

O MÉTODO FUZZY AHP APLICADO À ANÁLISE DE RISCOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS EM FASE DE CONSTRUÇÃO

Carla Guarino Linhares

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Athos de Silveira Ramos, 149 – Sala F.101 – Cidade Universitária – Rio de Janeiro - RJ
carlag.linhares@gmail.com

Clarissa Taciana Gabriel Gussen

Universidade Federal do Rio de Janeiro - Coppead
Av. Athos de Silveira Ramos, 149 – Sala F.101 – Cidade Universitária – Rio de Janeiro - RJ
clarissatgg@gmail.com

José Roberto Ribas

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Athos de Silveira Ramos, 149 – Sala F.101 – Cidade Universitária – Rio de Janeiro - RJ
ribas@poli.ufrj.br

RESUMO

As construções de Usinas Hidrelétricas são muito frequentes no Brasil e, por se tratarem de empreendimentos complexos e custosos, estão sujeitas a riscos de diversas naturezas com consequências relevantes. Nesse contexto, uma análise de riscos é essencial de modo a garantir a mitigação das perdas potenciais. A proposta desta pesquisa é de especificar um modelo para análise de riscos em uma usina hidrelétrica utilizando a metodologia *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP). O método em questão se propõe a hierarquizar um certo número de riscos identificados previamente, considerando o julgamento de especialistas frente às incertezas inerentes a esse processo decisório.

Palavras-chave: FAHP, Análise de Riscos, Usinas Hidrelétricas.

Área principal: ADM, EN.

ABSTRACT

Power plant constructions are very frequent in Brazil and, due to their complexity and high costs, such projects are subject to a wide range of risks coming from different sources, which consequences may be relevant. Therefore, risk analysis is essential to ensure that potential losses are mitigated. The main purpose of this research is to specify a risk analysis model for a hydroelectric power plant by means of a Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) method. This method aims at prioritize a number of risks that have been previously identified, in accommodating the inherent uncertainty of the decision process.

Key words: FAHP, Risks Analysis, Hydroelectric power plants.

Main area: ADM, EN.

1. Introdução

A análise multicritério é um instrumento de apoio à decisão que se baseia na abordagem de diversos critérios. Por integrar diferentes aspectos do processo decisório, essa vem sendo cada vez mais utilizada em análises de situações complexas.

Atualmente, há diversas técnicas de análise multicritério. O método *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP) é uma delas e tem se destacado por utilizar a lógica *Fuzzy* para tratar imprecisões inerentes ao processo decisório. Aplicações dessa metodologia são observadas em diversos estudos como, por exemplo, na seleção de alternativas de projeto e planejamento de edifícios públicos (Hsieh *et al.*, 2004), na avaliação de planos de gestão da água (Sredjevic e Medeiros, 2008), no desenvolvimento de sistema de seleção de pessoal (Güngör *et al.*, 2009) e na avaliação de desempenho de bancos indianos (Chatterjee *et al.*, 2010).

O artigo em questão desenvolve uma análise de riscos para uma Usina Hidrelétrica brasileira por meio do método FAHP, a qual faz parte de um projeto de P&D conduzido junto a Furnas Centrais Elétricas S/A denominado “Sistema de Gerenciamento de Riscos em Empreendimentos de Energia”.

Nesse contexto, a proposta da análise constitui na hierarquização dos riscos inerentes à fase de construção da Usina Hidrelétrica estudada, a fim de permitir uma melhor gestão dos mesmos por parte de Furnas.

2. A metodologia FAHP

A criação da técnica semiquantitativa FAHP, mencionada e explorada por Chang (1996), visou enriquecer a sua precedente, *Analytic Hierarchy Process* (AHP), desenvolvida pelo Professor Thomas Saaty.

O AHP é um método muito utilizado em tomada de decisões complexas. No entanto, problemáticas com crescentes níveis de dificuldade fazem com que a percepção humana adquira um papel relevante. Imprecisões e ambiguidades estão, assim, presentes em tais processos e não são tratadas pelo método AHP. Segundo Tang e Beynon (2005), é exatamente a existência de tais imprecisões e ambigüidades nas decisões que enfraquece o poder do AHP, abrindo espaço para a aplicação da lógica *Fuzzy* ao mesmo.

Saxena *et al.* (2010) também enfatizam o enfraquecimento do método AHP. Segundo eles, o mesmo parte do princípio de que o usuário do modelo possui informação completa sobre o assunto, o que, na realidade, raramente acontece. Em função disso, o FAHP se propõe a considerar essa realidade e admitir que os julgamentos são imprecisos. A lógica *Fuzzy* adquire, assim, papel importante no tratamento desse grau de imprecisão.

O método FAHP é baseado na definição de critérios e alternativas de escolha. Os critérios surgem a partir da decomposição do processo decisório em diferentes aspectos e são representados pelo vetor $C_n = (C_1, C_2, C_3, \dots, C_n)$. As alternativas de escolha, por seu lado, constituem as diferentes alternativas que serão analisadas e hierarquizadas pelo método FAHP no processo de tomada de decisão. Essas são representadas pelo vetor $A_n = (A_1, A_2, A_3, \dots, A_n)$. De acordo com Coyle (2004), tanto os critérios quanto as alternativas de escolha devem ser independentes entre si.

A primeira etapa do método consiste em comparações pareadas de todos os critérios. Tais comparações permitirão a atribuição de pesos aos critérios definidos e a conseqüente verificação de quais aspectos do processo decisório são mais relevantes. Em seguida, serão realizadas comparações pareadas das alternativas sob o ponto de vista de cada um dos critérios. A atribuição de pesos às alternativas será, assim, realizada e as mesmas poderão ser hierarquizadas. Tal hierarquização representa o *output* do modelo FAHP.

Cabe destacar que tanto as comparações pareadas dos critérios quanto as das alternativas são baseadas na escala de nove itens apresentada na tabela 1, na escala de Saaty (TANG e BEYNON, 2005).

Intensidade da preferência (Valor Numérico)	Definição (Escala Verbal)	Observações
1	Igualdade de preferência	Os dois elementos contribuem igualmente para o alcance do objetivo
3	Fraca preferência de um dos elementos	Julgamento levemente favorável a um dos dois elementos
5	Forte preferência de um dos elementos	Julgamento favorável a um dos dois elementos
7	Muito forte preferência de um dos elementos	Um dos elementos é muito forte e sua dominância pode ser demonstrada na prática
9	Preferência absoluta de um dos elementos	A superioridade de um dos elementos é evidente demais
2,4,6,8	Valores intermediários entre os dois julgamentos adjacentes	Utilizados quando houver necessidade de uma redução dos valores anteriormente apresentados
Valores recíprocos (não negativos)	Se um elemento <i>i</i> obtiver um dos valores apresentados acima quando comparado com o elemento <i>j</i> , então <i>j</i> possuirá o valor recíproco quando comparado com <i>i</i>	

Tabela 1 - Escala de preferência relativa baseada em Saaty (1980)
Fonte: Tradução livre Tang e Beynon (2005)

Um determinado número *Fuzzy* é caracterizado por uma função de pertinência $\mu_A(x)$ que assume valores no intervalo [0,1].

