

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS UNIDADE
ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

KARIM FERREIRA LIMA

**LINHAS VIRTUAIS PARA ANÁLISE GRÁFICA EM SITUAÇÕES DE
IMPEDIMENTO NOS JOGOS DE FUTEBOL**

São Leopoldo

2021

KARIM FERREIRA LIMA

**LINHAS VIRTUAIS PARA ANÁLISE GRÁFICA EM SITUAÇÕES DE
IMPEDIMENTO NOS JOGOS DE FUTEBOL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica, pelo Curso de
Engenharia Elétrica com Ênfase em
Controle e Automação da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Ms. Jean Schmith

São Leopoldo

2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela vida, por ter me dado saúde e forças para superar esta época de pandemia em que vivemos, causada pela Covid-19, pelas oportunidades e por ser um guia em minha vida, muitas vezes confortando o meu coração em momentos de difíceis decisões.

Agradeço aos meus pais Luís Carlos Canabarro Lima e Josane Jaqueline Ferreira Lima, por terem me educado e me ensinado os valores que tenho hoje, pelo incentivo durante todo o curso e pelas ajudas emocionais e, algumas vezes, financeiras, que foram essenciais para que eu pudesse chegar a este momento. Também a meu irmão Iuri Ferreira Lima, que sempre criticou de forma positiva meus projetos, e me ajudou a sempre dar o meu melhor.

Também sou grato a minha noiva Ariane Bonatto, pelo companheirismo, pelo apoio, pela confiança, paciência e motivação durante todo o período da graduação e, principalmente, durante a escrita deste trabalho, onde me auxiliou para que estivesse conforme as normas vigentes.

Ao Prof. Me. Jean Schmith, pela excelente orientação para escrever esta monografia, auxiliando, direcionando o caminho certo a seguir e sempre se fazendo presente para sanar qualquer dúvida minha no decorrer do processo.

Agradeço a eng. Markéta Juránková Dubská, cocriadora da programação do PCLines, função utilizada neste projeto, e que foi solícita ao sanar algumas dúvidas sobre a utilização do mesmo. Agradeço também ao Clube Esportivo Aimoré e seus dirigentes, que apresentaram diversas informações importantes para a construção do assunto do projeto.

A todos os meus professores, pelos conhecimentos e ensinamentos dedicados durante o período da graduação. E por fim, a todos meus amigos e colegas, que participaram diretamente ou indiretamente da minha formação acadêmica, em especial ao colega e amigo André Martins, pelo companheirismo, senso crítico, apoio e incentivo durante toda a graduação e execução deste trabalho.

RESUMO

O futebol é um esporte cativante, praticado em muitos países, onde em muitos deles envolve uma quantia grande de dinheiro, e que, atualmente, inovou em seu regulamento ao trazer a tecnologia do *Video Assistant Referee* (VAR), um método de apoio para a tomada de decisões dos árbitros durante uma partida. O VAR auxilia na análise de determinadas regras do esporte, entretanto, a determinação de “Impedimento”, uma das ocasiões, vem causando algumas polêmicas, principalmente no Brasil, pelo fato da demora da análise e definição da irregularidade. Nesse sentido, o projeto proposto tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta para a melhoria das análises de lances de Impedimento, a fim de tornar o sistema mais automático e que possa ser usado, também, em partidas que não são do ramo profissional. Os métodos utilizados foram através de técnicas de tratamento de imagens em lances de Impedimento capturados por emissoras de TV, por meio de programação em linguagem Python, de acordo com as especificações do regulamento. Ao todo, 10 vídeos foram selecionados para análise, sendo 5 com o lance no lado direito do campo e 5 no lado esquerdo. Dentre os vídeos, 1 arquivo foi escolhido como base para a explicação do desenvolvimento dos métodos utilizados no sistema que, como resultado, demonstra um vídeo da situação, com uma linha virtual traçada automaticamente, determinando uma linha relativa de Impedimento. Ainda, em todos os arquivos foi possível identificar o ponto de fuga da imagem, calibrar automaticamente este ponto, conforme o vídeo é apresentado, e projetar uma linha virtual de Impedimento.

Palavras-chave: Visão Computacional. Processamento Digital de Imagens. Linhas Virtuais de Impedimento. VAR.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da Receita Total da CBF.....	12
Figura 2 - Evolução dos Investimentos da CBF no Futebol.....	13
Figura 3 - Exemplo de infração por impedimento	15
Figura 4 - VAR e equipe na VOR da Copa do Mundo FIFA 2018, Rússia	20
Figura 5 - Teste de VOL em plano bidimensional.....	22
Figura 6 - Teste de VOL em espaço tridimensional.....	22
Figura 7 - Resultado homográfico das análises de Hashimoto e Osawa	25
Figura 8 - Representação do plano da Transformada de Hough.....	26
Figura 9 – Representação de uma reta em coordenadas polares e no plano da Transformada de Hough	27
Figura 10 – Início do lance de impedimento como entrada do sistema	29
Figura 11 – Fluxograma da metodologia.....	30
Figura 12 – Fluxograma da aplicação	31
Figura 13 - Representação dos espaços de cores RGB e HSV	32
Figura 14 - Imagem de entrada no sistema HSV.....	33
Figura 15 - Máscara da área do campo.....	34
Figura 16 - Imagem demonstrando a área de jogo.....	35
Figura 17 – Resultado da função Sobel	36
Figura 18 - Resposta da função de detector de Bordas Canny	37
Figura 19 - Representação do plano de coordenadas paralelas	38
Figura 20 – Espaço de coordenadas paralelas da imagem de entrada	39
Figura 21 - Resposta das linhas detectadas pela função PClines	40
Figura 22 - Exemplo de imagem em perspectiva	41
Figura 23 - Ponto de fuga da imagem de entrada	42
Figura 24 - Jogadores marcados e rastreados	44
Figura 25 - Resultado Final	46
Figura 26 - Ponto de calibração	48
Figura 27 – Validação do ponto de calibração	49
Figura 28 – Situação “Sempre Impedido”	50
Figura 29 – Situação “Sempre em Posição Legal”	51
Figura 30 – Transição “Impedido para posição legal”	52
Figura 31 – Transição “Posição legal para impedido”	53

