UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA

Autenticação biométrica de impressões digitais obtidas por foto

João Vitor de Souza Costa

FLORIANÓPOLIS-SC

2023

João Vitor de Souza Costa

Autenticação biométrica de impressões digitais obtidas por foto

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Programa de Graduação em Ciências da Computação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Bacharel em Ciências da Computação.

Orientador: Cristian Thiago Moecke
Responsável: Luciana de Oliveira Rech

FLORIANÓPOLIS-SC
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

de Souza Costa, Joao Vitor
Autenticação biométrica de impressões digitais obtidas por foto / Joao Vitor de Souza Costa ; orientador, Cristian Thiago Moecke, coorientador, Luciana de Oliveira Rech, 2023.
125 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Ciências da Computação, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Ciências da Computação. 2. Biometria. 3. Autenticação e verificação biométrica. 4. Extração de impressões digitais por foto. 5. API REST. I. Moecke, Cristian Thiago. II. de Oliveira Rech, Luciana. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Ciências da Computação. IV. Título.

João Vitor de Souza Costa

Autenticação biométrica de impressões digitais obtidas por foto

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Ciências da Computação, e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Ciências da Computação do Departamento de Informática e Estatística, Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, Santa Catarina - Brasil, 25 de Julho de 2023.

_____

Jean Everson Martina, Dr.
Coordenador(a) do curso de Ciências da Computação

Banca examinadora:

_____

Cristian Thiago Moecke, Me.
Orientador(a)
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

_____

Luciana de Oliveira Rech, Dr.
Coorientador(a)
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

_____

Alexandre Gonçalves Silva, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

_____

Ricardo Felipe Custódio, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

“Some men see things as they are and say why,
I dream things that never were and say, why not”
(George Bernard Shaw)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, que sempre me fortalece, e aos meus pais, que nunca pouparam esforços para que eu pudesse dedicar o tempo necessário à elaboração deste trabalho, conciliando-o com os estudos e o trabalho. Além de serem meu maior exemplo de força e superação.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão em primeiro lugar ao meu orientador, Cristian Thiago Moecke, por todo o apoio, incentivo e inspiração que proporcionou ao desenvolvimento deste trabalho e à minha carreira profissional. Sem sua ajuda e ensinamentos, eu não seria quem sou hoje.

Agradeço também aos meus pais, Arlene e Alexandre, que sempre estiveram presentes em todos os momentos da minha vida, me incentivando e dando todo suporte possível para que eu alcançasse meus objetivos e sonhos.

Agradeço à minha namorada Maria Júlia, que sempre me alegrou, motivou e apoiou o meu desenvolvimento pessoal e profissional, que foi essencial para o progresso deste trabalho e da minha vida profissional.

Também ao meu irmão Luiz Henrique, que foi grande inspiração para minha vida, e sempre esteve disposto a conversar e me ajudar nos momentos difíceis.

Também sou grato à minha família e amigos, que foram a base da minha vida e sempre me apoiaram.

Por fim, quero expressar minha gratidão à BRy Tecnologia, que desempenhou um papel fundamental na base teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho e para minha carreira.

RESUMO

Nos últimos anos, observou-se um aumento no uso de impressões digitais para autenticação e verificação de identidade. No entanto, essa abordagem requer hardware especializado de alto custo para extrair as informações biométricas, o que dificulta sua popularização e torna a utilização menos acessível.No mesmo período houve ainda uma intensificação na utilização de *smartphones,* que, aliado ao avanço tecnológico, possibilitou a evolução das câmeras presentes nesses dispositivos, tornando-os capazes de tirar fotos de alta qualidade.

Nesse contexto, este projeto visa criar uma forma alternativa para a extração de biometrias, através de uma foto da digital a partir principalmente de um *smartphone*. Por meio de uma técnica de captura e pós-processamento das fotos, utilizando uma série de filtros, as impressões digitais se tornam mais evidentes, facilitando sua comparação com biometrias obtidas por leitores biométricos tradicionais ou por meio dessa abordagem alternativa. É importante ressaltar que, embora leitoras biométricas também sejam cada vez mais comuns em *smartphones*, os sistemas operacionais desses dispositivos não oferecem APIs ou interfaces de captura de biometrias para validação externa, limitando a confirmação de identidade apenas no âmbito local, por questões de privacidade.

Por fim, o projeto propõe o desenvolvimento de uma API REST para a verificação de identidade com base nas impressões digitais extraídas por foto ou por leitor biométrico especializado. Essa API pode ser usada para avaliar a precisão do método proposto e pode ser aplicada em novos projetos, a fim de reduzir os custos envolvidos e facilitar o acesso para pessoas que não possuem um leitor de biometrias. O método proposto desenvolvido obteve ótimos resultados com taxa média aproximada de FAR de 0,001%, TAR de 77% e EER de 1% (considerados excelentes pelo NIST)

Palavras chave: Biometria, Autenticação biométrica, Verificação biométrica, API REST, Impressões digitais, *Smartphone*, Processamento de imagens.

ABSTRACT

In recent years, there has been an increase in the use of fingerprints for authentication and identity verification. However, this approach requires specialized and costly hardware to extract the biometric information, which hinders its popularization and makes it less accessible. Simultaneously, there has been a rise in the usage of smartphones, which, coupled with technological advancements, has allowed for the evolution of cameras in these devices, enabling them to capture high-quality photos.

In this context, this project aims to create an alternative method for biometric extraction, primarily using a photo of the fingerprint taken with a smartphone. By employing a technique of capture and post-processing of photos, utilizing a series of filters, the fingerprints become more evident, facilitating their comparison with biometrics obtained from traditional biometric readers or through this alternative approach. It is important to note that, although biometric readers are increasingly common in smartphones, the operating systems of these devices do not provide APIs or interfaces for capturing biometrics for external validation, limiting identity confirmation only within a local scope due to privacy concerns.

Lastly, the project proposes the development of a REST API for identity verification based on fingerprints extracted from photos or specialized biometric readers. This API can be used to assess the accuracy of the proposed method and can be implemented in new projects to reduce costs and facilitate access for individuals who do not possess a biometric reader. The proposed method achieved excellent results with an approximate average False Acceptance Rate (FAR) of 0.001%, True Acceptance Rate (TAR) of 77%, and Equal Error Rate (EER) of 1% (considered excellent by NIST).

Keywords: Biometry, Biometric authentication, Biometric verification, API REST, Fingerprint, Smartphone, Image processing.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE QUADROS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIS	*Automated Biometric Identification System*
AC	Autoridade Certificadora
AFIS	*Automated Fingerprint Identification System*
AHE	*Adaptive Histogram Equalization*
API	*Application Programming Interface*
BMP	Bitmap
CCD	*Charge-coupled device*
CIA	*Confidentiality, Integrity and Availability*
CLAHE	*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*
CMOS	*Complementary metal–oxide–semiconductor*
DNA	Ácido desoxirribonucleico
EER	*Equal error rate*
FAR	*False acceptance rate*
FBI	*Federal Bureau of Investigation*
FpMV	*Fingerprint Minutiae Viewer*
FRR	*False rejection rate*
GIF	*Graphics Interchange Format*
GIMP	*GNU Image Manipulation Program*
HDR	*High Dynamic Range*
ICP-Brasil	Infraestrutura de Chaves Públicas Brasileira
ICP	Infraestrutura de Chaves Públicas
ITI	Instituto Nacional de Tecnologia da Informação
JPEG/JPG	*Joint Photographic Experts Group*
JSON	*JavaScript Object Notation*
LED	*Light-Emitting Diode*
LFD	*Live Finger Detection*
MP	Megapixel
NFIQ	*NIST Fingerprint Image Quality*
NIST	*National Institute of Standards and Technology*
PNG	*Portable Network Graphics*
PPI	*Pixel Per Inch*

PSBio	Prestador de Serviço Biométrico
REST	*Representational State Transfer*
SDK	*Software Development Kit*
SERPRO	Serviço Federal de Processamento de Dados
SVG	*Scalable Vector Graphics*
TAR	*True acceptance rate*
TRR	*True rejection rate*
WSQ	*Wavelet scalar quantization*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O uso de biometrias para identificação de pessoas é uma realidade há muito tempo. Na década passada as impressões digitais e a verificação biométrica eram utilizados majoritariamente para fins jurídicos e identificação criminal (CERTISIGN, 2017). No entanto, com a popularização e avanço tecnológico, vários setores adotaram o uso da biometria intermediada com o computador para inúmeras finalidades. Dentre elas, as mais utilizadas são: autenticação de usuários (seja essa autenticação feita para acesso a uma área restrita, desbloquear o *smartphone*, fazer login em aplicativos e acesso a dados sensíveis) e a identificação de pessoas - sendo utilizada para votações, emissões de documentação e emissões de certificados digitais (MARCONDES, 2020).

Biometria, como o próprio nome já diz, significa a medição de características físicas ou comportamentais individuais de cada ser, usadas para identificá-lo (GOGONI, 2019). Existem várias formas de fazer essa identificação biométrica, dentre elas estão: impressões digitais dos dedos, face, palma da mão, íris, retina, voz, comportamento, DNA, entre outras (MARCONDES, 2020). Das formas citadas uma das mais difundidas é a identificação biométrica por meio das impressões digitais. Isso se deve ao fato de as impressões serem únicas (são distintas até mesmo para gêmeos univitelinos e entre os diferentes dedos da mão), perenes (formadas durante a gestação e não sofrem mudanças significativas ao longo da vida) e imutáveis (não se alteram com o desgaste ou após acidentes).

A identificação biométrica por meio de impressões digitais geralmente é realizada usando leitores biométricos equipados com sensores ópticos. No entanto, esses leitores têm um alto custo (HANSEN, 2021) e são difíceis de obter em certas áreas, como regiões rurais. Além disso, eles não são facilmente integrados pelos desenvolvedores, que necessitam implementar inúmeras formas de utilizar as mais variadas leitoras disponíveis no mercado, por não existir uma padronização de comunicação e cada uma possuir um SDK distinto (NEUROTECHNOLOGY, 2022). Somado ao fato de ser um dispositivo caro, os leitores biométricos não estão amplamente difundidos e não são comumente encontrados em residências e

empresas, o que dificulta o acesso geral à autenticação biométrica por meio de impressões digitais. Isso obriga muitas pessoas a se deslocarem pessoalmente para locais que possuam esses dispositivos, o que não é ideal em um contexto pandêmico como o atual.

Apesar de ser cada vez mais comum a existência de leitores de impressão digital em *smartphones*, esses sensores não são diretamente acessíveis aos apps para captura de biometria, ficando dedicados ao desbloqueio de senhas no próprio celular (NEC, 2022). Ou seja, não é permitido a um *app* obter as minúcias biométricas (formas mínimas que compõem a impressão digital que será detalhada no capítulo 2) para compará-las a uma base pré-existente externa - é permitido apenas obter uma confirmação ou não de que a biometria é correspondente àquela previamente cadastrada no *smartphone* para liberar o acesso, por exemplo, a uma credencial armazenada no celular.

A fim de sanar os problemas citados, esse projeto se propõe a trazer uma ferramenta que irá utilizar a câmera dos *smartphones* para a extração das digitais do usuário e ser possível realizar a verificação biométrica da digital com base em outra obtida independente do método escolhido, seja ele o tradicional por meio de *hardwares* específicos ou pela câmera do *smartphone*, sendo possível também a aferição da qualidade da biometria e a probabilidade destas pertencerem a mesma pessoa, levando em consideração os parâmetros internacionais de qualidade e aceitação de biometrias. A utilização de *smartphones* para o fim proposto é mais acessível e relativamente mais barato que um leitor tradicional, já que os *smartphones* são utilizados também para outros fins e são amplamente utilizados pela população. Outra motivação seria que o SERPRO até mesmo já abriu um edital para o desenvolvimento de uma aplicação com esta finalidade (DRULLIS, 2022).

É também necessário garantir a segurança da base de fotos, já que se alguém conseguir acessar indevidamente esta base, poderia facilmente burlar o sistema e roubar a identidade de outra pessoa. Além disso, é importante identificar formas de assegurar que o dedo capturado é de uma pessoa viva e que não é um dedo falso. A garantia de segurança deste novo método será discutida posteriormente no texto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Esse trabalho propõe o desenvolvimento de uma ferramenta para verificação biométrica que irá utilizar a câmera dos *smartphones* para a extração das impressões digitais do usuário, aliado a tecnologias de processamento de imagem e SDK para verificar qualidade e *match* biométrico. Bem como estudar a qualidade das biometrias, probabilidade de aceitação de um falso positivo ou falso negativo e realizar uma comparação da confiabilidade das digitais obtidas por meio da extração por foto em confronto à extração tradicional.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Extrair impressões digitais de um dedo por meio de uma foto;
- Processar foto para que evidencie as minúcias e impressões digitais;
- Verificar qualidade das biometrias obtidas, para que fique dentro dos padrões estabelecidos internacionalmente pelo NIST;
- Determinar e avaliar taxas de FAR (*False acceptance rate*), FRR (*False rejection rate*), TAR (*True acceptance rate*), TRR (*True rejection rate*) e EER (*Equal error rate*) obtidas;
- Comparar biometrias obtidas por fotos com biometrias obtidas por *hardwares* especialistas;
- Desenvolver uma API REST que realize a autenticação e validação biométrica a partir de duas digitais informadas, sendo elas dois WSQs, duas fotos ou um WSQ e uma foto.

1.3 Metodologia

Para atingir os objetivos deste trabalho será adotada a seguinte metodologia:

1. Estudo de como funciona a identificação biométrica com base nos WSQs obtidos por leitores ópticos convencionais;

2. Estudo de como extrair impressões digitais de fotos;

3. Estudo das tecnologias necessárias para extração da biometria (será utilizada a linguagem Java com o framework Spring junto do SDK de identificação biométrica da Neurotechnology);

4. Extração de biometrias e rodadas de testes com vários tipos de fotos e filtros diferentes (por meio de recorte, redimensionamento das fotos e algoritmos de processamento de imagens) a fim de se definir um algoritmo padrão;

5. Análise dos WSQs e NFIQ obtidos;

6. Comparação de biometrias e análise de batimento (*match*) biométrico ou não;

7. Análise dos índices de FAR, FRR, TAR, TRR e EER obtidos;

8. Comparação de biometrias obtidas por fotos com as lidas pelos leitores, variando o NFIQ das biometrias envolvidas;

9. Comparação de duas biometrias obtidas por fotos, variando o NFIQ das biometrias envolvidas;

10. Desenvolvimento da API REST que faz a verificação biométrica;

11. Análise dos resultados obtidos com proposições para trabalhos futuros.

1.4 Organização deste documento

Neste capítulo estão descritas as motivações para a realização do trabalho, bem como seus objetivos, já o restante do documento será organizado da seguinte forma:

No capítulo 2, será apresentada toda a fundamentação teórica necessária para a correta compreensão deste trabalho, por meio de conceitos sobre biometria, segurança, autenticação e verificação biométrica, minúcias das impressões digitais, NIST, NFIQ, fotos e filtros em imagens.

No capítulo 3, serão apresentados os trabalhos relacionados ao tema de obtenção de biometrias (impressões digitais) por fotos, destacando a implementação e análise feitas nestes trabalhos correlatos. É apresentado também uma revisão da literatura e o estado da arte no qual a proposta está inserida.

No capítulo 4, será apresentada a proposta deste trabalho, mostrando as tecnologias envolvidas para a realização da extração de impressões digitais via foto, tratamento de imagens, batimento biométrico e desenvolvimento da API proposta.

No capítulo 5, serão apresentados os testes e os resultados obtidos com validação de qualidade e análise das taxas de FAR, FRR, TAR, TRR e EER obtidas.

Por fim, no capítulo 6, será apresentado as conclusões, com revisão geral, contribuição, limitações e os próximos passos para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a total compreensão da proposta deste trabalho é necessário estabelecer uma base teórica do que é biometria e para que serve, como funcionam as impressões digitais, formato de armazenamento dessas biometrias, algoritmos de aferição de qualidade, a segurança envolvida no processo, autenticação e verificação biométrica, entendimento básico de fotografia e tratamento de imagens. Portanto, nesta seção serão contemplados todos os tópicos mencionados.

2.1 Biometria

Biometria vem da junção das palavras gregas Bios (que significa “vida”) e metron (que significa “medida”), significando então a medição de características físicas ou comportamentais individuais de cada ser, usadas para identificá-lo (GOGONI, 2019). O princípio básico da biometria é a utilização das inúmeras características que distinguem um ser de outro para identificar um único indivíduo (MARCONDES, 2020).

Existem várias formas de biometria, dentre elas estão: impressões digitais dos dedos, face, palma da mão, íris, retina, voz, comportamento (como a pessoa anda, digita, escreve ou até mesmo assina), DNA, veias, entre outras. Das formas citadas, as mais utilizadas atualmente são reconhecimento de face e impressões digitais, as quais são amplamente difundidas por serem relativamente fáceis de serem coletadas e analisadas (MARCONDES, 2020).

A utilização do reconhecimento facial tem como vantagem ser rápido e o baixo custo envolvido, porém apresenta problemas com algumas características fundamentais para um bom reconhecimento biométrico, como a unicidade (irmãos gêmeos compartilham de faces muito semelhantes), a perenidade (mudam de acordo com as demasiadas fases da vida) e a imutabilidade (podem mudar com acidentes). Por outro lado temos as impressões digitais, que sanam todos os problemas de unicidade, perenidade e imutabilidade do reconhecimento facial, aliado a boa confiabilidade, porém mais demorado e custoso (ONESPAN, 2022).

A biometria é amplamente utilizada nos dias de hoje, sendo muito comum em emissão de documentos oficiais do governo, certificados digitais, votações

(biometria eleitoral), identificação, controle de acesso a ambientes e áreas restritas, login em *smartphones* e em aplicativos *mobile,* e para identificação criminal (principal grande uso nas décadas anteriores).

O uso das biometrias está normalmente relacionado com segurança e para isso é necessário autenticá-las ou verificá-las a partir de alguns processos (MARY, 2022), que são eles:

1. **Captura:** A primeira etapa é o registro em si do que será utilizado para a comprovação da identidade. Ou seja, é o processo de aquisição da amostra biométrica (digital, face, íris, etc);

2. **Extração:** A extração é etapa onde a amostra coletada é traduzida em informações identificáveis de acordo com o tipo de biometria utilizado, onde cada tipo possui sua própria forma de tradução, gerando o *template.*

3. **Criação de Padrão:** Após ter traduzido as informações para um *template*, é feito um cadastro desse *template* como uma forma padrão e confiável dessa informação, que poderá ser usada como base futuramente.

4. **Comparação:** Após o registro e a criação do padrão, a comparação é feita para comprovar se as novas informações obtidas são semelhantes aos cadastros anteriores. Nessa etapa a comparação pode resultar em um batimento ou não, podendo ser realizada novamente até atingir o resultado esperado.

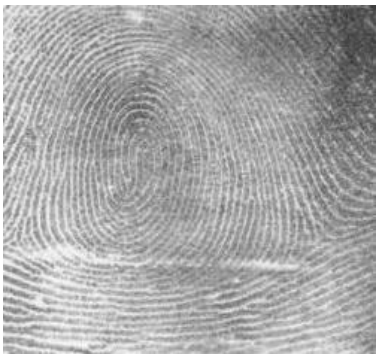
2.2 Impressões digitais

Impressão digital (também conhecidos como datilograma ou dermatoglifo) é o desenho formado pelas papilas (elevações da pele), presentes na ponta dos dedos, deixado em uma superfície lisa. As impressões digitais possuem algumas características já citadas anteriormente, como a unicidade (são distintas até para gêmeos univitelinos e entre os demais dedos da mão), perenidade (as papilas são formadas na gestação e não mudam consideravelmente ao longo da vida, até

mesmo na morte) e imutabilidade (não mudam se desgastadas ou após acidentes), que permitem identificar de forma muito confiável uma pessoa (MARY, 2022).

É importante citar que elas possuem um alto grau de variação entre os próprios dedos e os dedos de outras pessoas, porém existem raros casos de pessoas que não possuem impressões digitais - Síndrome de Nagali (STROMBERG, 2014). O uso de impressões digitais para identificar pessoas não é uma prática recente, sendo utilizada já na antiguidade como forma de autenticar documentos e selar operações comerciais (WATSON, 2008). As digitais foram o primeiro método especificamente utilizado para classificação e identificação oficial de seres humanos, tendo Henry Faulds publicado o primeiro artigo (1880) em que discutia o uso de impressões digitais como meio de identificação e classificação pessoal, assim como o uso de tinta de impressora como forma para obtê-las. Posteriormente Francis Galton publicou seu livro “Impressões Digitais”, embasado no trabalho de Faulds. O livro trazia o primeiro sistema de classificação das impressões digitais, com três padrões (CERTISIGN, 2017) básicos analisando as minúcias dos dedos – laçada (*loop*), arqueada (*arch*) e verticilo (*whorl*) - que são detalhadas no quadro 1.

Quadro 1: Tipos de impressões digitais

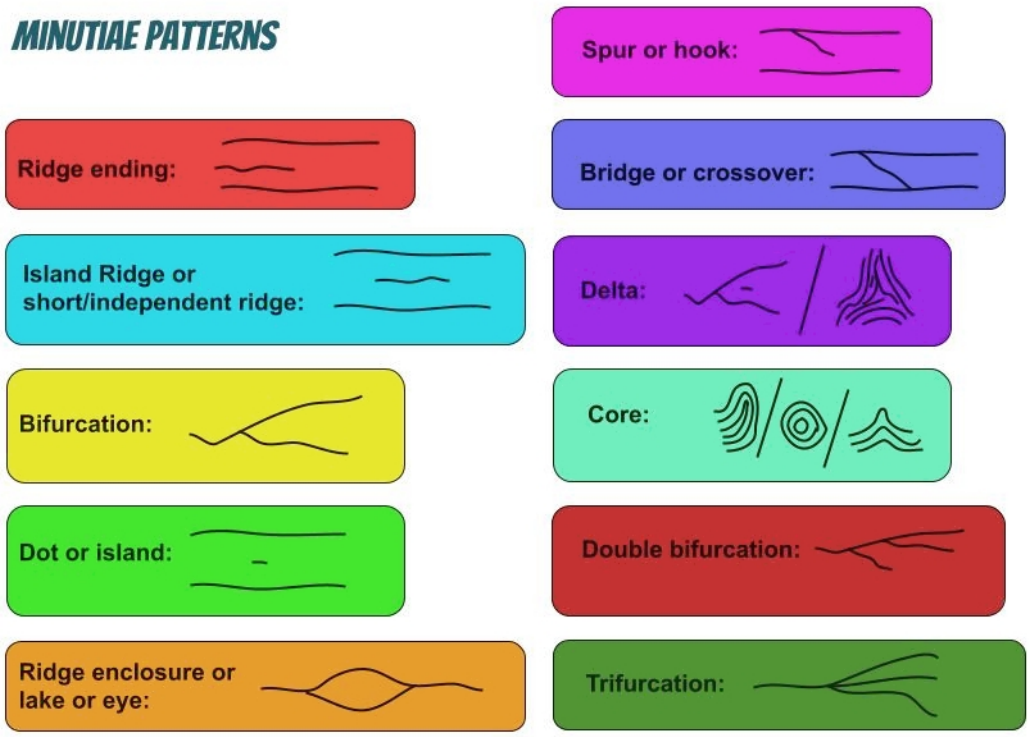
Arqueada(*Arch*)	**Laçada(*loop*)**	**Verticilo (Whorl)**
		

Fonte: Wikipédia (2022)

Com o passar dos anos a prática de analisar as minúcias dos dedos se tornou mais comum (MÁRCICO, 2022), criando a área de datiloscopia (processo de identificação humana por meio das impressões digitais), que evoluiu ainda mais com o sistema de classificação das minúcias (que são formas mínimas que compõem a impressão digital, possuindo vários padrões distintos que podem ser utilizados em

conjunto para identificar uma pessoa), definindo algumas formas padrões a serem analisadas nos dedos, conforme figura 1.

Figura 1: Padrões de minúcias



Fonte: Wikipédia (2022)

Inicialmente a coleta de digitais ocorria por meio de aplicação de tinta no dedo e realização de pressão em uma folha de papel lisa, a qual ficava marcada com as impressões do sujeito, porém com a popularização e modernização, surgiram várias formas de fazer essa coleta (MÁRCICO, 2022), sendo elas a coleta por sensores ópticos (sensores que tiram uma espécie de foto do dedo por meio de infravermelho), sensores CMOS ou capacitivos (utilizam de corrente elétrica para gerar a imagem das digitais), sensores por ultrassom (utilizam de ondas sonoras de alta frequência para obter a imagem da impressão digital) e sensores termais (utilizam das diferentes temperaturas entre os sulcos e as papilas para formar a imagem).

Por fim, é importante ressaltar que a qualidade da impressão digital obtida depende do método utilizado na coleta, e com um bom método e uma boa biometria, normalmente são encontrados entre 40 e 100 minúcias. (BANSAL; SEHGAL; BEDI, 2011)

2.3 WSQ

Uma das formas de registro das minúcias da impressão digital é com base em imagens em escala de cinza, as quais serão armazenadas numa base de comparação que tende a ser muito grande, portanto é necessário utilizar de algum algoritmo de compressão para que a imagem obtida possa ser utilizada sem consumir muito espaço de armazenamento e mesmo assim ter uma boa qualidade para diminuir o risco de falsos positivos em comparações.

O algoritmo utilizado para fazer essa compressão otimizada em imagens em escala de cinza é o WSQ (Wavelet Scalar Quantization), que é um algoritmo baseado na teoria de *wavelet* e foi desenvolvido pelo FBI em parceria com o Los Alamos National Laboratory, e com o NIST, tendo se tornado um padrão na área de biometrias, tanto nos Estados Unidos da América quanto em vários outros países do mundo. O arquivo gerado após a execução do algoritmo possui a extensão .wsq e é geralmente utilizado para armazenar imagens com 500 ppi. (NIST, 2022)

O próprio NIST fornece um software para visualizar as minúcias e a qualidade de um WSQ, sendo este conhecido como Fingerprint Minutiae Viewer (FpMV). Vale destacar que o WSQ possui uma perda de qualidade por compressão, portanto gerar um WSQ a partir de outro resultará em uma menor qualidade (LIBERT; ORANDI; GRATHAM, 2012).

2.4 NFIQ

Após gerado o registro WSQ é necessário verificar a qualidade dessa biometria obtida, para que não sejam consideradas biometrias de baixa qualidade, as quais impactam significativamente na quantidade de falsos positivos e falsos negativos nas comparações feitas com a base. Para isso o NIST especificou um algoritmo para averiguar a qualidade das imagens, o conhecido NFIQ - *NIST Fingerprint Image Quality*.

2.4.1 NFIQ 1.0:

A execução da primeira versão deste algoritmo que funciona analisando as minúcias encontradas na digital capturada fornece um *score* NFIQ que varia de 1 a 5, sendo 1 a melhor qualidade e 5 a pior qualidade. Por exemplo, no contexto das biometrias utilizadas no processo de emissão de certificados digitais na ICP-Brasil, só são aceitas biometrias com qualidade de NFIQ de 1 a 3 inclusive, sendo consideradas de baixíssima qualidade as que possuírem *score* 4 e 5. (ICP-Brasil, 2021)

2.4.2 NFIQ 2.0:

A segunda versão do algoritmo NFIQ tem uma melhor capacidade de avaliação das biometrias, podendo distinguir melhor o que é ou não uma boa biometria e para isso adicionou mais níveis de *scores*, que após a execução do algoritmo fornece um *score* de 1 a 100. Sendo assim, muito mais preciso que a versão inicial do NFIQ. (NIST, 2021)

2.5 Segurança

2.5.1 Segurança da informação

De acordo com Stallings (2015) existem cinco conceitos que definem os objetivos fundamentais da segurança da informação, compostas pela grande tríade CIA - Confidentiality (Confidencialidade), Integrity (Integridade) e Availability (Disponibilidade) e por mais dois conceitos introduzidos por ele que são autenticidade e responsabilização.

1. **Confidencialidade:** Se divide em dois sub conceitos que são a confidencialidade de dados - que diz respeito a limitar o acesso à informação apenas a quem tenha autorização - e a privacidade - que garante que os indivíduos tenham controle de como e quais informações serão compartilhadas.

2. **Integridade:** Garantir que uma informação não seja alterada por alguém sem permissão e nem de forma desconhecida.

3. **Disponibilidade:** Garantir que os usuários corretos tenham acesso às informações sem que sofra qualquer bloqueio ao acessá-las.

4. **Autenticidade:** É a capacidade de validar a legitimidade de uma mensagem, verificando a origem dessa mensagem, significando que os usuários realmente são quem dizem que são.

5. **Responsabilização / Não Repúdio:** Consiste na responsabilização das ações tomadas por um usuário, visando garantir que o autor não negue ter realizado tal ação. É necessário registrar as atividades para detectar as violações.

2.5.2 Segurança da biometria

O roubo ou falsificação de biometrias são práticas comuns no dia de hoje (KHANDELWAL, 2014), onde muitos sistemas utilizam das biometrias para permitir ou não o acesso a determinada área, o que faz com que ela seja alvo de muitos ataques. Porém cada tipo de biometria possui ataques diferentes, sendo a mais visada a biometria facial, por ser facilmente obtida e copiada. Os atacantes utilizam de uma foto do usuário do qual querem se passar ou até mesmo utilizam de tecnologias de *deepfake* para imitar o rosto do indivíduo (VIANA, 2022).

Nestes casos de roubo ou cópia de biometria facial a principal ação a fim de proteger o usuário é só permitir o envio de *streams* de vídeo controlado pela aplicação responsável pela coleta da face, que deve ser segura a manipulações, validando a vivacidade do conteúdo apresentado por meio de prova de vida (*liveness check*).

Já nos casos de ataque às impressões digitais, estes ocorrem normalmente com o uso de dedos de silicone - que foram feitos com base no dedo do indivíduo que se quer atacar - ou com a amputação do dedo do usuário. Para isso é necessário ter algum mecanismo de detecção de vivacidade do dedo, algo que nas leitoras ópticas específicas é realizado via uma tecnologia de LFD (Live Finger

Detection) que por meio de padrões em dedos falsos e infravermelho, é possível assegurar de que o dedo ali presente é de uma pessoa viva e também não é uma cópia (SUPREMA, 2016).

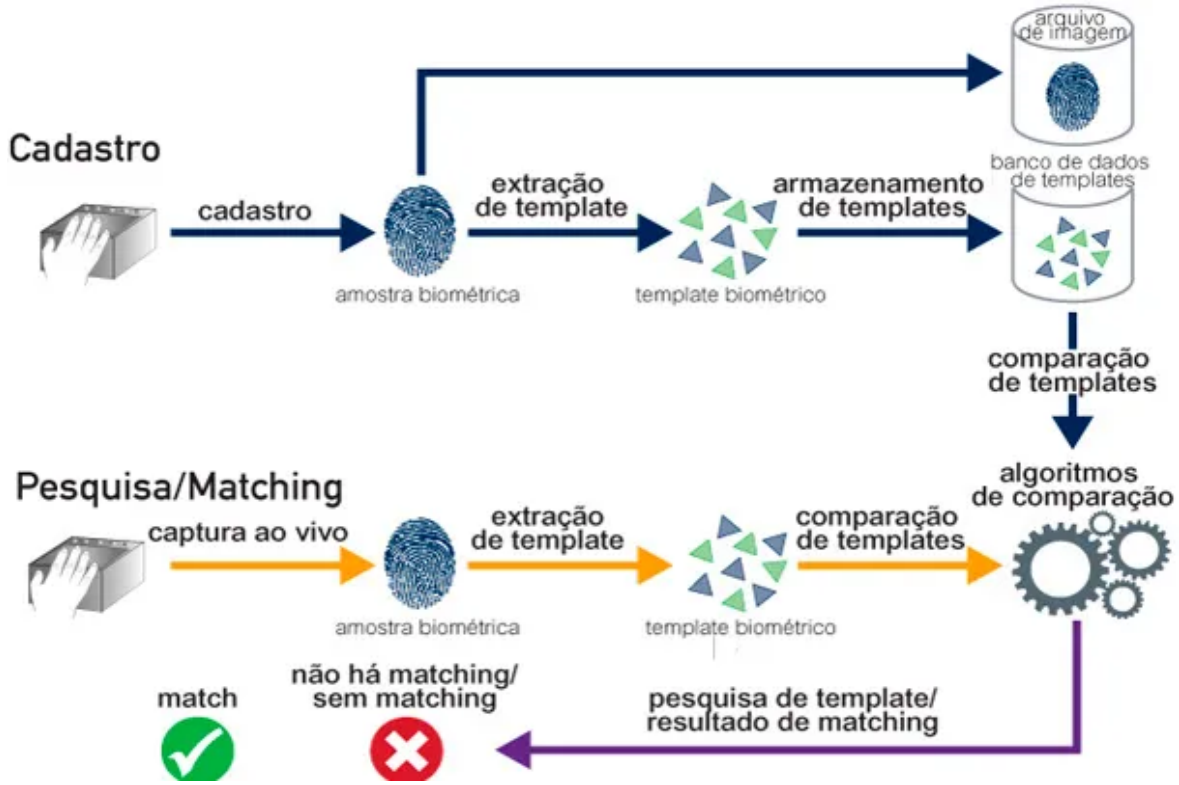
Com isso, fica evidente que ter o controle da coleta reduz drasticamente a possibilidade de ataques, visto que caso a fonte de coleta seja segura ou houver a presença de alguém confiável para fazê-la, é muito mais difícil fraudar a biometria sem que seja percebido. Ainda é necessário tomar mais algumas medidas, como o uso de algoritmos confiáveis e de precisão para extrair e comparar as biometrias, uma base confiável de dados, checagens adicionais e uso da biometria somente como parte da solução e não como substituto de todas as formas de segurança.

2.6 Autenticação e verificação biométrica

A fim de se utilizar a biometria para os seus variados fins, é necessário realizar uma operação de autenticação biométrica, método que consiste em validar a veracidade da identidade de um usuário por meio da verificação biométrica, processo que irá verificar a equivalência da biometria apresentada com outra previamente cadastrada e atestada como verdadeira - processo feito com comparação 1:1.