Segundo Saxena *et al.* (2010), há diferentes possibilidades de funções de pertinência: triangular, trapezoidal, gaussiana, etc. A mais utilizada delas é a triangular (figura 1), uma vez que essa possui uma simplicidade computacional que facilita o tratamento de dados.

Um número *Fuzzy* triangular pode ser descrito da seguinte forma:

$$(l, m, u)$$

Onde:

l = limite inferior;

m = valor modal (valor de pertinência = 1);

u = limite superior.

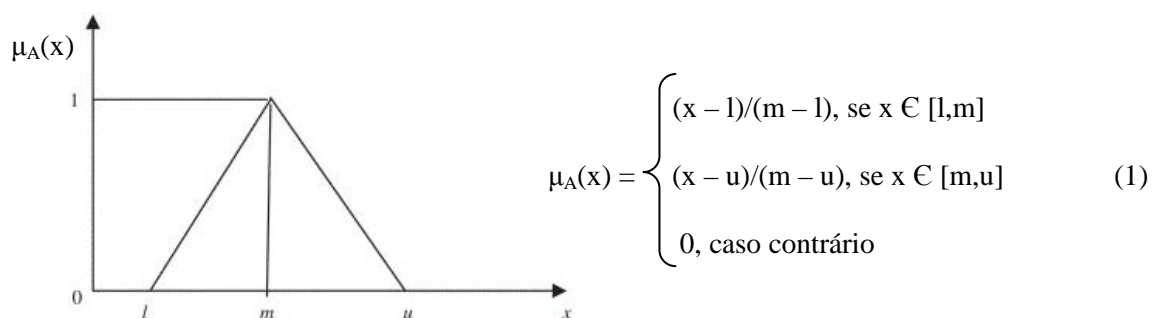


Figura 1 - Número *Fuzzy* triangular
Fonte: Autoria Própria

O grau de *fuzzificação* (δ) é o elemento responsável por expressar o grau de imprecisão do julgamento feito pelo usuário nas comparações pareadas do modelo FAHP.

Nesse contexto, em uma dada comparação pareada entre os elementos *i* e *j*, na qual o elemento *i* é preferível ao elemento *j*, o item *m* do número triangular *Fuzzy* resultante dessa comparação será um dos valores da escala de Saaty (tabela 1). Os itens *l* e *u* (limites inferior e

superior, respectivamente, do número triangular), por sua vez, descreverão a imprecisão do julgamento. Esta é influenciada pelo grau de *fuzzificação* (δ). Em um caso comum, onde a função de pertinência $\mu_A(x)$ é considerada simétrica, tem-se:

$$m - l = u - m = \delta \quad (2)$$

Dessa forma, dado o valor de m , o número *Fuzzy* triangular associado à comparação entre os elementos i e j , na qual i é diferente de j e i é preferível a j , será:

$$(m - \delta, m, m + \delta)$$

E o seu respectivo inverso (comparação entre os elementos j e i) será:

$$(1 / (m + \delta), 1 / m, 1 / (m - \delta))$$

No entanto, há algumas exceções. Quando o valor de m na comparação pareada for igual a 1 (elementos i e j igualmente preferíveis), o número *Fuzzy* triangular associado a essa comparação será:

$$(1 / (1 + \delta), 1, 1 + \delta)$$

Além disso, quando o valor de m for igual a 9 (valor extremo superior da escala de Saaty), o número *Fuzzy* triangular associado a essa comparação será:

$$(9 - \delta, 9, 9)$$

O grau de *fuzzificação* mais adotado é 0,5. No entanto, segundo Tang e Beynon (2005), tal grau, que é um *input* do modelo FAHP, não é necessariamente esse para todos os casos.

Saxena *et al.* (2010) também concordam com tal afirmação. Segundo eles, quanto maior for a imprecisão do participante no processo decisório, maior deverá ser o grau de *fuzzificação*. Cabe ressaltar que um grau $\delta = 1,5$ representa uma imprecisão alta.

Nesse contexto, deve-se perceber, em cada caso, o grau de imprecisão do participante. Um método interessante para isso é o questionamento das preferências em dois momentos diferentes, de modo que o participante, quando for responder a preferência – seja essa em relação aos critérios ou às alternativas –, pela segunda vez, não se lembre da resposta dada na primeira vez. Dessa maneira, a diferença entre os m das duas respostas será o grau de *fuzzificação*, e representará, assim, a imprecisão da resposta do participante. Cabe destacar que, com a utilização desse método, cada comparação pareada possuirá um grau de *fuzzificação* específico.

Cada uma das comparações pareadas, sejam essas dos critérios ou das alternativas de escolha, terá, assim, um número *Fuzzy* triangular associado. Tais resultados podem ser apresentados como na matriz da tabela 2. Os mesmos permitirão, a partir de operações matemáticas com números *Fuzzy*, calcular os pesos dos critérios primeiramente. Posteriormente, poder-se-á comparar os números *Fuzzy* triangulares associados a cada par de alternativas de escolha e, ponderando pelo peso de cada um dos critérios, chegar a uma hierarquização final. Todas as operações matemáticas necessárias serão apresentadas, em ordem de realização, nesta sessão.