Figura 32 – Sistema no lado esquerdo do campo	54
Figura 33 – Resposta do sistema com outro dado de entrada	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Etapas do projeto	30
------------------------------------	----

LISTA DE SIGLAS

AVAR	<i>Assistente do VAR</i>
CBF	<i>Confederação Brasileira de Futebol</i>
CUDA	<i>Compute Unified Device Architecture</i>
FA	<i>Football Association</i>
FIFA	<i>Fédération Internationale de Football Association</i>
FPS	<i>Frames Por Segundo</i>
HSV	<i>Hue, Saturation and Value</i>
HT	<i>Transformada de Hough</i>
IBM	<i>International Business Machines Corporation</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IFAB	<i>International Football Association Board</i>
OR	<i>On-field Review</i>
OpenCV	<i>Open Source Computer Vision Library</i>
RGB	<i>Red, Green and Blue</i>
RO	<i>Replay Operator</i>
RRA	<i>Referee Review Area</i>
SAICSIT	<i>South African Institute of Computer Scientists and Information Technologists</i>
VAR	<i>Video Assistant Referee</i>
VOL	<i>Virtual Offside Lines</i>
VOR	<i>Video Operation Room</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 Futebol	11
2.1.1 Regulamentos do Futebol.....	13
2.1.2 Regra de Impedimento	14
2.2 Árbitro Assistente de Vídeo (VAR)	15
2.2.1 Princípios do VAR	16
2.2.2 Incidentes/situações de análise	17
2.2.3 Aspectos do VAR	18
2.2.4 Linha virtual de impedimento (VOL).....	20
2.3 Estado da arte	23
3 METODOLOGIA	29
3.1 Fluxogramas	30
3.2 Identificação das linhas paralelas a linha de fundo do campo	32
3.2.1 Determinação da área do jogo.....	32
3.2.2 Detecção das linhas do campo	35
3.3 Identificação do ponto de fuga da imagem	40
3.3.1 Cálculo do ponto de fuga	40
3.4 Identificação dos jogadores	43
3.4.1 Marcação dos jogadores	43
3.5 Desenhar a linha virtual de Impedimento	45
3.5.1 Demarcação da linha virtual de impedimento na imagem	45
3.6 Calibração	47
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
4.1 Simulações	50
5 DISCUSSÃO	56
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

Com o passar das décadas, a tecnologia vem sendo utilizada cada vez mais no mundo dos esportes. Melhorar o desempenho de atletas, melhorar a arbitragem, melhorar o vestuário e melhorar a performance dos equipamentos utilizados são alguns exemplos do emprego de meios tecnológicos no ramo. Nesse sentido, o futebol, um dos maiores esportes atualmente, também tem se beneficiado destes avanços tecnológicos para implementar novos meios de monitorar suas partidas e torná-las mais justas.

A tecnologia chamada de *Video Assistant Referee* (VAR), surgiu com a tarefa de utilizar a tecnologia de vídeo para apoiar o processo de tomada de decisões de um árbitro, durante uma partida, em 4 situações de mudança de jogo: gols e infrações que levam a um gol, decisões de pênalti e infrações que levam a pênaltis, incidentes diretos de cartão vermelho e identidades equivocadas. Entretanto, o Impedimento — uma das regras mais complexas do esporte e uma situação específica que se encaixa em infrações que levam a um gol — tem causado diversas polêmicas, principalmente aqui no Brasil.

Conforme a IFAB (2019), — organização responsável pelas regras oficiais do futebol —, o impedimento é considerado como uma irregularidade no momento em que um jogador de determinada equipe está no campo de defesa adversário, mais próximo da linha de fundo do que o último jogador "rival", e recebe, ou toca, na bola estando nessa posição avantajada. Ou seja, saber se de fato o atleta está ou não impedido, é uma tarefa muito complexa, principalmente quando a diferença é milimétrica entre os envolvidos e quando se analisa a jogada a olho nú.

Nesse contexto, anteriormente, diversos estudos e sistemas, como por exemplo o de Hashimoto e Ozawa (2006), ou D'Orazio *et al.* (2009), que são projetos propostos para análise automática de situações de impedimento por meio de imagens, foram introduzidos previamente no ramo do esporte, seja de modo acadêmico, ou até mesmo como uma forma de validação em campeonatos oficiais. Todavia, atualmente, o método oficial e mais completo é o adotado pelo VAR, onde é possível verificar a irregularidade através da criação de *Virtual Offside Lines* (VOL), Linhas Virtuais de Impedimento traduzido para o português.

A polêmica se dá pelo fato de que a técnica utilizada na criação da VOL, pelo VAR, possui algumas operações manuais, o que apresenta uma demora para a

resposta do sistema, ocasionando um certo grau de irritabilidade e desconforto nos jogadores e telespectadores. Além disso, outro fator que é desfavorável ao VAR, é que a implementação e utilização de sua tecnologia exigem um investimento alto por parte dos clubes, por isso, muitas equipes de pequeno porte não podem usufruí-lo.

Sendo assim, são explicados, conforme regulamentação oficial do jogo, a regra de Impedimento, como funciona o VAR durante uma partida e como ele determina uma situação de irregularidade. Também, é proposta a análise de um lance de uma partida do Campeonato Brasileiro de 2020, para a criação de um projeto, que, por análise gráfica, exerça a mesma função que a do VAR.

