

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RAFAEL ROIZ MOYSÉS BETTI

**ESTUDO DA DETECÇÃO DE CÉDULAS FALSAS DA SEGUNDA FAMÍLIA DO
REAL BRASILEIRO ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE
IMAGENS**

São Carlos

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RAFAEL ROIZ MOYSÉS BETTI

**ESTUDO DA DETECÇÃO DE CÉDULAS FALSAS DA SEGUNDA FAMÍLIA DO
REAL BRASILEIRO ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE
IMAGENS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientação: Prof. Dr. Robson Barcellos

São Carlos

2023

Ficha catalográfica

FOLHA DE APROVAÇÃO

RAFAEL ROIZ MOYSÉS BETTI

ESTUDO DA DETECÇÃO DE CÉDULAS FALSAS DA SEGUNDA FAMÍLIA DO REAL BRASILEIRO ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Resultado / Nota

Prof. Dr. Robson Barcellos
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

_____/____

Examinador:

Prof. Dr. Celso Aparecido de França
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

_____/____

Examinador:

Prof. Dr. Lucas Barbosa Marcos
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

_____/____

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Luiz Henrique e Edneusa, à minha irmã Raquel, e à toda minha família e amigos. Sem eles, nada seria possível, mas com eles sou capaz de qualquer coisa.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos iniciais faço, sobretudo, ao meu Deus, que me agraciou com uma vida abençoada, com família, amigos, saúde e principalmente fé, sem os quais não seria capaz de nada nesta vida.

Agradeço à minha querida mãe Edneusa, pelo zelo e paciência durante meus anos de superação. Sua disciplina, cuidado, energia e amor me inspiram e são, ainda, virtudes que almejo alcançar um dia.

Agradeço ao meu pai Luiz Henrique, com quem divido minhas maiores angústias e afinidades. Sua sabedoria e abraço amigo nos meus momentos de maior sofrimento me deram força para não desistir dos meus sonhos e me levantar quando eu não pensei que poderia. Sua solidariedade e coração são dádivas que sonho herdar ao menos uma fração.

Agradeço à minha maior parceira e irmã, Raquel. Seu amadurecimento com os anos transformou-lhe de irmã mais nova à minha grande inspiração e referência de perseverança e personalidade. Seu apoio e cumplicidade foram essenciais para a conclusão desse trabalho e superação de diversos desafios da minha vida.

Um agradecimento mais que especial a meu orientador Prof. Dr. Robson Barcellos. Seu conhecimento, dedicação e esforço para me orientar e auxiliar na conclusão deste trabalho foram excepcionais. Sua preocupação e disposição ultrapassaram as de um professor e orientador e tornaram-se de um verdadeiro amigo, que guardarei em grande estima e gratidão durante toda a minha vida.

Gostaria também de agradecer aos amigos da Família PentaSis, Cássio e Isabelle por todo o suporte e trocas de experiências e ideias na confecção deste trabalho, que foram fundamentais.

Estendo meus agradecimentos aos doutores Airton Munhoz e Carlos Hubner, primordiais na recuperação da minha saúde e ânimo.

Dedico um agradecimento especial ao grande amigo Lucas Aragão, com quem dividi as maiores alegrias e experiências dos anos de graduação. Nossas longas conversas, risadas e histórias construíram em São Carlos uma amizade que levarei para o resto da vida. Sua história e personalidade me inspiram e não me deixam dúvidas de que fui privilegiado em cruzar seu caminho e cultivar sua amizade.

Gostaria também de dedicar especial gratidão e apreço ao amigo Gabriel Rodrigues, com quem dividi inúmeras madrugadas de estudo, reflexões e angústias ao longo dos anos de graduação. Sua solidariedade e companheirismo foram determinantes para seguir firme no

caminho da conclusão desse curso, não só minha como de diversos colegas. Sua aptidão para a ciência e engenharia sempre foram inspiradoras, a ele desejo todo o sucesso do mundo.

Estendo também meus agradecimentos aos amigos do Bombojaco e agregados, grupo mais fantástico de amigos do qual faço e me sinto parte. Nossas memórias juntos compõem, de fato, minha história e essência.

Um agradecimento também a todos os amigos com quem dividi o convívio do mesmo lar durante os anos de graduação: Guilherme, Guga, João Ricardo, Otávio, Sales, Cataldi e Guigo. Obrigado por todas as histórias memoráveis juntos.

Não poderia deixar de citar meus amigos de longa data de Sorocaba, Trutas e Pitangas. Apesar da distância física, sempre os carrego no coração e sei que nunca deixaram de torcer por mim. Essa conquista é dedicada a eles também.

Guardo meus agradecimentos finais à Bateria UFSCar, Centro Acadêmico da Engenharia Elétrica e Atlética UFSCar, em que colecionei muitos aprendizados fora das salas de aula e, principalmente, grandes amigos que proporcionaram os melhores anos da minha vida até agora.

“Só é lutador quem sabe lutar consigo mesmo.”

(Carlos Drummond de Andrade)

RESUMO

BETTI, Rafael R. M. **Estudo da detecção de cédulas falsas da segunda família do Real brasileiro através de técnicas de processamento de imagens**. 2023. 83f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* São Carlos, 2023.

Com o advento e criação de uma moeda oficial corrente para o território nacional também nasceram as tentativas de fraudar o papel-moeda brasileiro e forjar novas maneiras de falsificá-lo, que só crescem e evoluem com os anos. Dessa maneira, tendo em vista a suma importância do dinheiro para o funcionamento da economia e sociedade como um todo, também faz-se necessária a sua devida validação e combate às tentativas de falsificação, tanto por operadores humanos quanto automatizadamente. O presente trabalho propõe um sistema capaz de separar e classificar, de maneira automatizada, cédulas da Segunda Família do Real brasileiro em um grupo de cédulas falsas e outro grupo de cédulas verdadeiras. Para isso, são eleitos cinco elementos de segurança do papel-moeda brasileiro, sendo eles a “Marca D’Água”, “Número que Muda de Cor”, “Faixa Holográfica”, “Número Escondido” e “Elementos Fluorescentes”, estudados individualmente mediante diferentes técnicas de aquisição e processamento de imagens, análises matemáticas de imagens e determinação de um critério de classificação. A metodologia eleita para o presente estudo faz uso de MATLAB e leva em consideração métodos utilizados em outros trabalhos publicados sob a ótica da moeda indiana. Esse experimento apresentou acurácia de 100% para quatro dos cinco elementos de segurança testados, e 75% para o último, o que suscitou na discussão de futuras sugestões de desenvolvimento e aprimoramento para o projeto, também expostas neste trabalho.

Palavras-chave: detecção de cédulas falsas; dinheiro falso; elementos de segurança; papel-moeda; processamento de imagens; Real brasileiro.

ABSTRACT

BETTI, Rafael R. M. **Study of the detection of counterfeit banknotes from the second family of the Brazilian Real using image processing techniques.** 2023. 83f. Monograph (Undergraduation in Electrical Engineering) – Federal University of São Carlos, *campus* São Carlos, 2023.

With the advent and creation of an official currency for the national territory, attempts to defraud Brazilian paper money and forge new ways to counterfeit it also emerged, which only grow and evolve over the years. In this way, considering the utmost importance of money for the functioning of the economy and society as a whole, it is also necessary to validate it properly and combat attempts at counterfeiting, both by human operators and automatically. This paper proposes a system capable of automatically separating and classifying Brazilian Real bills from the Second Family into a group of counterfeit bills and another group of genuine bills. For this, five security features of Brazilian paper money are selected, namely the "Watermark", "Color-Changing Number", "Holographic Strip", "Hidden Number", and "Fluorescent Elements", studied individually using different image acquisition and processing techniques, image mathematical analysis, and the determination of a classification criterion. The methodology chosen for this study uses MATLAB and takes into account methods used in other works published from the perspective of Indian currency. This experiment presented an accuracy of 100% for four of the five security features tested, and 75% for the last, which led to the discussion of future suggestions for development and improvement for the project, also exposed in this paper."

Keywords: banknotes; brazilian Real; counterfeit banknote detection; counterfeit money; image processing; security features.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elemento de Segurança “Marca D’Água”.	19
Figura 2 - Elemento de Segurança "Fio de Segurança".	20
Figura 3 - Elemento de Segurança "Quebra-Cabeças" para as notas de dois, cinco e dez reais.	20
Figura 4 - Elemento de Segurança "Quebra-Cabeças" para as notas de vinte, cinquenta e cem reais.	21
Figura 5 - Localizações do Elemento de Segurança "Alto-relevo".	21
Figura 6 - Elemento de Segurança "Faixa Holográfica" porção 1.	22
Figura 7 - Elemento de Segurança "Faixa Holográfica" porção 2.	22
Figura 8 - Elemento de Segurança "Faixa Holográfica" porção 3.	23
Figura 9 - Elemento de Segurança "Faixa Holográfica" porção 4.	23
Figura 10 - Elemento de Segurança "Número que Muda de Cor".	23
Figura 11 - Elemento de Segurança "Número Escondido" para nota de 20 Reais.	24
Figura 12 - Elemento de Segurança "Número Escondido" para nota de 100 Reais.	24
Figura 13 - Elemento de Segurança "Elementos Fluorescentes”.	25
Figura 14 - Elemento de Segurança "Microimpressões".	25
Figura 15 - Leitor de Cheques bancários adaptado PentaSis Ltda.	27
Figura 16 - Fluxograma de etapas da Rotina Geral.	31
Figura 17 - Conjunto de trilha e roletes do Leitor de Cheques bancários adaptado, PentaSis Ltda.	32
Figura 18 - Feixe de leds e sensores do Leitor de Cheques bancários adaptado, PentaSis Ltda.	33
Figura 19 - Chave Manual (a) e Esquema elétrico de ligações da chave (b).	33
Figura 20 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais escaneada sob luz IR.	34
Figura 21 - Exemplar de cédula verdadeira de 20 Reais escaneada sob luz IR.	34
Figura 22 - Exemplar de cédula falsa de 100 Reais escaneada sob luz IR.	35
Figura 23 - Exemplar de cédula falsa de 20 Reais escaneada sob luz IR.	35
Figura 24 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais escaneada sob luz UV.	36
Figura 25 - Exemplar de cédula falsa de 100 Reais escaneada sob luz UV.	37
Figura 26 - Ambiente desenvolvido pelo autor para captura de imagem com uso de <i>backlight</i> . O quadrado amarelo (a) demonstra a posição da câmera fotográfica de aparelho celular.	38

Figura 27 - Exemplo de captura de imagem no ambiente de <i>backlight</i> desenvolvido pelo autor. Na imagem, um exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais.	38
Figura 28 - Exemplar de cédula falsa de 100 Reais sob iluminação <i>backlight</i> .	39
Figura 29 - Exemplar de cédula falsa de 100 Reais sob iluminação <i>backlight</i> .	39
Figura 30 - Região de Interesse do “Número Escondido” em uma cédula verdadeira de 100 Reais, fotografia sob zoom de 1.4X.	40
Figura 31 - Região de Interesse do “Número Escondido” em uma cédula falsa de 100 Reais, fotografia sob zoom de 1.4X.	40
Figura 32 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pré Cropagem 1 para “Marca D’Água”, sob captura com <i>backlight</i> .	42
Figura 33 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 para “Marca D’Água”, sob captura com <i>backlight</i> .	42
Figura 34 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 para Faixa Holográfica, sob captura em IR.	43
Figura 35 - Exemplar de cédula verdadeira de 20 Reais pós Cropagem 1 para Número que Muda de Cor, sob captura em IR.	43
Figura 36 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 para “Elementos Fluorescentes”, sob captura em UV.	43
Figura 37 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 para “Número Escondido”.	44
Figura 38 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 e Conversão para GS, para elemento de segurança “Faixa Holográfica”.	45
Figura 39 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 e Conversão para GS, para elemento de segurança “Marca D’Água”.	45
Figura 40 - Exemplar de cédula verdadeira de 20 Reais pós Cropagem 1 e Conversão para GS, para elemento de segurança “Número que Muda de Cor”.	45
Figura 41 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 e Conversão para GS, para elemento de segurança “Elementos Fluorescentes”.	46
Figura 42 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 e Conversão para GS, para elemento de segurança “Número Escondido”.	46
Figura 43 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para Faixa Holográfica. Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais.	47
Figura 44 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para Marca D’Água. Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais.	48

Figura 45 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para Número que Muda de Cor. Exemplar de cédula verdadeira de 20 Reais.	48
Figura 46 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para “Elementos Fluorescentes”. Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais.	49
Figura 47 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para Faixa Holográfica. Exemplar de cédula falsa de 100 Reais.	50
Figura 48 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para Número que Muda de Cor. Exemplar de cédula falsa de 20 Reais.	50
Figura 49 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para “Elementos Fluorescentes”. Exemplar de cédula falsa de 100 Reais.	51
Figura 50 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para Marca D’Água. Exemplar de cédula falsa de 100 Reais.	52
Figura 51 - Número Escondido sob método Sobel para cédula verdadeira de 100 Reais.	53
Figura 52 - Número Escondido sob método Prewitt para cédula verdadeira de 100 Reais.	53
Figura 53 - Número Escondido sob método Sobel para cédula falsa de 100 Reais.	54
Figura 54 - Máscara Binarizada para “Faixa Holográfica”. Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais.	55
Figura 55 - Máscara Binarizada para “Número que Muda de Cor”. Exemplar de cédula verdadeira de 20 Reais.	55
Figura 56 – Máscara Não Binarizada para “Marca D’Água”. Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais.	55
Figura 57 - Máscara Não Binarizada para “Elementos Fluorescentes”. Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais.	56
Figura 58 - Máscaras da Referência, Cédula Verdadeira 1 e Cédula Falsa 1, para “Faixa Holográfica”.	58
Figura 59 - Máscaras da Referência, Cédula Verdadeira 1 e Cédula Falsa 1, para “Número que Muda de Cor”.	58
Figura 60 - Máscaras da Referência, Cédula Verdadeira 1 e Cédula Falsa 1, para “Marca D’Água”.	59
Figura 61 - Máscaras da Referência, Cédula Verdadeira 1 e Cédula Falsa 1, para “Elementos Fluorescentes”.	59
Figura 62 - Máscaras da Referência, Cédula Verdadeira 1 e Cédula Falsa 1, para “Número Escondido”.	59

Figura 63 - Máscara resultante (Referência - amostra Verdadeira número 1) e Máscara resultante (Referência - amostra Falsa número 1), para Faixa Holográfica.	60
Figura 64 - Máscara resultante (Referência - amostra Verdadeira número 1) e Máscara resultante (Referência - amostra Falsa número 1), para Número que Muda de Cor.	60
Figura 65 - Máscara resultante (Referência - amostra Verdadeira número 1) e Máscara resultante (Referência - amostra Falsa número 1), para Marca D'Água.	60
Figura 66 - Máscara resultante (Referência - amostra Verdadeira número 1) e Máscara resultante (Referência - amostra Falsa número 1), para “Elementos Fluorescentes”.	61
Figura 67 - Máscara resultante (Referência - amostra Verdadeira número 1) e Máscara resultante (Referência - amostra Falsa número 1), para Número Escondido.	61
Figura 68 - Máscara gerada para amostra número 1 de cédula verdadeira (a), e cédula falsa (b) de 100 Reais, para Faixa Holográfica.	62
Figura 69 - Máscara gerada para amostra número 1 de cédula verdadeira (a), e cédula falsa (b) de 20 Reais, para Número que Muda de Cor.	62
Figura 70 - Máscara gerada para amostra número 1 de cédula verdadeira (a), e cédula falsa (b) de 100 Reais, para Marca D'água.	63
Figura 71 - Máscara gerada para amostra número 1 de cédula verdadeira (a), e cédula falsa (b) de 100 Reais, para “Elementos Fluorescentes”.	63
Figura 72 - Máscara gerada para amostra número 1 de cédula verdadeira (a), e cédula falsa (b) de 100 Reais, para Número Escondido.	63
Figura 73 - Gráfico do Método 1 sobre elemento de segurança da Faixa Holográfica.	65
Figura 74 - Gráfico do Método 2 sobre elemento de segurança da Faixa Holográfica.	66
Figura 75 - Gráfico do Método 1 sobre elemento de segurança do Número que Muda de Cor.	67
Figura 76 - Gráfico do Método 2 sobre elemento de segurança do Número que Muda de Cor.	68
Figura 77 - Gráfico do Método 1 sobre elemento de segurança da Marca D'Água.	69
Figura 78 - Gráfico do Método 2 sobre elemento de segurança da Marca D'Água.	69
Figura 79 - Gráfico do Método 1 sobre elemento de segurança “Elementos Fluorescentes”.	70
Figura 80 - Gráfico do Método 2 sobre elemento de segurança “Elementos Fluorescentes”.	71
Figura 81 - Gráfico do Método 1 sobre elemento de segurança do Número Escondido.	72
Figura 82 - Gráfico do Método 2 sobre elemento de segurança do Número Escondido.	73
Figura 83 - Exemplar de cédula verdadeira de 20 Reais sob escaneamento IR, com uso da guia de papel sulfite (retângulo amarelo à esquerda).	75

Figura 84 - Máscaras binarizadas da cédula Referência; amostra número 1 de cédula verdadeira; amostra número 1 de cédula falsa.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Matriz de confusão dos resultados finais do experimento.

74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GS	<i>Gray Scale</i>
IR	Infra-Vermelho
OCR	Reconhecimento Óptico de Caracteres (<i>Optical Character Recognition</i>)
SSIM	<i>Structure Similarity Index Method</i>
UV	Ultra-Violeta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Contextualização.....	18
1.2 A Cartilha da 2a Família do Real Brasileiro.....	18
1.3 Sistema Proposto.....	26
1.4 Introdução ao Processamento de Imagens.....	28
1.4.1 Processamento de Imagens.....	28
1.4.2 Conversão para Escalas de Cinza.....	29
1.4.3 Segmentação de Imagem.....	29
1.4.4 Detecção de Borda.....	30
1.4.5 Aritmética com Imagens.....	30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
3 METODOLOGIA	34
3.1 Rotina Geral.....	34
3.2 Aquisição de Imagens.....	35
3.2.1 Infra-vermelho (IR).....	35
3.2.2 Ultra-Violeta (UV).....	39
3.2.3 <i>Backlight</i>	41
3.2.4 Fotografia e Zoom.....	44
3.3 Pré-Processamento das Imagens.....	45
3.3.1 Primeira Cropagem (Cropagem 1).....	45
3.3.2 Conversão para <i>Gray Scale</i>	48
3.4 Técnicas de Processamento das Imagens.....	50
3.4.1 Aplicativo de Segmentação de Imagem MATLAB.....	50
3.4.2 Funções de Detecção de Borda.....	56

3.5 Extração de Características	58
3.5.1 Seleção da Máscara segmentada	58
3.5.2 Seleção da Técnica de Detecção de Borda	60
3.6 Segunda Cropagem (Cropagem 2).....	60
3.7 Análise matemática de imagens.....	61
3.7.1 Método 1: Subtração de Imagens e Soma Total de Pixels das Resultantes.....	61
3.7.2 Método 2: Intensidade Média de Pixel	65
3.8 Plotagem dos Gráficos e Estipulação dos Intervalos Característicos	68
3.9 Escolha dos Limiares de Classificação	68
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	70
4.1 Faixa Holográfica.....	70
4.2 Número que Muda de Cor.....	71
4.3 Marca D'Água	73
4.4 Elementos Fluorescentes.....	75
4.5 Número Escondido.....	76
4.6 Acurácia Final do experimento.....	79
5 PROBLEMAS ENFRENTADOS	81
5.1 Disponibilidade de Amostragem.....	81
5.2 Escorregamento das cédulas durante a aquisição de Imagens	81
6 CONCLUSÃO	83
7 TRABALHOS FUTUROS	84
8 REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Na atual ordem econômica mundial, o dinheiro possui grande relevância nas dinâmicas sociais, pois atua como um “validador social das mercadorias e dos trabalhos privados nelas contidos” [1]. Assim, para Alvim, o dinheiro se constitui como objeto essencial para a satisfação das necessidades humanas [2], e o Banco Central do Brasil define o dinheiro em espécie como um meio de pagamento conveniente, seguro e imediato [3].

Apesar da importância do dinheiro para a ordem econômica brasileira, o Banco Central do Brasil registrou alta quantidade de cédulas falsas de Real retidas nos estados da federação, sendo que o estado de São Paulo lidera essa concentração no país. Em 2021, foram registradas 109.531 cédulas falsas; em 2022, o número aumentou para 120.794; e até setembro de 2023 foram registradas 69.723 cédulas [4].

Diante da problemática existente para economia brasileira, configurada na disseminação de cédulas fraudulentas de Real corrente no país, e a fim de fomentar o desenvolvimento da tecnologia nacional em parceria com a empresa de automação bancária PentaSis Ltda., o presente trabalho pretende apresentar um experimento desenvolvido para a detecção automatizada de cédulas falsas da 2ª família do Real, através de técnicas de processamento de imagens, em que foram testados os elementos de segurança “Marca D’Água”, “Faixa Holográfica”, “Número que Muda de Cor”, “Número Escondido” e “Elementos Fluorescentes” contidos nas cédulas de valores de 100 e 20 Reais, estabelecidos pelo Banco Central do Brasil. Também, o presente trabalho pode incorporar soluções voltadas para o mercado de máquinas contadoras de cédulas e *vending machines*, reforçando a sua relevância.

Neste trabalho, são desenvolvidas rotinas de processamento de imagens de modo que, quando aplicadas sobre uma amostragem de cédulas verdadeiras do Real Brasileiro e sobre uma amostragem de cédulas falsas do mesmo, ao final destas rotinas, esses dois grupos de cédulas apresentem padrões de resposta distintos entre si, de maneira que se possam destacar matematicamente dois intervalos de variação de padrão de imagem que contenham as amostragens e separem os dois grupos de cédulas (verdadeiras e falsas).

