



Metodologia Híbrida para Análise de Portfólio em Geração Termelétrica utilizando Opções Reais, Números Fuzzy e Algoritmos Genéticos

Wallace José Damasceno do Nascimento^{(1),(2)}
wallacedamasceno@hotmail.com

Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco⁽¹⁾
marco@ele.puc-rio.br

Marco Antônio Guimarães Dias⁽¹⁾
marcoagd@ele.puc-rio.br

Maria Augusta Soares Machado⁽³⁾
fuzzy-consultoria@hotmail.com

⁽¹⁾PUC-Rio, Rua Marques de São Vicente, 225, 4^o andar, Rio de Janeiro, RJ

⁽²⁾Petrobras, Rua General Canabarro, 500, 7^o andar, Rio de Janeiro, RJ

⁽³⁾Ibmec-Rio, Av. Presidente Wilson, 118, 2^o andar, Rio de Janeiro, RJ

RESUMO

No mercado de energia, os agentes precisam dedicar muitos esforços na avaliação e decisão da alocação ótima de capital para a implementação de seus projetos, devido ao grande número de projetos candidatos em seus portfólios de investimento. Essas decisões visam escolher o subconjunto de projetos a ser implementado, pois muitas vezes os recursos financeiros são menores que os necessários para a implantação de todos os projetos, principalmente em tempos de crise econômica. Muitos são os riscos apresentados, e quanto mais risco e incerteza, maior a dificuldade de avaliação e decisão ótima de investimento. Os métodos clássicos para análise de portfólios de investimento são baseados em maximizar os retornos e minimizar os riscos. Estes métodos podem não ser capazes de lidar adequadamente com as opções reais dos projetos, seus riscos e incertezas. Este artigo apresenta uma metodologia híbrida para análise de portfólio composta de um modelo de Opções Reais Fuzzy de avaliação e um algoritmo genético de otimização. Uma aplicação em Geração Termelétrica é apresentada para ilustrar a metodologia.

PALAVRAS CHAVE. Opções Reais, Números Fuzzy, Algoritmos Genéticos

Tópicos (EN-PO na Área de Energia, ADM-Apoio à Decisão Multicritério, GF-Gestão Financeira)

ABSTRACT

In the energy market, the players devote a great deal of effort in valuation and optimal capital allocation decision for their projects implementation, because of the large number of candidate projects in their investment portfolios. These decisions aim to choose the projects subset to be implemented, because generally the financial resources are smaller than necessary for all projects implementation, especially in times of economic crisis. Many risks are presented, and how much more risk and uncertainty, greater is the difficulty of valuation and optimal investment decision. The classic methods for investment portfolios analysis are based on maximizing returns and minimizing risks. These methods may not be able to deal adequately with projects real options, their risks and uncertainties. This paper presents a hybrid methodology for portfolio analysis composed by a valuation Fuzzy Real Options model and an optimization genetic algorithm. An application in Thermo Power Generation is presented to illustrate the methodology.

KEYWORDS. Real Options, Fuzzy Numbers, Genetic Algorithm.

Paper topics (EN-OR in Energy, ADM-Multicriteria Decision Support, GF-Financial Management)



1. Introdução

A capacidade instalada atual de geração e importação de energia elétrica no Brasil é de cerca de 151.000 MW, sendo cerca de 92.000 MW em geração hidráulica, e de 43.000 MW em geração térmica convencional (gás, petróleo, biomassa e carvão) e nuclear [Aneel 2017].

A participação da geração termelétrica (incluindo nuclear), avançou de 13% médios no período de 1994 a 1998, para 15,3% em 1999, e 34% em 2015 [EPE 2016]. O impulso na geração termelétrica a partir do ano 2000 decorreu, sobretudo, do Programa Prioritário de Termelétricidade (PPT), cujo objetivo foi propiciar uma rápida implantação de centrais termelétricas movidas a gás natural.

Um dos principais problemas apresentados aos agentes deste mercado é a avaliação e decisão de alocação ótima de capital para a implementação de seus projetos de investimento, devido aos muitos projetos candidatos em seus portfólios e às incertezas envolvidas.

No Brasil, devido à predominância hidrelétrica, observa-se uma menor volatilidade nos preços à vista (spot) da energia no curto prazo e maior volatilidade no médio e longo prazo, e é neste contexto que as termelétricas se inserem.

Como no mercado brasileiro os contratos de venda de energia são instrumentos financeiros, sabe-se que uma usina térmica que produz energia somente nos períodos de preço spot elevado, pode atender seus contratos de fornecimento de energia com um custo efetivo inferior ao seu custo de operação, pois nos longos períodos de baixo preço, a usina pode comprar energia por um valor menor no mercado spot. Tratando-se de volatilidade de médio prazo, esta operação flexível permite ainda que a usina possa ser desligada nos meses em que os preços spot estão baixos e operar na em sua capacidade nominal nos meses em que eles estão altos. Em outras palavras, a flexibilidade operativa nas usinas térmicas é uma característica atraente no sistema brasileiro para elevar a rentabilidade dos projetos implementados.

Os tomadores de decisão devem escolher o subconjunto de projetos a ser implementado, pois especialmente em tempos de crise econômica, as empresas podem não dispor de recursos financeiros (próprios ou captados no mercado financeiro), para a implementação de todos os projetos candidatos.

Estas empresas possuem diferentes oportunidades de investimento. E independente do porte da companhia, os decisores desses agentes tentam responder à algumas questões [Aid 2012]:

- . Deve-se investir em produção de energia ou os clientes devem ser atendidos através de posições no mercado de energia?
- . Em qual(is) tipo(s) de ativo(s) de produção deve-se investir?
- . Quanto de cada tipo de ativo a empresa deve possuir?
- . Deve-se investir agora ou esperar?