Para a verificação biométrica ocorrer, é necessário que a biometria verdadeira do usuário já tenha sido extraída em um *template* biométrico anteriormente e cadastrado-a em uma base biométrica de *templates* confiáveis, só então é possível, por meio de nova coleta, verificar a autenticidade dessa nova biometria com base na anterior (MARCONDES, 2020). Este processo de cadastro e *match* com a base de dados é exibido na figura 2:

Figura 2: Processos da autenticação biométrica



Fonte: MARCONDES, 2020

Antigamente essa verificação era feita manualmente analisando as duas biometrias coletadas e validando se pertenciam ou não ao mesmo indivíduo, por um certo grau de similaridade aceitável entre as duas coletas, porém essa validação manual evoluiu e hoje é feita via sistemas automatizados e especialistas na verificação biométrica, onde cada tipo de biometria possui a sua própria forma de validação.

Vale destacar que o grau de similaridade é um valor que deve ser definido previamente e consiste num valor conhecido como *matching threshold* (limite de correspondência), o qual define até que ponto duas biometrias são consideradas iguais e pertencentes ao mesmo indivíduo. Um bom valor de *threshold* pode influenciar muito na quantidade de falsos positivos ou falsos negativos na base biométrica (MARY, 2022).

Para todos os cadastros feitos na base é recomendável a execução de uma operação de identificação (1:N - busca de 1 amostra na base de N registros) a fim de validar a existência de biometrias duplicadas ou fraudes (registro existente apontando para outra pessoa), a qual é uma operação mais lenta e custosa que a

verificação, porém extremamente importante para constituir uma base confiável e livre de fraudes (MARY, 2022).

Após feito o cadastro de várias biometrias essas irão compor a base do *Automated Biometric Identification System* - ABIS (AWARE, 2022), que nada mais é do que o sistema automatizado especialista em identificação biométrica ou AFIS - *Automated Fingerprint Identification System* no caso de um sistema automatizado especialista em identificação apenas de impressões digitais.

A composição de base e verificação biométrica por meio de impressões digitais segue o seguinte formato:

1. Coleta das impressões digitais;
2. Extração do *template*;
3. Validação do *score* NFIQ dentro do aceitável;
4. Identificação (1:N) na base biométrica com base em comparação das minúcias extraídas e batimento (*match*) de biometrias semelhantes dentro do limiar do *matching threshold*;
5. Resolução de conflitos (falso positivo ou fraudes);
6. Cadastramento biométrico;
7. Nova coleta de impressões digitais;
8. Extração do *template*;
9. Validação do *score* NFIQ dentro do aceitável;
10. Verificação (1:1) da impressão digital coletada com a previamente cadastrada para aquele usuário na base;

Por fim, a autenticação biométrica para ser segura necessita atingir uma certa porcentagem de aceitação ou não de usuários com base na similaridade das mesmas, para isso existe a taxa de FAR (*False acceptance rate*), FRR (*False rejection rate*), TAR (*True acceptance rate*), TRR (*True rejection rate*) e EER (*Equal error rate*). O significado delas são: (MAJHI et al., 2022; INNOVATRICS, 2022; MARY, 2022; ANDRESS, 2014)

- **FAR:** Também conhecida como taxa de fraude, é medida da probabilidade de um usuário que não corresponde a pessoa na qual está sendo realizada a autenticação biométrica ser aceita pelo sistema. É representado como a porcentagem de vezes que um

usuário não autorizado é aceito incorretamente pelo sistema, para que um sistema de autenticação seja mais seguro, essa medida deve ser minimizada.

- **FRR:** Também conhecida como taxa de rejeição, é medida da probabilidade de um usuário que corresponde a pessoa na qual está sendo realizada a autenticação biométrica não ser aceita pelo sistema. É representado como a porcentagem de vezes que um usuário autorizado não é aceito incorretamente pelo sistema, para que um sistema de autenticação seja mais confiável, essa medida deve ser minimizada.

- **TAR:** Também conhecido como taxa de *match*, é medida da probabilidade de um usuário autorizado ser aceito corretamente pelo sistema. É representado como a porcentagem de vezes que uma instância de pessoa autorizada é reconhecida corretamente pelo sistema, para que um sistema de autenticação seja mais seguro, essa medida deve ser maximizada.

- **TRR:** É representado como a porcentagem de vezes que uma pessoa não autorizada é negada corretamente pelo sistema, para que um sistema de autenticação seja mais seguro, essa medida deve ser maximizada.

- **EER:** É representado como a porcentagem onde o FAR é igual ao FRR. Mede a acurácia de um sistema biométrico, pois exibe o ponto onde a quantidade de falsas negações se torna menor do que a quantidade de falsas aceitações e vice-versa. Para que um sistema biométrico tenha a melhor segurança possível esse valor deve ser minimizado.

As taxas aceitas pela ICP-Brasil, por exemplo para um PSBio, são as expostas na figura 3:

Figura 3: Taxas de FAR e TAR aceitas pela ICP-Brasil para um PSBio

3.6.3 O sistema utilizado para realizar as identificações dos requerentes de um certificado digital deve, para um espaço amostral de 10 mil registros, ter, no mínimo, a seguinte acurácia:

a) impressão digital (NFIQ = 1 e indexando um dedo): para FAR (false accept rate) de 0,01%, TAR (true accept rate) de, no mínimo, 99,0%.

b) impressão digital (NFIQ = 1 e indexando dois dedos): para FAR de 0,01%, TAR de, no mínimo, 99,4%.

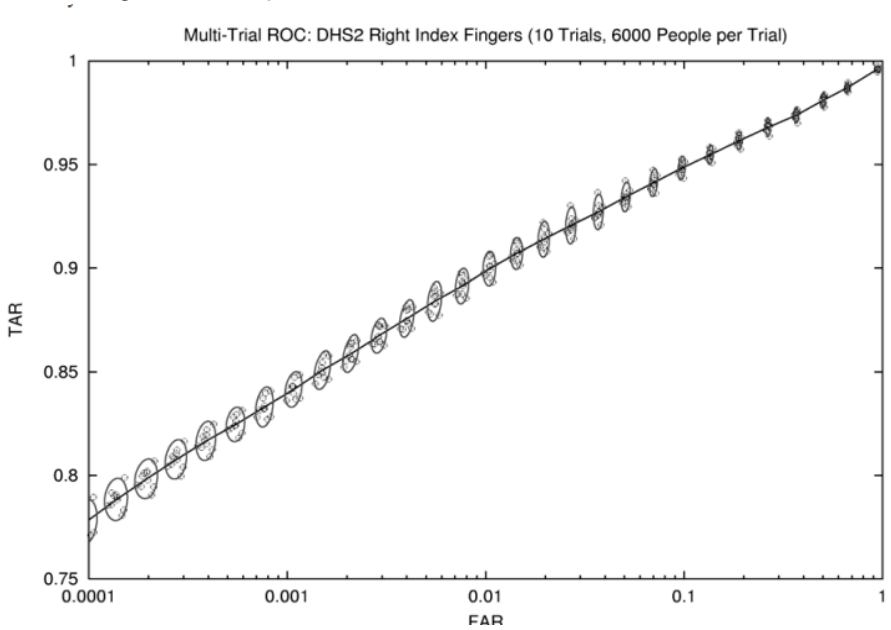
c) impressão digital (NFIQ = 1 e indexando três ou quatro dedos): para FAR de 0,01%, TAR de, no mínimo, 99,8%.

Procedimentos para Identificação Biométrica na ICP-Brasil DOC-ICP-05.03 v.3.0 *18/57*

Fonte: ICP-Brasil DOC-ICP05.03 v3.0 (2021)

Ainda quanto às taxas aceitas, o NIST especifica que o recomendado para uma verificação de impressões digitais é de um TAR de 96% para um FAR de 1%, assim como um TAR de cerca de 85% para um FAR de 0,001%. Assim como pode ser visto na figura 4. Ainda de acordo com o NIST o recomendado para uma verificação biométrica envolvendo faces é de um TAR de 90% para um FAR de 1% e um TAR de 70% para um FAR de 0,01%, isso com uma boa condição de iluminação, para cenários externos esses índices caem para 37% de TAR para um FAR de 1%

Figura 4: Relação entre taxas de FAR e TAR conforme o NIST



Fonte: NISTIR 7204 (2005)

Assim como mencionado anteriormente nesta seção, após a captura da imagem da biometria é necessário extrair um template da impressão digital que contenha as informações das minúcias e todos os pontos necessários para a identificação de um indivíduo. Para realizar essa extração normalmente é necessário um algoritmo específico, que para a realização deste trabalho será o algoritmo de extração de templates da Neurotechnology, que é um dos melhores existentes no mundo, tendo recebido inúmeros prêmios como um dos mais rápidos e precisos (NEUROTECHNOLOGY, 2023; FVC-ONGOING, 2023), porém existem outras alternativas gratuitas de menor desempenho, como o SourceAFIS e o MINDTCT (criado pelo NIST), porém de qualidade inferior. A escolha ou desenvolvimento de um bom extrator, interfere diretamente na qualidade do sistema biométrico.

Além do extrator é também necessário um *matcher* para realizar a comparação de dois templates e confirmar ou não a autenticação biométrica. Assim como o extrator, o *matcher* também interfere na qualidade do sistema biométrico, porém esse tem um impacto ainda maior, já que é quem efetivamente irá determinar se duas biometrias pertencem ou não ao mesmo indivíduo. Novamente o matcher utilizado será fornecido pela Neurotechnology, mas podem ser encontrados outros matchers como o SourceAFIS e o BOZORTH3 (criado pelo NIST), mas que novamente apresentam qualidade inferior.

2.7 Fotografia

A fotografia está totalmente difundida na sociedade atual e consiste na técnica de criar imagens por exposição luminosa em uma superfície fotossensível. A fotografia evoluiu consideravelmente ao longo dos anos, partindo de fotos em preto e branco com câmeras analógicas para fotos coloridas tiradas por câmeras digitais. As câmeras digitais tiveram um grande avanço tecnológico a partir do uso dos *smartphones* que fez com que câmeras melhores fossem disponibilizadas por um menor preço para um maior número de pessoas (PORTO, 2022).

A câmera digital presente nos *smartphones* é composta por um sensor chamado de CCD ou CMOS que ao receber luz, converte esta luz em um código eletrônico digital - um quadro com o valor das cores de todos os pixels da imagem -

que será armazenado na memória como um arquivo digital, podendo ter vários formatos (NICE; WILSON; GUREVICH, 2006).

Como mencionado, a imagem gerada é composta por pixeis, e um pixel por definição é o menor ponto que compõe uma imagem, podendo ser iluminado por qualquer cor, sendo assim vários pontos de cores definindo uma imagem. Portanto uma câmera que consiga gerar mais pixeis tem uma maior definição e resolução, pois tem mais pontos de cores gerando a imagem final, isso é entendido como quantidade de Megapixels de uma foto. Um megapixel (usualmente abreviado por MP) é equivalente a um milhão de pixels. Uma câmera de 5MP tem uma resolução de 2560 x 2048, já uma câmera de 12MP tem uma resolução de 4200 x 2690. Ainda sobre resolução, é importante mencionar que ela normalmente é descrita como PPI, que nada mais é do que a quantidade de pixels por polegada da imagem, onde quanto maior o PPI maior a resolução da imagem, já que essa apresenta mais pixels e consegue exibir mais detalhes da figura. Porém é necessário esclarecer que o PPI somente é válido para a resolução da imagem na tela, já que depende de uma área física de exibição, o que não existe na imagem digital (SONY, 2015).

Após feita a captura da foto pela câmera digital, essa foto é armazenada na memória do dispositivo, no caso de *smartphones* na memória interna do dispositivo. Essa foto digital necessita de algum formato específico para ser armazenada, e assim como mencionado podendo ter inúmeros formatos, porém todos eles pertencem a duas categorias (LEOCÁDIO, 2020), a categoria de imagens em bitmap (a mais utilizada, formada por pixels e obtida por câmeras digitais) e a categoria de imagens em vetor (renderizadas em pixels, porém não são construídas por tais, sendo formada por linhas, curvas e formas preenchidas, além de não serem produzidas por câmeras digitais). Imagens desta última categoria podem ser redimensionadas a qualquer tamanho sem que percam sua qualidade, diferentemente das imagens em bitmap. Pertencentes a essas categorias existem alguns formatos (LEOCÁDIO, 2020) como:

- JPEG/JPG (Joint Photographic Experts Group) - Formato mais utilizado, com alta taxa de compressão e perda de qualidade;
- GIF (Graphics Interchange Format) - Formato utilizado para animações com baixa qualidade;

- PNG (Portable Network Graphics) - Boa qualidade e possibilidade de fundo transparente;
- BMP (Bitmap) - Boa qualidade porém arquivo fica muito grande;
- SVG (Scalable Vector Graphics) - Vetorial, pode ser animado, com ótima qualidade e tamanho razoável.

Por fim, é importante ressaltar que existem ainda várias composições de lentes na fotografia (IPSISPRO, 2019), com três categorias de lentes, que são a grande angular (ângulo de visão grande, apresenta distorção), média (ou norma - lente que mais se aproxima do olho humano) e teleobjetiva (distorção de perspectiva). Existe ainda a funcionalidade das lentes, como as lentes macro, que permitem que a foto possa ser tirada de mais perto do objeto. Por isso, ela é ideal para captar detalhes e diferentes texturas, como nas impressões digitais. Na maioria das câmeras podem ser utilizados dois níveis de zoom, o zoom óptico (feito com um conjunto de lentes e evita a perda de qualidade) e o zoom digital (utiliza de software para se aproximar do conteúdo, perdendo qualidade já que não está efetivamente ficando mais próximo do objeto).

2.8 Tratamento de imagens

Tratamento de imagens é a prática de alterar imagens por meio de softwares. Prática comum em fotografias profissionais, onde os fotógrafos aplicam uma série de filtros sobre a imagem para que essa fique mais bonita aos olhos do que na forma original, além de ser muito explorado por sistemas que fazem uso de fotos ou as modificam.

Existem várias formas de se tratar imagens, sendo a edição via softwares especializados (como o Photoshop) uma forma bastante conhecida, porém são muito utilizados algoritmos de tratamento de imagens, que por meio destes a imagem é alterada para atingir um determinado objetivo, como realçar detalhes de uma foto, remover fundos, remover objetos, entre outros.

Um software de edição de imagens que será muito utilizado durante a execução deste trabalho é o GIMP (GNU Image Manipulation Program), sendo um

software de código aberto padrão do Linux, que será utilizado para recortar e redimensionar imagens.

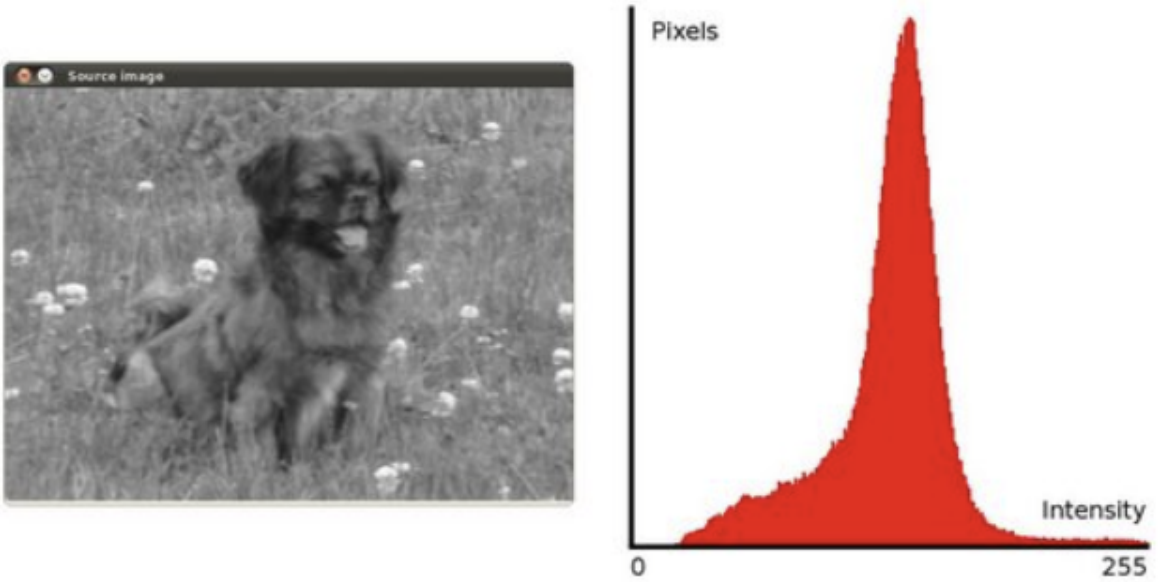
Por fim, é importante mencionar alguns filtros e algoritmos importantes para a conclusão deste trabalho, sendo então detalhados nas seções seguintes.

2.8.1 Equalização

O processo de equalização de uma imagem é o processo de uniformização desta, fazendo com que ela fique mais semelhante, ou seja, igualando a iluminação nas diferentes áreas da imagem. A equalização de imagens normalmente está atrelada a dois processos parecidos que são a equalização adaptativa do histograma (AHE) e a equalização de histograma adaptativo limitada por contraste (CLAHE).

A equalização de histograma é baseada na uniformização dos histogramas da imagem, ou seja, após fazer a representação gráfica dos diferentes valores de intensidade dos pixels de uma imagem em histogramas, é aumentada a distribuição global das intensidades a fim de se obter uma imagem com mais contraste e mais nítida. Na figura 5 é exibida uma imagem com seu histograma antes da equalização (OpenCV, 2022).

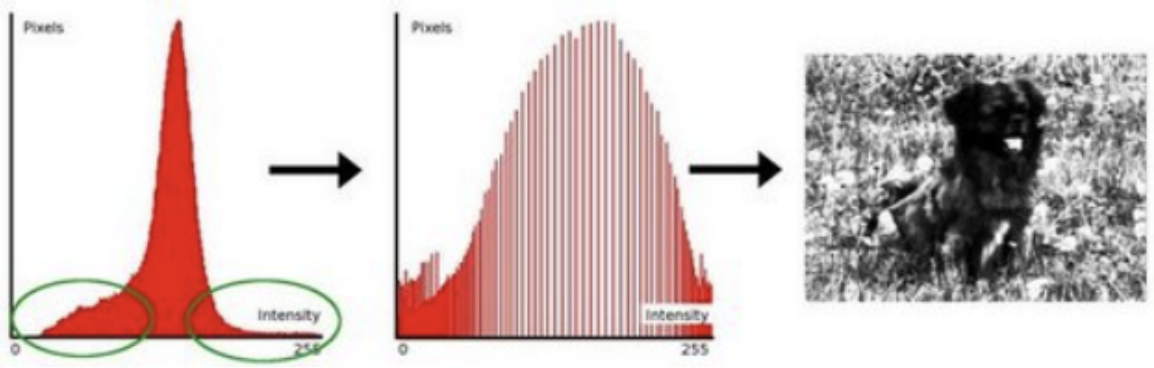
Figura 5: Imagem com seu histograma anterior a aplicação do AHE



Fonte: OpenCV, 2022

Já na figura 6 podemos ver a ação do AHE melhorando o contraste da imagem fazendo uma melhor distribuição global das intensidades.

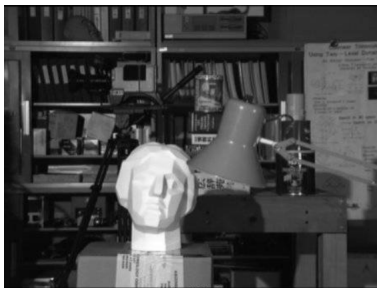
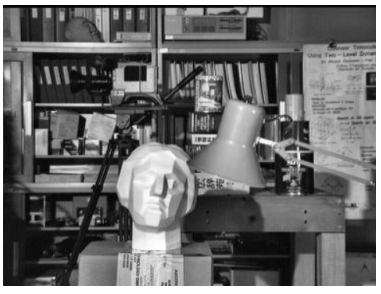
Figura 6: Histograma antes e após a aplicação do AHE e imagem obtida



Fonte: OpenCV, 2022

Como o AHE aplica uma equalização global, em algumas imagens o resultado obtido acaba ficando comprometido em algumas regiões da imagem, para solucionar isso foi criado o CLAHE que faz a equalização em blocos distintos e não a partir da imagem inteira, o que aumenta o contraste de cada região em específico, mas pode acarretar em um aumento de ruídos, o que é solucionado por meio de um limite de contraste (OpenCV, 2022). Com isso as imagens geradas pelo CLAHE são mais nítidas que as geradas pelo AHE e atendem o propósito em uma gama maior de imagens, porém possuem um tempo de processamento maior. No quadro 2 é exibido uma imagem em sua forma original, processada pelo AHE e pelo CLAHE para uma comparação visual dos resultados.

Quadro 2: Imagem original e processada pelo AHE e CLAHE

		
Original	AHE	CLAHE

Fonte: Adaptado de (OpenCV, 2022)

2.8.2 Filtros passa-baixa e passa-alta

Na área de tratamento de imagens é muito comum utilizar filtros que analisam a frequência das imagens e que com base nela permitem somente uma parte da frequência se acentue, dessa categoria existem os filtros de passa-baixa e passa-alta que são caracterizados da seguinte forma (GIOVANINI, 2022; SOUZA, 2016):

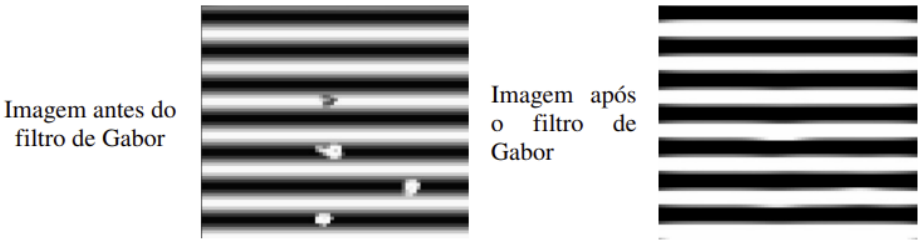
- Filtro passa baixa: Filtro que preserva os componentes de baixa frequência da imagem à custa de reduzir os de alta frequência. São filtros de suavização porque atenuam as regiões de bordas e detalhes finos.
- Filtro passa alta: Filtro que preserva os componentes de alta frequência, realçando as bordas entre diferentes áreas e aumentando a variação de brilho na imagem;

  São exemplos destas categorias os seguintes filtros:

  - **Filtro de Laplace (passa-alta):** Utilizado para detectar regiões de alta variação de cor, ou seja, bordas.
  - **Filtro Gaussiano (passa-baixa):** Utilizado para reduzir o nível de ruído, a fim de diminuir a distorção na imagem.
  - **Filtro de Gabor (passa-baixa):** Utilizado para reforçar texturas nas imagens, podendo recuperar informações das imagens ou até mesmo omitir ruídos.

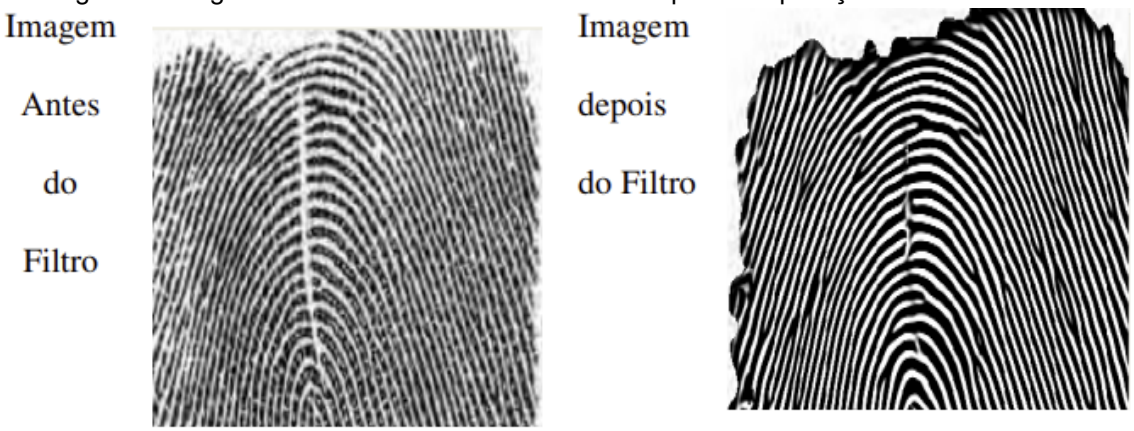
De acordo com Junior (2007), o filtro de Gabor tem o papel de ressaltar as linhas e remover o ruído de uma imagem, e fica evidente o seu funcionamento na figura 7 e na figura 8.

Figura 7: Imagem de linhas antes e depois da aplicação do filtro de Gabor



Fonte: Junior, 2007

Figura 8: Imagem de biometria com falha antes e depois da aplicação do filtro de Gabor



Fonte: Junior, 2007

O filtro de Gabor possui ainda vários parâmetros, que ainda de acordo com Junior (2007), precisam ser ajustados para cada imagem em questão, a fim de se obter o melhor resultado, dentre esses parâmetros alguns deles são utilizados para informar a frequência de aparecimento de linhas na imagem, orientação (inclinação) das linhas e grossura das linhas.

Devido ao grande número de parâmetros e particularidade de cada imagem, o filtro de Gabor é complexo de ser implementado, já que para imagens não lineares é preciso obter um mapa de frequência e orientação das linhas, a fim de se executar o filtro em cada bloco da imagem.

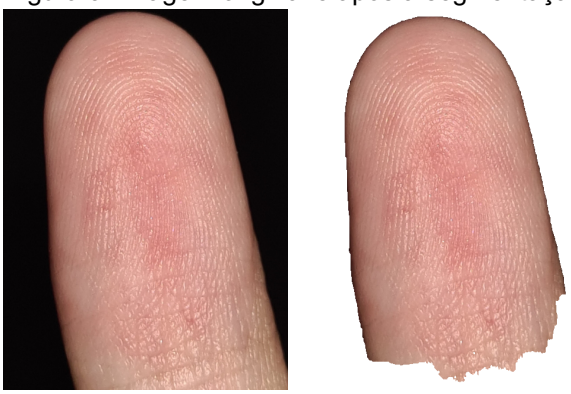
2.8.3 Segmentação

A segmentação de imagens é o processo de fracionar a imagem em partes comuns, ou seja, encontrar elementos semelhantes e distintos para separá-los. A segmentação possui vários usos, já que a partir de uma imagem é possível obter as regiões que possuem algum objeto de interesse como pessoas, carros, contornos ou regiões de foco (DATAGEN, 2022). Para atingir esse fim, essa técnica utiliza de várias maneiras de identificar as regiões de interesse, como uma segregação baseada em regiões, cores, *threshold*, entre outras.

É uma técnica muito utilizada em IAs de carros autônomos para detectar onde há carros e pessoas por meio de uma segmentação semântica (onde os grupos ficam separados por significado - carros ficam no mesmo grupo, porém separado de pessoas). Já no ramo de melhoria de imagens é muito utilizado para excluir zonas de não interesse na foto. No escopo deste trabalho esta técnica é

utilizada para remover o fundo das fotos, deixando somente a área de interesse na imagem, sendo esta o dedo do usuário. Na figura 9 é possível visualizar uma imagem processada pelo algoritmo de segmentação baseado em regiões.

Figura 9: Imagem original e após a segmentação



Fonte: Autor (2022)

2.8.4 Binarização

A binarização de uma imagem, consiste no processo de alterar o espectro de 256 tons de uma imagem para somente 2 ou seja binário. O algoritmo mais utilizado é o algoritmo de Otsu que consiste em encontrar um valor de *threshold* para a binarização da imagem (OTSU, 1979). Após encontrado o valor de *threshold* o algoritmo irá fazer com que todas as intensidades abaixo do valor sejam alteradas para 0 e todas as intensidades acima dela sejam alteradas para 1 (ou 255 para a visualização da imagem). Um resultado obtido por esse algoritmo pode ser visualizado na figura 10.

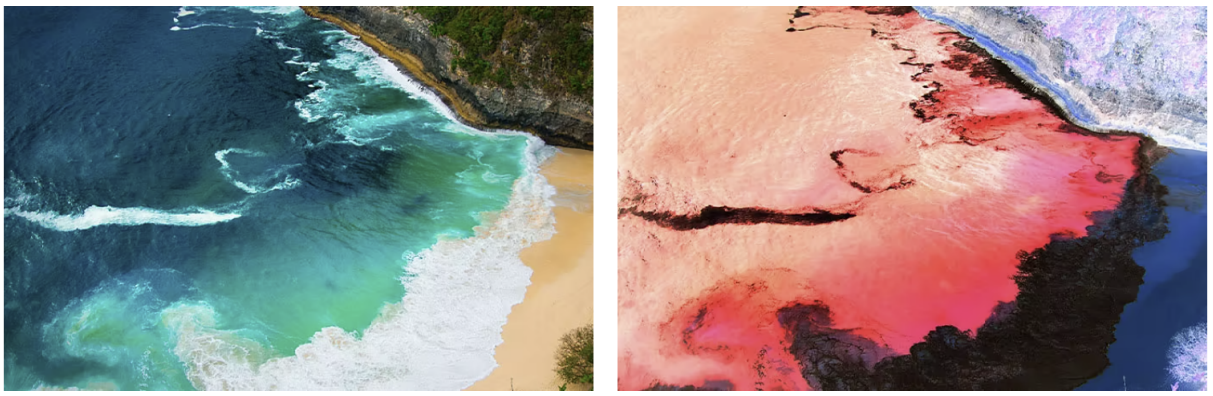
Figura 10: Imagem original e após a binarização

Fonte: Autor (2022)

2.8.5 Inversão de cores

A técnica de inversão de cores é um tipo de tratamento de imagens que transforma as cores da imagem com base no seu espectro, tornando-as opostas após a execução (Adobe, 2022). Com a execução deste filtro as imagens brancas passam a ser pretas e vice-versa, além de alterar todas as outras cores para o oposto. Na figura 11 é possível ver um exemplo desta técnica.

Figura 11: Imagem original e após a inversão de cores



Fonte: Adobe, 2022

2.9. Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas as definições teóricas que embasam o desenvolvimento deste trabalho. A compreensão do que é uma biometria, mais precisamente as impressões digitais e como elas podem ser utilizadas, garantindo a melhor qualidade possível após a extração em um processo de autenticação e verificação em um sistema de segurança, são primordiais para o desenvolvimento de um sistema de captura de biometrias por meio de fotos, como é o proposto por este trabalho. Além disso, é necessário entender corretamente qual o embasamento teórico por trás do tratamento de imagens, junto dos diversos algoritmos que serão utilizados para processar a imagem obtida pela câmera dos *smartphones*, a fim de se obter a melhor qualidade possível para a verificação biométrica.

Um maior detalhamento de como os filtros e algoritmos aqui expostos serão utilizados para processar uma biometria serão explorados nas seções 4.1 e 4.2 do

capítulo 4 de desenvolvimento da aplicação. Já as definições de biometrias e forma de comparação dessas serão destrinchada no capítulo 4 e 5.

As definições aqui expostas são ainda essenciais para o entendimento dos diversos sistemas propostos com fins similares ao proposto neste trabalho que serão detalhados no capítulo 3 de revisão do estado da arte, que serviram de inspiração para o desenvolvimento da aplicação final.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo serão descritos os trabalhos relacionados mais relevantes na área, a qual ainda foi muito pouco explorada. Após extensa busca na literatura, foram selecionados sete principais artigos, que foram classificados em três áreas distintas, que tratam de: melhoria de uma imagem de impressão digital, extração de biometria sem contato e extração por câmera de *smartphones*. Ao final do capítulo será feita uma comparação dos trabalhos relacionados com este em questão, além de um direcionamento para novas oportunidades de pesquisa.

3.1 Melhoria de imagens de impressões digitais

Nesta seção serão apresentados os principais trabalhos na área de melhoria de imagens de impressões digitais, sendo elas obtidas pelas leitoras tradicionais. Como principal motivação para a melhoria de impressões digitais com baixa qualidade, está o aproveitamento de uma amostra que seria descartada ou obter um melhor resultado a partir de uma imagem já de qualidade aceitável.

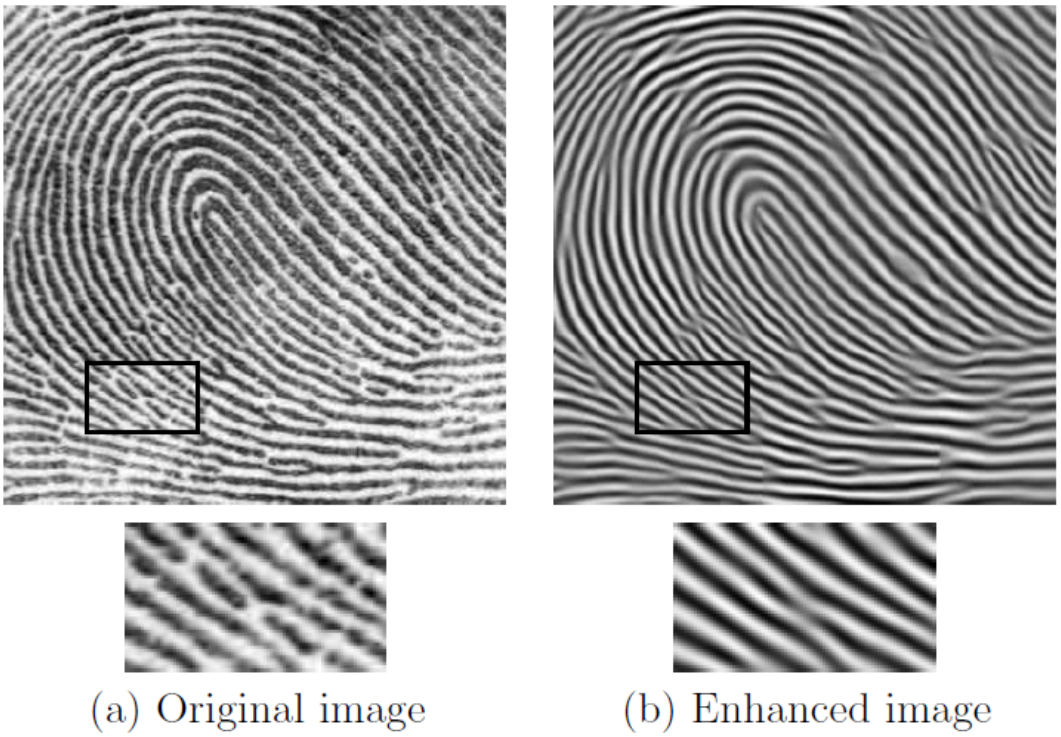
O primeiro trabalho encontrado foi o *Minutiae Extraction from Fingerprint Images - a Review* (BANSAL; SEHGAL; BEDI, 2011), que tem como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo que ao receber uma biometria obtida por um leitor óptico especializado processa a imagem para tornar as minúcias mais visíveis e facilitar a extração e comparação biométrica, influenciando diretamente na ocorrência ou não de um *match*. O algoritmo desenvolvido neste trabalho tem como base o filtro de Gabor que para o correto funcionamento necessita de um filtro de estimativa de orientação das elevações da impressão digital, assim como um filtro de estimativa de frequência dessas elevações.