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C _n
C ₁	(1,1,1)	(L ₁₂ ,M ₁₂ ,U ₁₂)	(L ₁₃ ,M ₁₃ ,U ₁₃)	(L ₁₄ ,M ₁₄ ,U ₁₄)	(L _{1n} ,M _{1n} ,U _{1n})
C ₂	(L ₂₁ ,M ₂₁ ,U ₂₁)	(1,1,1)	(L ₂₃ ,M ₂₃ ,U ₂₃)	(L ₂₄ ,M ₂₄ ,U ₂₄)	(L _{2n} ,M _{2n} ,U _{2n})
C ₃	(L ₃₁ ,M ₃₁ ,U ₃₁)	(L ₃₂ ,M ₃₂ ,U ₃₂)	(1,1,1)	(L ₃₄ ,M ₃₄ ,U ₃₄)	(L _{3n} ,M _{3n} ,U _{3n})
C ₄	(L ₄₁ ,M ₄₁ ,U ₄₁)	(L ₄₂ ,M ₄₂ ,U ₄₂)	(L ₄₃ ,M ₄₃ ,U ₄₃)	(1,1,1)	(L _{4n} ,M _{4n} ,U _{4n})
C _n	(L ₅₁ ,M ₅₁ ,U ₅₁)	(L ₅₂ ,M ₅₂ ,U ₅₂)	(L ₅₃ ,M ₅₃ ,U ₅₃)	(L ₅₄ ,M ₅₄ ,U ₅₄)	(1,1,1)

Tabela 2 – Matriz de comparações *Fuzzy*

Fonte: Autoria Própria

A primeira operação a ser realizada é a soma, para cada um dos elementos do processo decisório (critérios ou alternativas), dos valores encontrados para l , m e u , nas colunas e nas linhas da matriz de comparações. Nesse sentido, para cada um desses elementos, ter-se-á um número *Fuzzy* triangular que representará a soma de l , m e u da sua linha (l_{linha} , m_{linha} , u_{linha}) e um outro que representará a soma de l , m e u da sua coluna (l_{coluna} , m_{coluna} , u_{coluna}).

Em seguida, é necessário realizar a soma das somas das colunas de todos os elementos da matriz ($l_{\Sigma \text{colunas}}$, $m_{\Sigma \text{colunas}}$, $u_{\Sigma \text{coluna}}$).

Nesse momento, têm-se todos os elementos necessários para o cálculo da Medida Sintética *Fuzzy* (S), a qual servirá de base para a hierarquização dos elementos da matriz de comparações. Tal cálculo pode ser representado pela expressão matemática abaixo:

$$S_i = (l_{linhai}, m_{linhai}, u_{linhai}) \cdot (1/l_{\Sigma columna}, 1/m_{\Sigma columna}, 1/u_{\Sigma columna}) \quad (3)$$

onde \cdot representa a multiplicação *Fuzzy*, que, por sua vez, deve obedecer à seguinte regra matemática:

$$A \cdot B = (l_1, m_1, u_1) \cdot (l_2, m_2, u_2) = (l_1 * l_2, m_1 * m_2, u_1 * u_2)$$

Tanto no caso da hierarquização dos critérios, quanto no das alternativas, após a obtenção de todas as medidas sintéticas *Fuzzy* (S), a comparação entre o “S” de cada um dos elementos com o dos demais deverá ser realizada. Tal comparação deve ser feita, inicialmente, dois a dois, através do cálculo de $V(S_i \geq S_j)$, que representa o grau de possibilidade de S_i ser maior ou igual a S_j .

Sejam $S_1 (l_1, m_1, u_1)$ e $S_2 (l_2, m_2, u_2)$ dois números *Fuzzy* triangulares convexos que se interceptam. Tem-se que:

$$V(S_1 \geq S_2) = 1 \text{ se e somente se } m_1 \geq m_2 \text{ e} \\ V(S_2 \geq S_1) = \text{MaiorValor}(S_1 \cap S_2) = (l_1 - u_2) / [(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)] \quad (4)$$

A figura 2 ilustra os cálculos acima apresentados. Nesse caso, M_2 e M_1 são dois números *Fuzzy* triangulares convexos e $V(M_2 \geq M_1) = d$ (notação que será utilizada adiante):

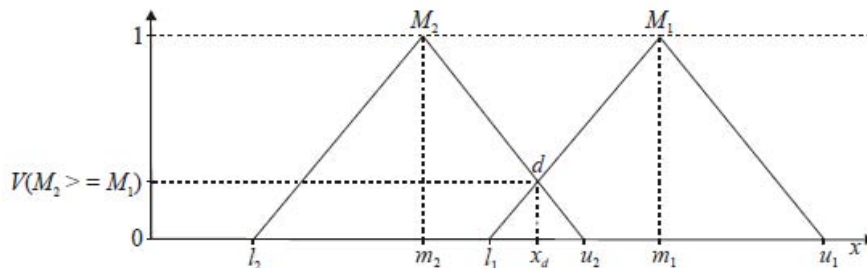


Figura 2 - A comparação entre dois números *Fuzzy* M_1 e M_2
Fonte: Tang e Beynon (2005, p. 9)

Vale ressaltar ainda que o grau de possibilidade de um dado número *Fuzzy* S ser maior que vários outros números *Fuzzy* deve ser calculado através da equação abaixo representada:

$$V(S \geq S_1, S_2, \dots, S_n) = V[(S \geq S_1) \text{ e } (S \geq S_2) \text{ e } \dots \text{ e } (S \geq S_n)] = \min V(S \geq S_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

Assim, após todas as comparações pareadas de “S” possíveis, a comparação global do “S” de um elemento C_i com o de todos os demais deverá ser realizada e é abaixo apresentada:

$$d(C_i) = V(S_i \geq S_a, S_b, S_c, \dots, S_n) = \text{Min}(V(S_i \geq S_a), V(S_i \geq S_b), V(S_i \geq S_c), \dots, V(S_i \geq S_n)) \quad (6)$$

O vetor W' , definido como $W' = [d(C_i), d(C_a), d(C_b), d(C_c), \dots, d(C_n)]$, após ser normalizado (W), será, nesse sentido, o vetor dos pesos dos elementos (sejam esses critérios ou alternativas de escolha).

Cabe destacar que o vetor final dos pesos das alternativas, por considerar a ponderação pelos pesos dos critérios, será definido da seguinte forma:

$$W_C \times W_A \quad (7)$$

onde W_C é o vetor linha normalizado dos pesos dos critérios e W_A é o vetor normalizado dos pesos das alternativas segundo cada um dos critérios, possuindo dimensão $n \times n'$, sendo n o número de critérios e n' , o número de alternativas.

Até o momento, o método FAHP foi apresentado considerando que apenas um participante responde com relação às preferências. No entanto, os processos decisórios são, cada vez mais, grupais, aproveitando as sinergias entre os participantes. Dessa maneira, a agregação das avaliações dos diversos participantes do processo é fundamental.

Segundo Meixner (2009), uma maneira adequada de agregar os julgamentos dos diversos participantes do processo decisório é baseada no cálculo da média geométrica e está apresentada abaixo, sendo K o número de participantes:

$$(8) \quad l_{ij} = \left[\prod_{k=1}^K l_{ijk} \right]^{1/K} \quad u_{ij} = \left[\prod_{k=1}^K u_{ijk} \right]^{1/K} \quad m_{ij} = \left[\prod_{k=1}^K m_{ijk} \right]^{1/K}$$

sendo ij a referência à comparação pareada entre os elementos i e j .