Muitas vezes estes gestores e decisores não utilizam de forma adequada as ferramentas computacionais para a análise de um grande número de projetos, baseando-se ainda em intuição, experiência e métodos simples e limitados para a tomada de decisões de investimento tão relevantes [April 2003]. Logo, podem não ser conduzidos às melhores decisões.

Em outros casos, são utilizadas apenas as metodologias clássicas para avaliação e otimização desses projetos de investimento, que são baseadas na busca da maximização dos retornos (VPL, TIR, etc.), juntamente com a minimização do risco (desvio padrão do VPL, variância, etc.).

Ainda assim, estes métodos tradicionais de avaliação podem não conseguir tratar de maneira adequada as flexibilidades gerenciais (opções reais) características dos projetos e atender à grande necessidade de previsão para o gerenciamento das imprecisões, riscos e incertezas, devido às possíveis dificuldades intrínsecas de solução e modelagem matemática (multivariáveis) dos problemas e ao tratamento dessas opções reais. Dessa forma, existindo ainda um amplo espaço para o desenvolvimento e aplicação de modelos alternativos, como os baseados na Teoria de Opções Reais, inclusive os complementados pela a utilização dos métodos de Inteligência Computacional, tais como Lógica Fuzzy, Redes Neurais e Algoritmos Genéticos.



Este artigo apresenta uma metodologia híbrida de análise de portfólio de projetos de investimento em revamps de usinas termelétricas no Brasil. Na área industrial, utiliza-se o termo genérico “*revamp*” para definir qualquer projeto referente à adequação, modificação, modernização, revitalização, ampliação e reformas em geral, de plantas industriais de qualquer natureza, inclusive usinas de geração termelétrica. A metodologia de análise proposta é dividida em 2 etapas:

. Etapa 1: modelo de avaliação por Opções Reais Fuzzy (combinação da Teoria das Opções Reais com a Teoria dos Números Fuzzy) para determinar os retornos, riscos e custos de investimento de cada projeto.

. Etapa 2: aplicação de um Algoritmo Genético de otimização multiobjetivo, para a seleção dos portfólios a serem implementados, por nível de valor total de investimento, representando as limitações orçamentárias dos agentes.

A figura 1 abaixo apresenta esquematicamente esta metodologia híbrida:

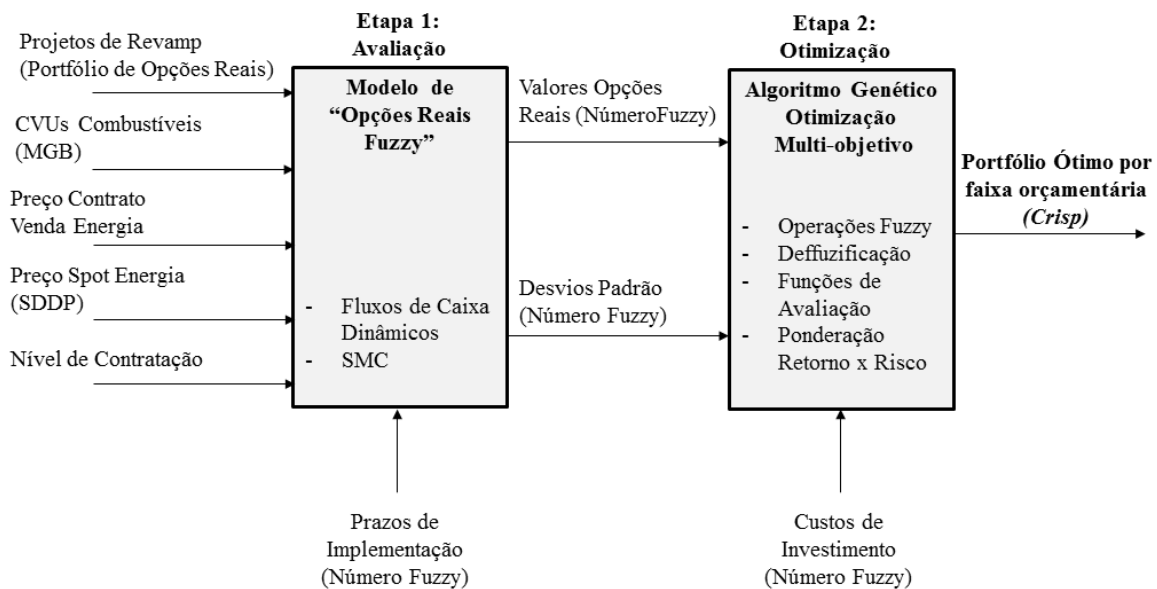


Figura 1: Metodologia Híbrida

2. Opções Reais em Energia e Geração Térmica de Eletricidade

A desregulamentação dos mercados energéticos em diversos países, inclusive no Brasil, incorporou uma série de incertezas e flexibilidades aos agentes, investidores e gestores de risco deste segmento da economia. Assim, as ferramentas tradicionais de análise de investimentos podem se tornar limitadas para tratar adequadamente essas incertezas e flexibilidades, abrindo espaço para a utilização da Teoria de Opções Reais na análise de investimentos do Mercado de Energia Elétrica no Brasil.