1.2 A Cartilha da 2ª Família do Real Brasileiro

Toda cédula do papel-moeda do Real brasileiro possui diversos elementos de segurança embutidos em si, que garantem sua autenticidade. O Banco Central do Brasil disponibilizou, em Cartilha de Treinamento, quais são as características e elementos de segurança a serem checados na verificação de autenticidade de uma cédula de dinheiro.

Com o intuito de seguir mantendo a segurança da moeda perante o desenvolvimento das técnicas de reprodução do dinheiro brasileiro, o Banco Central do Brasil lançou, em 2010, a Segunda Família de Cédulas do Real, cujas novas notas são munidas de recursos gráficos mais elaborados, aptos a impor maiores dificuldades às tentativas de falsificação.

Nesse sentido, as cédulas da Segunda Família do Real se caracterizam por suas dimensões, cores e temas. No que se refere às dimensões, quanto maior o valor da nota, maior é o seu comprimento. A respeito da altura da cédula, existem duas, uma para as notas de cem e cinquenta reais, e outra para os demais valores (dois, cinco, dez e vinte reais). Quanto às cores, cada valor de cédula possui uma coloração específica. Já quanto ao tema, as notas do Real possuem a efígie da República na frente da cédula e animais da fauna brasileira no verso.

Tratando-se dos elementos de segurança contidos nas cédulas verdadeiras de Real, o Banco Central recomenda praticar três ações para que se verifique a autenticidade da mesma, sendo elas: “Veja”, “Sinta” e “Descubra”.

Os elementos de segurança classificados como “Veja” contêm dispositivos de segurança visuais, dentre eles a “Marca D’Água” feita durante a fabricação do papel, e não durante sua impressão, em que a figura do animal respectivo ao valor da nota aparece em tons que variam do claro ao escuro, enquanto o valor da nota aparece em cor clara (Figura 1).

Figura 1 - Elemento de Segurança “Marca D’Água”.



Fonte: BRASIL, 2023.

Outro dispositivo visual é o “Fio de Segurança”, presente nas notas de dez, vinte, cinquenta e cem reais. De acordo com a cartilha, o fio é colocado no papel durante a sua fabricação e fica totalmente embutido neste. É encontrado na efígie da República e fica visível quando essa é colocada contra a luz. Nele está escrito o valor da nota (Figura 2).

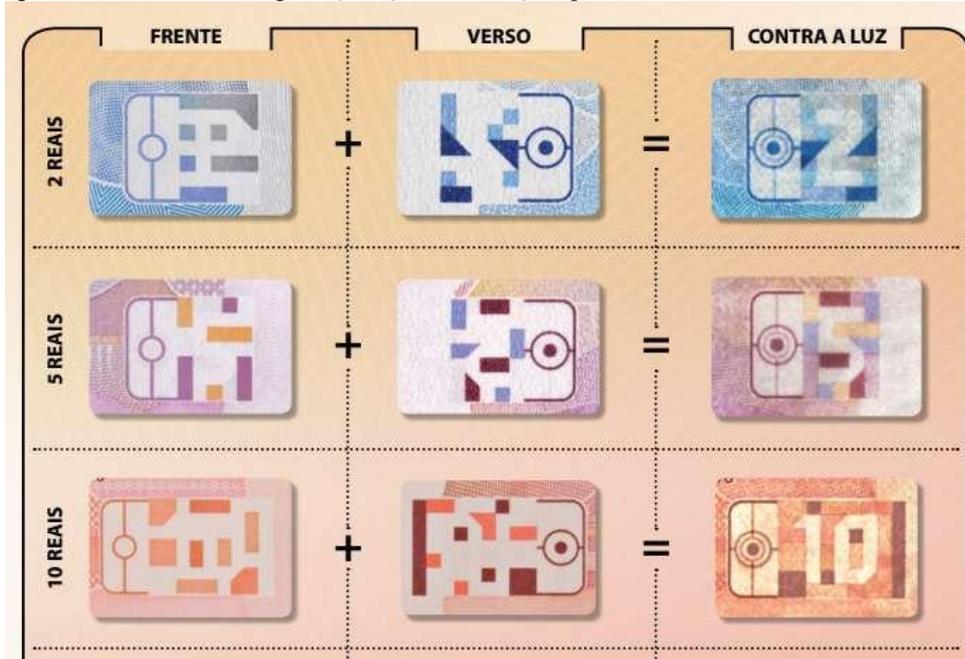
Figura 2 - Elemento de Segurança "Fio de Segurança".



Fonte: BRASIL, 2023.

Por fim, na categoria “Veja” há o elemento denominado “Quebra-Cabeça”, que consiste na composição de partes impressas na frente e no verso da nota, as quais se complementam e permitem visualizar o valor da nota quando colocada contra a luz (Figuras 3 e 4).

Figura 3 - Elemento de Segurança "Quebra-Cabeças" para as notas de dois, cinco e dez reais.



Fonte: BRASIL, 2023.

Figura 4 - Elemento de Segurança "Quebra-Cabeças" para as notas de vinte, cinquenta e cem reais.



Fonte: BRASIL, 2023.

Já na categoria dos dispositivos de segurança da classe “Sinta”, há o elemento de segurança tátil, o “Alto-Relevo”, que se caracteriza por um relevo no papel moeda em diferentes áreas da cédula, como na legenda “República Federativa do Brasil”, na efígie, nos numerais que indicam o valor da nota, nas extremidades laterais, na marca tátil, no verso, no número que indica o valor, na figura do animal, e na legenda “Banco Central do Brasil” (Figura 5).

Figura 5 - Localizações do Elemento de Segurança "Alto-relevo".

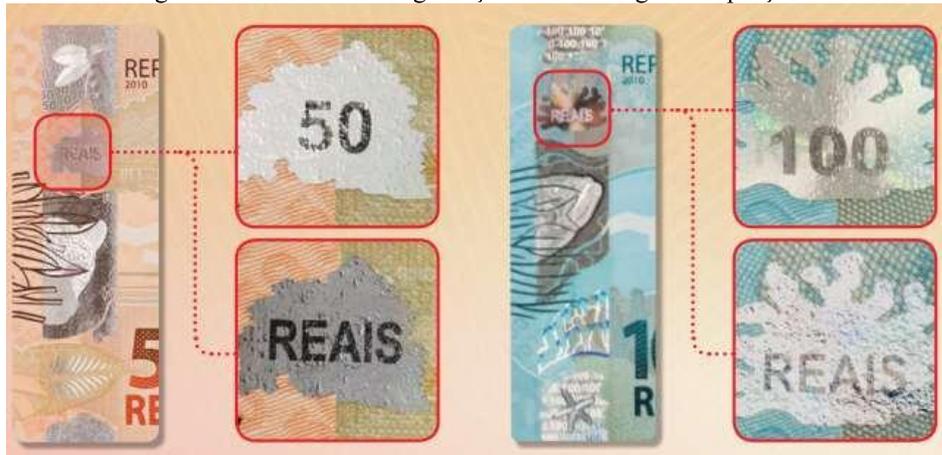


Fonte: BRASIL, 2023.

Encerrando a categoria do elemento de segurança “Sinta”, há a “Textura do Papel”, que destaca a diferença da textura do papel comum e do papel da cédula de dinheiro, sendo o primeiro mais liso que o papel do segundo.

Na categoria “Descubra”, por sua vez, há o elemento “Faixa Holográfica”, presente nas cédulas de cinquenta e cem reais. Esse elemento de segurança é composto por uma faixa metalizada na cédula que, ao movimentá-la, permite visualizar efeitos de mudança de cor e imagem na mesma. Ao realizar esses movimentos, é possível verificar a existência do número do valor da nota (cinquenta ou cem) ou a palavra “Reais” (Figura 6), bem como a diferença de coloração na imagem do animal (Figura 7). Além disso, as mudanças de coloração também estão presentes em outras partes da nota, como na folha (cinquenta) ou no coral (cem) (Figuras 8 e 9).

Figura 6 - Elemento de Segurança "Faixa Holográfica" porção 1.



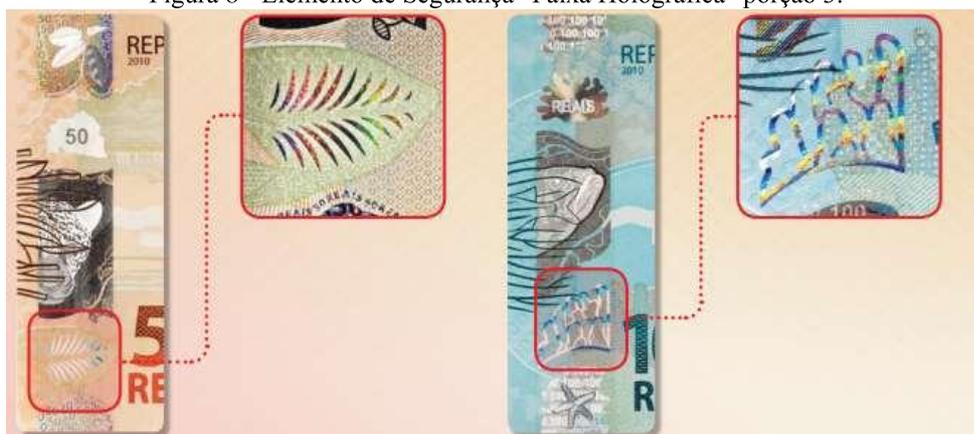
Fonte: BRASIL, 2023.

Figura 7 - Elemento de Segurança "Faixa Holográfica" porção 2.



Fonte: BRASIL, 2023.

Figura 8 - Elemento de Segurança "Faixa Holográfica" porção 3.



Fonte: BRASIL, 2023.

Figura 9 - Elemento de Segurança "Faixa Holográfica" porção 4.



Fonte: BRASIL, 2023.

O elemento de segurança “Número que Muda de Cor” é encontrado apenas nas cédulas de dez e vinte reais. Para ser checado, basta movimentar a nota e concluir se o número do valor da nota se altera da cor azul para a cor verde (Figura 10).

Figura 10 - Elemento de Segurança "Número que Muda de Cor".



Fonte: BRASIL, 2023.

O elemento “Número Escondido” está presente na frente das cédulas, no retângulo em sua lateral direita, e no verso das notas de cinquenta e cem reais. Nesses casos, é encontrado no desenho presente na parte inferior direita da nota. Para visualizá-lo, é preciso posicionar a nota na altura dos olhos, na horizontal, e surgirá o valor da nota dentro do mencionado retângulo ou do desenho (Figuras 11 e 12).

Figura 11 - Elemento de Segurança "Número Escondido" para nota de 20 Reais.



Fonte: BRASIL, 2023.

Figura 12 - Elemento de Segurança "Número Escondido" para nota de 100 Reais.



Fonte: BRASIL, 2023.

O dispositivo “Elementos Fluorescentes” demanda o uso de luz Ultra-Violeta (UV) para ser visualizado. Ao passar a luz sobre a nota, visualiza-se o número correspondente ao valor da nota, pequenas fibras da cor lilás espalhadas pela cédula, além da alteração da cor da numeração contida no verso da cédula, de passa de vermelho para amarelo (Figura 13).

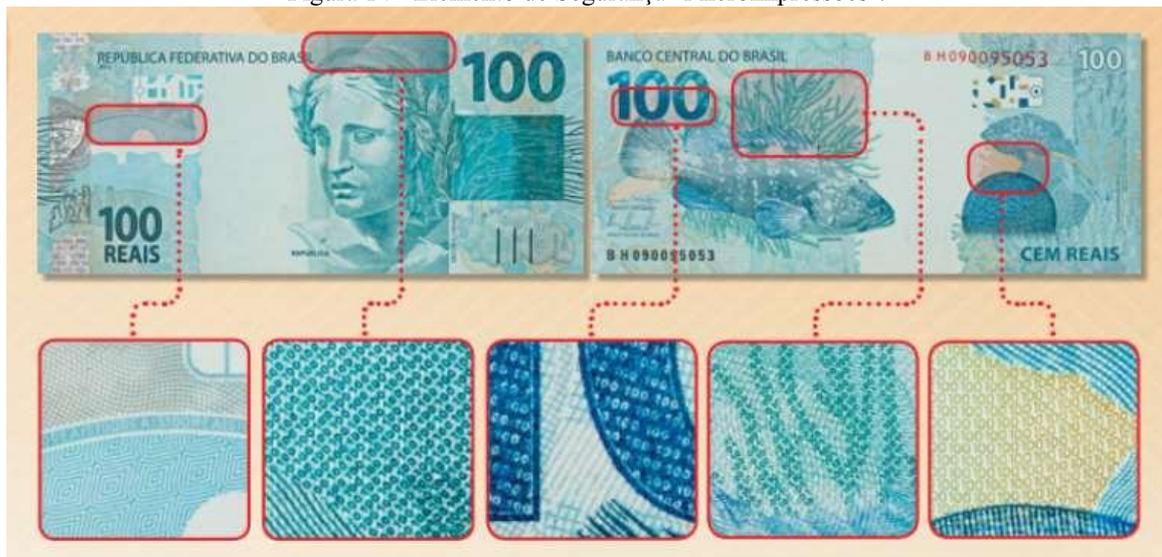
Figura 13 - Elemento de Segurança "Elementos Fluorescentes".



Fonte: BRASIL, 2023.

Por fim, as “Microimpressões” são caracterizadas pelo número correspondente ao valor da cédula impresso em tamanho muito pequeno em diversas áreas da mesma, como em torno da efigie da República na frente da nota, e em torno do animal no verso da nota (Figura 14) [3].

Figura 14 - Elemento de Segurança "Microimpressões".



Fonte: BRASIL, 2023.

1.3 Sistema Proposto

Neste trabalho foram seguidas as orientações da Cartilha de Treinamento da Segunda Família do Real, disponibilizada pelo Banco Central do Brasil, sobre os elementos de segurança usados para analisar cédulas verdadeiras. Para este estudo, foram escolhidos os seguintes elementos de segurança: “Marca D’Água”, “Faixa Holográfica”, “Número que Muda de Cor”, “Número Escondido” e “Elementos Fluorescentes” que, com exceção do último, são 4 dos 5 elementos de segurança definidos pela Cartilha como imediatos, para que um operador humano possa realizar uma checagem rápida de autenticidade de uma cédula. O quinto elemento dito como imediato, “Alto-Relevo”, foi excluído deste trabalho por não possibilitar uma clara análise de caráter visual, uma vez que foi criado para análise através do tato. Dessa forma, o “Alto-Relevo” foi substituído pelo elemento de segurança “Elementos Fluorescentes”, igualmente determinante para uma cédula autêntica, mas de acesso limitado a um operador humano por exigir presença de luz UV em sua análise, a qual foi disponibilizada para o trabalho.

Para afirmar que uma cédula é verdadeira, é necessário que ela seja aprovada em todas as rotinas de avaliação de todos os elementos de segurança. Se, para algum deles, ao final das rotinas de teste, ela apresentar resultados não condizentes com o padrão estabelecido como legítimo, não se poderá considerar a cédula como verdadeira. Essas rotinas consistem em, para cada uma das cédulas e elementos de segurança, análises de tipo de aquisição de imagem, no pré-processamento de imagem, no método de processamento de imagem, na extração de característica, na análise matemática dos padrões de imagem resultantes, e na apresentação de resultados, que serão abordados posteriormente.

Os elementos de segurança “Marca D’Água”, “Número Escondido” e “Elementos Fluorescentes” estão presentes em todas as cédulas. No entanto, a “Faixa Holográfica” só está presente nas cédulas de 50 e 100 reais, e o “Número que Muda de Cor” só está presente nas cédulas de 10 e 20 reais. Dessa forma, a fim de analisar todos os elementos de segurança escolhidos para o estudo, foram eleitas as cédulas de 100 e 20 reais, que juntas contêm todos os 5 elementos de segurança escolhidos. Portanto, com a cédula de 100 reais foram estudados “Marca D’Água”, “Número Escondido”, “Elementos Fluorescentes” e “Faixa Holográfica”; e na cédula de 20 reais, o “Número que Muda de Cor”.

Este trabalho fez uso de MATLAB, da MathWorks®, para a realização das operações e desenvolvimento do estudo de imagens. As ferramentas da linguagem foram fundamentais para a realização de etapas do processo, tais como detecção de borda e segmentação de imagem.

O equipamento empregado para a aquisição de imagens foi concedido pela empresa de automação bancária PentaSis Sistemas Ltda., parceira no desenvolvimento do estudo. O equipamento consiste na adaptação de um equipamento responsável pela leitura magnética de cheques bancários (Figura 15). Com ele foram realizados *scans* das cédulas em estudo, mantendo um padrão controlado de iluminação, angulação e tamanho de imagem, tanto sob iluminação em infravermelho (IR) quanto sob ultravioleta (UV).

Também, é importante salientar que o presente trabalho não inclui estudos e análises para a cédula de 200 Reais, já que o documento que foi utilizado para os presentes estudos, a Cartilha do Real, corresponde a uma edição antecedente à data de veiculação da cédula de 200 Reais.

Figura 15 - Leitor de Cheques bancários adaptado PentaSis Ltda.



Fonte: Acervo pessoal.

1.4 Introdução ao Processamento de Imagens

1.4.1 Processamento de Imagens

De acordo com Gonzalez e Woods,

Uma imagem pode ser definida como a função bi-dimensional, $f(x,y)$, onde x e y são coordenadas espaciais (de um plano), e a amplitude de f em qualquer par de coordenadas (x,y) é chamada de *intensidade* ou *nível de cinza* da imagem neste dado ponto. Quando x,y e os valores de amplitude de f são todos finitos, quantidades discretas, pode-se dizer que a imagem é uma *imagem digital* [5].

O campo de processamento de imagens digitais diz respeito à análise de imagens por meios automatizados, por meio de um computador digital. Segundo supracitado, uma imagem é composta de uma quantidade finita de elementos, sendo cada um deles dotado de posição e intensidade. Cada um desses elementos leva o nome de Pixel [5]. As operações aritméticas em imagens e aplicação das ferramentas de processamento de imagens usadas neste trabalho, que serão citadas nos subitens a seguir, só são aplicáveis em imagens em escalas-de-cinza, portanto foi abordado somente o conceito de imagens em duas dimensões.

1.4.2 Conversão para Escalas de Cinza

A Conversão para Escalas de Cinza é fundamental para o processamento de imagens. Imagens coloridas ou em RGB são compostas por três dimensões de pixels, Vermelho, Verde e Azul, respectivamente, o que, por sua vez, implica em uma quantidade muito pesada de dados quando se realizam operações ou análises com imagens. Com isso, é realizada a conversão para escalas de cinza, que transforma três coordenadas de pixel (R,G,B) em uma coordenada de 0 a 255, sendo 0 o mais próximo de preto e 255 o mais próximo de branco, e contendo, entre os dois extremos, diversos tons de cinza. No MATLAB existem diversas funções que realizam essas conversões, sendo que algumas delas estão representadas nas Funções 1, 2 e 3, a seguir [6]. Neste trabalho foi utilizada a Função 1.

Função 1: $I = \text{rgb2gray}(\text{RGB})$

Função 2: $\text{gray} = \text{rgb2gray}(\text{map})$

Função 3: $\text{imshow}(\text{gray})$

1.4.3 Segmentação de Imagem

Conforme descrito na página da Internet da MathWorks®,

“Segmentação de imagens envolve converter uma imagem em um coletivo de regiões de pixels que são representados por uma máscara ou imagem rotulada. Ao dividir uma imagem em segmentos, pode-se processar somente os segmentos importantes da imagem ao invés de processar a imagem toda” [7].

Muthukrishnan e Radha mencionam que a “segmentação de imagens consiste no processo de particionar uma imagem digital em múltiplas regiões ou aglomerados de pixels” [8]. Ou seja, a segmentação de imagens é o que divide uma imagem em partes, componentes ou objetos. Geralmente, os algoritmos de segmentação baseiam-se na descontinuidade ou na similaridade de valores de intensidade de pixel. A abordagem da similaridade corresponde a particionar uma imagem em regiões que apresentam um mesmo padrão de comportamento de intensidade de pixels, sendo esse padrão definido previamente e de acordo com o problema que se quer resolver ou situação que se pretende analisar. Paralelamente, a abordagem da descontinuidade particiona uma imagem baseando-se em mudanças abruptas no comportamento da intensidade de pixels numa determinada região, caracterizando possivelmente o contorno de algum objeto na imagem em questão [8].

1.4.4 Detecção de Borda

A detecção de bordas é uma ferramenta muito importante para a segmentação de imagens e também na visão computacional. A propriedade mais relevante da técnica de detecção de borda é a capacidade de localizar fronteiras entre objetos que estão representados em uma imagem. Bordas tipicamente ocorrem na fronteira entre duas regiões distintas, podendo representar a mudança de um objeto ou região de interesse para outra em uma mesma imagem. Esta fronteira é percebida devido à detecção de mudanças bruscas no padrão de intensidade de pixels em uma imagem, gerando descontinuidade e podendo representar contornos. Existem variadas técnicas de detecção de borda na literatura de segmentação de imagens, sendo algumas delas: *Canny Edge Detection*, *Sobel Edge Detection*, *Prewitt Edge Detection*, *Roberts Edge Detection*, *LoG Edge Detection*, entre outras [8]. No presente trabalho foram usadas *Sobel* e *Prewitt Edge Detection* para a realização do estudo.

1.4.5 Aritmética com Imagens

Também de acordo com a página da web da MathWorks®,

“Aritmética com imagens é a implementação de operações aritméticas comuns, tais quais adição, subtração, multiplicação e divisão, em imagens. Aritmética com imagens tem diversos usos em processamento de imagens tanto como uma etapa preliminar em operações mais complexas, como por si só. Por exemplo, subtração de imagens pode ser usada para detectar diferenças entre duas ou mais imagens do mesmo cenário ou objeto” [9].

