

APLICAÇÃO DE FUZZY QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT PARA SELEÇÃO DE INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA UTILIZAÇÃO EM UM SOFTWARE DE GESTÃO DE ENERGIA

FUZZY QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT APPLICATION FOR ENERGY EFFICIENCY INDICATORS FOR APPLICATION IN AN ENERGY MANAGEMENT SOFTWARE

Eduardo Kazumi Yamakawa¹, Paulo Augusto Cauchick Miguel², Alexandre Rasi Aoki³

¹Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina, SC. E-mail: eduardo.yamakawa@gmail.com

²Professor do Curso de Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina, SC
E-mail: paulo.cauchick@ufsc.br

³Professor do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, PR. E-mail: aoki@lactec.org.br

RESUMO

A melhoria da eficiência energética gera impactos positivos para a sociedade e para meio ambiente. Uma das possibilidades relevantes para que exista um diagnóstico da eficiência energética é a utilização de Indicadores de Eficiência Energética (IEE). Esta utilização, apoiada por um *software* de gestão energética que utiliza os IEE, pode auxiliar uma concessionária de energia elétrica a criar programas de eficiência energética direcionados para setores pertinentes, onde os IEE evidenciem uma situação com oportunidades de melhoria. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo demonstrar uma análise bibliométrica e de conteúdo referente ao tema *Fuzzy QFD – Quality Function Deployment (FQFD)*, bem como um exemplo de aplicação, realizada por meio de uma simulação computacional, utilizando o FQFD para se obter a priorização de IEE como entrada para o desenvolvimento de um *software* de gestão de energia. O resultado da simulação mostrou ser possível obter a priorização dos IEE em uma situação onde os dados de entrada para o QFD foram apresentados como variáveis linguísticas e não como variáveis numéricas construindo-se uma oportunidade de utilizar a lógica *Fuzzy* em conjunto com o QFD.

Palavras-chave: QFD; Lógica Nebulosa; Gestão de Energia; *Fuzzy-QFD*; Indicadores de Eficiência Energética.

ABSTRACT

The energy efficiency improvement generates positive impacts on the society and environment. One of the possibilities to have a diagnosis of energy efficiency is the use of Energy Efficiency Indicators (EEI). This application, supported by energy management software that uses the EEI, may help an energy utility to create energy efficiency programs targeted to industry sectors where the EEI show a situation with opportunities for improvement. This article shows a bibliometric analysis and a content analysis regarding the subject *Fuzzy QFD – Quality Function Deployment (FQFD)* and an application through a computational simulation using the FQFD to achieve the prioritization of EEI as inputs for the development of energy management software. The simulation result showed that it is possible to achieve prioritization of EEI in a situation where the incoming data for QFD are introduced as linguistic variables rather than numeric variables, building up an opportunity to use *Fuzzy logic* in combination with QFD.

Keywords: QFD, *Fuzzy Logic*, Energy Management, *Fuzzy-QFD*, Energy Efficiency Indicators.

1 – INTRODUÇÃO

O *Quality Function Deployment (QFD)* ou desdobramento da função da qualidade é um método de desenvolvimento de produto importante, dedicado a traduzir os requisitos de clientes em atributos (especificações) de produtos e serviços (CARNEVALLI e CAUCHICK MIGUEL, 2008). No entanto, o QFD é um método subjetivo e dependente da síntese das opiniões dos clientes (CHEN, 2012). É necessário haver consistência e rastreabilidade no processo de traduzir os requisitos de clientes em especificações de engenharia, mas requisitos de clientes frequentemente não podem ser precisamente expressos numericamente. Algumas vezes os requisitos dos clientes são expressos vagamente causando uma situação onde é difícil definir uma priorização desses requisitos.

De acordo com Hisdal (1998), a Lógica Nebulosa, ou *Fuzzy*, pode lidar com informações inexatas e variáveis linguísticas em uma maneira matemática bem definida que simula o processo de informação em uma linguagem natural de comunicação. Bevilacqua; Ciarapica; Giacchetta, (2006) colocam, ainda, que expressões como “alta competição”, “baixa interferência”, “baixo impacto” ou “alta colaboração” são imprecisas e estes termos, em uma linguagem natural, correspondem a valores de variáveis verbais que representam conceitos linguísticos tais como “muito baixo”, “baixo”, “médio”, entre outros. Em função das limitações anteriormente citadas sobre o método QFD, sua utilização em conjunto com a lógica *Fuzzy* resulta em uma solução importante e útil para a avaliação das especificações de projeto em relação aos requisitos dos clientes mesmo que estes estejam verbalizados limitadamente em termos linguísticos.

Em um contexto de de eficiência energética, suas ações trazem vantagens e benefícios em três esferas (NOGUEIRA, 2007; PANESI, 2006; MCLEAN-CONNER, 2009): (i) para a sociedade, com a redução nos gastos com energia, o estado poderá ter mais recursos para investir em outros setores, tais como o social, bem como maior garantia de fornecimento de energia elétrica e de atendimento a novos consumidores no futuro; (ii) para o meio ambiente, em função de redução dos impactos ambientais associados à produção, distribuição, transformação e uso de energia elétrica; e (iii) para as organizações, pela melhoria do aproveitamento das instalações e equipamentos elétricos, causando uma redução das despesas diretas referente ao consumo ineficiente de energia, bem como pelos impactos positivos de marketing junto ao mercado. No contexto anterior discutido, o presente trabalho objetiva demonstrar a utilização do *Fuzzy QFD* para a seleção de indicadores de eficiência energética voltado para a aplicação em um *software* de gestão de eficiência energética. O trabalho é então dividido em sete seções, incluindo esta introdução. A segunda seção apresenta uma compilação de publicações sobre indicadores de eficiência energética, seguida pela terceira seção que traz o processo de análise da literatura baseado em bibliometria. Na quarta seção é apresentada uma análise de conteúdo de publicações relativas a aplicação de *Fuzzy QFD*, enquanto que na quinta seção é demonstrado um exemplo de aplicação do *Fuzzy QFD*. Finalmente, na sexta seção apresentam-se os resultados e discussão destes, seguidos pelas conclusões do trabalho na sétima seção.

2 – LITERATURA EM INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Em uma análise comparativa (*benchmarking*), os indicadores de eficiência energética (IEE) apresentam, um cenário passado, uma projeção futura ou um potencial para melhorar a eficiência energética do local (APER, 2000). Nesse contexto, este tópico é voltado para a apresentação de estudos que envolvem a eficiência energética, em ordem cronológica, conduzidos em vários países.

Worrel *et al.* (1997) apresentam um estudo onde o consumo de energia da indústria de ferro e aço é examinada em sete países (Brasil, China, França, Alemanha, Japão, Polônia e Estados Unidos) no período 1980-1991, utilizando uma análise de decomposição com base em indicadores físicos por tipo de processo e variedade de produtos. Os autores citados constataram que nos países industrializados, os indicadores de intensidade energética baseados em valor agregado geralmente refletem o consumo específico de energia melhor do que outros indicadores econômicos, apesar de grandes diferenças observadas entre os países.

