

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO

Klaus Nery Teixeira

**ESTRATÉGIAS DE INVESTIMENTO UTILIZANDO
COINTEGRAÇÃO NA CURVA DE JUROS BRASILEIRA**

Porto Alegre

2016

Klaus Nery Teixeira

**ESTRATÉGIAS DE INVESTIMENTO UTILIZANDO
COINTEGRAÇÃO NA CURVA DE JUROS BRASILEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Administração.

Orientador: Prof. Dr. João Frois Caldeira

Porto Alegre

2016

CIP - Catalogação na Publicação

Teixeira, Klaus Nery
Estratégias de Investimento Utilizando
Cointegração na Curva de Juros Brasileira / Klaus
Nery Teixeira. -- 2016.
70 f.

Orientador: João Frois Caldeira.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Administração, Programa
de Pós-Graduação em Administração, Porto Alegre, BR-RS,
2016.

1. Curva de Juros. 2. Yield Curve. 3. Estrutura a
termo. 4. Cointegração. 5. Trading. I. Caldeira, João
Frois, orient. II. Título.

Klaus Nery Teixeira

**ESTRATÉGIAS DE INVESTIMENTO UTILIZANDO
COINTEGRAÇÃO NA CURVA DE JUROS BRASILEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Administração.

Conceito Final:

Aprovado em 15 de setembro de 2016.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. André Alves Portela Santos - UFSC

Prof. Dr. Hudson da Silva Torrent - UFRGS

Prof. Dr. Marcelo Brutti Righi - UFRGS

Orientador: Prof. Dr. João Frois Caldeira - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

“Feliz é aquele que possui sabedoria o suficiente para reconhecer, a cada minuto da vida, um motivo para agradecer (...)” Lenne Mendes.

Apesar de ainda não possuir tamanha sabedoria, felizmente são inúmeros os motivos para agradecer e muitas as pessoas a quem agradecer, principalmente neste momento de conclusão de fase que busca, justamente, aumentar o conhecimento. Primeiramente, como não poderia deixar de ser, agradeço a meus pais. Educadores, mais por paixão que apenas por profissão, por incentivarem a vida toda o apreço aos estudos e a constante busca pelo saber.

Ao Dr João Caldeira, por ter aceito o desafio de me orientar, desde o começo do curso, e ter sido sempre uma fonte de inspiração, acadêmica e profissional.

Remetendo aos tempos de graduação, aos Doutores Felipe Garcia e Gisele Braun, ao futuro Mestre Bruno Klassman, ao Mestre Fabio Nunes, e ao Bacharel Carlos Henrique Correa, pelo constante apoio, às vezes mais espiritual que propriamente físico, em progredir na área acadêmica.

Aos professores do programa do PPGA, e à UFRGS, por todos esses anos de ensino de elevada excelência.

Ao ex-chefe Rogério Braga, cuja flexibilidade e apoio em relação a horários permitiram que eu cursasse todos os créditos necessários para a realização do curso, mesmo que isso se traduzisse em me ausentar da mesa de operações em algumas ocasiões.

Aos irmãos da querida Adayr Figueiredo, que esbanjando compreensão e tolerância, entenderam minhas constantes ausências às terças de noite, necessário afastamento para a conclusão deste trabalho.

À casa Berlim e todos seus sócios, por estarem sempre lá nos (raros) momentos de descanso e descontração.

Ao amigo Cássio Xavier, pelos dados de juro, da Anbima, e por seu peculiar método de incentivar a eu mesmo resolver meus problemas de programação; ao mano e amigo Bruno Rodrigues, pelo sempre incansável auxílio quando o assunto é qualquer coisa relacionada às artes gráficas; ao ‘primo’ Humberto Alves, o betinho, pela amizade de sempre e a torcida distante, também compartilhada pelo parceiro Vitor. Aos amigos

Bruno Schuller, Gustavo e Pablo, pela igual torcida e bom humor de sempre.

Aos meus dindos Silvio, Patrícia, Ricardo e Gérson, pelo carinho e confiança no meu potencial.

Ao meu irmão Kellwin, por ser o maior exemplo que conheço do que é correr atrás dos sonhos, independente dos percalços que a vida possa e vai colocar na frente.

À Dra Priscila Silva Esteves, não caberia nem em todas as páginas da dissertação todas as coisas pelas quais eu poderia agradecer, então resumo em duas palavras: te amo.

Por fim, ao cara que está lá em cima, aqui embaixo, em todos os lugares, por ter permitido a conquista de mais essa etapa, e ter me brindado com as sidis mais maravilhosas e colocado seres tão espetaculares na minha atual vida terrena. Obrigado!

“Pra quem tem o pensamento forte,
O impossível é só questão de opinião”
Chorão

RESUMO

Diversos são os benefícios e objetivos de um profundo entendimento técnico do comportamento das taxas de juros, tanto de uma economia madura como de uma emergente. Do planejamento à execução de política monetária e da criação de cenários econômicos para tomada de decisão à alocação de recursos baseada somente nesses cenários, esses agentes podem fazer uso do arcabouço teórico que embasa as diferentes hipóteses de mercados eficientes e expectativas racionais, bem como do prêmio de risco, entre outras. Diante desse contexto, faz-se necessário estar em constante contato com o que a comunidade acadêmica desenvolve de tecnologia no estudo de curvas de juros. Este trabalho abordará as relações de cointegração e a possibilidade de elaboração de estratégias de investimentos de recursos financeiros baseadas somente nas relações descobertas. As diferentes modalidades operacionais foram escolhidas buscando replicar empiricamente no mercado de derivativos os fatores mais utilizados nos modelos de estimação e previsão de curva de juros e taxas a termo de juros. Visto que tais estratégias demandam mais sofisticação por parte do investidor, tendem a ser implementadas mais comumente por gestores profissionais e profissionais de bancos, e tentar-se-á mensurar seu potencial de retorno e sua remuneração frente ao risco tomado.

Palavras-chave: Curva de Juros, YieldCurve, Cointegração, *forward rate trading*.

ABSTRACT

Many benefits and objectives came from a deep understanding of interest rates behavior in developed countries and in emergent markets. From plan to execute monetary policy, to create economics scenarios, the decision that are made based in those scenarios, and for any kind of asset allocation, all market participants can use the theory that underlies the efficient market hypothesis, rational expectations and all kinds of risk premium. In this context, it is necessary to be in touch with academic literature technology about yield curves. This paper addresses the cointegration relations on interest rates and the trading opportunities that came from these relations. The strategies was chosen looking for apply in the markets the most usual models present on yield curve and forward rate estimation and prediction fields. Since these strategies demand a higher sophistication from investors, they tend to be used for professional asset managers and bankers. This work intends measure the potential profits and the return towards the risk of this investment approach.

Key-words: Yield Curve, Cointegration, Interest rate, *Forward Rate Trading*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Nível, inclinação e Curvatura em um modelo de 3 fatores	23
Figura 2 – Anormalidades em curvas de juros	25
Figura 3 – Exemplo de arbitragem: situação inicial	25
Figura 4 – Exemplo de arbitragem: tempo decorrido	27
Quadro 1 – Tipos de borboleta e movimentos da curva de juros	29
Figura 5 – Principais movimentos da curva de juros	30
Figura 6 – Evolução das taxas ao longo da amostra.....	35
Figura 7 – Esquema da pesquisa.....	46
Figura 8 – Evolução do patrimônio – dados de treinamento	51
Figura 9 – Evolução do patrimônio – dados de teste	52
Figura 10 – Evolução do resultado financeiro – dados de treinamento.....	53
Figura 11 – Evolução do resultado financeiro – dados de teste.....	54
Figura 12 – Índice de Ruído. 2006 a 2014.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Arbitragens em Renda Fixa: Assimetria e retorno ponderado pelo risco.....	28
Tabela 2 – Estatísticas descritivas	34
Tabela 3 – Retornos da estratégia, janela fixa de estimação.	55
Tabela 4 – Retornos da estratégia, janela móvel de estimação.....	57
Tabela 5 – Regressão multivariada, IRF-M e CDI. Resumo estatístico.	59
Tabela 6 – Regressão multivariada: IHFA, Retornos e CDI. Resumo estatístico.....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS.....	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
2	CURVA DE JUROS E ESTRUTURA A TERMO	20
2.1	CONCEITOS BÁSICOS.....	20
2.2	CURVA À VISTA E ESTRUTURA A TERMO	21
2.3	ARBITRAGENS NA CURVA DE JUROS.....	24
2.3.1	Travas Borboleta na curva de juros	28
2.4	COINTEGRAÇÃO.....	31
3	BASE DE DADOS E ANÁLISE EMPÍRICA	33
3.1	AMOSTRA E FONTE DE DADOS	33
3.2	ANÁLISE DOS DADOS	36
3.2.1	Tratamento inicial dos dados	36
3.3	A ARBITRAGEM.....	40
3.4	ESQUEMA DA PESQUISA.....	45
3.4.1	Etapa 1: Identificação dos pontos relevantes para o estudo	47
3.4.2	Etapa 2: Elaboração do modelo teórico proposto e coleta de dados	47
3.4.3	Etapa 3: Construção do código e algoritmo	48
3.4.4	Etapa 4: Janelas de tempo alternativas e testes de robustez	48
3.4.5	Etapa 5: Hipóteses de possíveis influências nos resultados e razões para existência de arbitragem	48
3.4.6	Etapa 6: Elaboração do relatório de resultados e conclusões	49
4	RESULTADOS	50
4.1	JANELA FIXA DE ESTIMAÇÃO	51
4.2	JANELA MÓVEL DE ESTIMAÇÃO	56
4.3	HIPÓTESES EXPLICATIVAS	58
4.3.1	Índice de renda fixa IRF-M	58
4.3.2	Índice de Hedge Funds Anbima IHFA	59

4.4	RUÍDOS DE LIQUIDEZ E OPORTUNIDADES DE ARBITRAGEM.....	61
5	CONCLUSÕES.....	65
	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

Possuir entendimento da dinâmica e a evolução da curva de juros é base para diversas áreas, tais como precificar instrumentos financeiros e seus derivativos, gerenciar riscos financeiros, alocar recursos em portfólios, estruturar dívidas, conduzir política monetária, entre outras, como pontuam Diebold e Rudebusch (2013). Para investigar as dinâmicas da curva de juros, a literatura tem produzido vasta quantidade de material, com uma considerável gama de modelos para previsão e estimação, tanto das maturidades como da estrutura a termo.

Na prática, curvas de juros não são observadas. Elas são construídas, ou estimadas, partindo-se dos preços (ou inversamente, das taxas) de títulos. Para essa construção, são considerados os títulos de zero cupom disponíveis, ou, transformados os títulos disponíveis em um título sem cupom, que é um título de dívida com preço de vencimento pré-definido e negociado no tempo t , descontado pela sua taxa atual. Ao se construir uma curva através desse método, chega-se a uma curva de juros descontada. A literatura e os mercados em geral se utilizam dos títulos soberanos para o cálculo de uma curva de juros livre de risco¹. Ao se estudar curvas de juros de países que não sejam os Estados Unidos, cujos títulos são considerados os livre de risco soberano a nível mundial, utiliza-se títulos do governo local, a fim de estimar a curva de juros para o determinado risco soberano. Comparações dos níveis de risco-país e instrumentos de risco contra falência de empresas e as respectivas curvas de juros locais com a curva de títulos soberanos norte-americanos, os *treasuries*, já foram realizadas, como em Hull e White (2004).

A evolução dos mercados financeiros e dos instrumentos derivativos disponíveis tornou viável ter-se acesso a taxas com intervalos de maturidade menor, bem como maior base de dados disponível e de melhor qualidade, auxiliando a pesquisa e melhorando a precisão e confiabilidade dos modelos. Derivativos são instrumentos cujo preço é determinado pelo valor de algum ativo base, chamado de ativo-objeto, pelo

¹Nos casos em que se deseja uma curva de títulos privados, pode ser utilizado um *spread* em relação à curva livre de risco, ou a estimação de uma curva, seguindo a mesma linha de raciocínio, apenas com títulos de dívida privada

comportamento de algum mercado ou, ainda, pela ocorrência de alguma combinação pré-definida de eventos (CARVALHO *et al.*, 2007). Fortuna (2007) acrescenta a essa definição as finalidades de se obter lucro especulativo através de tais contratos ou proteção contra eventuais perdas decorrentes de riscos não desejados.

Os contratos futuros de juros, derivativos cujo ativo-objeto são as taxas de títulos soberanos, serão os utilizados para o estudo da curva de juros, assim como na literatura atual, por motivos descritos anteriormente como: qualidade e tamanho da base de dados, maior precisão de cálculo e maior liquidez de negociação nos mercados².

A tentativa de modelar o formato e o comportamento da curva de juros tem se mostrado presente na literatura, quer com o intuito de melhor aplicação e mensuração da efetividade de política monetária, como em Haldane e Read (2000) e Banbura, Giannone e Reichlin (2010), quer como alternativa de investimento, testado e apresentado em Chua, Koh e Ramaswamy (2005).

A crescente evolução tecnológica e computacional se confunde com a história dos mercados financeiros. Durante os primeiros anos da bolsa de mercadorias, no relato de Azevedo e Barcellos (2010), os contratos futuros eram negociados nos chamados pregões viva-voz, que eram salas de negociação onde profissionais prepostos compravam e vendiam os contratos, seguindo ordens de seus clientes. A disseminação de recursos tecnológicos levou a bolsa a implantar um sistema eletrônico de negociação em 1997, mas mantendo ainda o sistema híbrido, com ambas as modalidades de negociação em vigor. Somente em 30 de junho de 2009, o pregão viva-voz foi extinto, permanecendo somente a negociação eletrônica. Esse histórico é relevante quando se estudam instrumentos derivativos, pois as bases de dados antes de 2009 podem contar algum tipo de viés, visto que os negócios fechados eram computados em cadernos e depois passados para uma lousa de cotações, bem como havia a figura do *scalper*³, que não era obrigado a divulgar os preços que negociava, tinha apenas a obrigatoriedade de enviar os negócios que havia feito para a câmara de liquidação.

²No Brasil, todos os contratos derivativos (financeiros e agrícolas) são negociados na BM&F BOVESPA, empresa resultante da fusão no ano de 2008 da Bolsa de Valores de São Paulo, a BOVESPA, e a Bolsa de Mercadorias e Futuros, a BM&F. A BM&F teve sua fundação em julho de 1985, com seus pregões (sessões de negociação) começando a operar em janeiro de 1986.

³ Operador especial, que adquiria um título na BM&F e operava somente na própria conta, isento de taxas.

O estudo de títulos públicos e de suas taxas de juros é relevante, quer para a pesquisa acadêmica, quer para a parte empírica dos mercados financeiros. Entre os pontos mais relevantes, está o fato de que diversos agentes participam do mercado não somente buscando alternativas de investimento, mas também para suprir necessidades de caixa, dado que os títulos do governo são utilizados como garantia em parte relevante das operações de financiamento de curto prazo. Os volumes diários atingem o nível de R\$ 890 bilhões⁴ em operações compromissadas, que são empréstimos de curtíssimo prazo (1 dia), e R\$ 1 trilhão e 90 bilhões em operações com compromisso de recompra, que possuem um prazo um pouco maior: de 3 a 6 meses. Quando volumes financeiros tão expressivos são negociados, em algum momento do tempo, devido aos movimentos dos agentes com forças divergentes de oferta e demanda, é possível que alguns ativos de mesmo risco apresentem preços não compatíveis, caracterizando uma oportunidade de arbitragem.

Existe um posicionamento de alguns pesquisadores, tais como Siconolfi, Raghavan e Pacelle (1998), Lowenstein e Williard (2000), Dunbar (2000) e Mackenzie (2005), e participantes do mercado de que estratégias de arbitragem seriam como “juntar centavos na superfície de um ferro a vapor”, ou seja, que os alfas produzidos seriam recorrentes, mas de pequena magnitude, contra perdas muito significativas quando algo de inesperado acontecesse. A crise dos fundos de *hedge* em 1998, gerada com a quebra do LTCM, intensificou e disseminou esse pensamento. O LTCM era um fundo de investimentos gerido por grandes nomes do meio acadêmico, entre os quais, um dos criadores do modelo de precificação de opções mais usado até hoje e vencedor do prêmio Nobel. O fundo perdeu todo o dinheiro dos investidores após os mercados entrarem em colapso com a crise dos tigres asiáticos em 1997. As estratégias utilizadas seriam sistemas de arbitragem que se aproveitavam de diferenças de taxas de juros, mas que saíram de sua relação de longo prazo e, devido à alta alavancagem, o fundo faliu.

