CARTEIRA DE INVESTIMENTOS FORMADA POR CRIPTOMOEDAS: APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

Helena Honorato Feliciano Oliveira (Ufscar) - helenahfoliveira@gmail.com

Flávio Leonel de Carvalho (UFSCar) - flavio@ufscar.br

Resumo:

O presente artigo busca auxiliar o processo de tomada de decisões referente a escolha de criptomoedas a compor uma carteira formada exclusivamente por moedas virtuais, bem como auxiliar na definição do percentual de participação de cada uma delas nesse portfólio. Para isso analisou-se a variação diária do preço de fechamento das 10 principais criptomoedas – Bitcoin, Etherium, Ripple, Bitcoin Cash, Litecoin, Monero, Enigma, Dash, zCash e EOS – e empregando a Teoria dos Portfólios e o Método de Programação Não Linear do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) foi possível definir um portfólio ótimo formado com apenas três criptomoedas: Litecoin (44,14%), Enigma (49,17%) e EOS (6,69). Embora esse resultado minimize a relação risco e retorno, mensurado pelo coeficiente de variação dos portfólios criados, e reduza os riscos específicos das moedas analisadas, é incapaz de diminuir o risco sistemático associado ao mercado de moedas virtuais. Tal constatação é inferida com base na correlação positiva existente entre as criptomoedas componentes da amostra.

Palavras-chave: *criptomoedas; risco; retorno; otimização; programação não linear.*

Área temática: *Mercado Financeiro, de Crédito e de Capitais*

CARTEIRA DE INVESTIMENTOS FORMADA POR CRIPTOMOEDAS: APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

Resumo

O presente artigo busca auxiliar o processo de tomada de decisões referente a escolha de criptomoedas a compor uma carteira formada exclusivamente por moedas virtuais, bem como auxiliar na definição do percentual de participação de cada uma delas nesse portfólio. Para isso analisou-se a variação diária do preço de fechamento das 10 principais criptomoedas – Bitcoin, Etherium, Ripple, Bitcoin Cash, Litecoin, Monero, Enigma, Dash, zCash e EOS – e empregando a Teoria dos Portfólios e o Método de Programação Não Linear do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) foi possível definir um portfólio ótimo formado com apenas três criptomoedas: Litecoin (44,14%), Enigma (49,17%) e EOS (6,69). Embora esse resultado minimize a relação risco e retorno, mensurado pelo coeficiente de variação dos portfólios criados, e reduza os riscos específicos das moedas analisadas, é incapaz de diminuir o risco sistemático associado ao mercado de moedas virtuais. Tal constatação é inferida com base na correlação positiva existente entre as criptomoedas componentes da amostra.

Palavras-chave: criptomoedas; risco; retorno; otimização; programação não linear.

Área temática do evento: Mercados Financeiro, de Crédito e de Capitais

1 INTRODUÇÃO

A forma mais comum de adquirir bens e serviços é através de moedas como o Dólar, Euro, Libra e o Real, que podem ser trocadas fisicamente por produtos ou serviços. As moedas seguem regulamentações governamentais, tendo sua emissão e valor controlado pelos bancos centrais. Recentemente, foram criadas as moedas virtuais ou criptomoedas, que também são mecanismos de troca, mas não submetidos a uma regulamentação centralizada.

Em 2008, época de crise econômica mundial, houve grande instabilidade das moedas reais e muitas pessoas passaram a buscar alternativas de investimento sou a utilizar moedas digitais livres como alternativas às moedas reais (TRESS; ANASTÁCIO, 2017).As moedas virtuais não teriam nacionalidade ou vínculo com autoridades monetárias e, portanto, não correria o risco de apreensão por parte dos governos e não estariam expostas a impostos inflacionários(GARCIA, 2014). Nesse cenário, conforme Silveira (2015), a Bitcoin passou a ser vista como uma alternativa viável. Sendo considerada a primeira moeda digital mundialmente descentralizada (BENICIO; CRUZ; SILVA, 2014).

O uso de moedas virtuais trouxe muitas inovações. Dentre elas pode-se citar o anonimato de seus usuários. Isso ocorre, pois o sistema registra as novas transações através do histórico desde a criação de determinada moeda por meio de chaves públicas, mas sem a identificação pessoal do usuário(GARCIA, 2014). Por outro lado, conforme Garcia (2014), o anonimato e a não submissão à regulamentação jurídica de uma instituição oficial contribuíram para a rejeição das criptomoedas por parte dos governos de alguns países.

Apesar disso, houve um aumento no número de usuários, principalmente devido às baixas taxas para utilização desses ativos, à maior liberdade que proporcionam (não há restrições de horários ou datas de funcionamento) e à eliminação da possibilidade de expropriação financeira por governos ou bancos. Assim, ao mesmo tempo em que o número de usuários das criptomoedas aumentou, as medidas para sua proibição, ou severas restrições, também cresceram em diversos países (GARCIA, 2014).

Nesse cenário, a falta de regulamentação e acompanhamento governamental torna a questão de segurança ainda mais preocupante. A segurança contra duplos pagamentos e a irreversibilidade de transações são garantidas por um mecanismo de registro distribuído aos milhares de computadores conectados em rede (ponto-a-ponto) denominado *Blockchain*. Por esse mecanismo todos os computadores possuem uma cópia idêntica do histórico de transações da moeda, impedindo que um determinado indivíduo provoque alterações em seu registro sem que a moeda seja excluída da rede. O histórico é registrado em toda a rede e é sempre utilizado no processo de validação das operações, impedindo a utilização duplicada da moeda pelo mesmo usuário ou evitando fraudes.