Após a execução do processamento os autores propõem um algoritmo para extrair as minúcias dessa imagem, que após obtidas podem ser utilizadas para realizar a comparação de duas biometrias. O desenvolvimento de um extrator de biometrias é bem complexo e necessita de um grande esforço para ser implementado, sendo um dos focos do trabalho. Como resultado os autores mostram uma melhoria nas imagens testadas, e que a qualidade final depende muito da imagem inicial obtida pelas leitoras.

Já o trabalho *Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction* (THAI, 2003) possui um foco maior em melhorar as imagens obtidas através do leitor óptico especializado. Assim como o primeiro trabalho, o principal filtro utilizado é o filtro de Gabor, mantendo os dois filtros de estimativas exigidos.

Também é possível visualizar um maior número de testes e um bom resultado obtido pelo algoritmo proposto, porém assim como no primeiro, a melhoria tem uma forte dependência da imagem inicial e é possível visualizar algumas imagens em que o algoritmo acaba por alterar incorretamente a biometria (transformando uma minúcia em uma linha contínua, já que o filtro é executado em pedaços, não conseguindo distinguir se o esperado é uma linha ou não), fazendo com que em um segundo momento essa possa até mesmo ser considerada pertencente a outra pessoa, como é possível visualizar na figura 12.

Figura 12: Biometria obtida por leitora especialista e tratada por algoritmo com filtro de Gabor



Fonte: THAI, 2003

Após a execução de inúmeros testes e vários valores distintos para o filtro de Gabor o autor chegou à conclusão de que o algoritmo facilita a extração de minúcias e melhora na comparação biométrica, porém ele não pode ser aplicado em todas as imagens, acarretando em um pior resultado em alguns casos, sendo difícil definir quando ou não utilizá-lo.

3.2 Extração de impressões digitais sem contato

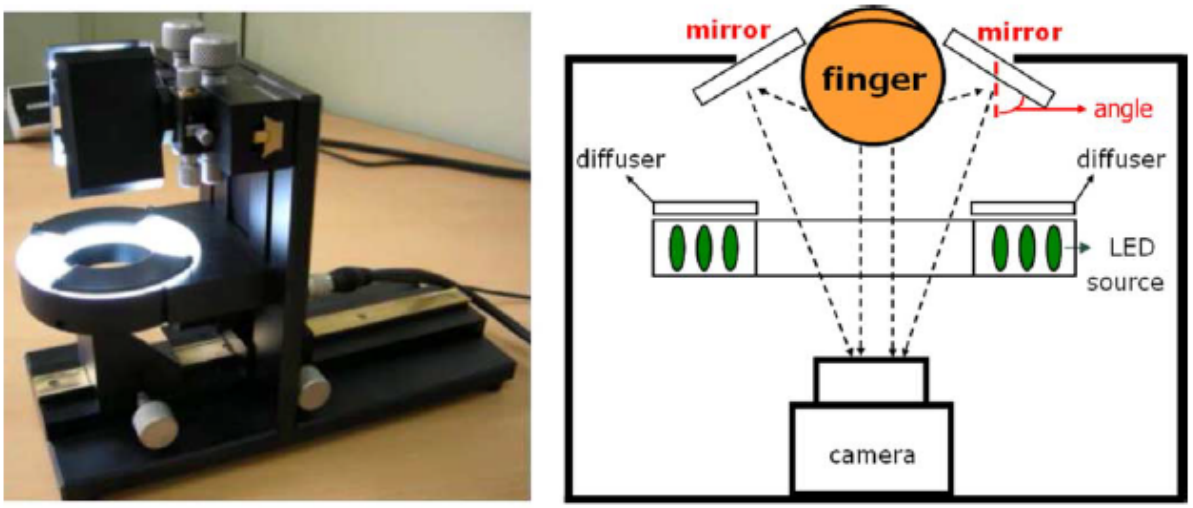
Nesta seção serão apresentados os principais trabalhos no contexto de extração de biometrias sem contato. Esta área estuda as inúmeras formas de se extrair uma biometria sem contato, seja ela por um equipamento específico ou por múltiplas câmeras para a obtenção de uma biometria 3D. Nos trabalhos aqui citados o foco está na obtenção de impressões digitais sem contato através de uma única câmera.

Um trabalho no ramo de impressões digitais em 3D obtidas por uma única câmera é o *Towards Contactless, Low-Cost and Accurate 3D Fingerprint Identification* (KUMAR; KWONG, 2015). No desenvolvimento deste foi utilizado um ambiente controlado, com uma câmera específica para a obtenção das imagens, com custo de 100 dólares e necessitando de 7 LEDs para iluminar corretamente o dedo no qual se quer extrair as impressões digitais. O algoritmo proposto pelos autores busca transformar a foto em uma biometria 3D com as minúcias em evidência para ser realizada a comparação com outras biometrias obtidas em 3D pelo método proposto.

No desenvolvimento do trabalho nada é citado sobre a possibilidade de comparar essas biometrias com as obtidas pelos métodos tradicionais de contato, sendo o foco do desenvolvimento a implementação da conversão de fotos 2D em 3D (melhorando-as utilizando o filtro de Gabor) e a comparação entre elas. Os autores também desenvolveram um algoritmo de *matching* baseado em biometrias 3D. Após a execução de experimentos, os autores concluíram que o método proposto obteve um melhor resultado do que as biometrias obtidas em 3D por outros métodos, porém esse resultado ainda está longe de ser utilizado em um sistema de larga escala, apresentando um EER alto de 18,56%.

Um outro trabalho importante no ramo de coletas sem contato é o *Mosaicing Touchless and Mirror-Reflected Fingerprint Images* (CHOI; CHOI; KIM, 2010). Neste trabalho é desenvolvido um dispositivo especializado para captura das imagens, sendo este composto por uma câmera, um anel de LED, difusores e dois espelhos ao lado do orifício onde o usuário irá colocar o dedo, como pode ser visualizado na figura 13.

Figura 13: Dispositivo especializado proposto para a obtenção de biometrias sem contato



Fonte: CHOI; CHOI; KIM, 2010

Além do dispositivo proposto, os autores desenvolveram um algoritmo de tratamento da imagem obtida (que possui três ângulos distintos do dedo - frontal, lateral direito e lateral esquerdo), evidenciando as minúcias e fazendo com que os três ângulos fossem dispostos um sobre o outro, para a obtenção de uma impressão digital mais larga.

Assim como os trabalhos mencionados anteriormente, o filtro principal para o processamento da imagem foi o filtro de Gabor, o qual foi muito bem aplicado pelos autores e exibiu imagens de altíssima fidelidade. Porém durante o desenvolvimento do trabalho não é realizado verificações biométricas entre as biometrias obtidas e as extraídas de leitores com contato, ficando o foco na comparação do número de minúcias verdadeiras encontradas na imagem. Após a realização dos testes é possível confirmar que o número de minúcias aumenta consideravelmente utilizando o método proposto, sendo equivalente a uma biometria obtida por contato com o dedo rolado na superfície de contato, porém não é esclarecido o resultado de FAR ou EER obtido nos testes.

Por fim foi encontrado o artigo *Contactless Fingerprint Recognition Using Deep Learning - A Systematic Review* (CHOWDHURY; IMTIAZ, 2022) que é uma revisão dos grandes trabalhos na área de extração de impressões digitais sem contato.

Neste artigo é realizada uma análise das três principais propostas de obtenção de biometrias, que são: Foto, *Deep Learning* e o método tradicional. Os

autores mostram os diferentes resultados obtidos em vários trabalhos da área e exibem as similaridades entre eles, que é a utilização de um filtro para melhorar as biometrias obtidas e um processo de coleta rigoroso.

O foco de pesquisa deste último trabalho é a utilização de *Deep Learning* na coleta de biometrias sem contato, que ainda apresenta resultados não utilizáveis em um sistema de larga escala. Os resultados obtidos em sistemas baseados em fotos não foram muito explorados, não sendo tão relevantes para o desenvolvimento deste trabalho em questão. Porém, ainda por meio da análise realizada por este artigo é possível evidenciar o quanto as pesquisas neste tema ainda precisam evoluir e a existência de poucos trabalhos na área.

3.3 Extração de impressões digitais via câmera dos *smartphones*

Nesta seção serão apresentados os principais trabalhos encontrados na área de extração de impressões digitais por fotos obtidas através de um *smartphone*, sendo estes da mesma área do trabalho em questão. Assim como já detalhado anteriormente, o foco da área é a utilização em larga escala por qualquer pessoa que possua um *smartphone,* sendo uma solução mais barata e acessível.

O primeiro trabalho encontrado com foco em fotos de *smartphones* é o *Scaling-Robust Fingerprint Verification with Smartphone Camera in Real-life Scenarios* (RAGHAVENDRA; BUSCH; YANG, 2013), que trata da utilização de fotos em larga escala para um sistema de verificação biométrica. No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados 3 modelos de celulares diferentes e o foco do trabalho foi na segmentação correta do fundo da imagem, já que para uma utilização em larga escala o algoritmo de remoção do fundo precisa ser bem preciso e funcionar corretamente para os mais variados fundos possíveis.

Além do foco na segmentação, o trabalho focou em desenvolver um algoritmo que fosse capaz de recortar automaticamente a região de interesse dos dedos, ou seja, a ponta (ROI). Após a aplicação do algoritmo os autores testaram algumas verificações biométricas e obtiveram resultados satisfatórios, porém o *matcher* utilizado tem qualidade moderada, o que pode impactar nos resultados obtidos. Além disso, não foi realizada nenhuma comparação com as biometrias obtidas pelo método tradicional, somente foi realizado comparações entre as

próprias fotos com um EER variando de 2% a 8% para biometrias obtidas no mesmo aparelho, e EER variando de 9% a 12% com biometrias obtidas por celulares diferentes.

Por fim, o trabalho mais completo encontrado foi o *Efficient Fingerprint Extraction and Matching Using Smartphone Camera* (GUPTA; ANAND; RAI, 2017), que utiliza de um aplicativo desenvolvido para a finalidade de tirar fotos dos dedos, o qual identifica a ponta dos dedos e foca automaticamente na região de interesse.

Após a captura da foto obtida pelo aplicativo proposto pelos autores, é então aplicado um algoritmo de processamento da imagem com foco em CLAHE e filtro de Gabor, além da detecção da zona de interesse, recorte e alinhamento. Por fim é realizada a extração de minúcias e comparação.

A imagem obtida pelo método proposto é de alta qualidade e nos testes realizados utilizando um *matcher* de qualidade intermediária foi possível obter resultados aceitáveis, porém as verificações ocorrem apenas entre as fotos extraídas do celular com as biometrias obtidas por leitoras especializadas, ou seja, não realizam uma análise da eficácia do método proposto a partir duas imagens obtidas no APP e processadas. Quanto aos resultados o EER obtido na comparação com WSQs foi de 6% a 15%.

Ainda foi possível concluir que imagens obtidas utilizando o HDR da câmera melhoram o resultado, e que o filtro de Gabor tem um bom desempenho no algoritmo proposto, sendo foco de desenvolvimento. Vale também ressaltar que o método proposto não trata da remoção de fundo, dada a justificativa de que o corte na zona de interesse não faz necessário o uso de segmentação.

Existem ainda algumas matérias e postagens em fóruns sobre o assunto em específico, sendo eles: *Scientists Extract Fingerprints from Photos Taken From up to Three Meters Away* (CIMPANU, 2017), *It's easy to create a fingerprint from smartphone photos of someone's finger* (ZIBREG, 2014), *Fingerprint scanner using camera of android device* (STACK OVERFLOW, 2016), *Busted! Cops use fingerprint pulled from a WhatsApp photo to ID drug dealer* (SMITH, 2018). e *Extract Fingerprint from Image* (STACK OVERFLOW, 2017). Nestes trabalhos são apresentados formas de extrair minúcias por meio de foto e que é possível fazer a extração por foto, porém não se aprofundam no tema, evidenciando qualidade da biometria obtida e em alguns nem a forma de fazer essa extração, só mencionando

ser possível como em (CIMPANU, 2017) que diz ser possível extrair biometrias a três metros de distância.

3.4 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados diversos trabalhos de temas relacionados ao proposto neste trabalho em questão, e foi possível evidenciar que é sim possível obter biometrias de impressões digitais obtidas por câmeras fotográficas. Para isso necessitam de um bom método de captura da foto, um bom algoritmo de processamento de imagem, realçando minúcias e centralizando a região de interesse, além de um bom extrator de minúcias e *matcher*. Um resumo das características de cada trabalho mencionado é exibido na tabela 1.

Tabela 1: Trabalhos relacionados e suas características

Trabalho	Gabor	E.E.	U.G.	C.O.	C.E.	API	Q.A.
BANSAL; SEHGAL; BEDI, 2011	S	S	S	N	N	N	S
THAI, 2003	S	S	S	N	N	N	S
KUMAR; KWONG, 2015	S	S	N	N	N	N	N
CHOI; CHOI; KIM, 2010	S	S	N	S	N	N	D
CHOWDHURY; IMTIAZ, 2022	N	D	D	N	N	N	D
RAGHAVENDRA; BUSCH; YANG, 2013	N	N	S	N	N	N	D
GUPTA; ANAND; RAI, 2017	S	N	S	N	N	N	S
Fingerprint Photo Matcher	N	N	S	S	S	S	S

Legenda:
Gabor = Utilização do filtro de Gabor no tratamento das imagens
E.E. = Necessidade de Equipamento Especializado
U.G. = Método para uso em geral em massa e para qualquer contexto
C.O. = Foco em Como Obter as fotos
C.E. = Comparação Extensa dos resultados e diferentes métodos
API = Desenvolvimento de API para utilização do método
Q.A. = Qualidade aceitável dentro dos parâmetros internacionais
S = Sim
N = Não
D = Depende o método abordado

Fonte: Autor (2022)

Observa-se que nenhum trabalho mencionado neste capítulo exibe a qualidade da biometria obtida em termos de NFIQ e não comparam os resultados obtidos entre todas as possíveis formas de avaliação, como qualidade em comparação com duas biometrias do método tradicional, comparação com duas biometrias do método proposto e comparação entre uma biometria do método proposto com uma do método tradicional, além de não dedicarem esforços em técnicas e câmeras necessárias para se obter a melhor foto. É importante também reforçar que apenas dois trabalhos focam na utilização em larga escala e de uso geral, sendo acessível por qualquer pessoa.

Por fim, poucos trabalhos apresentaram resultados próximos do aceitável nos parâmetros internacionais e nenhum propôs uma API de fácil utilização do método proposto para os mais variados fins, assim como o objetivo deste trabalho.

Neste ponto, caracteriza-se a importância deste trabalho, onde além de ser feita a extração das impressões digitais, irá ser realizado um estudo completo da qualidade dessa biometria obtida, com taxas de FAR, FRR, TAR, TRR e EER dentro dos padrões internacionais, comparação da biometria com WSQs e com outras fotos, além de uma API com processo automático, que ao receber a foto faz todo o processamento necessário para extrair as impressões digitais e até mesmo validá-las como pertencentes ou não ao mesmo indivíduo.

Fica evidente a oportunidade de pesquisa na área, em novos métodos de coleta sem contato em larga escala e de uso geral, além da oportunidade de desenvolver um algoritmo mais eficaz para o tratamento das imagens com filtros de Gabor somados com outros algoritmos de processamento de imagens, bem como um teste com um grande banco de dados em um cenário real de utilização e uma aplicação para captura automática dos dedos.

4 FINGERPRINT PHOTO MATCHER

Neste capítulo é apresentado o Fingerprint Photo Matcher, uma API REST capaz de executar verificações biométricas com base em duas digitais fornecidas, sejam elas extraídas pelos leitores tradicionais ou por uma foto das impressões digitais, garantindo um nível de qualidade aceito internacionalmente pelo NIST. Inicialmente são apresentados os desafios iniciais do desenvolvimento da aplicação bem como histórico inicial de testes, além da explicação, definição e escolha dos diversos algoritmos e técnicas envolvidas.

4.1 Definição do método de desenvolvimento

Para o desenvolvimento desta API, é necessário possuir ou implementar um extrator e *matcher* de biometrias. Devido a complexidade de desenvolvê-los, foi decidido pela utilização de um SDK biométrico especializado de alta capacidade e desempenho, produzido pela Neurotechnology e cujo acesso para a realização deste trabalho foi fornecido pela BRy Tecnologia. Em posse do SDK, era necessário confirmar sua capacidade de processar imagens de impressões digitais, que não possuem o formato WSQ, e extraí-las em um template que possa ser comparado futuramente, já que o foco deste trabalho consiste na validação de fotos de digitais. Desafio que se mostrou possível com a utilização deste motor biométrico, no qual a partir de uma foto do dedo enviada para o extrator, o processamento foi realizado e extraindo um template assim como exibido na figura 14.

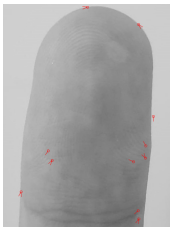
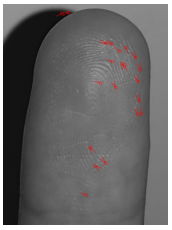
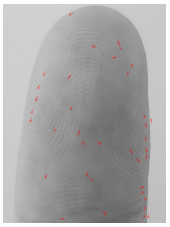
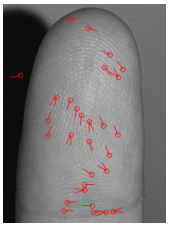
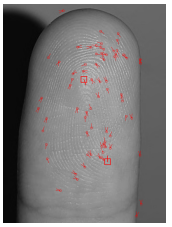
Figura 14: Extração de template e validação de qualidade a partir de foto

NFIQ = 5
Fonte: Autor (2022)

Após a extração, foi realizado um conjunto de testes básicos para validar a melhor forma de capturar imagens usando um smartphone, a fim de realçar os detalhes nas fotos e determinar a viabilidade do projeto.

Foi então realizada uma sequência de capturas do dedo do autor utilizando um *smartphone* Samsung Galaxy S10 e um Samsung Galaxy S20 explorando diferentes ângulos, lentes e modos de captura. Foram tiradas fotos com e sem HDR, com e sem flash e distantes ou próximas ao dedo. Para o foco foram testadas várias técnicas como: mão aberta, apenas um dedo erguido, dedo próximo ao fundo uniforme, e dedo com fundo distante. Os principais modelos de fotos obtidos, já com recorte na zona de interesse (ponta dos dedos), estão relacionados no quadro 3 e a técnica de captura com melhor resultado neste primeiro momento foi a de fundo uniforme próximo.

Quadro 3: Sequência de fotos com *smartphones*

 NFIQ: 5	 NFIQ: 5	 NFIQ: 2	 NFIQ: 5	 NFIQ: 5	 NFIQ: 2
Sem HDR, sem flash e distante	Sem HDR, sem flash e próximo	Sem HDR, com flash e próximo	Com HDR, sem flash e próximo	Com HDR, com flash e distante	Com HDR, com flash e próximo

Fonte: Autor (2022)

Após aferição visual e pela própria execução do extrator para validar as biometrias, foi possível perceber que o HDR e o flash eram os principais fatores na obtenção de fotos com minúcias bem perceptíveis, já que foi mais fácil obter fotos com NFIQs melhores desta maneira. Além disso é possível perceber uma boa influência da proximidade do dedo, porém, com lentes que não sejam do tipo macro ou zoom, conseguir focar na ponta dos dedos com a câmera próxima ao dedo é uma tarefa difícil.

Portanto é possível concluir que as condições ideais da foto são obtidas por câmeras com HDR, flash e lentes macro que conseguem focar melhor nas minúcias. Ter o controle do foco e do modo de captura é crucial para uma boa foto.

Por fim, para atestar a viabilidade do projeto e definir a estratégia de desenvolvimento, era necessário fazer algumas verificações biométricas básicas com WSQs obtidos por leitoras ópticas especialistas, garantindo assim o funcionamento do matcher com biometrias obtidas pelos dois métodos, além de fornecer uma ideia inicial da qualidade das fotos. Para isso foram realizadas verificações biométricas (utilizando o matcher disponibilizado) com as fotos anteriores e também com as mesmas fotos, porém tratadas com alguns filtros que são eles: aumento de brilho, contraste e filtro Gaussiano, todos aplicados pelo GIMP por meio dos *sliders* disponíveis.

Para que seja possível compreender e validar se o resultado obtido nestas, e nas futuras comparações, estão dentro dos parâmetros aceitos internacionalmente é preciso estudar a relação do *score* obtido no *matching* das biometrias com a taxa de FAR, utilizando o SDK da Neurotechnology. Esta relação é disponibilizada na documentação oficial do SDK e pode ser analisada na figura 15.

Figura 15: Documentação do SDK da Neurotechnology com a referência do FAR para o score

FAR (false acceptance rate)	Matching threshold (score)
100 %	0
10 %	12
1 %	24
0.1 %	36
0.01 %	48
0.001 %	60
0.0001 %	72
0.00001 %	84
0.000001 %	96

or using this formula:

`Threshold = -12 * log10(FAR); where FAR is NOT percentage value (e.g. 0.1% FAR is 0.001)`

Matching threshold should be selected according to desired FAR (False Acceptance Rate). FAR is calculated for single match (1:1) and during identification (1:N) false acceptance accumulates. Identification false acceptance probability can be calculated using this formula:

`(1-(1-FAR/100)^N)*100, where N - DB size`

For example:

If FAR=0.001% then probability that false acceptance situation will occur during 1:N identification (where N=10 000) is 1-(1-0.00001)^10000=9.52%.

If FAR=0.0001% then probability that false acceptance situation will occur during 1:N identification (where N=10 000) is 1-(1-0.000001)^10000=1.00%.

Matching threshold/FAR should be selected according to the system's development requirements and taking into account mentioned identification false acceptance accumulation.

Fonte: Neurotechnology (2018)

Com base na figura 15, é possível concluir que feita uma comparação 1:1 utilizando o *matcher* da Neurotechnology, este retorna um *score* indicando a similaridade entre as duas biometrias informadas. A própria fabricante já disponibiliza uma relação dos *scores* com o FAR resultante em cada comparação biométrica, ou seja, a porcentagem de falsos positivos aceitos para cada faixa de valor do *score*. Por exemplo, para uma verificação biométrica com *score* de 60 a probabilidade de essa pessoa ser um falso positivo é de 0.001%. É informado ainda na documentação de que o valor de *threshold* deve ser escolhido como o mínimo *score* aceito na verificação (1:1) e deve ter como base o nível de FAR desejado, já que quanto maior o valor, menor o FAR e maior é o FRR.

A Neurotechnology ainda fornece uma fórmula para o cálculo da probabilidade de ocorrência de falsos positivos na identificação (1:N) a partir do FAR obtido na verificação (1:1), assim como exibido na figura 15. No exemplo citado, escolhendo um FAR de 0.001% (*threshold* e *score* de 60) e executando uma identificação (1:N) com uma base de 10 mil biometrias (N = 10.000) a probabilidade de ocorrência de um falso positivo é de 9,52%. Assim como mencionado anteriormente o nível de FAR aceito na ICP-Brasil para um PSBio é de 0.01% que equivale ao *score* 48 no SDK, sendo este o valor utilizado como *match threshold*.

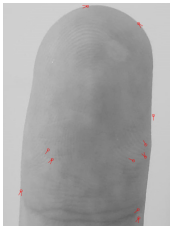
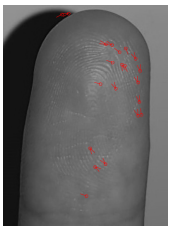
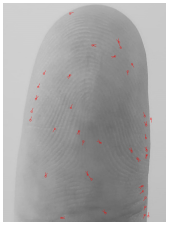
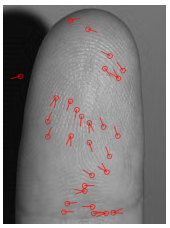
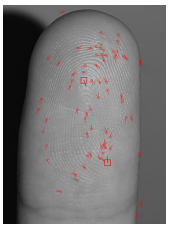
Com a compreensão dos valores e definido um threshold, foram então realizados os testes de viabilidade do projeto, com os resultados disponíveis no quadro 4, exibindo o resultado das imagens originais, e no quadro 5, com o resultado das imagens tratadas. Todas as fotos pertencem a dois possíveis dedos do autor, que foram comparados com os dois WSQs de NFIQ 1 exibidos na figura 16 (todos os dedos em WSQ presentes neste trabalho foram coletados através de uma leitora Suprema Biomini Slim S20, por meio de um software pertencente a BRy Tecnologia).

Figura 16: WSQs de dedos utilizados em testes iniciais

Fonte: Autor (2022)

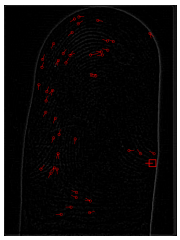
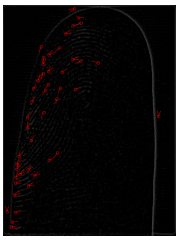
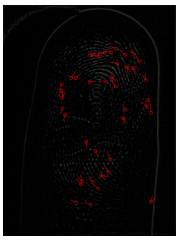
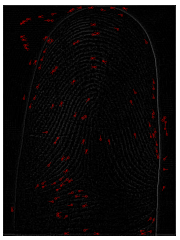
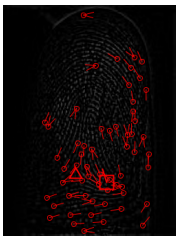
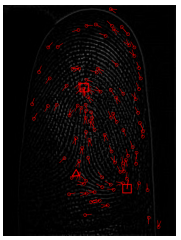
Para que as comparações pudessem ser realizadas foi necessário espelhar todas as fotos obtidas, para ficarem na mesma orientação das digitais salvas em WSQ. O resultado dos testes é baseado em duas categorias: o resultado da extração - *score* NFIQ do *template* extraído e quantidade de minúcias encontradas - e o resultado da verificação - *Match* (Correspondente) ou *No match* (não correspondente), além do *score* Neurotechnology envolvido (relação direta com o FAR). Vale destacar que todos os testes são feitos comparando com a biometria da mesma pessoa, então o resultado esperado é um *Match* (Correspondente).

Quadro 4: Verificações (1:1) com fotos iniciais originais

 NFIQ: 5	 NFIQ: 5	 NFIQ: 2	 NFIQ: 5	 NFIQ: 5	 NFIQ: 2
Score: 24 No Match FAR ~= 1%	Score: 10 No Match FAR ~= 10%	Score: 66 Match FAR ~= 0.001%	Score: 13 No Match FAR ~= 10%	Score: 12 No Match FAR ~= 10%	Score: 174 Match FAR ~= 0.0000001%

Fonte: Autor (2022)

Quadro 5: Verificações (1:1) com fotos iniciais tratadas com filtro Gaussiano

 NFIQ: 5	 NFIQ: 1	 NFIQ: 1	 NFIQ: 5	 NFIQ: 5	 NFIQ: 1
Score: 17 No Match FAR ~= 1%	Score: 22 No Match FAR ~= 1%	Score: 55 Match FAR ~= 0.01%	Score: 8 No Match FAR ~= 10%	Score: 8 No Match FAR ~= 10%	Score: 248 Match FAR ~= 0.0000001%

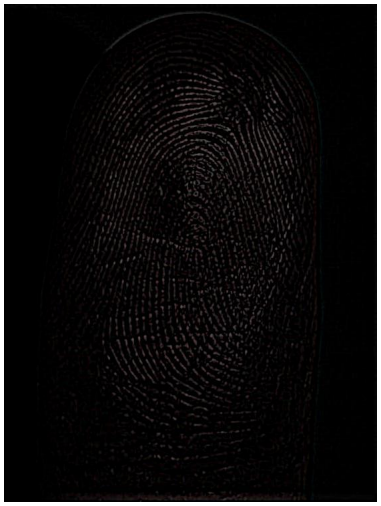
Fonte: Autor (2022)

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que é possível realizar um match entre uma foto de um dedo e um WSQ por meio do SDK da Neurotechnology. Além disso, é possível verificar que as imagens com flash, HDR e próximas aos dedos possuem maior desempenho e que realizando alguma filtragem na imagem é

possível melhorar o resultado obtido. Neste primeiro teste básico já foi possível obter quatro *matches* e nível de FAR dentro do aceito pelos padrões internacionais, porém sendo ainda necessário a evolução da captura e tratamento da imagem para que seja mais fácil de obtê-las e processá-las sendo aplicável a todas as fotos.

Por fim, um último teste antes da definição dos próximos passos de desenvolvimento foi realizado, executando a comparação de duas biometrias obtidas por foto, sendo elas de ótima qualidade, porém não resultando em um *match*, como exposto no quadro 6. Isso comprova que a extração por fotos e filtros ainda necessita evoluir para se tornar utilizável e que é necessário o desenvolvimento de um algoritmo de tratamento especial para essas fotos, que será proposto neste trabalho mais adiante, assim como um método de captura.

Quadro 6: Comparação de duas melhores biometrias extraídas

Biometria	**Comparada com**	**Resultado da Verificação**
 NFIQ: 1 Minúcias: 19	 NFIQ: 1 Minúcias: 115	Score: 27 No Match FAR ~= 1%

Fonte: Autor (2022)

O algoritmo de processamento de imagens necessário será discutido na próxima seção, e será desenvolvido com Java utilizando o *framework* Spring e a partir do seguinte método de desenvolvimento: implementação de múltiplos algoritmos de tratamento de imagens, aferição de desempenho destes algoritmos, para determinar o algoritmo final de tratamento, métodos de conexão e utilização do SDK da Neurotechnology (tanto para extração quanto para *match)*, por meio da API

disponibilizada pela BRy, além do desenvolvimento de uma API para utilização deste conjunto.

4.2 Desenvolvimento do algoritmo de tratamento de imagens

A partir dos testes iniciais realizados ficou evidente a necessidade de um algoritmo de tratamento de imagens, para isso, após extensa pesquisa na área, análise dos trabalhos relacionados e testes manuais, foram desenvolvidos vários algoritmos, que juntos fazem a imagem ficar mais nítida e com minúcias mais aparentes. Para o desenvolvimento destes algoritmos foi utilizado a biblioteca OpenCV, para facilitação do processo.

Para um melhor entendimento dos algoritmos que serão apresentados a seguir, a imagem resultante da aplicação de cada um deles será exposta após a explicação individual, além disso todos serão aplicados na mesma imagem original, que está exibida na figura 17 a seguir.