Entretanto, uma parte da literatura se dedica a demonstrar que certas estratégias têm retorno e assimetria (*skewness*) positiva, logo, os ganhos compensam os riscos e a magnitude das perdas. Duarte, Longstaff e Yu (2007) estudaram 5 estratégias de arbitragem de renda fixa e constataram que existem as que remuneram de forma

⁴ Fonte: Banco Central do Brasil

significativa os riscos assumidos. Chegaram também à conclusão de que as estratégias que envolvem maior capital intelectual são as que melhores resultados atingem. Neto (2012) e Karsimus (2015) encontraram resultados na mesma linha.

Os estudos nesse campo têm o objetivo de identificar se existem evidências de que estratégias de renda fixa geram retornos positivos e significativos do ponto de vista estatístico e econômico. O trabalho de Duarte, Longstaff e Yu (2007), e sua continuidade em Duarte (2007), testaram 5 estratégias de renda fixa usualmente implantadas por gestores profissionais e banqueiros de investimentos. Utilizando como métrica de retorno o índice de Sharpe, e como métrica de distribuição dos riscos a assimetria, o estudo buscou quais das estratégias remuneravam de forma eficiente os riscos assumidos e se esses retornos não seriam pequenos frente a uma possível perda muito expressiva ao longo do tempo. Assim, os autores concluem que duas das estratégias apresentam elevado potencial, e propõem uma conexão de causalidade entre o maior capital intelectual demandado por essas duas estratégias e seus melhores desempenhos. Uma destas duas estratégias, a borboleta de curva de juros, é o objeto de estudo dessa dissertação.

Seguindo linha similar, há o trabalho de Chua, Koh e Ramaswamy (2006) que verificou se estratégias na curva de juros utilizando reversão à média apresentavam retorno acima de dois *benchmarks*. Os três tipos de estratégias testadas buscavam encontrar um patamar de equilíbrio e oportunidades de investimento quando os preços se afastavam desse patamar nos três movimentos da curva apresentados: nível, inclinação e curvatura. Encontraram resultados significativamente superiores aos dois *benchmarks* de referência em estratégias de inclinação e curvatura.

Como apoio complementar do trabalho, há artigos que abordam modelos de previsão de curvas de juros, como visto em Caldeira, Santos e Moura (2016a), que adotam seleção de portfólios baseados em reversão à média e previsão de curva de juros por modelo de fatores, e encontram resultados superiores à seleção de portfólios tradicional nos títulos americanos; e Bowsher e Meeks (2008), que utilizaram função de sinal mais ruído para modelagem e previsão de curvas de juros. Ao aplicarem essa metodologia a 36 curvas de juros norte-americanas, encontraram resultados superiores a modelos anteriormente abordados na literatura, inclusive implementando uma estrutura

de *pairs trading*, obtendo resultados expressivos. Apesar de os artigos utilizarem modelagens diferentes entre si, em seus estudos chegaram a resultados satisfatórios no que tange a significância estatística e econômica dos modelos quando testados empiricamente.

Neto (2012) testa duas estratégias principais em renda fixa: arbitragem no *spread* entre *swaps* de taxas de juros europeias e norte-americanas, e arbitragem na própria curva de juros americana. Neste estudo, o autor inicialmente pretendia provar que a possibilidade de ganhos em estratégias de arbitragem não se mostrava disponível em períodos de crise financeira, como as de 1997 e 2008. E mais, pretendia provar que, além de não haver oportunidades de ganhos sem risco ou de risco reduzido nesses períodos, as estratégias que se utilizam desse racional sofreriam relevantes perdas. Porém, ao analisar quase 30 anos de dados, constatou que mesmo em momentos de alta volatilidade e incerteza dos mercados, como durante as crises, esse tipo de estratégia se demonstrou lucrativa. Cabe ressaltar que, apesar de ambas as estratégias terem apresentado retorno positivo significativo, apenas a segunda mostrou gerar efetivamente alfa (retorno acima do risco). A estratégia nos *swaps* apenas remunerou ao longo do tempo o risco adicional trazido por sua implementação.

O que o presente trabalho introduz de novo, neste sentido, além de aplicar as estratégias de curvaturas ao caso brasileiro, é utilizar os dados diários, ao contrário dos estudos citados que mensuravam e testavam dados de base mensal. Os resultados encontrados nesta dissertação foram expressivamente superiores aos encontrados na literatura, no que tange retornos absolutos e ponderados pelo risco, este último expresso por índice de Sharpe superior a 1,75 em todas as janelas temporais.

Dentre os padrões e modelos estudados por pesquisadores da área, as relações de cointegração procuram entender como as diferentes maturidades da curva se comportam entre si, e ao mesmo tempo, testar estratégias que não possuam, ou que possuam de forma suavizada, um viés direcional.

A literatura anterior já havia testado a estacionariedade entre os *spreads* de *yields*. O estudo de Giese (2008) estende o quadro teórico da hipótese das expectativas para verificar a presença da estacionariedade em *spreads* diferentemente ponderados (borboletas) utilizando CVAR nas taxas de juros americanas. Os resultados aceitam as

condições impostas, e mostram que uma avaliação mais significativa das expectativas futuras das taxas de juros pode ser obtida através da curvatura ao invés da inclinação da curva.

Faraco (2015) desenvolve um trabalho mais voltado para a estratégia em si, utilizando cointegração para detectar equilíbrios entre as diferentes maturidades da curva de juros brasileira e explorar desvios dessa condição de equilíbrio. O trabalho encontrou resultados promissores, porém, utilizou base de dados relativamente pequena, o que esta dissertação procura aprimorar. O autor também efetua testes com base intradia, o que acarreta um grande risco de fricção de microestrutura, podendo afetar significativamente os resultados.

Cieslak e Povala (2016) mostram, ao estudar a volatilidade das taxas de juros dos Estados Unidos, que a expectativa de volatilidade das taxas de curto prazo é a responsável pelos 'humps' locais em alguns trechos da curva com maturidade entre dois e três anos, explicando para essa parte da curva seu formato não-monotônico. Esse comportamento peculiar é uma das bases para explicar o motivo de existência de arbitragem em curvas de juros, e será aprofundada nas seções posteriores.

Sendo válida a hipótese das expectativas racionais, a razão pela qual essas taxas não estariam na sua relação de estacionariedade pode ser explicada por algumas outras teorias auxiliares. Também são efetuados, nesta pesquisa, os testes para verificar se as taxas a termo são integradas de mesma ordem e se cointegram entre si.

Frente a este contexto, é fundamental que se compreendam melhor as relações existentes na estrutura a termo da curva de juros e as oportunidades existentes para explorá-las, seja visando alocação de recursos mais eficiente, seja mensurando as possibilidades de aplicação de política monetária e seus reflexos nos agentes financeiros. Por essa razão, esta pesquisa foi elaborada, pretendendo-se responder à seguinte questão: é possível elaborar uma estratégia de investimentos na curva de juros brasileira, utilizando cointegração entre as taxas a termo, que produza resultados consistentes e significativos?

A partir desta questão, estruturou-se a presente dissertação. Com base na literatura revisada, o trabalho aprofunda estudos anteriores, aplicando-os principalmente para o caso brasileiro. Giese (2008) e Faraco (2015) encontraram relações de

cointegração em algumas combinações de taxas a termo de juros. O presente trabalho inova em relação aos anteriores, principalmente para o caso brasileiro, a medida que aumenta significativamente a base de dados, utilizando 12 maturidades, em uma base diária de aproximadamente 9 anos. Tal fato é significativo por contemplar diferentes fases de ciclo econômico, bem como a crise imobiliária norte-americana de 2008 que afetou todos os mercados mundiais, conferindo maior robustez aos resultados em diferentes cenários possíveis. Encontrar interação que se mostre permanente no tempo em instrumentos financeiros permite a criação de estratégias eficientes de alocação de recursos, bem como de previsão do comportamento da curva de juros e o consequente enriquecimento da pesquisa acadêmica sobre taxas de juros e efeitos da política econômica. Ao abordar mais a fundo o que já foi desenvolvido no tema, além de procurar encontrar relações e estratégias, o trabalho irá investigar as possíveis causas, baseado na teoria e na literatura de apoio disponível, de tais relações se mostrarem e permanecerem.

A presença ou ausência dos maiores agentes nos mercados, principalmente em momentos de alto grau de incerteza, está diretamente relacionado com o preço atual dos ativos financeiros e, por consequência, com a presença de situações nas quais a arbitragem é possível. Hu, Pan e Wang (2013) desenvolvem um importante artigo levando em consideração o conteúdo informacional que está presente nas operações envolvendo os títulos de emissão do governo. Desenvolveram um índice que mede o ruído, baseado na diferença entre os preços pelos quais são negociados os títulos e o valor teórico justo da curva naquela maturidade. Este índice busca capturar o nível do desbalanceamento entre a demanda e oferta por liquidez, que tende a se elevar substancialmente em épocas de turbulência e incerteza.

Na presente dissertação, se replicou um índice semelhante, de forma inovadora no que tange a literatura nacional, utilizando os títulos brasileiros, o mercado futuro de derivativos de juros, e o diferencial entre as taxas básicas de títulos públicos e privados.

O trabalho é organizado conforme seguem as seções. A seção 2 conceitua o que é o derivativo de juros, curva à vista e curva a termo, objetos principais de toda a modelagem da pesquisa, bem como a cointegração, arcabouço teórico para a fundamentação do algoritmo. A seção 3 apresenta a base de dados, a metodologia

utilizada para efetuar os testes e as estimações. A seção 4 apresenta os resultados e a seção 5 as conclusões.

1.1 OBJETIVOS

Com base na definição do problema de pesquisa, os seguintes objetivos foram estabelecidos.

1.1.1 Objetivo Geral

Construir um método de *trading* baseado na curvatura da curva de juros brasileira, em trechos que apresentem relação estacionária.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram delimitados:

- Testar a presença de cointegração em borboletas de taxas a termo de juros nas maturidades da base de dados
- Montar um algoritmo de operações baseado nos parâmetros de cointegração nas borboletas que apresentarem-na
- Utilizar métricas para mensurar os resultados objetivos quanto à significância e retorno em relação ao risco tomado
- Testar hipóteses disponíveis na literatura sobre possíveis razões dos resultados encontrados

2 CURVA DE JUROS E ESTRUTURA A TERMO

2.1 CONCEITOS BÁSICOS

O contrato futuro de taxas de juros negociado no Brasil é o contrato futuro de Taxa Média de Depósitos Interfinanceiros de um Dia, que é negociado pelo código DI1. Esse contrato teve o início de suas negociações em 5 de junho de 1991, e tem como objeto a taxa de juro efetiva até o vencimento do contrato, definida para esse efeito a acumulação das taxas médias de Depósitos Interfinanceiros no período compreendido entre a data de negociação, inclusive, e o último dia de negociação do contrato, inclusive.

Os Depósitos Interfinanceiros são as operações de empréstimo de um dia, realizadas entre instituições financeiras através da CETIP (câmara de liquidação de títulos privados), sem lastro em títulos públicos, e tem como taxa de referência a taxa básica de juros nacional, SELIC, definida pelo Banco Central, podendo, entretanto, divergir da mesma, por razões de equalização de oferta e demanda de recursos.

Alguns conceitos particulares do mercado futuro de taxa de juros brasileiro, objeto principal de estudo da dissertação, devem ser fixados e compreendidos. Primeiramente, conforme descrito acima e como consta no sítio da CETIP (<http://www.cetip.com.br/captacao-bancaria/di#!>), o Depósito Interfinanceiro (DI) é um título privado de Renda Fixa que auxilia no fechamento de caixa dos bancos, como instrumento de captação de recursos ou de aplicação de recursos excedentes. É o ativo-objeto dos contratos futuros utilizados para construção da curva de juros. Tais contratos possuem algumas especificidades.

1) Carrego: contratos de juros levam em consideração o custo de oportunidade do dinheiro se deixado aplicado em uma taxa livre de risco. Dessa forma, todos os preços são corrigidos diariamente. Esse conceito diferencia o resultado de operações de venda ou de compra do mesmo ativo. Para considerar tal fator no estudo, serão utilizados, como a ser explicado na metodologia e amostra de dados, preços já corrigidos.

2) Maturidades fixas: contratos futuros, em especial os contratos de juros, diferentemente de outros ativos financeiros, não mantém suas características inalteradas ao longo do tempo. Como possuem um prazo de vencimento, o tamanho de risco e exposição mudam de acordo com o tempo. Para mitigar tal efeito, serão utilizadas maturidades fixas, ou seja, ao invés de utilizar-se o contrato futuro disponível, através de interpolação, o prazo de vencimento de cada vértice será mantido fixo ao longo de toda a amostra (um mês, seis meses, um ano, etc.). A literatura como um todo trata de taxas de juros dessa maneira.

3) Margem de garantia e custos operacionais: margem de garantia é o recurso exigido pela clearing de todos os investidores que possuem posições em derivativos, de modo a garantir a liquidação financeira de todos os instrumentos. No escopo do trabalho, se for utilizada a margem, será como base para mensuração de retorno, e será calculada com base na margem inicial requerida pela bolsa, no momento de montagem da estratégia, não oscilando no tempo, como acontece na prática. Os custos de transação são constituídos basicamente de corretagem e emolumentos cobrados pela bolsa. A BM&FBovespa possui uma tabela regressiva de taxas, que concede maiores descontos quanto maior o volume operacional. De modo a não permitir que volume influencia a performance das estratégias testadas, serão utilizados os custos em seu nível de menor desconto. Essa tabela, utilizada para mensurar os custos operacionais da estratégia elaborada no trabalho pode ser encontrada em http://www.bmfbovespa.com.br/pt_br/servicos/tarifas/derivativos/.

2.2 CURVA À VISTA E ESTRUTURA A TERMO

A curva de juros e sua respectiva estrutura a termo é construída justamente a partir dos diversos vencimentos de contratos disponíveis. Utilizando a notação de Diebold e Rudebusch (2013), seja $P(\tau)$ o preço presente de um título de τ períodos a frente, e $y(\tau)$ a taxa composta até o vencimento, tem-se a seguinte fórmula:

$$P(\tau) = e^{-\tau y(\tau)} \quad (1.1)$$

Já a taxa a termo é dada por

$$f(\tau) = \frac{-P'(\tau)}{P(\tau)} \quad (1.2)$$

Sob a hipótese das expectativas racionais, o erro entre o preço à vista e as taxas a termo devem ter média condicional igual a zero. A hipótese das expectativas como explicação para a formação das taxas de juros de mercado remonta a Fischer (1986). Segundo ela, as taxas longas são um acumulado das taxas mais curtas acrescido de um prêmio de risco constante para cada maturidade. Segundo a notação de Longstaff (2000), a Hipótese das Expectativas (HE) da estrutura a termo de juros estabelece que:

$$E[r_{t+n}|H_t] = R_{t(n)} + a_n \quad (1.3)$$

onde r_{t+n} é a taxa de juros de curto prazo média do período t até $t + n$, H_t é o conjunto de informação do agente econômico usado no período t , $R_{t(n)}$ é a taxa esperada em t para o período n e a_n é um prêmio de risco invariante no tempo, ainda que possa diferir em distintos horizontes n .

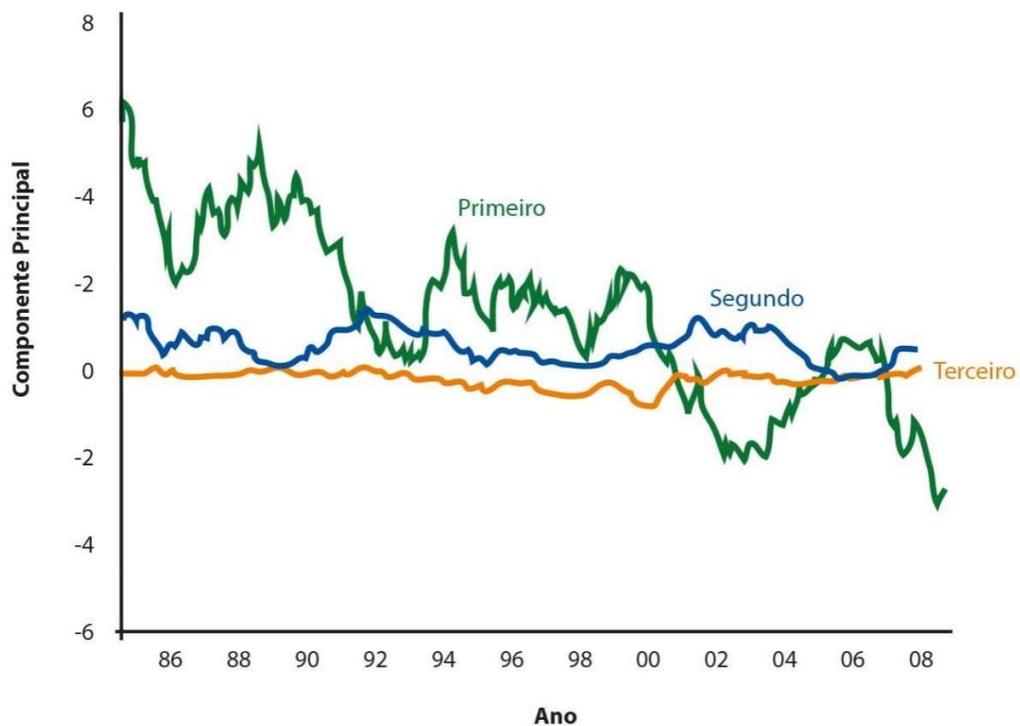
A intuição por trás de (1.3) é simples e baseia-se na existência de arbitragem. Supondo que houvesse uma expectativa de que as taxas de curto prazo fossem, em média, exageradamente baixas em relação à taxa longa, para um determinado horizonte. Os "tomadores" teriam incentivo a tomar dinheiro usando títulos de curto prazo, emprestando esses recursos usando títulos de longo prazo, movimento esse que faria a taxa longa cair e a curta subir de forma que o equilíbrio fosse restabelecido por esse mecanismo de atuação dos agentes. Assim, junto à Hipótese das Expectativas está a teoria dos mercados eficientes, que impõe que quaisquer movimentos nas taxas de juros mais longas deveriam estar associados a novas informações sobre a média das taxas de juros no futuro.