Segundo Tress e Anastácio (2017), o *Blockchain* é uma possibilidade de autorregulação do sistema financeiro sem depender de governos ou bancos. O próprio sistema se abastece, pois as operações são validadas pelos mineradores, imediatamente registradas em toda rede e possuem rígidos controles de segurança assegurados pela tecnologia do próprio sistema(BARRA, 2018).

Para a utilização das criptomoedas cada usuário possui uma chave pública e outra privada. A chave pública é a identificação da conta no mercado digital, as transações são vinculadas a essa chave, e a chave privada é utilizada apenas pelo dono da carteira digital para acessar e para permitir a realização de transações(NAKAMOTO, 2008). Por esse ser um sistema que funciona totalmente independente, seu anonimato pode encorajar operações ilegais como compras de armas, drogas, lavagem de dinheiro e terrorismo (MARTINS, 2016).

Levando em conta que as criptomoedas possuem características totalmente inovadoras, o desafio de definir sua natureza jurídica é grande, ainda mais para países como o Brasil, cujo sistema jurídico baseia-se no direito positivo (SILVA, 2017). Outro aspecto importante é o fato da tecnologia não ter segurança contratual, o que faz com o que os usuários não tenham apoio governamental, ou de órgãos de segurança, no caso de fraudes ou perda da chave privada, que é insubstituível (BENICIO; CRUZ; SILVA, 2015).Também existe a possibilidade de concorrência com as moedas reais, o que leva ao risco de desestabilização de preços das moedas virtuais sem que haja a atuação de bancos centrais com a finalidade de interferir em suas cotações(GARCIA, 2014).Desse modo, a alta variabilidade nos preços das criptomoedas podem provocar riscos significativos aos investidores, sobretudo considerando que há moedas com grande valorização, como o Bitcoin, enquanto outras, o zCash por exemplo, sofreram redução em seu valor desde o lançamento.

Uma possível alternativa para a redução dos riscos seria a formação de carteiras de investimentos formadas exclusivamente por criptomoedas. Assim seria possível reduzir o risco específico associado a uma determinada criptomoeda, a perda em uma poderia ser compensada por ganhos em outra. No entanto, para que a redução do risco ocorra é necessário selecionar papéis que sejam inversamente correlacionados. Desse modo, a decisão de seleção, bem como do percentual de participação de cada moeda virtual na carteira seria fundamental para a efetiva redução dos riscos.

Diante desse contexto, questiona-se: seria possível reduzir o risco dos investimentos em criptomoedas com a formação de um portfólio formado exclusivamente por moedas virtuais? Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar o relacionamento entre risco e retorno e a possibilidade de criação de portfólio formado exclusivamente por criptomoedas.

Para isso, baseando-se na teoria de portfólios de Markowitz (1952) e com o uso do Método de Programação Não Linear do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), buscou-se analisar a relação entre o risco e retorno das dez criptomoedas mais negociadas e a possibilidade de combinação desses papéis em uma carteira ótima de investimentos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Apesar da rejeição das criptomoedas por diversos governos, muitos investidores as enxergam como uma alternativa de investimentos, dado a ausência de taxas governamentais, o anonimato e a possibilidade de ganhos, por conta de seu grande potencial de valorização. Porém, é necessário ressaltar que sua alta volatilidade nos preços torna o investimento mais complexo e com elevado risco (BARBOSA, 2016).

Poucos estudos investigaram a importância das criptomoedas no Brasil. Sendo que os trabalhos abordam em sua maioria a importância da inovação tecnológica introduzida pelo *Blockchain* (GARCIA, 2014). Como esse sistema tem um registro único e compartilhado, não é possível que seja controlado por nenhum agente, o que torna falhas as tentativas de controle e regulação, já que o próprio sistema exige que todas as transações passem por aprovações coletivas, para que só assim sejam consolidadas, ou seja, a própria estrutura do sistema faz o papel de regulamentação (ANTUNES; FERREIRA; BOFF, 2015).

O surgimento da primeira moeda virtual é recente e ocorreu em 2008, muitos autores defendem que as criptomoedas foram uma resposta à crise econômica (GARCIA, 2014) e de credibilidade pelo qual as moedas reais e o mercado financeiro passavam nesse período. Inicial foi criada a Bitcoin, posteriormente surgiram outras moedas digitais, também como resposta à crise econômica, na qual havia grande instabilidade financeira, insegurança política e econômica, e o sistema *Blockchain* representou uma reação inovadora (BARBOSA,

2016).A popularidade das moedas virtuais cresceu muito desde então, Pires (2017) pontua que as localidades de maior volumes de moedas mineradas no mundo são Estados Unidos em primeiro lugar, seguido por China e Europa.

Para adquirir criptomoedas é necessário comprá-las ou obtê-las por meio da mineração. A mineração é o processo no qual um programador analisa as transações desde a criação da moeda até a transação atual para que assim, o processo seja consolidado e validado. Para melhor entender o processo de mineração, Simão, Macedo e Leite Filho (2017) destacam que a execução das transferências de valor entre os indivíduos são divididos em etapas. Inicialmente cada nova transação é transmitida para todos os computadores (nós) conectados à rede. Na sequência, cada computador coleta as novas transações em um bloco (*Blockchain*), de modo que cada unidade se empenha em encontrar uma prova de realização da transação para o seu bloco. Assim que o computador (nó) encontra uma prova de realização ele transmite as informações por meio da geração de um bloco para todos os outros. Dessa forma, segundo Nakamoto (2008), a única forma de garantir a segurança contra duplos pagamentos é revisando cada transação desde a criação da moeda até a nova transação que está para ser registrada e consolidada nesse bloco. Assim, o minerador que conseguir processar esses dados primeiro, tem a mineração bem-sucedida e recebe sua recompensa por isso.