Figura 17: Imagem original que será tratada individualmente por cada filtro

Fonte: Autor (2022)

Como todas os filtros foram implementados utilizando OpenCv é necessário converter as imagens para o formato de utilização da biblioteca, o que pode ser realizado a partir da seguinte função, que recebe uma imagem em *byte array* e retorna o Mat correspondente:

```
    private Mat getMatFromByteArrayImage(byte[] image) {
                            return    Imgcodecs.imdecode(new    MatOfByte(image),
Imgcodecs.CV_LOAD_IMAGE_UNCHANGED);
```

```
}
```

O primeiro algoritmo desenvolvido é o algoritmo para espelhar a imagem (*flip*) que recebe a imagem já no formato utilizado pelo OpenCv (Mat) e faz o espelhamento da mesma no eixo vertical com base no *flipCode* 1 utilizado, conforme especificado na documentação do OpenCv da função *flip*.

```
private Mat flipImage(Mat image) {
    log.info("Flipping image");
    Mat flippedImage = new Mat();
    Core.flip(image, flippedImage, 1);
    return flippedImage;
}
```

Figura 18: Imagem espelhada

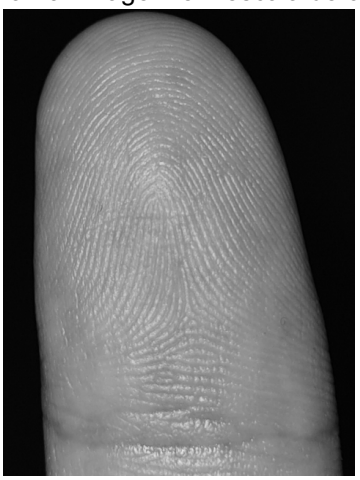
Fonte: Autor (2022)

Implementou-se um algoritmo para converter a imagem para escala de cinza, já que para a aplicação futura dos filtros de AHE e CLAHE é necessário que a imagem esteja em escala de cinza. O trecho de código referente a essa conversão é disposto a seguir, sendo novamente utilizada uma função da biblioteca que converte uma imagem RGB para escala de cinza.

```
private Mat convertImageToGrayScale(Mat image) {
    log.info("Converting image to gray scale");
```

```
        Mat grayScaleImage = new Mat();
        Imgproc.cvtColor(image, grayScaleImage, Imgproc.COLOR_RGB2GRAY);
        return grayScaleImage;
    }
```

Figura 19: Imagem em escala de cinza



Fonte: Autor (2022)

Com a conversão para escala de cinza realizada é possível utilizar o filtro AHE para otimizar o contraste da imagem, desenvolvido utilizando a função equivalente da biblioteca escolhida, conforme trecho de código adiante.

```
    private Mat applyEqualization(Mat image) {
        log.info("Applying Equalization");
        Mat equalizedImage = new Mat();
        Imgproc.equalizeHist(image, equalizedImage);
        return equalizedImage;
    }
```

Figura 20: Imagem com filtro AHE

Fonte: Autor (2022)

Como o resultado do AHE não se mostrou tão eficiente, já que enfatizou as minúcias mas gerou áreas com muita luz, é necessário implementar o CLAHE, que utiliza a função específica do OpenCV com parâmetro de *clipLimit* com valor 128, por ser o meio da intensidade de 0 a 255, e *tileGridSize* de tamanho 60x60, por resultar em uma imagem visualmente mais “definida”. Apesar de uma máquina conseguir visualizar as alterações de contraste de uma região, a aplicação do CLAHE se mostrou muito influente na melhora do NFIQ obtido.

```
private Mat applyAdaptiveHistogramEqualization(Mat image) {
    log.info("Applying Adaptive Histogram Equalization");
    Mat claheImage = new Mat();
    Size tileGridSize = new Size(60, 60);
    Imgproc.createCLAHE(128, tileGridSize).apply(image, claheImage);
    return claheImage;
}
```

Figura 21: Imagem com filtro CLAHE

Fonte: Autor (2022)

Após a aplicação do filtro de CLAHE fica evidente a melhora na visualização das minúcias, porém percebe-se que as minúcias estão invertidas com relação às exibidas em um WSQ, ou seja, onde na imagem, com o filtro aplicado, está branco, no WSQ é preto, o que pode impactar no match entre os dois tipos de biometrias no futuro. Por conta disso faz-se necessário o desenvolvimento de um algoritmo de inversão de cores, que pode ser implementado por meio da biblioteca utilizada, bastando aplicar uma operação de *not* bit a bit, por meio da função *bitwise_not*, conforme exibido no código a seguir:

```
private Mat invertImage(Mat image) {
    log.info("invert image");
    Mat invertImage = new Mat();
    Core.bitwise_not(image, invertImage);
    return invertImage;
}
```

Figura 22: Imagem com inversão de cores

Fonte: Autor (2022)

Como as imagens obtidas por WSQs possuem somente a cor branca para o fundo e preta para as áreas altas das minúcias, é fundamental binarizar a imagem para obter o resultado desejado, eliminando qualquer tom de cinza presente. O código para realizar a binarização da imagem é novamente bem simples de ser implementado com as funções do OpenCV. Basta utilizar-se da função *threshold* passando como parâmetros o valor de *threshold* dos bits que definirá a partir de que valor esse bit será alterado (0 ou 1), o valor máximo para setar quando os valores do bit forem maiores que o *threshold*, que neste caso é utilizado 255 (para que os bits possuam valores em 0 ou 255) e o tipo de thresh, que para esse algoritmo é o BINARY, já que pretende-se obter uma imagem com somente dois valores possíveis.

```
    private Mat binarizeImage(Mat image) {
        log.info("Binarize image");
        Mat binaryImage = new Mat();
                        Imgproc.threshold(image,   binaryImage,   127,   255,
Imgproc.THRESH_BINARY);
        return binaryImage;
    }
```

Figura 23: Imagem binarizada

Fonte: Autor (2022)

Outro método importante para a exibição apropriada da biometria, já que inicialmente esta fica muito distante da câmera e aparece uma região maior do dedo do que somente a área de interesse, é o método de *crop* que faz o recorte da imagem mais centralizada. A implementação do *crop* pode ser visto a seguir com um recorte simples da imagem, além da foto de exemplo.

```
private Mat crop(Mat image) {
    log.info("Cropping image");

    // Define the ROI
    int roiX = image.width() / 9;
    int roiY = image.height() / 9;
    int roiWidth = (int) (image.width() / 1.3);
    int roiHeight = (int) (image.height() / 1.3);

    // Define the ROI as a Rect object
    Rect roi = new Rect(roiX, roiY, roiWidth, roiHeight);

    // Crop the image to the ROI
    Mat croppedImage = new Mat(image, roi);

    return croppedImage;
}
```

Figura 24: Imagem recortada

Fonte: Autor (2022)

Vale destacar que o crop existente tem um tamanho padrão que pode não obedecer para todos os cenários de foto, câmera e dispositivos, necessitando para implementação em larga escala de um algoritmo com crop da zona de interesse com melhor qualidade e inteligência.

Além dos filtros já exibidos, detectou-se a possibilidade de implementar outros antes da definição final do algoritmo de processamento de imagens, filtros dos quais poderiam ser úteis para a conclusão da tarefa. O primeiro dos algoritmos testados foi a normalização, que iguala a iluminação em todos os pixels. Isso pode ser realizado por meio da função *normalize* da biblioteca com os parâmetros de menor e maior valor permitido nos pixels, assim como exibido no trecho de código a seguir:

```
private Mat normalizeImage(Mat image) {
    log.info("Normalizing image");
    Mat normalizedImage = new Mat();
    Core.normalize(image, normalizedImage, 0, 128, Core.NORM_MINMAX);
    return normalizedImage;
}
```

Figura 25: Imagem normalizada

Fonte: Autor (2022)

Como o filtro de Gabor foi o mais utilizado nas implementações de trabalhos relacionados, uma tentativa de desenvolvimento do mesmo está exposta a seguir, porém após a execução fica claro que para o correto funcionamento do filtro de Gabor é necessário a implementação de um de mapa de frequência das minúcias e orientação destas, que é muito difícil de ser implementado e irá variar com cada imagem e tamanho da mesma, além de ser difícil de padronizá-lo para fotos obtidas de diferentes dispositivos, padrões de iluminação, resolução e posicionamento diferentes.

```
private Mat applyGaborFilter(Mat image) {
    log.info("Applying Gabor filter");
    image.convertTo(image, CvType.CV_32F);

    // predefined parameters for Gabor kernel
    Size kSize = new Size(31, 31);
    double sigma = 30;
    double lambda = 30;
    double gamma = 0.25;
    double psi = 0;

    int numberOfGabors = 16;
    List<Mat> Gabors = new ArrayList<>(numberOfGabors);
    List<Double> thetas = new ArrayList<>(numberOfGabors);
    List<Mat> kernels = new ArrayList<>(numberOfGabors);
```

```
        double thetaIncrement = 180 / numberOfGabors;

        Mat enhanced = new Mat(image.width(), image.height(), CvType.CV_32F);

        for (int i = 0; i < numberOfGabors; i++) {
                            Gabors.add(new  Mat(image.width(),  image.height(),
CvType.CV_32F));
            thetas.add(i * thetaIncrement);
              kernels.add(Imgproc.getGaborKernel(kSize, sigma, thetas.get(i),
lambda, gamma, psi, CvType.CV_32F));
            Imgproc.filter2D(image, Gabors.get(i), -1, kernels.get(i));
        }

        for (int i = 0; i < numberOfGabors - 1; i++) {
            if (i == 0) {
                  Core.addWeighted(Gabors.get(i), 0, Gabors.get(i + 1), 1, 0,
enhanced);
            } else {
                      Core.addWeighted(enhanced, 1, Gabors.get(i + 1), 1, 0,
enhanced);
            }
        }
        return enhanced;
    }
```

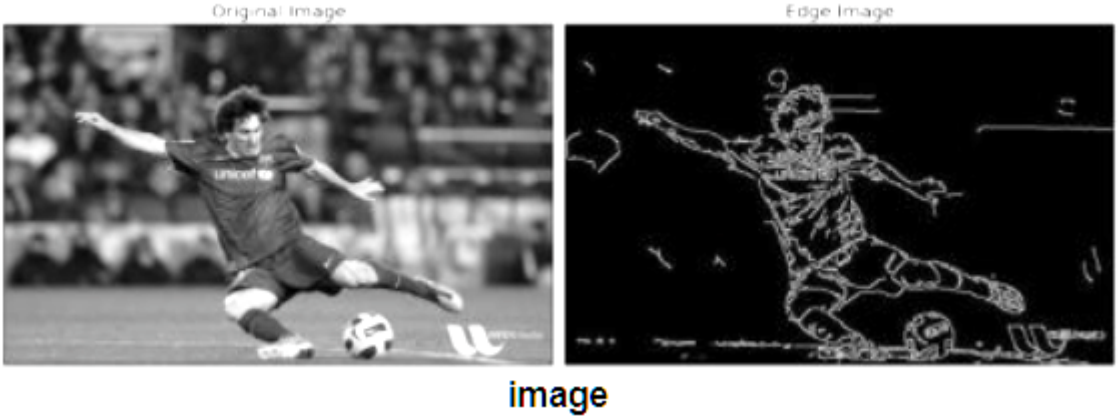
Figura 26: Imagem em escala de cinza com Gabor

Fonte: Autor (2022)

Outro filtro bastante citado na literatura é o *Canny Edge Detector* que é capaz de realçar as bordas e remover o conteúdo não pertencente às bordas, assim como

na imagem presente na documentação do OpenCv conforme figura 27, a implementação deste algoritmo está presente a seguir, assim como a imagem gerada conforme a figura 28.

Figura 27: Imagem com aplicação do filtro *Canny Edge Detector*

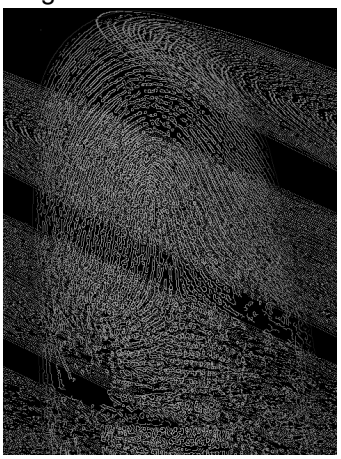


Fonte: OpenCv(2022)

```
    private Mat applyEdgeDetector(Mat image) {
        log.info("Applying Canny edge detector");
                Mat detectedEdges = new Mat(image.height(), image.width(),
CvType.CV_8UC1);
        Imgproc.blur(image, detectedEdges, new Size(3, 3));
        Imgproc.Canny(detectedEdges, detectedEdges, 10, 30);

        Mat dest = new Mat(image.height(), image.width(), CvType.CV_8UC1);
        image.copyTo(dest, detectedEdges);
        return dest;
    }
```

Figura 28: Imagem em escala de cinza com Canny



Fonte: Autor (2022)

Fica evidente que a utilização do filtro de *Canny Edge Detector* não trouxe o resultado esperado para as biometrias, exibindo muito ruído junto da imagem, já que este é um filtro passa-alta. Por fim, após a aplicação dos vários filtros, viu-se que alguns deles realçam detalhes no fundo da imagem, que não é uma zona de interesse, e dependo do que estiver presente no fundo da foto, pode impactar muito negativamente na qualidade da extração e no *match* dessa biometria. Portanto é imprescindível a segmentação da foto original, removendo o fundo presente desta. Os métodos expostos a seguir exibem a implementação do algoritmo para remoção de fundo.

```
    private Mat removeBackground(Mat image) {
        log.info("Removing simple background of image");

        int r = image.rows();
        int c = image.cols();
        Point p1 = new Point(c / 100, r / 100);
        Point p2 = new Point(c - c / 100, r - r / 100);
        Rect rect = new Rect(p1, p2);
        Mat mask = new Mat();
        Mat fgdModel = new Mat();
        Mat bgdModel = new Mat();

                Imgproc.grabCut(image, mask, rect, bgdModel, fgdModel, 5,
Imgproc.GC_INIT_WITH_RECT);
```

```
        Mat source = new Mat(1, 1, CvType.CV_8U, new Scalar(3.0));
        Core.compare(mask, source, mask, Core.CMP_EQ);

                Mat foreground = new Mat(image.size(), CvType.CV_8UC3, new
Scalar(255,
                  255, 255, 255));
        image.copyTo(foreground, mask);
        return foreground;
    }
```

Figura 29: Imagem com fundo removido (segmentado)

Fonte: Autor (2022)

4.3 Desempenho dos algoritmos de tratamento de imagens

Após a implementação de todos os algoritmos exibidos na seção anterior, é necessário garantir que estes sejam executados rapidamente, não impedindo o uso em larga escala. Portanto foi realizada uma análise no tempo de execução dos filtros, e praticamente todos eles se mostraram bem eficazes, com tempo de execução na casa de algumas dezenas ou centenas de milissegundos, o que é completamente aceitável para processamento das imagens. Porém o filtro de segmentação executa em um tempo variável, com forte dependência da imagem, onde em imagens com poucos detalhes ao fundo (pouca variação) e pequenas (aproximadamente 800 x 800 pixels) é possível concluir a segmentação em média em 600ms, porém em imagens maiores e com mais detalhes o filtro pode levar até 5s para finalizar a execução.

Na tentativa de sanar o problema de tempo de execução do algoritmo de remoção de fundo proposto inicialmente, foi realizada uma nova busca na literatura para a implementação de um novo método mais eficiente. Com base em STACK OVERFLOW (2013) e STACK OVERFLOW (2016) foi possível realizar o desenvolvimento do algoritmo a seguir:

```
    private Mat removeBackgroundAdvanced(Mat image) {
        log.info("Removing advanced background of image");
        Mat mask = new Mat();
        Imgproc.threshold(image, mask, 128, 255, Imgproc.THRESH_BINARY);

           Core.inRange(mask, new Scalar(0, 0, 0), new Scalar(10, 10, 10),
mask);
        Core.bitwise_not(mask, mask);

        return removeBackgroundFromMask(image, mask);
    }

    private Mat removeBackgroundFromMask(Mat image, Mat mask) {
        log.info("Removing background from mask");
        int r = image.rows();
        int c = image.cols();
        Point p1 = new Point(c / 100, r / 100);
        Point p2 = new Point(c - c / 100, r - r / 100);
        Rect rect = new Rect(p1, p2);
        Mat fgdModel = new Mat();
        Mat bgdModel = new Mat();

         convertToOpencvValues(mask); // from human readable values to OpenCV
values
               Imgproc.grabCut(image, mask, rect, bgdModel, fgdModel, 5,
Imgproc.GC_INIT_WITH_MASK);
        convertToHumanValues(mask); // back to human readable values
        Imgproc.threshold(mask, mask, 128, 255, Imgproc.THRESH_TOZERO);

         Mat foreground = new Mat(image.size(), CvType.CV_8UC1, new Scalar(0,
0, 0));
        image.copyTo(foreground, mask);
```

```
        return foreground;
    }

    private void convertToHumanValues(Mat mask) {
        byte[] buffer = new byte[3];
        for (int x = 0; x < mask.rows(); x++) {
            for (int y = 0; y < mask.cols(); y++) {
                mask.get(x, y, buffer);
                int value = buffer[0];
                if (value == Imgproc.GC_BGD) {
                    buffer[0] = 0; // for sure background
                } else if (value == Imgproc.GC_PR_BGD) {
                    buffer[0] = 85; // probably background
                } else if (value == Imgproc.GC_PR_FGD) {
                    buffer[0] = (byte) 170; // probably foreground
                } else {
                    buffer[0] = (byte) 255; // for sure foreground

                }
                mask.put(x, y, buffer);
            }
        }
    }

    private void convertToOpencvValues(Mat mask) {
        byte[] buffer = new byte[3];
        for (int x = 0; x < mask.rows(); x++) {
            for (int y = 0; y < mask.cols(); y++) {
                mask.get(x, y, buffer);
                int value = buffer[0];
                if (value >= 0 && value < 64) {
                    buffer[0] = Imgproc.GC_BGD; // for sure background
                } else if (value >= 64 && value < 128) {
                    buffer[0] = Imgproc.GC_PR_BGD; // probably background
                } else if (value >= 128 && value < 192) {
                    buffer[0] = Imgproc.GC_PR_FGD; // probably foreground
                } else {
                    buffer[0] = Imgproc.GC_FGD; // for sure foreground

                }
                mask.put(x, y, buffer);
```

```
                }
            }


    }
```

Figura 30: Imagem com fundo removido (segmentado) em algoritmo proposto

Fonte: Autor (2022)

Apesar de na imagem exibida na figura 30 o resultado estar correto e até melhor que o resultado obtido no algoritmo inicial, assim como o tempo de execução ter diminuído de uma média de 3s para 600ms, o algoritmo proposto não consegue remover corretamente o fundo em todos os casos, o que é mais impactante para a aplicação do que o baixo desempenho obtido no primeiro exemplo. Desta forma, para os objetivos deste trabalho, optou-se por utilizar o primeiro algoritmo, deixando a otimização como um trabalho futuro, já que este funciona para todos os casos.

Com isso conclui-se que os algoritmos possuem um bom tempo de execução, tendo uma pequena demora na conclusão somente em imagens maiores e com muitos detalhes no fundo, porém no pior dos casos testados o tempo foi de 5s, o que é aceitável, já que esse algoritmo será executado uma única vez no momento da coleta dos dedos, não impactando na base final.

4.4 Definição do algoritmo para processamento de imagem

Nesta seção será apresentada a versão final do algoritmo de processamento de imagem, que será composto por vários dos métodos implementados na seção

4.2. Para a escolha do algoritmo proposto foi realizada a captura de fotos dos 10 dedos do autor, processamento das imagens pelos algoritmos e extração das minúcias. Após a extração é possível verificar o NFIQ obtido, a composição de algoritmos que gerasse os melhores NFIQs seria a versão final do algoritmo.

Após inúmeros testes (que não serão exibidos para resumir o desenvolvimento), o algoritmo que obteve o melhor resultado é composto pela execução em ordem dos algoritmos de espelhamento, remoção de fundo, conversão para escala de cinza, inversão da imagem, CLAHE e binarização. A implementação deste é exibida no trecho de código a seguir:

```
public byte[] processImage(byte[] image) {
    Mat matImage = getMatFromByteArrayImage(image);

    matImage = flipImage(matImage);
    matImage = removeBackground(matImage);
    matImage = convertImageToGrayScale(matImage);
    matImage = invertImage(matImage);
    matImage = applyAdaptiveHistogramEqualization(matImage);
    matImage = binarizeImage(matImage);
    matImage = crop(matImage);

    return getByteArrayImageFromMat(matImage);
}
```

Para um melhor entendimento do algoritmo proposto, os passos intermediários do método são exibidos no quadro 7, assim como o resultado final extraído (NFIQ 3) e com exibição das minúcias na figura 31.

Quadro 7: Imagem obtida após cada etapa do processamento em série

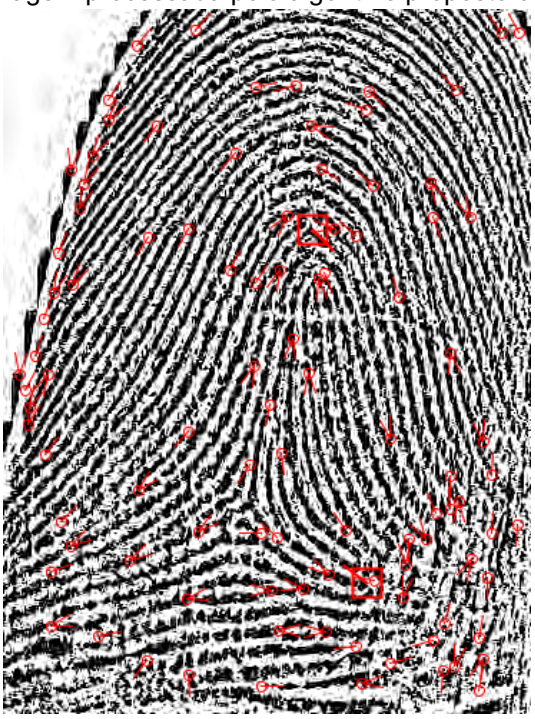
a	b	c	d	e	f	g
						

Legenda:

a) Flip - Imagem espelhada
b) Segmentação - Imagem sem fundo
c) Tons de cinza - Imagem em tons de cinza
d) Inversão - Imagem com cores invertidas
e) CLAHE - Imagem com aplicação do CLAHE
f) Binarização - Imagem binarizada
g) Crop - Imagem recortada no centro

Fonte: Autor (2022)

Figura 31: Imagem processada pelo algoritmo proposto com minúcias



NFIQ 1
Fonte: Autor (2022)

Percebe-se uma grande melhoria na visualização das minúcias da foto original, sendo relativamente fácil de comparar-se visualmente duas biometrias extraídas pelo método proposto, que juntamente com o NFIQ 1 extraído (dentro dos parâmetros aceitáveis internacionalmente) comprova a eficácia do algoritmo. É importante ressaltar que embora o NFIQ 1 obtido nessa biometria seja equivalente ao obtido nos testes iniciais, o valor inicial foi provavelmente mascarado por uma "falha" na implementação do NFIQ 1.0, que por apresentar mais pontos condizentes com possíveis minúcias fez com que o *score* fosse maior, executando o NFIQ 2.0 sobre a mesma biometria foi obtido um score de 42, que seria equivalente a um NFIQ 1.0 de 3. Essa "falha" na implementação do NFIQ 1.0 foi corrigida na implementação do NFIQ 2.0 (FIUMARA, 2021) que melhora a qualidade da

validação e consegue distinguir melhor entre os níveis de qualidade, já que essa possui uma avaliação de 0 a 100.

4.5 Desenvolvimento do algoritmo de verificação biométrica

Nesta seção será descrito o algoritmo responsável pela verificação biométrica, ou seja, a utilização do extrator e *matcher*. Assim como mencionado anteriormente ambos são pertencentes ao SDK desenvolvido pela Neurotechnology e que foram utilizados por meio de requisições a uma API REST desenvolvida pela BRy Tecnologia que utiliza o SDK, diminuindo assim a complexidade de se integrar com a biblioteca.

Para se utilizar essa API desenvolvida pela BRy é bem simples, para a extração basta informar a URL do serviço e fazer uma chamada POST com o *body* contendo a lista de biometrias pertencentes a cada operação (normalmente envolve somente um dedo, porém podem ser utilizados os 10 dedos e a face), informando o nome da biometria e o base64 contendo os dados necessários (wsq, png ou jpg). As biometrias devem ser informadas seguindo a convenção a seguir:

- RIGHT_HAND_INDEX = Dedo indicador da mão direita;
- RIGHT_HAND_MIDDLE = Dedo médio da mão direita;
- RIGHT_HAND_RING = Dedo anelar da mão direita;
- RIGHT_HAND_PINKY = Dedo mínimo da mão direita;
- RIGHT_HAND_THUMB = Dedo polegar da mão direita;
- LEFT_HAND_INDEX = Dedo indicador da mão esquerda;
- LEFT_HAND_MIDDLE = Dedo médio da mão esquerda;
- LEFT_HAND_RING = Dedo anelar da mão esquerda;
- LEFT_HAND_PINKY = Dedo mínimo da mão esquerda;
- LEFT_HAND_THUMB = Dedo polegar da mão esquerda;
- FACE = Face.

Como resultado da extração será retornado um objeto json contendo o template extraído, um *HashMap* contendo as biometrias, um *HashMap* contendo a qualidade NFIQ das mesmas, o *token* da face caso esteja presente na requisição (o

token é a imagem já recortada na área da face com a orientação corrigida) e as validações de conformidade da face.

Já para o *matcher* é realizada uma operação de *verify* (verificação 1:1) por meio de uma chamada POST passando no *body* dois *byte arrays* referentes a cada um dos templates no qual se quer verificar. Os templates são obtidos no resultado da extração. O retorno do *verify* é um objeto json contendo a operação que foi realizada, resultado (Sucesso ou não), *score*, descrição, identificador e data.

O código de implementação da conexão com extrator e matcher não será detalhado por ser muito simples e por estar presente no anexo deste trabalho. Já o código da API REST utilizada é privado e apenas faz a utilização do SDK da Neurotechnology que também é privado e não é possível acessá-lo.

4.6 Desenvolvimento da API

Nesta seção será descrito o desenvolvimento da interface da API, como utilizá-la, documentação e exemplos de uso com o Postman. A API é composta por quatro *endpoints*, sendo um deles responsável exclusivamente pelo processamento de imagem, outro por extrair os templates (realizando ou não o tratamento de imagem), e dois para verificação biométrica, onde um deles é exclusivo para verificar dois templates já extraídos, e o segundo para processar as imagens caso necessário, extrair e verificar os dois templates obtidos.

O código responsável pela definição e implementação da interface está contido na classe Java FingerprintPhotoMatcherController.java, que pode ser encontrada no código fonte da aplicação. A API foi documentada e disponibilizada no Postman, estando os arquivos necessários na raiz do projeto disponibilizado, um arquivo contendo as variáveis necessárias para testes também está presente.

O primeiro dos *endpoints* pertencentes a API do Fingerprint Photo Matcher é o *endpoint* de processamento da imagem, que pode ser acessado via REST por uma chamada POST para a URL da aplicação (localhost:8080 se executada localmente) e *path* /process-image, informando no body um json contendo o base64 da imagem a ser processada, no formato:

```
{
  "image": "BASE64"
}
```

Após realizada a chamada para o process-image, o base64 da imagem é retornado no corpo da resposta.

A API possui também o *endpoint* de extração de template, que pode ser requisitado via POST na URL da aplicação com path /extract-template. No body da requisição é necessário informar um json contendo um booleano de avaliação de qualidade (retornando o NFIQ) e a lista de biometrias a serem avaliadas contendo o nome da biometria, base64 e booleano *processImage* para processar a imagem caso seja uma foto e não um WSQ, conforme padrão abaixo:

```
{
  "biometrics": [
    {
      "bodyPart": "RIGHT_HAND_INDEX",
      "data": "{{RIGHT_HAND_INDEX-1}}",
      "processImage": true
    }
  ],
  "evaluateQuality": "true"
}
```

O retorno é composto pelo template e pela lista de biometrias com o nome, NFIQ e base64.

```
{
    "biometrics": [
        {
            "bodyPart": "RIGHT_HAND_INDEX",
            "nfiq": 2,
            "data": "base64"
        }
    ],
    "template": "template"
}
```

Já o *endpoint* de verificação que também realiza o processamento de imagens pode ser acessado pelo path /verify através de uma chamada POST com body contendo duas estruturas iguais ao *endpoint* de extração encapsuladas em cada template, conforme exemplo:

```
{
  "template1": {
```

```
        "biometrics": [
          {
            "bodyPart": "RIGHT_HAND_INDEX",
            "data": "{{RIGHT_HAND_INDEX-1}}",
            "processImage": true
          }
        ],
        "evaluateQuality": "true"
      },
      "template2":  {
        "biometrics": [
          {
            "bodyPart": "RIGHT_HAND_INDEX",
            "data": "{{RIGHT_HAND_INDEX-2}}",
            "processImage": true
          }
        ],
        "evaluateQuality": "true"
      }
    }
```

O retorno desse endpoint contém um json com a operação solicitada, resultado da operação (match ou não), *score*, resultado esperado (utilizado em testes) e descrição, conforme com a seguinte estrutura:

```
    {
      "operation": "VERIFY",
      "result": "SUCCESS",
      "score": 359,
      "expectedResult": null,
      "description": "OK"
    }
```

Por fim, existe o endpoint de verificação de templates, um POST com path /verify-templates que possui o mesmo retorno do endpoint anterior, porém com estrutura json da requisição mais simples, contendo apenas os dois templates a serem validados (que podem ser obtidos a partir do endpoint de extração), como no trecho abaixo:

```
    {
      "template1": "{{template1}}",
      "template2": "{{template2}}"
    }
```

Portanto está definida a interface de utilização da API proposta para este trabalho.

5 EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos experimentos realizados com o Fingerprint Photo Matcher. O objetivo desses experimentos é demonstrar que o método proposto pode ser utilizado para identificar uma pessoa, e que pode ser utilizado em larga escala para os mais variados fins. Os experimentos realizados foram desenhados para avaliar as seguintes questões:

- Eficiência: O método proposto é eficaz na tarefa de identificar um indivíduo?
- Segurança: É seguro utilizar o modelo desenvolvido?
- Desempenho: O tempo de processamento é rápido o suficiente?
- Aplicabilidade: É possível utilizar o método proposto para qualquer fim?
- Facilidade de uso: O método desenvolvido é fácil de utilizar? Pode ser utilizado por qualquer pessoa com dispositivos acessíveis?

Para responder todos os questionamentos anteriores é necessário executar uma bateria de testes, e para garantir que os testes sejam confiáveis é preciso obter uma base de dados completa, vasta e com todos os casos possíveis, com o objetivo de testar o processamento e a verificação biométrica. Para popular a base foram coletados todos os 10 dedos do autor duas vezes a partir da leitora especializada já citada anteriormente (Suprema Biomini Slim S20) e armazenados em WSQs, formando uma base de 20 dedos obtidos tradicionalmente. Já para a parte da base que contém as fotos dos dedos, foram realizadas 4 fotos de cada dedo do autor, totalizando 40 fotos.

Com a base formada é possível executar 3600 comparações biométricas, sendo este um número considerável. Cabe ressaltar que quanto maior a base melhor seria a validade do teste, porém fazer a coleta de biometrias de terceiros para exposição neste trabalho exige um processo de aprovação em conselho de ética, optando-se por deixar para trabalhos futuros.

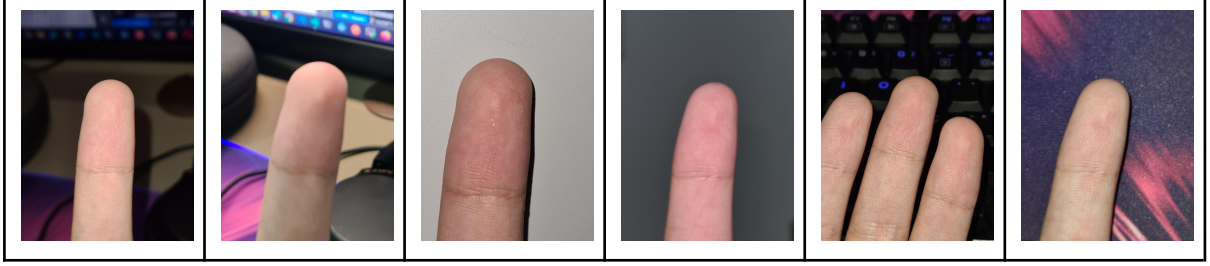
5.1 Base de testes e estratégia de execução

Assim como já mencionado anteriormente, foram obtidas 60 biometrias no total, sendo 20 destas WSQs obtidas tradicionalmente e as 40 restantes são fotos dos dedos obtidas a partir de um *smartphone* Samsung Galaxy S20. Essas

biometrias foram armazenadas no diretório src/test/resources do projeto e ficaram subdivididas em dois diretórios /images e /wsqs contendo as fotos e WSQs respectivamente.

Para a composição da base final de biometrias obtidas por fotos foram feitos diversos testes, os testes consistiram de inúmeras fotos do dedo do autor capturadas de maneiras variadas, por exemplo, com os dedos abertos ou fechados, com apenas um dedo levantado, com o fundo uniforme ou não e também com o fundo próximo ou distante. Algumas imagens de exemplificação dos métodos mencionados podem ser visualizadas no quadro 8:

Quadro 8: Exemplos de captura com outros métodos



Fonte: Autor (2022)

Para a execução do teste foi desenvolvido uma classe de testes FingerprintPhotoMatcherApplicationTests que possui todos os testes que serão executados, implementados com a biblioteca de testes do Spring (SpringBootTest). Nesta classe foi definido um único método de teste que é responsável por executar cada trecho das experimentações em ordem, já que cada experimentação depende do resultado de um passo anterior. O método principal está exposto abaixo:

```
@Test
void executeTests() {
    log.info("Tests started");
    cleanPreviousTests();
    buildPostmanEnvFile();
    processImages();
    processWsqs();
    verifyImagesWithWsqs();
    verifyImagesWithImages();
    verifyWsqsWithWsqs();
    buildReports();
    log.info("Tests finished successfully!");
}
```

O método principal irá executar em ordem a exclusão do resultado anterior, caso este já tenha sido executado, a geração de um *environment file* do Postman com os dedos presentes na base (para facilitar os testes utilizando diretamente a API proposta), o processamento e extração das imagens, extração dos WSQs, verificação das imagens contra os WSQs, verificação das imagens entre si, verificação dos WSQs entre si e por fim a geração de relatórios dos resultados obtidos em todas as etapas anteriores.

O *environment file* do Postman é gerado no diretório src/test/target/postman-env e deve ser importado no postman, junto a API disponibilizada no repositório do projeto, para que possa utilizar os dedos que compõem a base biométrica a fim de validar os resultados ou fazer experimentos próprios.

Na seção 5.2 será detalhado o processamento das biometrias e a extração das mesmas, na seção 5.3 será apresentado um detalhamento das verificações executadas e na seção 5.4 será feita uma análise das experimentações executadas, além de detalhamento do relatório gerado.

5.2 Testes de processamento de imagens

A primeira experimentação necessária para validar a qualidade do algoritmo de processamento desenvolvido é a validação do processamento das imagens, exibindo a imagem pós-processada e extraindo o template biométrico a partir dela, sendo possível então exibir o NFIQ obtido para a biometria e também a imagem com as minúcias detectadas expostas.

Para isso foi desenvolvido o teste de processamento de imagens, nessa etapa o sistema irá ler todas as biometrias que compõem a base para processá-las uma a uma com o método de processamento já exibido anteriormente (processImage) e após a execução deste método irá chamar o extrator da Neurotechnology para extrair, validar o NFIQ e exibir as minúcias obtidas em uma nova foto PNG.

É importante destacar que para as biometrias em WSQ não há necessidade da execução do processImage, já que este formato de arquivo é otimizado para armazenar uma biometria. O resultado desta etapa é armazenado no diretório src/test/target/processed que é subdivido em dois diretórios um para as imagens (/images) e um para os WSQs (/wsqs). O código para execução dessa etapa não será detalhado, porém pode ser acessado no repositório deste trabalho.

Para que seja possível compreender o resultado final detalhado na seção 5.4 é necessário primeiro entender os resultados obtidos nesta etapa das

experimentações, portanto será ilustrado cada passo com o resultado obtido. Uma das 40 biometrias que compõem o banco de testes de imagens obtidas por *smartphone* está exposta a seguir na figura 32.