Para isso, é demonstrado o passo a passo dos métodos e técnicas utilizadas, assim como as análises dos resultados obtidos da saída do sistema, que tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta para a melhoria das análises de lances de Impedimento, a fim de tornar o sistema mais autônomo, de baixo custo de investimento e implementação e, também, que possa ser usado em partidas que não são do ramo profissional.

Nesse contexto, o projeto tem como objetivos específicos a utilização da linguagem Python e biblioteca *Open Source Computer Vision Library* (OpenCV) para o desenvolvimento do algoritmo, a capacidade do sistema em detectar as linhas que são paralelas as linhas de fundo do campo de jogo, a identificação do ponto de fuga da imagem, a calibração do sistema sem a necessidade de implementar equipamentos no campo e, também, a projeção de uma linha virtual que define se o jogador em análise está impedido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Impedimento é uma das 17 regras compostas no regulamento oficial do futebol. Entretanto, é responsável por uma das grandes polêmicas do esporte. Existe uma certa complexibilidade em determinar a infração durante uma partida e, conseqüentemente, muitas vezes acaba gerando uma confusão, ou até mesmo uma irritabilidade, entre os jogadores e os espectadores do jogo.

Nesse contexto, nas últimas décadas, diversos estudos e sistemas foram realizados para detectar a infração automaticamente e, a fim de diminuir as falhas humanas, auxiliar os árbitros presentes. O maior exemplo disso, é a tecnologia adotada pelas maiores instituições organizacionais do esporte, a *Fédération Internationale de Football Association* (FIFA) e a *International Football Association Board* (IFAB), que, a partir do ano de 2018, incluíram nas regras o chamado *Video Assistant Referee* (VAR), Árbitro Assistente de Vídeo traduzido para o português.

No entanto, as técnicas utilizadas pelo VAR ainda possuem alguns aspectos manuais. Nesse sentido, é proposto o desenvolvimento de uma ferramenta que auxilia as análises, a fim de tornar o sistema mais automático possível e que possa ser usado, também, em partidas que não são do ramo profissional. Diferentemente do método utilizado atualmente, que detecta manualmente, no momento exato, o último jogador da equipe de defesa em seu próprio campo, o proposto projeta uma linha virtual que rastreia o jogador e o acompanha a cada momento.

Ao longo deste capítulo, são apresentados, de forma introdutória, conceitos essenciais para o bom entendimento do sistema de linhas virtuais para análise gráfica em situações de impedimento, assim como trabalhos relacionados, já publicados, que apresentam o estado da arte.

2.1 Futebol

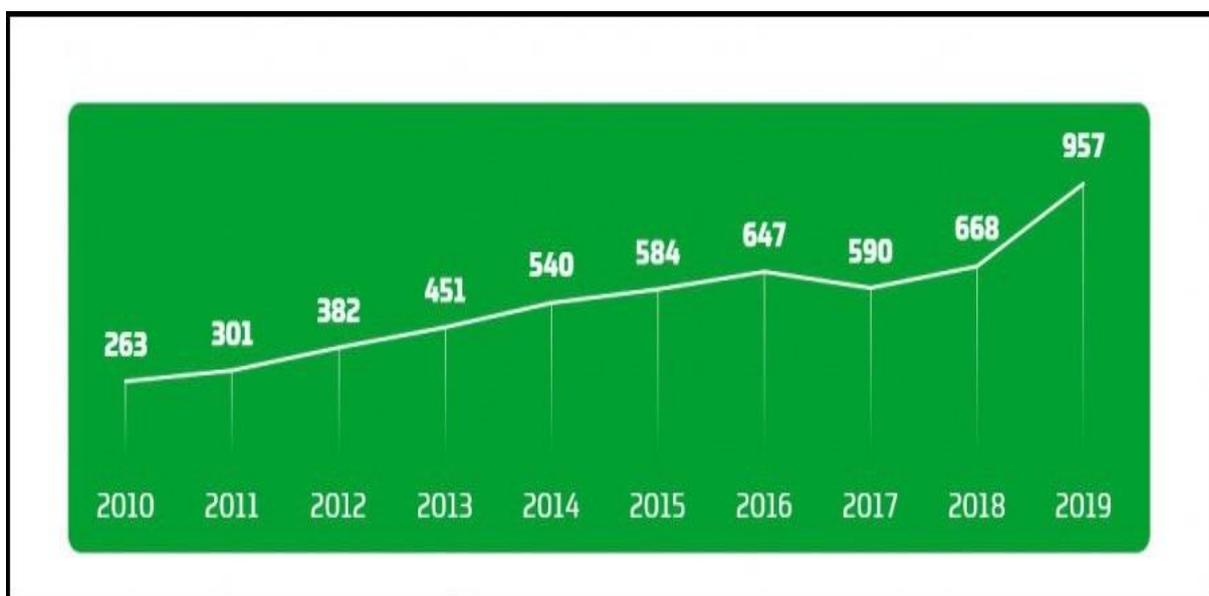
O futebol é um esporte conhecido mundialmente e que cativa boa parte da população. Entretanto, ao longo de sua história, passou por diversas evoluções até chegar ao formato que conhecemos atualmente. Além disso, existem diversos registros de distintas culturas e diferentes épocas que podem ser relacionados ao surgimento da atividade.

Em seu contexto histórico, o esporte possuía muitas características violentas.

Nesse sentido, um fato de grande relevância se deu na Inglaterra do século XIX, onde, com o intuito de torná-lo mais pacífico e incentivar a sua prática, criou-se algumas normas para o jogo, começando a ser integrado em escolas. No entanto, cada escola tinha as suas próprias regras e, quando surgiram as primeiras partidas, originou-se uma confusão quanto a forma em que se praticava o esporte. Conseqüentemente, houve uma divisão das escolas e o surgimento do *Football*, esporte que só se podia usar os pés, e o *Rugby*, esporte que se podia usar os pés e as mãos (FRISSELLI e MANTOVANI, 1999).