A partir de tal agregação, o método FAHP pode ser aplicado como foi descrito ao longo desta sessão, considerando as análises dos participantes do processo decisório.

3. O FAHP aplicado à análise de riscos de uma usina hidrelétrica

O Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) de Simplício é composto por duas usinas: Simplício, com potencial de geração de 305,7 MW, e Anta, 28 MW, ambas situadas no Rio Paraíba do Sul. Em 2007, a Eletrobrás Furnas recebeu a licença de instalação pelo IBAMA, permitindo o início das obras. Para a construção do empreendimento, foi formado o Consórcio Construtor de Simplício (CCS). O enchimento do reservatório do AHE em questão está previsto para Maio de 2012.

A alta complexidade da construção desse projeto é notória e é refletida na necessidade de gestão de inúmeras frentes de obras concomitantes. A inundação de um lixão com a conseqüente construção de um aterro sanitário em Sapucaia – cidade que margeia o Rio Paraíba do Sul - e a interferência com a ferrovia Centro Atlântica, com a posterior necessidade de construção de seis pontes ferroviárias, são apenas dois exemplos das diversidades de impactos que a instalação do complexo hidrelétrico provocou. Além disso, por se tratar de um trecho de vazão reduzida, onde é lançado o esgoto de Anta e de Sapucaia, Furnas teve a necessidade de implantar um sistema de esgotamento sanitário ao longo de toda a área.

Diante deste cenário, torna-se bastante necessária uma análise de riscos consistente. O FAHP foi, assim, utilizado como metodologia para tal análise.

Os critérios e as alternativas (riscos) para o caso do Complexo Hidrelétrico de Simplício foram definidos em conjunto com uma equipe de especialistas de Furnas e são apresentados nas tabelas 3 e 4, respectivamente.

Critérios
C ₁ : Modalidade de contratação do consórcio construtor
C ₂ : Estrutura financeira do projeto (parceiros, capital próprio, capital de terceiros)
C ₃ : Qualificação técnica do consórcio construtor e dos seus terceirizados
C ₄ : Característica topográfica e geológica
C ₅ : Localização da usina

Tabela 3 – Critérios definidos
Fonte: Autoria Própria

Alternativas
A ₁ : Risco de atraso no cronograma
A ₂ : Risco de exceder o orçamento
A ₃ : Risco de acidentes de trabalho acima da média
A ₄ : Risco de dano ao meio ambiente e à população vizinha
A ₅ : Risco de não atendimento às especificações técnicas

Tabela 4 – Alternativas definidas
Fonte: Autoria Própria

Tendo definido os critérios e as alternativas, as opiniões dos especialistas foram levantadas. Essas correspondem ao elemento m do número triangular *Fuzzy*, os quais devem estar de acordo com a escala de Saaty (tabela 1). O grau de *fuzzificação* (δ) utilizado neste estudo foi de 0,5.

Nesse sentido, é apresentada, na tabela 5, a matriz de comparações pareadas *Fuzzy* dos critérios. Tal matriz expressa, de forma agregada (segundo o método de agregação citado no final do capítulo 2) os julgamentos dos três participantes do processo decisório:

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁	(1,1,1)	(4.18,4.72,5.25)	(0.22, 0.25, 0.29)	(0.16, 0.18, 0.2)	(3.04, 3.56, 4.07)
C ₂	(0.19,0.21,0.24)	(1,1,1)	(0.21, 0.24, 0.27)	(0.16, 0.18, 0.2)	(1.04, 1.71, 2.31)
C ₃	(3.44, 3.98, 4.51)	(3.7, 4.22, 4.73)	(1,1,1)	(0.34, 0.48, 0.62)	(5.17, 5.74, 6.18)
C ₄	(5.09, 5.59, 6.1)	(5.09, 5.59, 6.1)	(1.46, 2.08, 2.64)	(1,1,1)	(2.16, 2.33, 2.47)
C ₅	(0.25, 0.28, 0.33)	(0.36, 0.58, 0.79)	(0.16, 0.17, 0.19)	(0.41, 0.43, 0.46)	(1,1,1)

Tabela 5 – Matriz agregada de comparações *Fuzzy* dos critérios
Fonte: Autoria Própria

Da mesma maneira, são apresentadas, na tabela 6, também de forma agregada, as matrizes de comparações pareadas *Fuzzy* das alternativas segundo cada um dos critérios:

C ₁	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
A ₁	(1,1,1)	(0.34, 0.48, 0.62)	(7.11, 7.61, 7.97)	(5.17, 5.74, 6.18)	(2.2, 3, 3.62)
A ₂	(1.46, 2.08, 2.64)	(1,1,1)	(5.17, 5.74, 6.18)	(3.76, 4.33, 4.8)	(1.07, 1.44, 1.75)
A ₃	(0.13, 0.13, 0.14)	(0.16, 0.17, 0.19)	(1,1,1)	(0.62, 0.69, 0.79)	(0.22, 0.25, 0.29)
A ₄	(0.16, 0.17, 0.19)	(0.21, 0.23, 0.27)	(1.27, 1.44, 1.62)	(1,1,1)	(0.46, 0.52, 0.6)
A ₅	(0.25, 0.33, 0.41)	(0.52, 0.69, 0.85)	(3.44, 3.98, 4.51)	(1.67, 1.91, 2.19)	(1,1,1)

C ₂	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
A ₁	(1,1,1)	(0.85, 1.44, 1.99)	(6.29, 6.8, 7.19)	(6.29, 6.8, 7.19)	(6.29, 6.8, 7.19)
A ₂	(0.41, 0.69, 0.97)	(1,1,1)	(3.02, 3.98, 4.66)	(3.02, 3.98, 4.66)	(2.67, 3.56, 4.2)
A ₃	(0.14, 0.15, 0.16)	(0.19, 0.25, 0.3)	(1,1,1)	(0.5, 1, 1.5)	(0.41, 0.69, 0.97)
A ₄	(0.14, 0.15, 0.16)	(0.19, 0.25, 0.3)	(0.5, 1, 1.5)	(1,1,1)	(0.36, 0.58, 0.79)
A ₅	(0.14, 0.15, 0.16)	(0.22, 0.28, 0.34)	(0.85, 1.44, 1.99)	(1.04, 1.71, 2.31)	(1,1,1)