Eichhammer e Mannsbart (1997) analisaram indicadores de energia na indústria de transformação europeia e estabeleceram o alcance e as limitações desse método, em geral, quando aplicado na prática, especialmente em processos de negociação. Foram analisados os efeitos estruturais específicos, bem como o

nível de detalhe necessário para corrigir todas as diferenças estruturais relevantes, a fim de aproximar os indicadores de eficiência de energia real. Por sua vez, Nanduri; Nyober; Jaccard (2002) utilizaram a abordagem de um indicador composto, que é um método para o cálculo de indicadores agregados de intensidade energética física para os setores de fabricação no Canadá e então compararam com outros métodos existentes de agregação.

Ang (2006) examinou alguns indicadores clássicos que eram frequentemente encontrados em estudos energéticos nacionais e internacionais em 1970 e 1980. Em seguida, o autor descreveu desenvolvimentos na ocasião para o uso da análise do índice de decomposição para propiciar um índice de eficiência energética composta de toda a economia baseada em uma abordagem *bottom-up*. A conclusão do autor foi que este índice composto era superior aos indicadores clássicos baseados em parâmetros econômicos e de eficiência energética ampla.

Hu e Wang (2006) apresentaram um trabalho sobre eficiência energética em 29 regiões administrativas da China para o período de 1995 a 2002, com um novo indicador que utiliza a análise envoltória de dados (*Data Envelopment Analysis-DEA*) para determinar o objetivo de entrada de energia para cada região da China para cada ano. O *Total Factor Energy Efficiency* (TFEE), ou fator total de eficiência energética, divide a meta de entrada de energia pela entrada de energia real. Na proposta desenvolvida, o capital social, o consumo de energia, e a área total semeada de culturas agrícolas utilizadas como substituto da energia da biomassa foram as quatro entradas consideradas e o PIB é a única saída.

Ramírez *et al.* (2006) desenvolveram indicadores para monitorar a evolução da eficiência energética na indústria de alimentos e tabaco com base em dados de produção das empresas, fornecidos pelo escritório de estatísticas da Holanda. O principal indicador para medir a eficiência energética foi o consumo específico de energia agregada. Neelis *et al.* (2007) estudaram as tendências de eficiência energética na indústria de fabricação holandesa entre 1995 e 2003 por meio de indicadores com base em dados públicos de produção física e de dados de consumo de energia específicos. Estimaram-se melhorias anuais de eficiência energética primária, no período estudado, de 1,3 % em média, com os subsetores individuais variando entre 0,1 % e 1,5 %.

Schenk e Moll (2007) desenvolveram um trabalho que mostrou que os indicadores físicos fornecem informações adicionais na análise de cenários. O uso de indicadores físicos, em vez de indicadores monetários, parece afetar os cenários de energia significativamente. As diferenças em relação aos indicadores monetários são maiores em regiões em desenvolvimento do que em regiões da OCDE. Concluiu-se que uma abordagem de energia e materiais integrados revela desenvolvimentos que são pouco visíveis por meio de uma abordagem monetária. Além disso, o trabalho demonstrou o potencial e os benefícios do uso de indicadores físicos para o desenvolvimento de cenários.

Wu *et al.* (2007) desenvolveram um trabalho que utilizou a expansão da série de Taylor para desenvolver um modelo de estrutura para indicadores de eficiência

energética (EEI), para o setor produtivo industrial em Taiwan. O índice de utilização da capacidade de produção e o índice de variação de utilização de energia foram formulados no modelo para descrever as diferenças entre EEI. Por meio da análise estrutural, o modelo mostrou que, enquanto o desempenho do EEI é proporcional ao índice da capacidade de utilização do processo de produção, é possível que a energia pode desenvolver-se num sentido oposto ao do EEI. Uma fábrica de aço de alta intensidade energética foi escolhida para mostrar a aplicação do modelo.

Zhou; Ang; Poh (2007) propuseram uma abordagem de programação matemática para a construção de indicadores compostos (*composite indicators* – IC). Os IC têm sido utilizados como uma ferramenta de monitoramento de desempenho, *benchmarking*, análise de políticas e comunicação pública em vários campos. Constatou-se que a utilização de um IC depende muito dos métodos de ponderação e agregação subjacentes. Boyd; Dutrow; Tunnessen (2008) apresentaram o indicador de desempenho energético (*Energy Performance Indicator* – EPI), que é uma ferramenta de *benchmarking* estatística que fornece uma visão geral do consumo de energia específica do setor por meio de uma relação entre o nível de consumo de energia e das várias atividades de produção, da qualidade da entrada de material e de fatores externos como, por exemplo, variações climáticas. Martínez (2009) descreveu o desenvolvimento da eficiência energética em setores industriais alemães e colombianos entre 1998 e 2005. O desempenho do setor industrial é analisado em termos de intensidade de energia, valor da produção, valor agregado, fontes de combustível e custos da energia.

Salta; Polatidis; Haralambopoulos (2009) desenvolveram uma estrutura metodológica *bottom-up*. Esta estrutura foi aplicada a subsetores industriais selecionados (produtos alimentares, bebidas e tabaco, ferro e aço, metais não ferrosos, minerais não metálicos e de papel) na Grécia no período 1985-2002. Dados físicos foram agregados de acordo com o seu consumo específico de energia (*Specific Energy Consumption* – SEC). Os valores e indicadores de eficiência energética físicos foram estimados. Chang e Hu (2010) elaboraram um trabalho que apresentou um “índice de variação total dos fatores da produtividade de energia (TFEPI)”, com base no conceito de fatores de eficiência energética e do índice de produtividade Luenberger para avaliar a evolução da produtividade de energia em regiões na China, resultando em um quadro geral dos fatores. Os fatores que afetaram TFEPI foram: (i) A parte ocidental tem uma TFEPI maior do que a área central e oriental; (ii) o aumento do estado de desenvolvimento e participação do consumo de energia pode melhorar o desempenho TFEPI da região, enquanto o aumento da proporção do PIB gerado pela indústria secundária deteriora TFEPI em uma dada região do país.

Palamutcu (2010) apresentou o consumo específico de energia, considerando os valores reais e estimados (*Specific Energy Consumption* – SEC) de energia elétrica calculada na fase de processamento de algodão têxtil (fição, tecelagem, processamento úmido e fabricação de vestuário). O autor constatou que o consumo real de

energia elétrica por unidade de produto têxtil na Turquia é maior do que o consumo estimado de energia elétrica por unidade de produto têxtil de cada estágio de processamento envolvido têxteis.

Pérez-Lombard *et al.* (2012) desenvolveram um método para construir os indicadores de eficiência energética (*Energy Efficiency Indicators* - EEI) aplicados para sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (*heat, ventilation and air conditioning* – HVAC), incluindo uma nova maneira de medir a eficiência da energia térmica destes tipos de sistemas.

Wang *et al.* (2012) apresentaram um estudo da estrutura do índice de fator total de eficiência energética, utilizado para determinar as diferenças de eficiência energética no setor industrial chinês com base nos dados estatísticos de empresas industriais em 30 províncias no período de 2005-2009. Os dados estatísticos utilizados como valores de entrada foram: a produção industrial bruta, o valor da produção e consumo de energia, equilíbrio médio remanescente de bens de capital e valor médio da força de trabalho. Os resultados mostraram que há espaço para a China para melhorar a sua eficiência energética, especialmente nas províncias ocidentais. Com base nos resultados foram discutidas algumas implicações políticas sobre a melhoria da eficiência energética, especialmente para regiões economicamente menos desenvolvidas na China.