Nas últimas décadas, tem sido crescente a utilização da Teoria de Opções Reais pelas empresas de energia na avaliação de seus investimentos de capital [Triantis e Borison 2001]. No Brasil, a utilização de opções reais em aplicações práticas no Mercado de Energia pelas empresas também é crescente, destacando-se a Petrobras S.A., empresa integrada de energia, atuante em Petróleo, Gás Natural, Biocombustíveis e Energia Elétrica (principalmente em Geração Termelétrica). A Petrobras já obteve uma série de casos de sucesso com a utilização da Teoria de Opções Reais em diferentes aplicações nas análises de seus investimentos, em suas diversas áreas de atuação [Dias 2005].

Inicialmente, como abordagem geral dos tipos de opções reais na avaliação econômica de termelétricas foram identificadas as seguintes opções [Griffes et al. 1999]:



- . Opção de crescimento;
- . Opção de abandono;
- . Opção de espera;
- . Opção de conversão;
- . Opção de repotencialização;
- . Opção de flexibilidade operacional.

Posteriormente, também foram abordadas as seguintes alternativas, que podem ser identificadas como opções reais na avaliação de investimentos de uma empresa de energia [Aid 2012]:

- . Substituição de partes de uma turbina com impacto na eficiência de produção (opção de troca);
- . Fechamento da usina antes do final da vida útil (opção de abandono/parada);
- . Fechamento sem a desmontagem da usina, para utilização posterior anos depois (opção de parada temporária).

No Brasil, alguns trabalhos também já foram desenvolvidos. Em um deles, foram identificadas as seguintes opções reais para uma Usina Termelétrica a Gás Natural instalada no Subsistema Sudeste e despachada de forma centralizada pelo ONS. Neste trabalho, foram abordadas as seguintes opções [Angst 2007]:

- . Opção de troca de insumo;
- . Opção de redução da oferta de energia ao Sistema Elétrico;
- . Opção de expansão.

A opção real que tem sido mais analisada e precificada na avaliação de termelétricas é a opção da flexibilidade operacional de parar temporariamente. Normalmente, nesta avaliação considera-se que quando o preço spot da energia elétrica está acima do custo variável de geração é lucrativo operar a planta. No entanto, se o custo variável for superior, normalmente há a flexibilidade de reduzir o nível de geração ou parar a operação, para evitar perdas financeiras.

O custo variável é obtido pelo produto do “*Heat Rate*” (eficiência da usina, que indica a quantidade de combustível necessária para produzir 1 MWh) com o preço spot do combustível, sendo interpretado como o preço de exercício de uma opção de compra (call option). O valor do projeto é determinado integrando-se o valor das opções de gerar a cada instante ao longo da vida útil do projeto.

3. Opções Reais Fuzzy

A avaliação de opções reais é normalmente realizada através dos métodos de Direitos Contingenciais (“*Contingent Claims*”), Modelo de Black & Scholes, Modelo de Black, Scholes & Merton (considerando o pagamento de dividendos), Árvores Binomiais e a Simulação de Monte Carlo. Todos esses métodos utilizam a teoria de probabilidades para o tratamento das incertezas, porém, essas incertezas e imprecisões nas estimativas de cenários futuros podem ser tratadas através de outros métodos, utilizando outras teorias, tais como a Teoria dos Conjuntos Fuzzy e a Lógica Fuzzy.

A Teoria dos Conjuntos Fuzzy [Zadeh 1965] foi desenvolvida para tratar elementos imprecisos em nossos processos de tomada de decisão, e estes elementos se mostram como o fator da teoria que permite o tratamento de praticamente todas as decisões em um ambiente de incerteza. Informalmente, um conjunto fuzzy é uma classe de objetos onde não existe uma barreira totalmente definida entre os objetos que pertencem a esta classe e os que não pertencem a ela [Bellman e Zadeh 1970].

Na clássica Teoria dos Conjuntos, um elemento simplesmente pertence ou não-pertence a um determinado conjunto. Ou pode-se dizer que o elemento é completamente pertinente ou impertinente ao conjunto. Este tipo de função característica é denominada Função de Pertinência Bivalente [Pacheco e Velasco 2007]. Esta lógica bivalente (falso/verdadeiro) é comumente utilizada em aplicações financeiras (e se apresenta como premissa básica da teoria de



probabilidades). Porém, a lógica bivalente apresenta um problema, pois geralmente as decisões financeiras precisam ser tomadas em ambientes e/ou situações de incerteza.

Incertezas no contexto das finanças e nas avaliações de investimentos significam que se mostra praticamente impossível a obtenção de estimativas corretas e precisas, como por exemplo, para custos de investimentos e fluxos de caixa futuros. Conjuntos fuzzy são conjuntos em que os elementos têm graus de pertinência, permitindo, por exemplo, a representação de “um custo de investimento em torno de 100 milhões de dólares”. Isso significa que os conjuntos fuzzy podem ser utilizados para formalizar a falta de acurácia normalmente existente nas decisões humanas e como uma forma de representação de vagueza, incerteza, ou conhecimento impreciso, por exemplo, para a estimativa de fluxos de caixa futuros, onde a razão humana é especialmente adaptável. As metodologias baseadas nos conjuntos fuzzy podem romper a tradicional linha entre as análises qualitativas e quantitativas, desde que a modelagem reflita mais o tipo de informação que está sendo estudada do que a preferência dos analistas e pesquisadores [Tarazo 1997].

Especialmente na área econômico-financeira, o uso da Teoria dos Conjuntos Fuzzy leva a resultados que não poderiam ser obtidos pelos métodos tradicionais [Ponsard 1988]. A Teoria dos Conjuntos Fuzzy e a Lógica Fuzzy vêm sendo adotadas em modelos de avaliação de opções financeiras, como por exemplo, na precificação binomial de uma opção com um “*pay-off*” Fuzzy [Muzzioli e Torricelli 2000] e na precificação de opções financeiras européias pelo modelo de Black-Scholes [Yoshida 2001].