Logo, deve haver uma combinação linear entre elas que é estacionária (ENDERS, 2004). Dado que uma taxa a termo é a expectativa da taxa a vista em um determinado tempo t , a mesma afirmativa deve ser válida entre duas taxas a termo, e deve haver uma relação linear entre essas duas taxas que é estacionária.

Um modelo que parece óbvio para tratar séries de taxas é um vetor autoregressivo, ou outro similar. Porém, um modelo de vetor autoregressivo irrestrito acarretaria perda

de muitos graus de liberdade. Para contornar essa situação, retornos de ativos financeiros costumam ser bem representados por um modelo de vetor autoregressivo restrito, apresentando uma estrutura de fator, ou seja, séries de dimensão alta são explicados por um fator em comum de dimensão mais baixa. No caso de curvas de juros, modelos de fatores provêm uma descrição bastante eficiente. Joslin, Singleton e Zhu (2011) notam que com apenas três fatores, ou componentes comuns, é possível explicar aproximadamente 95% das variações na curva de juros.

Figura 1 – Nível, inclinação e Curvatura em um modelo de 3 fatores



Fonte: Diebold e Rudebusch (2013)

Desses três fatores, ilustrados na figura 1, o primeiro é o nível da curva, que aparentemente não é estacionário, porém o mais previsível e com maior grau de persistência. (Na série de títulos norte-americanos utilizada por Diebold e Rudebusch (2013), achou-se autocorrelação de lag 1 igual a 0,97 para o nível da curva.) O segundo

fator é a inclinação da curva, que está relacionada ao momento do ciclo de negócios em que se encontra a economia local naquele determinando momento do tempo, e o terceiro fator é a curvatura. A estrutura a termo de uma curva de juros, portanto, pode ser representada por um modelo com esses três fatores, como por exemplo, no modelo estático de Nelson-Siegel:

$$f(\tau) = \beta_1 + \beta_2 e^{-\lambda\tau} + \beta_3 \lambda \tau e^{-\lambda\tau} \quad (1.3)$$

Onde β_1 , β_2 e β_3 são os fatores de nível, inclinação e curvatura.

Dado a literatura ter atestado ser possível representar a curva de juros eficazmente com esses três fatores, e ser possível analisar de forma empírica esses três fatores, ou seja, há instrumentos ou combinação de instrumentos financeiros nos quais seus retornos são justamente cada um desses três fatores, há motivos que levam a estudar e testar se em algum deles há oportunidades de alocação de recursos que supere a taxa livre de retorno.

2.3 ARBITRAGENS NA CURVA DE JUROS

Uma estratégia de arbitragem parte da premissa de que as curvas de juros deveriam ser monotônicas para serem livre de arbitragem. Havendo cointegração entre as taxas a termo entre si, por exemplo, pode ser possível fazer previsões para essas diferenças e, em momentos que as taxas estejam fora dessa relação, montar posições de arbitragem, visando o retorno à relação inicial.

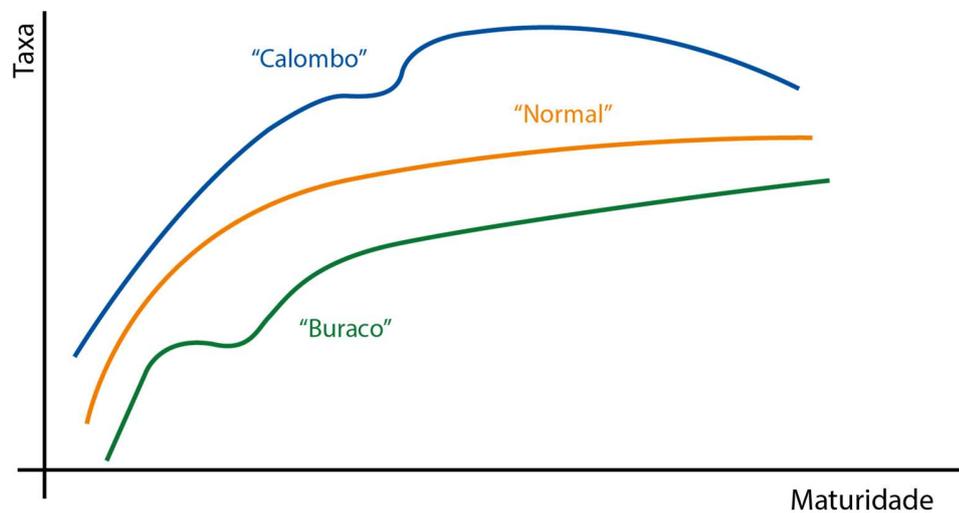
Dentre as estratégias existentes, aquelas envolvendo a curvatura abordam maior quantidade de aspectos na sua aplicação, englobando apostas direcionais, estratégias de arbitragem ou políticas de proteção. Há diversos tipos de curvaturas que serão ilustradas nas subseções posteriores.

O nível e a inclinação da curva de juros, dois primeiros fatores de definição da curva, também são objeto de estudo de estratégias de arbitragem. Porém, além do apoio de estudos já efetuados na literatura, e citados anteriormente, defendendo tal tipo de

estudo na curvatura das curvas, há um forte aliado que é o ganho de convexidade e da passagem do tempo a favor de estruturas que buscam ineficiências na curvatura.

Como dito anteriormente, estratégias de arbitragem partem da premissa de que as curvas devem ser monotônicas para não apresentarem oportunidades de auferir lucro sem risco. Em outras palavras, a curva não apresentaria certos 'buracos' ou 'calombos', como mostra a figura 2.

Figura 2- Anormalidades em curvas de juros

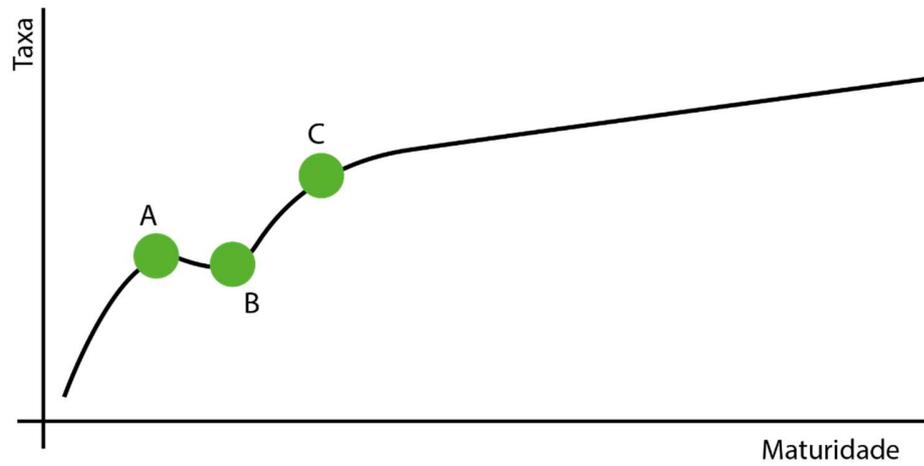


Fonte: A Trader's Guide Bonds, Swaps, and IR Instruments - Vol 1

Essas 'imperfeições' na curva de juros podem persistir por anos em alguns países. Motivo pelo qual é grande vantagem dessa classe de estratégia se beneficiar tanto de um retorno à curva, como se beneficiar da passagem do tempo.

Considere-se, a título de exemplo, uma posição composta de 1 título comprado na maturidade A, 1 comprado na maturidade C, e dois vendidos (a descoberto) na maturidade B, como ilustra a figura 3.

Figura 3 – Exemplo de arbitragem: situação inicial

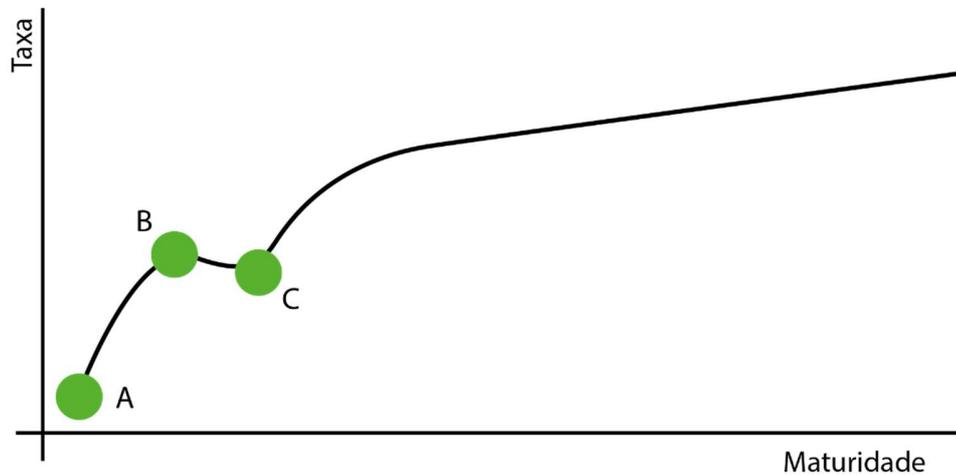


Fonte: A Trader's Guide Bonds, Swaps, and IR Instruments - Vol 1

Os três vértices formam entre eles um arco, que apresenta convexidade positiva do ponto de vista geométrico. E esse fato que irá gerar retorno positivo no caso da manutenção dessas imperfeições por um período extenso.

A figura 4 mostra como estaria a estrutura montada na figura 3 após decorrido certo período de tempo se a curvatura tivesse se mantido.

Figura 4 – Exemplo de arbitragem: tempo decorrido



Fonte: A Trader's Guide Bonds, Swaps, and IR Instruments - Vol 1

Note-se que, novamente do ponto de vista geométrico, a estrutura agora possui curvatura negativa, ou convexidade para baixo. Comparando-se cada vértice isoladamente se comprova como, nesse caso, a estratégia foi ganhadora: o título C foi comprado a uma taxa mais alta (ou preço mais baixo), e sua taxa agora é relativamente menor. Logo, seu preço está maior. O oposto ocorreu com o título B vendido a descoberto. A taxa subiu relativamente, ou o preço caiu, também gerando retorno positivo. E, por fim, o movimento do título A teve comportamento análogo ao título C.

Tendo como base esse racional, faz sentido que as estratégias envolvendo curvaturas apresentem algumas das melhores relações de risco x retorno. Na tabela 1, pode-se ver os 5 tipos de estratégias de arbitragens com renda fixa estudadas por Duarte, Longstaff e Yu (2007). A assimetria positiva argumenta em favor de a estratégia não gerar pequenos retornos positivos a maior parte do tempo e ocasionalmente gerar expressivas perdas. O índice de Sharpe, apresentado em Sharpe (1966), é um indicador de remuneração do risco da estratégia comumente utilizado na literatura, e resulta da razão entre a diferença de retorno para a taxa livre de risco e a diferença do desvio-padrão da estratégia para o desvio-padrão da taxa livre de risco. Quanto mais alto o índice, de maneira mais eficiente é remunerado o risco corrido.

Tabela 1 – Arbitragens em Renda Fixa: Assimetria e retorno ponderado pelo risco

Estratégias de renda fixa testadas no trabalho de Duarte, Longstaff e Yu (2007). Dentre as 5 analisadas, destacam-se com Índice de Sharpe elevado e assimetria positiva a borboleta na curva de juros e a arbitragem com *Credit Default Swap* (CDS).

Estratégia	Assimetria	Índice de Sharpe
Swap Spread	-0,111	0,597
Borboleta curva de juros	0,995	0,785
Arbitragem em <i>Mortgage</i>	0,064	0,514
Venda de Volatilidade	-0,925	0,72
CDS	2,556	1,203

Fonte: Duarte, Longstaff e Yu (2007): “Risk and Return in Fixed-Income Arbitrage”.

Como é possível verificar, das 5 estratégias testadas e analisadas, duas se destacam com assimetria positiva e com o maior Sharpe: borboleta na curva de juros e arbitragem com *Credit Default Swap* (CDS). Esta apresentou um índice de Sharpe maior do que 1, nível considerado elevado pela literatura. A estratégia consiste basicamente em buscar comportamento anormal entre o CDS, que é um tipo de seguro contra a falência da empresa, e o preço das ações. Como esse instrumento não está disponível no mercado brasileiro, foi deixado fora do escopo de pesquisa do presente trabalho. A segunda estratégia, de *butterfly* ou borboleta entre maturidades da curva está presente no mercado nacional, na literatura nacional e internacional, e será o objeto principal das estratégias testadas no presente trabalho.

2.3.1 Travas Borboleta na curva de juros

A borboleta é uma das mais utilizadas estratégias em renda fixa por gestores profissionais (MARTELLINI; PRIAULET; PRIAULET, 2002). Consiste basicamente em vender (comprar) duas maturidades da curva de juros e comprar (vender) o dobro de uma maturidade intermediária. Dessa maneira, procura-se isolar movimentos direcionais e buscar-se diferencial entre spreads que apresentem alguma relação estatística. Existem

alguns tipos de borboleta, que diferem entre si no formato e em quais movimentos da curva de juros irão ou não afetar o seu comportamento.

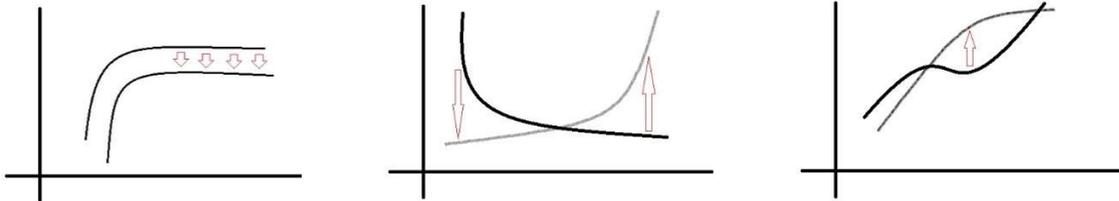
Quadro 1 – Tipos de borboleta e movimentos da curva de juros

Tipos de Estratégias Borboleta	Movimentos da Curva de Juros		
	Nível	Inclinação	Curvatura
Caixa e duração neutras		**	*
Ponderação 50/50			**
Ponderação por Regressão		**	
Ponderada pela maturidade		**	*
Diferencial de taxa a termo		*	**

Fonte: Martellini, Priaulet e Priaulet (2002). Complementada pelo autor.

A curva de juros pode apresentar três tipos de movimentos, que dependem de como as maturidades mais longas se comportam em relação ao comportamento das maturidades mais curtas. São eles: 1 – movimento paralelo ao longo de toda a curva de juros, ou seja, uma alteração no nível da curva. O risco deste tipo de movimento é praticamente neutralizado ao se utilizar estratégias borboleta. 2 – movimento na inclinação da curva, quando as taxas longas se movem expressivamente na direção oposta das taxas curtas. A estratégia de borboleta defende parcialmente esse comportamento da curva, dependendo de qual trecho está envolvido na estrutura. 3 – movimento na curvatura ou na convexidade da curva. É justamente o movimento local que a estratégia de borboleta pretende captar ao notar uma descontinuidade na curva. A figura 5 mostra graficamente os três movimentos principais da curva.

Figura 5 – Principais movimentos da curva de juros



Fonte: elaborada pelo autor.

No quadro 1, as borboletas que são relativamente pouco afetadas por esses movimentos são representadas com um asterisco (*), e as que são fortemente afetadas por inclinação da curva, ou seja, buscam justamente estar exposto a esse tipo de comportamento das taxas, com dois asteriscos (**). Por fim, quando a curva de juros tem movimentos diferentes ao longo da curva, com taxas maturidades diferentes de maturidades diferentes apresentando movimentos de magnitudes diferentes, e dessa forma, alterando o formato da curva, tal movimento altera a curvatura da mesma. O quadro 1 mostra quais as borboletas que são mais impactadas pela mudança na curvatura.