C ₃	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
A ₁	(1,1,1)	(2.01, 2.76, 3.4)	(1.78, 2.47, 3.07)	(2.2, 3, 3.62)	(0.43, 0.48, 0.54)
A ₂	(0.27, 0.36, 0.45)	(1,1,1)	(0.71, 1, 1.28)	(0.85, 1.44, 1.99)	(0.21, 0.23, 0.27)
A ₃	(0.3, 0.41, 0.51)	(0.71, 1, 1.28)	(1,1,1)	(1.18, 1.91, 2.56)	(0.18, 0.19, 0.22)
A ₄	(0.25, 0.33, 0.41)	(0.54, 0.69, 0.97)	(0.32, 0.52, 0.7)	(1,1,1)	(0.15, 0.16, 0.18)
A ₅	(1.46, 2.08, 2.64)	(3.76, 4.33, 4.8)	(4.57, 5.13, 5.57)	(5.56, 6.08, 6.48)	(1,1,1)

C ₄	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
A ₁	(1,1,1)	(0.41, 0.69, 0.97)	(4.18, 4.72, 5.25)	(4.18, 4.72, 5.25)	(2.67, 3.56, 4.2)
A ₂	(0.85, 1.44, 1.99)	(1,1,1)	(2.76, 3.66, 4.39)	(4.73, 5.28, 5.82)	(4.57, 5.13, 5.57)
A ₃	(0.19, 0.21, 0.24)	(0.21, 0.27, 0.33)	(1,1,1)	(1.48, 1.71, 1.97)	(1.43, 1.61, 1.8)
A ₄	(0.19, 0.21, 0.24)	(0.17, 0.19, 0.21)	(0.51, 0.58, 0.68)	(1,1,1)	(0.84, 1.12, 1.36)
A ₅	(0.22, 0.28, 0.34)	(0.18, 0.19, 0.22)	(0.56, 0.62, 0.7)	(0.67, 0.89, 1.08)	(1,1,1)

C ₅	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
A ₁	(1,1,1)	(0.41,0.69,0.97)	(1.46, 2.08, 2.64)	(0.62, 0.69, 0.79)	(1.04, 1.22, 1.4)
A ₂	(0.85, 1.44, 1.99)	(1,1,1)	(3.7, 4.22, 4.73)	(0.81, 0.92, 1.06)	(1.27, 1.44, 1.62)
A ₃	(0.34, 0.48, 0.62)	(0.21, 0.24, 0.27)	(1,1,1)	(0.36, 0.58, 0.79)	(0.61, 0.84, 1.05)
A ₄	(1.27, 1.44, 1.62)	(0.94, 1.09, 1.24)	(1.04, 1.71, 2.31)	(1,1,1)	(1.21, 1.44, 1.7)
A ₅	(0.72, 0.82, 0.96)	(0.62, 0.69, 0.79)	(0.86, 1.19, 1.49)	(0.59, 0.69, 0.82)	(1,1,1)

Tabela 6 – Matrizes agregadas de comparações *Fuzzy* entre alternativas
Fonte: Autoria Própria

Os pesos dos critérios foram encontrados a partir dos resultados na tabela 7. Tais cálculos são baseados nas operações da metodologia FAHP detalhadas no capítulo 2.

	Somas Linhas	Somas Colunas
C ₁	(8.60835, 9.704684, 10.80256)	(9.9608, 11.0656, 12.17928)
C ₂	(2.605937, 3.337851, 4.018992)	(14.3247, 16.1131, 17.8695)
C ₃	(13.65049, 15.41576, 17.04645)	(3.05670, 3.74277, 4.3933)
C ₄	(14.79327, 16.59394, 18.30305)	(2.07761, 2.26805, 2.4779)
C ₅	(2.169801, 2.469944, 2.779249)	(12.4079, 14.3326, 16.030)
Soma das Somas das Colunas		(41.82785, 47.52218, 52.9503)

Tabela 7 – Soma das linhas e colunas dos diferentes critérios
Fonte: Autoria Própria

Nesse contexto, a partir dos dados acima, as Medidas Sintéticas *Fuzzy* (S) puderam ser calculadas de acordo com a Equação (3) e, posteriormente, comparadas entre si através da Equação (4):

$$\begin{aligned}
 S_1 &= (0.16257, 0.20421, 0.258262) & S_2 &= (0.049214, 0.07023, 0.0960841) \\
 S_3 &= (0.257798, 0.32439, 0.407538) & S_4 &= (0.27938021, 0.34918, 0.437580) \\
 S_5 &= (0.0409780, 0.05197455, 0.066444)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V(S_1 \geq S_2) &= 1 & V(S_1 \geq S_3) &= 0.003847 & V(S_1 \geq S_4) &= 0 & V(S_1 \geq S_5) &= 1 \\
 V(S_2 \geq S_1) &= 0 & V(S_2 \geq S_3) &= 0 & V(S_2 \geq S_4) &= 0 & V(S_2 \geq S_5) &= 1 \\
 V(S_3 \geq S_1) &= 1 & V(S_3 \geq S_2) &= 1 & V(S_3 \geq S_4) &= 0.837907 & V(S_3 \geq S_5) &= 1 \\
 V(S_4 \geq S_1) &= 1 & V(S_4 \geq S_2) &= 1 & V(S_4 \geq S_3) &= 1 & V(S_4 \geq S_5) &= 1 \\
 V(S_5 \geq S_1) &= 0 & V(S_5 \geq S_2) &= 0.485448 & V(S_5 \geq S_3) &= 0 & V(S_5 \geq S_4) &= 0
 \end{aligned}$$

Calculou-se, então, a partir da Equação (6), o vetor $W'_C = [d(C_1), d(C_2), d(C_3), d(C_4), d(C_5)]$, e, após a sua normalização, chegou-se ao vetor dos pesos W_C :

$$W'_C = (0, 0, 0.837907, 1, 0) \qquad W_C = (0, 0, 0.455903, 0.544097, 0)$$

Os mesmos cálculos foram realizados para as comparações pareadas entre as alternativas segundo cada um dos critérios. Tais cálculos estão apresentados nas tabelas 8 a 12.