Além disso, também foram propostos modelos de avaliação e precificação de opções reais, com a utilização dos conjuntos fuzzy [Carlsson e Fullér 2003], [Collan et al. 2003], [Carlsson e Majlender 2005].

Posteriormente, foram desenvolvidas aplicações de “Opções Reais Fuzzy” na avaliação de projetos de investimento em diversas áreas, tais como Tecnologia da Informação [Chen et al. 2007], Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) [Tolga e Kahraman 2008], Indústria [Collan 2004] e aviação [Datar e Matthews 2007].

4. “*Pay-off*” para a avaliação de Opções Reais a partir de Números Fuzzy

Um método prático alternativo baseado na Teoria das Probabilidades para o cálculo do valor da opção real [Mathews e Salmon 2007] apresenta resultados equivalentes sob o ponto de vista matemático ao modelo clássico para precificação de opções [Black e Scholes 1973]. Este método alternativo gera e simula distribuições de probabilidades para o Valor Presente Líquido (VPL) dos retornos futuros do projeto. Essas distribuições de probabilidades dos fluxos de caixa futuros são utilizadas para gerar uma distribuição de “*pay-offs*”.

Neste trabalho, a etapa de avaliação é feita a partir dessa distribuição de “*pay-offs*”, e da combinação da Teoria das Opções Reais com a Teoria dos Números Fuzzy, considerando as diversas oportunidades de investimentos como um portfólio de opções reais. Para esta avaliação, é desenvolvido um método para a valoração da Opção Real a partir de fluxos de caixa dinâmicos gerados por Simulações de Monte Carlo, considerando o modelo de remuneração das térmicas e as incertezas associadas: nível de despacho da usina, nível de contratação, preço do contrato e séries futuras de preço spot (PLD) da energia elétrica e custos variáveis unitários (custos dos combustíveis). O cálculo do valor das opções se dá a partir da diferença entre os fluxos de caixas das usinas com as flexibilidades e os valores iniciais sem o exercício dessas opções, dentro do horizonte de estudo.

Cada uma das incertezas associadas tem sua representação adequada no modelo proposto, sendo as incertezas de prazo de implementação e custos de investimento representados como números fuzzy (Opções Reais Fuzzy).

A quantificação dos índices de retorno e risco para a otimização do portfólio de projetos de investimentos são saídas da modelo da etapa de avaliação. Este método mostra que o valor da Opção Real (medida de retorno) pode ser entendido como a média ponderada probabilística da distribuição de “*pay-offs*”. Números Fuzzy Triangulares estão englobados na área de Inteligência Computacional e são utilizados para representar incertezas possibilísticas. Neste caso, a



distribuição futura esperada dos possíveis custos e receitas do projeto de investimento, assim como a lucratividade e rentabilidade desses resultados através do VPL. O VPL Fuzzy é um número fuzzy e representa a distribuição dos “*pay-offs*” resultantes do projeto.

A imprecisão no processo de estimativa de prazo de um projeto pode ser tratada através de uma estimativa de 3 pontos, considerando os seguintes cenários de prazo, para definir a faixa aproximada do prazo de implementação dos projetos [PMI 2013]:

- . Mais Provável (MP) – estimativa baseada na duração do projeto, dadas suas atividades e os recursos prováveis de serem designados, com suas produtividades e disponibilidades para a execução das atividades do projeto, levando em conta as dependências e possíveis interrupções;

- . Otimista (O) – o prazo do projeto é baseado no melhor cenário de duração;

- . Pessimista (P) – o prazo do projeto é baseado no pior cenário de duração.

Neste artigo, os investimentos se referem a construções, ampliações e revitalizações de usinas térmicas, existindo incertezas na realização destas estimativas de prazo. Além da dificuldade de se estabelecer uma distribuição de probabilidades para representar este risco, devido ao provável número reduzido de projetos realmente similares implantados, ou com informações históricas confiáveis e/ou disponíveis.

Como os cálculos dos VPLs dos retornos se dão a partir de fluxos de caixa mensais, para cada cenário de prazo de implementação do projeto (Otimista, Mais Provável, Pessimista), estes valores são diferentes, pois no modelo a remuneração expandida passa a ocorrer após este prazo, que tem valor diferente em cada cenário. Logo, em cada projeto, o VPL apresenta valores diferentes para cada um desses cenários de prazo, podendo estes valores esperados serem representados através de números fuzzy, assim como, os Valores Esperados das Opções Reais (Opções Reais Fuzzy) e seus respectivos desvios-padrão. A figura 2 abaixo apresenta a representação do valor da opção real (Número Fuzzy Triangular):

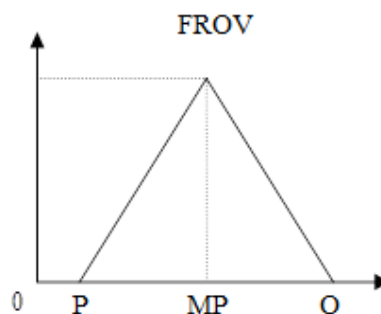


Figura 2: Distribuição Fuzzy dos Valores Esperados da Opção Real (EFROV)

5. Algoritmos Genéticos na Otimização de Portfólios

Os algoritmos genéticos (AGs) estão englobados na área de Inteligência Computacional, que contém os sistemas inspirados na natureza, que utilizam os processos naturais para solucionar problemas complexos reais e que têm um grande espaço de busca. Os algoritmos genéticos são embasados na genética de organismos vivos para procurar soluções ótimas ou sub ótimas. Isto acontece devido à codificação de cada possível solução de um problema em uma estrutura chamada cromossomo, que é formado por uma cadeia de caracteres.