Figura 32: Foto do dedo do autor (LEFT_HAND_MIDDLE-1)

Fonte: Autor (2022)

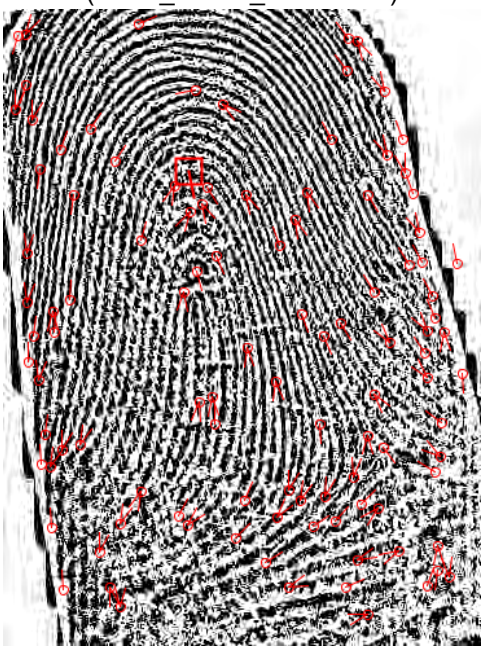
Após a execução do teste para este dedo em específico (dedo LEFT_HAND_MIDDLE-1 da base) foi obtida a imagem (Figura 33) após o passo de processamento de imagem, que resultou em um NFIQ 2 como disponível no arquivo LEFT_HAND_MIDDLE-1.json gerado após a execução do passo de extração.

Figura 33: Foto do dedo do autor processada pelo algoritmo proposto (LEFT_HAND_MIDDLE-1)

NFIQ 2
Fonte: Autor (2022)

Por fim é disponibilizado também a imagem com as minúcias em exibição após a extração, que é gerada no arquivo LEFT_HAND_MIDDLE-1-Minutiae.png e que pode ser visualizada na figura 34 a seguir:

Figura 34: Foto do dedo do autor processada pelo algoritmo proposto com minúcias (LEFT_HAND_MIDDLE-1)



NFIQ 2
Fonte: Autor (2022)

É evidente a melhora na exibição das minúcias após o processamento e também que a extração pode ser executada sem problemas gerando um bom template biométrico. Vale ressaltar que para a imagem obter o melhor resultado e poder ser comparada mais facilmente com os WSQs posteriormente, é necessário que a imagem seja redimensionada para conter 500 ppi, ou seja, possuir o mesmo tamanho das capturas feitas por leitores especializados tradicionais, já que o extrator e matcher utilizados seguem os padrões para *hardwares* especializados. Por conta disso as fotos presentes na base de imagens foram todas redimensionadas para conter aproximadamente 500 ppi, juntamente do *crop* realizado no algoritmo proposto, porém seria muito importante possuir um método para automatizar o redimensionamento para 500 ppi, que não será explorado neste momento, ficando como uma melhoria para trabalhos futuros.

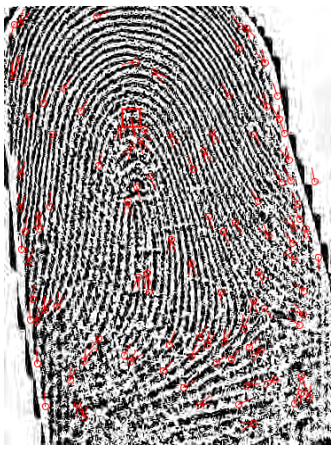
Além do processamento das imagens também é realizado a extração dos WSQs que compõem a base, para o mesmo dedo apresentado (LEFT_HAND_MIDDLE-1) o WSQ obtido já com as minúcias é apresentado na figura 35, obtendo um NFIQ 2, como exposto no arquivo LEFT_HAND_MIDDLE-1.json gerado pelo teste.

Figura 35: Dedo do autor obtido por leitora ótica especializada com minúcias (LEFT_HAND_MIDDLE-1)

NFIQ 2
Fonte: Autor (2022)

Após a exibição do WSQ com as minúcias fica evidente que a comparação visual entre os dois métodos é extremamente possível, e possuindo um treinamento de papiloscopia é fácil de identificar que as duas biometrias pertencem a mesma pessoa, assim como evidenciado no quadro 9.

Quadro 9: Foto processada ao lado de um WSQ

Biometria extraída por foto	**Comparada com (WSQ)**
 NFIQ: 2	 NFIQ: 2

Fonte: Autor (2022)

Um fato muito importante percebido na execução do teste descrito nesta seção é que o algoritmo de processamento de imagem está bem otimizado, trazendo bons resultados em um tempo baixo, levando em média um segundo para processar cada dedo. Cabe ressaltar que os mais de 60 processamentos estão disponíveis no repositório do projeto para uma avaliação completa dos testes realizados nesta etapa.

5.3 Testes de verificação biométrica

Após a experimentação bem sucedida do processamento das fotos é necessário prosseguir com a avaliação do método proposto e confirmar que este é capaz de verificar biometrias independente do tipo de captura e armazenamento. Portanto, é preciso realizar uma comparação (1:1) com todas as biometrias pertencentes a base.

Nesta etapa do teste o sistema irá comparar todas as biometrias obtidas por fotos do dedo entre si, depois compará-las com todos os WSQs coletados por meio dos leitores ópticos especialistas e por fim comparar todos os WSQs entre si. A verificação biométrica irá utilizar o matcher da Neurotechnology já mencionado anteriormente. O resultado desta etapa é armazenado no diretório src/test/target/result que é subdivido em três diretórios: um para as comparações entre imagens (/image-image), outro entre imagens e WSQs (/image-wsq) e um último para a comparação entre os WSQs (/wsq-wsq). Novamente o código para execução dessa etapa não será detalhado, porém pode ser acessado no repositório deste trabalho.

Cada comparação gera um arquivo .json com o resultado desta, este arquivo fica armazenado nos diretórios mencionados anteriormente e possuem um nome padronizado, sendo o nome do primeiro dedo (levando em consideração a subdivisão de bases - WSQ ou imagem) comparado separado por -Vs- do nome do segundo dedo, como por exemplo LEFT_HAND_MIDDLE-1-Vs-LEFT_HAND_MIDDLE-1.json. Neste arquivo irá conter um objeto JSON com os seguintes parâmetros: Operação (sempre uma verificação no contexto deste trabalho), resultado (correspondência ou não), *score* da

comparação, resultado esperado (correspondência ou não) e descrição do resultado.

Para exemplificar melhor o resultado obtido após a execução da etapa será novamente utilizado como base o dedo LEFT_HAND_MIDDLE-1 já exibido na etapa anterior, para este dedo foram executado alguns testes, entre eles a verificação (1:1) entre o próprio dedo LEFT_HAND_MIDDLE-1 obtido por imagens com ele mesmo, resultando em um *match* com *score* de 2700 conforme o seguinte JSON:


```
{
    "operation": "VERIFY",
    "result": "SUCCESS",
    "score": 2689,
    "expectedResult": "SUCCESS",
    "description": "OK"
}
```


Já a comparação entre o dedo LEFT_HAND_MIDDLE-1 obtido por leitoras especializadas com ele mesmo resultou em *match* com *score* de 1555 no seguinte JSON:


```
{
    "operation": "VERIFY",
    "result": "SUCCESS",
    "score": 1555,
    "expectedResult": "SUCCESS",
    "description": "OK"
}
```


E por fim a verificação entre o dedo LEFT_HAND_MIDDLE-1 obtido por foto com o mesmo dedo obtido pela leitora resultou também em um match biométrico e desta vez com score 165, indicando um FAR de menos de 0,000001%, o que é um valor excelente, como pode se ver no JSON abaixo:


```
{
    "operation": "VERIFY",
    "result": "SUCCESS",
    "score": 176,
```

```
        "expectedResult": "SUCCESS",
        "description": "OK"
    }
```

Foram executados ainda mais de 3600 comparações seguindo o mesmo formato exposto acima, onde a maioria deve resultar em não batimento biométrico já que não se tratam do mesmo dedo, todos os testes estão disponíveis no repositório do projeto e não serão detalhados nessa seção, porém será analisado o resultado final dos testes na seção 5.4.

Para uma verificação com resultado de *no match* o JSON gerado terá a seguinte estrutura, podendo variar o *score* e o resultado esperado conforme o teste executado.

```
    {
        "operation": "VERIFY",
        "result": "NO_MATCH",
        "score": 0,
        "expectedResult": "NO_MATCH",
        "description": "MATCH_NOT_FOUND"
    }
```

5.4 Análise dos testes e relatórios obtidos

Após a execução das etapas detalhadas nas seções anteriores o teste gera ainda alguns relatórios com detalhamento dos resultados obtidos nos testes, permitindo assim uma validação da qualidade do método proposto e uma resposta para cada uma das questões que fundamentaram os testes.

Estes relatórios são gerados no diretório /src/test/target/reports e possuem o formato .json com alguns objetos JSON contendo informações importantes das etapas anteriores. Após a obtenção dos relatórios serão gerados cinco arquivos, que são eles:

- Processed_Images_Report.json - Relatório com resultado do processamento das biometrias obtidas por foto;

- Processed_WSQs_Report.json - Relatório com resultado da extração das biometrias obtidas por leitora e armazenadas em WSQs;
- Verify_Image-Image_Report.json - Relatório com resultado das verificações (1:1) entre biometrias obtidas por foto entre si;
- Verify_Image-WSQ_Report.json - Relatório com resultado das verificações (1:1) entre biometrias obtidas por foto e biometrias obtidas por leitora;
- Verify_WSQ-WSQ_Report.json - Relatório com resultado das verificações (1:1) entre biometrias obtidas por leitora entre si;

Cada um destes relatórios será detalhado a seguir, pois são necessários para o entendimento completo dos testes e para validar a funcionalidade do método proposto.

Os dois relatórios que exibem o resultado do processamento das biometrias possuem a mesma estrutura e indicam quantas biometrias foram processadas e qual a quantidade de biometrias para cada valor de NFIQ possível, lembrando que variam de 1 a 5 sendo 1 o melhor. Para o processamento de biometrias obtidas por fotos foi obtido o seguinte relatório:


```
{
    "numberOfFiles": 41,
    "amountOfNfiq1": 13,
    "amountOfNfiq2": 10,
    "amountOfNfiq3": 1,
    "amountOfNfiq4": 15,
    "amountOfNfiq5": 2
}
```


Neste relatório podemos perceber que foram processadas 41 fotos e destas 41, 13 possuem NFIQ 1, 10 possuem NFIQ 2, uma possui NFIQ 3, 15 possuem NFIQ 4 e duas possuem NFIQ 5, ou seja, 24 de 41 estão dentro dos valores aceitáveis internacionalmente. Por conta disso o resultado das verificações posteriores pode ser negativamente afetado, já que com uma base de menor qualidade a verificação tende a não ser possível em todos os casos. Já para as biometrias obtidas por scanners especializados o seguinte relatório foi gerado:

```
{
    "numberOfFiles": 22,
    "amountOfNfiq1": 10,
    "amountOfNfiq2": 11,
    "amountOfNfiq3": 1,
    "amountOfNfiq4": 0,
    "amountOfNfiq5": 0
}
```


Neste relatório é possível concluir que das 22 biometrias processadas, 10 destas possuem NFIQ 1, 11 possuem NFIQ 2 e apenas uma possui NFIQ 3, sendo todas as 22 biometrias aceitas pelos padrões internacionais, o que deve levar a um impacto positivo na verificação entre si.

Avançando nos relatórios estão os resultados dos testes de verificação entre os três tipos possíveis de comparação, sendo a mesma estrutura de JSON compartilhada entre os três relatórios semelhantes. Nesta estrutura temos as seguintes indicações: Quantas verificações foram executadas, a quantidade de não correspondências, quantidade esperada de não correspondência, porcentagem de incidência da quantidade esperada de não correspondência, a quantidade de correspondências, quantidade esperada de correspondência, porcentagem de incidência da quantidade esperada de correspondência, e por fim a porcentagem geral de acertos.

Para a etapa de verificação das biometrias obtidas por foto obtivemos o seguinte resultado:


```
{
    "numberOfVerifies": 1681,
    "amountOfNoMatches": 1548,
    "expectedNoMatches": 1508,
    "hitPercentageOfNoMatch": 102.65251989389921,
    "amountOfMatches": 133,
    "expectedMatches": 173,
    "hitPercentageOfMatch": 76.878612716763,
    "amountOfFalseAcceptances": 0,
    "amountOfFalseRejections": 40,
    "amountOfTrueAcceptances": 133,
    "amountOfTrueRejections": 1508,
```

```
    "far": 0.0,
    "frr": 2.379535990481856,
    "tar": 76.878612716763,
    "trr": 100.0,
    "eer": 1.189767995240928,
    "overallHitPercentage": 97.62046400951814
}
```


Pode-se concluir a partir do relatório apresentado que foram executados 1681 verificações 1:1 entre as fotos e destas foram obtidos 1548 não correspondências de um total de 1508 esperadas, possuindo uma incidência de 102,65% de não correspondência, ou seja, recusando mais do que deveria, além de 133 correspondências de um total esperado 173 o que representa uma incidência de 76,87%. É possível visualizar também o estudo das taxas obtidas, que a partir de uma ocorrência de zero falsas aceitações, 40 falsas rejeições, 133 aceitações verdadeiras e 1508 rejeições verdadeiras foi obtido uma taxa de FAR de 0% (pelo *score* o FAR deve ser de 0,001%), FRR de 2,37%, TAR de 76,87%, TRR de 100% e EER de 1,18% e por fim totalizando um acerto geral de 97,62% das comparações. Estes valores obtidos podem ser considerados ótimos internacionalmente e suficientes para uma primeira versão do método proposto, já que a base de biometrias extraídas por um smartphone possui uma baixa qualidade de NFIQ, sendo os valores obtidos melhores do que o recomendado para um sistema de validação facial.

Podemos concluir que o sistema validou corretamente a maioria dos casos tendo como problema somente uma rejeição maior do que o esperado, dificultando a usabilidade mas mantendo a segurança muito elevada, já que não validou ninguém não autorizado.

Para as verificações de foto com WSQ obtivemos o seguinte relatório:


```
{
    "numberOfVerifies": 902,
    "amountOfNoMatches": 829,
    "expectedNoMatches": 810,
    "hitPercentageOfNoMatch": 102.34567901234568,
    "amountOfMatches": 73,
    "expectedMatches": 92,
    "hitPercentageOfMatch": 79.34782608695652,
```

```
    "amountOfFalseAcceptances": 0,
    "amountOfFalseRejections": 19,
    "amountOfTrueAcceptances": 73,
    "amountOfTrueRejections": 810,
    "far": 0.0,
    "frr": 2.106430155210643,
    "tar": 79.34782608695652,
    "trr": 100.0,
    "eer": 1.0532150776053215,
    "overallHitPercentage": 97.89356984478935
}
```


Com relatório apresentado conclui-se que foram executados 902 verificações 1:1 entre fotos e WSQs obtendo-se 829 não correspondências de um total de 810 esperadas, possuindo uma incidência de 102,34% de não correspondência, ou seja, novamente recusando mais do que deveria, além de 73 correspondências de um total esperado 92 o que representa um acerto de 79,34%, número acima do resultado anterior, o que comprova que a base de qualidade maior dos WSQs é impactante. As taxas obtidas são calculadas a partir de uma ocorrência de zero falsas aceitações, 19 falsas rejeições, 73 aceitações verdadeiras e 810 rejeições verdadeiras que levam a uma taxa de FAR de 0% (pelo *score* o FAR deve ser de 0,001%), FRR de 2,10%, TAR de 79,34%, TRR de 100% e EER de 1,05% e por fim totalizando um acerto geral de 97,89% das comparações. Novamente os valores obtidos podem ser considerados bons, já que a base de imagens (fotos de *smartphones*) possui uma baixa qualidade de NFIQ, o que impacta diretamente na verificação, causando uma diminuição da aceitação de usuários.

Por fim está o relatório de verificação entre os WSQs, exposto adiante:


```
    {
        "numberOfVerifies": 484,
        "amountOfNoMatches": 434,
        "expectedNoMatches": 434,
        "hitPercentageOfNoMatch": 100.0,
        "amountOfMatches": 50,
        "expectedMatches": 50,
        "hitPercentageOfMatch": 100.0,
        "amountOfFalseAcceptances": 0,
        "amountOfFalseRejections": 0,
        "amountOfTrueAcceptances": 50,
```

```
        "amountOfTrueRejections": 434,
        "far": 0.0,
        "frr": 0.0,
        "tar": 100.0,
        "trr": 100.0,
        "eer": 0.0,
        "overallHitPercentage": 100.0
    }
```


Neste relatório todas as 484 verificações conseguiram ter exatamente o resultado esperado, comprovando a qualidade da base, extrator e matcher envolvidos no teste. As taxas obtiveram os melhores valores possíveis, sendo 0% para FAR e FRR, ou seja, não houve falsas verificações, e 100% do TAR e TRR, ou seja, todas as verificações foram verdadeiras, o que resulta em um EER de 0% que é o melhor valor possível. Cabe ainda destacar que a execução de todas as etapas de teste e geração dos relatórios leva em média três minutos, o que é um tempo muito bom já que estão sendo realizados mais de 3600 comparações e mais de 60 processamentos.

Por fim é possível comprovar que o método sugerido é eficaz para resolver a demanda proposta com uma taxa média aproximada de FAR de 0,001%, TAR de 77% e EER de 1% (considerados excelentes pelo NIST), e que mesmo com a base de imagens estando composta por quase metade das biometrias com baixa qualidade o resultado foi bem expressivo e aceitável dentro dos parâmetros internacionais. Vale ressaltar que a base de imagens foi obtida sem muito esforço e com um método simples, caso esta seja melhorada será obtido um resultado melhor ainda, pois é possível averiguar que os baixos NFIQs são os provenientes dos resultados incorretos na verificação.

Para confirmar que os baixos NFIQs impactam negativamente o resultado das comparações, foi executada uma segunda bateria de testes com a utilização somente dos dedos com NFIQ menor ou igual a 3. Com isso o resultado obtido foi melhorado drasticamente, aumentando o TAR de verificações entre fotos de 76,97% para 84,21% e melhorando em poucas casas decimais as outras taxas, além de aumentar o TAR de verificações entre WSQs de 79,34% para 83,63% e melhorando também em poucas casas decimais os valores das outras taxas.

Portanto é possível assegurar todas as perguntas que motivaram os testes, sendo o método proposto eficaz (capaz de identificar um indivíduo corretamente), seguro (tem um nível de qualidade de comparação aceito internacionalmente), performático, aplicável a qualquer fim e muito fácil de utilizar com a API desenvolvida.

6 CONCLUSÕES

Este capítulo encerra o desenvolvimento deste trabalho. Serão revisitados as motivações e objetivos, junto de uma visão geral do projeto assim como a apresentação das contribuições e limitações. Por fim serão identificados os possíveis trabalhos futuros provenientes deste trabalho.

6.1 Revisão das motivações e objetivos

Nos últimos anos observou-se uma tendência cada vez maior no uso de identificação biométrica, aliado ao crescimento do uso dos *smartphones*. Ainda neste período houve o início de uma pandemia global, onde as pessoas foram forçadas a descobrir maneiras de não entrarem em contato umas com as outras, o que voltou os olhares para métodos de autenticação biométrica seguros que não necessitasse de contato.

O levantamento do estado da arte realizado neste trabalho demonstrou que ainda não existe nenhum meio seguro e eficaz para identificar as pessoas sem necessitar de contato. Existem alguns modelos propostos para cobrir essa lacuna, porém todos carecem de alguns detalhes importantes e principalmente são difíceis de serem aplicados em larga escala, possuindo um valor de implantação elevado.

Por conta disso, o objetivo geral deste trabalho foi apresentar um modelo de identificação biométrica para validação das impressões digitais sem que haja a necessidade de contato, para isso foi utilizado a câmera presente nos *smartphones*. Para atender este objetivo, alguns objetivos específicos foram perseguidos, que são: Extração de impressões digitais a partir de uma foto processada, validação da qualidade das biometrias obtidas bem como níveis de FAR e TAR obtidos independente do método de obtenção da biometria e desenvolvimento de uma API REST que disponibilize de maneira fácil a utilização do modelo desenvolvido.

6.2 Visão geral do trabalho

Este trabalho apresentou um método proposto para a verificação biométrica por impressões digitais obtidas a partir de uma simples foto de *smartphone*, de maneira a evitar o contato das pessoas com uma leitora e diminuir o custo para a validação da biometria.

O trabalho pode ser dividido em três partes principais. A primeira delas consiste na revisão dos fundamentos teóricos para o desenvolvimento do método proposto, assim como a revisão do estado da arte das verificações biométricas sem contato. Sendo esta uma parte crucial para o entendimento do objetivo e definição da proposição final deste trabalho.

A segunda parte abrange o desenvolvimento da aplicação que realiza todo o processamento necessário para atingir o resultado esperado. Buscou-se utilizar métodos simples e fáceis de serem implementados para que a execução se realizasse em um tempo baixo. Foram necessários vários micro testes para a obtenção dos algoritmos de processamento parciais, assim como o algoritmo final.

E a terceira parte do trabalho consiste na criação, execução e validação dos testes. Nessa etapa procurou-se exibir os dados de uma maneira simples e que fosse capaz de validar que o método proposto é capaz de validar corretamente uma verificação biométrica dentro dos padrões internacionais. Desta maneira alcançou-se o objetivo proposto para o projeto.

6.3 Contribuições

De acordo com os objetivos definidos para este trabalho, pode-se listar várias contribuições como um detalhamento de como funciona o processo de identificação biométrica, análise de minúcias e tratamento de imagens. Também foi possível desenvolver um método capaz de processar fotos obtidas através de *smartphones*, ou qualquer câmera comum, extraí-las em um template biométrico e realizar uma comparação 1:1 de fotos com WSQs ou outras fotos, mantendo a qualidade e taxa de FAR dentro de 0.001% que é considerado ótimo internacionalmente.

Cabe ressaltar que o método sugerido é eficaz para resolver a demanda proposta com uma taxa média aproximada de FAR de 0,001%, TAR de 77% e EER de 1% (considerados excelentes pelo NIST), e que mesmo com a base de imagens estando composta por quase metade das biometrias com baixa qualidade o resultado foi bem expressivo e aceitável dentro dos parâmetros internacionais. Considerando somente biometrias com NFIQ 1 a 3 os valores obtidos foram de FAR de 0,001%, TAR de 83% e EER de 1%.

Além disso foi realizada uma revisão dos trabalhos relacionados na área, mostrando as principais diferenças entre cada trabalho, bem como a utilização de maneiras não tradicionais no processamento das imagens e o desenvolvimento de uma API REST para o método de verificação proposto, a fim de tornar simples a utilização por qualquer pessoa. Diferentemente dos outros trabalhos na área, este levou em consideração NFIQ e fez uma validação completa das taxas de qualidade, além de também focar em como obter as biometrias.

6.4 Trabalhos futuros

Como continuação deste trabalho, pode ser realizada uma busca por algoritmos de tratamento de imagens, junto com a busca de novos filtros que possam realçar mais as minúcias da foto tirada, independente das condições, facilitando a extração da digital. Buscar por uma boa implementação do filtro de Gabor, que possua um filtro de estimativa de orientação das elevações da

impressão digital, assim como um filtro de estimativa de frequência dessas elevações.

Também para ajudar no processamento de biometrias e testes, realizar uma longa sessão de coleta, armazenando várias biometrias com diferentes índices de qualidade (extraídas pelos sensores tradicionais) e várias fotos de outros *smartphones* e câmeras, as quais serão posteriormente processadas. Assim como a coleta de biometrias de mais pessoas, a fim de compor uma base realmente vasta e completa. Implementar uma forma de testes automatizados considerando toda a nova base, levantando relatórios mais completos que os dispostos aqui. Ainda no ramo da coleta, é possível estudar as melhores maneiras de obtenção da foto e até mesmo o desenvolvimento de um APP que detecta a zona de interesse dos dedos e faz um recorte automático da área, auxiliando na captura, e ainda fazendo com que a imagem seja automaticamente redimensionada para conter 500 ppi na zona de interesse. Para facilitar ainda mais a coleta o ideal seria tirar apenas a foto da mão e a partir desta executar um recorte em cada dedo.

Outra melhoria a ser realizada seria a utilização de um novo algoritmo de segmentação, pois o algoritmo utilizado não se mostrou capaz de funcionar em qualquer cenário, demorando consideravelmente para imagens grandes e detalhadas. Por fim criar uma forma de validação de prova de vida, já que a prova de vida de um dedo depende fortemente de confiança no dispositivo utilizado para a captura (leitoras medem radiação infravermelha) e no acompanhamento de um terceiro confiável. Para desenvolver essa validação poderia ser utilizado uma coleta com mais *frames* e IA para detectar o movimento do dedo e fazer uma captura "3D" com aproximação e afastamento do dedo, com o objetivo de provar que é uma pessoa de fato viva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADOBE. **How to switch up your color scheme.** Disponível em: https://www.adobe.com/creativecloud/photography/discover/invert-colors.html. Acesso em: 04 jan. 2023.

ANDRESS, Jason. **Basics of Information Security (Second Edition)**. 2014**.** Disponível em: https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/false-acceptance-rate. Acesso em: 22 jul. 2022.

AWARE. **Identificação e verificação biométrica.** 2022. Disponível em: https://www.aware.com/pt/identificacao-e-verificacao-biometrica/. Acesso em: 20 jul. 2022.

BAELDUNG. **Intro to OpenCV with Java.** 08 fev. 2020. Disponível em: https://www.baeldung.com/java-opencv. Acesso em: 21 nov. 2022.

BANSAL, Roli; SEHGAL, Priti; BEDI, Punam. **Minutiae Extraction from Fingerprint Images - a Review.** Set. 2011. Disponível em: https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1201/1201.1422.pdf. Acesso em: 21 jul. 2022.

CARDILOGIX. **NIST Fingerprint Image Quality (NFIQ).** Disponível em: https://www.cardlogix.com/glossary/nist-fingerprint-image-quality-nfiq/. Acesso em: 20 jul. 2022.

CERTISIGN. **Qual é a relação entre a impressão digital e a sua personalidade?**., 28 ago. 2017. Disponível em: https://blog.certisign.com.br/qual-e-a-relacao-entre-a-impressao-digital-e-a-sua-personalidade/. Acesso em 20 jul. 2022.

CHOI, H.; CHOI, K.; KIM, J. **"Mosaicing Touchless and Mirror-Reflected Fingerprint Images"** in IEEE Transactions on Information Forensics and Security, v. 5, n. 1, p. 52-61, Mar. 2010, doi: 10.1109/TIFS.2009.2038758.

CHOWDHURY, A M Mahmud; IMTIAZ, Masudul Haider. **"Contactless Fingerprint Recognition Using Deep Learning - A Systematic Review".** set. 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/363385196_Contactless_Fingerprint_Recognition_Using_Deep_Learning-A_Systematic_Review. Acesso em: 20 jul. 2022.

CIMPANU, Catalin. **Scientists Extract Fingerprints from Photos Taken From up to Three Meters Away.** Bleeping Computer. 12 jan. 2017. Disponível em: https://www.bleepingcomputer.com/news/security/scientists-extract-fingerprints-from-photos-taken-from-up-to-three-meters-away/. Acesso em: 01 mar. 2022.

DATAGEN. **Image Segmentation:** The Basics and 5 Key Techniques. Disponível em: https://datagen.tech/guides/image-annotation/image-segmentation/. Acesso em: 04 jan. 2023.

DORIZZI, B. *et al*. **"Fingerprint and On-Line Signature Verification Competitions at ICB 2009"**, in proceedings International Conference on Biometrics (ICB), Alghero, Italy, p. 725-732. Jun. 2019.

DRULLIS, Gustavo. **Serpro abre edital para solução de captura de digitais com câmera do celular.** 25 jul. 2022. Disponível em: https://www.mobiletime.com.br/noticias/25/07/2022/serpro-abre-edital-para-solucao-de-captura-de-digitais-com-camera-do-celular/. Acesso em: 20 nov. 2022.

FIUMARA, Greg. **Releases: usnistgov/NFIQ2**. 2021. Disponível em: https://github.com/usnistgov/NFIQ2/releases Acesso em: 31 dez. 2023.

FVC-ONGOING. **Published Results:** Fingerprint Verification. 2023. Disponível em: https://biolab.csr.unibo.it/fvcongoing/UI/Form/PublishedAlgs.aspx#&&rURsNOBN92xHvjxPZGC6ijhPFrM/3jvSgQW4k4kb2N6WSmFNBeVjER/ctEmy/LeYAsEnQJS7YXm2S1n0FG6OEv4di3+jYBjmpFdvXB3dvT1n2z6HlFGmNiFluVZ3bAC1enEVaTMxzFy28IIGYDo3zxThgPM=. Acesso em 02 fev. 2023.

GARRIS, Michael D.; WILSON, Charles L. **NIST Biometrics Evaluations and Developments.** Disponível em: https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-1ba4778e3b87bdd6ce660349317d3263/pdf/GOVPUB-C13-1ba4778e3b87bdd6ce660349317d3263.pdf. Acesso em 03 fev. 2023.

GIMP. Disponível em: https://www.gimp.org/. Acesso em: 22 jul. 2022.

GIOVANINI, Adenilson. **Filtro Passa Alta?**. 2022. Disponível em: https://adenilsongiovanini.com.br/blog/filtro-passa-alta-o-que-e-e-para-que-serve/ Acesso em: 30 jul. 2022

GOGONI, Ronaldo. **O que é biometria? Os 6 tipos mais usados na tecnologia.** 2019. Disponível em: https://tecnoblog.net/responde/o-que-e-biometria-tecnologia/. Acesso em: 21 jul. 2022.

GUPTA, Saksham; ANAND, Sukhad; RAI, Atul. **Efficient Fingerprint Extraction and Matching Using Smartphone Camera.** 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318899084_Fingerprint_Extraction_Using_Smartphone_Camera. Acesso em: 21 jul. 2022.

HANSEN, Lauren. **Is Biometric Technology Worth the Cost?**, 30 jul. 2021. Disponível em: https://www.cioinsight.com/infrastructure/biometric-technology/#:~:text=How%20Much%20Does%20Biometric%20Security,little%20as%20%2420%20per%20device. Acesso em 20 de jul. 2022.

IJRET, Editor. EFFICIENT FINGERPRINT IMAGE ENHANCEMENT ALGORITHM BASED ON GABOR FILTER. **ACADEMIA.** Abr. 2014. Disponível em: https://www.academia.edu/7552233/EFFICIENT_FINGERPRINT_IMAGE_ENHANCEMENT_ALGORITHM_BASED_ON_GABOR_FILTER. Acesso em: 10 nov. 2022.

INNOVATRICS. **Equal Error Rate (EER).** 2022. Disponível em: https://www.innovatrics.com/glossary/equal-error-rate-eer/#:~:text=A%20statistic%20used%20to%20show,accuracy%20of%20the%20biometric%20system. Acesso em: 20 jul. 2022.

IPSISPRO. **Aprenda tudo sobre lentes fotográficas agora.** 30 abr. 2019. Disponível em: https://blog.ipsispro.com.br/tudo-sobre-lentes-fotograficas. Acesso em: 22 jul. 2022.

JUNIOR, Luciano Lucas de Oliveira. **Filtros Compostos e Adaptativos: o filtro de Gaussiano, Laplaciano do Gaussiano e de Gabor (Harmônico-Gaussiano)**. 2017. Disponível em: http://www.ic.uff.br/~aconci/Gabor.pdf Acessado em: 21 jul. 2022

KHANDELWAL, Swati. **Hacker Clones German Defense Minister's Fingerprint Using Just her Photos**. The Hacker News, 30 dez. 2014. Disponível em: https://thehackernews.com/2014/12/hacker-clone-fingerprint-scanner.html. Acesso em 01 mar. 2022.

KUMAR, A.; KWONG, C. **"Towards Contactless, Low-Cost and Accurate 3D Fingerprint Identification"** in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 37, n. 3, p. 681-696, 1 March 2015, doi: 10.1109/TPAMI.2014.2339818.

LEOCÁDIO, Rodrigo. **Formatos de Imagem: Aprenda tudo sobre os principais Formatos de Imagem Digital!.** Futura Express, 02 mar. 2020. Disponível em: https://www.futuraexpress.com.br/blog/formatos-de-imagem/. Acesso em: 21 jul. 2022.

LIBERT, John; ORANDI, Shahram; GRATHAM, John. **Comparison of the WSQ and JPEG 2000 Image Compression Algorithms On 500 ppi Fingerprint Imagery.** 24 abr. 2012. Disponível em: https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-cc24a731f16cb865d9164f88def784ee/pdf/GOVPUB-C13-cc24a731f16cb865d9164f88def784ee.pdf. Acesso em: 21 jul. 2022.

LIBRARY. **What is Resolution?.** Disponível em: https://guides.lib.umich.edu/c.php?g=282942&p=1885350#:~:text=PPI%20(Pixels%20Per%20Inch)%20refers,ink%20on%20a%20printed%20image. Acesso em: 04 jan. 2023.

MAJHI, Banshidhar *et al*. **Machine Learning for Biometrics:** Concepts, Algorithms and Applications. 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/book/9780323852098/machine-learning-for-biometrics. Acesso em: 22 jul. 2022.

MÁRCICO, José Eduardo. **Papiloscopia**. 2022. Disponível em: http://www.papiloscopia.com.br/historia.html Acesso em: 20 jul. 2022

MARCONDES, José Sérgio. **Biometria, Sistema Biométrico: O que é, Como Funciona?**. Blog Gestão de Segurança Privada, 11 de ago. 2020. Disponível em: https://gestaodesegurancaprivada.com.br/biometria-sistema-biometrico-o-que-e-como-funciona. Acesso em: 19 jul. 2022.

MARY, Clark. **Biometric Glossary: Technical Terms and Definitions.** Bayometric. 2022. Disponível em: https://www.bayometric.com/biometric-glossary-terms-definitions/ Acesso em: 20 jul. 2022.

MARY, Clark. **Can Smartphone Work As A Biometric Device? Your Phone Is More Powerful Than You Know.** Bayometric. 2022. Disponível em: https://www.bayometric.com/smartphone-as-a-biometric-device/ Acesso em: 20 jul. 2022.

MARY, Clark. **False Acceptance Rate (FAR) and False Recognition Rate (FRR) in Biometrics.** Bayometric. 2022. Disponível em: https://www.bayometric.com/false-acceptance-rate-far-false-recognition-rate-frr/ Acesso em: 20 jul. 2022.