Em suma, foram encontrados na literatura diversos tipos de indicadores: físicos, monetários, compostos, agregados e clássicos, com abordagens *bottom-up* e *top-down*. Em geral, os indicadores são utilizados para monitorar a situação e a evolução da eficiência energética nos contextos estudados. Nas situações descritas, onde os mesmos foram utilizados para definir metas de economia e fazer o acompanhamento, houve resultados positivos.

3 – BUSCA BIBLIOGRÁFICA e BIBLIOMETRIA SOBRE FUZZY QFD

Para o presente trabalho, na busca bibliográfica, foram adotadas as seguintes bases de dados: *Web of Science*, *Science Direct Online*, *Scopus*, *SciELO (Scientific Electronic Library Online)*, *IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)*, *Emerald*, e *Google Acadêmico*. Para a realização das consultas às bases de dados citadas, as palavras chave “QFD” e “*Quality Function Deployment*” combinadas com a palavra chave “*Fuzzy*” foram utilizadas. Na busca realizada não se utilizou recorte temporal, sendo que os artigos encontrados compreendiam o período de 1996 a 2012. Foram utilizados apenas publicações em periódicos, pois estas passam por processos de seleção e avaliação com rigorosos critérios de avaliação, se comparados com congressos e outros eventos. Na Tabela 1 é apresentado o resultado da busca bibliográfica nas bases de dados citadas.

Tabela 1 – Resultado das buscas de artigos nas bases de dados

Base de Dados	Quantidade	Duplicados	Sem Duplicados
Web of Science	77	0	77
Scopus	222	11	211
Emerald	30	9	21
IEEE	2	0	2
SciELO	0	0	0
Google Acadêmico	10	0	11
TOTAL:	342	20	322

Fonte: Elaborado pelos autores com base na busca e organização bibliográfica

Comparando-se os artigos localizados em todas as bases de dados, foi possível localizar mais de 85 artigos duplicados, resultando em um total de 237 publicações. A quantidade de citações que estes artigos possuíam, no período da busca, foi de 5.393 citações. Os 54 artigos com 25 ou mais citações representaram 80 % do total de citações (4.314 citações). Dessas 54 publicações foi possível obter o texto completo de 39, que tiveram seus conteúdos analisados. Os artigos analisados foram: Kahraman; Ertay; Buyukozan (2006); Kwong; Bai (2002); Kim (2005); Chan; Wu (2005); Temponi; Yen; Tiao (1999); Tang (2002); Chen; Weng (2006); Vivianne; Hefin (2000); Bevilacqua; Ciarapica; Giachetta (2006); Shen; Tan; Xie (2001); Han (2001); Sohn; Choi (2001); Karsak (2004); Zhou (1998); Fung; Chen; Tang (2006); Erol; Ferrell (2003); Bottani; Rizzi (2006); Buyukozkan *et al.* (2004); Yang (2003); Chen; Fung; Tang (2006); Chen; Weng (2003); Karsak; Ozogul (2009); Buyukozkan; Feyzio (2005); Lee; Sheu; Tsou (2008); Buyukozkan; Feyzio; Ruan (2007); Kwong (2007); Carnevalli; Miguel (2008); Fung; Law; Ip (1999); Georg; Sixten (2003); Pramod (2006); Ramasamy; Selladurai (2004); Chen; Ko (2009); Zhang; Chu (2009); Lai (2008); Amin; Razmi (2009); Bottani (2009); Chen; Ko (2008); Killen; Mike; Hunt (2005) e Celik (2009). Os quinze autores que mais se destacaram com relação a quantidade de citações e número de artigos são apresentados, respectivamente, nas Figura 1 e Figura 2. Os autores Buyukozkan; Tang; Fung; Chen; Kwong; Karsak, E. E. e Chen, L. J. são listados tanto entre os quinze autores mais citados quanto entre os quinze autores com maior quantidade de artigos por autor.

Figura 1 – Quantidade de citações por autor considerando-se os quinze autores com mais citações

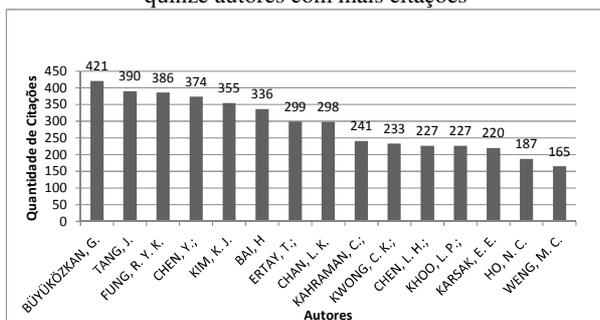
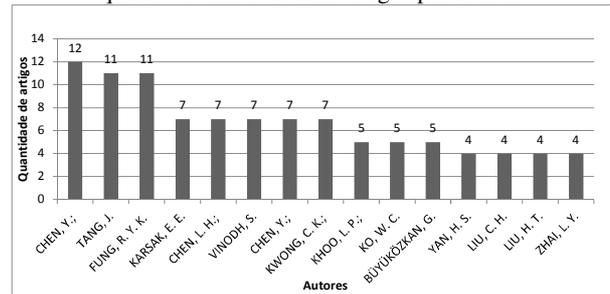
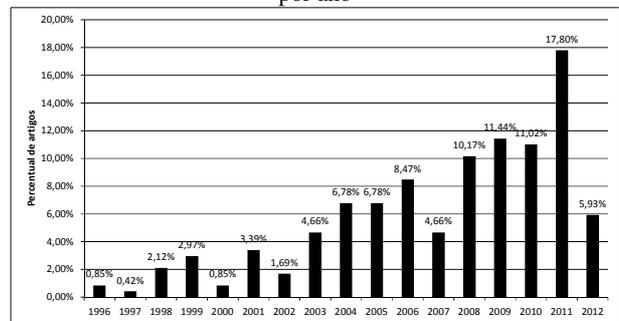


Figura 2 – Quantidade de artigos por autor considerando-se os quinze autores com mais artigos publicados



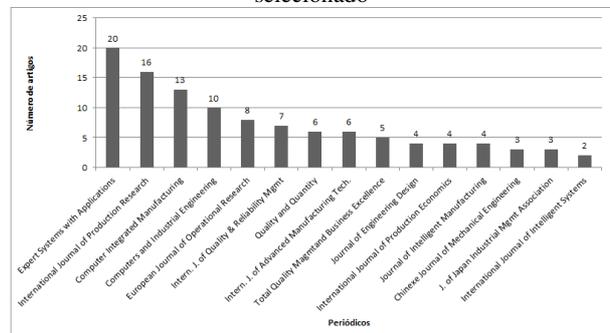
Na Figura 3 é apresentada uma distribuição percentual dos artigos por ano, onde verifica-se um aumento na quantidade de publicações no tema a partir de 2008. Como a busca bibliográfica foi realizada em agosto de 2012, a quantidade de artigos publicados foi parcial para aquele ano.

Figura 3 – Distribuição percentual da quantidade total de artigos por ano



Na Figura 4 são apresentados os quinze periódicos com maior quantidade de artigos publicados no tema e a quantidade de artigos por periódico no grupo de artigos. Como pode ser visto, os periódicos com mais publicações no tema são: *Expert Systems Applications*, *International Journal of Production Research* e *Computer Integrated Manufacturing*.