A estratégia ponderada por regressão atribui pesos para as maturidades longa e curta de acordo com parâmetros obtidos por algum modelo, como em Faraco (2015). Em contrapartida, a borboleta de diferencial de taxas *forward* ou à termo pondera as maturidades das extremidades de modo a resultar na taxa a termo mais longa e na taxa a termo mais curta. Quando as maturidades são simétricas entre si, ou seja, a diferença tempo até o vencimento entre a mais curta e a intermediária é igual à diferença entre a intermediária e a mais longa, a diferencial de *forward* pondera igualmente à estratégia 50/50. Essa estratégia é abordada por Giese (2008).

Dado que estudos anteriores procuraram mostrar que estratégias de maior capital intelectual envolvido em taxas de juros obtêm melhores retornos, buscar relações relativamente mais sofisticadas já utilizadas anteriormente pela literatura nos instrumentos financeiros disponíveis no mercado financeiro nacional, inovando quanto à

base de dados e quanto à estratégia em si aplicada, pode apresentar resultados significativos.

2.4 COINTEGRAÇÃO

O conceito de cointegração introduzido por Engler e Granger (1987) considera que uma série de variáveis econômicas está no seu equilíbrio de longo-prazo quando:

$$\beta_1 x_{1t} + \beta_2 x_{2t} + \dots + \beta_n x_{nt} = 0 \quad (2.1)$$

Sendo β e x_t os vetores $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ e (x_1, x_2, \dots, x_n) , o sistema está em equilíbrio de longo prazo quando $\beta x_t = 0$. O desvio do equilíbrio de longo prazo, chamado de erro de equilíbrio, e_t , de modo que $e_t = \beta x_t$. Se o equilíbrio é significativo, o erro de equilíbrio deve seguir um processo estacionário.

Enders (2004) cita como exemplo de cointegração a hipótese de taxa a termo não-viesada. Segundo ele, uma forma da hipótese de eficiência de mercado afirma que o preço no futuro de um ativo financeiro deve ser igual ao valor esperado do preço à vista desse ativo no futuro. Denotando f_t o log do preço de um ativo financeiro um período a frente (no exemplo do autor, a taxa de câmbio) no tempo t e s_t o log do preço à vista desse mesmo ativo em t , a teoria afirma que $E_t s_{t+1} = f_t$. Se essa relação falha, arbitradores podem esperar auferir lucro sem risco no mercado cambial. Se as expectativas dos agentes é racional, a previsão do erro para a taxa à vista de câmbio no período $t+1$ vai ser igual a zero, logo $s_{t+1} - E_t s_{t+1} = \varepsilon_{t+1}$, onde $E_t \varepsilon_{t+1} = 0$. Combinando as duas equações, $s_{t+1} = f_t + \varepsilon_{t+1}$. Desde que $\{s_t\}$ e $\{f_t\}$ sejam integradas de ordem 1, a hipótese de taxas a termo não-viesadas exige que exista uma combinação linear entre a taxa a vista e a taxa a termo que seja estacionária. Assim como taxas de câmbio, taxas de juros compartilham das mesmas hipóteses, e baseado nestas será desenvolvida a modelagem do presente trabalho.

Logo, cointegração na área de finanças significa que existe uma relação de longo prazo entre os ativos financeiros que a constituem. Formalmente, se x_t e y_t são $I(1)$, ou

seja, é necessária apenas uma operação de diferença para tornar a série estacionária, e são cointegrados, de forma que o erro $\varepsilon_t = y_t - \alpha - \beta x_t$ é $I(0)$, no longo prazo x_t e y_t não irão divergir, ainda que em momentos do curto prazo possam se apresentar de maneira divergente. O teste para verificar se há cointegração é feito em alguns passos. O primeiro deles é verificar se as séries, no caso desta dissertação, cada maturidade, são integradas de mesma ordem. Essa verificação é realizada através do teste de raiz unitária proposto por Dickey e Fuller. O teste basicamente procura verificar se o parâmetro do termo autoregressivo é diferente de 1, o que define uma série ser ou não estacionária. A versão aumentada do teste, conhecida como *Augmented Dickey-Fuller (ADF)*, realiza o teste para séries com processo autoregressivo maior que 1, como no caso de os erros não apresentarem-se como ruído branco, sendo necessário um processo maior de defasagens. O segundo passo é aplicar o método de dois estágios proposto por Engler e Granger, explicado anteriormente, nas séries que apresentam mesma ordem de integração. Nos conjuntos de maturidades que apresentam cointegração, o modelo de equilíbrio de longo prazo resultante gera o erro, que possibilita a correção dos desvios através de sua análise.

No âmbito do mercado financeiro, a isso se dá a denominação de retorno à media, ou *mean return strategy*. Como $\varepsilon_t \sim IID(0, \sigma^2)$, $y_t = \alpha + \beta x_t$ pode ser interpretado sendo um equilíbrio ou relacionamento de longo prazo entre esses dois ativos ou mercados, e ε_t sendo o termo de correção de erro. Dado ε_t originar o valor do erro da expressão de equilíbrio, é, dessa forma, o desvio do equilíbrio, e no longo prazo será igual a zero. O desvio em relação ao equilíbrio é justamente o que será parametrizado para verificar se o sistema está distante de sua relação de longo prazo, e portanto, proporcionando uma oportunidade de posicionar-se na expectativa de o sistema retornar à relação de longo prazo.

3 BASE DE DADOS E ANÁLISE EMPÍRICA

Nesta seção, são apresentados os procedimentos metodológicos adotados para a realização desta pesquisa. São descritos os elementos e as ações executadas nas diferentes etapas da pesquisa. Nesse capítulo, há também o detalhamento da base de dados, as inovações presentes em relação aos estudos já efetuados, e a apresentação do índice a ser utilizado para mensurar os resultados.

3.1 AMOSTRA E FONTE DE DADOS

A problemática que inspira essa pesquisa consiste em verificar a presença de cointegração em *spreads* de diferentes maturidades da curva de juros brasileira e na curvatura da curva, através de borboletas. Para isso, foram estudadas 12 maturidades fixas⁵ da curva de juros, suas diferenças de inclinação, as borboletas utilizando ponderação de peso de acordo com os parâmetros do modelo e borboletas utilizando a diferença de taxas a termo (*forward*).

A escolha da base de dados envolve duas questões a serem discutidas. A primeira, a utilização de maturidades fixas. Dado o fato particular de instrumentos de dívida (ao contrário de outros ativos sem vencimento, como ações por exemplo) possuírem um prazo determinado, sua estrutura básica altera-se com a passagem do tempo. Isso ocorre pois o vencimento da obrigação aproxima-se a cada período. De forma a padronizar os dados estudados, e não comparar características diferentes, a literatura que aborda essa área utiliza maturidades fixas, sendo o prazo para o vencimento de determinado contrato sempre o mesmo. A segunda questão é a especificidade de as taxas a termo possuírem maturidade fixa entre si. Esse conceito confere robustez aos estudos feitos com essa estrutura, visto que em uma estratégia que utiliza maturidades fixas, após a entrada na operação, os contratos alteram-se ao decorrer do tempo. A taxa a termo elimina este

⁵ 21,63,126,252,378,504,630,756,882,1008,1134 e 1260 dias úteis.

problema, mas o decorrimto dos períodos terá o mesmo efeito sobre todas as maturidades envolvidas, e a maturidade da taxa a termo permanecerá a mesma.

A tabela 2 mostra a estatística descritiva das maturidades utilizadas, e a figura 6 ilustra a evolução das taxas da amostra ao longo do período.

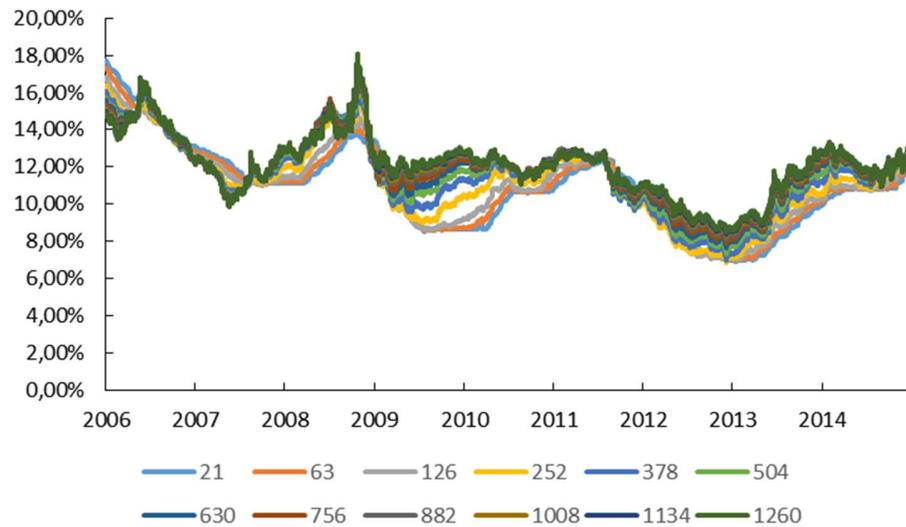
Tabela 2 – Estatísticas descritivas

Estatísticas descritivas das 12 maturidades fixas utilizadas na amostra. Período 2006 a 2014.

Maturidade	Yield	Yield	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose
dias úteis	média	mediana					
21	10,91%	10,83%	6,92%	17,71%	2,27%	0,42	0,11
63	10,91%	10,88%	6,97%	17,35%	2,20%	0,31	-0,09
126	10,99%	10,99%	6,92%	16,83%	2,14%	0,18	-0,30
252	11,23%	11,24%	6,86%	16,40%	2,10%	0,06	-0,35
378	11,51%	11,52%	6,99%	17,12%	2,03%	0,02	-0,26
504	11,72%	11,76%	7,32%	17,45%	1,93%	-0,01	-0,10
630	11,85%	11,91%	7,65%	17,78%	1,85%	0,02	0,05
756	11,94%	11,99%	7,91%	17,83%	1,78%	0,05	0,17
882	12,01%	12,07%	8,13%	17,93%	1,72%	0,06	0,28
1008	12,06%	12,10%	8,29%	18,00%	1,68%	0,11	0,39
1134	12,10%	12,14%	8,39%	18,08%	1,65%	0,14	0,46
1260	12,12%	12,20%	8,54%	18,10%	1,63%	0,18	0,50

Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 6 – Evolução das taxas ao longo da amostra



Fonte: Bloomberg

Os dados utilizados foram compostos de basicamente duas partes. A primeira, consistiu em uma base de dados dos contratos de depósito interfinanceiro de um dia negociados na BM&F, com frequência diária, utilizando-se as taxas de fechamento, convertidas para PU (Preço Unitário), e corrigidas de forma a neutralizar o efeito do carregamento descrito no item 1 caput. A amostra da base compreende dados de janeiro de 2006 a dezembro de 2014. A segunda parte visa tratar essas taxas, para que possam ser trabalhadas maturidades fixas, visto que os contratos modificam-se ao longo do tempo (prazo e duração), o que poderia afetar o estudo. Para tanto, foi utilizado o método de *cubicspline*⁶ nestes contratos, obtendo-se as maturidades fixas desejadas. Nos testes de cointegração e na modelagem, foram estes dados os utilizados.

⁶Através de um vetor de coeficientes, se aproxima a taxa na maturidade entre os dois vértices disponíveis, de forma a minimizar a função de chegada na taxa mais próxima.

3.2 ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados será aqui descrita em três etapas: tratamento inicial dos dados, algoritmo de *trading* e índices de interpretação dos retornos encontrados.

3.2.1 Tratamento inicial dos dados

Primeiramente, os dados diários de fechamento dos diversos vencimentos dos contratos de juros futuros receberam tratamento explicado anteriormente, conforme McCulloch (1975) e Adams e Deventer (1994), para interpolar as maturidades fixas e dessa forma apresentarem estrutura temporal proporcional ao longo do tempo, o que não é possível efetuar ao se trabalhar com contratos derivativos que apresentam vencimento.

Métodos baseados em *spline* utilizam alguns pontos de referência para, através de polinômios, aproximar a curva de taxas ou a estrutura a termo. O método enfrenta um *trade-off* entre a precisão do ajuste e a suavização da curva.

Assumindo-se que a curva a termo instantânea é um *cubic spline* com nodos em $(t_0, t_1, t_2 \dots t_k)$ Em cada subintervalo $[t_{i-1}, t_i]$, sendo $1 \leq i \leq k$, a taxa a termo f é uma função polinomial cúbica com maturidade m :

$$f(m, b) = a^i \left(\frac{m - t_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right)^3 + b^i \left(\frac{m - t_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right)^2 + c^i \left(\frac{m - t_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right) + d^i \quad (3.1)$$

Onde $b = ((a^i, b^i, c^i, d^i), i = 1, 2, 3 \dots k)$ resume os parâmetros do *spline*. Adicionalmente, é requerido que f e sua primeira derivada sejam contínuos nos nodos. É também imposta a restrição $d^0 > 0$ e $a^k > 0$ para assegurar que as taxas a termo sejam maiores que zero nas maturidades zero e infinito.

Dada a curva a termo, as taxas de zero cupom podem ser derivadas a partir dela, e os parâmetros b_t podem ser estimados utilizando os preços dos vértices de DI futuro observados:

$$b_t = \min_b \left[\sum_{i=1}^{N_t} \left[(P^i(b) - P_t^i) \cdot \frac{1}{D_i} \right]^2 + \lambda \int_0^{t_k} [f''(x, b)]^2 dx \right] \quad (3.2)$$

Onde $\lambda \geq 0$ e $f''(x, b)$ é a segunda derivada da taxa a termo em relação à maturidade x .

Foram ainda calculados os Preços Unitários de cada maturidade, para toda a mostra, considerando-se conforme contrato padronizado pela BM&F, o valor de R\$ 100.000,00 no vencimento, trazidos a valor presente descontados pela taxa atual da maturidade. O mesmo procedimento foi realizado para encontrar os Preços Unitários das taxas a termo. Esses dados foram utilizados para o cálculo do retorno financeiro das estratégias, bem como da incidência de taxas operacionais.

Calculadas as taxas a termo, aplicou-se testes para verificar se havia combinações dessas taxas que são integradas de primeira ordem ($I(1)$).

O teste de cointegração proposto por Engler e Granger (1987) se dá em duas etapas. Seja um modelo de combinação linear:

$$x_{1,t} = \beta_1 + \beta_2 x_{2,t} + \dots + \beta_n x_{n,t} + \mu_t \quad (3.3)$$

A primeira etapa consiste em estimar o vetor de coeficientes β através de MQO. Na segunda etapa, testam-se se os resíduos possuem raiz unitária. A segunda etapa baseia-se no intuitivo de que, rearranjando a equação (3.3) e isolando o resíduo, encontra-se a relação de longo prazo entre as variáveis que estão sendo testadas. Então, se elas apresentarem uma relação de convergirem para um comportamento estável no longo prazo, essa relação deve ser estacionária. Verifica-se a raiz unitária com o teste de Dickey-Fuller aumentado.

O aspecto menos favorável à utilização desse procedimento seria principalmente o fato de que o coeficiente β pode ser zero e não existir combinação linear entre as séries. Tal situação é contornada de maneira relativamente fácil visto que no presente estudo os testes serão feitos não utilizando mais de duas séries caso a caso (ou duas séries de taxas, quando testar os spreads, ou diferenças de spreads ao se testar as borboletas).

Dentre os 220 pares possíveis da amostra (12 maturidades fixas, combinadas as taxas a termo duas a duas, repetindo a maturidade intermediária), 139 rejeitaram a hipótese nula, quando utilizada toda a base de dados para o teste.

O algoritmo de investimento e os parâmetros definidos para cada situação, de abertura e encerramento de cada operação, estão definidos na seção Arbitragem e os retornos da estratégia e índices de interpretação dos mesmos estão na seção Resultados.

A maioria das medidas de *performance* são computadas usando dados históricos, mas justificadas baseando-se em relações previstas (SHARPE, 1994). Implementações práticas tendem a usar resultados *ex post*, enquanto discussões teóricas focam mais em valores *ex ante*. Implicitamente ou explicitamente, esse fato assume que os resultados históricos têm, pelo menos em parte, algum poder preditivo.

William Sharpe, em seu clássico artigo de 1966 (depois revisto em 1994), introduziu um índice que veio a levar seu nome, que media a *performance* de fundos mútuos ponderados pelo risco assumido pelos mesmos. Esse índice passou a ser largamente utilizado para mensurar risco adicional ao risco (alfa) em estratégias de investimentos e ativos financeiros diversos.

Seja R_{Ft} o retorno do fundo ou estratégia no período t , R_{Bt} o retorno do *benchmark* utilizado no período t , e D_t o diferencial de retorno no período t :

$$D_t \equiv R_{Ft} - R_{Bt} \quad (3.4)$$

O índice de Sharpe histórico é dado por :

$$S_h = \frac{\bar{D}}{\sigma_D} \quad (3.5)$$

Onde \bar{D} é o valor médio do diferencial de retorno ao longo do período t , e σ_D o desvio padrão do diferencial no período t .