Nos algoritmos genéticos são particularmente adaptados a problemas não lineares e descontínuos e a todos aqueles problemas que podem falhar em um esquema tradicional de otimização. Desta maneira, pode-se inferir que eles são uma boa ferramenta para análise de carteiras de projetos de investimentos. O benefício fundamental de um otimizador baseado em algoritmos genéticos é sua habilidade para tratar problemas que têm muitas restrições [Lazo 2000].

Para a otimização de portfólios, já se mostrou viável a aplicação de um AG associado a um método multi critério, considerando a média e a variância dos VPLs como medidas de retorno



e risco, e a função de avaliação do algoritmo com objetivos de “Maximizar a Média do VPL da Carteira” e “Minimizar a Variância do VPL da Carteira” [Barcelos et al. 2003].

6. Avaliação do Portfólio de Projetos de Revamp em Usinas Termelétricas

Para a aplicação do modelo proposto, é considerado como exemplo numérico um portfólio de 15 projetos de investimento hipotéticos, com a modelagem das incertezas, imprecisões, e possibilidade de exercício das opções reais dos diversos tipos de projetos integrantes da carteira em avaliação. Foram considerados os seguintes tipos de projetos, equivalentes a um portfólio de opções reais:

.Ampliação de usinas existentes (Opção de Expansão);

.Transformação de usinas de ciclo térmico simples para ciclo combinado (Opção de Repotencialização);

.Conversão de usinas a Gás Natural para operação bicomcombustível, com Óleo Diesel como combustível alternativo (Opção de Mudança de Insumo).

Para a avaliação do portfólio, as diversas oportunidades de investimento a serem abordadas são representadas no modelo de forma a possibilitar a obtenção dos valores dos VPLs Fuzzy (retornos) e dos desvios-padrão desses VPLs (riscos), de modo a possibilitar a otimização através do AG.

No modelo, para os projetos de revamp abordados, além da flexibilidade operacional (gerar ou não gerar) já oferecida a um agente gerador proprietário de uma usina termelétrica no Brasil, conforme apresentado através do “VPrígido”, são oferecidos ao agente 3 tipos de opções reais de investimentos nas usinas existentes:

. Expansão Simples (Opção de Expansão);

. Fechamento de Ciclo (Opção de Repotencialização);

. Conversão para Bicomcombustível (Opção de Mudança de Insumo).

Na avaliação de opções reais, o VPL tradicional pode ser expandido da seguinte forma [Trigeorgis 1996]:

$$VPL \text{ Expandido} = VPL \text{ Estático} + \text{Valor da Opção Real}$$

Logo, os valores das usinas com o exercício das opções reais adicionais (VPLs Expandidos), resultantes das flexibilidades gerenciais, representadas pelas demais oportunidades de investimento (Opção de Expansão, Repotencialização e Mudança de Insumo). Os valores dessas opções reais, calculadas a partir das diferenças entre os Valores Presentes dos fluxos de caixa dinâmicos são representados conforme a equação:

$$Vopção = VP_{\text{expandido}} - VP_{\text{rígido}}$$

7. Otimização dos Portfólios

A tabela 1 apresenta o valor da opção real (medida de retorno) de cada projeto, resultante da etapa de avaliação é apresentado como um número fuzzy triangular, assim como seus respectivos desvios padrão (medida de risco). Da mesma forma que os prazos de implementação, para a representação dos custos estimados de investimento de cada projeto, também são utilizados números fuzzy triangulares para a representação da incerteza possibilística destes valores no modelo (Mais Provável, Otimista e Pessimista).

Projeto	Valor Esperado da Opção Real Fuzzy (MMBR\$)			Desvio Padrão Fuzzy da Opção Real (MMBR\$)			Custo de Investimento Fuzzy (MMBR\$)		
	P	MP	O	P	MP	O	O	MP	P
P1	[154,9	; 162,11	; 169,65]	[55,08	; 55,74	; 56,58]	[105	; 140	; 205]
P2	[496,19	; 531,11	; 579,88]	[103,21	; 104,08	; 105,78]	[320	; 380	; 460]
P3	[303,16	; 318,21	; 334,46]	[87,12	; 87,74	; 88,6]	[210	; 240	; 285]



P4	[270,56 ; 283,7 ; 309,08]	[92,84 ; 93,57 ; 94,95]	[175 ; 200 ; 250]
P5	[53,27 ; 53,94 ; 54,42]	[121,73 ; 122,4 ; 122,86]	[35 ; 40 ; 55]
P6	[51,76 ; 54,18 ; 55,52]	[36,11 ; 36,96 ; 37,53]	[30 ; 40 ; 60]
P7	[13,55 ; 13,75 ; 14,03]	[30,67 ; 31,05 ; 31,37]	[7 ; 10 ; 15]
P8	[182,69 ; 194,88 ; 202,11]	[53,65 ; 54,65 ; 55,09]	[155 ; 190 ; 210]
P9	[451,32 ; 490,16 ; 562,69]	[107,44 ; 108,52 ; 111,09]	[360 ; 410 ; 480]
P10	[35,23 ; 35,54 ; 36,14]	[78,23 ; 78,99 ; 80,09]	[20 ; 25 ; 35]
P11	[113,28 ; 120,12 ; 124,06]	[38,6 ; 39,63 ; 40,16]	[85 ; 80 ; 110]
P12	[49,75 ; 52,8 ; 57,06]	[25,58 ; 26,12 ; 26,73]	[115 ; 138 ; 150]
P13	[20,16 ; 22,3 ; 25,51]	[19,45 ; 19,74 ; 20,3]	[13 ; 17 ; 21]
P14	[20,74 ; 20,9 ; 21,1]	[48,92 ; 49,21 ; 49,32]	[11 ; 16 ; 20]
P15	[128,85 ; 139,85 ; 147,03]	[33,19 ; 33,76 ; 34,23]	[100 ; 120 ; 140]