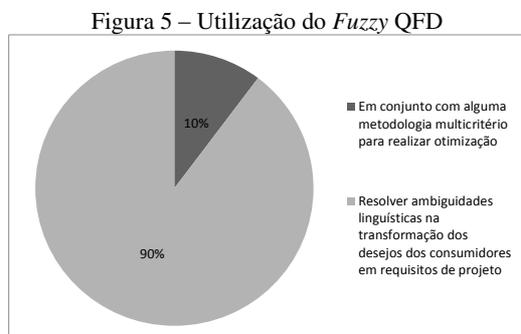
Figura 4 – Quantidade de artigos por periódico no grupo selecionado



4 – ANÁLISE DE CONTEÚDO DOS ARTIGOS SOBRE FUZZY QFD

Nesta seção é apresentada uma análise dos conteúdos dos 39 artigos do grupo selecionado. Na Figura 5 é apresentada uma distribuição percentual quanto ao uso do *Fuzzy QFD*

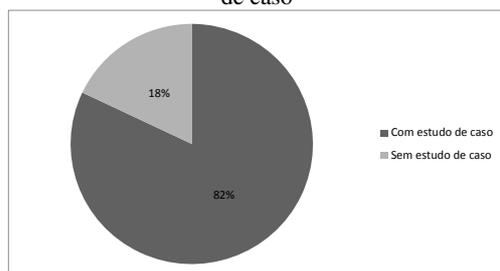
nos artigos analisados. Consta-se que na maioria dos casos, o Fuzzy QFD é utilizado para resolver ambiguidades linguísticas na transformação das necessidades dos clientes em requisitos/atributos de projeto e, na menor parte dos casos, é utilizado em conjunto com alguma metodologia multicritério para realizar algum tipo de otimização.



Na

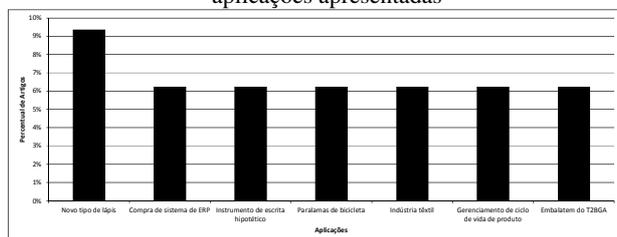
Figura 6 é mostrada a distribuição de artigos quanto a existência de estudo de caso (aplicação) descrito nas publicações. Como pode ser visto, na grande maioria havia um estudo de caso presente nos artigos.

Figura 6 – Distribuição de artigos quanto a existência de estudo de caso



Na Figura 7 são mostrados os sete principais tipos de aplicação do QFD encontrados nos artigos do grupo selecionado.

Figura 7 – Distribuição percentual dos artigos quanto as aplicações apresentadas



Na análise realizada não foi encontrada nenhuma aplicação envolvendo Fuzzy QFD no desenvolvimento de software para gestão de energia. Também não foi localizado nenhum artigo relacionado a indicadores de eficiência energética. Evidencia-se desta maneira uma oportunidade para demonstrar a aplicação do Fuzzy QFD aplicado a seleção de indicadores de eficiência energética para um software de gestão de energia.

5 – APLICAÇÃO DO FUZZY QFD EM GESTÃO DE ENERGIA

O exemplo de aplicação desenvolvido é parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento onde o cliente é a Companhia Paranaense de Energia – Copel e a entidade que está desenvolvendo o projeto é o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Lactec. O objetivo do projeto é obter a priorização dos indicadores de eficiência energética que serão implantados no software de gestão de energia que está sendo desenvolvido no âmbito do projeto. Os indicadores deverão ser priorizados segundo os requisitos da concessionária de energia, cliente do projeto.

A aplicação desenvolvida utilizou o QFD combinado com a lógica Fuzzy com o objetivo de realizar a avaliação dos indicadores de eficiência energética em relação aos requisitos dos consumidores, quando os mesmos são definidos de maneira linguística. Para Zadeh (1965), a lógica Fuzzy é uma classe de objetos com graus de pertinência contínuos; grande parte dos grupos de objetos no mundo real não possui um critério precisamente definido de pertinência.

A inferência Fuzzy é o processo de formular o mapeamento de uma dada entrada para uma saída utilizando lógica Fuzzy, cujas fases principais são “fuzzificação”, avaliação das regras, agregação e “defuzzificação”. O mapeamento dos resultados “defuzzificados” na situação do problema fornece a base onde decisões podem ser tomadas. Existem dois tipos de sistemas de inferência Fuzzy que podem ser implantados no Matlab: o modelo Mamdani e o modelo Sugeno. Esses dois modelos diferem na maneira em que a saída do sistema é determinada. O modelo Mamdani após o processo de agregação a função de pertinência de saída é um conjunto Fuzzy enquanto o modelo Sugeno utiliza um valor constante na função de pertinência de saída. Para o presente trabalho o modelo Mamdani foi escolhido, pois é necessário que a saída seja um conjunto Fuzzy, pois a saída também é definida em termos linguísticos. O processo de “fuzzificação” consiste em atribuir graus de pertinência entre 0 e 1 para as entradas “Grau de atendimento do indicador de eficiência energética (GRATIND)” e “Peso dos requisitos dos consumidores (PESREQ).

A etapa de avaliação das regras consiste em utilizar o valor Fuzzy obtido durante o processo de “fuzzificação” e avaliá-lo por meio da base de regras para obter o valor Fuzzy de saída. A avaliação das regras segue o padrão “se (condição 1) e (condição 2)” “então (resultado x)”. O uso de variáveis linguísticas e regras do tipo SE-ENTÃO utilizam a tolerância à imprecisão e incerteza de maneira similar ao cérebro humano para resumir dados e concentrar-se nas informações relevantes para a tomada de decisão.

O processo de “defuzzificação” consiste em combinar os valores Fuzzy obtidos da etapa de avaliação das regras. A saída com a priorização dos indicadores de eficiência energética (PRIOR) são avaliadas em relação ao valor específico e traduzidos em valores linguísticos.

Os requisitos dos consumidores foram informados pela concessionária de energia elétrica cliente e os graus de importância dos requisitos foram definidos em consenso entre os especialistas do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec) e da concessionária de energia elétrica. Na Tabela 2 são apresentados os requisitos de consumidores e seus respectivos pesos utilizando variáveis linguísticas.

Tabela 2 – Requisitos e seus respectivos pesos utilizando variáveis linguísticas

Requisitos dos consumidores	Pesos dos requisitos
Servir para diversos setores industriais (SDSI)	Muita Relevância (MUR)
Ter a visão por setor produtivo (TVSP)	Média Relevância (MER)
Subsidiar o planejamento energético do sistema de distribuição. (SPESD)	Muita Relevância (MUR)
Apontar maiores oportunidades de eficiência (AMOEF)	Pouca Relevância (POR)
Permitir <i>benchmarking</i> da indústria no seu setor (PBIS)	Média Relevância (MER)
Ser compatível a todos os consumidores industriais da COPEL (SCCIC)	Relevante (REL)

Tabela 4 é apresentada uma matriz de QFD contendo o grau de atendimento do indicador de eficiência energética (IEE) aos requisitos dos consumidores (RC) por meio de variáveis linguísticas.