Existem diversas funções no MATLAB que permitem as operações aritméticas entre imagens. Nesse trabalho foi usado o conceito de subtração entre imagens, no qual ainda existe uma gama de funções disponíveis, exibidas nas funções das Funções 4 e 5.

Função 4: $Z = \text{imsubtract}(X, Y)$

Função 5: $Z = \text{imabsdiff}(X, Y)$

Para esse estudo, foi empregada a função representada pela Equação 4, a qual tem como característica a diferença dos valores de intensidade pixel a pixel entre as imagens subtraídas, mas leva em conta a ordem do minuendo e subtraendo da operação, ao passo que a Equação 5 somente leva em conta a diferença absoluta entre os pixels subtraídos, não importando a ordem de minuendo e subtraendo [10]. Foram testadas ambas as funções, contudo foi escolhida a Equação 4 para este trabalho por proporcionar uma ciência melhor do que ocorre com as imagens e com a operação de subtração entre elas, visto que é importante a ordem do minuendo e subtraendo para realizar as operações corretamente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em [11] foi utilizado *Python* para o desenvolvimento de um sistema com uma série de etapas de processamento de imagem, que consistem no pré-processamento de imagem, na conversão para escalas de cinza, em métodos de detecção de borda, na segmentação de imagem, e na extração e comparação de características. A aquisição das imagens é feita através de *scans* ou por fotografia com uso de celular. Este sistema faz uso de SSIM (*Structure Similarity Index Method*) para realizar sua etapa de comparação de características. Afirma-se aqui que os métodos deste *paper* podem ser aplicados a outras moedas do mundo (no presente estudo foi feito com a Rúpia Indiana) e diferencia-se dos demais trabalhos por exibir ao usuário a diferença entre as cédulas sob validação e a cédula de referência usada como base de comparação.

Em [12] foi utilizada a comparação entre cédula *input* (sob análise) e os valores de referência calculados para diferentes parâmetros de cédulas originais em ambiente similar. Em seu trabalho, a aquisição de imagens é feita através de um conjunto de módulo de câmera fotográfica controlada por microcontrolador em adição de uso de luzes branca e UV e o sistema é desenvolvido em *Matlab*. Utiliza-se aqui um método diferente de estudo para cada elemento de segurança analisado, envolvendo detecção de borda, segmentação de imagem, OCR (*Optical Character Recognition* - Reconhecimento Óptico de Caracteres), entre outros algoritmos, mas mantendo um padrão geral de etapas de pré-processamento de imagem, comparação de dados de referência com *input*, bem como denominação e validação da cédula. Assim, garantiu-se uma acurácia de 100% para classificação do valor de cédula e 90% para validação da autenticidade, mantendo, ainda assim, um baixo grau de complexidade.

Devido à especificidade do tema deste trabalho e escassez de estudos que apresentem a mesma similaridade de métodos e material análogo, neste caso a Rúpia Indiana em relação ao Real brasileiro, foram encontrados somente os dois trabalhos supracitados.

No presente trabalho, foi utilizado o mesmo princípio de comparação de características de cédulas teste com as cédulas de referência usadas pelos autores mencionados. Além disso, foi empregada a mesma sequência básica de etapas de [11] e a mesma abordagem independente dos elementos de segurança, como em [12]. Entretanto, esse estudo diferencia-se das referências citadas, pois analisou o Real Brasileiro ao invés da Rúpia Indiana, e a aquisição de imagens foi realizada com auxílio de um equipamento adaptado de escaneamento e leitura de cheques bancários da empresa PentaSis Automação Ltda., que fez

aquisições de imagem diferentes para cada elemento de segurança, ao invés de uma só captura da cédula toda, e utilizou análises matemáticas de pixels para avaliar seus resultados.

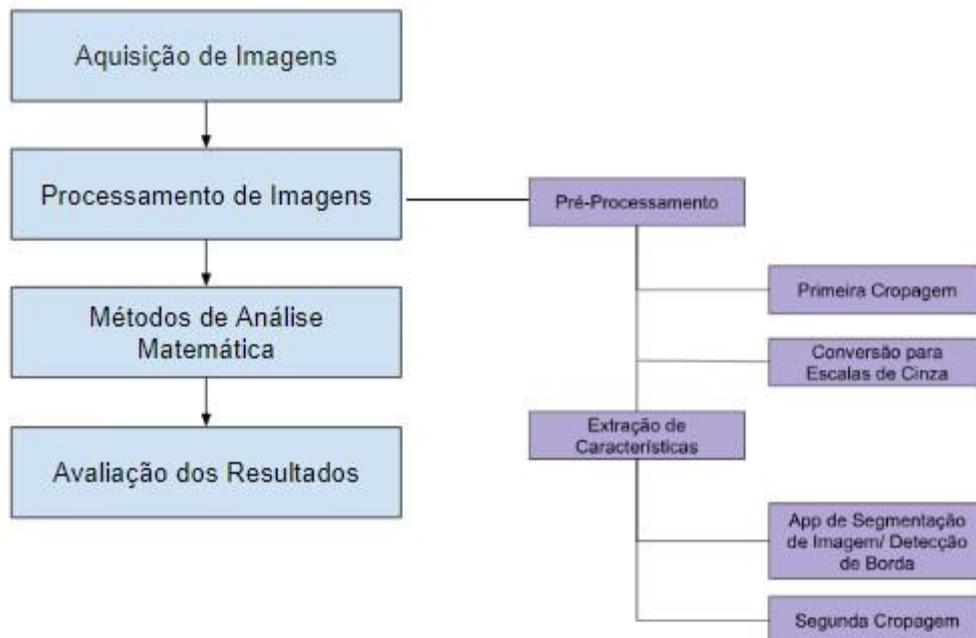
3 METODOLOGIA

3.1 Rotina Geral

Foram reunidas 40 amostras de cédulas do Real Brasileiro, sendo 10 cédulas verdadeiras de 100 reais, 10 cédulas falsas de 100 reais, 10 cédulas verdadeiras de 20 reais e 10 cédulas falsas de 20 reais. As cédulas verdadeiras foram obtidas pelo autor através de saque bancário, e as cédulas falsas foram disponibilizadas pela empresa parceira no desenvolvimento deste estudo (PentaSis Ltda.).

Cada amostra de cédula passou por uma série de etapas, sendo elas: aquisição de imagem, pré-processamento de imagem, método de processamento de imagem, extração de característica, análise matemática dos padrões de imagem resultantes, e avaliação de resultados (Plotagem dos gráficos e escolha dos Limiares de Classificação) (Figura 16).

Figura 16 - Fluxograma de etapas da Rotina Geral.



Fonte: Elaboração própria.

Uma vez concluídas as etapas, foi possível identificar um padrão típico de comportamento das cédulas verdadeiras após essas rotinas, e um padrão suficientemente diferente, baseado em métodos matemáticos, de comportamento das cédulas falsas, de modo que se possa separar os dois grupos.

As etapas supracitadas serão detalhadas nas seções a seguir.

3.2 Aquisição de Imagens

3.2.1 Infra-vermelho (IR)

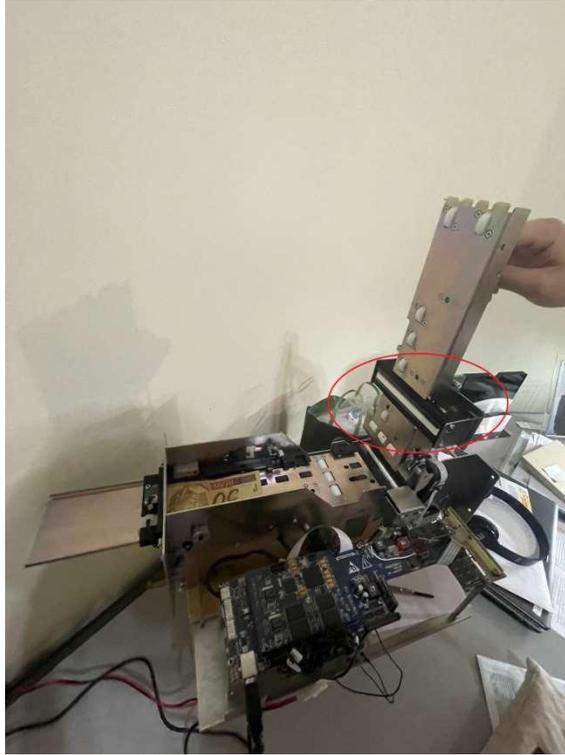
O equipamento utilizado para a realização deste estudo, o Leitor de Cheques bancários adaptado PentaSis Ltda., possui uma trilha pela qual as cédulas são tracionadas por um sistema de rolamentos, indicada na Figura 17, de maneira que, ao atravessar o feixe de leds e sensores de luz e cor, indicados na Figura 18, é disparada uma captura de imagem de modo a escanear a cédula toda conforme ela atravessa o feixe. Ao final do tracionamento, em software próprio da empresa e interligado ao hardware de captura de imagem, é gerada a imagem que teria sido capturada anteriormente.

Figura 17 - Conjunto de trilha e roletes do Leitor de Cheques bancários adaptado, PentaSis Ltda.



Fonte: Acervo pessoal.

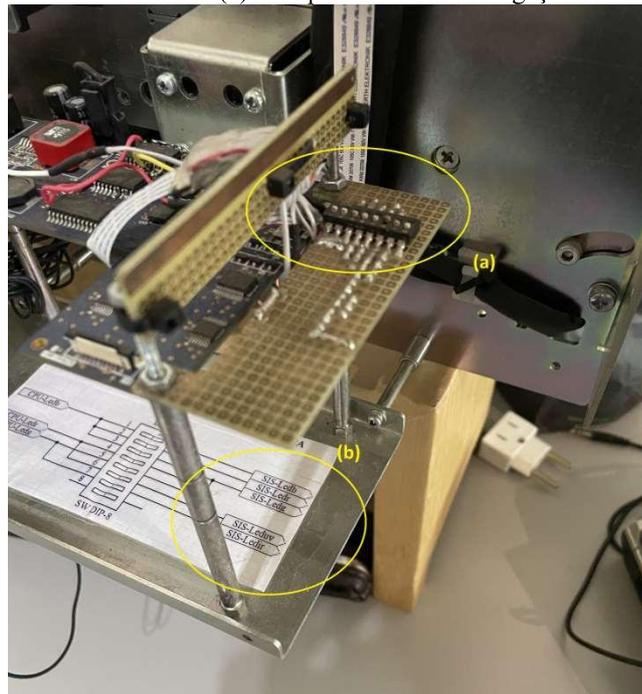
Figura 18 - Feixe de leds e sensores do Leitor de Cheques bancários adaptado, PentaSis Ltda.



Fonte: Acervo pessoal.

No próprio hardware do Leitor de Cheques, existe uma chave manual (Figura 19) com a qual se estabelece se o escaneamento será feito em infravermelho, ultravioleta ou preto e branco.

Figura 19 - Chave Manual (a) e Esquema elétrico de ligações da chave (b).



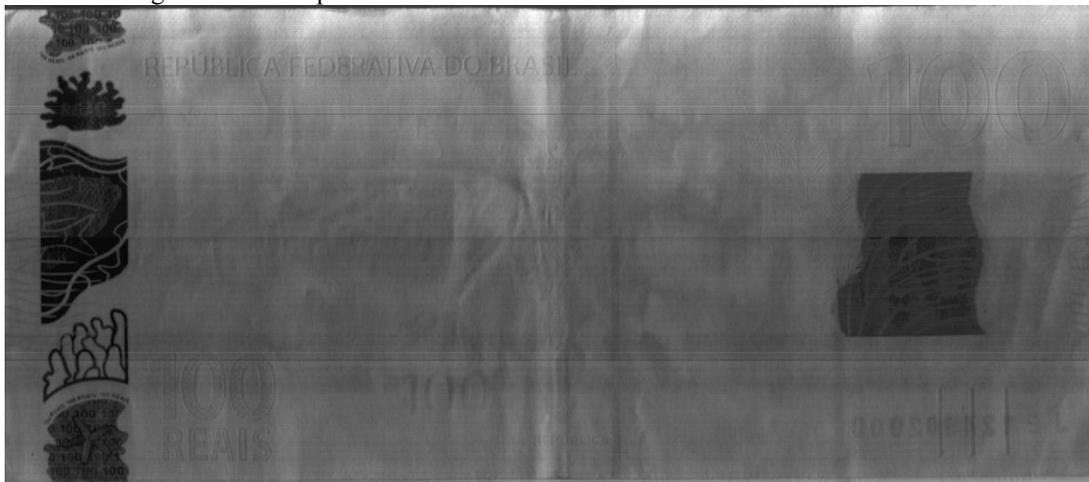
Fonte: Acervo pessoal.

Nessa etapa do trabalho, com o intuito de destacar os elementos de segurança citados no início desse capítulo, foram feitos os *scans* de 10 cédulas verdadeiras e 10 cédulas falsas para cada um dos valores de 100 Reais e 20 Reais. Ao final da etapa de escaneamento, foram coletadas todas as imagens obtidas e adicionadas a um Banco de Imagens.

Foram usados estes dois valores de cédulas para se poder estudar a “Faixa Holográfica” (presente somente em notas de 100 e 50) e o “Número que Muda de Cor” (presente somente em notas de 20 e 10).

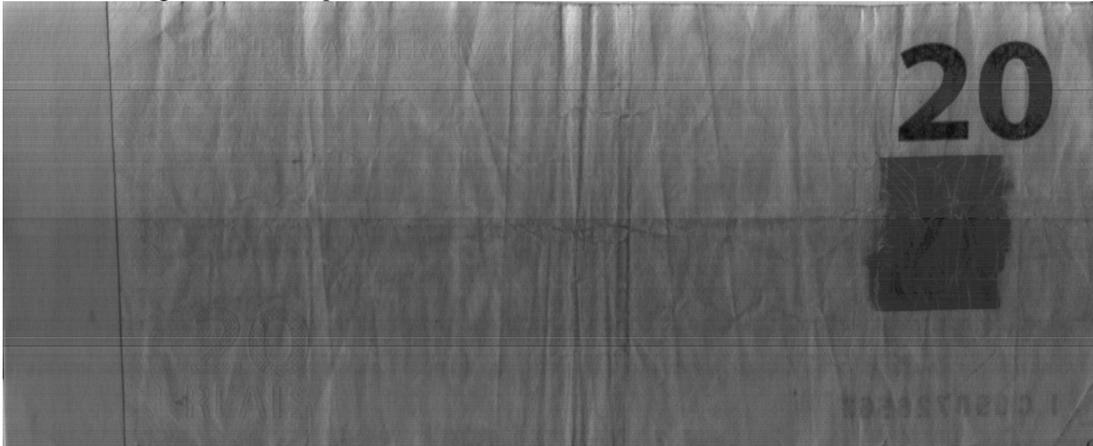
Em uma cédula verdadeira do papel-moeda do Real, foi constatado empiricamente, com o equipamento de escaneamento em Infra-vermelho (IR), que os elementos de segurança da “Faixa Holográfica” e “Número que Muda de Cor” são compostos por materiais e tintas que reagem à luz infravermelha, de maneira que, quando submetidos a um *scan* sob luz IR, a imagem obtida é de uma cédula em branco com somente os ditos elementos de segurança em destaque (Figuras 20 e 21).

Figura 20 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais escaneada sob luz IR.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 21 - Exemplar de cédula verdadeira de 20 Reais escaneada sob luz IR.

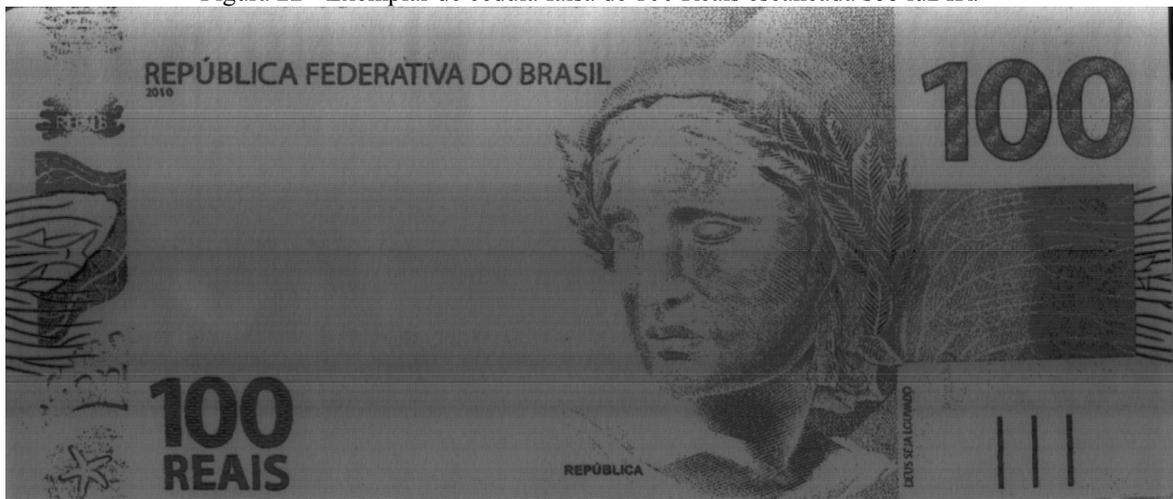


Fonte: Acervo pessoal.

Esse comportamento de imagem ocorreu em 100% das cédulas verdadeiras que foram submetidas a *scans* em IR. Vale mencionar que a porção da cédula correspondente ao elemento de segurança do Número Escondido também se destaca, porém sua análise será feita, posteriormente, por outro método mais apropriado.

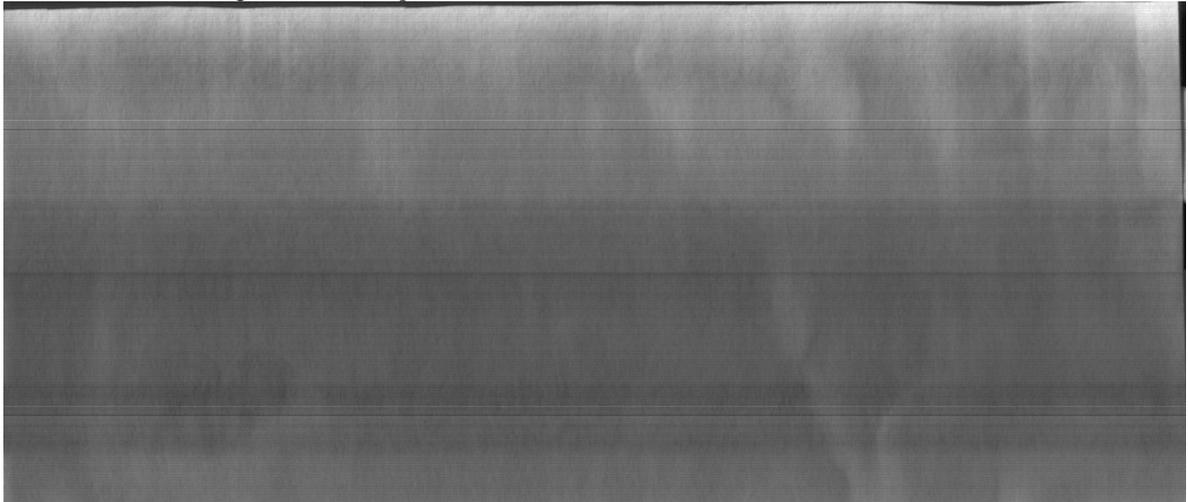
Paralelamente, como ilustrado nas Figuras 22 e 23, observou-se que, realizando os mesmos escaneamentos em cédulas falsas, não se verificava o mesmo padrão de comportamento de imagem que se averiguou nas amostras verdadeiras.

Figura 22 - Exemplar de cédula falsa de 100 Reais escaneada sob luz IR.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 23 - Exemplar de cédula falsa de 20 Reais escaneada sob luz IR.



Fonte: Acervo pessoal.

3.2.2 Ultra-Violeta (UV)

Paralelamente ao caso da “Faixa Holográfica” e “Número que Muda de Cor”, o Real brasileiro possui outro elemento de segurança denominado “Elementos Fluorescentes”. O papel-moeda original do Real possui em si impressões em tinta ultravioleta, não visíveis a olho-nu, que correspondem a fibras do papel-moeda dispersas por toda a cédula de forma aleatória e não padronizada, bem como a denominação do valor da respectiva cédula, em tinta UV, na porção média à esquerda da face da cédula, além da numeração serial da cédula na porção superior no verso. A impressão da denominação da cédula será a porção estudada nesse trabalho, visto que as fibras do papel-moeda não apresentam um padrão definido, e a numeração serial é única para cada cédula. Tanto a denominação do valor da cédula quanto as fibras em tinta UV estão presentes na Figura 24, e 100% das cédulas verdadeiras usadas apresentaram esse mesmo padrão de comportamento de imagem.

Figura 24 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais escaneada sob luz UV.



Fonte: Acervo pessoal.

Por outro lado, quando realizado o mesmo escaneamento sob luz UV nas cédulas falsas de 100 Reais, não foi observado o mesmo comportamento de padrão de imagem (Figura 25).

Figura 25 - Exemplar de cédula falsa de 100 Reais escaneada sob luz UV.



Fonte: Acervo pessoal.

Assim, foi utilizado novamente o Leitor de Cheques PentaSis adaptado para a realização dos *scans* em ultravioleta. Após o chaveamento manual do equipamento para realizar os *scans* em UV, foram escaneadas 10 cédulas verdadeiras e 10 cédulas falsas de 100 reais com o intuito de destacar o elemento de segurança dos “Elementos Fluorescentes”. Ao fim da etapa de escaneamento, foram coletadas todas as imagens obtidas e adicionadas ao Banco de Imagens.

3.2.3 Backlight

Para o estudo do elemento de segurança “Marca D’Água”, foi desenvolvido um sistema de *backlight* para a aquisição de imagens. A “Marca D’Água” é uma característica típica do papel-moeda do Real, isto é, ela é embutida durante a fabricação do papel, e não no processo de impressão de tinta na cédula. Desse modo, a “Marca D’Água” só é visível na cédula quando vista contra uma fonte de luz.