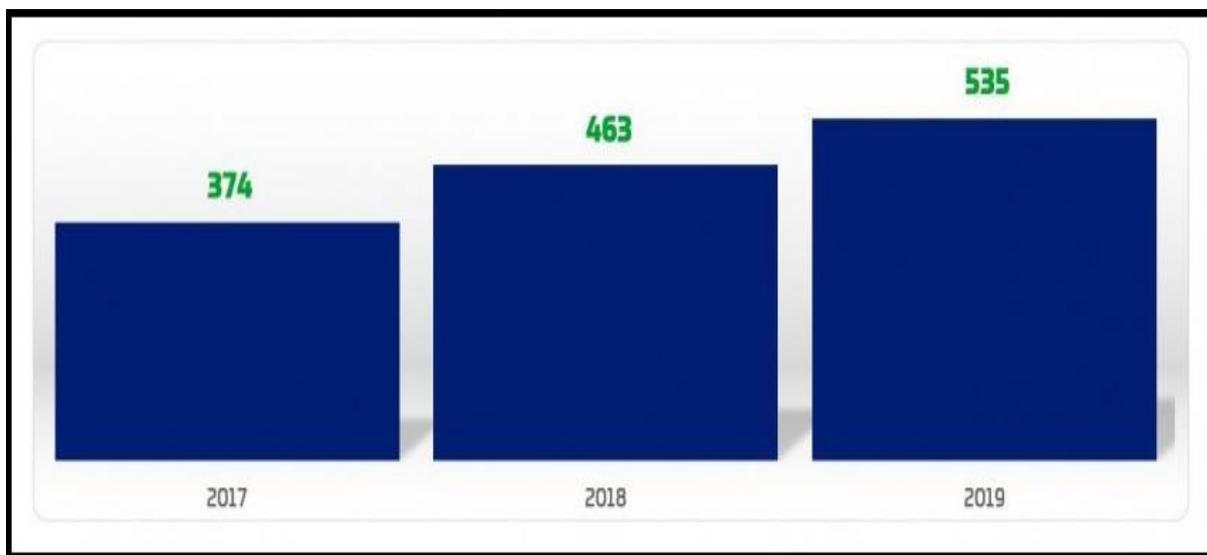
Atualmente, o futebol é praticado em muitos países e ainda possui algumas polêmicas quanto a aplicação de suas regras em determinadas partidas. Uma das possíveis causas, é o fato de que há muito dinheiro envolvido no esporte. Só no Brasil, por exemplo, a Confederação Brasileira de Futebol (CBF) divulgou, em 2020, um documento com as declarações financeiras do ano de 2019 da instituição. Em resumo, a receita total da organização foi de R\$ 957 milhões, sendo desses mais da metade, exatamente R\$ 535 milhões, aplicados direta e indiretamente como formas de investimentos. Na Figura 1, é apresentado a evolução histórica da receita total, em milhões de reais, da CBF na última década e, a Figura 2 ilustra a evolução dos investimentos diretos e indiretos, em milhões de reais também, no futebol brasileiro entre 2017 e 2019.

Figura 1 – Evolução da Receita Total da CBF



Fonte: Demonstrações Financeiras da CBF – 2019.

Figura 2 – Evolução dos Investimentos da CBF no Futebol



Fonte: site da CBF (2020).

Ao somar os valores investidos nos últimos anos, o resultado é um montante superior a R\$ 1,37 bilhão aplicado no futebol nacional e, como consequência, uma repercussão positiva, visto que a evolução da receita total aumentou na mesma medida. Dentre esses investimentos, se encaixam todas as ferramentas necessárias para garantir que o esporte ocorra da maneira mais honesta possível.

2.1.1 Regulamentos do Futebol

Como comentado na seção 2.1 Futebol, as diferentes regras que surgiram nas escolas em que o futebol havia sido implementado, coagiram para que houvesse uma necessidade de unificação de seus regulamentos. Por conseguinte, no ano de 1863, representantes de clubes e escolas inglesas, se reuniram e criaram a *Football Association* (FA), que organizou e divulgou os primeiros regulamentos universais do esporte. Entretanto, em 1886, pelo fato de ainda haver algumas divergências, a FA e associações escocesas, irlandesas e galesas se uniram e criaram a *International Football Association Board* (IFAB), que até hoje é a instituição responsável pelo regulamento oficial do futebol.

Atualmente, a IFAB é constituída pelas 4 Federações europeias, juntamente com a *Fédération Internationale de Football Association* (FIFA), que é a instituição que

engloba as demais Federações mundiais e a única corporação autorizada a organizar um campeonato a nível internacional.

Segundo a própria IFAB, as regras do jogo mudaram, de forma significativa, até possuírem as características vigentes. Atualmente, conforme o banco de dados da IFAB, o regulamento é composto por 17 normas e uma, em especial ao propósito deste projeto, é a interpretação e determinação de posição de “Impedimento”.