MARY, Clark. **Identification (1:N) vs. Verification (1:1) vs. Segmented Identification (1:Few).** Bayometric. 2022. Disponível em: https://www.bayometric.com/identification-verification-segmented-identification/ Acesso em: 20 jul. 2022.

MARY, Clark. **Minutiae Based Extraction in Fingerprint Recognition.** Bayometric. 2022. Disponível em: https://www.bayometric.com/minutiae-based-extraction-fingerprint-recognition/

NEC. **How is biometric data stored?**, 14 abr. 2022. Disponível em: https://www.nec.co.nz/market-leadership/publications-media/how-is-biometric-data-stored/ Acesso em 20 de jul. 2022.

NEUROtechnology. Disponível em: https://www.neurotechnology.com/. Acesso em: 01 mar. 2022.

NEUROTECHNOLOGY. **Technology Awards.** 2023 Disponível em: https://www.neurotechnology.com/megamatcher-abis-awards.html. Acesso em: 31 dez. 2023.

NICE, Karim; WILSON, Tracy V.; GUREVICH, Gerald. **How Digital Cameras Work**. 29 nov. 2006. Disponível em: https://electronics.howstuffworks.com/cameras-photography/digital/digital-camera.htm Acessado em 22 jul. 2022.

NIST. **NFIQ 2**. 12 nov. 2021. Disponível em: https://www.nist.gov/services-resources/software/nfiq-2. Acesso em: 20 jul. 2022.

ONESPAN. **Autenticação biométrica: Definição, tendências, prós e contras, casos de uso e mitos**. 2022. Disponível em: https://www.onespan.com/pt-br/topics/autenticacao-biometrica#:~:text=A%20autenticação%20biométrica%20é%20um,e%20outros%20recursos%20de%20rede. Acesso em: 20 jul. 2022.

OPENCV. **Histogram Equalization.** Disponível em: https://docs.opencv.org/3.4/d4/d1b/tutorial_histogram_equalization.html. Acesso em: 30 dez. 2022.

OPENCV. **Histograms - 2: Histogram Equalization**. 2022. Disponível em: https://docs.opencv.org/4.x/d2/d74/tutorial_js_histogram_equalization.html. Acesso em: 21 nov. 2022.

OPENCV. **How to remove black background from grabcut output image in OpenCV android ?.** 24 nov. 2013. Disponível em: https://answers.opencv.org/question/24463/how-to-remove-black-background-from-grabcut-output-image-in-opencv-android/. Acesso em: 31 dez. 2022.

OTSU, N. **“A threshold selection method from gray-level histograms”**, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, 9(1), p. 62–66 (1979)

PORTO, Gabriela. Fotografia. **Infoescola.** 2022. Disponível em: https://www.infoescola.com/artes/fotografia/. Acesso em: 21 jul. 2022.

RAGHAVENDRA, R.; BUSCH, C.; YANG B. **"Scaling-robust fingerprint verification with smartphone camera in real-life scenarios"** 2013 IEEE Sixth International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS), 2013, p. 1-8, doi: 10.1109/BTAS.2013.6712736.

ROSEBROCK, Adrian. **OpenCV Histogram Equalization and Adaptive Histogram Equalization (CLAHE).** 01 fev. 2021. Disponível em: https://pyimagesearch.com/2021/02/01/opencv-histogram-equalization-and-adaptive-histogram-equalization-clahe/. Acesso em: 20 nov. 2022.

SHAH, Anuj. Through The Eyes of Gabor Filter. **Medium.** 17 jun. 2018. Disponível em: https://medium.com/@anuj_shah/through-the-eyes-of-Gabor-filter-17d1fdb3ac97. Acesso em: 20 nov. 2022.

SMITH, Ms. **Busted! Cops use fingerprint pulled from a WhatsApp photo to ID drug dealer.** CSO Online: 16 abr. 2018. Disponível em: https://www.csoonline.com/article/3268837/busted-cops-use-fingerprint-pulled-from-a-whatsapp-photo-to-id-drug-dealer.html. Acesso em: 01 mar. 2022.

SONY. **Qual é a diferença entre pontos por polegada (DPI) e Pixels por polegada (PPI)?.** 09 set. 2015. Disponível em:

https://www.sony.com.br/electronics/support/articles/00027623. Acesso em 02. fev. 2023.

SOUZA, Gabriel de Melo. **Laplaciano do Gaussiano.** 18 set. 2016. Disponível em: https://melosgabriel.github.io/pdi/6.Filtro-Espacial/#:~:text=Como%20vimos%20nas%20aulas%20da,suavizante%2C%20para%20eliminarmos%20os%20ru%C3%ADdos. Acesso em: 20 jul. 2022.

STACK OVERFLOW. **Extract Fingerprint from Image.** 26 dez. 2017. Disponível em: https://stackoverflow.com/questions/47974193/extract-fingerprint-from-image. Acesso em: 01 mar. 2022.

STACK OVERFLOW. **Fingerprint scanner using camera of android device.** 05 mai. 2016. Disponível em: https://stackoverflow.com/questions/37053197/fingerprint-scanner-using-camera-of-android-device. Acesso em: 01 mar. 2022.

STACK OVERFLOW. **How to combine the results of Gabor filter in OpenCV.** 12 ago. 2015. Disponível em: https://stackoverflow.com/questions/31969003/how-to-combine-the-results-of-Gabor-filter-in-opencv. Acesso em: 21 nov. 2022.

STACK OVERFLOW. **How to convolve an image with different Gabor filters adjusted according to the local orientation and density using FFT?.** 14 out. 2012. Disponível em: https://stackoverflow.com/questions/12878754/how-to-convolve-an-image-with-different-Gabor-filters-adjusted-according-to-the. Acesso em: 10 nov. 2022.

STACK OVERFLOW. **How to set a mask image for grabCut in OpenCV?.** 01 jan. 2013. Disponível em: https://stackoverflow.com/questions/14111716/how-to-set-a-mask-image-for-grabcut-in-opencv. Acesso em: 10 nov. 2022.

STACK OVERFLOW. **Removing black background and make transparent from grabcut output in python open cv.** 11 nov. 2016. Disponível em: https://stackoverflow.com/questions/40527769/removing-black-background-and-make-transparent-from-grabcut-output-in-python-ope. Acesso em: 10 nov. 2022.

STALLINGS, William. **Criptografia e segurança de redes: princípios e práticas**. 6. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2015. xvii, 558 p. ISBN 9788543005898.

STROMBERG, Joseph. **Adermatoglyphia: The Genetic Disorder Of People Born Without Fingerprints**, 14 jan 2014. Disponível em: https://www.smithsonianmag.com/science-nature/adermatoglyphia-genetic-disorder-people-born-without-fingerprints-180949338/ Acesso em: 20 jul. 2022

SUPREMA. **Suprema's Live Finger Detection Technology.** 26 set. 2016. Disponível em:

http://kb.supremainc.com/knowledge/doku.php?id=en:tc_whitepaper_suprema_live_finger_detection. Acesso em: 31 dez. 2022.

THAI, Raymond. **Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction.** 2003. Disponível em: https://www.peterkovesi.com/studentprojects/raymondthai/RaymondThai.pdf. Acesso em: 21 jul. 2022.

VIANA, Rafael. **Deepfakes: como vídeos falsos são usados para burlar sistemas de segurança**, 19 mai. 2022. Disponível em: https://www.combateafraude.com/post/deepfakes-videos-falsos-seguranca Acesso em: 21 jul. 2022.

WATSON, Craig I. *et al*. **User's Guide to NIST Biometric Image Software (NBIS).** Disponível em: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=51097. Acesso em: 04 jan. 2023.

WATSON, Stephanie. **How Fingerprinting Works**. 24 mar. 2008 Disponível em: https://science.howstuffworks.com/fingerprinting3.htm Acesso em: 20 jul. 2022.

WIKIPEDIA. **Fingerprint.** Wikipedia. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Fingerprint. Acesso em: 20 jul. 2022.

WIKIPEDIA. **Normal Map.** Wikipedia. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Normal_map. Acesso em: 20 jul. 2022.

WIKIPEDIA. **Tratamento de Imagem.** Wikipedia. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Tratamento_de_imagem. Acesso em: 20 jul. 2022.

WILSON, C. L. **Biometric Accuracy Standards.** Disponível em: https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Events/ISPAB-MARCH-2003-MEETING/documents/March2003-Biometric-Accuracy-Standards.pdf. Acesso em: 04 jan. 2023.

ZIBREG, Christian. **It’s easy to create a fingerprint from smartphone photos of someone’s finger.** 29 dez. 2014. Disponível em: https://www.idownloadblog.com/2014/12/29/fingerprint-from-photo/. Acesso em: 01 mar. 2022.

APÊNDICES

Apêndice A - Código fonte:

O código fonte está disponível em um repositório do github no seguinte link:
https://github.com/costafigueira/fingerprint-photo-matcher

Apêndice B - Artigo para submissão no RITA:

Revista de Informática Teórica e Aplicada - RITA - ISSN 2175-2745
Vol. XX, Num. XX (2018) 11-XX

RESEARCH ARTICLE

Biometric authentication of fingerprints obtained by photo

Autenticação biométrica de impressões digitais obtidas por foto

João Vitor de Souza Costa[1]*, Cristian Thiago Moecke[1], Luciana de Oliveira Rech[1]

Abstract: In recent years, there has been an increase in the use of fingerprints for authentication and identity verification. However, this approach requires specialized and costly hardware to extract the biometric information, which hinders its popularization and makes it less accessible. Simultaneously, there has been a rise in the usage of smartphones, which, coupled with technological advancements, has allowed for the evolution of cameras in these devices, enabling them to capture high-quality photos. In this context, this project aims to create an alternative method for biometric extraction, primarily using a photo of the fingerprint taken with a smartphone. By employing a technique of capture and post-processing of photos, utilizing a series of filters, the fingerprints become more evident, facilitating their comparison with biometrics obtained from traditional biometric readers or through this alternative approach. It is important to note that, although biometric readers are increasingly common in smartphones, the operating systems of these devices do not provide APIs or interfaces for capturing biometrics for external validation, limiting identity confirmation only within a local scope due to privacy concerns. Lastly, the project proposes the development of a REST API for identity verification based on fingerprints extracted from photos or specialized biometric readers. This API has the purpose to reduce costs and facilitate access for individuals who do not possess a biometric reader.
Keywords: Biometric authentication — Fingerprint — Smartphone — Image processing — API REST

Resumo: Nos últimos anos, observou-se um aumento no uso de impressões digitais para autenticação e verificação de identidade. No entanto, essa abordagem requer hardware especializado de alto custo para extrair as informações biométricas, o que dificulta sua popularização e torna a utilização menos acessível.No mesmo período houve ainda uma intensificação na utilização de smartphones, que, aliado ao avanço tecnológico, possibilitou a evolução das câmeras presentes nesses dispositivos, tornando-os capazes de tirar fotos de alta qualidade. Nesse contexto, este projeto visa criar uma forma alternativa para a extração de biometrias, através de uma foto da digital a partir principalmente de um smartphone. Por meio de uma técnica de captura e pós-processamento das fotos, utilizando uma série de filtros, as impressões digitais se tornam mais evidentes, facilitando sua comparação com biometrias obtidas por leitores biométricos tradicionais ou por meio dessa abordagem alternativa. É importante ressaltar que, embora leitoras biométricas também sejam cada vez mais comuns em smartphones, os sistemas operacionais desses dispositivos não oferecem APIs ou interfaces de captura de biometrias para validação externa, limitando a confirmação de identidade apenas no âmbito local, por questões de privacidade. Por fim, o projeto propõe o desenvolvimento de uma API REST para a verificação de identidade com base nas impressões digitais extraídas por foto ou por leitor biométrico especializado. Essa API tem a finalidade de reduzir os custos envolvidos e facilitar o acesso para pessoas que não possuem um leitor de biometrias.
Palavras-Chave: Autenticação biométrica — Impressões digitais — Smartphone — Processamento de imagens — API REST

[1] *Departamento de Informática e Estatística, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianopolis - Santa Catarina, Brasil*
***Corresponding author**: joaovitor.sc24@gmail.com
DOI: http://dx.doi.org/10.22456/2175-2745.XXXX • **Received:** dd/mm/yyyy • **Accepted:** dd/mm/yyyy

1. Introdução

O uso de biometrias para identificação de pessoas é uma realidade há muito tempo. Na década passada as impressões digitais e a verificação biométrica eram utilizados majoritariamente para fins jurídicos e identificação criminal [1]. No entanto, com a popularização e avanço tecnológico, vários setores adotaram o uso da biometria intermediada com o computador para inúmeras finalidades. Dentre elas, as mais uti-

lizadas são: autenticação de usuários (seja essa autenticação feita para acesso a uma área restrita, desbloquear o smartphone, fazer login em aplicativos e acesso a dados sensíveis) e a identificação de pessoas - sendo utilizada para votações, emissões de documentação e emissões de certificados digitais [2].

Biometria, como o próprio nome já diz, significa a medição de características físicas ou comportamentais individuais de cada ser, usadas para identificá-lo [3]. Existem várias formas de fazer essa identificação biométrica, dentre elas estão: impressões digitais dos dedos, face, palma da mão, íris, retina, voz, comportamento, DNA, entre outras [2]. Das formas citadas uma das mais difundidas é a identificação biométrica por meio das impressões digitais. Isso se deve ao fato de as impressões serem únicas (são distintas até mesmo para gêmeos univitelinos e entre os diferentes dedos da mão), perenes (formadas durante a gestação e não sofrem mudanças significativas ao longo da vida) e imutáveis (não se alteram com o desgaste ou após acidentes).

A identificação biométrica por meio de impressões digitais geralmente é realizada usando leitores biométricos equipados com sensores ópticos. No entanto, esses leitores têm um alto custo [4] e são difíceis de obter em certas áreas, como regiões rurais. Além disso, eles não são facilmente integrados pelos desenvolvedores, que necessitam implementar inúmeras formas de utilizar as mais variadas leitoras disponíveis no mercado, por não existir uma padronização de comunicação e cada uma possuir um SDK distinto [5]. Somado ao fato de ser um dispositivo caro,os leitores biométricos não estão amplamente difundidos e não são comumente encontrados em residências e empresas, o que dificulta o acesso geral à autenticação biométrica por meio de impressões digitais. Isso obriga muitas pessoas a se deslocarem pessoalmente para locais que possuam esses dispositivos, o que não é ideal em um contexto pandêmico como o atual.

Apesar de ser cada vez mais comum a existência de leitores de impressão digital em smartphones, esses sensores não são diretamente acessíveis aos apps para captura de biometria, ficando dedicados ao desbloqueio de senhas no próprio celular [6]. Ou seja, não é permitido a um APP obter as minúcias biométricas para compará-las a uma base pré-existente externa - é permitido apenas obter uma confirmação da correspondência da biometria com aquela previamente cadastrada no smartphone.

A fim de sanar os problemas citados, esse projeto se propõe a trazer uma ferramenta que irá utilizar a câmera dos smartphones para a extração das digitais do usuário e ser possível realizar a verificação biométrica da digital com base em outra obtida independente do método escolhido, seja ele o tradicional por meio de hardwares específicos ou pela câmera do smartphone. A utilização de smartphones para o fim proposto é mais acessível e relativamente mais barato que um leitor tradicional, já que os smartphones são utilizados também para outros fins e são amplamente utilizados pela população. Outra motivação seria que o SERPRO até mesmo já abriu um edital para o desenvolvimento de uma aplicação com esta finalidade [7].

É também necessário garantir a segurança da base de fotos, já que se alguém conseguir acessar indevidamente esta base, poderia facilmente burlar o sistema e roubar a identidade de outra pessoa. Além disso, é importante identificar formas de assegurar que o dedo capturado é de uma pessoa viva e que não é um dedo falso. A garantia de segurança deste novo método será discutida posteriormente no texto. Além disso será analisado a qualidade das biometrias dentro do padrões internacionais, probabilidade de aceitação de um falso positivo ou falso negativo (com análise das taxas de FAR, FRR, TAR, TRR e EER) e realizar uma comparação da confiabilidade das digitais obtidas por meio da extração por foto em confronto à extração tradicional.

Nesta seção estão descritas as motivações para a realização do trabalho, bem como seus objetivos, já o restante do documento será organizado da seguinte forma: Na seção 2, será apresentada toda a fundamentação teórica necessária para a correta compreensão deste trabalho. Na seção 3, serão apresentados os trabalhos relacionados ao tema de obtenção de biometrias (impressões digitais) por fotos, destacando a implementação e análise feitas nestes trabalhos correlatos. Na seção 4, será apresentada a proposta deste trabalho, exibindo as tecnologias envolvidas, desenvolvimento das técnicas de tratamento de imagens, batimento biométrico e da API proposta. Na seção 5, serão apresentados os testes e os resultados obtidos com validação de qualidade e análise das taxas de FAR, FRR, TAR, TRR e EER obtidas. Por fim, na seção 6, será apresentado as conclusões, com revisão geral, contribuição, limitações e os próximos passos para trabalhos futuros.

2. Fundamentação Teórica

Nesta seção serão descritos os principais conceitos relacionados a este trabalho, como o que é biometria e para que serve, como funcionam as impressões digitais, formato de armazenamento dessas biometrias, algoritmos de aferição de qualidade, a segurança envolvida no processo, autenticação e verificação biométrica, entendimento básico de fotografia e tratamento de imagens.

2.1 Biometria

Biometria vem da junção das palavras gregas Bios (que significa “vida”) e metron (que significa “medida”), significando então a medição de características físicas ou comportamentais individuais de cada ser, usadas para identificá-lo [3]. O princípio básico da biometria é a utilização das inúmeras características que distinguem um ser de outro para identificar um único indivíduo [2].

Existem várias formas de biometria, dentre elas estão: impressões digitais dos dedos, face, palma da mão, íris, retina, voz, comportamento (como a pessoa anda, digita, escreve ou até mesmo assina), DNA, veias, entre outras. Das formas citadas, as mais utilizadas atualmente são reconhecimento de

face e impressões digitais, as quais são amplamente difundidas por serem relativamente fáceis de serem coletadas e analisadas [2].

A utilização do reconhecimento facial tem como vantagem ser rápido e o baixo custo envolvido, porém apresenta problemas com algumas características fundamentais para um bom reconhecimento biométrico, como a unicidade (irmãos gêmeos compartilham de faces muito semelhantes), a perenidade (mudam de acordo com as demasiadas fases da vida) e a imutabilidade (podem mudar com acidentes). Por outro lado temos as impressões digitais, que sanam todos os problemas do reconhecimento facial, aliado a boa confiabilidade, porém mais demorado e custoso [8].

A biometria é amplamente utilizada nos dias de hoje, sendo muito comum em emissão de documentos oficiais do governo, certificados digitais, votações (biometria eleitoral), identificação, controle de acesso a ambientes e áreas restritas, login em smartphones e em aplicativos mobile, e para identificação criminal (principal grande uso nas décadas anteriores).

2.2 Impressões digitais

Impressão digital (também conhecidos como datilograma ou dermatoglifo) é o desenho formado pelas papilas (elevações da pele), presentes na ponta dos dedos, deixado em uma superfície lisa. As impressões digitais possuem algumas características importantes, como a unicidade (são distintas até para gêmeos univitelinos e entre os demais dedos da mão), perenidade (as papilas são formadas na gestação e não mudam consideravelmente ao longo da vida, até mesmo na morte) e imutabilidade (não mudam se desgastadas ou após acidentes), que permitem identificar de forma muito confiável uma pessoa [9].

É importante citar que elas possuem um alto grau de variação entre os próprios dedos e os dedos de outras pessoas, porém existem raros casos de pessoas que não possuem impressões digitais - Síndrome de Nagali [10]. O uso de impressões digitais para identificar pessoas não é uma prática recente, sendo utilizada já na antiguidade como forma de autenticar documentos e selar operações comerciais [11]. As digitais foram o primeiro método especificamente utilizado para classificação e identificação oficial de seres humanos, tendo Henry Faulds publicado o primeiro artigo (1880) em que discutia o uso de impressões digitais como meio de identificação e classificação pessoal, assim como o uso de tinta de impressora como forma para obtê-las. Posteriormente Francis Galton publicou seu livro “Impressões Digitais”, embasado no trabalho de Faulds. O livro trazia o primeiro sistema de classificação das impressões digitais, com três padrões [1] básicos analisando as minúcias dos dedos – laçada (loop), arqueada (arch) e verticilo (whorl) - que são detalhadas na figura 1.

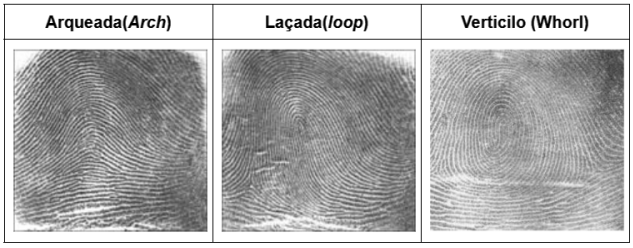


Figure 1. Tipos de impressões digitais

Com o passar dos anos a prática de analisar as minúcias dos dedos se tornou mais comum [12], criando a área de datiloscopia (processo de identificação humana por meio das impressões digitais), que evoluiu ainda mais com o sistema de classificação das minúcias (formas mínimas que compõem a impressão digital, possuindo vários padrões distintos que podem ser utilizados em conjunto para identificar uma pessoa), definindo algumas formas padrões a serem analisadas nos dedos, conforme a figura 2.

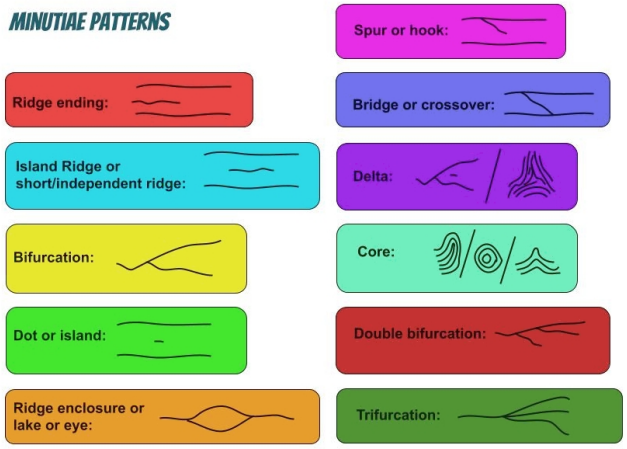


Figure 2. Padrões de minúcias

Inicialmente a coleta de digitais ocorria por meio de aplicação de tinta no dedo e realização de pressão em uma folha de papel lisa, a qual ficava marcada com as impressões do sujeito, porém com a popularização e modernização, surgiram várias formas de fazer essa coleta [12], sendo elas a coleta por sensores ópticos (sensores que tiram uma espécie de foto do dedo por meio de infravermelho), sensores CMOS ou capacitivos (utilizam de corrente elétrica para gerar a imagem das digitais), sensores por ultrassom (utilizam de ondas sonoras de alta frequência para obter a imagem da impressão digital) e sensores termais (utilizam das diferentes temperaturas entre os sulcos e as papilas para formar a imagem).

Por fim, é importante ressaltar que a qualidade da impressão digital obtida depende do método utilizado na coleta, e com um bom método e uma boa biometria, normalmente são encontrados entre 40 e 100 minúcias. [13]

2.2.1 WSQ

Uma das formas de registro das minúcias da impressão digital é com base em imagens em escala de cinza, as quais serão armazenadas numa base de comparação que tende a ser muito grande, portanto é necessário utilizar de algum algoritmo de compressão. O algoritmo utilizado para fazer essa compressão otimizada em imagens em escala de cinza é o WSQ (Wavelet Scalar Quantization), que é um algoritmo baseado na teoria de wavelet e foi desenvolvido pelo FBI em parceria com o Los Alamos National Laboratory, e com o NIST, tendo se tornado um padrão na área de biometrias. O arquivo gerado após a execução do algoritmo possui a extensão .wsq e é geralmente utilizado para armazenar imagens com 500 ppi. [14]. Vale destacar que o WSQ possui uma perda de qualidade por compressão, portanto gerar um WSQ a partir de outro resultará em uma menor qualidade [15].

2.2.2 NFIQ

Para validar a qualidade de um WSQ o NIST especificou um algoritmo conhecido como NFIQ - NIST Fingerprint Image Quality. Esse algoritmo em sua primera versão funciona analisando as minúcias encontradas na digital capturada e fornece um score NFIQ que varia de 1 a 5, sendo 1 a melhor qualidade e 5 a pior qualidade. Por exemplo, no contexto das biometrias utilizadas no processo de emissão de certificados digitais na ICP-Brasil, só são aceitas biometrias com qualidade de NFIQ de 1 a 3 inclusive, sendo consideradas de baixíssima qualidade as que possuírem score 4 e 5. (ICP-Brasil, 2021). Já a segunda versão do algoritmo NFIQ tem uma melhor capacidade de avaliação das biometrias, podendo distinguir melhor o que é ou não uma boa biometria e para isso adicionou mais níveis de scores, que após a execução do algoritmo fornece um score de 1 a 100. Sendo assim, muito mais preciso que a versão inicial do NFIQ. [14]

2.3 Segurança

O roubo ou falsificação de biometrias são práticas comuns no dia de hoje [16], onde muitos sistemas utilizam das biometrias para permitir ou não o acesso a determinada área, o que faz com que ela seja alvo de muitos ataques. Porém cada tipo de biometria possui ataques diferentes, sendo a mais visada a biometria facial, por ser facilmente obtida e copiada. Os atacantes utilizam de uma foto do usuário do qual querem se passar ou até mesmo utilizam de tecnologias de deepfake para imitar o rosto do indivíduo [17].

Nestes casos de roubo ou cópia de biometria facial a principal ação a fim de proteger o usuário é só permitir o envio de streams de vídeo controlado pela aplicação responsável pela coleta da face, que deve ser segura a manipulações, validando a vivacidade do conteúdo apresentado por meio de prova de vida (liveness check).

Já nos casos de ataque às impressões digitais, estes ocorrem normalmente com o uso de dedos de silicone - que foram feitos com base no dedo do indivíduo que se quer atacar - ou com a amputação do dedo do usuário. Para isso é necessário ter algum mecanismo de detecção de vivacidade do dedo, algo que nas leitoras ópticas específicas é realizado via uma tecnologia de LFD (Live Finger Detection) que por meio de padrões em dedos falsos e infravermelho, é possível assegurar de que o dedo ali presente é de uma pessoa viva e também não é uma cópia [18].

Com isso, fica evidente que ter o controle da coleta reduz drasticamente a possibilidade de ataques, visto que caso a fonte de coleta seja segura ou houver a presença de alguém confiável para fazê-la, é muito mais difícil fraudar a biometria sem que seja percebido. Ainda é necessário tomar mais algumas medidas, como o uso de algoritmos confiáveis e de precisão para extrair e comparar as biometrias, uma base confiável de dados, checagens adicionais e uso da biometria somente como parte da solução e não como substituto de todas as formas de segurança.

2.4 Autenticação Biométrica

A autenticação biométrica consiste em validar a veracidade da identidade de um usuário por meio da verificação biométrica, processo que irá verificar a equivalência da biometria apresentada com outra previamente cadastrada (comparação 1:1) e atestada como verdadeira (identificação 1:n). Para a verificação biométrica ocorrer, é necessário que a biometria verdadeira do usuário já tenha sido extraída em um template biométrico anteriormente e cadastrado-a em uma base biométrica de templates confiáveis, só então é possível, por meio de nova coleta, verificar a autenticidade dessa nova biometria com base na anterior [2]. Este processo de cadastro e match com a base de dados é exibido na 3, assim como a necessidade de a cada cadastramento fazer uma pesquisa na base a fim de encontrar biometrias semelhantes e evitar possíveis fraudes (identificação 1:n).

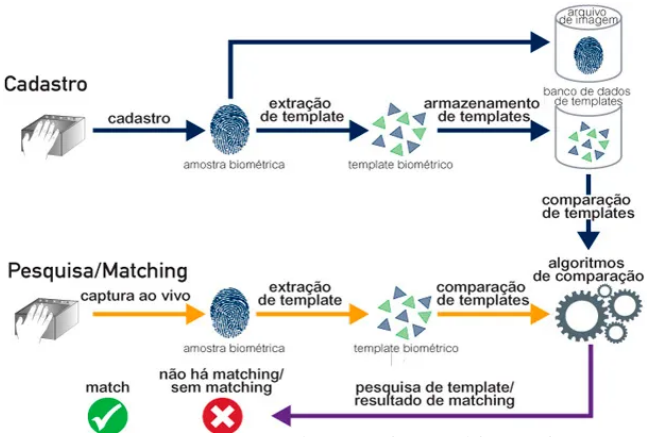


Figure 3. Processos da autenticação biométrica

Antigamente, a verificação biométrica era realizada manualmente, comparando duas biometrias coletadas para determinar se pertenciam à mesma pessoa. Essa análise era baseada em um certo grau de similaridade aceitável entre as duas amostras. No entanto, atualmente, a validação manual foi substituída por sistemas automatizados e especialistas em verificação biométrica. É importante destacar que o grau de

similaridade é definido previamente por um valor conhecido como ”matching threshold” (limite de correspondência), que determina até que ponto duas biometrias são consideradas semelhantes e pertencentes à mesma pessoa. Um valor adequado de threshold pode ter um grande impacto na quantidade de falsos positivos ou falsos negativos na base biométrica [19].

Por fim, a autenticação biométrica para ser segura necessita atingir uma certa porcentagem de aceitação ou não de usuários com base na similaridade das mesmas, para isso existe a taxa de FAR (False acceptance rate), FRR (False rejection rate), TAR (True acceptance rate), TRR (True rejection rate) e EER (Equal error rate). O significado delas são: [20] [21] [22] [23]

- FAR: Também conhecida como taxa de fraude, é a probabilidade de um usuário não autorizado ser aceito pelo sistema de autenticação biométrica. É importante minimizá-la para aumentar a segurança do sistema.
- FRR: Também conhecida como taxa de rejeição, é a probabilidade de um usuário autorizado não ser aceito pelo sistema de autenticação biométrica. Minimizar essa medida é essencial para aumentar a confiabilidade do sistema.
- TAR: Também conhecido como taxa de match,é a probabilidade de um usuário autorizado ser aceito corretamente pelo sistema de autenticação biométrica. Maximizar essa medida é crucial para aumentar a segurança do sistema.
- TRR: É representado como a porcentagem de vezes que uma pessoa não autorizada é negada corretamente pelo sistema, para que um sistema de autenticação seja mais seguro, essa medida deve ser maximizada.
- EER: é a taxa em que o FAR é igual ao FRR. Mede a acurácia de um sistema biométrico, encontrando o ponto de equilíbrio entre falsas negações e falsas aceitações. Minimizar esse valor é importante para garantir a melhor segurança do sistema.

As taxas aceitas pela ICP-Brasil, por exemplo para um PSBio com base no DOC-ICP05.03 v3.0 (2021) é de 0,01% de FAR e 99% de TAR. Ainda quanto às taxas aceitas, o NIST especifica que o recomendado para uma verificação de impressões digitais é de um TAR de 96% para um FAR de 1%, assim como um TAR de cerca de 85% para um FAR de 0,001%. De acordo com o NISTIR 7204 (2005). Ainda de acordo com o NIST o recomendado para uma verificação biométrica envolvendo faces é de um TAR de 90% para um FAR de 1% e um TAR de 70% para um FAR de 0,01%, isso com uma boa condição de iluminação, para cenários externos esses índices caem para 37% de TAR para um FAR de 1%

Para a realização deste trabalho o algoritmo utilizado para extração de templates é desenvolvido pela Neurotechnology, que é um dos melhores existentes no mundo, tendo recebido inúmeros prêmios como um dos mais rápidos e precisos [24] [25], porém existem outras alternativas gratuitas de menor desempenho, como o SourceAFIS e o MINDTCT (criado pelo NIST), porém de qualidade inferior. A escolha ou desenvolvimento de um bom extrator, interfere diretamente na qualidade do sistema biométrico.

Além do extrator é também necessário um matcher para realizar a comparação de dois templates e confirmar ou não a autenticação biométrica. Assim como o extrator, o matcher também interfere na qualidade do sistema biométrico, porém esse tem um impacto ainda maior, já que é quem efetivamente irá determinar se duas biometrias pertencem ou não ao mesmo indivíduo. Novamente o matcher utilizado será fornecido pela Neurotechnology, mas podem ser encontrados outros matchers como o SourceAFIS e o BOZORTH3 (criado pelo NIST), mas que novamente apresentam qualidade inferior.

2.5 Fotografia

Fotografia consiste na técnica de criar imagens por exposição luminosa em uma superfície fotossensível. A fotografia evoluiu consideravelmente ao longo dos anos, partindo de fotos em preto e branco com câmeras analógicas para fotos coloridas tiradas por câmeras digitais. A câmera digital presente nos smartphones é composta por um sensor chamado de CCD ou CMOS que ao receber luz, converte esta luz em um código eletrônico digital - um quadro com o valor das cores de todos os pixels da imagem - que será armazenado na memória como um arquivo digital, podendo ter vários formatos [26].

A imagem digital é composta por pixels, que são os pontos mínimos que formam a imagem, podendo ser iluminados por diferentes cores. Uma câmera com mais pixels tem maior definição e resolução, pois possui mais pontos de cores para gerar a imagem final, medida em megapixels (MP). Um megapixel é equivalente a um milhão de pixels. Ainda sobre resolução, é importante mencionar que ela normalmente é descrita como PPI (pixels por polegada), onde quanto maior o PPI, maior a resolução da imagem e mais detalhes podem ser exibidos. No entanto, é importante destacar que o PPI é válido apenas para a exibição na tela, pois depende de uma área física, o que não existe na imagem digital [27].

Por fim, é importante ressaltar que existem ainda várias composições de lentes na fotografia [28], com três categorias de lentes, que são a grande angular (ângulo de visão grande, apresenta distorção), média (ou norma - lente que mais se aproxima do olho humano) e teleobjetiva (distorção de perspectiva). Existe ainda a funcionalidade das lentes, como as lentes macro, que permitem que a foto possa ser tirada de mais perto do objeto. Por isso, ela é ideal para captar detalhes e diferentes texturas, como nas impressões digitais. Na maioria das câmeras podem ser utilizados dois níveis de zoom, o zoom óptico (feito com um conjunto de lentes e evita a perda de qualidade) e o zoom digital (utiliza de software para se aproximar do conteúdo, perdendo qualidade já que não está efetivamente ficando mais próximo do objeto).