Sendo assim, procurou-se montar um ambiente controlado com as características necessárias para o destacamento da região de interesse da cédula e captura da imagem. Para isso, foram reunidos uma fonte de luz suspensa, quatro apoios de igual altura, uma placa de vidro, um aparelho celular com câmera fotográfica de 12 megapixel, uma amostra de 10 cédulas verdadeiras e uma amostra de 10 cédulas falsas, ambas as amostras de 100 reais. O ambiente foi montado de modo a suspender a placa de vidro sobre os quatro apoios de igual altura, e nessa placa seriam apoiadas as cédulas para aquisição de suas imagens via câmera fotográfica do aparelho celular. Sobre a placa foi colocada a fonte de luz, e sob a placa foi posta a câmera fotográfica (Figura 26).

Figura 26 - Ambiente desenvolvido pelo autor para captura de imagem com uso de *backlight*. O quadrado amarelo (a) demonstra a posição da câmera fotográfica de aparelho celular.



Fonte: Acervo pessoal.

Entre a cédula e a fonte de luz também foi adicionada uma folha de papel A4 branca sobre a cédula, para padronizar o *background* da imagem capturada (Figura 27).

Figura 27 - Exemplo de captura de imagem no ambiente de *backlight* desenvolvido pelo autor. Na imagem, um exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais.



Fonte: Acervo pessoal.

Esse ambiente de testes foi elaborado considerando o papel-moeda legítimo em que a cédula verdadeira do Real é produzida e, quando observada contra a luz, deixa em evidência a

imagem da “Marca D’Água” (no caso da nota de 100 Reais, a imagem da Garoupa). Se a cédula for falsa e, portanto, não impressa em papel-moeda legítimo, quando observada contra a luz, não se espera ver nenhuma Marca D’Água revelada. A diferença entre um exemplar de cédula verdadeira e falsa sob as mesmas condições de iluminação no ambiente de testes está ilustrada nas Figuras 28 e 29, evidenciando a presença da Marca D’Água, enquanto na cédula falsa não há presença alguma de Marca D’Água (Figura 29).

Figura 28 - Exemplar de cédula falsa de 100 Reais sob iluminação *backlight*.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 29 - Exemplar de cédula falsa de 100 Reais sob iluminação *backlight*.



Fonte: Acervo pessoal.

Sob estas condições e procurando manter um padrão de posicionamento, foram capturadas as fotografias das 20 cédulas de 100 Reais (10 verdadeiras e 10 falsas) e adicionadas ao banco de imagens.

3.2.4 Fotografia e Zoom

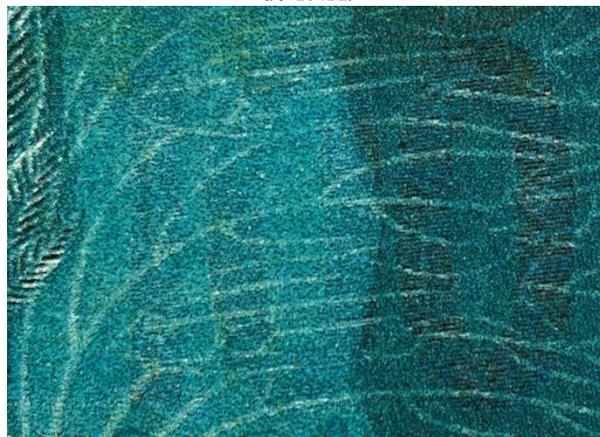
O último elemento de segurança a ser analisado foi o “Número Escondido”. Para analisá-lo é fundamental que se possa enxergar claramente as fibras do papel, típicas do material que compõe o papel-moeda, visto que é a combinação de fibras verticais com fibras horizontais em determinada disposição que causa o efeito óptico que permite identificar o elemento. Uma cédula falsificada não seria feita em papel-moeda legítimo, portanto, não se espera encontrar tais fibras em uma falsificação. Pode-se observar a diferença entre as capturas de imagem de uma cédula verdadeira e falsa, respectivamente, nas Figuras 30 e 31. Para tanto, fez-se uso de uma máquina fotográfica de telefone celular, com resolução de 12 megapixels, e 1.4x de intensidade de Zoom digital para realizar a captura das imagens da porção da cédula onde se encontra a região de interesse do “Número Escondido”.

Figura 30 - Região de Interesse do “Número Escondido” em uma cédula verdadeira de 100 Reais, fotografia sob zoom de 1.4X.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 31 - Região de Interesse do “Número Escondido” em uma cédula falsa de 100 Reais, fotografia sob zoom de 1.4X.



Fonte: Acervo pessoal.

Nesse processo, foi mantido o padrão de execução na captura das imagens, com a câmera levemente suspensa e fixa e posicionando, a cada captura, cada uma das cédulas sob ela, na mesma posição e sob mesma intensidade de Zoom.

Foram capturadas 20 imagens (10 cédulas verdadeiras e 10 cédulas falsas de 100 Reais) da região de interesse do Número Escondidas e adicionadas ao Banco de Imagens.

3.3 Pré-Processamento das Imagens

3.3.1 Primeira Cropagem (Cropagem 1)

Mesmo mantendo uma padronização nos métodos de captura das imagens do Banco de Imagens, é comum que ocorram algumas imperfeições nesta padronização, seja na angulação da imagem, presença de *background* ou qualquer outra informação que não seja correspondente à imagem da cédula somente, ou à região de interesse.

Assim, nesta etapa preocupou-se em recortar (*crop*) e ajustar manualmente cada uma das cem imagens do Banco de Imagens, a fim de manter somente as regiões de interesse para estudo, esta etapa foi chamada de Cropagem 1.

Para as imagens do banco correspondentes aos elementos de segurança “Faixa Holográfica”, “Número que Muda de Cor”, “Elementos Fluorescentes” e “Marca D’Água”, foram recortadas as imagens de modo a preservar somente a cédula, inteira e completa, conforme Figuras 32 e 33, que demonstram o antes e depois da etapa “Cropagem I”, respectivamente.

Figura 32 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pré Cropagem 1 para “Marca D’Água”, sob captura com *backlight*.



Fonte: Acervo pessoal.

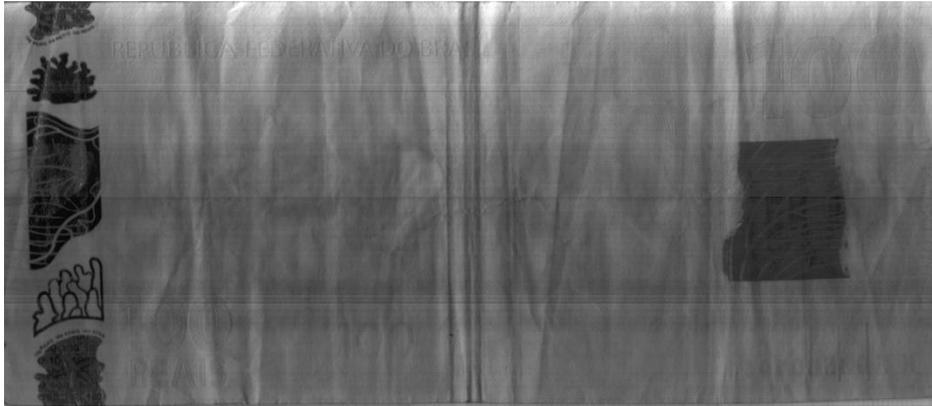
Figura 33 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 para “Marca D’Água”, sob captura com *backlight*.



Fonte: Acervo pessoal.

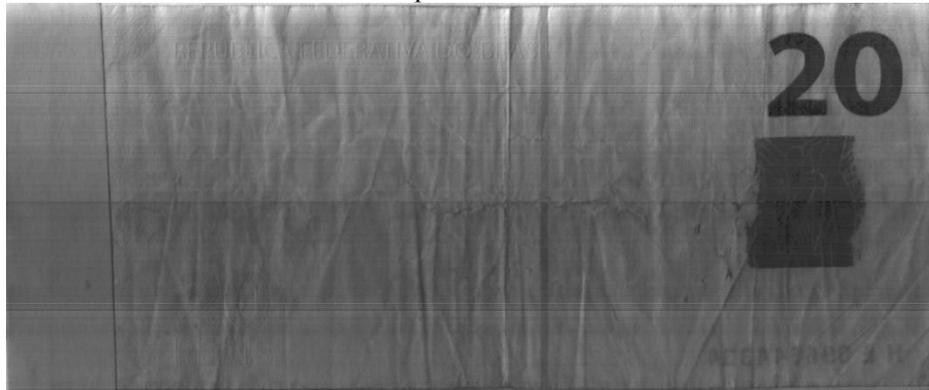
Nas Figuras 34, 35 e 36 são exibidos exemplares de cédulas verdadeiras pós Cropagem 1 para os elementos de segurança “Faixa Holográfica”, “Número que Muda de Cor” e “Elementos Fluorescentes”, respectivamente.

Figura 34 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 para “Faixa Holográfica”, sob captura em IR.



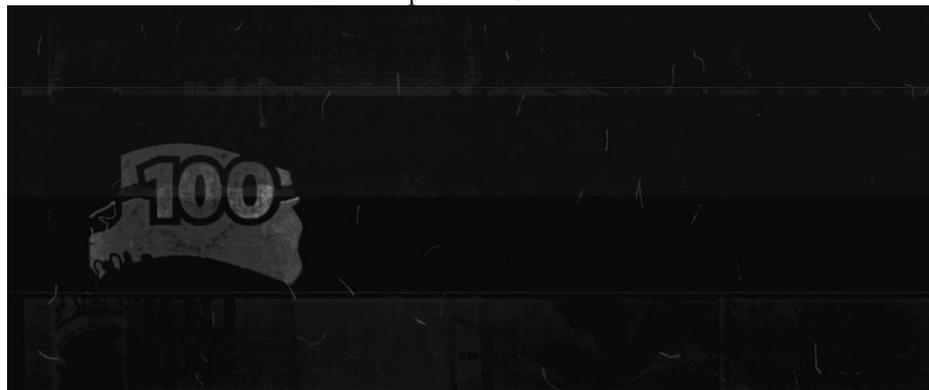
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 35 - Exemplar de cédula verdadeira de 20 Reais pós Cropagem 1 para “Número que Muda de Cor”, sob captura em IR.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 36 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 para “Elementos Fluorescentes”, sob captura em UV.



Fonte: Acervo pessoal.

Já no caso das imagens onde se buscou evidenciar o “Número Escondido”, preocupou-se em recortar somente a porção da cédula que contivesse a região de interesse correspondente a esse elemento de segurança, conforme demonstra a Figura 37.

Figura 37 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 para “Número Escondido”.



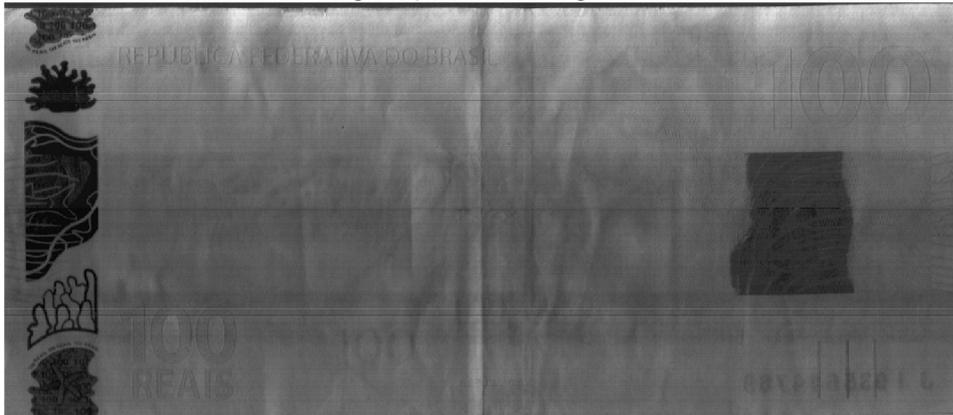
Fonte: Acervo pessoal.

3.3.2 Conversão para *Gray Scale*

Inicialmente, algumas capturas de imagens são coloridas, isto é, a imagem possui três camadas de pixels (RGB). Para que se possa analisar as imagens, realizar operações matemáticas e aplicar funções e ferramentas de processamento de imagem, é necessário que se faça uma conversão das imagens de colorida para escalas-de-cinza (*grayscale* ou GS).

Dessa forma, através do emprego de funções próprias do MATLAB, as coordenadas de pixel compostas por três dados (R,G,B) são convertidas para um único valor equivalente, que varia entre 0 e 255, transformando a imagem em uma equivalente de uma só camada. Nesse trabalho foi utilizada a função da Equação 1, citada na seção 1.4.2. A partir desse estágio, todas as imagens do Banco de Imagens estarão cropadas, convertidas para *grayscale* e aptas a serem analisadas, comparadas e submetidas a funções e ferramentas de processamento de imagem. As Figuras 38, 39, 40, 41 e 42 exemplificam cada um dos 5 elementos de segurança no estágio pós primeira cropagem e conversão para Gray Scale (GS), para exemplares de cédulas verdadeiras.

Figura 38 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 e Conversão para GS, para elemento de segurança “Faixa Holográfica”.



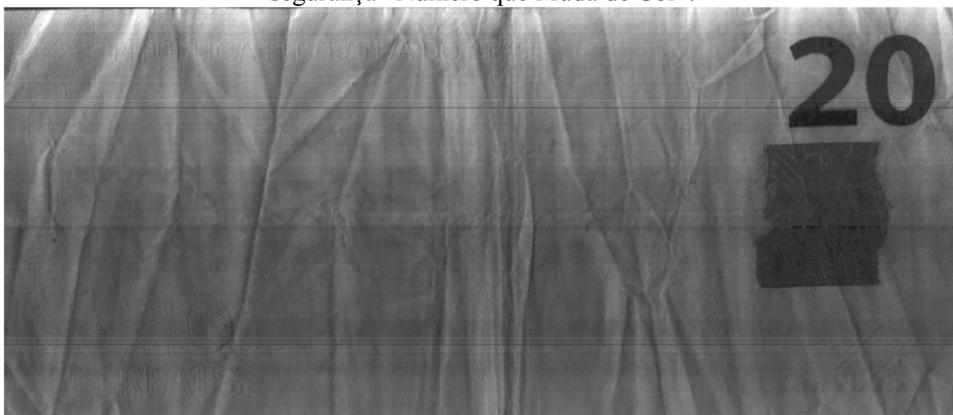
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 39 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 e Conversão para GS, para elemento de segurança “Marca D’Água”.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 40 - Exemplar de cédula verdadeira de 20 Reais pós Cropagem 1 e Conversão para GS, para elemento de segurança “Número que Muda de Cor”.



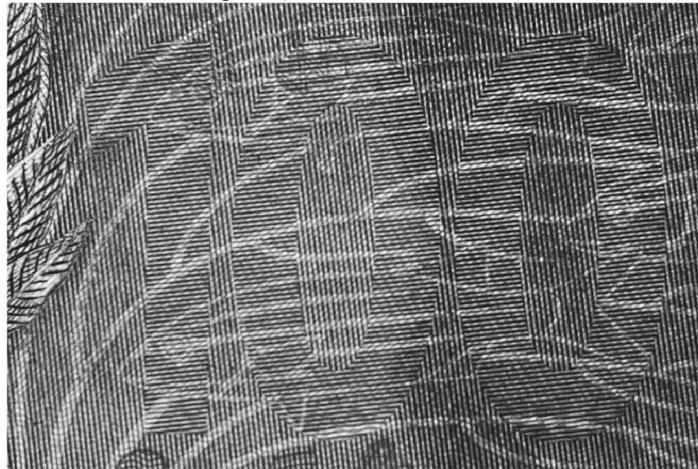
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 41 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 e Conversão para GS, para elemento de segurança “Elementos Fluorescentes”.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 42 - Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais pós Cropagem 1 e Conversão para GS, para elemento de segurança “Número Escondido”.



Fonte: Acervo pessoal.

3.4 Técnicas de Processamento das Imagens

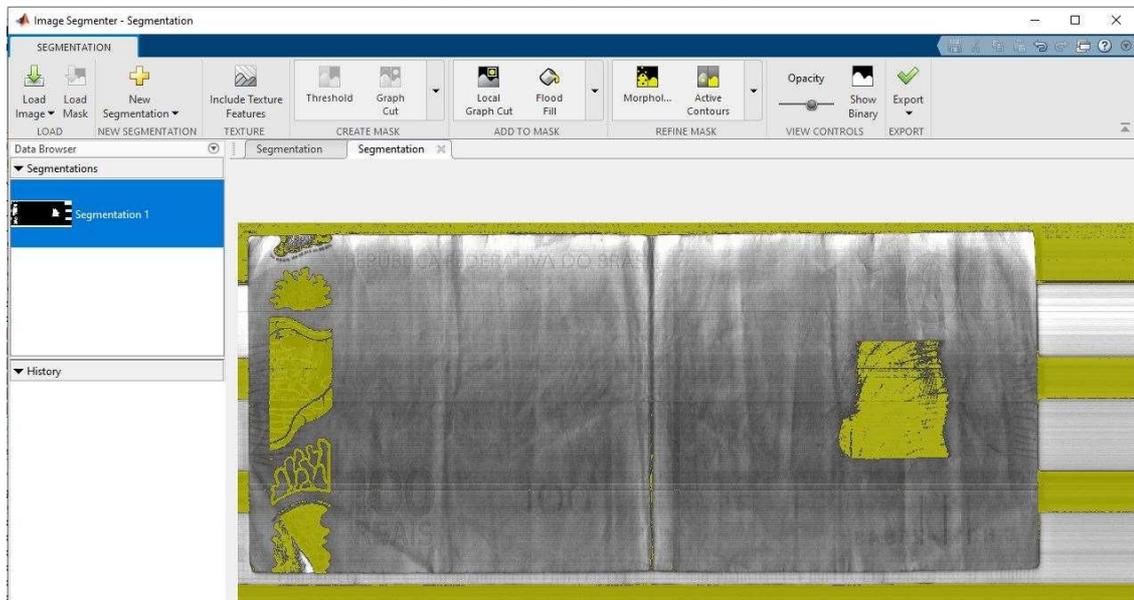
3.4.1 Aplicativo de Segmentação de Imagem MATLAB

Após todas as imagens serem tratadas, passando pela primeira cropagem e conversão para escalas de cinza, elas estão aptas para serem submetidas às etapas de processamento de imagem. O intuito dessa etapa é utilizar o aplicativo próprio do MATLAB, de Segmentação de Imagem, para, com suas ferramentas, destacar as regiões de interesse dos elementos de segurança do restante da cédula.

A finalidade é que em cédulas verdadeiras os elementos de segurança fiquem ainda mais em evidência, e nas cédulas falsas sigam não sendo detectados.

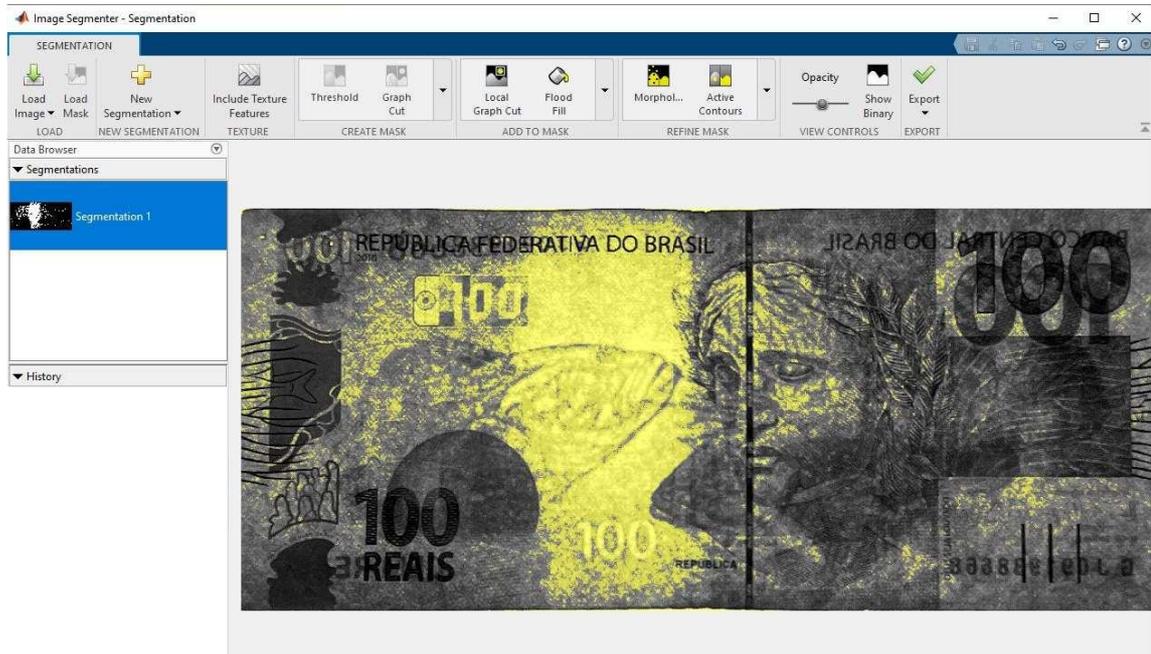
Assim, para cada elemento de segurança (com exceção do “Número Escondido”) submeteu-se inicialmente uma cédula verdadeira correspondente ao elemento em análise e, manualmente, ajustou-se os parâmetros das ferramentas de *Threshold*, *Morphology*, *Local GraphCut*, e *InvertMask*, responsáveis por destacar as regiões de interesse, limiarizar, recortar e extrair as características sob estudo neste trabalho. Assim criou-se uma rotina de segmentação de imagem de modo que, ao final dela, a região de interesse esteja destacada. Nas Figuras 43, 44, 45 e 46 estão exibidas as etapas de ajuste manual no aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para os 4 elementos de segurança citados, em exemplares de cédulas verdadeiras.