2.1.2 Regra de Impedimento

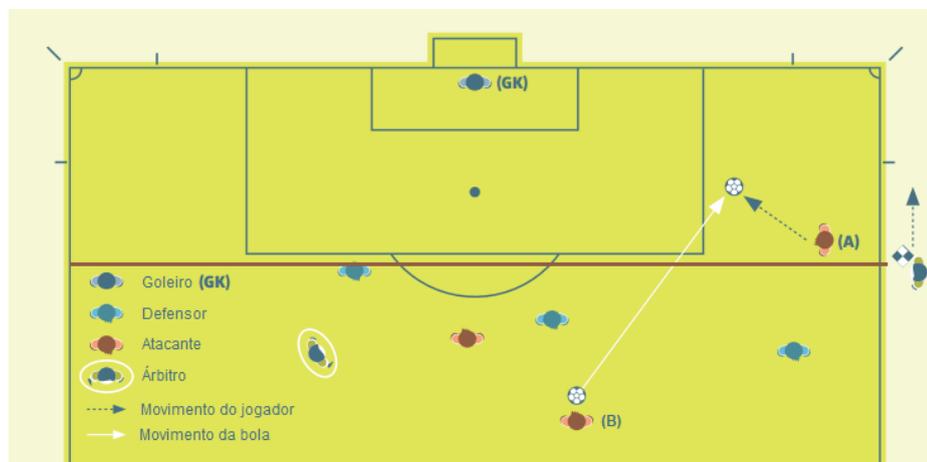
Por definição, conforme a IFAB (2019), a posição de impedimento é quando um jogador de determinada equipe está no campo adversário, ou seja, após a linha central, e “sua cabeça, tronco ou a perna, incluindo o pé, estão totais ou parcialmente mais próximos da linha de gol do que a bola e o último oponente.” Ainda nesse, os braços do jogador e o goleiro não são levados em consideração.

Contudo, um jogador estar em posição de impedimento não é avaliado como uma infração. Para que seja determinado a irregularidade, o atacante deve estar na posição, exatamente no mesmo momento em que a bola tocar ou for lançada por um membro da mesma equipe, e participar ativamente da jogada.

Segundo a IFAB (2019), participar ativamente do lance se refere aos atos de executar qualquer toque na bola, interferir o adversário, obstruindo o campo de visão ou o impedindo de se locomover até a bola, e tirar vantagem dessa posição, como por exemplo chutar uma bola rebatida na trave. Entretanto, há algumas exceções, como por exemplo receber a bola de um tiro de meta, de um escanteio ou de uma reposição na lateral.

A Figura 3 exemplifica a explicação de um lance de impedimento, onde é ilustrado a metade do campo da equipe defensora e o jogador (A) está posicionado após a linha imaginária vermelha, que representa a posição do último defensor, ou seja, a linha de impedimento, e recebe a bola do jogador (B). Sendo assim, o jogador (A) comete a infração de impedimento no momento em que participar ativamente da jogada (IFAB, 2019).

Figura 3 – Exemplo de infração por impedimento



Fonte: Adaptado das Regras Oficiais do Futebol – IFAB, 2019.

Ainda assim, a determinação de infração por impedimento é uma situação muito controversa no esporte. Existem muitos fatores que influenciam e dificultam a análise da jogada. A obstrução dos jogadores, as posições milimetricamente exatas, o exato momento em que o companheiro de equipe passa a bola e a interpretação se o jogador em posição de impedimento influenciou ou não a jogada são as principais discussões existentes e, mesmo com a utilização de tecnologias como o “Árbitro Assistente de Vídeo”, essa situação continua causando uma inquietação e influenciando no bem estar do jogo.

2.2 Árbitro Assistente de Vídeo (VAR)

Com o avanço da tecnologia, o futebol, assim como outros esportes, vem buscando diversos meios de inovação que os auxiliem para que cada partida ocorra da maneira mais justa possível conforme as suas regras. Nesse contexto, em 2018, a IFAB introduziu o *Video Assistant Referee* (VAR), Árbitro Assistente de Vídeo traduzido para o português, no regulamento oficial do jogo.

Por definição, o VAR é um árbitro de jogo que analisa a partida, enquanto ela ocorre, por diversas imagens. O VAR pode auxiliar o árbitro oficial presente a tomar uma decisão quando ele comete algum erro ou algum incidente grave é perdido. Contudo, o objetivo do VAR não é atuar em todos os casos e ter 100% de precisão em todas as decisões, mas sim, ter a menor interferência possível, a fim de evitar que

o esporte tenha o fluxo e emoções essenciais interrompidas devido as paradas na partida, e atuar apenas em determinadas situações de jogo (IFAB, 2019).

Sendo assim, são introduzidos os princípios básicos do protocolo do VAR, os incidentes em que a ferramenta pode atuar e, também, de que forma ele é utilizado durante uma partida. Além disso, a fim de introduzir conhecimentos sobre o principal sistema de análise constituído por este projeto, é explicada a metodologia das técnicas padrões da FIFA para a análise da *Virtual Offside Lines* (VOL), Linha Virtual de Impedimento traduzido para o português.

2.2.1 Princípios do VAR

Apesar do protocolo do VAR estar presente nos regulamentos oficiais do futebol, a sua aplicabilidade não é obrigatória durante as partidas. Ou seja, ele é um opcional para as competições e, além disso, o seu uso é permitido apenas quando o organizador da competição/partida cumpriu todos os requisitos do protocolo de implementação do VAR, conforme estabelecido no manual do VAR, e recebeu permissão por escrito da IFAB e da FIFA. Além disso, para utilização do VAR, deve-se aplicar 12 princípios (IFAB, 2019):

- a) um VAR é um oficial da partida, com acesso independente às imagens da partida, que pode auxiliar o árbitro apenas no caso de um “erro claro e óbvio” ou um “grave incidente ocorrido” em relação a:
 - gols e infrações que levam a um gol;
 - decisões de pênaltis e infrações que levam a pênaltis;
 - incidentes diretos de cartão vermelho;
 - identidade equivocada;
- b) o árbitro deve sempre tomar uma decisão, ou seja, o árbitro não tem permissão para “não tomar decisão” e utilizar o VAR para tomá-la; uma decisão de permitir que o jogo continue após uma suposta ofensa pode ser revisada também;
- c) a decisão original dada pelo árbitro não será alterada, a menos que a análise do vídeo mostre claramente que a decisão foi um “erro claro e óbvio”;
- d) somente o árbitro pode iniciar uma revisão; o VAR e os outros oficiais da partida podem apenas recomendar uma revisão ao árbitro;
- e) a decisão final é sempre tomada pelo árbitro, com base nas informações do