Tabela 1: Dados de entrada do Algoritmo Genético de Otimização

Para a seleção do portfólio, o AG apresenta os seguintes objetivos: “Maximizar o Retorno Total” e “Minimizar o Risco Total do Portfólio”, para certa faixa de valor máximo de investimento total.

No modelo, o retorno do portfólio é dado pelo valor esperado total das opções reais do portfólio, sendo representado pelo somatório dos valores esperados (Fuzzy) de opções reais de cada projeto pertencente a um portfólio, conforme a equação:

$$FROV_{Portfolio} = \sum_{i=1}^n FROV_{Pi} x_i$$

Onde:

$FROV_{Portfolio}$ = Valor total do Portfólio de Opções Reais (Número Fuzzy Triangular);

$FROV_{Pi}$ = Valor esperado da Opção Real do Projeto “i” (Número Fuzzy Triangular);

x_i = Participação do Projeto “i” no Portfólio (0 ou 1), cromossoma do AG.

O risco do portfólio é dado pela variância total do portfólio, sendo representada a partir dos desvios-padrão (Fuzzy) decorrentes da avaliação de cada projeto:

$$\sigma_{Portfolio}^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_i x_j \sigma_{Pi} \sigma_{Pj} \rho_{i,j}$$

Onde:

$\sigma_{Portfolio}^2$ = Variância do portfólio (Número Fuzzy Triangular)

σ_{Pi} = Desvio-padrão do projeto “i” (Número Fuzzy Triangular)

σ_{Pj} = Desvio-padrão do projeto “j” (Número Fuzzy Triangular)

$\rho_{i,j}$ = Correlação entre os projetos “i” e “j”.

A estimativa simplificada destas correlações entre os pares dos tipos de projetos é obtida através de simulações entre os diferentes tipos de projetos avaliados simultaneamente e por testes de validação dessas correlações estimadas. Dessa forma, foram encontradas as seguintes correlações entre as opções de “revamp”: +0,98 entre projetos de expansão, +0,99 entre projetos de fechamento de ciclo, +0,99 entre projetos de conversão; +0,75 entre projetos de expansão e fechamento de ciclo; -0,41 entre projetos de expansão e conversão; -0,1 entre projetos de fechamento de ciclo e conversão.

A definição do valor limite de investimento total do portfólio é dada conforme a equação abaixo, e será representada como uma restrição no modelo:



$$I_{Portfólio} = \sum_{i=1}^n x_i I_i$$

Onde:

$I_{Portfólio}$ = Custo de Investimento do Portfólio (Número Fuzzy Triangular);

I_i = Custo de Investimento do Projeto “i” (Número Fuzzy Triangular);

x_i = Participação do Projeto “i” no Portfólio (0 ou 1), cromossoma do AG.

Para o cálculo do retorno total, variância, custo total de investimento do portfólio e VPL total, são aplicadas as operações de soma, subtração, multiplicação e divisão entre números fuzzy triangulares [Pessimista, Mais Provável, Otimista], conforme abaixo:

$$\begin{aligned} [P_1, MP_1, O_1] \oplus [P_2, MP_2, O_2] &= [P_1 + P_2, MP_1 + MP_2, O_1 + O_2] \\ [P_1, MP_1, O_1] \ominus [P_2, MP_2, O_2] &= [P_1 - O_2, MP_1 - MP_2, O_1 - P_2] \\ [P_1, MP_1, O_1] \otimes [P_2, MP_2, O_2] &= [P_1 P_2, MP_1 MP_2, O_1 O_2] \\ [P_1, MP_1, O_1] \oslash [P_2, MP_2, O_2] &= [P_1 / O_2, MP_1 / MP_2, O_1 / P_2] \end{aligned}$$

Uma vez definidas as metodologias de cálculo para os indicadores de retorno e risco do portfólio, o próximo passo é a definição das respectivas funções de avaliação para estes valores no AG, que são calculados a partir dos valores fuzzy. Neste trabalho, o método de aproximação é desenvolvido para normalizar estas funções de avaliação. Para desenvolvimento das funções de avaliação, os valores obtidos para os retornos e riscos dos portfólios, apresentados como números fuzzy, devem ser defuzzificados, para a avaliação pelo AG dos valores esperados (“crisp”) destes indicadores de retorno e risco, assim como para a restrição do valor do custo de investimento total do portfólio.