Figura 43 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para “Faixa Holográfica”. Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais.



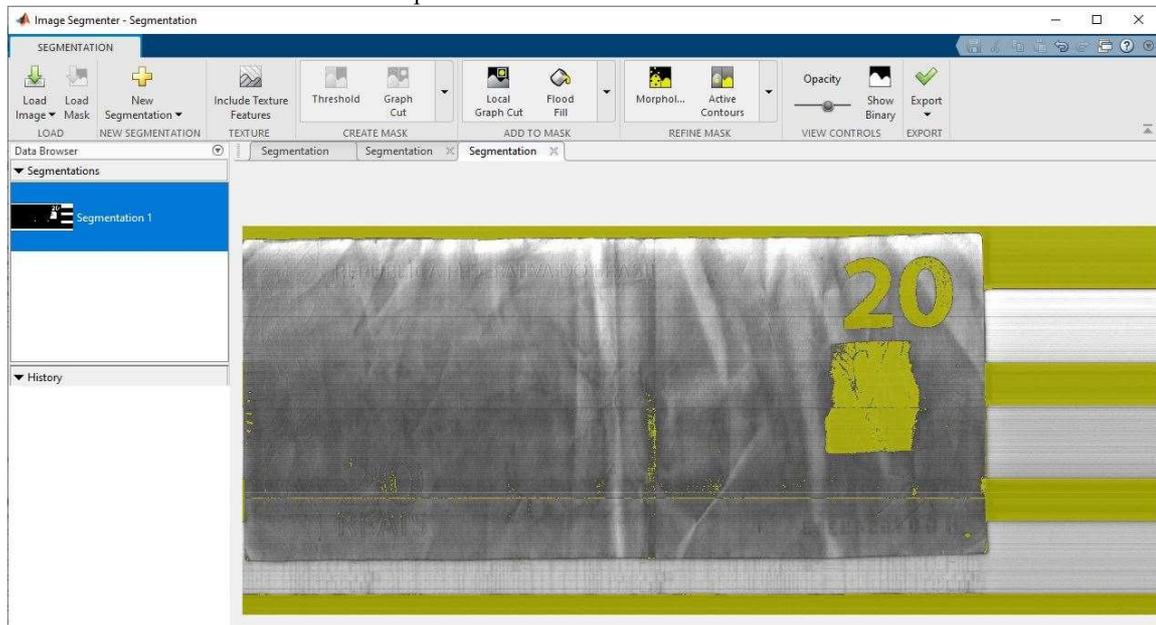
Fonte: Elaboração própria.

Figura 44 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para “Marca D’Água”. Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais.



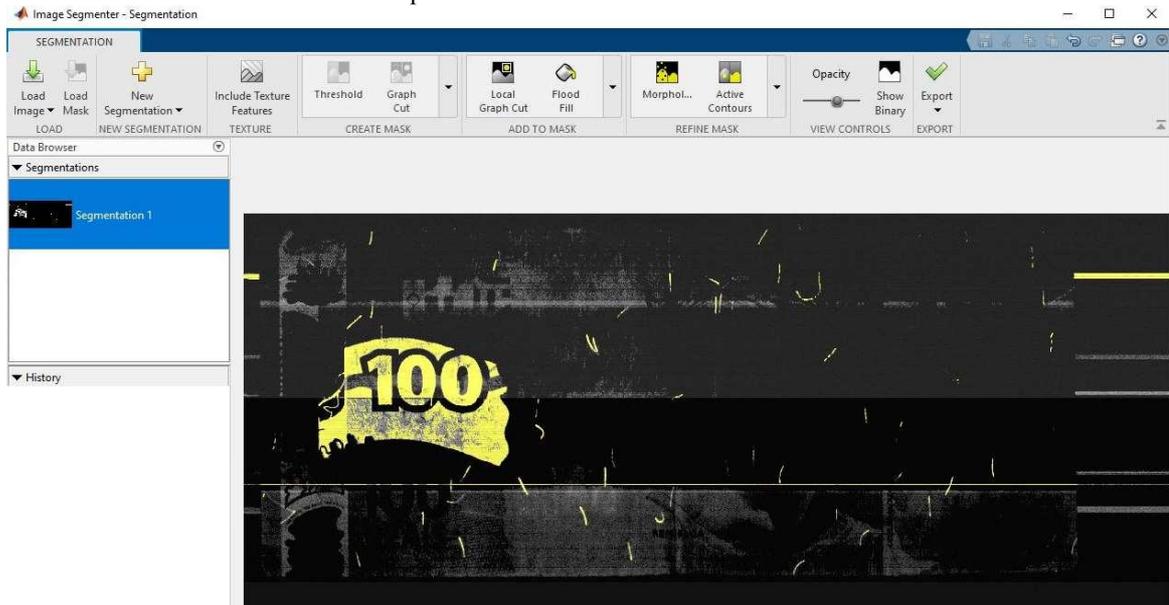
Fonte: Elaboração própria.

Figura 45 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para “Número que Muda de Cor”. Exemplar de cédula verdadeira de 20 Reais.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 46 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para “Elementos Fluorescentes”.
Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais.



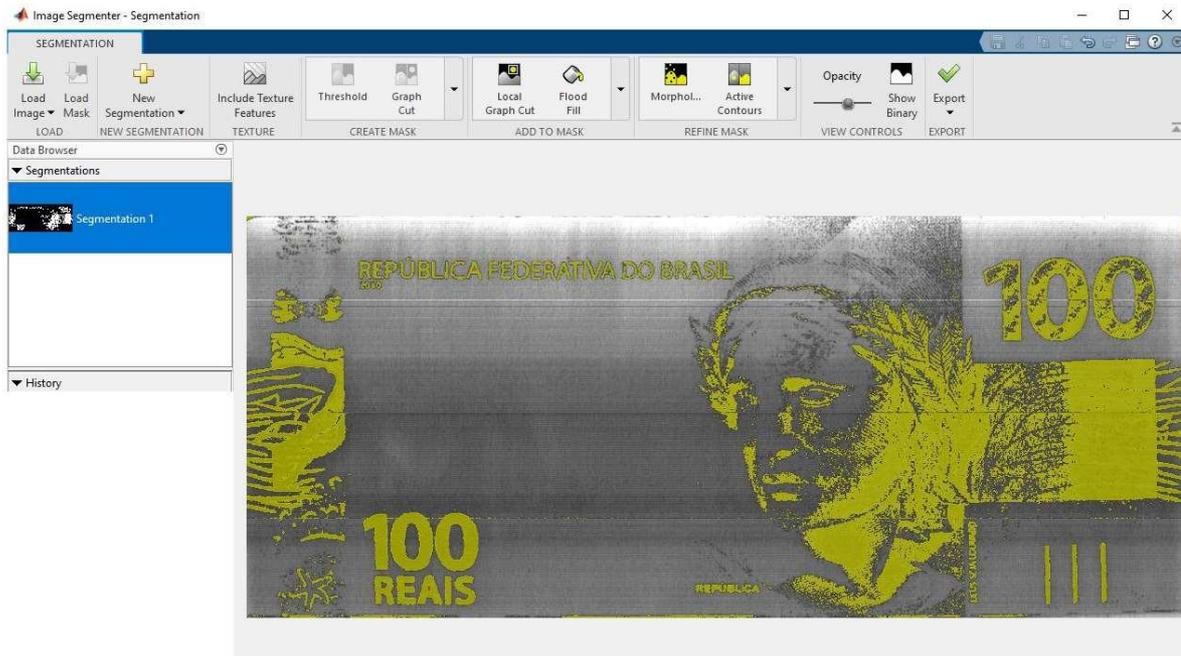
Fonte: Elaboração própria.

Na segmentação de imagem gerada para os elementos “Faixa Holográfica” e “Número que Muda de Cor”, também ficou em destaque a porção da cédula que contém o “Número Escondido” nas cédulas verdadeiras. Entretanto, como posteriormente serão cropadas somente as regiões de interesse para análise matemática da imagem, foi ignorada essa porção, uma vez que não houve interferência na análise dos dois primeiros elementos citados, e o “Número Escondido” foi analisado posteriormente através de outra metodologia.

A partir do momento em que essa rotina de segmentação de imagem foi criada manualmente uma primeira vez, o próprio aplicativo de segmentação de imagem do MATLAB permite que seja gerada uma função para repetir a rotina sempre que necessário, podendo aplicá-la às demais imagens do Banco de Imagens para determinado elemento de segurança. Dessa maneira, ao fim desta etapa, haverá quatro funções diferentes de segmentação de imagem, uma para cada elemento de segurança, e cada uma delas destacando a sua respectiva região de interesse.

Para as imagens correspondentes à análise de “Faixa Holográfica”, no caso das cédulas verdadeiras, após submetidas à rotina de segmentação de imagem, a “Faixa Holográfica” era destacada com nitidez e precisão, enquanto nas cédulas falsas não se verificou a mesma nitidez (Figura 47).

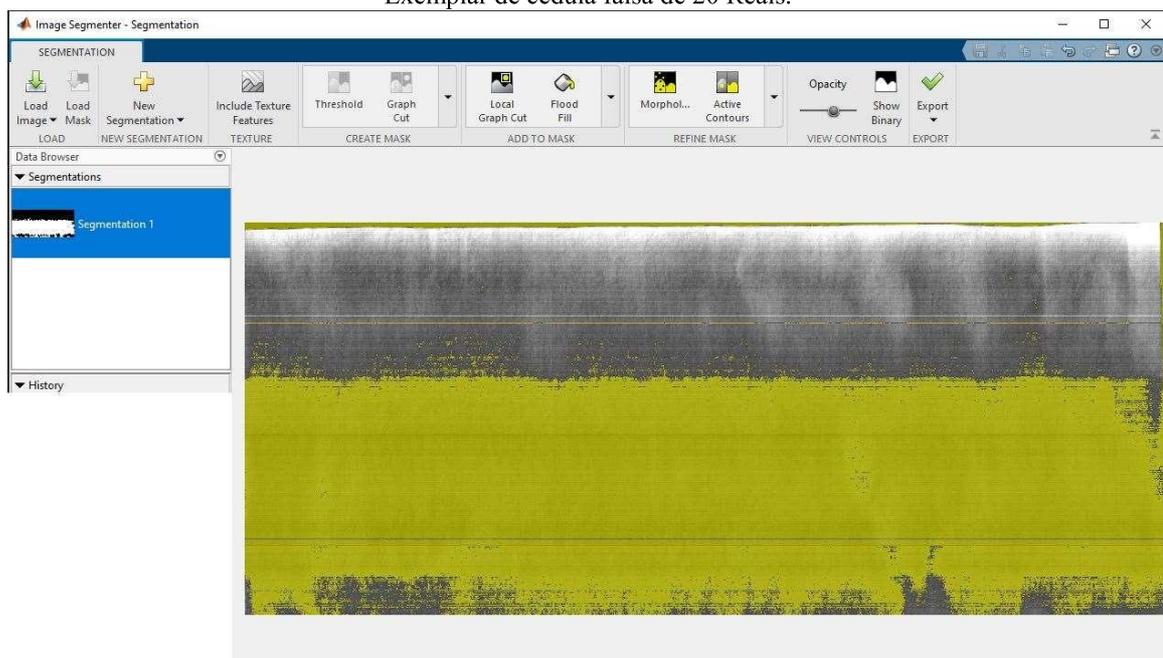
Figura 47 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para “Faixa Holográfica”. Exemplar de cédula falsa de 100 Reais.



Fonte: Elaboração própria.

Para as imagens correspondentes à análise do “Número que Muda de Cor”, no caso das cédulas verdadeiras, após submetidas à rotina de segmentação de imagem, “O Número que Muda de Cor” era claramente destacado com nitidez e precisão, enquanto nas cédulas falsas não se verificou nenhuma evidência do número (Figura 48).

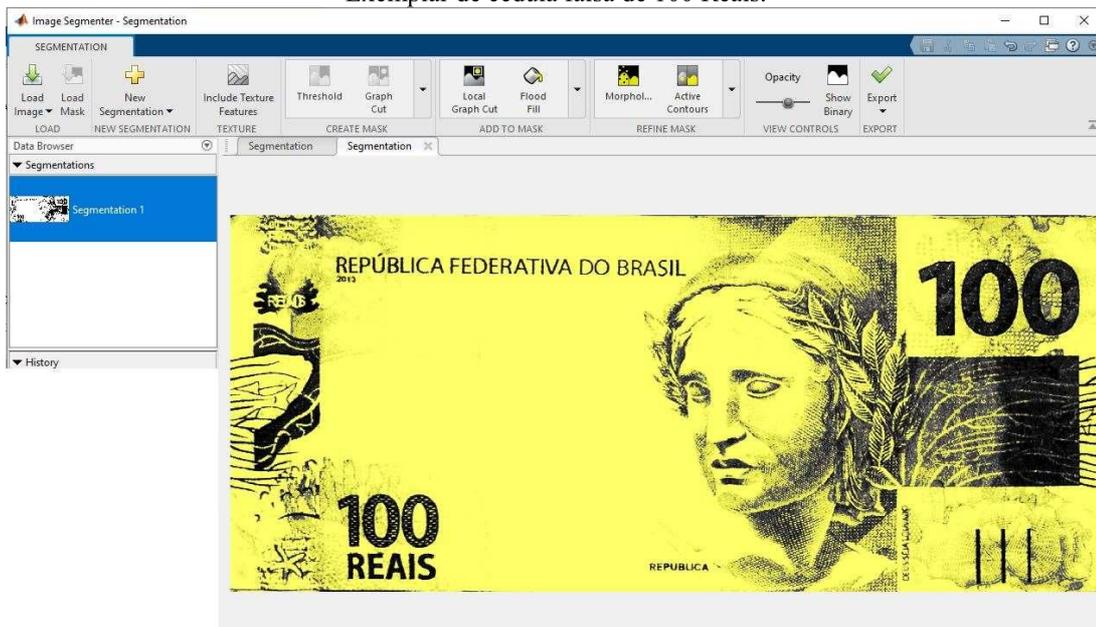
Figura 48 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para “Número que Muda de Cor”. Exemplar de cédula falsa de 20 Reais.



Fonte: Elaboração própria.

Para as imagens correspondentes à análise dos “Elementos Fluorescentes”, no caso das cédulas verdadeiras, após submetidas à rotina de segmentação de imagem, a denominação oculta do valor da cédula em tinta UV era claramente destacado com nitidez e precisão, enquanto nas cédulas falsas não houve revelação alguma da denominação oculta (Figura 49), mostrando um padrão totalmente não condizente com o legítimo.

Figura 49 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para “Elementos Fluorescentes”.
Exemplar de cédula falsa de 100 Reais.



Fonte: Elaboração própria.

Para as imagens correspondentes à análise da “Marca D’Água”, no caso das cédulas verdadeiras, após submetidas à rotina de segmentação de imagem, a “Marca D’Água” era claramente revelada e destacada com nitidez e precisão, enquanto nas cédulas falsas, por não serem feitas em papel-moeda e não possuírem Marca D’Água, não se revelou ou destacou nenhuma imagem nítida correspondente ao padrão legítimo (Figura 50).

Figura 50 - Ajuste em Aplicativo de Segmentação de Imagem do MATLAB para “Marca D’Água”. Exemplar de cédula falsa de 100 Reais.



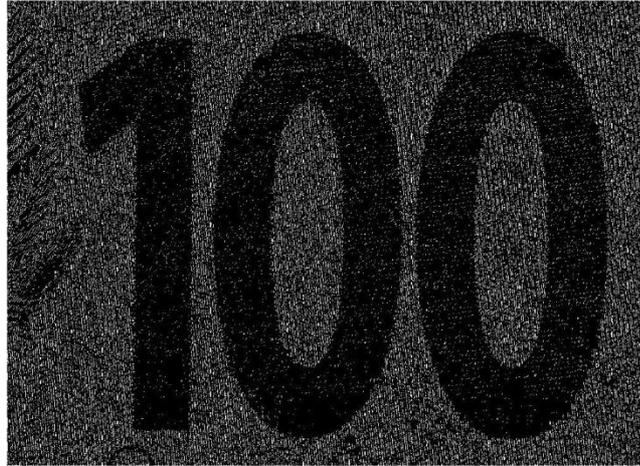
Fonte: Elaboração própria.

3.4.2 Funções de Detecção de Borda

Paralelamente ao aplicativo de segmentação de imagem do MATLAB, essa etapa tem como objetivo destacar o elemento de segurança “Número Escondido”, o qual não foi eficaz no aplicativo de Segmentação de Imagem.

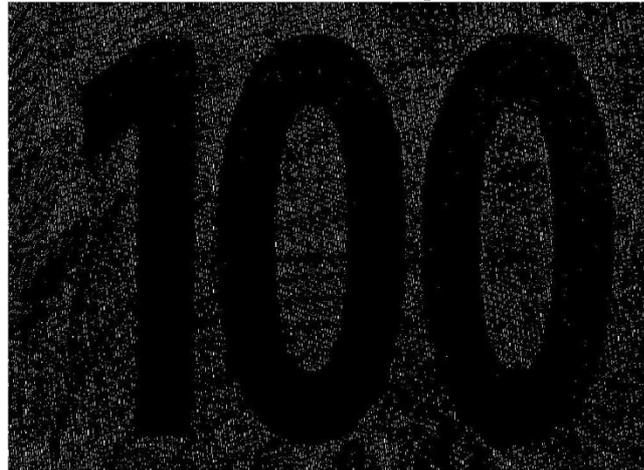
Esse elemento de segurança é um efeito óptico produto de uma combinação das fibras, verticais e horizontais, do papel-moeda do Real. Dessa forma, após uma captura nítida de imagem garantindo a plena identificação das fibras, submeteu-se as imagens do Banco de Imagens a duas funções de detecção de borda do MATLAB, a detecção de borda por método Sobel e por método Prewitt. Além disso, foram ajustados os parâmetros de detecção de borda vertical, horizontal e ajustado o limiar na função. As imagens obtidas por método Sobel e Prewitt para cédulas verdadeiras estão demonstradas nas Figuras 51 e 52.

Figura 51 – “Número Escondido” sob método Sobel para cédula verdadeira de 100 Reais.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 52 – “Número Escondido” sob método Prewitt para cédula verdadeira de 100 Reais.



Fonte: Acervo pessoal.

Após verificadas todas estas variações, foi eleita a configuração de método Sobel, com parâmetro de detecção de linhas verticais e limiar de 0.05.

Quando aplicada a configuração de detecção de borda às cédulas verdadeiras, pôde-se identificar entre as linhas verticais a formação do elemento “Número Escondido”. As cédulas falsas, por não possuírem fibras no material do papel, não apresentaram nenhum padrão identificável (Figura 53).

Figura 53 – “Número Escondido” sob método Sobel para cédula falsa de 100 Reais.



Fonte: Acervo pessoal.

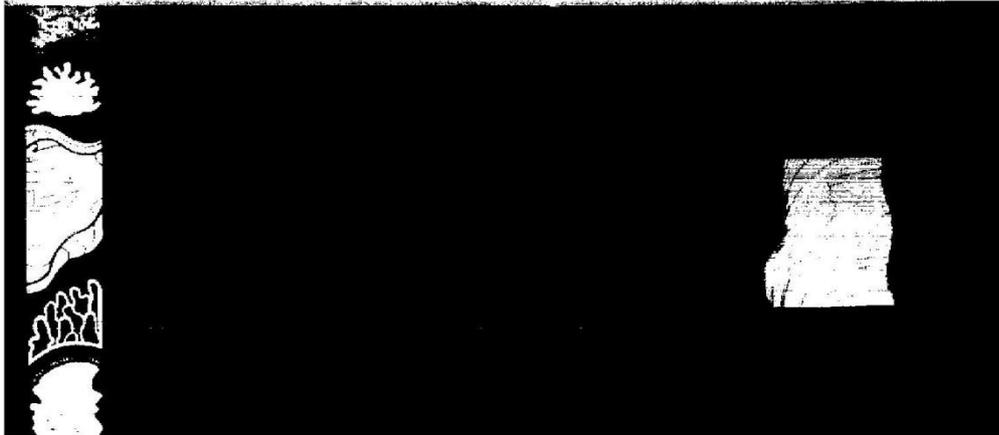
3.5 Extração de Características

3.5.1 Seleção da Máscara segmentada

Uma vez submetidas as imagens ao aplicativo de segmentação, obtém-se ao final a chamada Máscara da Imagem Segmentada, que corresponde a todos os pixels da imagem original que foram preservados após os processos de *Threshold*, *Morphology*, *Local GraphCut*, e *InvertMask*, englobados na segmentação da imagem. Os demais pixels são ignorados e transformados em 0 (preto), enquanto os que foram preservados podem ser mantidos nos seus respectivos valores de escala de cinza, ou ser todos convertidos para 1 (branco), configurando assim uma Máscara Binarizada.

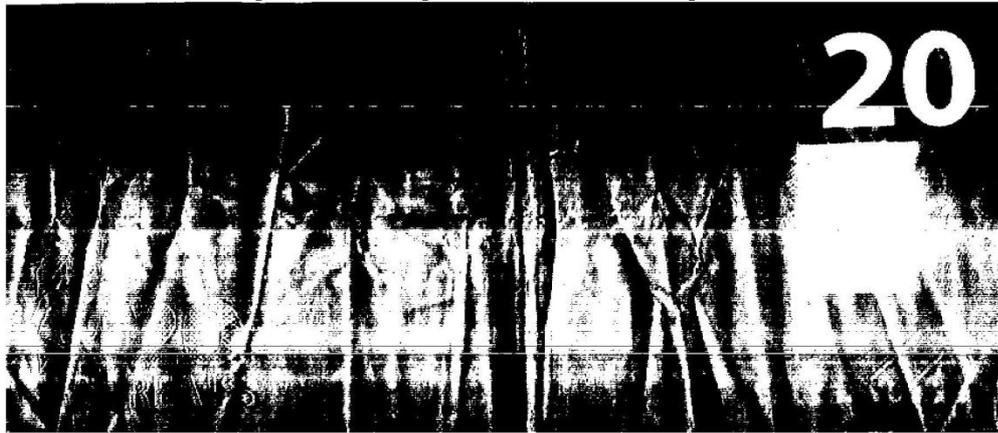
Foram testados ambos os tipos de Máscara e, de acordo com a qualidade na resposta do resultados, foi escolhida a Máscara Binarizada para os elementos de segurança “Faixa Holográfica” (Figura 54) e “Número que Muda de Cor” (Figura 55), e a Máscara Não Binarizada para “Marca D’Água” (Figura 56) e “Elementos Fluorescentes” (Figura 57).