VAR ou após o árbitro realizar uma *on-field review* (OFR), revisão em campo traduzido para o português;

- f) não há limite de tempo para o processo de revisão, pois a precisão é mais importante que a velocidade;
- g) os jogadores e suas equipes técnicas não devem cercar o árbitro ou tentar influenciar durante o processo de revisão, a decisão final ou se uma situação deve ser revisada;
- h) o árbitro deve permanecer “visível” durante o processo de revisão para garantir a transparência;
- i) se o jogo continuar após um incidente que será revisto, qualquer ação disciplinar tomada/necessária durante o período pós-incidente não será cancelada, mesmo que a decisão original seja alterada (exceto uma advertência/expulsão por interromper um ataque promissor ou chance clara de gol);
- j) se o jogo parou e foi reiniciado, o árbitro não poderá realizar uma revisão, exceto em caso de identidade equivocada ou de possível expulsão relacionada a uma conduta violenta, como cuspir, morder ou realizar gesto(s) extremamente ofensivo(s), insultuoso(s) e/ou abusivo(s);
- k) o período de jogo antes e depois de um incidente revisado é determinado pelas regras do jogo e pelo protocolo VAR;
- l) como o VAR irá verificar automaticamente todas as situações/decisões, não há necessidade de treinadores ou jogadores solicitarem uma revisão.

2.2.2 Incidentes/situações de análise

Conforme citado na seção 2.2.1 Princípios do VAR, e pelo regulamento, o árbitro pode receber a assistência do VAR em apenas quatro categorias de incidentes de jogo. De forma elucida, essas situações que podem ser revisadas são:

- a) gols e infrações que levam a um gol:
 - infração cometida pela equipe atacante durante a jogada que levou ao gol ou no marcar o gol (mão na bola, falta, impedimento, etc.);
 - bola fora do jogo antes do gol;
 - decisões sobre atribuição de um gol (gol/não gol);
 - infração cometida pelo goleiro ou pelo batedor durante a execução de um

pênalti, ou ultrapassagem de um atacante ou defensor que participa diretamente do jogo se o pênalti rebater em uma trave, travessão ou no goleiro;

b) decisões de pênaltis e infrações que levam ao pênalti:

- infração cometida pela equipe atacante na jogada do incidente punível com um pênalti (mão na bola, falta, impedimento, etc.);
- bola fora de jogo antes do incidente;
- localização da infração (dentro ou fora da grande área);
- pênalti incorretamente concedido;
- infração de pênalti não penalizada;

c) incidentes diretos de cartão vermelho:

- evitar uma chance clara de gol (especialmente o lugar da falta e posição de outros jogadores);
- falta brusca e grave (ou disputa imprudente);
- conduta violenta, morder ou cuspir em outra pessoa;
- uso de gestos ofensivos, insultantes ou humilhantes;

d) identidade equivocada:

- se o árbitro penalizar uma infração e, em seguida, der ao jogador errado da equipe infratora (penalizada) um cartão amarelo ou vermelho, a identidade do infrator poderá ser revisada; a infração em si não pode ser revista, a menos que esteja relacionada a um gol, incidente de pênalti ou cartão vermelho direto.

2.2.3 Aspectos do VAR

Conforme citado na seção 2.2.1 Princípios do VAR, o protocolo da utilização do VAR está composto nas regras oficiais do futebol. De forma literal, o protocolo exige algumas disposições práticas para o bom funcionamento do VAR durante um jogo. Contudo, para um melhor entendimento desses aspectos práticos, são necessários alguns conhecimentos conceituais e específicos de termos que o constituem.

De acordo com a IFAB (2019), um dos requisitos, para as partidas que utilizam o VAR, é que devem haver um *Video Operation Room* (VOR) e pelo menos uma *Referee Review Area* (RRA), Sala de Operação de Vídeo e Área de Revisão do Árbitro

traduzidas para o português respectivamente.

A VOR é uma sala que pode estar situada no estádio, próximo ao estádio ou em um local distante, e onde o árbitro assistente de vídeo (VAR) e seus auxiliares realizam toda a análise das imagens em tempo real. Já a RRA, é um local claramente marcado e visível, fora das linhas que demarcam o campo de jogo, onde o árbitro da partida faz a revisão em campo (OFR). Os dois espaços são áreas restritas, e caso qualquer jogador ou integrante das comissões técnicas acessem o local, serão advertidos (IFAB, 2019).

Sendo assim, conforme o regulamento, o uso do VAR durante uma partida envolve os seguintes aspectos práticos:

- a) O VAR assiste a partida na sala de operação de vídeo (VOR), juntamente com um assistente do VAR (AVAR) e operador de replay (RO);
- b) Dependendo do número de ângulos da câmera (e outras considerações), pode haver mais de um AVAR ou RO;
- c) Somente pessoas autorizadas podem entrar no VOR ou se comunicar com o VAR/AVAR/RO durante a partida;
- d) O VAR tem acesso independente à reprodução de imagens de transmissão de TV e controle sobre elas;
- e) O VAR está conectado ao sistema de comunicação usado pelos árbitros e pode ouvir tudo o que eles dizem; o VAR só pode falar com o árbitro pressionando um botão (para evitar que o árbitro se distraia com as conversas na VOR);
- f) Se o VAR estiver ocupado com uma 'verificação' ou uma 'revisão', o AVAR poderá falar com o árbitro, especialmente se o jogo precisar ser interrompido ou para garantir que o jogo não seja reiniciado;
- g) Se o árbitro decidir visualizar uma reprodução, o VAR selecionará a velocidade e ângulo mais apropriados; o árbitro pode solicitar outros ângulos e velocidades adicionais ou alternativas.