Estratégias de arbitragem são usualmente comparadas à taxa livre de risco, por se tratarem de investimentos *a priori* neutros em relação a movimentos direcionais do mercado. Na presente pesquisa, o índice de Sharpe histórico foi utilizado considerando os retornos da própria estratégia desenvolvida sendo o diferencial de retorno, dado que as posições montadas são sempre efetuadas com derivativos, não sendo necessário desembolso de caixa, e as margens requeridas pela bolsa podem ser aplicadas em ativos que retornam a taxa livre de risco (no caso brasileiro, CDI).

Sendo ainda conservador nesse ponto, o desvio padrão utilizado também foi somente o da estratégia. O conservadorismo nesse caso se dá no momento em que é possível também descontar o desvio padrão da estratégia do desvio padrão do próprio ativo livre de risco, resultado em um índice de Sharpe maior.

Após encontrados os resultados, uma questão natural que surge é se os demais agentes arbitradores e gestores de recursos geram resultados similares. Como visto em Karsimus (2015), se os resultados da estratégia se assemelham a um índice relacionado de fundos multimercados, é possível que a estratégia elaborada caracterize o que boa parte dos fundos na verdade faz. Caso contrário, ou a estratégia desenvolvida é realmente uma novidade e ainda não implementada pelos gestores, o que apresenta grande valor de geração de alfa, ou sua participação é pouco relevante frente a outras estratégias utilizadas que têm mais peso nos resultados.

O índice utilizado para realizar tal comparação foi o Índice de Hedge Funds Anbima (IHFA). O IHFA é um índice representativo da indústria de *hedge funds* no Brasil, criado com o objetivo de servir de parâmetro para o acompanhamento da evolução deste segmento. O seu valor é reflexo, em moeda corrente, da evolução de uma aplicação hipotética em cotas de uma cesta de fundos selecionados a partir de critérios específicos predefinidos. O índice é constituído com data-base em 31/3/08 e valor igual a 1.000. Com o objetivo de preservar a representatividade do indicador, sua composição teórica é revista periodicamente⁷. Os dados diários disponíveis do IHFA iniciam somente em 01/10/2007, razão pela qual os resultados da estratégia do presente trabalho serão considerados a partir dessa data quando comparados ao índice.

A regressão dos retornos da estratégia contra os retornos do IHFA, após descontado o CDI do período:

$$R_{IHFA,t} = \alpha + \beta R_{i,t} \quad (3.6)$$

Onde $R_{i,t}$ é cada retorno do algoritmo do trabalho, utilizando a mesma data 31/03/2008 como base 100.

⁷ Os critérios de seleção de componentes, periodicidade do balanceamento da carteira teórica e as fontes de informação constam no manual de metodologia IHFA, disponível em http://portal.anbima.com.br/informacoes-tecnicas/indices/ihfa/Documents/Metodologia_IHFA.pdf

Outra questão a ser levantada é se o modelo criado não apenas alavanca um investimento em títulos pré-fixados, utilizando derivativos para essa finalidade. Portanto, é conveniente também controlar a série de retornos para um portfólio de títulos de renda fixa. A presente pesquisa efetuou, então, regressão dos retornos da estratégia contra o índice de renda fixa de títulos pré-fixados calculado pela Anbima, IRF-M.

$$R_{i,t} = \alpha + \beta_1 R_{IRFM,t} + \beta_2 R_{CDI,t} \quad (3.7)$$

Dada a disponibilidade de dados diários desde 2005, foi possível utilizar a base 100 para o início de toda a amostra aplicada na modelagem da estratégia.

3.3 A ARBITRAGEM

Detectada a presença de cointegração, o conjunto de maturidades é armazenado, juntamente com os coeficientes da combinação linear que deu origem e o desvio padrão medido em uma janela móvel que servirá para a padronização das operações. Ou seja, os deslocamentos dos preços em relação à condição de longo prazo foram mensurados em desvios-padrão, e o tamanho desse deslocamento foi a variável de decisão.

A estratégia investiga a presença de cointegração entre as taxas a termo resultantes da interação entre essas maturidades fixas, e o comportamento do seu diferencial ao longo do tempo.

Seja a taxa *forward* entre dois vértices quaisquer da curva de juros, já definida anteriormente, a taxa média do período, que resulta, partindo-se da taxa mais curta, na taxa mais longa. Sob um ponto de vista mais intuitivo, a taxa *forward* pode ser conceituada como a taxa efetiva média daquele intervalo de tempo. É plausível, portanto, que as taxas, principalmente as mais longas, apresentem uma convergência entre si, bem como uma relação de longo prazo que leve a esse equilíbrio. Considere-se y_1, y_2 e y_3 as taxas até a maturidade dos períodos 1, 2 e 3, onde $1 < 2 < 3$, e τ_t o tempo até o vencimento, na data presente, da taxa y_t .

A taxa *forward* entre os períodos 1 e 2 é dada por :

$$f_{1,2} = ((1 + y_2)^{\tau_2} \cdot (1 + y_1)^{-\tau_1})^{\frac{1}{\tau_2 - \tau_1}} \quad (3.8)$$

Foram procuradas, então, relações de longo prazo entre as *forwards* $f_{1,2}$ e $f_{2,3}$, com o vértice intermediário sendo sempre o vencimento mais longo da primeira taxa e o mais curto da segunda. Se encontradas essas relações, o algoritmo de operação segue as seguintes etapas de estratégia: na janela de tempo $x+1$ verificam-se desvios da relação de convergência, procurando-se aproveitar esses desvios, monta-se a operação, visando seu retorno para seu estado ‘normal’. Os parâmetros só são utilizados na janela de tempo posterior adjacente. É importante notar que a distância entre a maturidade inicial e a intermediária pode ou não ser a mesma que a distância entre a maturidade intermediária e a final. Em outras palavras, serão consideradas borboletas simétricas e assimétricas.

O algoritmo abre uma posição quando o erro ultrapassa 2 desvios padrão (dp), considerando uma janela móvel para cálculo do desvio. Este parâmetro fixo da estratégia baseou-se em métodos já utilizados na literatura, como em Chan (2009). Foram utilizados 22, 60, 120 e 180 dias de janela, encontrando resultados similares em todas e cujos resultados serão apresentados na seção seguinte. Se o erro estiver dois dp maior, a estratégia vende a descoberto a taxa mais longa e compra a taxa mais curta, zerando a posição quando o erro voltar para 1 dp acima do verificado. De forma análoga, quando o erro estiver dois dp menor, a estratégia compra a taxa mais longa e vende a taxa mais curta, também encerrando quando o erro voltar para 1 dp abaixo do mensurado na janela. Resumidamente, é calculado um z-score⁸ e o sinal de operação é dado por:

- abre uma posição de compra se $z_t < -2,00$
- abre uma posição de venda de $z_t > 2,00$
- fecha uma posição de compra se $z_t > -1,00$
- fecha uma posição de venda se $z_t < 1,00$

Os contratos são negociados proporcionalmente aos seus coeficientes de integração ponderados de modo a gerar a taxa a termo. Portanto, não se verifica *duration* zero na maioria da estratégia. Ainda que, por conceito, em estratégias de arbitragem busque-se neutralidade em relação ao mercado, haverá um reduzido risco direcional na

⁸ $z_t = \frac{\varepsilon_t - \mu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon}$

estratégia proposta, ainda que mitigado pelas hipóteses nas quais se fundamentam a mesma.

Com a finalidade de também mensurar um possível resultado financeiro das operações geradas, foi calculado o acumulado através dos preços de cada taxa, e após ponderados pela equação de cointegração, conforme descrito anteriormente.

Seja o preço unitário (PU) de um contrato de juros futuros de um dia (DI1) R\$ 100.000,00 trazidos a valor presente, descontando-se pela taxa de ajuste negociada no *call* de fechamento como anteriormente detalhado:

$$PU_{v,t} = \frac{100.000}{(1+i_t)^{\frac{du}{252}}} \quad (3.9)$$

Onde v é o vértice da curva a ser calculado, i_t a taxa de ajuste no tempo t , e du o número de dias úteis entre o vencimento do vértice e t .

Aplicando-se a fórmula de cálculo do PU à equação de cálculo da taxa a termo, dada em 3.8, com especial atenção ao fato do preço ser inverso à taxa, chega-se à fórmula para encontrar o preço de uma *forward*:

$$PU_{f_{1,2,t}} = \frac{100.000}{(1+i_{f_{1,2,t}})^{\frac{du_2-du_1}{252}}} \quad (3.10)$$

Onde $i_{f_{1,2}}$ é a taxa a termo entre os vértices 1 e 2 no tempo t , du_2 o número de dias úteis entre o vencimento do vértice 2 e t , du_1 o número de dias úteis entre o vencimento do vértice 1 e t .

Das 2247 observações, 1500 foram utilizadas como dados de treinamento, e 747 como dados de teste fora da amostra. Os parâmetros foram obtidos primeiramente nos dados de treinamento como um todo, e mantidos ao se testar para fora da amostra. A fim de precaver contra o envelhecimento dos parâmetros, em um segundo momento os parâmetros foram sendo recalculados em uma periodicidade fixa, de forma a incorporar os novos dados conforme a passagem do tempo. Essa periodicidade fixa também foi utilizada em 4 medidas, e os resultados constam na próxima seção.

A base diária e de preços de fechamento⁹ corrige problemas de frequência encontrados na literatura anterior. Em Giese (2008) e Neto (2012), a base mensal utilizada diminui, de certa forma artificialmente, a possível volatilidade das estratégias, bem como retira muitos dados ao não considerar todos os dias restantes de cada mês, perdendo assim conteúdo informacional relevante. Em contrapartida, a condução operacional de Faraco (2015) de abrir e fechar operações no mesmo dia incorre em um problema significativo de micro-estrutura de mercado, que pode chegar a resultados não fiéis ou não realizáveis. Ao utilizar apenas o preço, ainda que em base *tick-by-tick*, seria necessária uma base de dados muito maior contendo os *spreads bid-ask*¹⁰, bem como dados da profundidade do livro de ofertas, para mensurar se seria possível negociar as entradas geradas pela estratégia nos mesmos preços, e medir a influência do tamanho das operações geradas pela estratégia nos próprios preços de mercado. Utilizar os preços de *call* de fechamento é, portanto, uma escolha inteligente feita pelo presente trabalho. Elimina, por definição, os problemas de fricção de microestrutura. Como o preço teórico do *call* é determinado pela interação entre oferta e demanda, não é necessário agredir a contraparte, eliminando assim o *bid-ask spread*. Soma-se a esse fato, os *calls* não ocorrerem de forma simultânea, o que permite conhecer o fechamento de um contrato mais curto antes do *call* de fechamento de um mais longo. Ao atingir um nível interessante em um algoritmo, por exemplo, poder-se-ia operar os contratos mais longos no próprio *call*, precisando agredir assim apenas uma ponta no *after-market*¹¹ se assim fosse necessário. Há ainda a possibilidade de negociar OTC (over-the-counter): dado os preços de fechamento serem a referência de preço do dia, é normal agentes negociarem em mercado de balcão pelo mesmo preço de fechamento do *call*, para conseguirem um maior número de negócios que podem ter ficado de fora do leilão por não haver contraparte no momento.

Os estudos relacionados ao tema desenvolvidos anteriormente na literatura, conforme revisado e abordado nas seções anteriores, chegaram em sua maioria a resultados satisfatórios e motivadores no que tange métodos de investimentos em renda

⁹ Os preços de fechamento dos derivativos de taxas de juros se dão em *call* diário, realizado das 16:00h às 16:15, conforme consta no contrato de taxas de juros da BovespaBM&F.

¹⁰ Diferença entre a melhor compra e a melhor venda de um ativo financeiro no mercado eletrônico.

¹¹ Período de negociação de juros futuros na BM&F compreendido entre as 16:50h e 18:00h.

fixa. Esses resultados já incitam a pesquisa para o caso brasileiro, dado que, com exceção de Faraco (2015), todos os artigos abordam os mercados dos Estados Unidos ou da Europa.

Além da possibilidade de utilizar uma linha de pensamento já testada e provada para dados do Brasil, há ainda a chance de melhoria em alguns aspectos não abordados, ou que receberam pouca atenção dos autores anteriores.

O primeiro ponto é a frequência dos dados utilizados. Todos os autores (novamente, a exceção foi Faraco (2015)) utilizaram dados mensais, o que causa uma perda de conteúdo informacional muito grande quando se fala de anos de dados. Somase a essa perda, o fato de que dados de fechamento mensal deixam para trás grande parte da volatilidade diária, principalmente na ocorrência de notícias relevantes, dados econômicos, etc. Faraco (2015) em contrapartida utiliza base de dados intradia, o que evita o problema anterior, mas incorre num alto risco de fricção de microestrutura de mercado, principalmente quando o ativo estudado são taxas de juros, no qual a menor variação possível (0,01%) altera significativamente os resultados. Portanto, a presente pesquisa utilizou base de dados diária.

De todas as estratégias utilizadas pelos autores, foi notória a sobressaliência daquelas que utilizavam diferencial de taxas e curvatura de juros, razão pela qual foi a estratégia escolhida para ser implementada nessa dissertação.

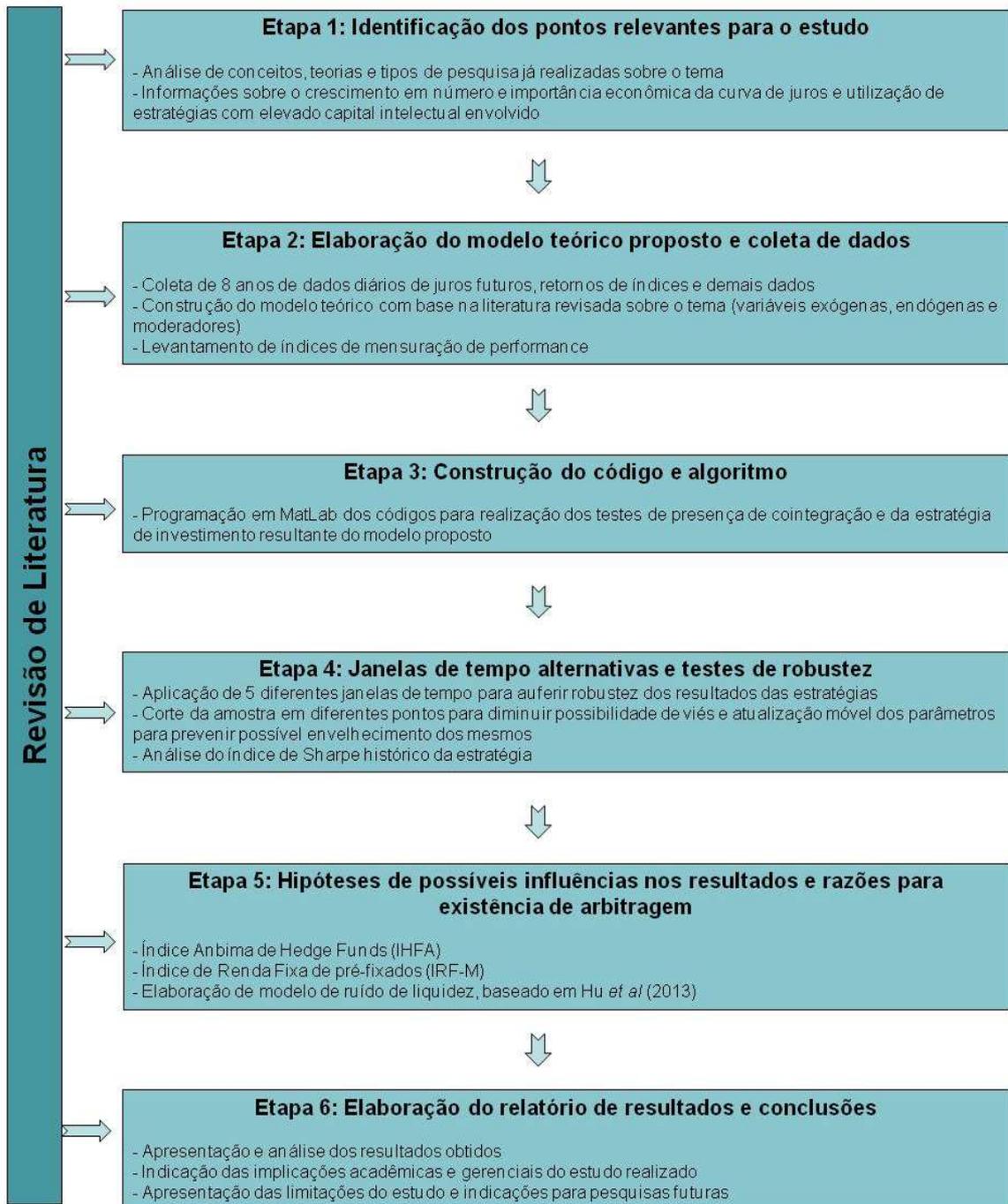
Por fim, o trabalho ainda inova ao procurar hipóteses mensuráveis do porquê da existência da possibilidade de arbitragem na curva de juros. Ao comparar os resultados encontrados ao índice de multimercados brasileiros, busca analisar se os principais gestores tomam suas decisões baseadas em maior parte buscando movimentos direcionais, o que pode explicar um dos motivos de não serem aproveitadas em sua totalidade essas oportunidades. Também é testada a presença de grande incerteza a respeito da política monetária nas maturidades mais curtas, o que também modifica o formato da curva e pode ser capaz de explicar as diferenças nas maturidades onde a curva não é monotônica e permite operações de arbitragem.