Para o minerador conseguir validar um bloco, é preciso resolver um desafio criptográfico, por isso pode-se dizer que a recompensa é pela prova de trabalho, ou "*proofof work*"(RICCI et al., 2016). Esse processo valida o *Blockchain*. Uma analogia para descrever o processo de mineração é como se o *Blockchain* fosse um livro contendo o histórico de todas as transações da moeda e o minerador que consegue completar o *proof-of-work* pode atualizar o *Blockchain*, adicionando uma página ao livro (CHIU; KOEPPL, 2017). O bloco é como se fosse a nova página do livro, que contém as novas transações que estão sendo mineradas.

Verifica-se, portanto, que a compreensão do processo relacionado às moedas virtuais não é trivial. E apesar de todo o processo de segurança, já foi registrado falhas que causaram prejuízos a diversos usuários. Além disso, há motivos para a não aceitação das moedas digitais, entre eles, os custos para a produção e uso destas.

As criptomoedas necessitam de uma complexa infraestrutura de redes tecnológicas e muito conhecimento na área de tecnologia da informação e comunicação. É necessário profissionais que possam suprir a demanda que pode surgir caso aumente excessivamente o número de aderentes a esse tipo de moedas e para resolver possíveis desafios tecnológicos que venham a surgir. Como por exemplo, de custo de operação das criptomoedas pode-se mencionar a sobrecarga do sistema, a necessidade de tecnologias cada vez mais avançadas para a garantia de segurança e rapidez do sistema, além da energia elétrica necessária para minerar. Diante dessas questões foram feitos cálculos de gasto de energia para sustentar a rede de computadores *peer-to-peer* para minerar e produzir moedas digitais em escala mundial constatou-se que tal procedimento consumiria energia elétrica equivalente ao gasto da Irlanda (PIRES, 2017).

Embora o sistema *Blockchain* exija muita energia para operar, deve-se considerar os custos financeiros e ambientais para produzir, transportar e armazenar as moedas reais que poderiam ser economizados com o uso das moedas virtuais, já que é necessário matéria-prima para sua produção, espaço físico para armazenamento, uma administração central, além da necessidade de investir mais em segurança para a armazenagem, transporte e para garantir a segurança dos usuários e portadores das moedas físicas.

Além dos custos do uso das moedas digitais, alguns países proibiram sua utilização alegando a possibilidade de uso para fins ilícitos. Por exemplo, China, Equador, Islândia, Rússia, Tailândia, Bolívia, Índia, Jordânia e Vietnã proibiram ou impuseram severas

restrições para o uso das moedas digitais (GARCIA, 2014).Garcia (2014) e Pires(2017) apontam que há usuários de criptomoedas que as utilizam para lavagem de dinheiro e para compras de armas, drogas, pornografia, entre outras atividades ilegais, já que com seu anonimato fica praticamente impossível identificar o usuário da chave pública. Além disso, a falta de uma autoridade central para a regularização dessas moedas pode ocasionar muitos problemas, como a falta de modelos legislativos para investigar e punir ilegalidades, roubos e ataques especulativos (TRESS; ANASTÁCIO, 2017). Assim, verifica-se que o risco de operação com criptomoedas é elevado e precisa ser considerado na análise de investimentos nesse tipo de ativo.

Um dos grandes desafios para os investidores é compreender a relação entre risco e retorno e como minimizar o risco dos seus investimentos. Em se tratando de moedas virtuais é necessário compreender como esses ativos se comportam em termos de variabilidade e como as diversas moedas se correlacionam. De acordo com Markowitz (1952) a diversificação pode reduzir os riscos dos investimentos e ao mesmo tempo maximizar o retorno esperado. Assaf Neto (2014) reforça esse pensamento dizendo que o risco da carteira se torna menor que o risco individual dos ativos porque existe o elemento da correlação que minimiza o risco.

Para Borba *et al* (2010) um indivíduo pode reduzir seu risco total pela combinação de ativos que não representem correlação perfeita e positiva, assim a redução será tão maior quanto menor for essa correlação. Essa ideia é completada por Gonçalves *et al* (2002) que afirma que no modelo de portfólio a variância da carteira dependerá da covariância entre os pares de ativos, a qual por sua vez depende da correlação entre os ativos. Desse modo, considerando a existência de diversas criptomoedas, é possível supor a possibilidade de criação de um portfólio específico de criptomoedas que seja capaz de reduzir o risco específico dessas moedas virtuais.

Markowitz (1952) classifica o risco em dois tipos, o diversificável e o não diversificável. O diversificável seria aquele que pode ser neutralizado, pois está atrelado aos riscos específicos de cada ativo. No caso do presente estudo seria o risco específico de uma determinada criptomoeda. Já o não diversificável está atrelado ao macroambiente, como crises econômicas, políticas, desastres naturais entre outros cenários os quais não é possível evitar, pois não são controláveis pelos investidores.

Definindo risco como o desvio padrão dos retornos diários, a teoria aborda que o risco não é a variável mais importante, mas sim o retorno. Isso porque cada ativo tem seu risco específico, porém quando alocados em uma carteira dependerá do correlacionamento com todos os demais ativos participantes do portfólio. O pressuposto básico consiste na constatação de que o retorno sempre será o retorno médio ponderado, enquanto o risco dependerá do comportamento conjunto dos ativos, da covariância entre todos os ativos da carteira. Assim, um ativo de elevado risco pode beneficiar o investidor quando apresentar correlacionamento negativo com outros ativos componentes do portfólio.