Segundo o critério C₁:

C ₁	Somas Linhas	Somas Colunas
A ₁	(15.8199, 17.8312, 19.3885)	(3.000516, 3.71904, 4.3860)
A ₂	(12.4572, 14.587875, 16.37020)	(2.23245, 2.57948, 2.9323)
A ₃	(2.12477, 2.25030, 2.41266)	(17.984251, 19.77176, 21.2874)
A ₄	(3.096264, 3.370380, 3.68202)	(12.212658, 13.67183, 14.95448)
A ₅	(6,87508, 7.91868, 8.9668)	(4.943471, 6.216323, 7.259859)
Soma das Somas das Colunas		(40.37335, 45.95845, 50.82022)

Tabela 8 – Soma das linhas e colunas das alternativas com base no critério C₁
Fonte: Autoria Própria

$$S_{1A1} = (0.31129, 0.3879853, 0.480230) \quad S_{1A2} = (0.2451247, 0.3174144, 0.405470)$$

$$S_{1A3} = (0.0418096, 0.048963, 0.05975) \quad S_{1A4} = (0.060925, 0.073335, 0.0911994)$$

$$S_{1A5} = (0.135282, 0.172300, 0.222097)$$

$$V(S_{1A1} \geq S_{1A2}) = 1 \quad V(S_{1A1} \geq S_{1A3}) = 1 \quad V(S_{1A1} \geq S_{1A4}) = 1 \quad V(S_{1A1} \geq S_{1A5}) = 1$$

$$V(S_{1A2} \geq S_{1A1}) = 0.571646 \quad V(S_{1A2} \geq S_{1A3}) = 1 \quad V(S_{1A2} \geq S_{1A4}) = 1 \quad V(S_{1A2} \geq S_{1A5}) = 1$$

$$V(S_{1A3} \geq S_{1A1}) = 0 \quad V(S_{1A3} \geq S_{1A2}) = 0 \quad V(S_{1A3} \geq S_{1A4}) = 0 \quad V(S_{1A3} \geq S_{1A5}) = 0$$

$$V(S_{1A4} \geq S_{1A1}) = 0 \quad V(S_{1A4} \geq S_{1A2}) = 0 \quad V(S_{1A4} \geq S_{1A3}) = 1 \quad V(S_{1A4} \geq S_{1A5}) = 0$$

$$V(S_{1A5} \geq S_{1A1}) = 0 \quad V(S_{1A5} \geq S_{1A2}) = 0 \quad V(S_{1A5} \geq S_{1A3}) = 1 \quad V(S_{1A5} \geq S_{1A4}) = 1$$

$$W'_{C1} = (1, 0.571646, 0, 0, 0)$$

$$W_{C1} = (0.636275, 0.363725, 0, 0, 0.0030)$$

Segundo o critério C₂:

C ₂	Somas Linhas	Somas Colunas
A ₁	(15.431, 27.7003, 24.55091)	(1.83227, 2.1342, 2.44245)
A ₂	(8.07760, 15.231340, 15.490245)	(2.46098, 3.22602, 3.93018)
A ₃	(1.9079, 3.8403, 3.9249610)	(11.66599, 14.22539, 16.33750)
A ₄	(1.34990, 3.23177, 3.753145)	(2.44245, 14.493125, 16.6610)
A ₅	(2.36925, 5.15418, 5.80123)	(10.73405, 12.639150, 14.14935)
Soma das Somas das Colunas		(29.13576, 46.71797, 53.52051)

Tabela 9 – Soma das linhas e colunas das alternativas com base no critério C₂
Fonte: Autoria Própria

$$S_{2A1} = (0.2883, 0.59292, 0.842638) \quad S_{2A2} = (0.15092, 0.326027, 0.5316575)$$

$$S_{2A3} = (0.035648, 0.0822024, 0.134712) \quad S_{2A4} = (0.025222, 0.069176, 0.1288)$$

$$S_{2A5} = (0.044268, 0.110325, 0.1991106)$$

$$V(S_{2A1} \geq S_{2A2}) = 1 \quad V(S_{2A1} \geq S_{2A3}) = 1 \quad V(S_{2A1} \geq S_{2A4}) = 1$$

$$V(S_{2A1} \geq S_{2A5}) = 1 \quad V(S_{2A2} \geq S_{2A1}) = 0.476911 \quad V(S_{2A2} \geq S_{2A3}) = 1$$

$$V(S_{2A2} \geq S_{2A4}) = 1 \quad V(S_{2A2} \geq S_{2A5}) = 1 \quad V(S_{2A3} \geq S_{2A1}) = 0$$

$$V(S_{2A3} \geq S_{2A2}) = 0 \quad V(S_{2A3} \geq S_{2A4}) = 1 \quad V(S_{2A3} \geq S_{2A5}) = 0.76281$$

$$V(S_{2A4} \geq S_{2A1}) = 0 \quad V(S_{2A4} \geq S_{2A2}) = 0 \quad V(S_{2A4} \geq S_{2A3}) = 0.877335$$

$$V(S_{2A4} \geq S_{2A5}) = 0.672631 \quad V(S_{2A5} \geq S_{2A1}) = 0 \quad V(S_{2A5} \geq S_{2A2}) = 0.18259$$

$$V(S_{2A5} \geq S_{2A3}) = 1 \quad V(S_{2A5} \geq S_{2A4}) = 1$$

$$W'_{C2} = (1, 0.476911, 0, 0, 0)$$

$$W_{C2} = (0.677089, 0.322911, 0, 0, 0)$$

Segundo o critério C₃:

C_3	Somas Linhas	Somas Colunas
A_1	(7.42100, 9.70588, 11.628039)	(3.275652, 4.181357, 5.014789)
A_2	(3.03505, 4.03583, 4.988448)	(8.02033, 9.779034, 11.443161)
A_3	(3.360055, 4.5133458, 5.5750427)	(8.380813, 10.118897, 11.625281)
A_4	(2.26549, 2.71386, 3.2605173)	(10.78672, 13.437382, 15.65138)
A_5	(16.356777, 18.6189, 20.48980)	(1.974863, 2.071218, 2.20723)
Soma das Somas das Linhas		(32.43838, 39.58789, 45.94185)

Tabela 10 – Soma das linhas e colunas das alternativas com base no critério C_3
Fonte: Autoria Própria

$$S_{3A1} = (0.161530, 0.24517, 0.35846) \quad S_{3A2} = (0.066063, 0.101946, 0.153782)$$

$$S_{3A3} = (0.073137, 0.114008, 0.171865) \quad S_{3A4} = (0.049312, 0.0685529, 0.1005141)$$

$$S_{3A5} = (0.3560321, 0.470319, 0.631653)$$

$$V(S_{3A1} \geq S_{3A2}) = 1 \quad V(S_{3A1} \geq S_{3A3}) = 1 \quad V(S_{3A1} \geq S_{3A4}) = 1$$

$$V(S_{3A1} \geq S_{3A5}) = 0.010692 \quad V(S_{3A2} \geq S_{3A1}) = 0 \quad V(S_{3A2} \geq S_{3A3}) = 0.86989$$

$$V(S_{3A2} \geq S_{3A4}) = 1 \quad V(S_{3A2} \geq S_{3A5}) = 0 \quad V(S_{3A3} \geq S_{3A1}) = 0.07304$$

$$V(S_{3A3} \geq S_{3A2}) = 1 \quad V(S_{3A3} \geq S_{3A4}) = 1 \quad V(S_{3A3} \geq S_{3A5}) = 0$$

$$V(S_{3A4} \geq S_{3A1}) = 0 \quad V(S_{3A4} \geq S_{3A2}) = 0.507797 \quad V(S_{3A4} \geq S_{3A3}) = 0.375891$$

$$V(S_{3A4} \geq S_{3A5}) = 0 \quad V(S_{3A5} \geq S_{3A1}) = 1 \quad V(S_{3A5} \geq S_{3A2}) = 1$$

$$V(S_{3A5} \geq S_{3A3}) = 1 \quad V(S_{3A5} \geq S_{3A4}) = 1$$

$$W'_{C3} = (0.010692, 0, 0, 0, 1)$$

$$W_{C3} = (0.010579, 0, 0, 0, 0.989421)$$

Segundo o critério C_4 :