3.4 ESQUEMA DA PESQUISA

A pesquisa foi efetuada em seis etapas que se desenvolveram de forma sequencial e complementar, tomando-se como base os pressupostos sugeridos na literatura. A revisão de literatura deu suporte a todo o processo de pesquisa e auxiliou no esclarecimento de eventuais questionamentos que surgiram no decorrer do estudo.

Para facilitar a compreensão do processo de realização da presente dissertação, segue, na próxima página, uma figura com a representação gráfica de todas as etapas de desenvolvimento da pesquisa. Logo a seguir, estas estarão descritas de forma detalhada.

Figura 7 – Esquema da pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor

3.4.1 Etapa 1: Identificação dos pontos relevantes para o estudo

A etapa inicial deste estudo contou com uma revisão bibliográfica aprofundada, onde foram consultados os principais conceitos, teorias e pesquisas já realizadas sobre os temas que esta dissertação engloba. Na introdução, foram apresentados alguns dos principais autores que abordam os tópicos utilizados.

Conforme destacado por Flick (2004), o ponto de partida do pesquisador é o conhecimento teórico oriundo da literatura, a partir do qual os pressupostos teóricos ganham evidência como versões preliminares da compreensão do objeto que está sendo pesquisado, podendo ser reformuladas ou até aperfeiçoadas no curso da realização do estudo. Todavia, conforme já salientado, é importante ressaltar que o levantamento teórico permeou todas as fases de elaboração do estudo em questão.

Dentre alguns tópicos analisados nesta etapa, pode-se destacar: Informações sobre o crescimento em número e importância econômica da curva de juros e utilização de estratégias com elevado capital intelectual envolvido.

3.4.2 Etapa 2: Elaboração do modelo teórico proposto e coleta de dados

Nesta segunda etapa, foi feita uma coleta de 9 anos de dados diários de juros futuros, retornos de índices e demais dados. Pode-se encontrar informações sobre estes dados na seção 3.1. De forma conjunta, realizou-se um levantamento de índices de mensuração de performance. A partir destas informações e das coletadas na etapa 1, construiu-se um modelo teórico (com variáveis exógenas, endógenas e moderadores).

3.4.3 Etapa 3: Construção do código e algoritmo

No decorrer da etapa 3, realizou-se, através do MatLab, a programação dos códigos para realização dos testes de presença de cointegração e da estratégia de investimento resultante do modelo proposto. O detalhamento deste código foi apresentado na seção 3.3 desta dissertação.

3.4.4 Etapa 4: Janelas de tempo alternativas e testes de robustez

Durante a etapa 4, executou-se a aplicação de 5 diferentes janelas de tempo com o objetivo de auferir a robustez dos resultados das estratégias. Também nesta fase do estudo, foi feito o corte da amostra em diferentes pontos para diminuir a possibilidade de viés e atualização móvel dos parâmetros para, desta forma, prevenir o possível envelhecimento dos mesmos. Após este corte, realizou-se a análise do índice de Sharpe histórico da estratégia. Na seção 3.2.1, foi apresentado um detalhamento da utilização deste índice.

3.4.5 Etapa 5: Hipóteses de possíveis influências nos resultados e razões para existência de arbitragem

Na quinta etapa desta pesquisa, foi feito um levantamento de hipóteses das possíveis influências e razões para a existência da arbitragem. Na seção 4.3, há um maior aprofundamento sobre estes pontos. Para fazer esta verificação, utilizou-se o Índice Anbima de Hedge Funds (IHFA) e o Índice de Renda Fixa de pré-fixados (IRF-M). Com base nestas informações, elaborou-se, então, o modelo de ruído de liquidez que teve como base o trabalho dos autores Hu, Pan e Wang (2013).

3.4.6 Etapa 6: Elaboração do relatório de resultados e conclusões

O relatório contendo os resultados obtidos foi desenvolvido após o término de todas as outras 5 etapas da pesquisa e será apresentado a partir da próxima seção desta dissertação. Juntamente com estas informações, foram destacadas as implicações gerenciais e acadêmicas, as limitações da presente pesquisa e as sugestões para estudos futuros (que poderão contribuir ao referido tema abordado nesta dissertação).

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos com o algoritmo de *trading* descrito na seção anterior são apresentados e discutidos neste capítulo.

Primeiramente, a estratégia foi testada dividindo-se a amostra de dados em duas partes, fixas, e calculados os retornos e índices de desempenho. Nesta etapa, apenas as janelas de média móvel e desvio padrão (para o cálculo do *z-score* descrito na seção Arbitragem) foram sendo modificadas ao longo do tempo.

Em um segundo estágio, calculou-se os resultados atualizando os parâmetros a cada ciclo de tempo, com a finalidade de constatar se o envelhecimento dos parâmetros influenciava os retornos. Algumas janelas de dados e de reestimação dos parâmetros foram testadas, e os resultados são mostrados na segunda metade da seção 4.

Após terem sido calculados os retornos da estratégia em diversas janelas de tempo e reestimação, comparou-se os ganhos da estratégia com os ganhos do índice de renda fixa pré-fixado, de forma a mensurar até que ponto os resultados obtidos estão correlacionados a aplicações desta categoria ou uma modalidade alavancada dela. Na mesma etapa da pesquisa, os resultados também são comparados à rentabilidade do índice de fundos de multimercado. Esse estudo teve como objetivo verificar se os gestores de fundo utilizam ou utilizaram alguma estratégia similar ao longo do período disponível de dados.

Concluindo a seção, replicou-se o índice de ruído de liquidez de Hu, Pan e Wang (2013), com base nos dados brasileiros, para verificar se em épocas de crises de liquidez e grandes perdas dos investidores, os arbitadores se retiram do mercado, deixando mais oportunidades de arbitragem disponíveis e, conseqüentemente, aumentando o nível de ruído presente nos preços dos ativos.

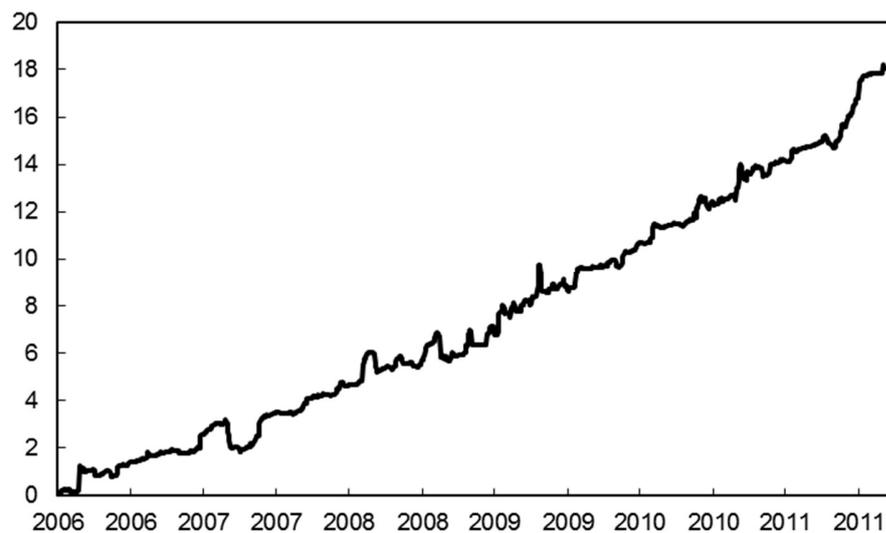
4.1 JANELA FIXA DE ESTIMAÇÃO

Utilizando-se a divisão da amostra de forma similar à parcialmente presente na literatura, em um primeiro momento, se dividiu a base de dados em 3. As duas primeiras partes foram utilizadas como dados de treinamento e estimação dos parâmetros, contemplando 1.500 dias de dados. A parte final, com 747 dias, como base de teste para cálculo dos resultados fora da amostra, dados os parâmetros encontrados na base de treinamento.

As figuras 8 e 9 mostram a evolução do patrimônio da estratégia ao longo do tempo, considerando-se a aplicação de 100% na estratégia, igualmente ponderados entre as borboletas que apresentavam as condições de entrada e saída conforme as regras do algoritmo, e reinvestindo-se totalmente o lucro nas operações seguintes (retornos apresentam capitalização). A janela para cálculo da média móvel e desvio padrão foi de 60 dias.

Figura 8 – Evolução do patrimônio – dados de treinamento

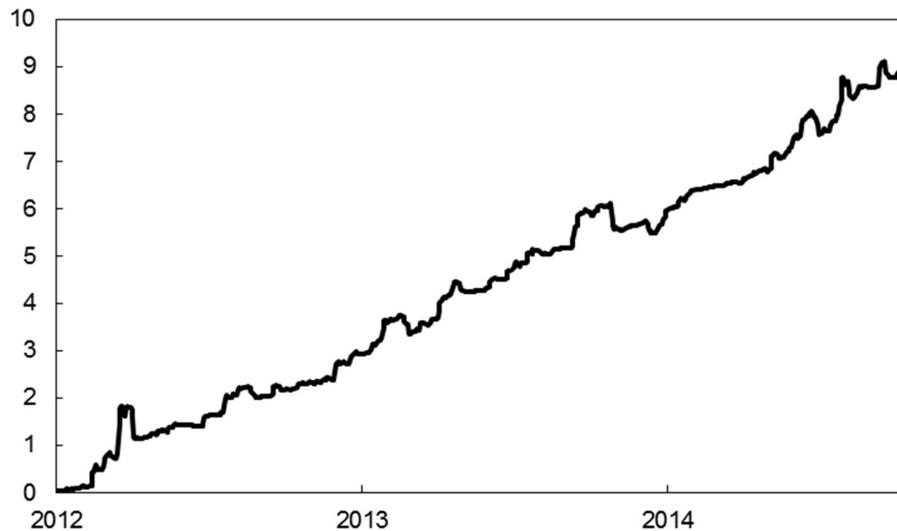
Patrimônio teórico acumulado pela estratégia utilizando a base de dados de treinamento, janela móvel de média e desvio padrão de 60 dias úteis, e mensurado em ticks de taxa.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 9 – Evolução do patrimônio – dados de teste

Patrimônio teórico acumulado pela estratégia utilizando a base de dados de teste, janela móvel de média e desvio padrão de 60 dias úteis, e mensurado em *ticks* de taxa.



Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados encontrados são bastante expressivos. Dentro da amostra, a estratégia obteve um retorno de aproximadamente 2000 pontos, o máximo *drawdown*¹²(MDD) de 10,46% e um índice de Sharpe 1,53. Nos resultados fora da amostra, também foram encontrados elevados ganhos, com um MDD um pouco mais elevado, de 27,82%, mas Sharpe também mais elevado, 1,75. A volatilidade anualizada dos resultados fora da amostra também foi menor, de 15,70% contra 31,53% dos dados de treinamento. Essa redução de volatilidade é pertinente, dado o menor espaço de tempo contemplado para teste e, talvez mais relevante, a presença da crise financeira de 2008 na amostra de treinamento.

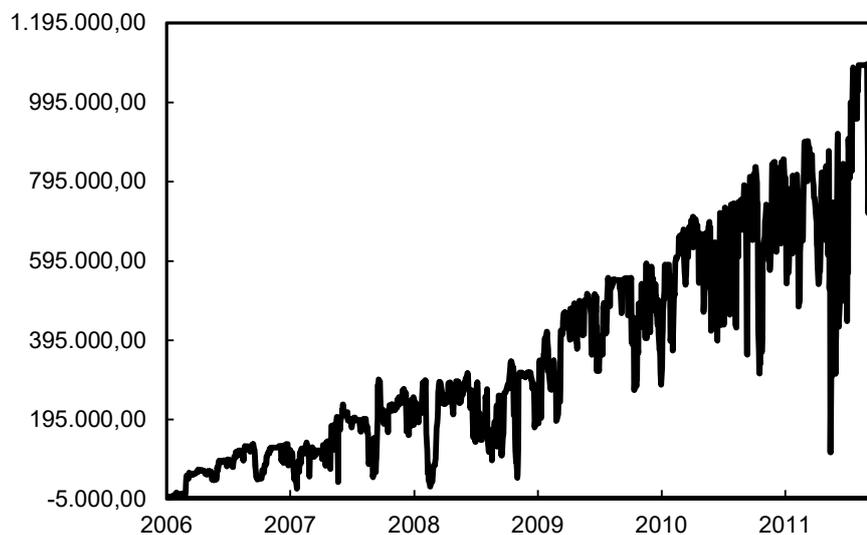
Levando-se em consideração a margem teórica máxima dos contratos de juros futuros, é possível calcular ganhos e retornos financeiros da estratégia de forma aproximada. A margem teórica máxima é o valor calculado pela BovespaBM&F e requerido para manter abertas posições em contratos derivativos por período superior a

¹² Maior perda a partir do máximo atingido anteriormente

um dia¹³. A margem requerida varia conforme o contrato, visto que os contratos mais longos possuem maior oscilação financeira dada a variação mínima da taxa de 0,01%. Mantendo o estudo conservador, utilizou-se a margem teórica máxima do contrato mais longo, de 5 anos, que no dia 30/12/2014 era de R\$ 5.704,22¹⁴. Logo, para haver recursos para ser possível se posicionar em todas as combinações que se enquadravam nas regras do algoritmo, o que não acontecia em todos os momentos do tempo, a carteira inicial era de R\$ 792.886,58. Ao se alocar um contrato de cada maturidade em cada operação, chegou-se aos resultados de R\$ 1.100.961,42 de lucros na base de treinamento, e R\$ 551.737,18 fora da amostra. A evolução dos ganhos é mostrada nas figuras 10 e 11.

Figura 10 – Evolução do resultado financeiro – dados de treinamento

Patrimônio teórico acumulado pela estratégia utilizando a base de dados de treinamento, janela móvel de média e desvio padrão de 60 dias úteis, e mensurado em R\$. O tamanho de cada posição aberta pela estratégia independia da maturidade de cada vértice, sendo padronizado em 1 lote.



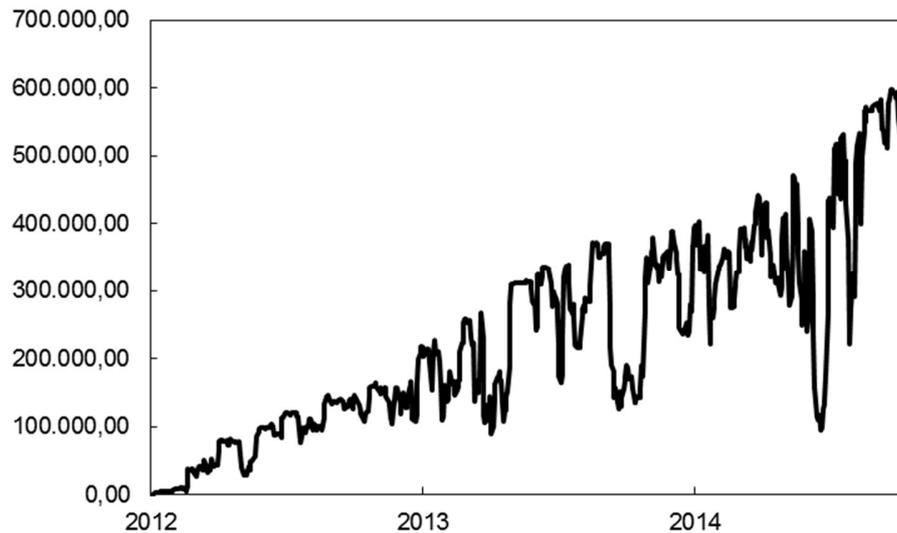
Fonte: Elaborada pelo autor

¹³ Esse valor é a 'segurança' da *clearing* de que cada agente detém o montante necessário para cumprir com os ajustes em caso de perdas. O cálculo é feito com base nos cenários da área de risco da *clearing*, e é exigido além do ajuste financeiro diário.