Tabela 4 – Grau de atendimento dos indicadores de eficiência energética aos requisitos dos consumidores

IEE \ RC	Indicadores de Eficiência Energética										
	Consumo de Energia/Área Fabril (A)	Consumo de Energia/Receita (B)	Consumo de Energia/Número de funcionários (C)	Consumo de Energia/Potência Transformador de Entrada (D)	Consumo de Energia Reativa / Consumo de Energia (E)	% ambientes da produção com iluminação natural (F)	% de produtos produzidos com defeito (G)	kWh/quantidade de produtos refugados (H)	kWh/UPP de Produto Acabado (I)	Custo com energia / Produtos Produzidos (J)	
Servir para diversos setores industriais (SDSI)	APL	ATE	APL	APL	APL	ATE	NAT	NAT	APL	APL	
Ter a visão por setor produtivo (TVSP)	NAC	ATE	ATE	ATE	APL	NAT	ATE	APA	ATE	APL	
Subsidiar o planejamento energético do sistema de distribuição. (SPESD)	NAC	APL	NAC	APL	APL	NAC	NAC	NAC	APL	NAT	
Apontar maiores oportunidades de eficiência (AMOEF)	ATE	ATE	NAT	APL	APL	APL	NAC	NAC	APL	ATE	
Permitir <i>benchmarking</i> da indústria no seu setor (PBIS)	APL	APL	ATE	NAT	ATE	ATE	APL	APL	APL	APL	
Ser compatível a todos os consumidores industriais da COPEL (SCCIC)	APL	APL	APL	APL	APL	APL	APA	APA	APL	ATE	
Possibilitar a análise do potencial de eficiência (PAPE)	APA	NAT	NAT	APL	APL	APL	NAC	NAC	APL	NAT	
Sinalizar pontos de melhoria nos usos finais da instalação elétrica. (SPMUF)	APA	APA	NAT	ATE	ATE	APL	NAC	NAC	APL	NAT	

Fonte: Elaborado pelos autores com base na aplicação realizada.

Legenda: NAC: Não atende completamente; NAT: Não atende; APA: Atende parcialmente; ATE: Atende; APL: Atende plenamente

Na matriz de QFD apresentada na

Possibilitar a análise do potencial de eficiência (PAPE)	Média Relevância (MER)
Sinalizar pontos de melhoria nos usos finais da instalação elétrica (SPMUF)	Pouquíssima Relevância (PQR)

Fonte: Elaborado pelos autores com base na aplicação realizada

Na Tabela 3 são apresentados os indicadores de eficiência energética provenientes de um *brainstorming* os quais devem ser subsequentemente priorizados.

Tabela 3 – Conjunto de Indicadores

Indicadores de Eficiência Energética
Consumo de Energia/Área Fabril (A)
Consumo de Energia/Receita (B)
Consumo de Energia/Número de funcionários (C)
Consumo de Energia/Potência Transformador de Entrada (D)
Consumo de Energia Reativa / Consumo de Energia (E)
Percentual de ambientes da produção com iluminação natural (F)
Percentual de produtos produzidos com defeito (G)
kWh/quantidade de produtos refugados (H)
kWh/UPP de Produto Acabado (I)

Fonte: Elaborado pelos autores com base na aplicação realizada

Na

Tabela 4 não é utilizado o campo referente a comparação com concorrentes porque não existe produto similar no mercado que faça gestão energética baseado em indicadores de eficiência energética. Na Tabela 5 são explicitadas as regras de saída relacionando

cada situação de grau de atendimento do indicador de eficiência energética (GAIEE) com os graus de importância dos requisitos dos consumidores (GIRC).

Tabela 5 – Tabela de regras de saídas relacionando o grau de atendimento do indicador de eficiência energética com os graus de importância dos requisitos dos consumidores

GIRC \ GAIEE	Não Atende Completamente (NAC)	Não Atende (NAT)	Atende Parcialmente (APA)	Atende (ATE)	Atende Plenamente (APL)
Pouquíssimo Relevante (PQR)	MBA	MBA	MBA	BAI	MED
Pouco Relevante (POR)	MBA	MBA	BAI	BAI	MED
Média Relevância (MER)	MBA	BAI	BAI	MED	ALT
Relevante (RE)	BAI	BAI	MED	ALT	MAL
Muito Relevante (MUR)	BAI	MED	ALT	MAL	MAL

Fonte: Elaborado pelos autores com base na aplicação realizada.

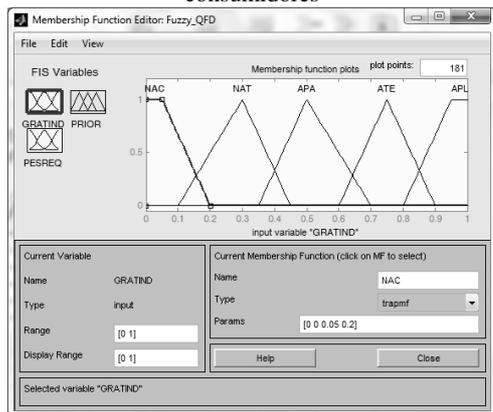
Legenda: MBA: Muito baixa; BAI: Baixa; MED: Média; ALT: Alta; MAL: Muito alta

A partir dos pesos dos requisitos dos consumidores apresentados na Tabela 2, do grau de atendimento dos

Tabela 4 e das regras de saída mostradas na .

realizaram-se simulações computacionais utilizando o *software* Matlab® e sua extensão para lógica *Fuzzy*. O sistema utilizado para a simulação possuía duas entradas sendo uma referente ao grau de atendimento dos indicadores de eficiência energética aos requisitos dos consumidores denominada GRATIND e outra referente aos pesos dos requisitos dos consumidores chamada de PESREQ. As regras de saída da simulação referentes a priorização dos indicadores foram denominadas PRIOR. Na Figura 8 é mostrada a representação gráfica das funções de pertinência para o grau de atendimento dos indicadores de eficiência energética aos requisitos dos consumidores.

Figura 8 – Funções de pertinência para grau de atendimento dos indicadores de eficiência energética aos requisitos dos consumidores



Na Tabela 6 são apresentados os valores das funções de pertinência para o grau de atendimento dos indicadores de eficiência energética aos requisitos dos consumidores.

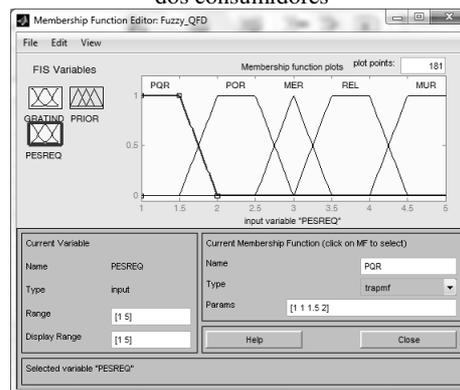
indicadores de eficiência energética aos requisitos dos consumidores mostrados na

Tabela 6 – Funções de pertinência para grau de atendimento dos indicadores de eficiência energética aos requisitos dos consumidores

Definição	Tipo de Função de Pertinência	Função de Pertinência
Não Atende Completamente – NAC	Trapezoidal	[0, 0, 0.05, 0.2]
Não Atende – NAT	Triangular	[0.1, 0.3, 0.45]
Atende Parcialmente – APA	Triangular	[0.35, 0.5, 0.7]
Atende – ATE	Triangular	[0.6, 0.75, 0.9]
Atende Plenamente - APL	Trapezoidal	[0.8, 0.95, 1, 1]

Na Figura 9 são apresentadas as funções de pertinência para os pesos dos requisitos dos consumidores.