C_4	Somas Linhas	Somas Colunas
A_1	(12.45259, 14.6856, 16.660605)	(2.451614, 3.14732, 3.807425)
A_2	(13.91929, 16.50911, 18.76770)	(1.972658, 2.35105, 2.724240)
A_3	(4.308367, 4.80864, 5.3424622)	(9.00795, 10.58160, 12.006459)
A_4	(2.707969, 3.104939, 3.48534)	(12.053914, 13.599205, 15.120731)
A_5	(2.619042, 2.989780, 3.3377666)	(10.521131, 12.41893, 13.93503)
Soma das Somas das Linhas		(36.00727, 42.09812, 47.593893)

Tabela 11 – Soma das linhas e colunas das alternativas com base no critério C_4
Fonte: Autoria Própria

$$S_{4A1} = (0.26164, 0.348843, 0.46270) \quad S_{4A2} = (0.292459, 0.3921579, 0.521219)$$

$$S_{4A3} = (0.09052, 0.1142247, 0.1483717) \quad S_{4A4} = (0.0568974, 0.07375, 0.0967957)$$

$$S_{4A5} = (0.055028, 0.0710193, 0.092697)$$

$$V(S_{4A1} \geq S_{4A2}) = 0.797174 \quad V(S_{4A1} \geq S_{4A3}) = 1 \quad V(S_{4A1} \geq S_{4A4}) = 1$$

$$V(S_{4A1} \geq S_{4A5}) = 1 \quad V(S_{4A2} \geq S_{4A1}) = 1 \quad V(S_{4A2} \geq S_{4A3}) = 1$$

$$V(S_{4A2} \geq S_{4A4}) = 1 \quad V(S_{4A2} \geq S_{4A5}) = 1 \quad V(S_{4A3} \geq S_{4A1}) = 0$$

$$V(S_{4A3} \geq S_{4A2}) = 0 \quad V(S_{4A3} \geq S_{4A4}) = 1 \quad V(S_{4A3} \geq S_{4A5}) = 1$$

$$V(S_{4A4} \geq S_{4A1}) = 0 \quad V(S_{4A4} \geq S_{4A2}) = 0 \quad V(S_{4A4} \geq S_{4A3}) = 0.134187$$

$$V(S_{4A4} \geq S_{4A5}) = 1 \quad V(S_{4A5} \geq S_{4A1}) = 0 \quad V(S_{4A5} \geq S_{4A2}) = 0$$

$$V(S_{4A5} \geq S_{4A3}) = 0.047896 \quad V(S_{4A5} \geq S_{4A4}) = 0.929013$$

$$W'_{C4} = (0.79774, 1, 0, 0, 0)$$

$$W_{C4} = (0.443571, 0.556429, 0, 0, 0)$$

Segundo o critério C_5 :

C_5	Somas Linhas	Somas Colunas
A_1	(4.536400, 5.683246, 6.788296)	(4.1847962, 5.187319, 6.1925321)
A_2	(7.633210, 9.021303, 10.40622)	(3.183216, 3.71122, 4.258629)
A_3	(2.52277, 3.146112, 3.738114)	(8.064408, 10.192854, 12.171416)
A_4	(5.4635452, 6.681855, 7.869891)	(3.3711461, 3.8911674, 4.46834)
A_5	(3.783924, 4.39442, 5.0590974)	(5.136283, 5.944372, 6.77070)
Soma das Somas das Colunas		(23.93985, 28.926942, 33.861622)

Tabela 12 – Soma das linhas e colunas das alternativas com base no critério C_5
Fonte: Autoria Própria

$$S_{5A1} = (0.133968, 0.196468, 0.283556) \quad S_{5A2} = (0.22542, 0.311865, 0.434682)$$

$$S_{5A3} = (0.074502, 0.108760, 0.1561460) \quad S_{5A4} = (0.161349, 0.2309907, 0.32873)$$

$$S_{5A5} = (0.111746, 0.151914, 0.211325)$$

$$V(S_{5A1} \geq S_{5A2}) = 0.335003 \quad V(S_{5A1} \geq S_{5A3}) = 1 \quad V(S_{5A1} \geq S_{5A4}) = 0.779736$$

$$V(S_{5A1} \geq S_{5A5}) = 1 \quad V(S_{5A2} \geq S_{5A1}) = 1 \quad V(S_{5A2} \geq S_{5A3}) = 1$$

$$V(S_{5A2} \geq S_{5A4}) = 1 \quad V(S_{5A2} \geq S_{5A5}) = 1 \quad V(S_{5A3} \geq S_{5A1}) = 0.201822$$

$$V(S_{5A3} \geq S_{5A2}) = 0 \quad V(S_{5A3} \geq S_{5A4}) = 0 \quad V(S_{5A3} \geq S_{5A5}) = 0.507112$$

$$V(S_{5A4} \geq S_{5A1}) = 1 \quad V(S_{5A4} \geq S_{5A2}) = 0.560911 \quad V(S_{5A4} \geq S_{5A3}) = 1$$

$$V(S_{5A4} \geq S_{5A5}) = 1 \quad V(S_{5A5} \geq S_{5A1}) = 0.634533 \quad V(S_{5A5} \geq S_{5A2}) = 0$$

$$V(S_{5A5} \geq S_{5A3}) = 1 \quad V(S_{5A5} \geq S_{5A4}) = 0.387255$$

$$W'_{C5} = (0.335003, 1, 0, 0.560911, 0) \quad W_{C5} = (0.176697, 0.52745, 0, 0.295853, 0)$$