¹⁴ A tabela com as margens teóricas de todos os contratos está disponível para consulta em http://www.bmfbovespa.com.br/pt_br/servicos/market-data/consultas/mercado-de-derivativos/indicadores/margem-teorica-maxima/

Figura 11 – Evolução do resultado financeiro – dados de teste

Patrimônio teórico acumulado pela estratégia utilizando a base de dados de teste, janela móvel de média e desvio padrão de 60 dias úteis, e mensurado em R\$. O tamanho de cada posição aberta pela estratégia independia da maturidade de cada vértice, sendo padronizado em 1 lote.



Fonte: Elaborada pelo autor

Neste momento, é possível o surgimento da dúvida do por quê os resultados financeiros, apesar de demonstrarem evolução de ganhos crescentes com o tempo da mesma maneira que a evolução em pontos, mostram-se bem mais voláteis e com perdas de tamanho mais expressivo. A justificativa apoia-se no tamanho de alocação em cada estratégia de borboleta. Para fins de mensuração simples da estratégia, adotou-se alocar um contrato, ou o seu equivalente, de modo que o resultado em pontos tem participação igual de maturidades mais curtas e mais longas. Já no resultado financeiro, a oscilação marginal das maturidades mais longas tem relevância financeira muito maior. Essa questão pode ser trabalhada com *asset allocation*, ponderando o tamanho de cada posição por diversos fatores como risco, maior sharpe histórico, menor volatilidade passada, etc., e é um campo promissor para futuras pesquisas.

Diferentes janelas de média móvel e desvio padrão foram calculadas (20, 60, 90 e 120 dias) em diferentes cortes da amostra, com o intuito de conferir maior robustez aos resultados encontrados e eliminar o possível viés que poderia ter sido encontrado em uma determinada janela utilizada. Os resultados constam na tabela 3.

Tabela 3 – Retornos da estratégia, janela fixa de estimação.

Tabela contendo os resultados da estratégia em cada corte da amostra, e em todas as janelas móveis testadas. **PnL** é o acumulado de *tick* ao longo do período; **MDD** é o Máximo *Draw Down*; **Sharpe** o índice de Sharpe; **Vol Anual** é a volatilidade anual dos retornos, calculada através do desvio-padrão; **n ops** é o número de operações feitas pelo algoritmo; **% ops pos** é o percentual de operações com lucro; **% ops neg** é o percentual de operações com prejuízo; **média ops pos** é o lucro médio, medido em ticks, das operações vencedoras e **média ops neg** é o prejuízo médio, medido em ticks, das operações perdedoras.

Base de treinamento	Janela	PnL	MDD	Sharpe	Vol Anual	n ops	% ops pos	% ops neg	média ops pos	média ops neg
1500	20	20,95	-25,66%	1,78	37,30	12249	0,84	0,16	0,002426	-0,002272
	60	20,48	-10,46%	1,73	31,53	7677	0,86	0,14	0,003173	-0,002948
	90	17,09	-21,70%	1,74	29,86	6155	0,88	0,12	0,003502	-0,002616
	120	16,54	-13,09%	1,69	29,52	5265	0,91	0,09	0,003699	-0,002605
1123	20	14,25	-40,67%	1,99	24,30	9152	82,83%	17,17%	0,002432	-0,002551
	60	11,48	-10,84%	1,92	20,37	5202	82,62%	17,38%	0,003311	-0,003333
	90	10,55	-25,93%	1,90	19,39	4085	84,21%	15,79%	0,003625	-0,002985
	120	10,12	-14,15%	1,74	20,26	3365	87,52%	12,48%	0,003836	-0,002808
749	20	8,47	-32,77%	2,44	15,25	6153	83,41%	16,59%	0,002190	-0,002623
	60	7,96	-7,22%	2,11	12,80	3524	82,15%	17,85%	0,002864	-0,003183
	90	6,49	-5,81%	2,25	12,58	2779	85,57%	14,43%	0,003235	-0,002996
	120	6,36	-7,87%	1,88	13,23	2383	88,33%	11,67%	0,003258	-0,001811
Base de teste	Janela	PnL	MDD	Sharpe	Vol Anual	n ops	% ops pos	% ops neg	média ops pos	média ops neg
746	20	9,99	-17,01%	2,22	17,25	6335	86,22%	13,78%	0,002033	-0,000779
	60	8,92	-16,65%	2,15	15,72	3942	90,54%	9,46%	0,002642	-0,001324
	90	8,26	-11,91%	2,26	14,16	3241	91,48%	8,52%	0,002866	-0,001097
	120	7,60	-5,30%	2,05	13,84	2709	93,39%	6,61%	0,003023	-0,000757
1123	20	16,03	-27,62%	1,99	24,30	9281	87,59%	12,41%	0,002141	-0,000696
	60	16,04	-23,88%	2,10	20,37	6492	93,65%	6,35%	0,002774	-0,001130
	90	14,70	-16,89%	2,11	19,39	5310	93,07%	6,93%	0,003031	-0,000936
	120	14,28	-23,80%	2,08	20,26	4688	94,88%	5,12%	0,003235	-0,000875
1497	20	22,30	-46,85%	2,04	15,25	12396	86,04%	13,96%	0,002323	-0,000875
	60	20,70	-22,37%	2,03	12,80	8201	90,62%	9,38%	0,002968	-0,001268
	90	18,75	-28,65%	1,90	12,58	8201	93,08%	6,92%	0,003201	-0,001657
	120	17,36	-51,35%	1,80	13,23	5616	93,63%	6,37%	0,003410	-0,001943

Fonte: Elaborada pelo autor

De maneira geral, os resultados foram consistentes com a primeira amostragem e em linha com os encontrados em Neto (2012) em sua estratégia com títulos de 5 anos, e em Chua (2006) em sua estratégia “2-B”. Em todos os períodos, a estratégia encerrou com lucro. O maior tempo posicionado proporcionou ganhos maiores na maioria dos casos. A janela de 20 dias mostrou o maior nível de MDD, compensado pelo maior ganho absoluto. O índice de Sharpe ficou sempre acima de 1,69. Esse indicador se mostrou bem acima do encontrado nos estudos anteriores. Em Duarte *et al.* (2005), as estratégias de arbitragem na curva de juros não superaram 0,77. Faraco (2015) não apresenta o índice de Sharpe das operações realizadas. Na seção seguinte, são apresentados os

resultados obtidos ao se reestimar os parâmetros de cointegração a cada intervalo de tempo.

4.2 JANELA MÓVEL DE ESTIMAÇÃO

Uma questão pertinente que é possível surgir é se os parâmetros do modelo não ficariam obsoletos com a passagem do tempo. Ou ainda, se empiricamente um agente que utilizasse o modelo não iria imputar novos dados disponíveis aos já existentes. Para responder essa pergunta, se aplicou o algoritmo a diferentes cortes na amostra, e se estimou novamente os parâmetros periodicamente. Os resultados encontrados estão nesta seção.

Inicialmente, utilizou-se como amostra inicial a mesma utilizada no primeiro estudo da seção anterior, de 1.500 dias e a janela de média móvel de 60 dias. Porém, se calculou novamente os parâmetros a cada 200 dias, e o algoritmo só fazia operações nos 200 dias seguintes. Chegou-se a um resultado de 6,50 pontos de lucro, MDD de -22,19%, Sharpe 1,97 e volatilidade anualizada de 13,08%. Resultados similares aos anteriores, com um pequeno aumento na volatilidade e no MDD, de certa forma eram esperados, dado o maior volume de operações e a mudança de parâmetros de negociação mais frequente.

Seguindo em linha com o anteriormente testado, mudou-se o corte e a periodicidade de estimação dos parâmetros, para não criar viés nos resultados. Os valores obtidos encontram-se na tabela 4.

Tabela 4 – Retornos da estratégia, janela móvel de estimação

Resultados da estratégia ao se reestimar os parâmetros de cointegração periodicamente. **Base inicial** é o tamanho da amostra inicial da primeira estimação; **Estimação** é o período da reestimação; **Janela** é o período utilizado para as médias e desvios-padrão; **PnL** é o acumulado de *tick* ao longo do período; **MDD** é o Máximo *Draw Down*; **Sharpe** o índice de Sharpe; **Vol Anual** é a volatilidade anual dos retornos, calculada através do desvio-padrão.

Base inicial	Estimação	Janela	PnL	MDD	Sharpe	Vol Anual
1000	100	20	13,85	-8,93%	2,00	24,96
		60	7,95	-21,72%	2,05	12,19
1000	200	20	14,75	-4,43%	1,95	26,97
		60	12,11	-13,29%	1,97	17,85
1500	100	20	8,29	-18,47%	2,06	15,50
		60	6,13	-24,78%	1,93	9,59
1500	200	20	8,91	-9,30%	2,08	16,49
		60	6,50	-22,19%	1,97	13,08

Fonte:Elaborada pelo autor

O destaque foi a janela de 20 dias, que produziu os menores níveis de MDD relativos quando foi aplicada a periodicidade de estimação dos parâmetros, oposto ao ocorrido na base fixa de dados para estimação do modelo. De maneira geral, os valores de lucro acumulado reduziram um pouco, e os níveis de índice de Sharpe e volatilidade anualizada mantiveram-se similar aos anteriores. A literatura, até onde foi o escopo do presente trabalho, não realizou esse tipo de abordagem, o que não possibilita a comparação dos níveis encontrados.

A parte final deste capítulo destina-se a relacionar os resultados obtidos com os índices de renda fixa, com os resultados dos gestores profissionais e criar uma medida de ruído de liquidez, a fim de localizar as possibilidades de arbitragem em momentos de *stress* dos mercados.

4.3 HIPÓTESES EXPLICATIVAS

A presente pesquisa vai um pouco além da literatura que serviu de base, buscando em literatura auxiliar possíveis explicações e hipóteses para os ganhos teóricos apresentados pela arbitragem desenvolvida. Na subseção 4.3, são formuladas e testadas três delas.

4.3.1 Índice de renda fixa IRF-M

O alfa gerado por uma determinada estratégia pode, em algumas circunstâncias, ter origem na alavancagem utilizada pela mesma, em maior ou menor grau.

Determinar se há ou não tal advento, e em caso positivo, conhecer o seu grau, torna mais transparente a relação encontrada ao se construir um modelo, no que tange a exposição a fatores de risco. Vayanos e Vila (2009) sugerem que os resultados obtidos por estratégias de arbitragem de curva de juros podem estar relacionados ao prêmio de risco presente nos títulos. Para testar se essa relação existe na estratégia do presente trabalho, se calculou a regressão dos resultados contra os retornos diários do principal índice de renda fixa de pré-fixados do Brasil, o IRF-M. Este índice pertence à família de índices de mercado Anbima (IMA), que representa a evolução da carteira de títulos públicos federais a preços de mercado, com abrangência aproximada de 97% desse segmento de mercado¹⁵. De forma a capturar somente o prêmio de risco dos títulos, a regressão múltipla também foi controlada para o retorno diário da taxa livre de risco, a taxa CDI, fornecida pela Central de Custódia e Liquidação de Títulos Privados (CETIP). A equação é a apresentada a seguir, e as estatísticas encontradas são apresentadas na tabela 5.

$$R_{i,t} = \alpha + \beta_1 R_{IRFM,t} + \beta_2 R_{CDI,t} \quad (4.1)$$

¹⁵ Fonte: Anbima.

Tabela 5 – Regressão multivariada, IRF-M e CDI. Resumo estatístico.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>		<i>Coeficientes</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
α	-0,00779	-1,85899	0,06323	α	0,00940	1,71094	0,08754
β_1	-0,23095	-0,52885	0,59699	β_1	-0,14317	-0,27732	0,78162
β_2	23,35969	2,44704	0,01452	β_2	-17,00935	-1,06200	0,28861

Fonte: Elaborada pelo autor

No lado esquerdo da tabela, estão as estatísticas da regressão obtidas com os dados de treinamento e, no lado direito, com os de teste. É possível notar que o coeficiente dos retornos do índice de pré-fixados não foi significativo em nenhum dos casos, o que leva a crer que a estratégia não é uma alavancagem do prêmio de risco presente nos títulos que são os ativos-objeto dos derivativos. O R^2 ficou abaixo de 1% nas duas regressões.

Na regressão dentro da amostra, o coeficiente dos retornos do CDI se mostrou significativo. Porém, a correlação entre os retornos é de apenas 6,53%, o que não permite maior inferência a este respeito.

Dado não haver correlação linear com o índice de retorno livre de risco nem com o prêmio de risco dos títulos pré-fixados, o próximo passo é mensurar se, de alguma forma, os gestores profissionais utilizam algum método similar ou obtêm retornos que se relacionam com os resultados da estratégia.

4.3.2 Índice de Hedge Funds Anbima IHFA

Após ter replicado os retornos da estratégia utilizando cointegração na curva de juros brasileira contra o índice de renda fixa nacional e a taxa livre de risco local, não encontrando relação linear significativa, procura-se saber se outros agentes arbitradores presentes no ambiente apresentam resultados similares. Conforme Karsimus (2015), se os resultados da estratégia se assemelham aos resultados do índice de fundos relacionado, pode-se dizer que a estratégia caracteriza o que parte relevante dos gestores está fazendo. Caso contrário, a estratégia presente neste trabalho introduz um

alfa que diferente da estratégia média capturada pelo índice, o que pode significar que os gestores realmente não utilizam métodos parecidos, ou os utilizam em baixa escala.

O fato de os retornos da estratégia explicarem, ou não, os retornos do índice pode acarretar algumas implicações. Caso positivo, a estratégia desenvolvida consegue explicar em certo grau o que os gestores profissionais estão fazendo para obter retornos. Se não, a metodologia criada difere bastante da média dos gestores e oferece uma fonte alternativa de geração de alfa. Fontes diferentes de geração de alfa tendem a sofrer menos com competição, dado que os demais agentes não estão buscando a mesma oportunidade de arbitragem, bem como não são tão penalizadas em momentos de vácuos de liquidez ou alta população de arbitradores em determinados momentos (HU; PAN; WANG, 2013).

O índice escolhido para representar o mercado de fundos multimercado brasileiro, chamados internacionalmente de *hedge funds*, foi o Índice de Hedge Funds Anbima (IHFA). O IHFA é um índice representativo da indústria de *hedge funds* no Brasil, criado como parâmetro de acompanhamento da evolução deste segmento. O seu valor é reflexo, em moeda corrente, da evolução de uma aplicação hipotética em cotas de uma cesta de fundos selecionados a partir de critérios específicos predefinidos, descritos na sua metodologia¹⁶. Para preservar a representatividade do indicador, sua composição teórica é revista periodicamente. Devido a disponibilidade de dados somente a partir de 01/10/2007, os resultados dentro da amostra foram considerados iniciando na mesma data.

Para capturar somente o grau explicativo do alfa gerado pela estratégia desenvolvida no trabalho, a regressão também foi controlada pelo retorno diário do CDI (pode ser verificada na tabela 6), seguindo a lógica da equação que consta na subseção 4.3.1.

$$R_{IHFA,t} = \alpha + \beta_1 R_{i,t} + \beta_2 R_{i,t} R_{CDI,t} \quad (4.2)$$

¹⁶ Disponível em http://portal.anbima.com.br/informacoes-tecnicas/indices/ihfa/Documents/Metodologia_IHFA.pdf

Tabela 6 – Regressão multivariada: IHFA, Retornos e CDI. Resumo estatístico.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>		<i>Coefficientes</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
α	0,00095	2,34598	0,01916	α	0,00047	1,42328	0,15511
β_1	-1,31979	-1,34796	0,17796	β_1	-0,33057	-0,34349	0,73134
β_2	0,00842	1,52793	0,12683	β_2	-0,00204	-0,88614	0,37585

Fonte: Elaborada pelo autor

Os coeficientes, tanto para os resultados dentro da amostra como para fora da amostra, não possuem significância. O alfa se mostrou significativo somente nos resultados dentro da amostra. Logo, como introduzido no início dessa seção, pode-se inferir que a metodologia desenvolvida nesta dissertação não é utilizada, em média, pela maioria dos gestores de fundos multimercado no Brasil. Isto explica, em parte, a possibilidade de retornos tão significativos, o que é menos provável quando é grande o número de agentes procurando oportunidades de geração de alfa na mesma regra de arbitragem.

4.4 RUÍDOS DE LIQUIDEZ E OPORTUNIDADES DE ARBITRAGEM

O estudo de títulos públicos e de suas taxas de juros é interessante para a pesquisa acadêmica e empírica por diversas razões. Entre elas, está o fato de que diversos agentes participam do mercado não somente buscando alternativas de investimento, mas também para suprir necessidades de caixa, dado que os títulos do governo são utilizados como garantia em parte relevante das operações de financiamento de curto prazo. Logo, como descrevem Hu, Pan e Wang (2013), as operações com títulos possuem conteúdo informacional sobre as necessidades de liquidez do mercado financeiro de uma forma mais abrangente.