Além disso, segundo a FIFA (2018), em cada partida, um de seus membros fica situado na VOR e, utilizando um tablet e um sistema de informações desenvolvido por ela, informa as emissoras, comentaristas e outros meios sobre o acionamento da revisão pelo VAR, incluindo informações sobre o motivo da revisão e o resultado, com o intuito de garantir que todos os fãs de futebol no estádio e os que estão assistindo na TV sejam bem informados do que está acontecendo durante um processo.

Contudo, a IFAB (2019) ainda ressalta que qualquer mau funcionamento na tecnologia utilizada pelo VAR, qualquer decisão errada dos participantes envolvidos durante uma revisão, a decisão de não revisar e revisar uma situação em que não há necessidade, não irá invalidar a partida.

A Copa do Mundo FIFA 2018 foi o primeiro campeonato totalmente assistido pelo VAR. Na Figura 4 é apresentado a VOR, que ficou localizada em Moscou, Rússia, e a equipe do VAR, que contava com um árbitro principal, 3 árbitros assistentes (AVAR1, AVAR2 e AVAR3) e mais quatro operadores de replay (OR) (FIFA, 2018).

Figura 4 – VAR e equipe na VOR da Copa do Mundo FIFA 2018, Rússia



Fonte: site da FIFA (2018).

Na competição, dentre os assistentes, o AVAR2 era o responsável por antecipar e verificar todas as possíveis situações de impedimento e, assim, facilitar a análise do VAR (FIFA, 2018).

2.2.4 Linha virtual de impedimento (VOL)

Conforme citado na seção 2.2.2 Incidentes/situações de análise e pelo regulamento, quando uma equipe realiza um gol e há uma suspeita de impedimento, no caso uma irregularidade que poderia anular o gol, o VAR pode acionar o árbitro

para que ele reveja o lance e decidir se o evento é legítimo ou não. Para isto, o VAR precisa demonstrar claramente, e de modo confiável, as imagens a serem analisadas e interpretadas pelo árbitro, para que não ocorra nenhum tipo de injustiça com qualquer uma das equipes. Sendo assim, a tecnologia do árbitro assistente de vídeo é composta por um método de análise baseado em *Virtual Offside Line* (VOL), traduzido para o português como Linha Virtual de Impedimento.

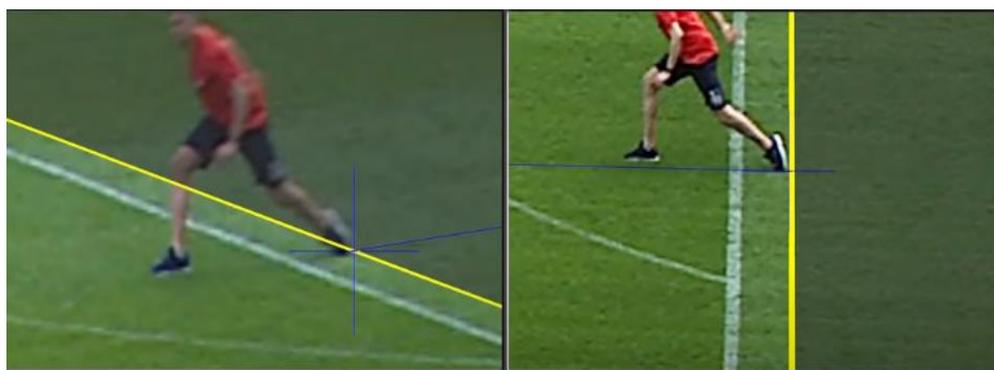
Segundo a FIFA (2018), uma VOL é uma linha sobreposta, graficamente, em uma imagem capturada do campo, para representar a posição relativa dos jogadores e, assim, determinar qual atleta está na posição de impedimento conforme as regras do jogo. Entretanto, a ideia da análise já era alvo de estudos nas últimas décadas, e pesquisas realizadas pela FIFA, entre 2016 e 2019, mostraram que os erros mais frequentes e as maiores dificuldades encontradas pelos desenvolvedores, em relação as linhas virtuais, são: a topografia do campo, particularmente a curvatura do campo; a distorção do ângulo da câmera; a obstrução dos jogadores; e a questão do rastreamento de partes individuais de cada corpo.

Ainda assim, a tecnologia que é utilizada pelo VAR durante as partidas foi desenvolvida por empresas terceiras e, nesse contexto, a FIFA formalizou um manual de testes e avaliações dos métodos de VOL. Os objetivos da análise são de determinar a precisão e a repetibilidade de cada fornecedor e, conforme o protocolo, a avaliação é efetuada em duas etapas de testes distintos. Contudo, a verificação dos sistemas deve ser realizada em dois estádios separados e, para obter a certificação, o projeto deve ser aprovado nos dois locais (FIFA, 2019).

A primeira etapa dos testes é baseada na competência do sistema em verificar a posição de um objeto no plano bidimensional, em perspectiva reduzida, e a capacidade do algoritmo de sobrepor corretamente, na imagem, uma linha de impedimento conforme as características do campo e a angulação da câmera. Na Figura 5, podemos observar um exemplo da análise, onde após ser identificado, manualmente, a última parte do corpo do participante, uma linha amarela é traçada automaticamente e paralelamente a linha de fundo. A segunda parte é um pouco parecida com a primeira, entretanto, são utilizados ângulos de câmeras mais estreitos e o objeto em análise fica suspenso no ar, a fim de avaliar a calibração e aptidão do sistema em identificar o local exato, em várias câmeras, em espaço tridimensional. A Figura 6, ilustra um exemplo da apuração, onde após selecionar manualmente o objeto em análise, são tracejadas, automaticamente, uma linha amarela

perpendicularmente ao plano e uma linha paralela a linha de fundo. Com isso, é apurado, de fato, uma situação mais parecida com a que acontece durante uma partida e possíveis casos específicos, como por exemplo, a obstrução dos jogadores (FIFA, 2019).