Finalizados os cálculos dos pesos dos critérios e das alternativas, chegou-se à hierarquização final das alternativas que representam os riscos do Complexo Hidrelétrico de Simpício. A árvore representada na figura 3 ilustra todos os resultados anteriormente calculados:

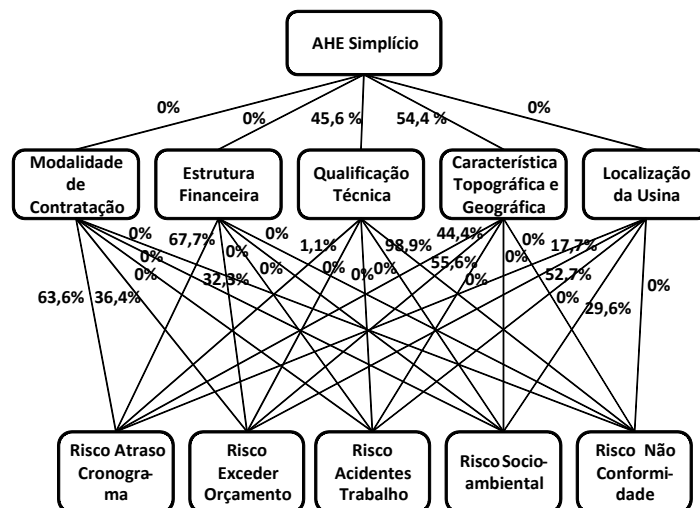


Figura 3 – Árvore dos Critérios e Riscos com as respectivas probabilidades
Fonte: Autoria Própria

Dessa maneira, constata-se que dois critérios (C_3 e C_4) se destacaram dentre os cinco adotados. Além disso, segundo cada um dos critérios, chegou-se a um peso para cada risco (alternativa de escolha).

Os pesos nulos encontrados tanto para alguns dos critérios quanto para alguns dos riscos não indicam uma irrelevância dos mesmos no projeto, mas sim uma baixa preferência frente às demais opções.

Assim, com base na Equação (7), a aplicação da metodologia FAHP para o Complexo de Simplício resultou na seguinte hierarquização de riscos:

- 1° - Risco de não atendimento às especificações técnicas do projeto: 45,1%;
- 2° - Risco de exceder o orçamento: 30,25%;
- 3° - Risco de atraso no cronograma: 24.65%;
- 4° - Risco de acidentes de trabalho acima da média: 0%;
- 5° - Risco de dano ao meio ambiente e à população vizinha: 0%.

De fato, os riscos relacionados às especificações técnicas e ao orçamento do projeto são relevantes na UHE Simplício, confirmando a eficiência do método FAHP no contexto estudado.

4. Conclusão

O trabalho em questão discorre sobre a aplicabilidade do método FAHP, de análise multicritério. Com a notoriedade do potencial hidrelétrico no Brasil, os autores deste estudo decidiram aplicar tal método em uma análise de riscos de um Complexo Hidrelétrico: o Complexo de Simplício.

As impressões obtidas desse estudo foram diversas. Primeiramente, o resultado encontrado para o vetor peso dos critérios chama a atenção pelo fato de três dos cinco critérios terem obtido peso nulo. Os autores atribuem parte deste resultado ao fato de os participantes do processo decisório terem respondido graus de preferência extremos em diversas comparações pareadas. Além disso, tal resultado é decorrente da própria característica do algoritmo, que, na comparação global das medidas sintéticas *Fuzzy* (Equação 5), seleciona o menor valor dentre as comparações. Em um caso com um número razoável de critérios e de alternativas, a probabilidade de que um ou mais resultados para o vetor de pesos seja igual a zero é, assim, elevada.

Observou-se também que, o pré-estabelecimento do grau de *fuzzificação* (δ) em 0,5 influenciou a hierarquização dos riscos. Desta forma, os autores sugerem a adoção de uma abordagem mais precisa, também exposta neste trabalho: a realização de reuniões com os especialistas em dois momentos distintos, a fim de identificar as imprecisões inerentes aos julgamentos.

Apesar de algumas necessidades de ajustes, cabe destacar que a hierarquização obtida, de fato, representa a realidade do Complexo Hidrelétrico estudado. Isso porque os riscos de não atendimento às especificações técnicas do projeto e de exceder o orçamento possuem grande notoriedade na construção de empreendimentos desse tipo, resultado esse que foi confirmado pela equipe de Furnas. O método FAHP mostrou-se, assim, eficiente na hierarquização dos riscos do estudo realizado, podendo auxiliar Furnas na gestão dos riscos inerentes aos seus empreendimentos.

Referências

- CHANG, D.Y.**, (1996), Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP, *European Journal of Operational Research*, 95, 649-655.
- CHATTERJEE D., CHOWDHURY, S. e MUKHERJEE B.** (2010), A Study of the Application of Fuzzy Analytical Hierarchical Process (FAHP) in the Ranking of Indian Banks, *International Journal of Engineering Science and Technology*, v. 2, n.7, 2511-2520.
- COYLE, G.**, The Analytic Hierarchy Process, In: *Practical Strategy: Structured Tools and Techniques*, Glasgow: Pearson, 2004.
- GÜNGÖR, Z., SERHADLIOGLU, G. e KESEN, S. E.** (2009), A fuzzy AHP approach to personnel selection problem, *Applied Soft Computing*, 9, 641-646.

HSIEH, T., LU, S. e TZENG, G. (2004), Fuzzy MCDM approach for planning and design tenders selection in public office buildings, *International Journal of Project Management*, 22, 573-584.

MEIXNER, O., Fuzzy AHP Group Decision Analysis and its Application for the Evaluation of Energy Sources. In: International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process, 2009. *Anais...*Pittsburgh, 2009.

SAATY, T.L., The Analytical Hierarchy Process, New York: McGraw Hill, 1980.

SAXENA, V.; JAIN, M.; SINGH, P. e SAXENA, P.K., Fuzzy Delphi Hierarchy Process and its Application to Improve Indian Telemedical Services. Acesso em 16/01/2012, disponível em < http://www.knu.edu.tw/lecture/%E8%AA%B2%E7%A8%8B%E8%B3%87%E6%96%99/ANP/Proceedings/Final_Papers/77_Saxena_FuzzyDelphiHierarchyProcessIndianTelemedicine_REV_FIN.pdf >, 2010.

SREDJEVIC, B. e MEDEIROS, Y. D. P. (2008), Fuzzy AHP Assessment of Water Management Plans, *Water Resources Management*, 22, 877-894.

TANG, Y. e BEYNON, M. (2005), Application and Development of a Fuzzy Analytic Hierarchy Process within a Capital Investment Study, *Journal of Economics and Management*, v.1, n.2, 207-230.