Figura 54 - Máscara Binarizada para “Faixa Holográfica”. Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 55 - Máscara Binarizada para “Número que Muda de Cor”. Exemplar de cédula verdadeira de 20 Reais.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 56 – Máscara Não Binarizada para “Marca D’Água”. Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 57 - Máscara Não Binarizada para “Elementos Fluorescentes”. Exemplar de cédula verdadeira de 100 Reais.



Fonte: Acervo pessoal.

3.5.2 Seleção da Técnica de Detecção de Borda

Paralelamente, o elemento “Número Escondido” não fez uso do aplicativo de segmentação de imagem MATLAB, mas sim das funções de detecção de borda pelos métodos Sobel e Prewitt, conforme Figuras 51 e 52.

Da mesma forma que para os demais elementos de segurança, após análise dos experimentos feitos nessa etapa, com ambos os métodos, escolheu-se prosseguir com a técnica de *Sobel Edge Detection*, com parâmetro de detecção de linhas verticais e limiar de 0.05.

3.6 Segunda Cropagem (Cropagem 2)

Nessa etapa já foram feitos todos os processos de segmentação de imagem e as imagens das cédulas verdadeiras e falsas já foram separadas. Contudo, com o objetivo de diminuir o esforço computacional e focar as análises de imagem somente na porção de cédula que contém o elemento de segurança sob avaliação, é realizada, nesse momento, uma segunda cropagem, buscando selecionar e recortar somente a região de interesse correspondente à análise do elemento de segurança.

Para tanto, é estabelecida uma coordenada inicial (x,y) na cédula e um intervalo de extensão do recorte para x na horizontal e y na vertical.

Com isso, serão obtidos, ao final, recortes de iguais tamanhos para todas as regiões de interesse do Banco de Imagens do determinado elemento de segurança, permitindo uma

padronização do Banco de Imagens e da operação entre imagens, uma vez que são feitas pixel a pixel.

O objetivo dessa etapa é padronizar o tamanho dos recortes, sem pretensão de cropar a mesma exata porção de todas as cédulas, uma vez que esse grau de precisão a nível de pixel é virtualmente impraticável. Para isso, existe uma atenção especial ao processo de Primeira Cropagem, que é feita manualmente e individualmente para cada imagem de cédula e, uma vez realizado com a minúcia de cercar toda a cédula, e somente a cédula, e usando o mesmo padrão de execução, permite que as regiões de interesse ao final da Segunda Cropagem sejam porções o mais correspondentes possível em todas as imagens de cédulas, o que será mensurado matematicamente nas próximas seções.

3.7 Análise matemática de imagens

3.7.1 Método 1: Subtração de Imagens e Soma Total de Pixels das Resultantes

Essa etapa, com todas as imagens do Banco de Imagens em tamanhos padronizados e já submetidas aos processos de Pré-Processamento e Processamento de Imagem, será responsável pela comparação entre as imagens, a fim de separar as legítimas das falsificadas. Vale mencionar que um operador humano seria capaz de discernir uma imagem falsa de uma legítima, visto que isso fica evidente após os processos supracitados. Contudo, o propósito do estudo é fazê-lo de maneira automatizada, encontrando parâmetros matemáticos que demonstrem a disparidade entre cédulas verdadeiras e falsas.

A escolha dos parâmetros corretos é fundamental, visto que um parâmetro ruim não separa os dois grupos, por mais distintos que sejam.

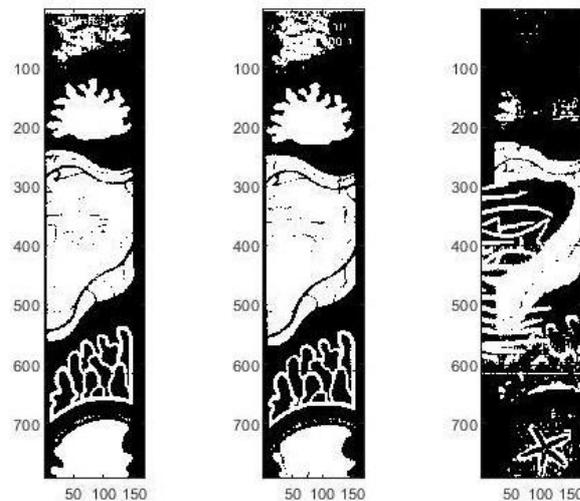
Dessa maneira, o método tem o intuito de avaliar a variação da semelhança de notas verdadeiras entre si, e a variação da semelhança entre notas falsas e verdadeiras.

Para tanto, juntamente aos grupos já existentes de 10 amostras de cédulas verdadeiras e 10 cédulas falsas, será usada mais uma cédula verdadeira que será chamada de cédula “Referência”, que será submetida também a todas as etapas de pré-processamento e processamento de imagem de acordo com o elemento de segurança em avaliação. Ao final do processo, existirão 10 máscaras verdadeiras, 10 máscaras falsas e 1 máscara da Referência, tão verdadeira quanto às outras 10 verdadeiras do Banco de Imagens, contendo a região de interesse do elemento de segurança em avaliação.

Será então realizada uma operação de subtração de imagens, utilizando a função *imsubtract* do MATLAB, através da qual se realiza, pixel a pixel, entre as imagens minuendo e subtraendo, uma subtração de valores de intensidade de pixels. Como resultado dessa operação, será obtida uma imagem resultante da diferença das máscaras que será chamada de Máscara Resultante. A operação será repetida entre a Referência e as 10 cédulas verdadeiras, uma a uma, e entre a Referência e as 10 cédulas falsas, uma a uma, obtendo, assim, 10 máscaras resultantes que caracterizam uma variação da semelhança entre as imagens de cédulas verdadeiras, e 10 máscaras resultantes que caracterizam a variação de semelhança entre cédulas falsas e verdadeiras.

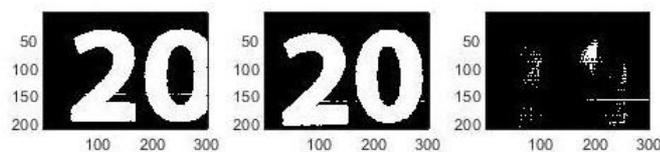
Nas Figuras 58, 59, 60, 61 e 62 estão ilustradas, para cada elemento de segurança, um exemplo dos componentes da subtração descrita acima. Nelas, estão exibidas a máscara da Referência (que será sempre minuendo), a máscara da amostra número 1 de cédula verdadeira (subtraendo para a Referência), e a máscara da amostra número 1 de cédula falsa (subtraendo para a Referência).

Figura 58 - Máscaras da Referência, Cédula Verdadeira 1 e Cédula Falsa 1, para “Faixa Holográfica”.



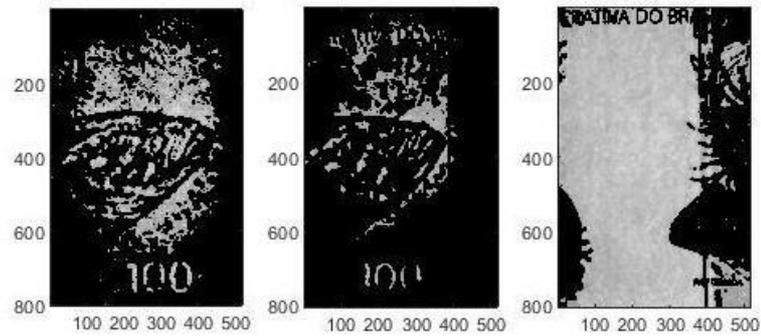
Fonte: Elaboração própria.

Figura 59 - Máscaras da Referência, Cédula Verdadeira 1 e Cédula Falsa 1, para “Número que Muda de Cor”.



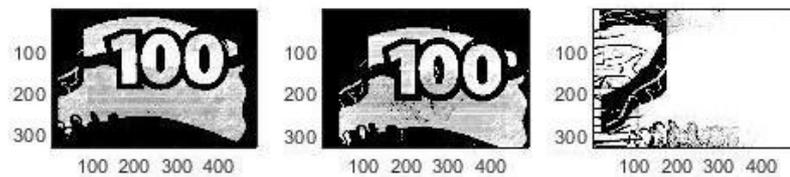
Fonte: Elaboração própria.

Figura 60 - Máscaras da Referência, Cédula Verdadeira 1 e Cédula Falsa 1, para “Marca D’Água”.



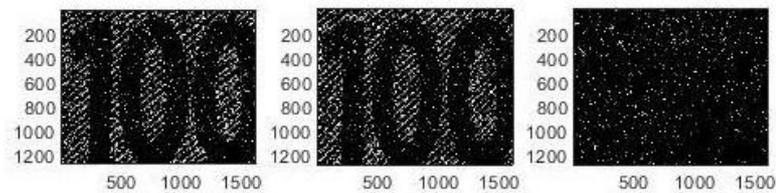
Fonte: Elaboração própria.

Figura 61 - Máscaras da Referência, Cédula Verdadeira 1 e Cédula Falsa 1, para “Elementos Fluorescentes”.



Fonte: Elaboração própria.

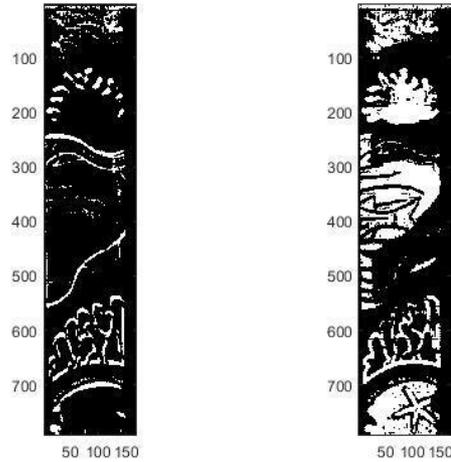
Figura 62 - Máscaras da Referência, Cédula Verdadeira 1 e Cédula Falsa 1, para “Número Escondido”.



Fonte: Elaboração própria.

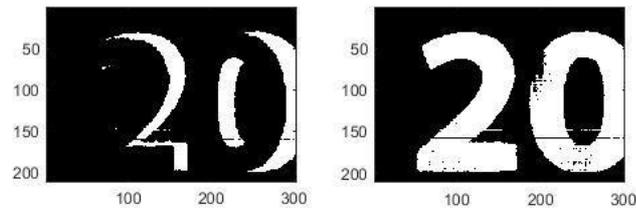
Nas Figuras 63, 64, 65, 66 e 67 estão ilustradas as máscaras resultantes das subtrações das máscaras “Referência - Cédula Verdadeira número 1” e “Referência - Cédula Falsa número 1”, para cada um dos elementos de segurança. Essa operação foi repetida para cada uma das 10 amostras de cédulas verdadeiras e 10 cédulas falsas.

Figura 63 - Máscara resultante (Referência - amostra Verdadeira número 1) e Máscara resultante (Referência - amostra Falsa número 1), para Faixa Holográfica.



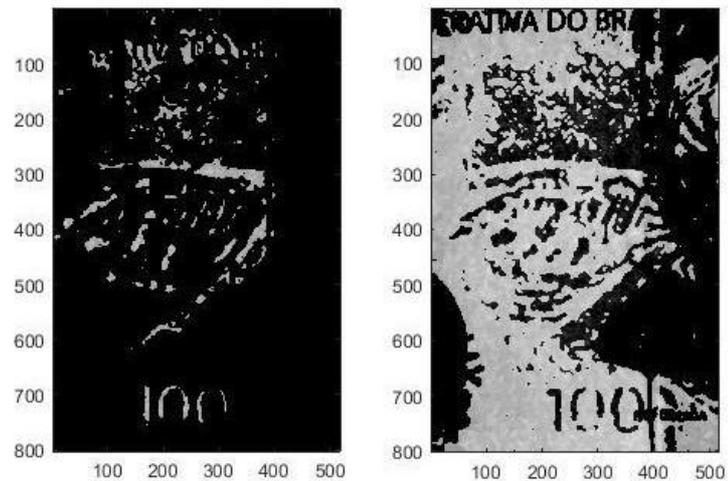
Fonte: Elaboração própria.

Figura 64 - Máscara resultante (Referência - amostra Verdadeira número 1) e Máscara resultante (Referência - amostra Falsa número 1), para Número que Muda de Cor.



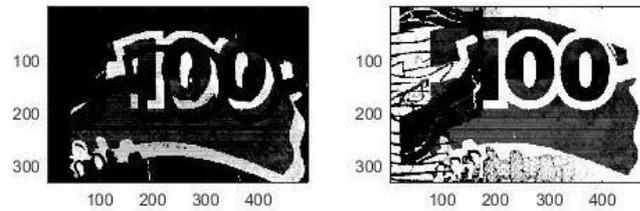
Fonte: Elaboração própria.

Figura 65 - Máscara resultante (Referência - amostra Verdadeira número 1) e Máscara resultante (Referência - amostra Falsa número 1), para Marca D'Água.



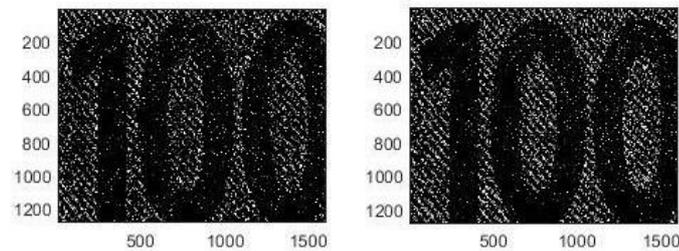
Fonte: Elaboração própria.

Figura 66 - Máscara resultante (Referência - amostra Verdadeira número 1) e Máscara resultante (Referência - amostra Falsa número 1), para “Elementos Fluorescentes”.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 67 - Máscara resultante (Referência - amostra Verdadeira número 1) e Máscara resultante (Referência - amostra Falsa número 1), para Número Escondido.



Fonte: Elaboração própria.

É virtualmente impossível que, em termos de valores de intensidade pixel a pixel, uma imagem seja idêntica à outra, mesmo que capturada de uma mesma cédula. Isso se dá devido a variações, mesmo que ínfimas, de iluminação e posicionamento no momento da aquisição das imagens, bem como a precisão na etapa das *cropagens*. Contudo, a expectativa desse método é que, mesmo que ainda existam variações na imagens de uma cédula verdadeira para outra, a disparidade do intervalo de variação médio das cédulas falsas seja tão discrepante que, com o estabelecimento de um Limiar, proporcione uma clara distinção e separação entre os intervalos de variação dos dois grupos.

Após a etapa das subtrações das máscaras e obtenção das 20 máscaras resultantes, é necessário um parâmetro matemático que mensure a distinção entre os dois grupos de cédulas. Visto que os grupos são muito distintos aos olhos de um operador humano, essa distinção será traduzida matematicamente através de todos os pixels das imagens. Será, portanto, realizada uma soma total de todos os valores de pixel contidos em cada uma das máscaras resultantes e, posteriormente, serão comparados e plotados em gráficos os resultados obtidos.

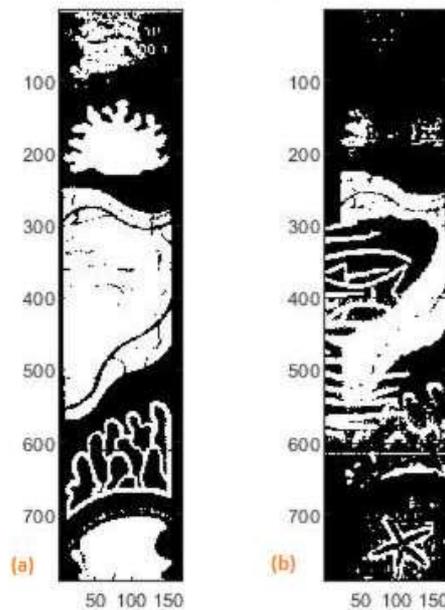
3.7.2 Método 2: Intensidade Média de Pixel

Nesse segundo método, não serão realizadas operações entre as imagens das máscaras, mas sim analisadas as próprias máscaras geradas para cada uma das cédulas verdadeiras e falsas.

Uma vez reunidas as 10 máscaras verdadeiras e as 10 máscaras falsas das cédulas, será calculado, de cada uma das imagens, o seu Valor Médio de Pixels, que consiste na soma dos valores de cada pixel da imagem divididos pela quantidade total desses pixels em cada imagem analisada.

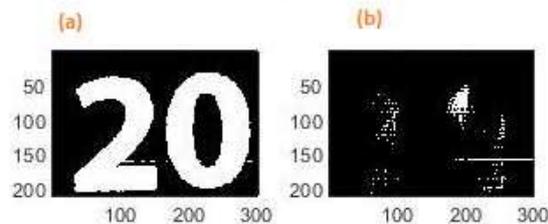
Estão exibidas nas Figuras 68, 69, 70, 71 e 72, para cada elemento de segurança, as máscaras geradas para os exemplares número 1 de cédula verdadeira (a) e número 1 de cédula falsa (b).

Figura 68 - Máscara gerada para amostra número 1 de cédula verdadeira (a), e cédula falsa (b) de 100 Reais, para “Faixa Holográfica”.



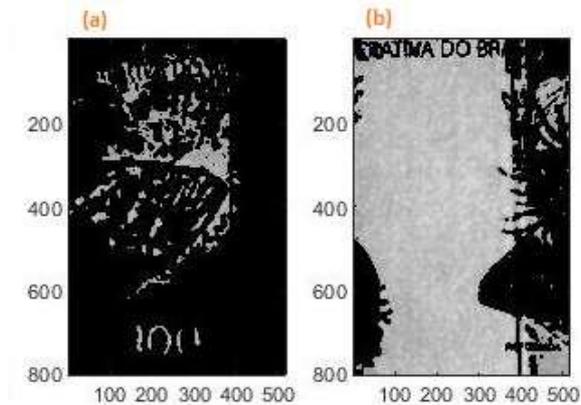
Fonte: Elaboração própria.

Figura 69 - Máscara gerada para amostra número 1 de cédula verdadeira (a), e cédula falsa (b) de 20 Reais, para “Número que Muda de Cor”.



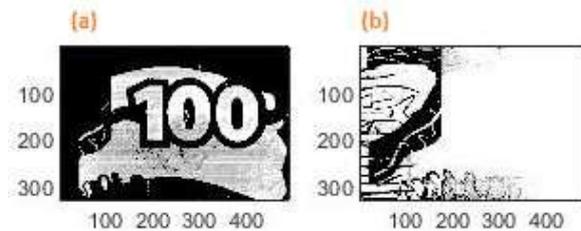
Fonte: Elaboração própria.

Figura 70 - Máscara gerada para amostra número 1 de cédula verdadeira (a), e cédula falsa (b) de 100 Reais, para “Marca D’Água”.



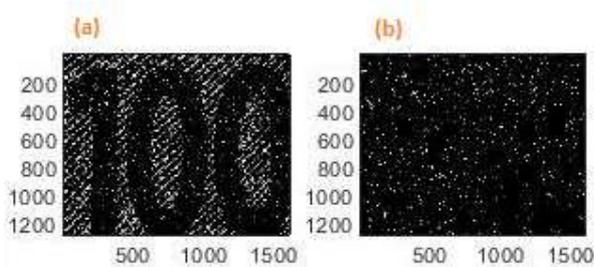
Fonte: Elaboração própria.

Figura 71 - Máscara gerada para amostra número 1 de cédula verdadeira (a), e cédula falsa (b) de 100 Reais, para “Elementos Fluorescentes”.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 72 - Máscara gerada para amostra número 1 de cédula verdadeira (a), e cédula falsa (b) de 100 Reais, para “Número Escondido”.



Fonte: Elaboração própria.

Para calcular o Valor Médio de Intensidade de Pixel de cada uma das máscaras geradas, há um conjunto de funções prontas no MATLAB capaz de fornecer esses dados sobre qualquer imagem que se aplique a função. A função disponível e usada nesse trabalho, para o presente método, é representada pela função da Equação 6.

$$B = \text{mean2}(A) \quad (\text{Eq. 6})$$

Após registrados cada Valor Médio de Intensidade de Pixel de cada uma das 10 máscaras verdadeiras e 10 máscaras falsas, esses serão reunidos e plotados em gráficos.

3.8 Plotagem dos Gráficos e Estipulação dos Intervalos Característicos

Uma vez que todos os exemplares de cédulas verdadeiras e falsas passam por todas as etapas de processamento de imagem e métodos matemáticos de avaliação e comparação, os dados mensurados são coletados e plotados em gráficos a fim de proporcionar uma visualização mais ampla dos padrões de respostas para cada amostra.

Desse modo, foram plotados dois gráficos para cada um dos 5 elementos de segurança avaliados. O primeiro diz respeito à técnica 1 do Método 1 (seção 3.7.1), que corresponde ao valor total da somatória de pixel da imagem resultante da subtração das máscaras *versus* o número do exemplar de cédula. E o segundo diz respeito à técnica do Método 2 (seção 3.7.2), que corresponde aos valores de intensidade média de pixel da máscara *versus* o exemplar de cédula correspondente.