Para a solução do problema multi-objetivo, o modelo desenvolvido apresenta um índice de ponderação (λ), com coeficientes de variação que visam indicar a preferência do agente em relação à ponderação de retorno e risco na decisão de investimento. Dessa forma o problema de otimização (maximizar retorno e minimizar risco), permite que as funções de avaliação do AG possam ser convertidas em uma única função objetivo, conforme abaixo:

$$Max \quad \mu = \lambda \mu_{Retorno} + (1 - \lambda) \mu_{Risco}$$

Onde:

μ = Função de Avaliação do Algoritmo Genético

λ = Índice de Ponderação Retorno x Risco

Para cada portfólio avaliado, a representação do problema de otimização se dá através da obtenção do portfólio ótimo para um valor máximo de investimento total, representando as limitações orçamentárias reais dos agentes. Pois o modelo visa indicar o subconjunto ótimo de projetos a ser implementado, dentro de uma faixa orçamentária, considerando o problema real das organizações muitas vezes não terem disponibilidade de recursos financeiros suficientes para investir em todos os projetos candidatos à implementação. Para cada portfólio, estas limitações orçamentárias serão representadas através da seguinte restrição no AG:

$$EI_{Portfólio} \leq I_{máximo}$$

Onde:

$EI_{Portfólio}$ = Valor esperado (crisp) do custo total de investimento do portfólio;



$$I_{\text{máximo}} = \text{Valor máximo total a ser investido pelo agente em projetos de revamp.}$$

8. Resultados

A tabela 2 apresenta os resultados da otimização do exemplo numérico estudado, considerando a mesma importância do agente para as funções objetivo de retorno e risco ($\lambda=0,5$), através dos portfólios ótimos encontrados pelo AG para cada faixa de investimento total, assim como os valores totais de retorno, desvio padrão, VPL, coeficiente de variação (razão desvio padrão / retorno) e função de avaliação do AG, com 50 % de taxa de crossover e 10% de taxa de mutação.

Investimento Máximo Total (MMBR\$)	Portfólio Ótimo ($\lambda=0,5$)															Retorno Total (MMBR\$)	Desvio Padrão (MMBR\$)	VPL (MMBR\$)	Coef. de Variação	Função de Avaliação do A.G.
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15					
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	121,92	84,39	23,80	0,69	0,5122
200	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	211,95	94,25	9,98	0,44	0,5276
300	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	412,03	126,08	105,37	0,31	0,5579
400	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	566,02	152,06	155,16	0,27	0,5782
500	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	672,42	178,14	172,71	0,26	0,5883
600	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	791,21	183,38	185,19	0,23	0,6090
700	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	978,05	216,32	260,53	0,22	0,6279
800	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1.027,57	212,52	264,05	0,21	0,6397
900	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1.192,14	256,69	281,22	0,22	0,6446
1000	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1.355,60	287,29	339,01	0,21	0,6546
1100	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1.400,54	276,14	328,92	0,20	0,6712
1200	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1.543,42	304,15	348,14	0,20	0,6774
1300	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1.598,66	318,30	335,48	0,20	0,6766
1400	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1.741,54	348,11	354,69	0,20	0,6780
1500	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1.863,45	383,59	378,49	0,21	0,6672
1600	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1.988,76	414,03	447,84	0,21	0,6597
1700	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	2.078,79	436,18	434,03	0,21	0,6522
1800	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	2.118,97	451,41	347,43	0,21	0,6420
1900	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	2.240,89	480,91	371,23	0,21	0,6292
2000	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	2.337,67	516,64	376,83	0,22	0,6008
2100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2.551,41	611,27	421,88	0,24	0,5000

Tabela 2: Combinações de projetos gerados pelo AG de Otimização

Estes resultados definem para cada faixa de investimento total disponibilizado pelo agente, qual seria o subconjunto ótimo de projetos a ser implementado. A relação retorno x risco de cada portfólio está relacionada ao valor da função objetivo do AG. Neste caso, a faixa de investimento com melhor relação retorno x risco é a de R\$ 1400 milhões, com retorno esperado de R\$1741 milhões, desvio padrão de R\$348 milhões e valor de avaliação do AG de 0,678. Nesta faixa, seriam implementados 7 projetos, sendo 2 expansões (P4 e P15), 3 fechamentos de ciclo (P2, P8 e P9) e 2 conversões para bicombustível (P10 e P14).

9. Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho, foi possível concluir que na avaliação de projetos e tomada de decisão de investimentos sob condições de incerteza, se mostra como uma alternativa adequada aos métodos tradicionais, a utilização da Teoria de Opções Reais combinada com técnicas de Inteligência Computacional, neste caso, Números Fuzzy e Algoritmos Genéticos.

A escolha do portfólio ótimo de projetos de investimento em “revamps” em usinas de Geração Termelétrica pode ser um destes casos, pois existem várias fontes de incerteza associados aos projetos e remunerações destas usinas, tais como: níveis de contratação e de despacho, Preço de Liquidação de Diferenças (PLD), Custos Variáveis de Geração para o Gás Natural e para o Diesel, Custos de Investimentos e Prazos de Implementação.

Geralmente, nas avaliações de portfólios de projetos em grandes corporações, os projetos são classificados por ordem de prioridade quando avaliados de maneira individual. Porém, estas avaliações podem ser inadequadas, pois o subconjunto ótimo pode variar de acordo



com o montante total a ser investido. O método de otimização de carteiras pode ser um elemento adicional a ser considerado nas decisões de investimento em projetos pelas empresas.

Este trabalho também visou mostrar que de acordo com a faixa orçamentária e o valor esperado da total das opções do portfólio de opções reais, a prioridade dos projetos pode ser alterada, mostrando-se a relevância da obtenção do portfólio ótimo para cada faixa orçamentária total, ressaltando a utilidade da metodologia desenvolvida como uma ferramenta de apoio às decisões estratégicas de investimento para grandes agentes do mercado de energia, devido ao grande número de oportunidades disponíveis diante de sua capacidade financeira. Fazendo com que as empresas possam decidir, de forma similar ao mercado financeiro, quais ativos melhor se ajustam às carteiras corporativas.