Com base na teoria de Markowitz (1952) e com o emprego de modelos de otimização, diversos estudos buscam definir uma carteira de investimentos de máximo retorno ao menor nível de risco. Dill, Souza e Borba (2011) abordou a busca de um portfólio de plantação de verão, entre as opções estavam soja, milho e girassol, com a finalidade de redução dos riscos associados a esse tipo de atividade agrícola. Bruni, Fuentes e Famá (1998) também utilizaram a Teoria de Markowitz para a análise dos benefícios da distribuição de investimentos em mercados latinos americanos entre 1996 e 1997. Já Arfux (2004), utilizou esta teoria para uma análise de riscos nas carteiras de contratos de comercialização de energia elétrica, e Bach et.al (2015) utilizaram para analisar a existência da relação entre a eficiência, retorno e o risco das carteiras diversificadas no mercado brasileiro de ações. Assim, considerando que existe um

risco específico associado a cada criptomoeda e um risco econômico que pode afetar o mercado de moedas virtuais como um todo, o presente estudo buscará a formação de uma carteira formada exclusivamente por criptomoedas que seja capaz de minimizar a relação risco e retorno e reduzir o risco específico desse tipo de investimento.

3 METODOLOGIA

O objetivo do presente estudo foi analisar o risco e retorno das principais criptomoedas e identificar a viabilidade da criação de uma carteira de investimentos formada exclusivamente por criptomoedas. Para isso analisou-se o histórico diário de cotação das dez principais criptomoedas – Bitcoin, Etherium, Ripple, Bitcoin Cash, Litecoin, Monero, Enigma, Dash, zCash e EOS – abrangendo o período da criação de cada uma das criptomoedas até o mês de junho de 2018.As informações foram obtidas por meio do site *Investing*.

Após a construção da base de dados calcularam-se o retorno, determinado pela média dos retornos de cada ativo, e o risco, mensurado com base no desvio padrão referente ao preço de fechamento de cada uma das criptomoedas analisadas.

Na sequência, baseando-se na teoria de portfólio de Markowitz (1952), e por meio do emprego de modelos de otimização, definiram-se os ativos e as participações percentuais de cada um deles nas carteiras construídas. Para tanto, empregou-se o modelo de Programação Não Linear tendo como função objetivo a minimização da relação entre risco (desvio padrão da carteira) e retorno (retorno médio ponderado pelo peso de cada ativo na composição da carteira). Assim, a função objetivo do modelo de programação não linear foi determinado pela minimização do coeficiente de variação de cada um dos portfólios.

O retorno de cada uma das carteiras analisadas foi determinado pelo retorno médio ponderado pela participação de cada ativo no portfólio pelo retorno médio da criptomoeda. Assim, conforme Equação (1), pode-se avaliar o retorno de cada carteira de criptomoedas construída;

$$E(R_p) = \sum_{K=1}^{n} W_k * R_k \tag{1}$$

onde, $E(R_p)$ refere-se ao retorno médio de uma carteira de investimentos; W_k representa a participação percentual do ativo$k$ na carteira de investimentos; R_k refere-se ao retorno do ativo k.

O risco do portfólio, por sua vez, foi determinado pelo desvio padrão da carteira de investimentos formada pelas criptomoedas selecionadas para compor cada uma das carteiras, que conforme Markowitz (1952) pode ser mensurado conforme Equação 2.

$$\sigma_p = \left[\sum_{K=1}^{n} W_k^2 * \sigma_k^2 + \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} 2 * W_k * W_i * \rho_{k,i} * \sigma_k * \sigma_i\right]^{1/2} \tag{2}$$

onde, σ_p refere-se ao risco de uma carteira de investimentos, determinado por seu desvio padrão; W_k representa a participação percentual do ativo k na carteira de investimentos;W_i representa a participação percentual do ativo $i$na carteira de investimentos;σ_k^2 refere-se a

variância do ativo k;$\rho_{k,i}$ trata-se do coeficiente de correlação entre os ativos k e o ativo i;$\sigma_k$trata-se do desvio padrão do ativo k; e $\sigma_i$refere-se ao desvio padrão do ativo i.

Observa-se nas equações 1 e 2 que, tanto o risco quanto o retorno das carteiras serão determinados pela escolha das criptomoedas a serem incluídas em cada um dos portfólios, bem como da definição do percentual de participação de cada um dos ativos. Outro aspecto importante é o fato do modelo de Markowitz (1952) apresentar como principal contribuição a possibilidade de redução do risco do portfólio. No entanto, para que isso seja possível é necessário que as carteiras de investimento tenham em sua composição ativos que apresentem correlação negativa ou inversa. E para que o retorno seja o máximo possível, é importante que o portfólio seja formado por ativos de alta rentabilidade. Considerando que o objetivo do presente estudo foi a análise da relação risco/retorno, que teve como meta a formação de carteiras com o máximo retorno e o mínimo risco, optou-se por selecionar as carteiras com base na relação entre risco (desvio padrão das carteiras) e retorno (retorno médio ponderado entre o retorno de cada uma das criptomoedas e sua participação no portfólio). Assim, a relação risco e retorno, função objetivo do modelo de programação não linear, foi determinada pela minimização do coeficiente de variação entre o risco(Equação 2) e o retorno (Equação1) de cada uma das carteiras formadas.

$$CV_p = \frac{\sigma_p}{E(R_p)} \tag{3}$$

onde,CV_p refere-se ao coeficiente de variação do portfólio p; $\sigma_p$refere-se ao risco de uma carteira de investimentos$p$, determinado por seu desvio padrão, conforme Equação 2;e $E(R_p)$ refere-se ao retorno médio de uma carteira de investimentos$p$, mensurado conforme Equação1.

Observa-se nas equações 1 e 2que, tanto o risco, quanto o retorno das carteiras serão determinados pela escolha das criptomoedas a serem incluídas em cada um dos portfólios, bem como da definição do percentual de participação de cada um dos ativos. Deste modo, para selecionar a combinação ótima de criptomoedas que minimizam a relação entre risco e retorno, utilizou-se técnicas de otimização.