Figura 9 – Funções de pertinência para os pesos dos requisitos dos consumidores



Na Tabela 7 são mostrados os valores das funções de pertinência para os requisitos dos consumidores.

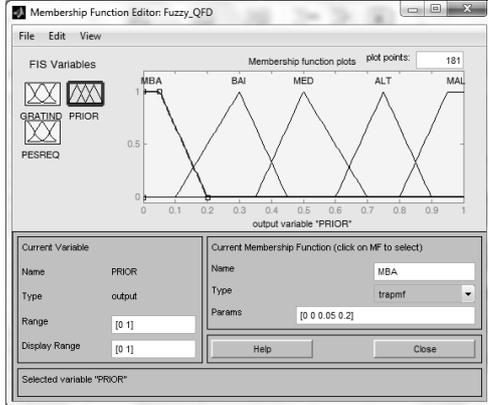
Tabela 7 – Funções de pertinência para pesos dos requisitos dos consumidores

Definição	Tipo de Função de Pertinência	Função de Pertinência
Pouquíssima Relevância – PQR	Trapezoidal	[1, 1, 1.5, 2]
Pouca Relevância – POR	Trapezoidal	[1.5, 2, 2.5, 3]
Média Relevância – MER	Triangular	[2.5, 3, 3.5]
Relevante – REL	Trapezoidal	[3, 3.5, 4, 4.5]
Muita Relevância - MUR	Trapezoidal	[4, 4.5, 5, 5]

Fonte: Elaborado pelos autores com base na aplicação realizada

Na Figura 10 são mostradas as funções de pertinência para as regras da saída do sistema para a construção da priorização dos indicadores.

Figura 10 – Funções de pertinência para as regras de saída do sistema para a construção da priorização dos indicadores



Na

Tabela 8 são mostrados os valores das funções de pertinência para as regras de saída do sistema para a construção da priorização dos indicadores.

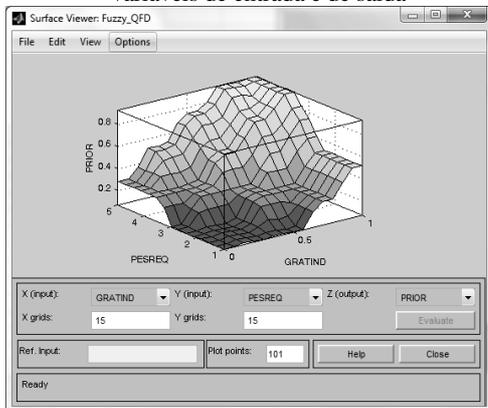
Tabela 8 – Funções de pertinência para as regras de saída do sistema para a construção da priorização dos indicadores

Definição	Tipo de Função de Pertinência	Função de Pertinência
Pouquíssima Relevância – PQR	Trapezoidal	[1, 1, 1.5, 2]
Pouca Relevância – POR	Trapezoidal	[1.5, 2, 2.5, 3]
Média Relevância – MER	Triangular	[2.5, 3, 3.5]
Relevante – REL	Trapezoidal	[3, 3.5, 4, 4.5]
Muita Relevância - MUR	Trapezoidal	[4, 4.5, 5, 5]

Fonte: Elaborado pelos autores com base na aplicação realizada

Na Figura 11 é apresentada uma superfície em 3 dimensões formada pelas variáveis de entrada e saída. Verifica-se que a prioridade maior ocorre quando o grau de atendimento do indicador de eficiência energética (GRATIND) e o peso do requisito do consumidor (PESREQ) estão com seus valores nos pontos máximos.

Figura 11 – Superfície em 3 dimensões formada pelas variáveis de entrada e de saída

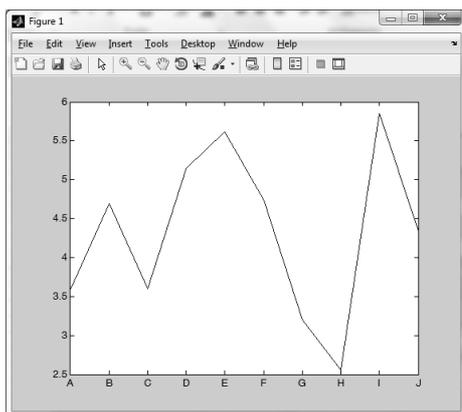


6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da simulação computacional pode ser observado nas Figura 12 e na Tabela 9 onde a priorização dos indicadores de eficiência energética (IEE) é apresentada. Analisando-se as prioridades obtidas pelos IEE após a simulação nota-se que os indicadores priorizados em primeiro (kWh/Unidade Padrão de Produção UPP de Produto Acabado), segundo (Consumo de Energia Reativa/Consumo de Energia) e terceiro (Consumo de Energia/Potência Transformador de Entrada) atendem os requisitos do cliente apontados como muito relevantes que são: “Servir para diversos setores industriais” e “Subsidiar o planejamento energético do sistema de distribuição”. O indicador “kWh/Unidade Padrão de Produção de Produto Acabado” fornece a informação de quanta energia está sendo utilizada para fabricar uma unidade padrão de produção de produto acabado e por meio deste indicador é possível comparar clientes com a mesma atividade fim e também atende a diversos setores industriais. Com esta informação a concessionária pode saber como está a eficiência energética geral para cada setor e para cada cliente auxiliando no planejamento energético do sistema de distribuição. O indicador “Consumo de Energia Reativa/Consumo de Energia” mostra como está o equilíbrio entre o consumo de energia reativa e energia ativa e permite a concessionária avaliar alguns parâmetros de qualidade de energia, sendo que este IEE também serve para diversos setores industriais e subsidia o planejamento do sistema de distribuição permitindo organizar ações futuras para a compensação de energia reativa da rede. O indicador “Consumo de Energia/Potência do Transformador de Entrada” permite avaliar o fator de carregamento da instalação evidenciando subutilização ou sobreutilização das instalações. Caso o sistema esteja com baixo fator de carregamento a eficiência energética de dispositivos como transformadores e motores elétricos é menor do que quando operam com carga nominal. Este indicador também pode ser utilizado para diversos setores industriais e pode contribuir no planejamento energético do sistema de distribuição fornecendo dados típicos de carregamento das indústrias o que auxilia no cálculo da expansão do sistema.

Na Figura 12 é apresentada a priorização dos indicadores de eficiência energética.

Figura 12 – Representação gráfica da saída da simulação indicando a priorização dos indicadores de eficiência energética



Na Tabela 9 é transcrito o resultado da simulação computacional mostrado na Figura 12 mostrando a priorização dos indicadores de eficiência energética.

Tabela 9 – Priorização dos indicadores de eficiência energética

Indicador de Eficiência Energética	Priorização
kWh/UPP de Produto Acabado (I)	1
Consumo de Energia Reativa / Consumo de Energia (E)	2
Consumo de Energia / Potência Transformador de Entrada (D)	3
Percentual de ambientes da produção com iluminação natural (F)	4
Consumo de Energia/Receita (B)	5
Custo com energia / Produtos Produzidos (J)	6
Consumo de Energia/Área Fabril (A)	7
Consumo de Energia/Número de funcionários (C)	7
Percentual de produtos produzidos com defeito (G)	8
kWh/quantidade de produtos refugados (H)	9

Fonte: Elaborado pelos autores com base na aplicação realizada.