2.6 Tratamento de imagens

Tratamento de imagens é a prática de alterar imagens por meio de softwares, sendo uma atividade comum em fotografia profissional e sistemas que fazem uso de fotos. Os fotógrafos

aplicam filtros e edições para melhorar a aparência da imagem original. Além disso, algoritmos de tratamento de imagens são amplamente utilizados para atingir objetivos específicos, como realçar detalhes, remover fundos ou objetos, entre outros. O software GIMP (GNU Image Manipulation Program) é uma ferramenta de edição de imagens de código aberto comumente utilizada. Filtros e algoritmos importantes serão detalhados nas próximas subseções para a conclusão deste trabalho.

2.6.1 Equalização

A equalização de uma imagem é um processo de uniformização que busca igualar a iluminação em diferentes áreas da imagem. Existem dois métodos comuns de equalização: a equalização adaptativa do histograma (AHE) e a equalização de histograma adaptativo limitada por contraste (CLAHE).A equalização de histograma consiste em aumentar a distribuição global das intensidades dos pixels em uma imagem, melhorando o contraste e a nitidez. O AHE aplica a equalização de forma global, porém pode comprometer regiões específicas da imagem.

Para resolver esse problema, o CLAHE realiza a equalização em blocos distintos da imagem, aumentando o contraste de cada região individualmente. No entanto, isso pode resultar em um aumento de ruídos. Para lidar com isso, é aplicado um limite de contraste [29]. Em comparação, as imagens geradas pelo CLAHE são mais nítidas do que as geradas pelo AHE e são adequadas para uma variedade maior de imagens. No entanto, o CLAHE requer mais tempo de processamento.

2.6.2 Filtros passa-baixa e passa-alta

Na área de tratamento de imagens é muito comum utilizar filtros que analisam a frequência das imagens e que com base nela permitem somente uma parte da frequência se acentue, dessa categoria existem os filtros de passa-baixa e passa-alta [30] [31], alguns exemplos destes filtros são:

- Filtro de Laplace (passa-alta): Utilizado para detectar regiões de alta variação de cor, ou seja, bordas.
- Filtro Gaussiano (passa-baixa): Utilizado para reduzir o nível de ruído, a fim de diminuir a distorção na imagem.
- Filtro de Gabor (passa-baixa): Utilizado para reforçar texturas nas imagens, podendo recuperar informações das imagens ou até mesmo omitir ruídos.

2.6.3 Segmentação

A segmentação de imagens é o processo de fracionar a imagem em partes comuns, ou seja, encontrar elementos semelhantes e distintos para separá-los. A segmentação possui vários usos, já que a partir de uma imagem é possível obter as regiões que possuem algum objeto de interesse como pessoas, carros, contornos ou regiões de foco [32]. Para atingir esse fim, essa técnica utiliza de várias maneiras de identificar as regiões de interesse, como uma segregação baseada em regiões, cores, threshold, entre outras.

2.6.4 Binarização

A binarização de uma imagem, consiste no processo de alterar o espectro de 256 tons de uma imagem para somente 2 ou seja binário. O algoritmo mais utilizado é o algoritmo de Otsu que consiste em encontrar um valor de threshold para a binarização da imagem [33]. Após encontrado o valor de threshold o algoritmo irá fazer com que todas as intensidades abaixo do valor sejam alteradas para 0 e todas as intensidades acima dela sejam alteradas para 1 (ou 255 para a visualização da imagem).

2.6.5 Inversão de cores

A técnica de inversão de cores é um tipo de tratamento de imagens que transforma as cores da imagem com base no seu espectro, tornando-as opostas após a execução [34]. Com a execução deste filtro as imagens brancas passam a ser pretas e vice-versa, além de alterar todas as outras cores para o oposto.

3. Trabalhos Relacionados

Neste capítulo serão descritos os trabalhos relacionados mais relevantes na área, a qual ainda foi muito pouco explorada. Após extensa busca na literatura, foram selecionados sete principais artigos, que foram classificados em três áreas distintas, que tratam de: melhoria de uma imagem de impressão digital, extração de biometria sem contato e extração por câmera de smartphones. Ao final do capítulo será feita uma comparação dos trabalhos relacionados com este em questão, além de um direcionamento para novas oportunidades de pesquisa.

3.1 Melhoria de imagens de impressões digitais

Na área de melhoria de imagens de impressões digitais obtidas por leitoras tradicionais, foram encontrados dois trabalhos relevantes.

O primeiro trabalho, intitulado ”Minutiae Extraction from Fingerprint Images - a Review” [13], propõe o desenvolvimento de um algoritmo para processar imagens biométricas obtidas por leitores ópticos especializados, com o objetivo de tornar as minúcias mais visíveis e facilitar a extração e comparação biométrica. O algoritmo utiliza o filtro de Gabor como base e requer filtros para estimar a orientação e a frequência das elevações na impressão digital. Após o processamento, um algoritmo de extração é proposto. O trabalho destaca que o desenvolvimento de um extrator de biometrias é complexo e exige um esforço significativo para sua implementação, sendo um dos focos do trabalho. Os resultados mostraram uma melhoria nas imagens testadas, mas ressaltaram a dependência da qualidade da imagem inicial obtida pelas leitoras.

Já o trabalho ”Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction” [35], possui um foco maior em melhorar as imagens obtidas através do leitor óptico especializado. Assim como o primeiro trabalho, o principal filtro utilizado é o filtro de Gabor, mantendo os dois filtros de estimativas exigidos. O estudo realizou diversos testes e obteve bons resultados com o

algoritmo proposto. No entanto, assim como no trabalho anterior, a melhoria depende fortemente da qualidade da imagem inicial, e em alguns casos, o algoritmo pode incorretamente alterar a biometria, levando a uma possível associação errônea com outra pessoa. O autor concluiu que o algoritmo facilita a extração de minúcias e melhora a comparação biométrica, mas não pode ser aplicado em todas as imagens, resultando em um desempenho inferior em alguns casos.

3.2 Extração de impressões digitais sem contato

Na área de extração de biometrias sem contato, foram encontrados três trabalhos relevantes.

O trabalho "Towards Contactless, Low-Cost and Accurate 3D Fingerprint Identification" [36] propõe a obtenção de impressões digitais em 3D por meio de uma única câmera. O estudo utiliza um ambiente controlado com uma câmera específica com custo de 100 dólares e 7 LEDs para iluminar adequadamente o dedo. O algoritmo desenvolvido busca transformar a foto em uma representação 3D da biometria, com destaque para as minúcias, para posterior comparação com outras biometrias 3D obtidas pelo método proposto. No desenvolvimento do trabalho nada é citado sobre a possibilidade de comparar essas biometrias com as obtidas pelos métodos tradicionais de contato, sendo o foco do desenvolvimento a implementação da conversão de fotos 2D em 3D (melhorando-as utilizando o filtro de Gabor) e a comparação entre elas. Os autores também desenvolveram um algoritmo de matching baseado em biometrias 3D. Após a realização de experimentos, concluiu-se que o método proposto obteve melhores resultados do que outros métodos de obtenção de biometrias 3D, porém ainda não está pronto para ser utilizado em um sistema de grande escala, devido a uma taxa de erro elevada (EER de 18,56%).

No trabalho "Mosaicing Touchless and Mirror-Reflected Fingerprint Images" [37], é desenvolvido um dispositivo especializado para a captura de imagens de impressões digitais sem contato. Esse dispositivo é composto por uma câmera, um anel de LED, difusores e dois espelhos posicionados ao lado do orifício onde o dedo é colocado. Os autores também criaram um algoritmo para processar as imagens obtidas, que incluem três ângulos diferentes do dedo: frontal, lateral direito e lateral esquerdo. Esse algoritmo destaca as minúcias e sobrepõe os três ângulos para obter uma impressão digital mais larga. Assim como nos trabalhos anteriores, o filtro de Gabor é utilizado como o principal método de processamento de imagem, resultando em imagens altamente precisas. No entanto, durante o desenvolvimento do trabalho, não foram realizadas verificações biométricas entre as biometrias obtidas por contato e as obtidas sem contato, sendo o foco apenas na comparação do número de minúcias corretamente identificadas nas imagens. Após a realização de testes, observou-se um aumento significativo no número de minúcias utilizando o método proposto, tornando-o equivalente a uma biometria obtida por contato direto do dedo na superfície de leitura, porém não é esclarecido o resultado de FAR ou EER obtido nos testes.

O artigo "Contactless Fingerprint Recognition Using Deep Learning - A Systematic Review" [38] é uma revisão dos principais trabalhos na área de extração de impressões digitais sem contato. Nesse artigo, os autores realizam uma análise das três principais abordagens para obtenção de biometrias, que são: foto, deep learning e o método tradicional. Eles apresentam os resultados diferentes obtidos em vários trabalhos e destacam as similaridades entre eles, como o uso de filtros para melhorar as biometrias e um processo rigoroso de coleta. O foco principal dessa pesquisa é a utilização de deep learning na obtenção de biometrias sem contato, mas os resultados obtidos ainda não são aplicáveis em sistemas de larga escala. Os resultados obtidos em sistemas baseados em fotos não foram muito explorados, não sendo tão relevantes para o desenvolvimento deste trabalho em questão. Porém, ainda por meio da análise realizada por este artigo é possível evidenciar o quanto as pesquisas neste tema ainda precisam evoluir e a existência de poucos trabalhos na área.

3.3 Extração de impressões digitais via câmera dos smartphones

Nesta seção serão apresentados os principais trabalhos encontrados na área de extração de impressões digitais por fotos obtidas através de um smartphone, sendo estes da mesma área do trabalho em questão. Assim como já detalhado anteriormente, o foco da área é a utilização em larga escala por qualquer pessoa que possua um smartphone, sendo uma solução mais barata e acessível.

O primeiro trabalho encontrado com foco em fotos de smartphones é o Scaling-Robust Fingerprint Verification with Smartphone Camera in Real-life Scenarios [39], que trata da utilização de fotos em larga escala para um sistema de verificação biométrica. No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados 3 modelos de celulares diferentes e o foco do trabalho foi na segmentação correta do fundo da imagem, já que para uma utilização em larga escala o algoritmo de remoção do fundo precisa ser bem preciso e funcionar corretamente para os mais variados fundos possíveis. Além do foco na segmentação, o trabalho focou em desenvolver um algoritmo que fosse capaz de recortar automaticamente a região de interesse dos dedos, ou seja, a ponta (ROI). Após a aplicação do algoritmo os autores testaram algumas verificações biométricas e obtiveram resultados satisfatórios, porém o matcher utilizado tem qualidade moderada, o que pode impactar nos resultados obtidos. Além disso, não foi realizada nenhuma comparação com as biometrias obtidas pelo método tradicional, somente foi realizado comparações entre as próprias fotos com um EER variando de 2% a 8% para biometrias obtidas no mesmo aparelho, e EER variando de 9% a 12% com biometrias obtidas por celulares diferentes.

Por fim, o trabalho mais completo encontrado foi o Efficient Fingerprint Extraction and Matching Using Smartphone Camera [40], que utiliza de um aplicativo desenvolvido para a finalidade de tirar fotos dos dedos, o qual identifica a ponta dos

dedos e foca automaticamente na região de interesse. Após a captura da foto obtida pelo aplicativo proposto pelos autores, é então aplicado um algoritmo de processamento da imagem com foco em CLAHE e filtro de Gabor, além da detecção da zona de interesse, recorte e alinhamento. Por fim é realizada a extração de minúcias e comparação. A imagem obtida pelo método proposto é de alta qualidade e nos testes realizados utilizando um matcher de qualidade intermediária foi possível obter resultados aceitáveis, porém as verificações ocorrem apenas entre as fotos extraídas do celular com as biometrias obtidas por leitoras especializadas, ou seja, não realizam uma análise da eficácia do método proposto a partir duas imagens obtidas no APP e processadas. Quanto aos resultados o EER obtido na comparação com WSQs foi de 6% a 15%. Ainda foi possível concluir que imagens obtidas utilizando o HDR da câmera melhoram o resultado, e que o filtro de Gabor tem um bom desempenho no algoritmo proposto, sendo foco de desenvolvimento. Vale também ressaltar que o método proposto não trata da remoção de fundo, dada a justificativa de que o corte na zona de interesse não faz necessário o uso de segmentação.

3.4 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados diversos trabalhos de temas relacionados ao proposto neste trabalho em questão, e foi possível evidenciar que é sim possível obter biometrias de impressões digitais obtidas por câmeras fotográficas. Para isso necessitam de um bom método de captura da foto, um bom algoritmo de processamento de imagem, realçando minúcias e centralizando a região de interesse, além de um bom extrator de minúcias e matcher. Um resumo das características de cada trabalho mencionado é exibido na figura 4.

Trabalho	Gabor	E.E.	U.G.	C.O.	C.E.	API	Q.A.
BANSAL; SEHGAL; BEDI, 2011	S	S	S	N	N	N	S
THAI, 2003	S	S	S	N	N	N	S
KUMAR; KWONG, 2015	S	S	N	N	N	N	N
CHOI; CHOI; KIM, 2010	S	S	N	S	N	N	D
CHOWDHURY; IMTIAZ, 2022	N	D	D	N	N	N	D
RAGHAVENDRA; BUSCH; YANG, 2013	N	N	S	N	N	N	D
GUPTA; ANAND; RAI, 2017	S	N	S	N	N	N	S
Fingerprint Photo Matcher	N	N	S	S	S	S	S

Legenda:
Gabor = Utilização do filtro de Gabor no tratamento das imagens
E.E. = Necessidade de Equipamento Especializado
U.G. = Método para uso em geral em massa e para qualquer contexto
C.O. = Foco em Como Obter as fotos
C.E. = Comparação Extensa dos resultados e diferentes métodos
API = Desenvolvimento de API para utilização do método
Q.A. = Qualidade aceitável dentro dos parâmetros internacionais
S = Sim
N = Não
D = Depende o método abordado

Figure 4. Trabalhos relacionados e suas características

Observa-se que nenhum trabalho mencionado neste capítulo exibe a qualidade da biometria obtida em termos de NFIQ e não comparam os resultados obtidos entre todas as possíveis formas de avaliação, como qualidade em comparação com duas biometrias do método tradicional, comparação com duas biometrias do método proposto e comparação entre uma biometria do método proposto com uma do método tradicional, além de não dedicarem esforços em técnicas e câmeras necessárias para se obter a melhor foto. É importante também reforçar que apenas dois trabalhos focam na utilização em larga escala e de uso geral, sendo acessível por qualquer pessoa.

Por fim, apenas um trabalho apresentado teve resultados próximos do aceitável nos parâmetros internacionais e nenhum propôs uma API de fácil utilização do método proposto para os mais variados fins, assim como o objetivo deste trabalho. Neste ponto, caracteriza-se a importância deste trabalho, onde além de ser feita a extração das impressões digitais, irá ser realizado um estudo completo da qualidade dessa biometria obtida, com taxas de FAR, FRR, TAR, TRR e EER dentro dos padrões internacionais, comparação da biometria com WSQs e com outras fotos, além de uma API com processo automático, que ao receber a foto faz todo o processamento necessário para extrair as impressões digitais e até mesmo validá-las como pertencentes ou não ao mesmo indivíduo.

Fica evidente a oportunidade de pesquisa na área, em novos métodos de coleta sem contato em larga escala e de uso geral, além da oportunidade de desenvolver um algoritmo mais eficaz para o tratamento das imagens com filtros de Gabor somados com outros algoritmos de processamento de imagens, bem como um teste com um grande banco de dados em um cenário real de utilização e uma aplicação para captura automática dos dedos.

4. Fingerprint photo matcher

Neste capítulo, apresentamos o Fingerprint Photo Matcher, uma API REST para verificar biometria usando duas digitais fornecidas. As digitais podem ser extraídas de leitores tradicionais ou de uma foto das impressões digitais. Garantimos um nível de qualidade aceito internacionalmente pelo NIST. Discutimos os desafios iniciais do desenvolvimento da aplicação, o histórico de testes, e a explicação, definição e escolha dos algoritmos e técnicas envolvidas.

4.1 Definição do método de desenvolvimento

Para o desenvolvimento desta API, é necessário possuir ou implementar um extrator e matcher de biometrias. Devido a complexidade de desenvolvê-los, foi decidido pela utilização de um SDK biométrico especializado de alta capacidade e desempenho, produzido pela Neurotechnology e cujo acesso para a realização deste trabalho foi fornecido pela BRy Tecnologia. Em posse do SDK, era necessário confirmar sua capacidade de processar imagens de impressões digitais, que não possuem o formato WSQ, e extraí-las em um template que possa ser comparado futuramente, já que o foco deste trabalho consiste na validação de fotos de digitais. Desafio que se mostrou possível com a utilização deste motor biométrico. Na documentação do SDK temos uma relação do score de Threshold com o FAR do sistema biométrico, e foi utilizado o score 48 que tem relação com um FAR de 0,01% e também

por ser o valor aceito para um PSBIO (Prestador de Serviço Biométrico) credenciado pelo ITI.

Foi então realizada uma sequência de capturas do dedo do autor utilizando um smartphone Samsung Galaxy S10 e um Samsung Galaxy S20 explorando diferentes ângulos, lentes e modos de captura. Foram tiradas fotos com e sem HDR, com e sem flash e distantes ou próximas ao dedo. Para o foco foram testadas várias técnicas como: mão aberta, apenas um dedo erguido, dedo próximo ao fundo uniforme, e dedo com fundo distante. Os principais modelos de fotos obtidos, já com recorte na zona de interesse (ponta dos dedos), estão relacionados no figura 5 e a técnica de captura com melhor resultado neste primeiro momento foi a de fundo uniforme próximo.

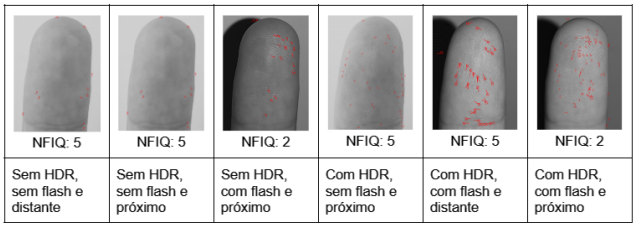


Figure 5. Sequência de fotos com smartphones

Após aferição visual e pela própria execução do extrator para validar as biometrias, foi possível perceber que o HDR e o flash eram os principais fatores na obtenção de fotos com minúcias bem perceptíveis, já que foi mais fácil obter fotos com NFIQs melhores desta maneira. Além disso é possível perceber uma boa influência da proximidade do dedo, porém, com lentes que não sejam do tipo macro ou zoom, conseguir focar na ponta dos dedos com a câmera próxima ao dedo é uma tarefa difícil.Portanto é possível concluir que as condições ideais da foto são obtidas por câmeras com HDR, flash e lentes macro que conseguem focar melhor nas minúcias. Ter o controle do foco e do modo de captura é crucial para uma boa foto.

Por fim, para atestar a viabilidade do projeto e definir a estratégia de desenvolvimento, era necessário fazer algumas verificações biométricas básicas com WSQs obtidos por leitoras ópticas especialistas, garantindo assim o funcionamento do matcher com biometrias obtidas pelos dois métodos, além de fornecer uma ideia inicial da qualidade das fotos. Para isso foram realizadas verificações biométricas (utilizando o matcher disponibilizado) com as fotos anteriores e também com as mesmas fotos, porém tratadas com alguns filtros que são eles: aumento de brilho, contraste e filtro Gaussiano, todos aplicados pelo GIMP por meio dos sliders disponíveis, como é possível visualizar na figura 6 e 7.

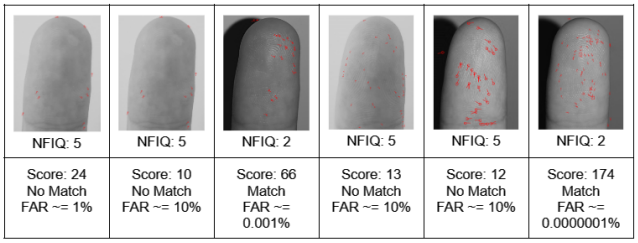


Figure 6. Verificações (1:1) com fotos iniciais originais

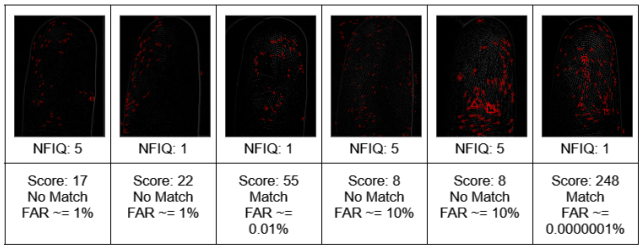


Figure 7. Verificações (1:1) com fotos iniciais tratadas com filtro Gaussiano

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que é possível realizar um match entre uma foto de um dedo e um WSQ por meio do SDK da Neurotechnology. Além disso, é possível verificar que as imagens com flash, HDR e próximas aos dedos possuem maior desempenho e que realizando alguma filtragem na imagem é possível melhorar o resultado obtido. Neste primeiro teste básico já foi possível obter quatro matches e nível de FAR dentro do aceito pelos padrões internacionais, porém sendo ainda necessário a evolução da captura e tratamento da imagem para que seja mais fácil de obtê-las e processá-las sendo aplicável a todas as fotos.

Por fim, um último teste antes da definição dos próximos passos de desenvolvimento foi realizado, executando a comparação de duas biometrias obtidas por foto, sendo elas de ótima qualidade, porém não resultando em um match. Isso comprova que a extração por fotos e filtros ainda necessita evoluir para se tornar utilizável e que é necessário o desenvolvimento de um algoritmo de tratamento especial para essas fotos, que será proposto neste trabalho mais adiante, assim como um método de captura.

O algoritmo de processamento de imagens necessário será discutido na próxima seção, e será desenvolvido com Java utilizando o framework Spring e a partir do seguinte método de desenvolvimento: implementação de múltiplos algoritmos de tratamento de imagens, aferição de desempenho destes algoritmos, para determinar o algoritmo final de tratamento, métodos de conexão e utilização do SDK da Neurotechnology (tanto para extração quanto para match), por meio da API disponibilizada pela BRy, além do desenvolvimento de uma API para utilização deste conjunto.

4.2 Definição do algoritmo de processamento

A partir dos testes iniciais realizados ficou evidente a necessidade de um algoritmo de tratamento de imagens, para isso,

após extensa pesquisa na área, análise dos trabalhos relacionados e testes manuais, foram desenvolvidos vários algoritmos, que juntos fazem a imagem ficar mais nítida e com minúcias mais aparentes. Para o desenvolvimento destes algoritmos foi utilizado a biblioteca OpenCV, para facilitação do processo.

Para definir o algoritmo final de processamento, era necessário fazer a implementação de vários algoritmos de tratamento de imagens que juntos irão compor a implementação final. Portanto, o primeiro algoritmo desenvolvido é o algoritmo para espelhar a imagem (flip) que recebe a imagem e faz o espelhamento da mesma no eixo vertical, feito desta maneira para equivaler com as biometrias obtidas em leitores tradicionais. Implementou-se um algoritmo para converter a imagem para escala de cinza, já que para a aplicação futura dos filtros de AHE e CLAHE é necessário que a imagem esteja em escala de cinza.

Com a conversão para escala de cinza realizada é possível utilizar o filtro AHE para otimizar o contraste da imagem, como o resultado do AHE não se mostrou tão eficiente, já que enfatizou as minúcias mas gerou áreas com muita luz, é necessário implementar o CLAHE, que utiliza a função específica do OpenCV. Apesar de uma máquina conseguir visualizar as alterações de contraste de uma região, a aplicação do CLAHE se mostrou muito influente na melhora do NFIQ obtido.

Após a aplicação do filtro de CLAHE fica evidente a melhora na visualização das minúcias, porém percebe-se que as minúcias estão invertidas com relação às exibidas em um WSQ, ou seja, onde na imagem, com o filtro aplicado, está branco, no WSQ é preto, o que pode impactar no match entre os dois tipos de biometrias no futuro. Por conta disso faz-se necessário o desenvolvimento de um algoritmo de inversão de cores.

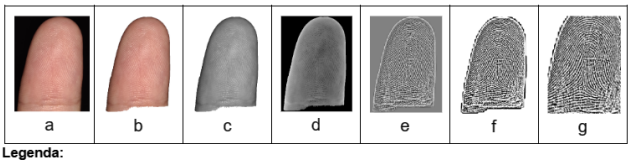
Como as imagens obtidas por WSQs possuem somente a cor branca para o fundo e preta para as áreas altas das minúcias, é fundamental binarizar a imagem para obter o resultado desejado, eliminando qualquer tom de cinza presente. Outro método importante para a exibição apropriada da biometria, já que inicialmente esta fica muito distante da câmera e aparece uma região maior do dedo do que somente a área de interesse, é o método de crop que faz o recorte da imagem mais centralizada. Vale destacar que o crop existente tem um tamanho padrão que pode não obedecer para todos os cenários de foto, câmera e dispositivos, necessitando para implementação em larga escala de um algoritmo com crop da zona de interesse com melhor qualidade e inteligência.

Além dos filtros já exibidos, detectou-se a possibilidade de implementar outros antes da definição final do algoritmo de processamento de imagens, filtros dos quais poderiam ser úteis para a conclusão da tarefa. O primeiro dos algoritmos testados foi a normalização, que iguala a iluminação em todos os pixels, porém não foi utilizado para o algoritmo final. Como o filtro de Gabor foi o mais utilizado nas implementações de trabalhos relacionados, uma tentativa de desenvolvimento foi realizada, porém após a execução fica claro que para o correto funcionamento do filtro de Gabor é necessário a implementação de um de mapa de frequência das minúcias e orientação destas, que é muito difícil de ser implementado e irá variar com cada imagem e tamanho da mesma, além de ser difícil de padronizá-lo para fotos obtidas de diferentes dispositivos, padrões de iluminação, resolução e posicionamento diferentes. Outro filtro bastante citado na literatura é o Canny Edge Detector que é capaz de realçar as bordas e remover o conteúdo não pertencente às bordas, porém não trouxe o resultado esperado para as biometrias, exibindo muito ruído junto da imagem, já que este é um filtro passa-alta.

Por fim, após a aplicação dos vários filtros, viu-se que alguns deles realçam detalhes no fundo da imagem, que não é uma zona de interesse, e dependo do que estiver presente no fundo da foto, pode impactar muito negativamente na qualidade da extração e no match dessa biometria. Portanto é imprescindível a segmentação da foto original, removendo o fundo presente desta.

Avançando para a versão final do algoritmo de processamento de imagem, este será composto por vários dos métodos implementados. Para a escolha do algoritmo proposto foi realizada a captura de fotos dos 10 dedos do autor, processamento das imagens pelos algoritmos e extração das minúcias. Após a extração é possível verificar o NFIQ obtido, a composição de algoritmos que gerasse os melhores NFIQs seria a versão final do algoritmo. Como critério de desempate foi utilizado a aferição visual. Após inúmeros testes (que não serão exibidos para resumir o desenvolvimento), o algoritmo que obteve o melhor resultado é composto pela execução em ordem dos algoritmos de espelhamento, remoção de fundo, conversão para escala de cinza, inversão da imagem, CLAHE e binarização.

Para um melhor entendimento do algoritmo proposto, os passos intermediários do método são exibidos na figura 8, assim como o resultado final extraído (NFIQ 3) e com exibição das minúcias na figura 9.



Legenda:

a) Flip - Imagem espelhada
b) Segmentação - Imagem sem fundo
c) Tons de cinza - Imagem em tons de cinza
d) Inversão - Imagem com cores invertidas
e) CLAHE - Imagem com aplicação do CLAHE
f) Binarização - Imagem binarizada
g) Crop - Imagem recortada no centro

Figure 8. magem obtida após cada etapa do processamento em série

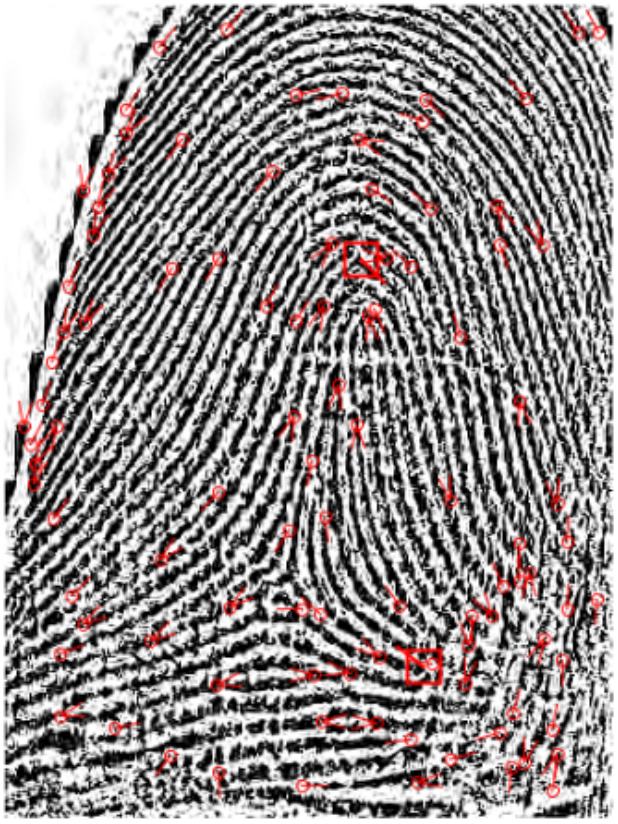


Figure 9. Imagem processada pelo algoritmo proposto com minúcias

Percebe-se uma grande melhoria na visualização das minúcias da foto original, sendo relativamente fácil de comparar-se visualmente duas biometrias extraídas pelo método proposto, que juntamente com o NFIQ 1 extraído (dentro dos parâmetros aceitáveis internacionalmente) comprova a eficácia do algoritmo. É importante ressaltar que embora o NFIQ 1 obtido nessa biometria seja equivalente ao obtido nos testes iniciais, o valor inicial foi provavelmente mascarado por uma "falha" na implementação do NFIQ 1.0, que por apresentar mais pontos condizentes com possíveis minúcias fez com que o score fosse maior, executando o NFIQ 2.0 sobre a mesma biometria foi obtido um score de 42, que seria equivalente a um NFIQ 1.0 de 3. Essa "falha" na implementação do NFIQ 1.0 foi corrigida na implementação do NFIQ 2.0 [41] que melhora a qualidade da validação e consegue distinguir melhor entre os níveis de qualidade, já que essa possui uma avaliação de 0 a 100.

Cabe ressaltar que o código de extração e comparação de biometrias utilizou a API disponibilizada pela BRy Tecnologia que utiliza o SDK da Neurotechnology, sendo assim, não há uma grande implementação por conta do autor.

4.3 Desempenho do algoritmo

Após a implementação de todos os algoritmos exibidos na seção anterior, é necessário garantir que estes sejam executados rapidamente, não impedindo o uso em larga escala. Portanto foi realizada uma análise no tempo de execução dos filtros, e praticamente todos eles se mostraram bem eficazes, com tempo de execução na casa de algumas dezenas ou centenas de milissegundos, o que é completamente aceitável para processamento das imagens. Porém o filtro de segmentação executa em um tempo variável, com forte dependência da imagem, onde em imagens com poucos detalhes ao fundo (pouca variação) e pequenas (aproximadamente 800 x 800 pixels) é possível concluir a segmentação em média em 600ms, porém em imagens maiores e com mais detalhes o filtro pode levar até 5s para finalizar a execução.

Na tentativa de sanar o problema de tempo de execução do algoritmo de remoção de fundo proposto inicialmente, foi realizada uma nova busca na literatura para a implementação de um novo método mais eficiente. Apesar de na nova implementação o resultado estar correto e até melhor que o resultado obtido no algoritmo inicial, assim como o tempo de execução ter diminuído de uma média de 3s para 600ms, o algoritmo proposto não consegue remover corretamente o fundo em todos os casos, o que é mais impactante para a aplicação do que o baixo desempenho obtido no primeiro exemplo. Desta forma, para os objetivos deste trabalho, optou-se por utilizar o primeiro algoritmo, deixando a otimização como um trabalho futuro, já que este funciona para todos os casos.

Com isso conclui-se que os algoritmos possuem um bom tempo de execução, tendo uma pequena demora na conclusão somente em imagens maiores e com muitos detalhes no fundo, porém no pior dos casos testados o tempo foi de 5s e com tempo médio de 900ms, o que é aceitável, já que esse algoritmo será executado uma única vez no momento da coleta dos dedos, não impactando na base final.

4.4 Desenvolvimento da API

Nesta seção será descrita a API desenvolvida. Esta API foi criada por meio do Postman com documentação e exemplos de uso. A API é composta por quatro endpoints, sendo um deles responsável exclusivamente pelo processamento de imagem, outro por extrair os templates (realizando ou não o tratamento de imagem), e dois para verificação biométrica, onde um deles é exclusivo para verificar dois templates já extraídos, e o segundo para processar as imagens caso necessário, extrair e verificar os dois templates obtidos.

O primeiro dos endpoints pertencentes a API do Fingerprint Photo Matcher é o endpoint de processamento da imagem, que pode ser acessado via REST por uma chamada POST para a URL da aplicação (localhost:8080 se executada localmente) e path /process-image, informando no body um json contendo o base64 da imagem a ser processada. Após realizada a chamada para o process-image, o base64 da imagem processada é retornado no corpo da resposta.

A API possui também o endpoint de extração de template, que pode ser requisitado via POST na URL da aplicação com path /extract-template. No body da requisição é necessário informar um json contendo um booleano de avaliação de

qualidade (retornando o NFIQ) e a lista de biometrias a serem avaliadas contendo o nome da biometria, base64 e booleano processImage para processar a imagem caso seja uma foto e não um WSQ. O retorno é composto pelo template e pela lista de biometrias com o nome, NFIQ e base64.