3.1 Otimização

A otimização consiste em uma área da matemática que tem como objetivo apoiar a tomada de decisão. Normalmente as decisões podem ser representadas por uma expressão matemática, sendo a melhor solução, dentre todas as soluções possíveis, considerada a solução ótima. Nesse contexto, pode-se destacar a Programação Linear e a Programação Não Linear. A programação Linear busca encontrar a melhor solução para problemas que possam ser representados por expressões lineares (BREGALDA; OLIVEIRA; BORNTEIN, 1983). Enquanto a Programação Não Linear pode ser aplicada a problemas cuja função objetivo ou restrições são não lineares.

No caso do presente estudo, a decisão baseia-se na escolha de quais criptomoedas comporão a carteira de investimentos e o percentual de participação de cada uma delas no portfólio. Observa-se na Equação 4 que a otimização da função objetivo do presente estudo (CV_p) é não linear e consiste na minimizaçãodo coeficiente de variação entre o desvio padrão do portfólio (Equação 2)e o retorno da carteira (Equação 1):

$$CV_p = \frac{\left[\sum_{K=1}^{n} W_k^2 * \sigma_k^2 + \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} 2 * W_k * W_i * \rho_{k,i} * \sigma_k * \sigma_i\right]^{1/2}}{\sum_{K=1}^{n} W_k * R_k} \quad (4)$$

Desse modo, dado que o coeficiente de variação depende de duas equações, sendo uma delas não linear, a solução ótima da Equação (4) não poderá ser resolvida usando a Programação Linear. Por isso, empregou-se o Método de Programação Não Linear do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), disponível na ferramenta Solver do Microsoft Excel. O método GRG consiste, de acordo com Ignízio e Cavalier (1994), em um algoritmo heurístico capaz de oferecer soluções aceitáveis para problemas complexos com baixo custo computacional. Além do GRG, mencionado e empregado no presente estudo, o suplemento Solver do Microsoft Excel apresenta duas outras ferramentas para simulações, sendo elas Evolutionary e LP Simplex. O Gradiente Reduzido Não Linear (GRG) é adequado para problemas não lineares de baixa complexidade, o Método LP Simplex deve ser usado em problemas lineares e o Evolutionary é adequado a processos de otimização que envolva alta complexidade, sobretudo em problemas cujas restrições possam variar de forma abrupta.

Assim sendo, empregou-se o Método de Programação Não Linear do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), disponível na ferramenta Solver do Microsoft Excel. Essa escolha deveu-se ao fato do retorno do portfólio (de acordo com a Equação 1)depender do retorno de cada criptomoeda participante da carteira e do percentual de participação, do risco (conforme Equação 2) além da participação percentual e da participação percentual ao quadrado, depender do risco individual de cada moeda (desvio padrão)e da correlação combinada entre os pares de criptomoedas selecionadas pelo modelo de otimização e da variável objetivo ser a minimização da relação risco (desvio padrão do portfólio) e retorno (retorno do portfólio).

Assim, para obter a solução ótima foi necessário seguir as seguintes etapas:

1) identificar as variáveis desconhecidas: que no presente estudo tratam-se dos percentuais de participação de cada ativo no portfólio – representado por W_i, onde$W$ é a participação percentual da criptomoeda na carteirae i refere-se a i-ésima criptomoeda;

2) listar as restrições: a soma dos W_i devem corresponder a 100%; nenhum W_i pode apresentar valor negativo; e é possível determinar um número mínimo de criptomoedas no portfólio como uma restrição adicional com objetivo a forçar uma quantidade mínima de papéis;

3) identificar a função objetivo ou critério de otimização do problema: foi minimizar a relação risco e retorno, ou seja, o modelo de otimização formado teve como meta apresentar o mínimo risco por máximo retorno – mínimo coeficiente de variação entre o desvio padrão e retorno da carteira (Equação 3).

4 RESULTADOS

O presente estudo analisou a relação entre risco e retorno das 10 principais criptomoedas. Para isso, obteve-se informações a respeito do preço de fechamento de cada um dos papéis, envolvendo o período do início da série histórica até o dia 30 de junho de 2018. Na sequência, com base nos dados diários calcularam-se as variações percentuais diárias dos preços de fechamento de cada uma das criptomoedas, bem como sua variabilidade, como pode ser observado na Tabela 1.

Observa-se também na Tabela 1que, com exceção da criptomoeda zCash, todas as demais moedas virtuais analisadas apresentam valorização em seu preço. O retorno médio diário de todos os papéis foi positivo, o que evidencia a grande oportunidade de rentabilidade

dessas criptomoedas, mas se atentarmos para a variabilidade, verifica-se que o desvio padrão diário sofre grande variabilidade se comparado a média. A Bitcoin apresentou o menor desvio padrão diário, de 4,67% ao dia, enquanto a Enigma e a Dash apresentaram, respectivamente, desvios padrão diário de 14,08% e 273,57% ao dia.

Tabela 1 – Análise descritiva das criptomoedas

Criptomoeda	Início	Preço de Abertura	Preço de Fechamento	Retorno diário	Desvio Padrão diário	Mínimo	Máximo
Bitcoin	02/02/2012	6,10	6.391,50	0,40%	4,67%	-31,09%	36,15%
Etherium	11/03/2016	11,75	453,85	0,64%	6,73%	-26,91%	44,70%
Ripple	02/03/2016	0,01	0,46	0,91%	10,82%	-47,95%	179,55%
BitcoinCash	04/08/2017	327,40	748,95	0,85%	11,77%	-32,62%	78,50%
Litecoin	25/08/2016	3,84	81,01	0,72%	7,87%	-26,50%	83,49%
Monero	31/01/2015	0,30	131,44	1,93%	19,90%	-74,00%	214,29%
Enigma	21/12/2017	1,01	1,47	1,51%	14,08%	-31,25%	82,00%
Dash	19/02/2015	10,00	239,97	11,91%	273,57%	-99,32%	9150,00%
zCash	30/10/2016	1.900,00	171,65	0,06%	14,05%	-68,19%	172,11%
EOS	03/07/2017	2,91	8,12	0,69%	11,18%	-30,00%	42,75%

Fonte: Tabela elaborada pelos autores

Outro ponto abordado nesse estudo foi a formação de um portfólio formado exclusivamente por criptomoedas. Para isso calculou-se a correlação entre todos os papéis, como pode ser observado na matriz de correlação apresentada na Tabela 2. O cálculo da matriz de correlação foi possível para o período em que todas as criptomoedas apresentavam valores de fechamento em comum. Desse modo, a matriz apresentada na Tabela 2 corresponde a correlação entre todas as criptomoedas no período de 21 de dezembro de 2017 até o período de 30 de junho de 2018.