Neste estudo, os autores propõem e discutem uma medida para o ruído que pode ser causado pela demanda por liquidez no mercado norte-americano de *treasuries*. Eles notaram que o ruído nos preços de um determinado ativo surge do desbalanceamento

entre a demanda e a oferta de liquidez por este ativo. A demanda por liquidez se origina das pressões transitórias de compra e venda do ativo em si, enquanto a oferta de liquidez vem dos *market makers* e arbitradores, que acomodam essas pressões. Logo, os disparos nos ruídos de preços podem ter origem em um aumento na demanda por liquidez, uma redução na oferta de liquidez, ou ambos.

Quando o capital disponível dos arbitradores é abundante, o ruído de um título é facilmente diluído ao longo da curva. Porém, quando o capital é reduzido, ou há desvios ao longo de toda a curva, o ruído permanece e aumenta. Dessa forma, o índice proposto por eles busca capturar essa situação em específico.

Dado o objetivo principal da presente pesquisa ser construir um método de *trading* baseado na curvatura da curva de juros brasileira, em trechos que apresentem relação estacionária, faz sentido comparar seus resultados a uma medida similar de ruído de liquidez, a fim de se constatar se os períodos de alto ruído são melhor aproveitados pelo modelo, e até mesmo, futuramente, adicionar esse índice como ponderador do tamanho de cada posição aberta, como em Karsimus (2015).

Analogamente, se construiu o mesmo índice de ruído nesta dissertação, utilizando as Letras do Tesouro Nacional (LTN), que são títulos pré-fixados e possuem vencimento na mesma data que seus respectivos derivativos de taxa de juros. Essa característica em especial eliminou a necessidade da estimação de uma curva para encontrar a taxa da maturidade exatamente igual ao vencimento do título, como desenvolvido no artigo de Hu, Pan e Wang (2013).

O índice de ruído é dado por

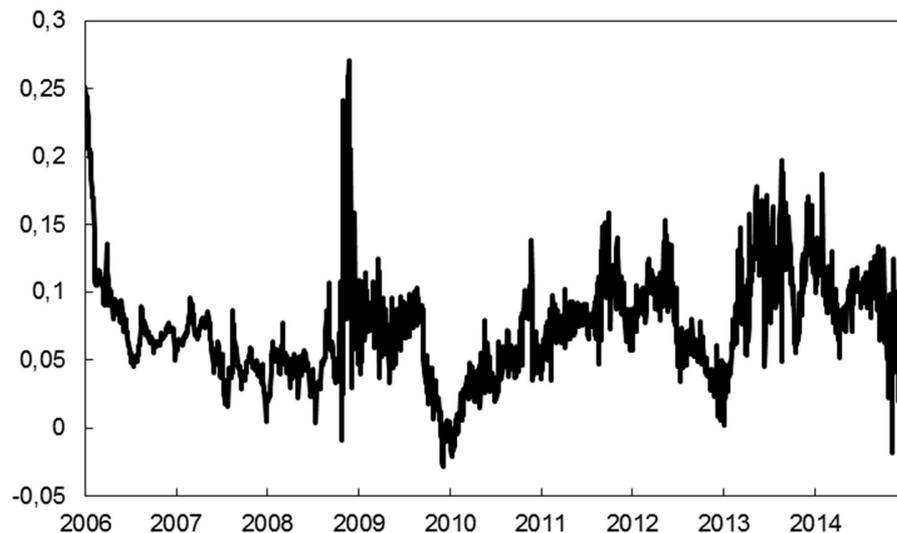
$$Ruído_t = \sqrt{\frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} [y_{LTN,t}^i - y_{DI1,t}^i]^2} \quad (4.3)$$

Onde N_t é o número de títulos LTN disponível no período t , $y_{LTN,t}^i$ é a taxa do título com vencimento i no período t , e $y_{DI1,t}^i$ é a taxa do DI futuro de mesmo vencimento i no período t . Foram excluídas as datas que não haviam informação. Nos feriados em que não houve sessão de negociação na BM&F, mas houve marcação do preço na Anbima, se utilizou o ajuste do DI futuro de $t-1$.

A figura 12 mostra a evolução do ruído ao longo da amostra.

Figura 12 – Índice de Ruído. 2006 a 2014.

Índice de ruído de liquidez, calculado conforme Hu, Pan e Wang (2013) para o caso brasileiro.



Fonte: Elaborada pelo autor

Nota-se que o nível máximo do ruído no período foi em novembro de 2008, auge da crise financeira daquele ano. Leituras elevadas também são observadas no final de 2011, quando o Banco Central cortou a taxa Selic contra a expectativa predominante dos agentes, e perto das eleições de 2014, por exemplo.

A regressão univariada para os resultados dentro da amostra apresentou um R^2 baixo, de 1,4%. É um nível bem inferior do que encontraram Karsimus (2015) e Hu, Pan e Wang (2013). Para os resultados fora da amostra, o R^2 foi um pouco mais elevado, de 2,5%.

Há no Brasil a especificidade de a taxa básica que é definida pela autoridade monetária (SELIC), e que serve de balizamento para as operações de títulos de emissão do governo, divergir da taxa de depósito interbancário (CDI). Assim, realizou-se uma regressão multivariada, controlando também para esse diferencial de taxa. Os resultados não modificaram em magnitude relevante, e o coeficiente do diferencial entre Selic e CDI não foi significativo. A relação entre o índice de ruído, replicado de acordo com a equação proposta por Hu, Pan e Wang (2013), e o diferencial entre as taxas Selic e CDI, no entanto, se mostrou bastante elevada, acima de 81% e o coeficiente significativo a um

nível de confiança de 99%. Essa ligação é interessante e pode motivar futuros estudos, ligando o contexto de momentos de ruído de liquidez alto e alto diferencial entre as taxas básicas referenciais de títulos públicos e privados no Brasil.

No universo da estratégia desenvolvida na presente dissertação, as regressões sugerem que os retornos das operações não apresentam relação com os momentos críticos de ruído nos preços dos títulos. Ao mesmo tempo que não encontra-se dependência desses momentos de maior *stress* na estratégia desenvolvida, também não se beneficia da mesma. Logo, nesse aspecto, não é possível criar parâmetros para aumentar ou diminuir posição durante esses períodos.

5 CONCLUSÕES

Nesta dissertação, estudou-se estratégias de arbitragem disponíveis na curva de juros brasileira, tema ainda pouco abordado pela literatura nacional se comparado ao maior número de pesquisas feitas em âmbito mundial. O foco principal foi construir um método de *trading* baseado na curvatura da curva de juros brasileira, em trechos que apresentem relação estacionária. Este objetivo, uma vez alcançado, permitiu identificar oportunidades advindas da presença de cointegração entre as taxas a termo das maturidades de curto e médio prazo da estrutura pré-fixada, utilizando 12 vértices fixos entre um mês e cinco anos.

Os resultados mostraram haver, dentro da amostra de 9 anos compreendida entre 2006 e 2014, combinações lineares ao longo da curva em mais da metade dos casos. Das 220 combinações disponíveis, 139 apresentaram cointegração em algum momento do tempo. Os resultados mostraram também bons retornos possíveis utilizando um algoritmo relativamente simples de entrada e saída nessas borboletas, gerando retornos elevados, de até 2.000 *ticks* no resultado acumulado e de índice de Sharpe relevante e significativo, acima de 1,7 para todos os casos testados. Os expressivos lucros teóricos trazem importantes implicações acadêmicas e empíricas. Sob o primeiro ponto de vista, se reforça o conceito de estacionariedade das taxas a termo e seu vasto campo de pesquisa. Sob o segundo, abre-se um leque ainda maior de oportunidades de gestão de recursos e investimentos.

Os ganhos encontrados na estratégia desenvolvida se mostraram coerentes ao se modificarem a janela de cálculo das médias e desvios-padrão móveis, que geravam os sinais de operação, bem como em diferentes janelas de reestimação dos parâmetros do modelo. Ao se calcular os lucros financeiros utilizando apenas um contrato para cada maturidade, ainda que tenha se obtido novamente retornos positivos, se notou que estes foram relativamente menores em magnitude e apresentaram um nível pouco maior de volatilidade. Tal fato era esperado, dado o valor financeiro por unidade das maturidades mais longas ser maior que o valor das maturidades mais curtas, e deixa espaço para

futuras pesquisas que podem visar otimizar os resultados dessa e de outras estratégias através de *asset allocation* e *position sizing*.

Analisou-se, ainda, as relações que os retornos da estratégia poderiam apresentar com diversas explicações encontradas por alguns autores, indo além do abordado pela literatura básica. Os resultados não apresentaram relação significativa, primeiramente, com o índice de renda fixa pré-fixados calculado pela Anbima, o que permite afirmar não ter sido encontrado apenas um método de alavancagem com alguma sofisticação. Da mesma forma, não houve significância nos coeficientes quando comparados os resultados das operações com o retorno do principal índice de fundos multimercados brasileiros, implicando que a estratégia é, no mínimo, pouco utilizada pelos gestores profissionais, o que explica em parte a possibilidade de haver tais ganhos de arbitragem ainda disponíveis.

Retornos como estes, utilizando-se de arbitragens das mais diversas, podem sofrer em épocas de crises em que muitos agentes se retiram ou diminuem de forma relevante suas posições nos mercados.

A fim de mensurar esta possibilidade e, se seria possível aumentar ou diminuir o tamanho das posições para melhorar os ganhos em momentos de falta de liquidez e cenários de stress, replicou-se, de forma inovadora para dados brasileiros, um índice de ruído utilizando os preços dos títulos públicos que são o ativo-objeto dos derivativos de juros. Não se encontrou relação significativa entre os resultados e os momentos de maior ruído, o que ao mesmo tempo que não permite ponderações sobre alocação nestes momentos, também mostra que os ganhos da estratégia não sofreram durante eles. Ao se construir essa medida de ruído encontrou-se, ainda, elevada relação entre o ruído e o diferencial entre as taxas básicas brasileiras, SELIC e CDI, que pode servir de base para posteriores estudos sobre como crises afetam a liquidez do sistema bancário e interbancário nacionais.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, K. J.; DEVENTER, D. R. V. Fitting yield curves and forward rate curves with maximum smoothness. **The Journal of Fixed Income**, p. 52-62, jun. 1994.
- AZEVEDO, Simone; BARCELLOS, Marta. **Histórias do Mercado de Capitais no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Elsevier Brasil, 2010.
- BANBURA, Marta; GIANNONE, Domenico; REICHLIN, Lucrezia. Large bayesian vector auto regressions. **Journal of Applied Econometrics**, v. 25, p. 71–92, nov. 2010
- BOWSHER, Clive G.; MEEKS, Roland. The dynamics of economic functions: modeling and forecasting the yield curve. **Journal of the American Statistical Association**, v. 103, n. 484, p. 1419-1437, dec. 2008
- CALDEIRA, João F.; MOURA, Guilherme V.; SANTOS, André A. P. Bond portfolio optimization using dynamic factor models. **Journal of Empirical Finance**, v. 37, p. 128-158, jun. 2016a.
- CALDEIRA, João F.; MOURA, Guilherme V.; SANTOS, André A. P. Predicting the yield curve using forecast combinations. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 100, p. 79-98, aug. 2016b.
- CARVALHO, F. J. C.; SOUZA, F. E. P.; SICSU, J.; PAULA, L. F. R.; STUDART, R. **Economia monetária e financeira: Teoria e política**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2007
- CIESLAK, Anna; POVALA, Pavol. Information in the Term Structure of Yield Curve Volatility. **The Journal of Finance**, v. 71, n. 3, p. 1393-1436, jun. 2016.
- CHAN, Ernest P. **Quantitative Trading: How to build your own Algoritm Trading Business**. John Wiley & Sons, 2009.
- CHUA, Choong Tze; KOH, Winston T. H.; RAMASWAMY, Krishna. Profiting from Mean-Reverting Yield Curve Trading Strategies. *In: FINANCIAL MANAGEMENT ASSOCIATION EUROPEAN CONFERENCE, 2005, Siena. Anais...* Siena: Research Collection Lee Kong Chian School Of Business, 2005. p. 1-40.
- DIEBOLD, Francis X.; RUDEBUSCH, Glenn D. **Yield Curve Modeling and Forecasting: the dynamic Nelson-Siegel approach**. 1. st. United Kingdom: Princeton University Press, 2013.
- DUARTE, Jefferson; LONGSTAFF, Francis A.; YU, Fan. Risk and Return in Fixed-Income Arbitrage: Nickels in Front of a Steamroller. **The Review of Financial Studies**, v. 20, n. 3, p. 769-810. 2007.

DUNBAR, Nicholas. **Inventing money**: the story of Long-term Capital Management and the legends behind it. New York: John Wiley and Sons, 2000.

ENDERS, Walter. **Applied Econometric Time Series**. 2. nd. New York: John Wiley and Sons, 2004.

ENGLER, R. F.; GRANGER, C. W. J. Co-integration and error correction: representation, estimation and testing. **Econometrica**, v. 55, p. 251-276. 1987.

FARACO, Rafael Peressoni. **Arbitragem estatística na estrutura a termo usando cointegração**. 2015. 62 f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Programa de Pós-Graduação em Economia, Departamento de Economia e Relações Internacionais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

FISCHER, Irving. **Appreciation and interest**. Publications of the American Economic Association, 11 p. 21-29, 1896.

FLICK, U. **Uma Introdução à Pesquisa Qualitativa**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

FORTUNA, Eduardo. **Mercado financeiro**: produtos e serviços. 16. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2007.

GIESE, Julia V. Level, Slope, Curvature: Characterising the yield curve in a cointegrated VAR model. **Economics**: The open-access, Open-assessment e-journal, v. 20, n. 19, p. 1-20, sept. 2008.

HALDANE, Andrew G.; READ, Vicky. Monetary Policy Surprises and the Yield Curve. **Bank of England Working Paper**, London, n. 106, 2000. Disponível em: <<http://www.bankofengland.co.uk/archive/Documents/historicpubs/workingpapers/2000/wp106.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2015.

HULL, John; WHITE, Alan. Valuation of a CDO and an nth to Default CDS Without Monte Carlo Simulation. **Journal of Derivatives**, v. 12, n. 2, p. 1-40. 2004.

HU, Grace Xing; PAN, Jun; WANG, Jiang. Noise as Information for Illiquidity. **The Journal of Finance**, v. 68, n. 6, p. 2341-2382, dec. 2013.

JOSLIN, S.; SINGLETON, K. J. ZHU, H. A new perspective on Gaussian dynamic term structure models. **Review of Financial Studies**, v. 24, n. 3, p. 926-970. 2011.

KARSIMUS, Lassi. **Yield curve arbitrage in the EUR swap rates market**: Replicating the strategies of quantitative arbitrageurs. 2015. 86 f. Dissertação (Master of Science) – School of Business, Department of Finance, Aalto University, Helsinki, 2015.

LONGSTAFF, F. **The term structure of very short-term rates : New evidence for the expectation hypothesis**. *Journal of Financial Economics*, 58 p. 397-415, 2000.

LOWENSTEIN, M.; WILLIARD, G. A. Local Martingales, arbitrage, and viability: Free snacks and cheap thrills. **Economic Theory**, v. 16, n. 1, p. 135-161, jul. 2000.

MACKENZIE, Donald. How a Superportfolio Emerges: Long-Term Capital Management and the Sociology of Arbitrage. *In*: CETINA, Karin, Knorr; PREDA, Alex (Org.). **The Sociology of Financial Markets**. Oxford: Oxford University Press, 2005. p. 62-83.

MARTELLINI, L.; PRIAULET, P.; PRIAULET, S. Understanding the butterfly strategy. **Research and Innovation Notes**, p. 1-14. 2002. Disponível em: <[http://www.jamesgoulding.com/Research_II/Butterfly/Butterfly%20\(Understanding\).pdf](http://www.jamesgoulding.com/Research_II/Butterfly/Butterfly%20(Understanding).pdf)> . Acesso em: 15 abr. 2015.

MCCULLOCH, J. Huston. The tax-adjusted yield curve. **The Journal of Finance**, v. 30, n. 3, p. 811-830, jun. 1975

NETO, Carlos Francisco de Figueiredo. **Fixed-income arbitrage strategies: swap spread arbitrage and yield curve arbitrage**. 2012. 65 f. Dissertação (Master in Economics and Business Administration) - Oulu Business School, Department of Finance, University of Oulu, Oulu, 2012.

SHARPE, W. F. Mutual fund performance. **The Journal of Business**, v. 39, n. 1, p. 119-138. 1966.

SHARPE, W. F. The Sharpe Ratio. **The Journal of Portfolio Management**, v. 21, n. 1, p. 49-58. 1994.

SICONOLFI, Michael; RAGHAVAN, A.; PACELLE, M. All Bets Are Off: How the Salesmanship and Brainpower Failed at Long-Term Capital. **Wall Street Journal**, New York, 16 nov. 1998.

VAYANOS, D.; VILA, J. A preferred-habitat model of the term structure of interest rates. **National Bureau of Economic Research**, NBER Working paper n. 15487. 2009.