Já o endpoint de verificação que também realiza o processamento de imagens pode ser acessado pelo path /verify através de uma chamada POST com body contendo duas estruturas iguais ao endpoint de extração encapsuladas em cada template. O retorno desse endpoint contém um json com a operação solicitada, resultado da operação (match ou não), score, resultado esperado (utilizado em testes) e descrição.

Por fim, existe o endpoint de verificação de templates, um POST com path /verify-templates que possui o mesmo retorno do endpoint anterior, porém com estrutura json da requisição mais simples, contendo apenas os dois templates a serem validados (que podem ser obtidos a partir do endpoint de extração).

Portanto está definida a interface de utilização da API proposta para este trabalho.

5. Experimentação e análise dos resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos experimentos realizados com o Fingerprint Photo Matcher. O objetivo desses experimentos é demonstrar que o método proposto pode ser utilizado para identificar uma pessoa, e que pode ser utilizado em larga escala para os mais variados fins.

Para garantir que os testes sejam confiáveis é preciso obter uma base de dados completa, vasta e com todos os casos possíveis, com o objetivo de testar o processamento e a verificação biométrica. Para popular a base foram coletados todos os 10 dedos do autor duas vezes a partir da leitora especializada já citada anteriormente (Suprema Biomini Slim S20) e armazenados em WSQs, formando uma base de 20 dedos obtidos tradicionalmente. Já para a parte da base que contém as fotos dos dedos, foram realizadas 4 fotos de cada dedo do autor, totalizando 40 fotos.

Com a base formada é possível executar 3600 comparações biométricas, sendo este um número considerável. Cabe ressaltar que quanto maior a base melhor seria a validade do teste, porém fazer a coleta de biometrias de terceiros para exposição neste trabalho exige um processo de aprovação em conselho de ética, optando-se por deixar para trabalhos futuros.

5.1 Base de testes

Assim como já mencionado anteriormente, foram obtidas 60 biometrias no total, sendo 20 destas WSQs obtidas tradicionalmente e as 40 restantes são fotos dos dedos obtidas a partir de um smartphone Samsung Galaxy S20.

Para a composição da base final de biometrias obtidas por fotos foram feitos diversos testes, os testes consistiram de inúmeras fotos do dedo do autor capturadas de maneiras variadas, por exemplo, com os dedos abertos ou fechados, com apenas um dedo levantado, com o fundo uniforme ou não e também com o fundo próximo ou distante. Algumas imagens de exemplificação dos métodos mencionados podem ser visualizadas na figura 10:

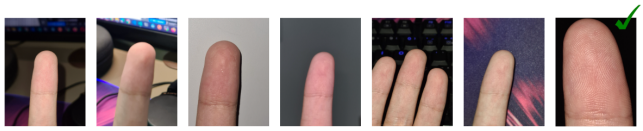


Figure 10. Exemplos de captura

Após os testes foi definido um método de captura que permite uma melhor qualidade visual das minúcias, portanto todas as biometrias obtidas por foto que compõem a base foram obtidas seguindo o mesmo procedimento. Este método de coleta de biometrias consiste em: Capturar uma foto do dedo com ele distante dos outros, utilizar a câmera de zoom do smartphone, deve-se aproximar o dedo o máximo possível da lente da câmera e manter o fundo bem distante, por fim utilizar as configurações de HDR e flash ativadas.

Ao utilizar o flash, garante-se uma iluminação adequada para capturar os detalhes essenciais das impressões digitais, somado ao fundo distante ajuda a criar um contraste que evidencia somente o dedo na imagem e "apagando" o fundo. Dessa forma, o resultado final é uma foto com a biometria em primeiro plano e um fundo uniforme preto (como exposto anteriormente na figura 10 na imagem com uma marcação verde), destacando claramente as características biométricas do dedo.

É fundamental ressaltar que, após as diversas tentativas de captura, experimentando várias posições do dedo e diferentes fundos, o método descrito revelou-se a melhor maneira de garantir uma imagem clara e detalhada, que permita a precisão e confiabilidade do processo de reconhecimento biométrico. O uso de um fundo uniformemente preto é uma consequência dessa abordagem, com o objetivo de eliminar distrações visuais que possam comprometer a análise e a identificação biométrica. Ao utilizar outros métodos de captura, as imagens obtidas frequentemente contêm um excesso de informações além do dedo, o que pode resultar em distração e falta de foco na área de interesse durante o processamento dessas imagens, como exibido anteriormente na figura 10.

Por fim, para a composição da base foi realizado um pequeno recorte de todas as imagens para que estas contivessem somente a ponta dos dedos e que o centro das minúcias (core) estivesse no centro da imagem. Isso é importante para uma melhor comparação biométrica e garantia do processamento correto. Por conta da complexidade de implementação optou-se pela utilização das imagens obtidas desta maneira, porém idealmente deveria ser utilizado um aplicativo mobile que indique e auxilie na obtenção da foto, além de já fazer um recorte na zona de interesse.

5.2 Testes de processamento

A primeira experimentação necessária para validar a qualidade do algoritmo de processamento desenvolvido é a validação do

processamento das imagens, exibindo a imagem pós-processada e extraindo o template biométrico a partir dela, sendo possível então exibir o NFIQ obtido para a biometria e também a imagem com as minúcias detectadas expostas.

Para isso foi desenvolvido o teste de processamento de imagens, nessa etapa o sistema irá ler todas as biometrias que compõem a base para processá-las uma a uma com o método de processamento já exibido anteriormente e após a execução deste método irá chamar o extrator da Neurotechnology para extrair, validar o NFIQ e exibir as minúcias obtidas em uma nova foto PNG.

Para que seja possível compreender o resultado final detalhado na seção 5.4 é necessário primeiro entender os resultados obtidos nesta etapa das experimentações, portanto será ilustrado cada passo com o resultado obtido. Uma das 40 biometrias que compõem o banco de testes de imagens obtidas por smartphone está exposta a seguir na figura 11.

Figure 11. Foto do dedo do autor (LEFT_HAND_MIDDLE-1)

Após a execução do teste para este dedo em específico foi obtido após o passo de processamento de imagem uma biometria com NFIQ 2 como disponível após a execução do passo de extração, que pode ser visto com as minúcias em destaque na figura 12.

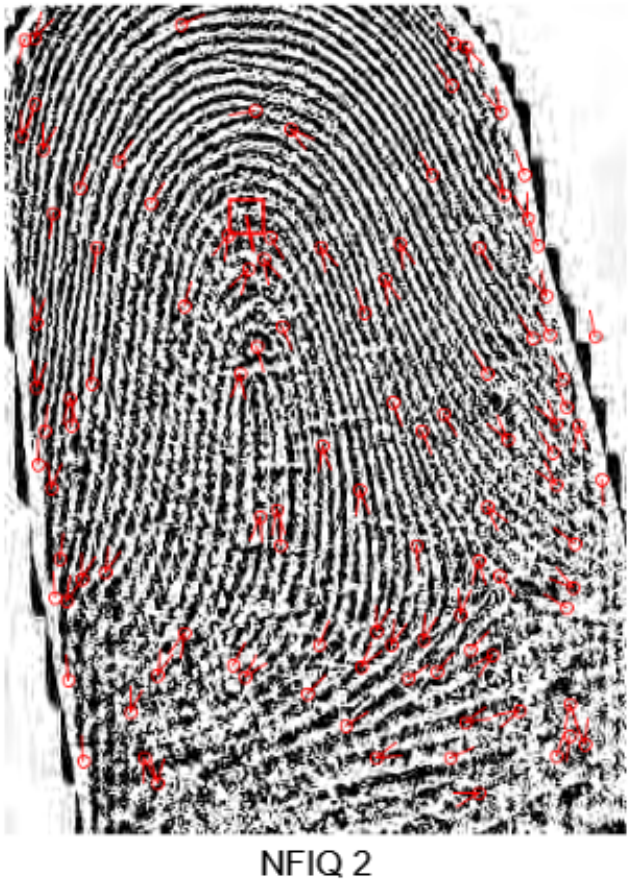


Figure 12. Foto do dedo do autor processada pelo algoritmo proposto com minúcias (LEFT_HAND_MIDDLE-1)

É evidente a melhora na exibição das minúcias após o processamento e também que a extração pode ser executada sem problemas gerando um bom template biométrico. Vale ressaltar que para a imagem obter o melhor resultado e poder ser comparada mais facilmente com os WSQs posteriormente, é necessário que a imagem seja redimensionada para conter 500 ppi, ou seja, possuir o mesmo tamanho das capturas feitas por leitores especializados tradicionais, já que o extrator e matcher utilizados seguem os padrões para hardwares especializados.

Por conta disso as fotos presentes na base de imagens foram todas redimensionadas para conter aproximadamente 500 ppi, juntamente do crop realizado no algoritmo proposto, porém seria muito importante possuir um método para automatizar o redimensionamento para 500 ppi, que não será explorado neste momento, ficando como uma melhoria para trabalhos futuros.

Após a exibição do WSQ com as minúcias fica evidente que a comparação visual entre os dois métodos é extremamente possível, e possuindo um treinamento de papiloscopia é fácil de identificar que as duas biometrias pertencem a mesma pessoa, assim como evidenciado na figura 13.

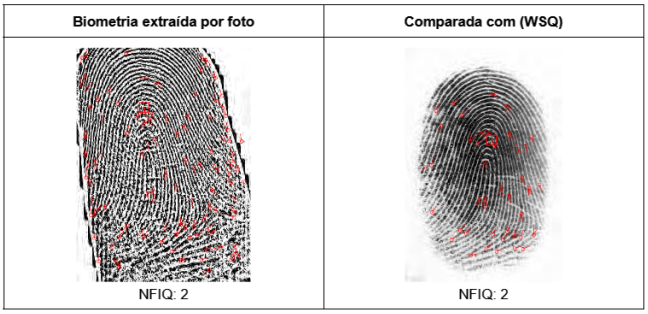


Figure 13. Foto processada ao lado de um WSQ

Um fato muito importante percebido na execução do teste descrito nesta seção é que o algoritmo de processamento de imagem está bem otimizado, trazendo bons resultados em um tempo baixo, levando em média um segundo para processar cada dedo. Cabe ressaltar que os mais de 60 processamentos estão disponíveis no repositório do projeto para uma avaliação completa dos testes realizados nesta etapa.

5.3 Testes de verificação

Após a experimentação bem sucedida do processamento das fotos é necessário prosseguir com a avaliação do método proposto e confirmar que este é capaz de verificar biometrias independente do tipo de captura e armazenamento. Portanto, é preciso realizar uma comparação (1:1) com todas as biometrias pertencentes a base.

Nesta etapa do teste o sistema irá comparar todas as biometrias obtidas por fotos do dedo entre si, depois compará-las com todos os WSQs coletados por meio dos leitores ópticos especialistas e por fim comparar todos os WSQs entre si. A verificação biométrica irá utilizar o matcher da Neurotechnology já mencionado anteriormente.

Para exemplificar melhor o resultado obtido após a execução da etapa será novamente utilizado como base o dedo já exibido na etapa anterior, para este dedo foram executado alguns testes, entre eles a verificação (1:1) entre o próprio dedo obtido por imagens com ele mesmo, resultando em um match com score de 2700.

Já a comparação entre o dedo 1 obtido por leitoras especializadas com ele mesmo resultou em match com score de 1555.

E por fim a verificação entre o dedo obtido por foto com o mesmo dedo obtido pela leitora resultou também em um match biométrico e desta vez com score 165, indicando um FAR de menos de 0,000001%, o que é um valor excelente.

Foram executados ainda mais de 3600 comparações seguindo o mesmo formato exposto acima, onde a maioria deve resultar em não batimento biométrico já que não se tratam do mesmo dedo, todos os testes estão disponíveis no repositório do projeto e não serão detalhados nessa seção, porém será analisado o resultado final dos testes na seção 5.4.

5.4 Análise dos resultados

Após a execução das etapas detalhadas nas seções anteriores o teste gera ainda alguns relatórios com detalhamento dos resultados obtidos nos testes, permitindo assim uma validação da qualidade do método proposto e uma resposta para cada uma das questões que fundamentaram os testes.

Os dois relatórios que exibem o resultado do processamento das biometrias possuem a mesma estrutura e indicam quantas biometrias foram processadas e qual a quantidade de biometrias para cada valor de NFIQ possível, lembrando que variam de 1 a 5 sendo 1 o melhor.

Para o processamento de biometrias obtidas por fotos foi obtido o seguinte relatório: Foram processadas 41 fotos e destas 41, 13 possuem NFIQ 1, 10 possuem NFIQ 2, uma possui NFIQ 3, 15 possuem NFIQ 4 e duas possuem NFIQ 5, ou seja, 24 de 41 estão dentro dos valores aceitáveis internacionalmente. Por conta disso o resultado das verificações posteriores pode ser negativamente afetado, já que com uma base de menor qualidade a verificação tende a não ser possível em todos os casos.

Já para as biometrias obtidas por scanners especializados o seguinte relatório foi gerado: Foram processadas 22 biometrias, 10 destas possuem NFIQ 1, 11 possuem NFIQ 2 e apenas uma possui NFIQ 3, sendo todas as 22 biometrias aceitas pelos padrões internacionais, o que deve levar a um impacto positivo na verificação entre si.

Para a etapa de verificação das biometrias obtidas por foto obtivemos o seguinte resultado: Foram executados 1681 verificações 1:1 entre as fotos e destas foram obtidos 1548 não correspondências de um total de 1508 esperadas, possuindo uma incidência de 102,65% de não correspondência, ou seja, recusando mais do que deveria, além de 133 correspondências de um total esperado 173 o que representa uma incidência de 76,87%. É possível visualizar também o estudo das taxas obtidas, que a partir de uma ocorrência de zero falsas aceitações, 40 falsas rejeições, 133 aceitações verdadeiras e 1508 rejeições verdadeiras foi obtido uma taxa de FAR de 0% (pelo score o FAR deve ser de 0,001%), FRR de 2,37%, TAR de 76,87%, TRR de 100% e EER de 1,18% e por fim totalizando um acerto geral de 97,62% das comparações. Estes valores obtidos podem ser considerados ótimos internacionalmente e suficientes para uma primeira versão do método proposto, já que a base de biometrias extraídas por um smartphone possui uma baixa qualidade de NFIQ, sendo os valores obtidos melhores do que o recomendado para um sistema de validação facial.

Podemos concluir que o sistema validou corretamente a maioria dos casos tendo como problema somente uma rejeição maior do que o esperado, dificultando a usabilidade mas mantendo a segurança muito elevada, já que não validou ninguém não autorizado.

Para as verificações de foto com WSQ obtivemos o seguinte relatório: Foram executados 902 verificações 1:1 entre fotos e WSQs obtendo-se 829 não correspondências de um total de 810 esperadas, possuindo uma incidência de 102,34% de não correspondência, ou seja, novamente recusando mais do que deveria, além de 73 correspondências de um total esperado 92 o que representa um acerto de 79,34%, número acima do

resultado anterior, o que comprova que a base de qualidade maior dos WSQs é impactante. As taxas obtidas são calculadas a partir de uma ocorrência de zero falsas aceitações, 19 falsas rejeições, 73 aceitações verdadeiras e 810 rejeições verdadeiras que levam a uma taxa de FAR de 0% (pelo score o FAR deve ser de 0,001%), FRR de 2,10%, TAR de 79,34%, TRR de 100% e EER de 1,05% e por fim totalizando um acerto geral de 97,89% das comparações. Novamente os valores obtidos podem ser considerados bons, já que a base de imagens (fotos de smartphones) possui uma baixa qualidade de NFIQ, o que impacta diretamente na verificação, causando uma diminuição da aceitação de usuários.

Por fim está o relatório de verificação entre os WSQs, neste relatório todas as 484 verificações conseguiram ter exatamente o resultado esperado, comprovando a qualidade da base, extrator e matcher envolvidos no teste. As taxas obtiveram os melhores valores possíveis, sendo 0% para FAR e FRR, ou seja, não houve falsas verificações, e 100% do TAR e TRR, ou seja, todas as verificações foram verdadeiras, o que resulta em um EER de 0% que é o melhor valor possível. Cabe ainda destacar que a execução de todas as etapas de teste e geração dos relatórios leva em média três minutos, o que é um tempo muito bom já que estão sendo realizados mais de 3600 comparações e mais de 60 processamentos.

Por fim é possível comprovar que o método sugerido é eficaz para resolver a demanda proposta com uma taxa média aproximada de FAR de 0,001%, TAR de 77% e EER de 1% (considerados excelentes pelo NIST), e que mesmo com a base de imagens estando composta por quase metade das biometrias com baixa qualidade o resultado foi bem expressivo e aceitável dentro dos parâmetros internacionais. Vale ressaltar que a base de imagens foi obtida sem muito esforço e com um método simples, caso esta seja melhorada será obtido um resultado melhor ainda, pois é possível averiguar que os baixos NFIQs são os provenientes dos resultados incorretos na verificação.

Para confirmar que os baixos NFIQs impactam negativamente o resultado das comparações, foi executada uma segunda bateria de testes com a utilização somente dos dedos com NFIQ menor ou igual a 3. Com isso o resultado obtido foi melhorado drasticamente, aumentando o TAR de verificações entre fotos de 76,97% para 84,21% e melhorando em poucas casas decimais as outras taxas, além de aumentar o TAR de verificações entre WSQs de 79,34% para 83,63% e melhorando também em poucas casas decimais os valores das outras taxas.

Portanto é possível assegurar todas as perguntas que motivaram os testes, sendo o método proposto eficaz (capaz de identificar um indivíduo corretamente), seguro (tem um nível de qualidade de comparação aceito internacionalmente), performático, aplicável a qualquer fim e muito fácil de utilizar com a API desenvolvida.

6. Conclusões e Trabalhos futuros

Nos últimos anos observou-se uma tendência cada vez maior no uso de identificação biométrica, aliado ao crescimento do uso dos smartphones. Ainda neste período houve o início de uma pandemia global, onde as pessoas foram forçadas a descobrir maneiras de não entrarem em contato umas com as outras, o que voltou os olhares para métodos de autenticação biométrica seguros que não necessitasse de contato.

O levantamento do estado da arte realizado neste trabalho demonstrou que ainda não existe nenhum meio seguro e eficaz para identificar as pessoas sem necessitar de contato. Existem alguns modelos propostos para cobrir essa lacuna, porém todos carecem de alguns detalhes importantes e principalmente são difíceis de serem aplicados em larga escala, possuindo um valor de implantação elevado.

Por conta disso, o objetivo geral deste trabalho foi apresentar um modelo de identificação biométrica para validação das impressões digitais sem que haja a necessidade de contato, para isso foi utilizado a câmera presente nos smartphones. Para atender este objetivo, alguns objetivos específicos foram perseguidos, que são: Extração de impressões digitais a partir de uma foto processada, validação da qualidade das biometrias obtidas bem como níveis de FAR e TAR obtidos independente do método de obtenção da biometria e desenvolvimento de uma API REST que disponibilize de maneira fácil a utilização do modelo desenvolvido.

Este trabalho apresentou um método proposto para executar uma verificação biométrica por impressões digitais obtidas a partir de uma simples foto de smartphone, de maneira a evitar o contato das pessoas com uma leitora e diminuir o custo para a validação da biometria.

O trabalho pode ser dividido em três partes principais. A primeira delas consiste na revisão dos fundamentos teóricos para o desenvolvimento do método proposto, assim como a revisão do estado da arte das verificações biométricas sem contato. Sendo esta uma parte crucial para o entendimento do objetivo e definição da proposição final deste trabalho.

A segunda parte abrange o desenvolvimento da aplicação que realiza todo o processamento necessário para atingir o resultado esperado. Buscou-se utilizar métodos simples e fáceis de serem implementados para que a execução se realizasse em um tempo baixo. Foram necessários vários micro testes para a obtenção dos algoritmos de processamento parciais, assim como o algoritmo final.

E a terceira parte do trabalho consiste na criação, execução e validação dos testes. Nessa etapa procurou-se exibir os dados de uma maneira simples e que fosse capaz de validar que o método proposto é capaz de validar corretamente uma verificação biométrica dentro dos padrões internacionais. Desta maneira alcançou-se o objetivo proposto para o projeto.

De acordo com os objetivos definidos para este trabalho, pode-se listar várias contribuições como um detalhamento de como funciona o processo de identificação biométrica, análise de minúcias e tratamento de imagens. Também foi possível desenvolver um método capaz de processar fotos obtidas através

de smartphones, ou qualquer câmera comum, extraí-las em um template biométrico e realizar uma comparação 1:1 de fotos com WSQs ou outras fotos, mantendo a qualidade e taxa de FAR dentro de 0.001% que é considerado ótimo internacionalmente.

Cabe ressaltar que o método sugerido é eficaz para resolver a demanda proposta com uma taxa média aproximada de FAR de 0,001%, TAR de 77% e EER de 1% (considerados excelentes pelo NIST), e que mesmo com a base de imagens estando composta por quase metade das biometrias com baixa qualidade o resultado foi bem expressivo e aceitável dentro dos parâmetros internacionais. Considerando somente biometrias com NFIQ 1 a 3 os valores obtidos foram de FAR de 0,001%, TAR de 83% e EER de 1%.

Além disso foi realizada uma revisão dos trabalhos relacionados na área, mostrando as principais diferenças entre cada trabalho, bem como a utilização de maneiras não tradicionais no processamento das imagens e o desenvolvimento de uma API REST para o método de verificação proposto, a fim de tornar simples a utilização por qualquer pessoa. Diferentemente dos outros trabalhos na área, este levou em consideração NFIQ e fez uma validação completa das taxas de qualidade, além de também focar em como obter as biometrias.

Como continuação deste trabalho, pode ser realizada uma busca por algoritmos de tratamento de imagens, junto com a busca de novos filtros que possam realçar mais as minúcias da foto tirada, independente das condições, facilitando a extração da digital. Buscar por uma boa implementação do filtro de Gabor, que possua um filtro de estimativa de orientação das elevações da impressão digital, assim como um filtro de estimativa de frequência dessas elevações.

Também para ajudar no processamento de biometrias e testes, realizar uma longa sessão de coleta, armazenando várias biometrias com diferentes índices de qualidade (extraídas pelos sensores tradicionais) e várias fotos de outros smartphones e câmeras, as quais serão posteriormente processadas. Assim como a coleta de biometrias de mais pessoas, a fim de compor uma base realmente vasta e completa. Implementar uma forma de testes automatizados considerando toda a nova base, levantando relatórios mais completos que os dispostos aqui. Ainda no ramo da coleta, é possível estudar as melhores maneiras de obtenção da foto e até mesmo o desenvolvimento de um APP que detecta a zona de interesse dos dedos e faz um recorte automático da área, auxiliando na captura, e ainda fazendo com que a imagem seja automaticamente redimensionada para conter 500 ppi na zona de interesse. Para facilitar ainda mais a coleta o ideal seria tirar apenas a foto da mão e a partir desta executar um recorte em cada dedo.

Outra melhoria a ser realizada seria a utilização de um novo algoritmo de segmentação, pois o algoritmo utilizado não se mostrou capaz de funcionar em qualquer cenário, demorando consideravelmente para imagens grandes e detalhadas. Por fim criar uma forma de validação de prova de vida, já que a prova de vida de um dedo depende fortemente de confiança no dispositivo utilizado para a captura (leitoras medem radiação infravermelha) e no acompanhamento de um terceiro confiável. Para desenvolver essa validação poderia ser utilizado uma coleta com mais frames e IA para detectar o movimento do dedo e fazer uma captura ”3D” com aproximação e afastamento do dedo, com o objetivo de provar que é uma pessoa de fato viva.

Referências

[1] CERTISIGN. *Qual é a relação entre a impressão digital e a sua personalidade?* 2017. ⟨https://blog.certisign.com.br/qual-e-a-relacao-entre-a-impressao-digital-e-a-sua-personalidade/⟩. Acesso em 20 jul. 2022.

[2] MARCONDES, J. S. *Biometria, Sistema Biométrico: O que é, Como Funciona?* 2020. Blog Gestão de Segurança Privada ⟨https://gestaodesegurancaprivada.com.br/biometria-sistema-biometrico-o-que-e-como-funciona⟩. Acesso em 19 jul. 2022.

[3] GOGONI, R. *O que é biometria? Os 6 tipos mais usados na tecnologia.* 2019. ⟨https://tecnoblog.net/responde/o-que-e-biometria-tecnologia/⟩. Acesso em 21 jul. 2022.

[4] HANSEN, L. *Is Biometric Technology Worth the Cost?* 2021. ⟨https://www.cioinsight.com/infrastructure/biometric-technology/#:~:text=How%20Much%20Does%20Biometric%20Security,little%20as%20%2420%20per%20device⟩. Acesso em 20 jul. 2022.

[5] NEUROTECHNOLOGY. *NEUROtechnology*. 2022. ⟨https://www.neurotechnology.com/⟩. Acesso em: 01 mar. 2022.

[6] NEC. *How is biometric data stored?* 2022. ⟨https://www.nec.co.nz/market-leadership/publications-media/how-is-biometric-data-stored/⟩. Acesso em 20 jul. 2022.

[7] DRULLIS, G. *Serpro abre edital para solução de captura de digitais com câmera do celular*. 2022. ⟨https://www.mobiletime.com.br/noticias/25/07/2022/serpro-abre-edital-para-solucao-de-captura-de-digitais-com-camera-do-celu⟩. Acesso em 20 nov. 2022.

[8] ONESPAN. *Autenticação biométrica: Definição, tendências, prós e contras, casos de uso e mitos*. 2022. ⟨https://www.onespan.com/pt-br/topics/autenticacao-biometrica#:~:text=A%20autentica%C3%A7%C3%A3o%20biom%C3%A9trica%20%C3%A9%20um,e%20outros%20recursos%20de%20rede⟩. Acesso em 20 jul. 2022.

[9] MARY, C. *Minutiae Based Extraction in Fingerprint Recognition*. 2022. Bayometric. ⟨https://www.bayometric.com/minutiae-based-extraction-fingerprint-recognition/⟩. Acesso em 20 jul. 2022.

[10] STROMBERG, J. *Adermatoglyphia: The Genetic Disorder Of People Born Without Fingerprints*. 2014.

⟨https://www.smithsonianmag.com/science-nature/adermatoglyphia-genetic-disorder-people-born-without-fingerprints-180949382/⟩. Acesso em 20 jul. 2022.

[11] WATSON, S. *How Fingerprinting Works*. 2008. ⟨https://science.howstuffworks.com/fingerprinting3.htm⟩. Acesso em 20 jul. 2022.

[12] MáRCICO, J. E. *Papiloscopia*. 2022. ⟨http://www.papiloscopia.com.br/historia.html⟩. Acesso em 20 jul. 2022.

[13] BANSAL, R.; SEHGAL, P.; BEDI, P. *Minutiae Extraction from Fingerprint Images - a Review*. 2011. ⟨https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1201/1201.1422.pdf⟩. Acesso em 21 jul. 2022.

[14] NIST. *NFIQ 2*. 2021. ⟨https://www.nist.gov/services-resources/software/nfiq-2⟩. Acesso em 20 jul. 2022.

[15] LIBERT, J.; ORANDI, S.; GRATHAM, J. *Comparison of the WSQ and JPEG 2000 Image Compression Algorithms On 500 ppi Fingerprint Imagery*. 2012. ⟨https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-cc24a731f16cb865d9164f88def784ee/pdf/GOVPUB-C13-cc24a731f16cb865d9164f88def784ee.pdf⟩. Acesso em 21 jul. 2022.

[16] KHANDELWAL, S. *Hacker Clones German Defense Minister's Fingerprint Using Just her Photos*. 2014. The Hacker News ⟨https://thehackernews.com/2014/12/hacker-clone-fingerprint-scanner.html⟩. Acesso em 01 mar. 2022.

[17] VIANA, R. *Deepfakes: como vídeos falsos são usados para burlar sistemas de segurança*. 2022. ⟨https://www.combateafraude.com/post/deepfakes-videos-falsos-seguranca⟩. Acesso em 21 jul. 2022.

[18] SUPREMA. *Suprema's Live Finger Detection Technology*. 2016. ⟨http://kb.supremainc.com/knowledge/doku.php?id=en:tc_whitepaper_suprema_live_finger_detection⟩. Acesso em 31 dez. 2022.

[19] MARY, C. *Biometric Glossary: Technical Terms and Definitions. Bayometric*. 2022. Bayometric. ⟨https://www.bayometric.com/biometric-glossary-terms-definitions/⟩. Acesso em 20 jul. 2022.

[20] MAJHI, B.; AL. et. *Machine Learning for Biometrics: Concepts, Algorithms and Applications*. 2022. ⟨https://www.sciencedirect.com/book/9780323852098/machine-learning-for-biometrics⟩. Acesso em 22 jul. 2022.

[21] INNOVATRICS. *Equal Error Rate (EER)*. 2022. ⟨https://www.innovatrics.com/glossary/equal-error-rate-eer/#:~:text=A%20statistic%20used%20to%20show,accuracy%20of%20the%20biometric%20system⟩. Acesso em 20 mar. 2023.

[22] MARY, C. *False Acceptance Rate (FAR) and False Recognition Rate (FRR) in Biometrics*. 2022. Bayometric. ⟨https://www.bayometric.com/false-acceptance-rate-far-false-recognition-rate-frr/⟩. Acesso em 28 jul. 2022.

[23] ANDRESS, J. *Basics of Information Security (Second Edition)*. 2014. ⟨https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/false-acceptance-rate⟩. Acesso em 22 jul. 2022.

[24] NEUROTECHNOLOGY. *Technology Awards*. 2023. Bayometric. ⟨https://www.neurotechnology.com/megamatcher-abis-awards.html⟩. Acesso em 31 mar. 2023.

[25] FVC-ONGOING. *Published Results: Fingerprint Verification*. 2023. ⟨https://biolab.csr.unibo.it/fvcongoing/UI/Form/PublishedAlgs.aspx#&&rURsNOBN92xHvjxPZGC6ijhPFrM/3jvSgQW4k4kb2N6WSmFNBeVjER/ctEmy/LeYAsEnQJS7YXm2S1n0FG6OEv4di3+jYBjmpFdvXB3dvT1n2z6HlFGmNiFluVZ3bAC1enEVaTMxzFy28lIGYDo⟩. Acesso em 02 fev. 2023.

[26] NICE, K.; WILSON, T. V.; GUREVICH, G. *How Digital Cameras Work*. 2006. ⟨https://electronics.howstuffworks.com/cameras-photography/digital/digital-camera.htm⟩. Acesso em 22 jul. 2022.

[27] SONY. *Qual é a diferença entre pontos por polegada (DPI) e Pixels por polegada (PPI)?* 2015. ⟨https://science.howstuffworks.com/fingerprinting3.htm⟩. Acesso em 02 fev. 2023.

[28] IPSISPRO. *Aprenda tudo sobre lentes fotográficas agora*. 2019. ⟨https://blog.ipsispro.com.br/tudo-sobre-lentes-fotograficas⟩. Acesso em 22 jul. 2022.

[29] OPENCV. *Histograms - 2: Histogram Equalization*. 2022. ⟨https://docs.opencv.org/4.x/d2/d74/tutorial_js_histogram_equalization.html⟩. Acesso em 21 nov. 2022.

[30] GIOVANINI, A. *Filtro Passa Alta?* 2022. ⟨https://adenilsongiovanini.com.br/blog/filtro-passa-alta-o-que-e-e-para-que-serve/⟩. Acesso em 30 jul. 2022.

[31] SOUZA, G. de M. *Laplaciano do Gaussiano*. 2016. ⟨https://melosgabriel.github.io/pdi/6.Filtro-Espacial/#:~:text=Como%20vimos%20nas%20aulas%20da,suavizante%2C%20para%20eliminarmos%20os%20ru%C3%ADdos⟩. Acesso em 20 jul. 2022.

[32] DATAGEN. *Image Segmentation: The Basics and 5 Key Techniques.* 2022. ⟨https://datagen.tech/guides/image-annotation/image-segmentation/⟩. Acesso em 04 jan. 2023.

[33] OTSU. *A threshold selection method from gray-level histograms*. 1979. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, 9(1), p. 62–66 (1979). Acesso em 30 jul. 2022.

[34] ADOBE. *How to switch up your color scheme*. 2022. ⟨https://www.adobe.com/creativecloud/photography/discover/invert-colors.html⟩. Acesso em 04 jan. 2023.

[35] THAI, R. *Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction*. 2003. ⟨https://www.peterkovesi.com/studentprojects/raymondthai/RaymondThai.pdf⟩. Acesso em 21 jul. 2022.

[36] KUMAR, A.; KWONG, C. *Towards Contactless, Low-Cost and Accurate 3D Fingerprint Identification*. 2015. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 37, n. 3, p. 681-696, 1 March 2015, doi: 10.1109/TPAMI.2014.2339818. Acesso em 30 jul. 2022.

[37] CHOI, H.; CHOI, K.; KIM, J. *Mosaicing Touchless and Mirror-Reflected Fingerprint Images*. 2010. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, v. 5, n. 1, p. 52-61, Mar. 2010, doi: 10.1109/TIFS.2009.2038758. Acesso em 30 jul. 2022.

[38] CHOWDHURY, A. M. M.; IMTIAZ, M. H. *Contactless Fingerprint Recognition Using Deep Learning - A Systematic Review*. 2021. ⟨https://www.researchgate.net/publication/363385196_Contactless_Fingerprint_Recognition_Using_Deep_Learning-A_Systematic_Review⟩. Acesso em 20 jul. 2022.

[39] RAGHAVENDRA, R.; BUSCH, C.; YANG, B. *Scaling-robust fingerprint verification with smartphone camera in real-life scenarios*. 2013. IEEE Sixth International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS), 2013, p. 1-8, doi: 10.1109/BTAS.2013.6712736. Acesso em 30 jul. 2022.

[40] GUPTA, S.; ANAND, S.; RAI, A. *Efficient Fingerprint Extraction and Matching Using Smartphone Camera*. 2017. ⟨https://www.researchgate.net/publication/318899084_Fingerprint_Extraction_Using_Smartphone_Camera⟩. Acesso em 21 jul. 2022.

[41] FIUMARA, G. *Releases: usnistgov/NFIQ2*. 2021. ⟨https://github.com/usnistgov/NFIQ2/releases⟩. Acesso em 31 dez. 2022.