Tabela 2 – Matriz de Correlação

	Bitcoin	Etherium	Ripple	BitcoinCash	Litecoin	Monero	Enigma	Dash	zCash	EOS
Bitcoin	1,0000									
Etherium	0,9156	1,0000								
Ripple	0,8417	0,9113	1,0000							
BitcoinCash	0,8757	0,7655	0,7688	1,0000						
Litecoin	0,9553	0,9186	0,8639	0,8415	1,0000					
Monero	0,9722	0,9561	0,9018	0,8771	0,9701	1,0000				
Enigma	0,6883	0,8802	0,8517	0,6309	0,5613	0,7111	1,0000			
Dash	0,9690	0,9073	0,8666	0,9213	0,9354	0,9645	0,6710	1,0000		
zCash	0,6085	0,6414	0,6071	0,8600	0,6175	0,6235	0,7979	0,6560	1,0000	
EOS	0,5476	0,7646	0,6466	0,5786	0,6296	0,6545	0,3373	0,4123	0,4308	1,0000

Fonte: Tabela elaborada pelos autores

Um ponto fundamental na teoria de portfólio proposta por Markowitz (1952) é o fato do risco de um ativo dentro de portfólio ser diferente de seu risco isolado, fora da carteira (ASSAF NETO, 2014). Isso ocorre porque o risco do portfólio depende da correlação entre os retornos de todos os ativos componentes da carteira. Para minimizar o risco de um portfólio de investimentos é importante que ele seja composto por papéis com correlação negativa, assim as perdas com um ativo específico são compensadas pelos ganhos com outro papel que apresente resultado contrário. Observa-se na Tabela 2 que todos os ativos apresentaram correlação positiva. Esse aspecto reduz o poder de minimização do risco, conforme proposto por Markowitz (1952). No entanto, como o objetivo do presente estudo foi montar uma

carteira composta exclusivamente por criptomoedas optou-se por não incluir outros tipos de papéis que poderiam maximizar o potencial de redução de risco da carteira.

Na sequência, empregando o Método de Programação Não Linear do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), implementado e disponível nos suplementos do software Microsoft Excel, foi possível simular 3 diferentes situações.

Primeiramente, foi simulado a situação em que as criptomoedas escolhidas deveriam apresentar participação entre 1 e 20% no percentual de investimentos da carteira ótima. Essa restrição foi incluída com a finalidade de manter a participação de todas as dez criptomoedas na carteira inicial (portfólio 1). Assim, na primeira simulação a decisão era restrita somente ao peso de cada ativo na carteira, haja vista que haveria a participação obrigatória de todas as moedas.

Observa-se na Tabela 3 que as criptomoedas Etherium, Litecoin, Monero e Enigma participam com 20%, a EOS com 15% e as demais criptomoedas atingem a participação mínima de 1%. Essa primeira simulação gera um portfólio com retorno médio diário de 1,20% e desvio padrão de 13,03% ao dia. Além disso, o coeficiente de variação, que foi a função objetivo, atinge o valor mínimo de 10,82. Essa carteira é a mais eficiente do ponto de vista de mínimo coeficiente quando há a obrigatoriedade de participação das 10 moedas.

Tabela 3 – Primeira carteira simulada: participação de todas as criptomoedas

	Retorno (R_k)	Desvio Padrão (σ_k)	Participação Otimizada (W_k)		
			Portfólio 1	Portfólio 2	Portfólio 2
Bitcoin	0,40%	4,67%	1,00%	25,00%	
Etherium	0,64%	6,73%	20,00%	13,28%	
Ripple	0,91%	10,82%	1,00%		
BitcoinCash	0,85%	11,77%	1,00%		
Litecoin	0,72%	7,87%	20,00%	25,00%	44,14%
Monero	1,93%	19,90%	20,00%		
Enigma	1,51%	14,08%	20,00%	25,00%	49,17%
Dash	11,91%	273,57%	1,00%		
zCash	0,06%	14,05%	1,00%		
EOS	0,69%	11,18%	15,00%	11,72%	6,69%
Retorno da carteira [$E(R_p)$]			1,20%	0,82%	1,11%
Risco da carteira [σ_p]			13,03%	7,64%	9,71%
Coeficiente de variação [CV_p]			10,82	9,29	8,78

Fonte: Tabela elaborada pelos autores

Notas: W refere-se à participação percentual; R_k refere-se ao retorno médio diário;σ_k trata-se do desvio padrão; $E(R_p)$ refere-se ao retorno médio ponderado pela participação de cada criptomoeda na carteira; σ_p trata-se do desvio padrão de cada portfólio simulado considerando o modelo de portfólio proposto por Markowitz; CV_p refere-se ao coeficiente de variação; os índices ke p referem-se respectivamente à k-ésima criptomoeda e p trata-se do portfólio formado pelo modelo de otimização.

Na segunda carteira (portfólio 2), as restrições estabelecidas foram a exigência de que as criptomoedas ocupassem de 0 a 25% do percentual de participação no portfólio. Assim, possibilitando que fosse zerada a participação de algumas criptomoedas, mas restringindo a carteira a um número mínimo de 4 criptomoedas.