Os resultados da avaliação apresentados como números fuzzy mostram aos decisores as faixas de variabilidade do valor agregado por cada uma das opções, sendo realizada a defuzzificação apenas na etapa de otimização. Estes resultados se mostram relevantes e importantes na atualidade e no futuro dos mercados energéticos no Brasil, tendo em vista a crescente integração entre os diversos mercados e empresas de energia elétrica, combustíveis e outras fontes de energia.

Como trabalhos futuros, pode ser sugerida a extensão do modelo proposto para a avaliação de projetos em outros tipos de usinas de geração de energia, e outros tipos de plantas industriais; a representação de outras incertezas como números fuzzy na etapa de avaliação e na etapa de otimização, a utilização de outros métodos para a defuzzificação, e a comparação do AG com outros métodos de avaliação multicritério.

10. Referências

- . Aïd, R. (2012). A Review of Optimal Investment Rules in Electricity Generation, Rapport de Recherche, RR-FiME-12-03.2012.
- . Aneel -Agência Nacional de Energia Elétrica (2017). Banco de Informações de Geração. Web page <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> . Acessado: 02-04-2017.
- . Angst, C.(2007). Avaliação de Investimento: Avaliação de Usina Termelétrica a Gás Natural em ciclo aberto no Brasil, sensibilidade a riscos e opções relacionadas. Trabalho de Conclusão de Curso. Ibmecc Business School. Rio de Janeiro.
- . April, J. et al (2003). Advanced Optimization Methodology in the Oil and Gas Industry: The Theory of Scatter Search Techniques with simple Examples, Texas, Dallas: SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, Paper, SPE 82009, 7pp, 2003a.
- . Barcelos, F.B.; Hamacher, S. e Pacheco, M.A. (2003). Determinação da Fronteira de Eficiência através da Estratégia de Pareto: Aplicação em Carteiras de Projetos de Petróleo e Gás. Artigo em conferência. In Anais do XXXV SBPO.
- . Bellman, R.E. e Zadeh, L.A. (1970). Decision-making in a Fuzzy Environment , Management Science, vol.17, pp. B141-B164.
- . Black, F e Scholes, M. (1973). The Pricing of Options and Corporate Liabilities, Journal of Political Economy 81.
- . Carlsson, C. e Fullér, R. (2003). A Fuzzy approach to Real Options Valuation, Fuzzy Sets and Systems, vol.139, no.2, pp.297-312.
- . Carlsson, C. e Majlender, P. (2005). On Fuzzy Real Options Valuation, Proceedings of the 9th Annual International Conference on Real Options, Paris, France.



- . Chen, T.; Zhang, S. e Yu, B. (2007). Fuzzy Real Options Analysis for IT Investment in Nuclear Power Station, Proceedings of the 7th International Conference on Computational Science, pp.953-959, Beijing, China.
- . Collan, M.; Carlsson, C. e Majlender, P. (2003). Fuzzy Black and Scholes Real Options Pricing, Journal of Decision Systems, vol.12, no.3-4, pp.341-416.
- . Collan, M. (2004). Giga-Investments: Modeling the Valuation of Very Large Industrial Real Investments, PhD.Thesis, Turku Centre for Computer Science, Turku, Finland.
- . Datar, V. e Matthews, S. (2007) A Practical Method for Valuing Real Options: the Boeing Approach, Journal of Applied Corporate Finance, vol.19, no.2, pp.95-104.
- . Dias, M.A.G. (2005). Opções Reais Híbridas com Aplicações em Petróleo, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Industrial, PUC-Rio.
- . EPE-Empresa de Pesquisa Energética (2016). Balanço Energético Nacional 2016 – Ano Base 2015.
- . Griffes, P.; Hsu, M. e Kahn, E.(1999). Power Asset Valuation: Real Options, Ancillary Services, and Environmental Risks, Chapter 5, The New Power Markets: Corporate Strategies for Risk and Reward, Risk Books.
- . Lazo, J. G. L.(2004). Determinação do Valor de Opções Reais por Simulação Monte Carlo com Aproximação por Números Fuzzy e Algoritmos Genéticos. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-Rio.
- . Mathews, S. e Salmon, J. (2007). Business Engineering: a Practical Approach to Valuing High-risk, High-return Projects using Real Options, in Tutorials in Operational Research, P.Gray, Ed., Informs, Hanover, USA.
- . Muzzioli, S. e Torricelli, C. (2000). A Model for Pricing an Option with a Fuzzy Pay-Off, Fuzzy Economics Review, vol.6, no.1, pp.49-62.
- . Pacheco, M. A. C. e Vellasco, M. M. B. (org) (2007). Sistemas Inteligentes de Apoio a Decisão, Análise Econômica de Projetos de Desenvolvimento de Campos de Petróleo sob Incerteza, Editora PUC-Rio.
- . PMI – Project Management Institute (2013). A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide), Fifth Edition.
- . Tarazo, M. (1997). A Methodology and a Model for Qualitative Business Planning, International Journal of Business Research, vol.3, no1,PP.41-62.
- . Tolga, C. e Kahraman, C. (2008). Fuzzy Multiattribute Evaluation of R&D Projects using a Real Options Valuation Model, International Journal of Intelligent Systems, vol.23, no.11, pp.1153-1176.
- . Triantis, A. J. e Borison, A. (2001). Real Options: State of the Practice, Journal of Applied Corporate Finance.
- . Trigeorgis, L. (1996). Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation. The MIT Press.
- . Yoshida, Y. (2001). The Valuation of European Options in Uncertain Environment, European Journal of Operational Research, vol.135, no.2, pp.303-310.
- . Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy Sets, Information and Control, vol.8, PP.338-353.