Finalmente, cabe reforçar que na análise bibliométrica foi possível localizar os autores de destaque dentro do acervo bibliográfico, bem como os periódicos com mais publicações. As aplicações para o *Fuzzy QFD* encontradas nos artigos analisados vão desde as mais simples como o projeto de um lápis até mais sofisticadas como projetos de automóveis e máquinas de embalar dinamite. Algumas aplicações de *Fuzzy QFD* aliam outras técnicas como ANP e também o AHP e outras metodologias multicritério para dar suporte a decisão e também mostraram que podem trabalhar juntas na resolução de questões envolvendo múltiplos critérios.

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, foi possível obter uma priorização de indicadores de eficiência energética utilizando o *Fuzzy QFD* por meio do *software* Matlab® onde as relações entre os requisitos de consumidores e os indicadores de eficiência energética foram descritos por meio de variáveis linguísticas. A aplicação simulada

desenvolvida no presente trabalho é distinta das encontradas em outras publicações, tanto quanto a aplicação (indicadores de eficiência energética) quanto na maneira de implantar. Como se tratou de um produto sem similar no mercado não utilizou-se a comparação com concorrentes como elemento de cálculo.

As variáveis linguísticas que descrevem as relações entre os requisitos de consumidores e os indicadores de eficiência energética foram definidas em consenso entre os especialistas do instituto de pesquisa e os clientes da concessionária de energia elétrica. A análise dos artigos demonstrou que a Lógica Nebulosa (ou Fuzzy) é bastante útil para se traduzir as variáveis linguísticas das expectativas dos clientes em requisitos de projetos, pois é similar aos fenômenos da natureza onde os estados não são fixos com apenas uma característica, mas são compostos de várias características em conjunto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia Paranaense de Energia – COPEL, que é o cliente do projeto de pesquisa e desenvolvimento, à Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, pelo financiamento do projeto e ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, que executa o projeto de pesquisa e desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- AMIN, S. H.; RAZMI, J. An integrated fuzzy model for supplier management: A case study of ISP selection and evaluation. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 4, p. 8639-8648, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2008.10.012>.
- ANG, B. W. Monitoring changes in economy-wide energy efficiency: From energy-GDP ratio to composite efficiency index. **Energy Policy**, v. 34, n. 5, p. 574-582, 2006.
- APERC – ASIA PACIFIC ENERGY RESEARCH CENTRE. Energy efficiency indicators: A study of energy efficiency indicators for industry. In **APERC economies**. Tokyo, 2000.
- BEVILACQUA, M.; CIARAPICA, F. E.; GIACCHETTA, G. A fuzzy-QFD approach to supplier selection. **Journal of Purchasing and Supply Management**, v. 12, n. 1, p. 14-27, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pursup.2006.02.001>.
- BOTTANI, E. A fuzzy QFD approach to achieve agility. **International Journal of Production Economics**, v. 119, n. 2, p. 380-391, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.02.013>.
- BOTTANI, E.; RIZZI, A. Strategic management of logistics service: A fuzzy QFD approach. **International Journal of Production Economics**, v. 103, n. 2, p. 585-599, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.11.006>.
- BOYD, G.; DUTROW, E.; TUNNESSEN, W. The evolution of the Energy Star® energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 6, p. 709-715, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.02.024>.
- BÜYÜKÖZKAN, G.; ERTAY, T.; KAHRAMAN, C.; RUAN, D. Determining the importance weights for the design requirements in the house of quality using the fuzzy analytic network approach. **International Journal of Intelligent Systems**, v. 19, n. 5, p. 443-461, 2004. <http://dx.doi.org/10.1002/int.20006>.
- BÜYÜKÖZKAN, G.; FEYZIOLU, O. Group decision making to better respond customer needs in software development.

- Computers and Industrial Engineering**, v. 48, n. 2, p. 427-441, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2005.01.007>.
- CARNEVALLI, J. A.; CAUCHICK MIGUEL, P.A. Review, analysis and classification of the literature on QFD - Types of research, difficulties and benefits. **International Journal of Production Economics**, v. 114, n. 2, p. 737-754, Aug., 2008.
- CELIK, M.; CEBI, S.; KAHRAMAN, C.; DEHA ER, I. An integrated fuzzy QFD model proposal on routing of shipping investment decisions in crude oil tanker market. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 3, p. 6227-6235, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2008.07.031>.
- CHAN, L. K.; WU, M. L. A systematic approach to quality function deployment with a full illustrative example. **Omega**, v. 33, n. 2, p. 119-139, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2004.03.010>.
- CHANG, T. P.; HU, J. L. Total-factor energy productivity growth, technical progress, and efficiency change: An empirical study of China. **Applied Energy**, v. 87, n. 10, p. 3262-3270, 2010.
- CHEN, C. W. Modeling and initiating knowledge management program using FQFD: A case study involving a healthcare institute. **Quality and Quantity**, v. 46, n. 3, p. 889-915, 2012.
- CHEN, L. H.; WENG, M. C. An evaluation approach to engineering design in QFD processes using fuzzy goal programming models. **European Journal of Operational Research**, v. 172, n. 1, p. 230-248, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2004.10.004>.
- CHEN, L. H.; KO, W. C. A fuzzy nonlinear model for quality function deployment considering Kano's concept. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 48, n. 3-4, p. 581-593, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mcm.2007.06.029>.
- CHEN, L. H.; KO, W. C. Fuzzy linear programming models for new product design using QFD with FMEA. **Applied Mathematical Modelling**, v. 33, n. 2, p. 633-647, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2007.11.029>.
- CHEN, Y.; FUNG, R. Y. K.; TANG, J. Rating technical attributes in fuzzy QFD by integrating fuzzy weighted average method and fuzzy expected value operator. **European Journal of Operational Research**, v. 174, n. 3, p. 1553-1566, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2004.12.026>.
- EICHHAMMER, W.; MANNSBART, W. Indicators for a European cross-country comparison of energy efficiency in the manufacturing industry. **Energy Policy**, v. 25, p. 759-772, 1997.
- EROL, I.; FERRELL JR., W. G. A methodology for selection problems with multiple, conflicting objectives and both qualitative and quantitative criteria. **International Journal of Production Economics**, v. 86, n. 3, p. 187-199, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00049-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00049-5).
- FUNG, R. Y. K.; CHEN, Y.; TANG, J. Estimating the functional relationships for quality function deployment under uncertainties. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 157, n. 1, p. 98-120, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fss.2005.05.032>.
- FUNG, R. Y. K.; LAW, D. S. T.; IP, W. H. Design targets determination for inter-dependent product attributes in QFD using fuzzy inference. **Integrated Manufacturing Systems**, v. 10, n. 6, p. 376-383, 1999. <http://dx.doi.org/10.1108/09576069910293040>.
- GEORG, H.; SIXTEN, S. The leading edge in QFD for software and electronic business. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 20, n. 1, p. 36-55, 2003.
- HAN, S. B.; CHEN, S. K.; EBRAHIMPOUR, M.; SODHIM N. S. A conceptual QFD planning model. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 18, n. 8, p. 796-812, 2001. <http://dx.doi.org/10.1108/02656710110401187>.
- HISDAL, E. The philosophical issues raised by fuzzy set theory. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 25, n. 3, p. 349-356, 1988.
- HU, J. L.; WANG, S. C. Total-factor energy efficiency of regions in China. **Energy Policy**, v. 34, n. 17, p. 3206-3217, 2006.
- KAHRAMAN, C.; ERTAY, T.; BUYUKOZKAN, G. A fuzzy optimization model for QFD planning process using analytic network approach. **European Journal of Operational Research**, v. 171, n. 2, p. 390-411, 2006. ISSN 0377-2217.
- KARSAK, E. E. Fuzzy multiple objective programming framework to prioritize design requirements in quality function deployment. **Computers and Industrial Engineering**, v. 47, n. 2-3, p. 149-163, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2004.06.001>.
- KARSAK, E. E.; ÖZOGUL, C. O. An integrated decision making approach for ERP system selection. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 1, p. 660-667, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2007.09.016>.
- KILLEN, C. P.; MIKE, W.; HUNT, R. Strategic planning using QFD. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 22, n. 1, p. 17-29, 2005. ISSN 0265-671X.
- KIM, K.-J.; MOSKOWITZ, H.; DHINGRAC, A.; EVANS, G. Fuzzy multicriteria models for quality function deployment. **European Journal of Operational Research**, v. 121, n. 3, p. 504-518, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00048-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00048-X).
- KWONG, C. K.; BAI, H. A fuzzy AHP approach to the determination of importance weights of customer requirements in quality function deployment. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 13, n. 5, p. 367-377, 2002. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1019984626631>.
- LAI, X.; XIE, M.; TAN, K.-C.; YANG, B. Ranking of customer requirements in a competitive environment. **Computers and Industrial Engineering**, v. 54, n. 2, p. 202-214, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.042>.
- LEE, Y. C.; SHEU, L. C.; TSOU, Y. G. Quality function deployment implementation based on Fuzzy Kano model: An application in PLM system. **Computers and Industrial Engineering**, v. 55, n. 1, p. 48-63, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2007.11.014>.
- MARTÍNEZ, C. I. P. Energy efficiency developments in the manufacturing industries of Germany and Colombia, 1998-2005. **Energy for Sustainable Development**, v. 13, n. 3, p. 189-201, 2009.
- MCLEAN-CONNER, P. **Energy Efficiency: Principles and Practices**. Tulsa, Oklahoma (EUA): PennWell Corporation, 2009, 194 p.
- NANDURI, M.; NYOBER, J.; JACCARD, M. Aggregating physical intensity indicators: results of applying the composite indicator approach to the canadian industrial sector. **Energy Policy**, v. 30, p. 151-163, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00083-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00083-0).
- NEELIS, M.; RAMIREZ-RAMIREZ, A.; PATEL, M.; FARLA, J.; BOONEKAMP, P.; BLOK, K. Energy efficiency developments in the Dutch energy-intensive manufacturing industry, 1980-2003. **Energy Policy**, v. 35, n. 12, p. 6112-6131, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.06.014>.
- NOGUEIRA, F. H. F. M. Política de ação: Eficiência Energética. **Secretaria de estado de planejamento e gestão**. Governo do Estado do Rio de Janeiro, RJ, 2007.
- PALAMUTCU, S. Electric energy consumption in the cotton textile processing stages. **Energy**, v. 35, n. 7, p. 2945-2952, 2010.
- PANESI, A. R. Quinteros. **Eficiência Energética: Industrial, Comercial e Residencial**. São Paulo: Ensino Profissional, 2006, 189 p.
- PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; MAESTRE, I. R.; CORONEL, J. F. Constructing HVAC energy efficiency indicators. **Energy and Buildings**, v. 47, p. 619-629, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.039>.
- PRAMOD, V. R.; DEVADASAN, S. R.; MUTHU, V. P.; MOORTHY, G. D. Integrating TPM and QFD for improving