Observa-se na Tabela 3 que o risco para a Carteira 2 foi de 7,64% e o retorno de 0,82% ao dia, gerando assim um coeficiente de variação menor, de 9,29. Vale destacar a redução na rentabilidade, que foi em termos percentuais, se comparado a rentabilidade da carteira 1, de 32% e a redução no risco de 41%. Assim, essa segunda carteira em termos relativos (risco versus retorno) foi mais eficiente.

Na terceira carteira, não foi definida nenhuma restrição, permitindo zerar a participação dos ativos, mas com a exigência de que 100% do capital fosse investido, ou seja, a soma dos $W_k s$deveriam representar 100% do capital. A decisão nesse caso reside na escolha das moedas e no percentual de cada uma delas. O risco calculado com base no desvio padrão da carteira, conforme Markowitz (1952), foi de 9,71% ao dia. O retorno, por sua vez, foi de 1,11% ao dia. O coeficiente de variação de 8,78 foi o menor dos três modelos simulados. É interessante ressaltar que na carteira 3, em que não há restrições para os percentuais dos ativos, a criptomoeda Bitcoin foi excluída do portfólio. Isso é interessante, pois a Bitcoin é a criptomoeda mais conhecida e apresentou a maior valorização em termos absolutos (Tabela 1), passando de US$ 6,10 em fevereiro de 2012 para US$ 6.391,50, na data final da coleta de dados do presente estudo.

Pode-se observar, portanto, que a carteira mais atrativa, considerando a dispersão relativa do risco (desvio padrão do portfólio) por unidade de retorno esperado (retorno esperado do portfólio) foi a terceira carteira. Esse portfólio foi formado, conforme modelo de otimização, pelas criptomoedas Litecoin, Enigma e EOS com, respectivamente 44,14%, 49,17% e6,69% de participação na carteira otimizada. Apesar de seu retorno de 1,11% ser menor do que o retorno da primeira carteira 1,2%, ela pode ser considerada mais atrativa se considerar a dispersão relativa do risco por unidade de retorno (coeficiente de variação).

5 CONCLUSÕES

Por meio do emprego de modelos de otimização, o presente estudo possibilitou a criação de três portfólios formados exclusivamente por criptomoedas – Bitcoin, Etherium, Ripple, Bitcoin Cash, Litecoin, Monero, Enigma, Dash, zCash e EOS.

Para a composição do primeiro portfólio optou-se por considerar como restrição a necessidade de participação mínima de 1% de cada ativo no portfólio. Por isso, a decisão apoiada pelo modelo de otimização restringiu-se ao percentual de participação de cada criptomoeda.

Na segunda carteira simulada, nenhuma das moedas poderiam ultrapassar o limite de máximo de 25% de participação. Desse modo, havia a obrigatoriedade de participação de ao menos 4 criptomoedas no portfólio. O resultado foi a escolha de cinco papéis, Bitcoin, Etherium, Litecoin, Enigma e EOS. Esse segundo modelo envolvia duas decisões: a seleção das criptomoedas a compor a carteira e a participação percentual de cada uma delas, obedecendo ao limite máximo de 25%.

O terceiro modelo simulado foi realizado sem a restrição do percentual máximo de participação das moedas selecionadas. Por isso, a decisão se restringiu à escolha das moedas e à participação percentual de cada uma delas na carteira. Como não havia limite de participação máxima nessa terceira simulação, poderia haver a concentração dos investimentos em poucas criptomoedas. O resultado foi a seleção de apenas três: Litecoin, Enigma e EOS. Essa carteira apresentou a o resultado ótimo.

Vale ressaltar que a carteira proposta no presente estudo, por ser formada exclusivamente por criptomoedas, não é capaz de minimizar o risco a um nível ideal. Isso ocorre devido ao fato de a maioria das criptomoedas analisadas apresentarem correlação positiva. Em situações como essa é mais apropriado a inclusão de outros tipos de ativos que apresentem correlação negativa entre si. Assim seria possível aumentar o nível de diversificação do portfólio e, consequentemente, reduzir o risco.

Por meio do presente estudo foi possível verificar a viabilidade de uso das ferramentas de otimização disponíveis no Microsoft Excel para a tomada de decisões relativas à seleção de

criptomoedas (ou ativos) e a definição do percentual de participação das mesmas em uma carteira de investimentos. Desse modo, verifica-se que a correlação positiva entre as diversas criptomoedas analisadas dificulta a redução do risco da carteira a um nível ótimo. Sugere-se, portanto que as carteiras de investimentos formadas por criptomoedas, incluam também outros tipos de ativos que apresentem correlação negativa com os papéis aqui analisados.

Ressalta-se que o uso ou negociação com criptomoedas ainda é recente. Há poucos trabalhos que analisaram o impacto econômico e social desses papéis. São raros os trabalhos que investigam a mudança de paradigma que as criptomoedas estão gerando nas economias nacionais. Embora o presente estudo tenha se restringido a análise da relação risco, retorno e formação de portfólios com o uso de criptomoedas, pontua-se a necessidade de compreensão desse fenômeno que pode impactar de forma definitiva a economia. Ressalta-se a necessidade de ampliação de estudos, tanto abordando a necessidade de regulamentação, como investigando a viabilidade, segurança e o impacto social e econômico do uso em massa das criptomoedas. Por isso, destaca-se a importância do tema.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. D. Tratamento jurídico das criptomoedas: a dinâmica dos bitcoins e o crime de lavagem de dinheiro. **Revista Brasileira de políticas públicas**, Brasília v. 7, p. 23-25, 2017.