Esses dois gráficos foram feitos para amostras de 1 até 10 cédulas falsas e 1 até 10 cédulas verdadeiras, que serão superpostas para melhor observar a distinção entre o comportamento padrão da variação das curvas em cada um dos casos (falsas e verdadeiras). Portanto, ao final, serão obtidas, para cada um dos 5 elementos de segurança, 2 curvas de variação de resposta às técnicas dos Métodos 1 e 2, uma curva para casos verdadeiros, e uma curva para casos falsos. Todos os dez gráficos serão apresentados e discutidos na seção 4 deste trabalho.

3.9 Escolha dos Limiares de Classificação

Dado que o objetivo desse trabalho é encontrar dois intervalos distintos de padrão de comportamento das cédulas sob as mesmas etapas de processamento de imagem que diferenciam as respostas típicas de uma cédula verdadeira das respostas de uma falsa, foi escolhido para cada um dos elementos de segurança e cada um dos métodos matemáticos usados, um limiar numérico que separa, visando a maior acurácia possível, os grupos de cédulas verdadeiras e falsas, baseando-se nos gráficos gerados pelos experimentos. Nos gráficos do Método 1 foi escolhido um valor de Somatória Total de Pixels da Máscara Subtraída Resultante e no Método 2 foi escolhido um valor de Intensidade Média de Pixel de Máscara Cropada.

O critério utilizado para a escolha do Limiar de Classificação é o valor médio da menor distância possível entre as duas curvas de comportamento (verdadeira e falsa). Dessa forma, verificou-se o menor valor da curva de maior média e o maior valor da curva de menor média. O ponto médio entre esses dois valores foi adotado como o Limiar de Classificação, separando as curvas verdadeira acima e falsa abaixo, ou ao contrário, dependendo do caso. Todas as escolhas de Limiar serão demonstradas nos respectivos gráficos no capítulo 4 deste trabalho.

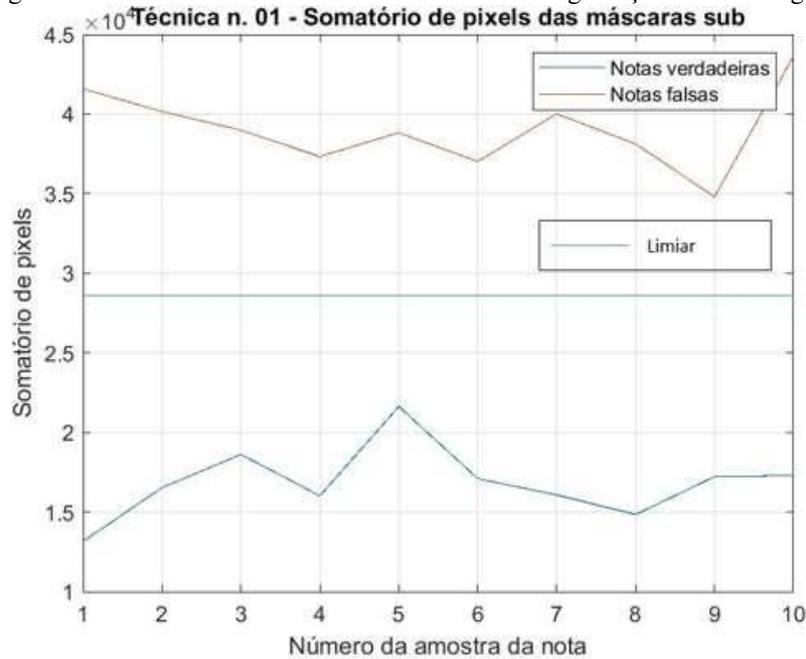
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Faixa Holográfica

Após realizadas todas as etapas de processamento de imagem e todas as análises matemáticas descritas, foram gerados dois gráficos para os Métodos matemáticos 1 e 2, respectivamente, para o elemento de segurança “Faixa Holográfica”.

A Figura 73 mostra as duas curvas distintas de variação de comportamento de imagem para cédulas verdadeiras e cédulas falsas. Dessa maneira, seguindo o critério de escolha do Limiar de Classificação descrito na seção 3.9, o Limiar foi definido em 28225, que corresponde ao ponto médio entre os valores de soma total de pixels registrados para as amostras de cédula 9 falsa (34810) e cédula 5 verdadeira (21640). Com essa escolha de Limiar, foi obtida uma acurácia de 100% na separação dos dois grupos de cédulas, sendo todas as amostras acima do Limiar consideradas falsas e todas abaixo do Limiar, verdadeiras.

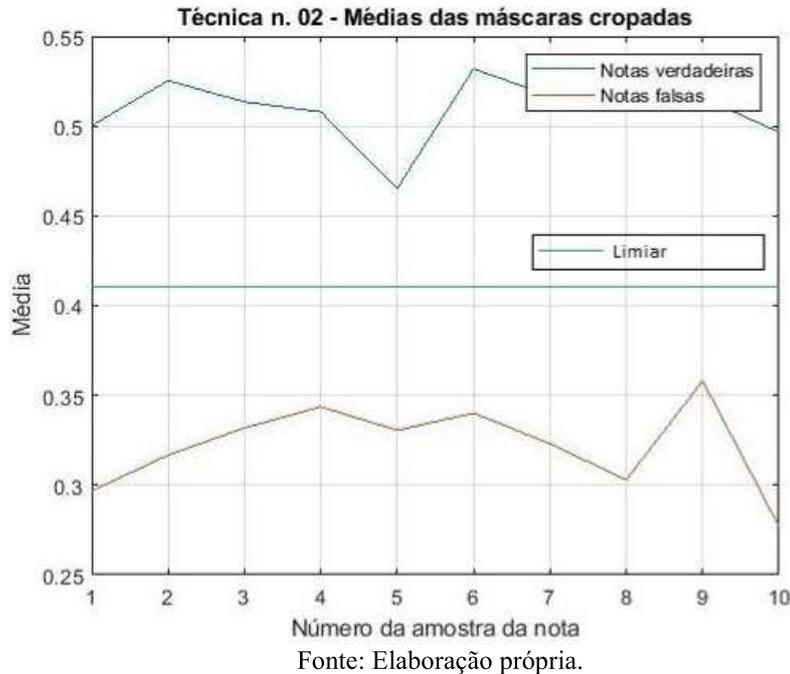
Figura 73 - Gráfico do Método 1 sobre elemento de segurança “Faixa Holográfica”.



Paralelamente, para o Método 2, foi obtido o gráfico presente na Figura 74. Para esse, o Limiar foi definido em 0,4117, que corresponde ao ponto médio entre os valores de intensidade média de pixel registrados para as amostras de cédula 5 verdadeira (0,4653) e cédula 9 falsa (0,3581). Com essa escolha de Limiar, foi obtida uma acurácia de 100% na

separação dos dois grupos de cédulas, sendo todas as amostras acima do Limiar consideradas verdadeiras e todas abaixo do Limiar, falsas.

Figura 74 - Gráfico do Método 2 sobre elemento de segurança “Faixa Holográfica”.



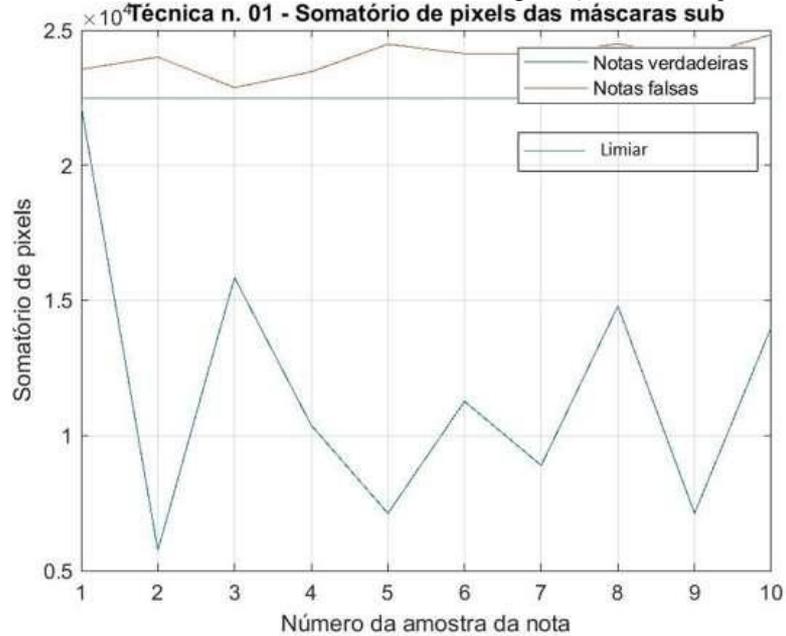
Por fim, para o elemento de segurança “Faixa Holográfica”, verifica-se acurácia final de 100% com os dois métodos combinados.

4.2 Número que Muda de Cor

Após realizadas todas as etapas de processamento de imagem e todas as análises matemáticas descritas, foram gerados outros dois gráficos para os Métodos matemáticos 1 e 2, respectivamente, para o elemento de segurança “Número que Muda de Cor”.

A Figura 75 demonstra que foram obtidas duas curvas distintas de variação de comportamento de imagem para cédulas verdadeiras e cédulas falsas. Dessa maneira, seguindo o critério de escolha do Limiar de Classificação descrito na seção 3.9, o Limiar foi definido em 22545, que corresponde ao ponto médio entre os valores de soma total de pixels registrados para as amostras de cédula 3 falsa (22880) e cédula 1 verdadeira (22210). Com essa escolha de Limiar, foi obtida uma acurácia de 100% na separação dos dois grupos de cédulas, sendo todas as amostras acima do Limiar consideradas falsas e todas abaixo do Limiar, verdadeiras.

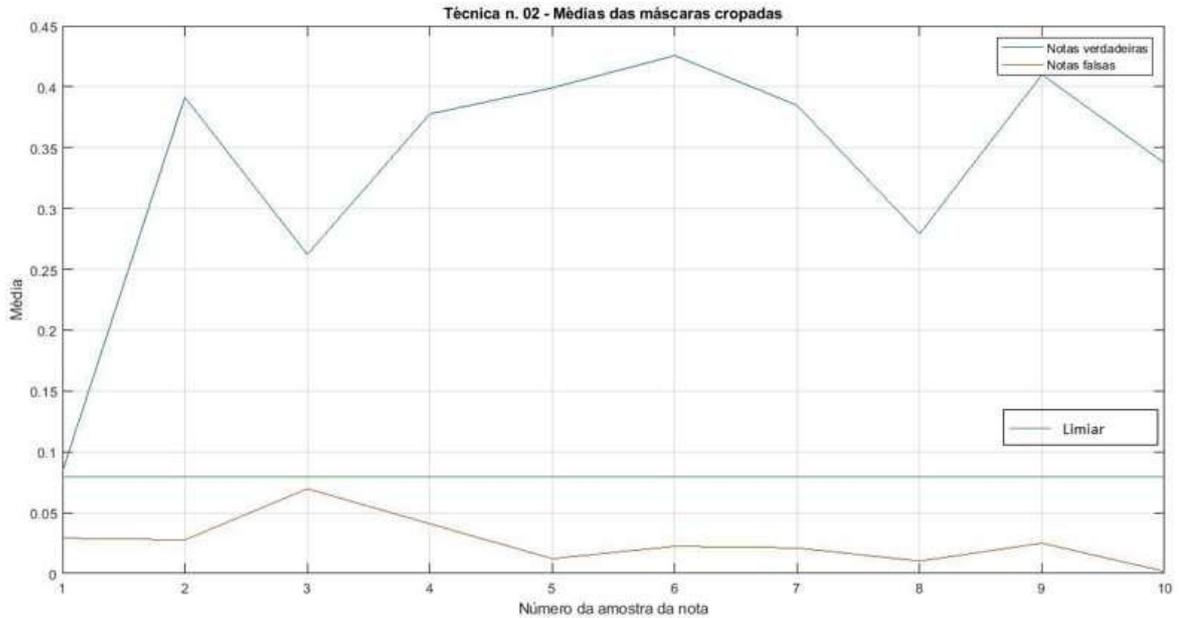
Figura 75 - Gráfico do Método 1 sobre elemento de segurança “Número que Muda de Cor”.



Fonte: Elaboração própria.

Paralelamente, para o Método 2 foi obtido o gráfico presente na Figura 76. O Limiar foi definido em 0,076695, que corresponde ao ponto médio entre os valores de intensidade média de pixel registrados para as amostras de cédula 1 verdadeira (0,08373) e cédula 3 falsa (0,06966). Com essa escolha de Limiar, foi obtida uma acurácia de 100% na separação dos dois grupos de cédulas, sendo todas as amostras acima do Limiar consideradas verdadeiras e todas abaixo do Limiar, falsas.

Figura 76 - Gráfico do Método 2 sobre elemento de segurança “Número que Muda de Cor”.



Fonte: Elaboração própria.

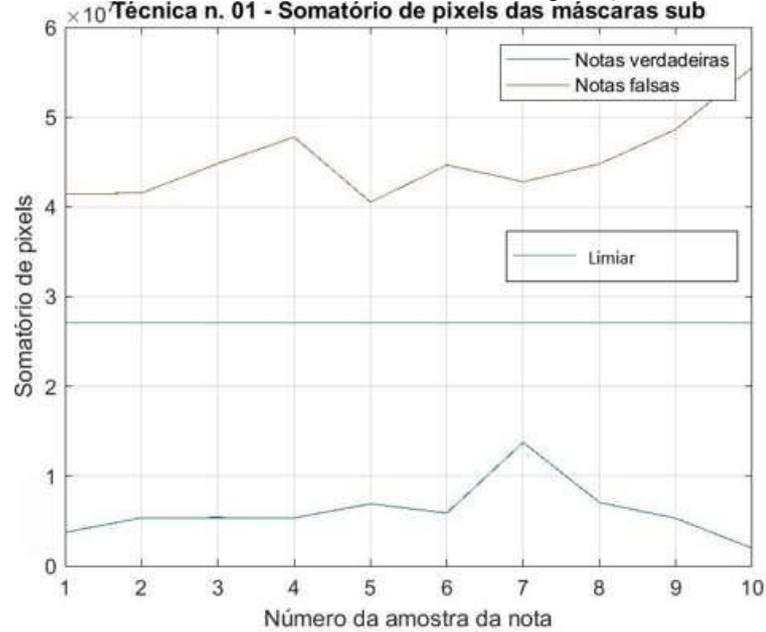
Por fim, para o elemento de segurança “Número que Muda de Cor”, verifica-se acurácia final de 100% com os dois métodos combinados.

4.3 Marca D'Água

Após realizadas todas as etapas de processamento de imagem e todas as análises matemáticas descritas neste trabalho, foram gerados outros dois gráficos para os Métodos matemáticos 1 e 2, respectivamente, para o elemento de segurança “Marca D'Água”.

A Figura 77 demonstra que foram obtidas duas curvas distintas de variação de comportamento de imagem para cédulas verdadeiras e cédulas falsas. Assim, seguindo o critério de escolha do Limiar de Classificação descrito na seção 3.9, o Limiar foi definido em 27135000, que corresponde ao ponto médio entre os valores de soma total de pixels registrados para as amostras de cédula 5 falsa (40520000) e cédula 7 verdadeira (13750000). Com essa escolha de Limiar, foi obtida uma acurácia de 100% na separação dos dois grupos de cédulas, sendo todas as amostras acima do Limiar consideradas falsas e todas abaixo do Limiar, verdadeiras.

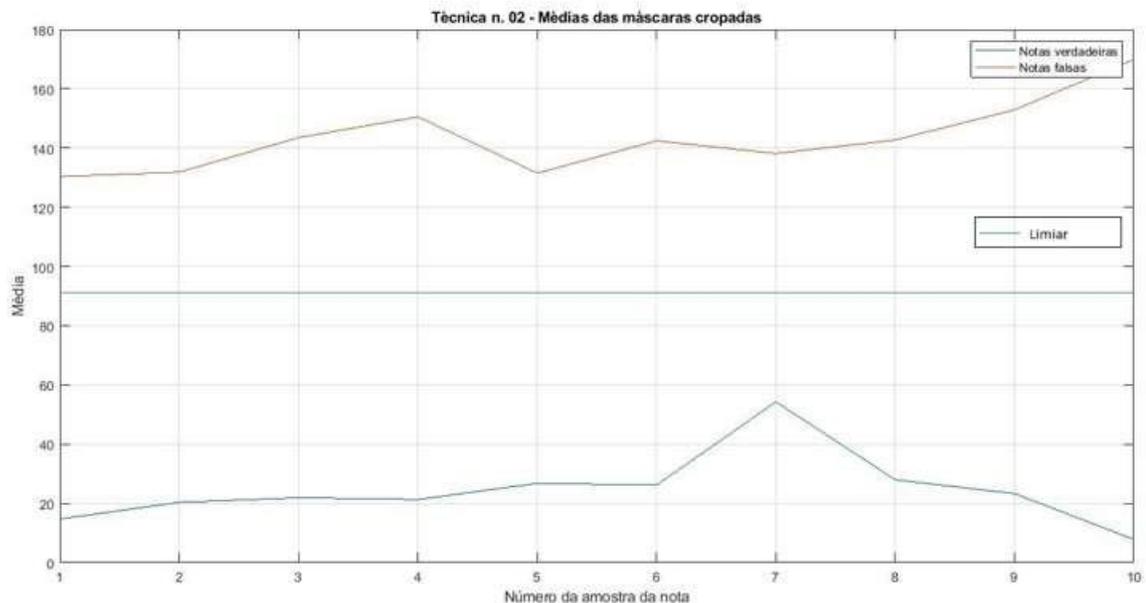
Figura 77 - Gráfico do Método 1 sobre elemento de segurança “Marca D’Água”.



Fonte: Elaboração própria.

Paralelamente, para o Método 2, foi obtido o gráfico presente na Figura 78. O Limiar foi definido em 92,35, que corresponde ao ponto médio entre os valores de intensidade média de pixel registrados para as amostras de cédula 1 falsa (130,4) e cédula 7 verdadeira (54,3). Com essa escolha de Limiar, foi obtida uma acurácia de 100% na separação dos dois grupos de cédulas, sendo todas as amostras acima do Limiar consideradas falsas e todas abaixo do Limiar, verdadeiras.

Figura 78 - Gráfico do Método 2 sobre elemento de segurança “Marca D’Água”.



Fonte: Elaboração própria.

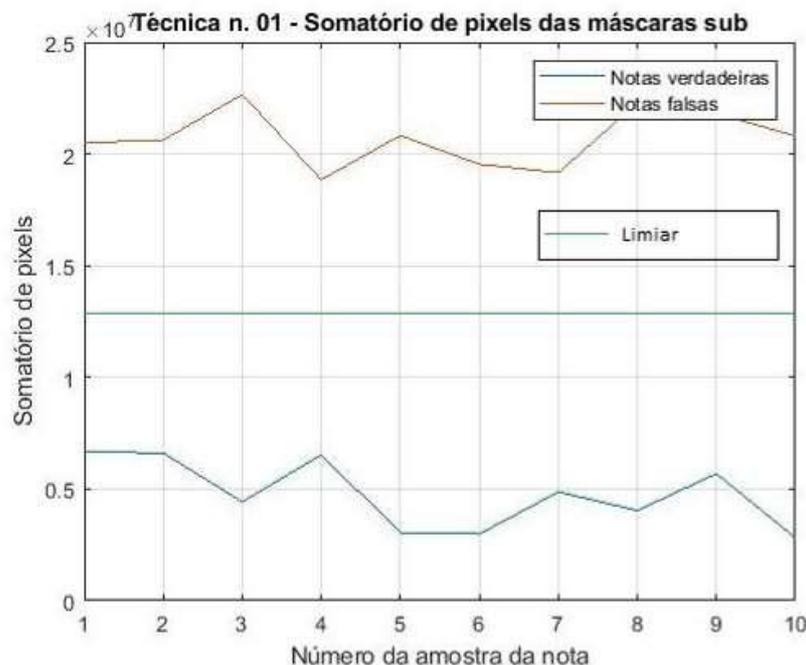
Por fim, considerando o critério inicial desse estudo, que consiste na obrigatoriedade da cédula ser aprovada em ambos os métodos de análise matemática, para os 5 elementos de segurança, para que seja dada como legítima, obtêm-se, para o elemento de segurança “Marca D’Água”, acurácia final de 100% com os dois métodos combinados.

4.4 Elementos Fluorescentes

Após realizadas todas as etapas de processamento de imagem e todas as análises matemáticas descritas nesse trabalho, foram gerados outros dois gráficos para os Métodos matemáticos 1 e 2, respectivamente, para o elemento de segurança “Elementos Fluorescentes”.

A Figura 79 demonstra que foram obtidas duas curvas distintas de variação de comportamento de imagem para cédulas verdadeiras e cédulas falsas. Dessa maneira, seguindo o critério de escolha do Limiar de Classificação descrito na seção 3.9, o Limiar foi definido em 12748500, que corresponde ao ponto médio entre os valores de soma total de pixels registrados para as amostras de cédula 4 falsa (18850000) e cédula 1 verdadeira (6647000). Com essa escolha de Limiar, foi obtida uma acurácia de 100% na separação dos dois grupos de cédulas, sendo todas as amostras acima do Limiar consideradas falsas e todas abaixo do Limiar, verdadeiras.