- quality in maintenance engineering. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 12, n. 2, p. 150-171, 2006. <http://dx.doi.org/10.1108/13552510610667174>.
- RAMASAMY, N. R.; SELLADURAI, V. Fuzzy logic approach to prioritise engineering characteristics in quality function deployment (FL-QFD). **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 21, n. 9, p. 1012-1023, 2004. ISSN 0265-671X.
- RAMÍREZ, C. A.; BLOK, K.; NEELIS, M.; PATEL, M. Adding apples and oranges: The monitoring of energy efficiency in the Dutch food industry. **Energy Policy**, v. 34, n. 14, p. 1720-1735, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2005.01.014>.
- SALTA, M.; POLATIDIS, H.; HARALAMBOPOULOS, D. Energy use in the Greek manufacturing sector: A methodological framework based on physical indicators with aggregation and decomposition analysis. **Energy**, v. 34, n. 1, p. 90-111, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2008.10.006>.
- SCHENK, N. J.; MOLL, H. C. The use of physical indicators for industrial energy demand scenarios. **Ecological Economics**, v. 63, n. 2-3, p. 521-535, 2007.
- SHEN, X. X.; TAN, K. C.; XIE, M. The implementation of quality function deployment based on linguistic data. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 12, n. 1, p. 65-75, 2001. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008955630880>.
- SOHN, S. Y.; CHOI, I. S. Fuzzy QFD for supply chain management with reliability consideration. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 72, n. 3, p. 327-334, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00022-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00022-9).
- TANG, J.; FUNG, R. Y. K.; XU, B.; WANG, D. A new approach to quality function deployment planning with financial consideration. **Computers and Operations Research**, v. 29, n. 11, p. 1447-1463, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548\(01\)00041-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548(01)00041-7).
- TEMPONI, C.; YEN, J.; TIAO, W. A. House of quality: A fuzzy logic-based requirements analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 117, n. 2, p. 340-354, 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00275-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00275-6).
- VIVIANNE, B.; HEFIN, R. Methods and techniques to help quality function deployment (QFD). **Benchmarking: An International Journal**, v. 7, n. 1, p. 8-20, 2000. ISSN 1463-5771.
- WANG, Z.-H.; ZENG, H.; WEI, Y.; ZHANG, Y. Regional total factor energy efficiency: An empirical analysis of industrial sector in China. **Applied Energy**, v. 97, p. 115-123, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.071>.
- WORREL, E.; PRINCE, L.; MARTIN, N.; FARLA, J.; SCHAEFFER, R. Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators. **Energy Policy**, v. 25, n. 7-9, p. 727-744, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215\(97\)00064-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215(97)00064-5).
- WU, L.-M.; CHEN, B.; BOR, Y.; WU, Y. Structure model of energy efficiency indicators and applications. **Energy Policy**, v. 35, n. 7, p. 3768-3777, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.01.007>.
- YANG, Y. Q.; WANG, S. Q.; DULAIMI, M.; LOW, S. P. A fuzzy quality function deployment system for buildable design decision-makings. **Automation in Construction**, v. 12, n. 4, p. 381-393, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0926-5805\(03\)00002-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-5805(03)00002-5).
- ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338-353, 1965.
- ZHANG, Z.; CHU, X. Fuzzy group decision-making for multi-format and multi-granularity linguistic judgments in quality function deployment. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 5, p. 9150-9158, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2008.12.027>.
- ZHOU, M. Fuzzy logic and optimization models for implementing QFD. **Computers and Industrial Engineering**, v. 35, n. 1-4, p. 237-240, 1998. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352\(98\)00073-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352(98)00073-4).
- ZHOU, P.; ANG, B. W.; POH, K. L. A mathematical programming approach to constructing composite indicators. **Ecological Economics**, v. 62, n. 2, p. 291-297, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.12.020>.