ANTUNES, F. S; FERREIRA, N. A. e BOFF, S. O. Bitcoin – Inovações, Impactos no Campo Jurídico e Regulação para Evitar Crimes na Internet. In: Congresso Iberoamericano de Investigadores e Docentes de Direito e Informática. **Anais**... Santa Maria, RS, 2015.

ARFUX, G. A. B. **Gerenciamento de riscos na comercialização de energia elétrica com uso de instrumentos derivativos: uma abordagem via teoria de portfólios de Markowitz**. 2004. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Santa Catarina, 2004.

ASSAF N., A. **Finanças Corporativas e Valor**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2014.

BACH, T. M. et al. Eficiência das Companhias Abertas e o Risco versus Retorno das Carteiras de Ações a partir do Modelo de Markowitz. **Revista Evidenciação Contábil e Finanças,** João Pessoa. v.3, p.34-53, 2015

BARBOSA, P. C. L. **Bitcoin E Moedas Fiat : Um Estudo De Volatilidade**. 2016. 75 f. Dissertação (MBA em Gestão de Riscos Financeiros, Corporativos e Compliance) - Programa de MBA em Gestão de Riscos Financeiros, Corporativos e Compliance, Fundação Instituto de pesquisas econômicas – FIPE , São Paulo, 2016.

BARRA, D. S. **Otimização de Portfólio Para Uma Carteira de Criptomoedas: Uma Abordagem em Reinforcement Learning**. 2018. 39f. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas), Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Santa Catarina, 2018.

BENICIO, A. A. e CRUZ, A. R. e SILVA, M. W. S. Bitcoin a Moeda Digital que se Tornou

Realidade. **Revista Científica da UNESC**, Rondônia, v. 12, n. 1, p. 2-5, 2015.

BREGALDA; OLIVEIRA; BORNTEIN. **Introdução à Programação Linear**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1983.

BRUNI, A. L., FUENTES, J. e FAMÁ R. A Moderna Teoria de Portfólios e a Contribuição dos Mercados Latinos na Otimização da Relação Risco *versus* Retorno de Carteiras Internacionais: Evidências Empíricas Recentes (1996-1997).In: Semead FEA/USP, **Anais**... São Paulo: USP, 1998.

CHIU, J. e KOEPPL, T. V. The Economics of Cryptocurrencies – Bitcoin and Beyond. **SSRN - Social Science Research Network**, Canada. 2017. Disponível em: <https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3048124>.

MOTA, P. L. **Markowitz e a Teoria Moderna de Portfólios**. Disponível em: <http://terracoeconomico.com.br/markowitz-e-teoria-moderna-de-portfolios>. Acesso em 8 out 2018.

PRATES, W. R. **Teoria de Markowitz (teoria da carteira) e a fronteira eficiente**. Disponível em: < https://www.wrprates.com/teoria-de-markowitz-teoria-da-carteira-e-a-fronteira-eficiente/>. Acesso em 20 nov 2018.

DILL, R. P., SOUZA, F. C. e BORBA, J. A. **Uma proposta de um modelo de otimização do portfólio para as culturas de verão**. 2010. Disponível em: <http://www.custoseagronegocioonline.com.br/numero3v6/Risco%20e%20Retorno.pdf>. Acesso em 25 nov 2018.

GARCIA, R. de S. **Moedas virtuais são moedas? Um estudo de caso para o Bitcoin e o Litecoin**. 2014. 36 f. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

IGNÍZIO, J.P., CAVALIER, T.M. **Linear Programming. Englewood Cliffs: Prentice Hall**, 1994.

MARKOWITZ, H. Portfolio selection. **The Journal of Finance**, Reino Unido. v. 7, n. 1, p. 77-91, 1952.

MARTINS, A. N. da G. L. Quem tem medo do Bitcoin? O Funcionamento das moedas criptografadas e algumas perspectivas de inovações institucionais. **Revista Jurídica Luso Brasileira,** Curitiba. v. 2, p. 137–171, 2016.

NAKAMOTO, S. Bitcoin: **A Peer-to-PeerElectronic Cash System**. 2008. Disponível em: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.

OLIVEIRA, M. R. G. e colab. **Otimizando uma carteira de investimentos: um estudo com ativos do Ibovespa no período de 2009 a 2011**. 2011. Disponível em <http://www.institutoateneu.com.br/ojs/index.php/RRCF/article/download/9/24>. Acesso em 30 nov 2018.

PIRES, H. F. **Bitcoin : a moeda do ciberespaço**. 2017. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/geousp/ article/view/134538>. Acesso em 29 nov 2018.

RICCI, S. e colab. **Dinâmica das transações do Bitcoin: uma abordagem quantitativa**. 2016. Disponível em: <http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/wperformance/2016/005.pdf>. Acesso em 2 nov 2018.

SILVA, G. A. B. e RODRIGUES, C. K. S. Mineração individual de bitcoins e litecoins no mundo. **XVI Simpósio Brasileiro em Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais**. Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - Centro Universitário de Brasília. Brasília. 2016.

SILVA, L. G. D. **A Regulação do Uso de Criptomoedas no Brasil**. 2017. 124 f. Monografia (Graduação em Direito Político e Econômico), Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2017.

SILVEIRA, F. A. **Bitcoin como Ativo em Carteiras de Investimentos: uma Análise com Base no Modelo de Portfólio de Markowitz**. 2015. 47 f. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas), Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Criciúma. 2015.

SIMÃO, B. C.; MACEDO, L. A. F e LEITE F., P. A. M., Análise da relação entre os retornos do bitcoin e os fatores de risco: uma abordagem multifatorial. In: Congresso Anpcont. **Anais**... Belo Horizonte, MG, Brasil, 2017.

TRESS, E. H. H. e ANASTÁCIO, P. G. T. **Uma Revisão da Literatura Sobre o Comportamento dos Preços do Bitcoin: Trata-se de uma Bolha Especulativa?** 2017. 92 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.