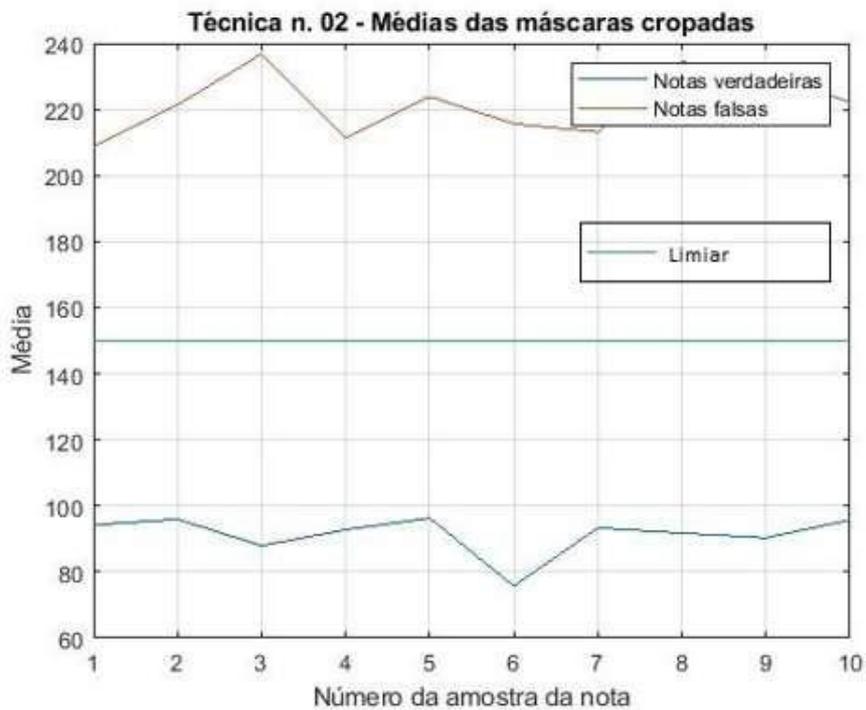
Figura 79 - Gráfico do Método 1 sobre elemento de segurança “Elementos Fluorescentes”.



Fonte: Elaboração própria.

Paralelamente, para o Método 2, foi obtido o gráfico presente na Figura 80. O Limiar foi definido em 152,575, que corresponde ao ponto médio entre os valores de intensidade média de pixel registrados para as amostras de cédula 1 falsa (208,8) e cédula 5 verdadeira (96,35). Com essa escolha de Limiar, foi obtida uma acurácia de 100% na separação dos dois grupos de cédulas, sendo todas as amostras acima do Limiar consideradas falsas e todas abaixo do Limiar, verdadeiras.

Figura 80 - Gráfico do Método 2 sobre elemento de segurança “Elementos Fluorescentes”.



Fonte: Elaboração própria.

Por fim, para o elemento de segurança “Elementos Fluorescentes”, verifica-se acurácia final de 100% com os dois métodos combinados.

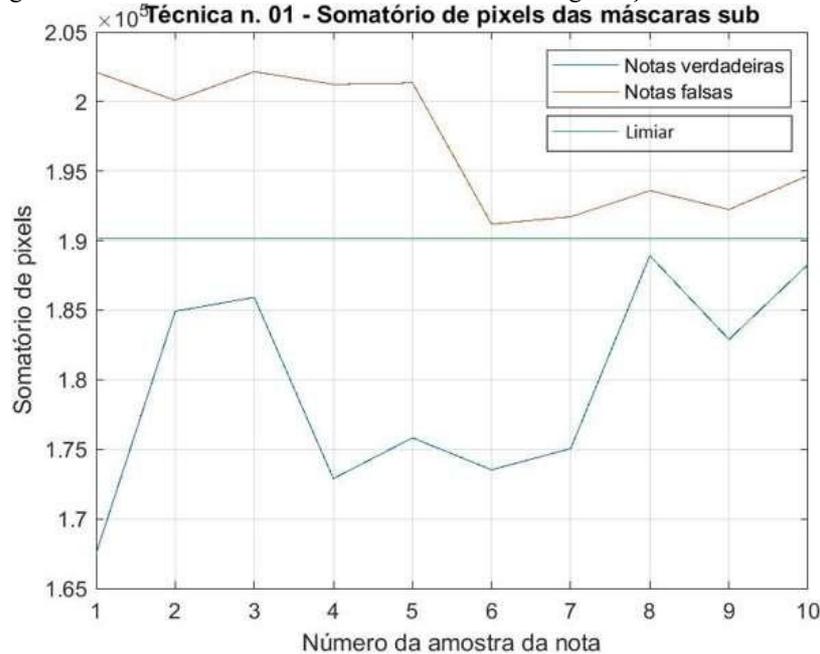
4.5 Número Escondido

Após realizadas todas as etapas de processamento de imagem e todas as análises matemáticas descritas neste trabalho, foram gerados outros dois gráficos para os Métodos matemáticos 1 e 2, respectivamente, para o elemento de segurança “Número Escondido”.

A Figura 81 demonstra que foram obtidas duas curvas distintas de variação de comportamento de imagem para cédulas verdadeiras e cédulas falsas. Dessa maneira,

seguindo o critério de escolha do Limiar de Classificação descrito na seção 3.9, o Limiar foi definido em 190050, que corresponde ao ponto médio entre os valores de soma total de pixels registrados para as amostras de cédula 6 falsa (101200) e cédula 8 verdadeira (188900). Com essa escolha de Limiar, foi obtida uma acurácia de 100% na separação dos dois grupos de cédulas, sendo todas as amostras acima do Limiar consideradas falsas e todas abaixo do Limiar, verdadeiras.

Figura 81 - Gráfico do Método 1 sobre elemento de segurança “Número Escondido”.

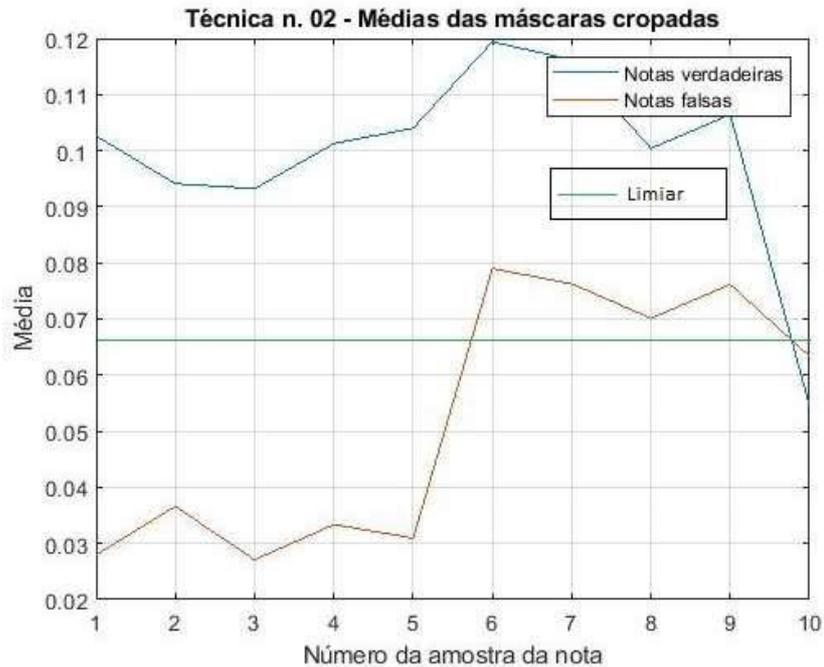


Fonte: Elaboração própria.

Paralelamente, para o Método 2 foi obtido o gráfico presente na Figura 82. Para esse, o Limiar foi definido em 0,06679, que corresponde ao ponto médio entre os valores de intensidade média de pixel registrados para as amostras de cédula 10 verdadeira (0,05459) e cédula 6 falsa (0,07899), os quais, por sua vez, correspondem, respectivamente, aos pontos mais baixo da curva de maior média, e mais alto da curva de menor média, conforme o critério de escolha do Limiar descrito na seção 3.9. Com essa escolha de Limiar, foi obtida uma acurácia de 75% na separação dos dois grupos de cédulas, dado que, assumindo-se que as amostras acima do Limiar são consideradas verdadeiras e abaixo do Limiar, falsas, as amostras 6, 7, 8 e 9 das cédulas falsas, e a amostra 10 das cédulas verdadeiras foram classificadas erroneamente, correspondendo a 5 amostras entre as 20, isto é, 25% de erro. Isso se deu devido à ocorrência de valores muito discrepantes de intensidade de pixel apresentados

pela amostra de cédula verdadeira número 10 em relação às demais medidas obtidas para as outras amostras verdadeiras.

Figura 82 - Gráfico do Método 2 sobre elemento de segurança “Número Escondido”.



Por fim, para o elemento de segurança “Número Escondido” verifica-se acurácia final de 75% com os dois métodos combinados, uma vez que houve falha na classificação das amostras 5, 6, 7, 8 e 9 das cédulas falsas, e na amostra 10 das cédulas verdadeiras.

4.6 Acurácia Final do experimento

Considerando o critério inicial deste trabalho, que consiste na necessidade de que a cédula seja aprovada em ambos os métodos de análise matemática para os 5 elementos de segurança para ser dada como legítima, ao final de todas as avaliações matemáticas de todos os elementos de segurança, foi obtida uma acurácia final combinada de 75%.

Foi possível constatar que somente as amostras 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 de cédulas verdadeiras foram classificadas corretamente como verdadeiras pelos métodos e critérios do experimento, enquanto as amostras 1, 2, 3, 4, 5 e 10 de cédulas falsas foram classificadas corretamente como falsas, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Matriz de confusão dos resultados finais do experimento.

	Amostras Verdadeiras	Amostras Falsas
Positivo verdadeiro	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9	
Negativo verdadeiro		1, 2, 3, 4, 5 e 10
Positivo falso		
Negativo falso		
Inconclusivo	10	6, 7, 8 e 9

Fonte: Elaboração própria.

5 PROBLEMAS ENFRENTADOS

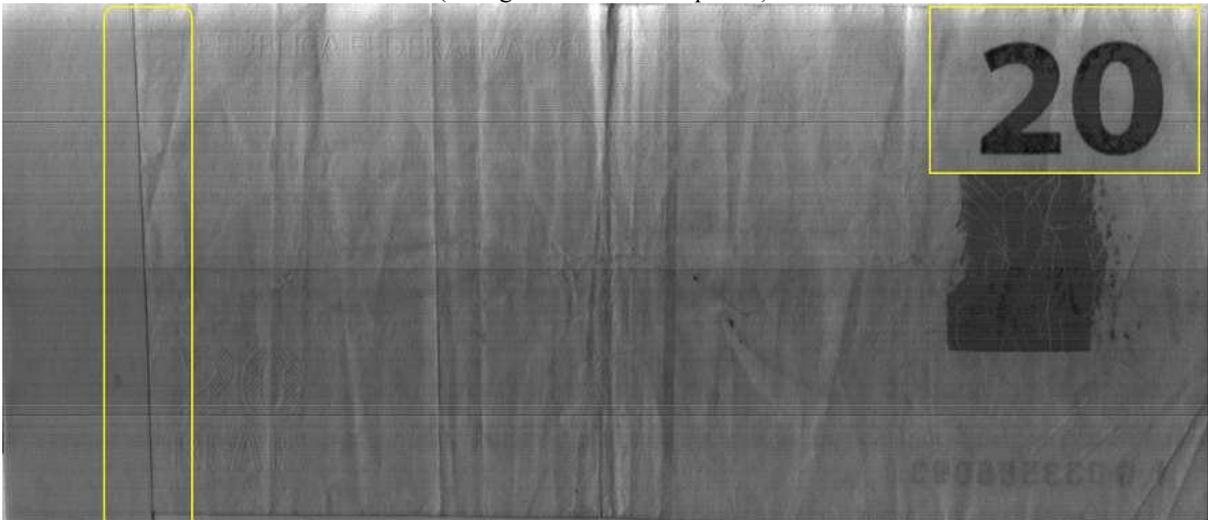
5.1 Disponibilidade de Amostragem

O primeiro desafio deste trabalho consistiu em reunir amostras suficientes de cédulas verdadeiras, mas principalmente, de cédulas falsas do Real. A escassez de exemplares, principalmente de valores monetários menores, limitou a amostragem deste trabalho a somente 20 itens no total.

5.2 Escorregamento das cédulas durante a aquisição de Imagens

Devido ao extenso uso de algumas cédulas, essas ficam mais suscetíveis a dobras, amassos e escorregamento durante a etapa de aquisição de imagem. Este problema foi enfrentado diversas vezes, principalmente com as cédulas de 20 Reais. Procurou-se repetir o processo de escaneamento dessas cédulas até que fosse capturada sua imagem sem irregularidades, no entanto, mesmo assim em alguns casos não foi possível. Portanto, a solução encontrada foi munir as cédulas de um “suporte”, ou “guia”, feito com papel sulfite, que permitiu a tração da cédula pelos roletes do equipamento de escaneamento utilizado sem que houvesse deslizamento da cédula, devido à natureza mais firme do papel sulfite. Também houve a atenção para que essa “guia” não comprometesse a região de interesse da cédula após a aquisição das imagens. Na Figura 84 é possível verificar a presença da “guia” em papel sulfite (retângulo amarelo à esquerda) e o fato da mesma não ter comprometido a captura da região de interesse do elemento de segurança “Número que Muda de Cor” (retângulo amarelo à direita).

Figura 83 - Exemplar de cédula verdadeira de 20 Reais sob escaneamento IR, com uso da guia de papel sulfite (retângulo amarelo à esquerda).

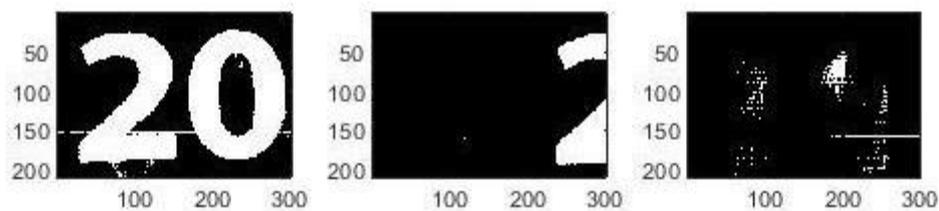


Fonte: Acervo pessoal.

A necessidade dessa solução se deu após a constatação de que a amostra número 1 das cédulas de 20 Reais sofreu deslizamento durante a aquisição de sua imagem. Após verificar-se que os dados obtidos em gráfico para a amostra 1 foram muito discrepantes dos demais, foi investigado e apurado o ocorrido.

Na Figura 76 é possível observar que o valor de intensidade média de pixel da amostra 1 foi muito abaixo das demais cédulas verdadeiras. Isso se deu, conforme imagem central da Figura 84, devido ao escorregamento na captura da imagem inicial da cédula. Como consequência, a primeira cropagem, segunda cropagem e demais etapas subsequentes também foram deslocadas, comprometendo o padrão de captura e análise que se manteve nos outros exemplares do estudo. No entanto, optou-se por manter essa amostra, a fim de demonstrar a dificuldade enfrentada.

Figura 84 - Máscaras binarizadas da cédula Referência; amostra número 1 de cédula verdadeira; amostra número 1 de cédula falsa.



Fonte: Elaboração própria.

6 CONCLUSÃO

O dinheiro vivo é essencial para a satisfação das necessidades humanas na sociedade e sua veracidade é resguardada pela necessidade da ordem econômica do país. Diante dessa relevância, é fundamental que as cédulas em circulação sejam válidas. É por isso que se faz necessário haver alta acurácia do experimento para a identificação automatizada de cédulas falsas.

Observou-se que a acurácia para quatro dos elementos testados (“Faixa Holográfica, Número que Muda de Cor, Elementos Fluorescentes e Marca D’Água”) foi satisfatória, uma vez que o sistema obteve sucesso ao distinguir em 100% as cédulas verdadeiras e as cédulas falsas utilizadas no experimento.

O critério utilizado para determinação dos Limiares de Classificação também funcionou de maneira satisfatória para os 4 elementos de segurança supracitados e, visto que o objetivo do trabalho era encontrar dois intervalos distintos de comportamento de imagem para os dois grupos de cédulas, a escolha do Limiar foi capaz de separar ambos os grupos em 100% para os 4 elementos de segurança dentro da amostragem utilizada.

Por outro lado, o critério se mostrou ineficiente perante o caso do elemento “Número Escondido”, que apresentou acurácia de somente 75%. Em uma hipótese de ausência da amostra número 10 das cédulas verdadeiras, o Limiar hipotético calculado seria capaz de separar ambos os grupos em 100% mais uma vez. Ocorrência que levou à conclusão de que, para uma amostra mais extensa de cédulas, e com a possibilidade de abranger tipos diferentes de falsificação, deve ser levada em consideração a escolha de outro critério de Limiar que não seja tão suscetível a amostras com dados altamente discrepantes, passíveis de comprometer a acurácia geral do experimento. Um critério para tornar o método mais robusto pode ser a média entre as médias das curvas de comportamento das imagens, o qual fica menos frágil à amostras muito discrepantes.

No entanto, no tocante ao elemento de segurança “Número Escondido”, foi ineficaz ao objetivo deste trabalho, visto que apresentou menor precisão, de 75%, na correta classificação das cédulas. Assim, diante do rigor e da necessidade de acurácia na identificação, constata-se que os resultados insatisfatórios referentes a tal elemento de segurança comprometem a eficácia do método utilizado, em que se buscava a precisão dos cinco elementos simultaneamente. Portanto, conclui-se que o método carece de aprimoramento.

7 TRABALHOS FUTUROS

Existe margem para diversos aprimoramentos do presente estudo. Primeiramente, como melhoria, sugere-se estudar os demais elementos de segurança não compreendidos neste trabalho, tendo em vista que somente foram abordados os elementos orientados como principais para uma rápida avaliação por um operador humano, de acordo com a Cartilha do Banco Central do Brasil. Isso implicará no emprego de outras técnicas de processamento de imagens, tais quais OCR, para estudo do elemento de segurança das Microimpressões; técnicas capazes de estudar a presença do elemento de segurança do Alto-Relevo; entre outros avanços que trarão mais acurácia e refinamento para as etapas de classificação e separação de cédulas falsas e verdadeiras, combatendo diferentes estratégias de falsificação.

Além disso, é relevante buscar estender a quantidade de amostras de cédulas, bem como de outras denominações de valores, em parcerias com o Banco Central do Brasil e Bancos privados, onde são mais recorrentes as aparições dessas amostras. Quanto maiores e mais diversas as amostras, maior abrangência pode-se alcançar com os algoritmos de detecção e reconhecimento de imagem, tanto para preparar os algoritmos para espécies diferentes de contrafacção, como para perceber as mudanças mais sutis entre cédulas verdadeiras, como por exemplo o uso, sujeira e sinais do tempo que podem comprometer sua devida validação.

Outrossim, nas próprias etapas desenvolvidas neste trabalho cabem melhorias na utilização e escolha das técnicas de processamento de imagem, incorporando outras ferramentas e métodos, a fim de buscar sempre maior modernidade e padronização nas condições de estudo das amostras e avaliação dos resultados.

Por fim, a escolha do Limiar de Classificação é determinante para o devido discernimento dos dois grupos de cédulas falsas e verdadeiras. Para esse trabalho, em que se pretendia separar da maneira mais otimizada possível os dois grupos de cédulas, a escolha do Limiar funcionou bem para 4 dos 5 elementos de segurança. Porém, para o “Número Escondido”, que demonstrou maiores variações de comportamento de imagem nos gráficos obtidos, o critério foi falho. Dessa maneira, a escolha de outro critério mais resistente a grandes variações causadas por amostras discrepantes pode ser mais eficaz, como, por exemplo, o critério de um Limiar resultante da média entre as médias das curvas de comportamento de imagem dos dois grupos.

8 REFERÊNCIAS

- 1 PARANÁ, E.; MOLLO, M. L. R. (Mollo, 2010, p. 128 - MOLLO, M. L. R. Dinheiro como relação social: uma leitura do poder monetário do Estado na MMT. Artigos originais Economia e Sociedade, Campinas, v. 30, n. 1 (71), p. 15-38, janeiro-abril, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ecos/a/47s79vxz5tQSGcqQY8FPdRj/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 26, out., 2023.
- 2 ALVIM, V. Dinheiro: Instituição social relevante na sociedade moderna. Revista Eletrônica dos Pós-Graduandos em Sociologia Política da UFSC, v. 1, n. 1, agosto-dezembro, 2003, p. 1-25. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/emtese/article/download/13679/12537/42158>. Acesso em: 26, out., 2023.
- 3 BRASIL. Segunda Família do Real. Cartilha de Treinamento. Banco Central do Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/novasnotas/assets/downloads/material-apoio/2e5/Cartilha.pdf>. Acesso em: 26, out., 2023.
- 4 BRASIL. Estatística de Falsificação. Banco Central do Brasil, 2023. Disponível em: https://www.bcb.gov.br/content/estatisticas/mecirestfalsas/EstatisticaFalsificacao%20-%20UF%20X%20Denominacao_internet_2023.pdf. Acesso em: 06, nov., 2023.
- 5 GONZALEZ, R. C. WOODS, R. E. Digital Image Processing. 2th Edition. New Jersey: Prentice-Hall, 2002.
- 6 KALER, P. Study of Grayscale image in Image processing. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, v. 4, issue 11, 309-3011, nov., 2016. Disponível em: <https://ijritcc.org/index.php/ijritcc/article/view/2653/2653>. Acesso em: 26, out., 2023.
- 7 WHAT Is Image Segmentation?. MathWorks, [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/discovery/image-segmentation.html>. Acesso em: 26, out., 2023.
- 8 MUTHUKRISHNAN, R.; RADHA, M. Edge detection techniques for image segmentation. International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT) Vol 3, No 6, Dec 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/274872300_Edge_Detection_Techniques_For_Image_Segmentation. Acesso em: 26, out., 2023.
- 9 IMAGE Arithmetic. MathWorks, [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2020a/images/image-arithmetic.html>. Acesso em: 28, out., 2023.
- 10 IMSUBTRACT. MathWorks, [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2020a/images/ref/imsubtract.html>. Acesso em: 28, out., 2023.

11 ROY, V.; MISHRA, G.; MANNADIAR, R.; PATIL, S. Fake Currency Detection Using Image Processing. IJCSMC, Vol. 8, Issue. 4, April 2019, pg.88 – 93. Disponível em: <https://ijcsmc.com/docs/papers/April2019/V8I4201914.pdf>. Acesso em: 26, out., 2023.

12 MURTHY, S.; KURUMATHUR, J.; REDDY, B. R. Design and Implementation of Paper Currency Recognition with Counterfeit Detection. Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET), 2016.