Figura 5 – Teste de VOL em plano bidimensional



Fonte: site da FIFA (2018).

Figura 6 – Teste de VOL em espaço tridimensional



Fonte: site da FIFA (2018).

Na prática, quando o VAR tem uma suspeita da irregularidade, a verificação é executada conforme os métodos de validação citados. Ademais, pelas dificuldades já mencionadas, o VAR analisa a jogada de vários ângulos e marca de forma manual a posição dos jogadores envolvidos, primeiramente no plano 2D e, caso haja necessidade, no espaço 3D. Diferentemente do projeto apresentado por este

documento, onde é proposto o rastreamento do último jogador da equipe que está defendendo no momento, sem contar com o goleiro, e do atacante adversário, para demarcar automaticamente as suas posições em campo, para que, assim, possa diminuir o tempo de verificação da situação.

A FIFA (2019) entende que apesar do avanço tecnológico, os métodos/técnicas atuais e os equipamentos disponíveis ainda possuem algumas limitações quanto a geração de uma VOL e, nesse contexto, consideraram um grau de erro ao avaliarem os requisitos. Eles ainda afirmam: “a sobreposição de imagens e detecção de pontos exatos, mesmo em imagens de alta resolução, pode ter um certo grau de incerteza, dependendo do pixel selecionado.” (FIFA, 2019, p. 2, tradução autoral).

2.3 Estado da Arte

Antes mesmo do protocolo do VAR ser introduzido nas regras oficiais do futebol, e a sua tecnologia ser implementada nas partidas, o interesse em estudos sobre análises de cenas no esporte cresceu nas últimas décadas, à medida que o avanço da tecnologia facilitou. Nesse contexto, para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados alguns artigos científicos como fundamentação teórica. Ao longo do capítulo, são demonstrados resumos de cinco artigos que sintetizam técnicas e análises relacionadas com a proposta.

Em artigo publicado no IEEE, Jiang *et al.* (2010) relatam que rastrear uma bola de futebol, durante uma partida, era uma tarefa muito difícil na época, pois o seu pequeno tamanho nas imagens e as mudanças bruscas de movimento adicionavam grandes complexidades à análise. Nesse sentido, os autores projetaram um sistema capaz de localizar e rastrear a bola em tempo real de jogo. O algoritmo desenvolvido foi baseado na ideia de capturar um vídeo, calcular a média das imagens, conforme atualização, para criar um plano de fundo, transformar a imagem em uma escala de cinza e logo após em elementos apenas em preto e branco e subtrair o quadro atual do plano de fundo gerado e, assim, detectar um objeto em movimento.

É notório o conhecimento da técnica que foi utilizada por Jiang *et al.* (2010), visto que é um método utilizado até os dias de hoje em programas para detecção de movimento de objetos. Além disso, os autores ainda apontam que os dados resultantes de seus algoritmos podem ser implementados em um sistema para controlar uma câmera que transmita, ou grave, a partida, uma vez que o projeto é

capaz de estimar onde a bola estará localizada nos próximos quadros consecutivos (JIANG *et al.*, 2010).

Em outro artigo publicado na conferência anual de pesquisa da *South African Institute of Computer Scientists and Information Technologists* (SAICSIT), Naidoo e Tapamo (2006, p. 51, tradução autoral) descrevem que “detectar e rastrear objetos em movimento são duas das etapas mais fundamentais envolvidas nas análises de vídeos esportivos” e, também, os autores (Moor *et al.*, 1998, *apud* NAIDOO; TAPAMO, 2006, p. 51, tradução autoral) citam que “uma das principais vantagens do processamento de imagens à outras técnicas, quando se trata de rastreamento de objetos, é que ele não é invasivo”, ou seja, não há necessidade de implementar nenhum outro tipo de sistema físico no objeto em análise.

Ainda neste, Naidoo e Tapamo (2006) utilizaram três tipos de vídeos, cada um com uma angulação específica, e desenvolveram um algoritmo computacionalmente eficiente, para a época e em linguagem de programação C++, para detectar e rastrear uma bola de futebol, os jogadores e árbitros, além disso, propuseram um método de detecção automática de impedimentos. Como resultado, Naidoo e Tapamo (2006) conseguiram satisfatoriamente uma análise em tempo real com desempenho de 4 frames por segundo (fps) para uma exibição completa e 16 fps para exibição apenas de resultados. As técnicas de extração do campo, aplicação da transformada Hough para detecção de linhas, entre outras, utilizadas pelos autores, estão presente em demais artigos de análises de situações similares e, principalmente, neste projeto proposto.

Em outra publicação no IEEE, apoiada pela Federação Italiana de Futebol, D’Orazio *et al.* (2009) investigaram a viabilidade de um sistema com exatamente seis câmeras, dispostas em locais diferentes de um campo de futebol, para realizar uma detecção, em tempo real, dos jogadores e bola e, assim, determinar automaticamente uma situação de impedimento e atuar como uma ferramenta de apoio aos árbitros.

O sistema proposto por D’Orazio *et al.* (2009), foi de notável importância, pois foi validado na série A do campeonato italiano de 2006-2007 e apresentou originalidade em métodos de tratamento de imagens. As principais novidades se deram pelas técnicas de detecção de jogadores e bola através da subtração de segundo plano por meio de energias locais, a diferenciação das cores das equipes por um algoritmo de aglomeração e, por meio da detecção da bola, reconhecer quando um passe é efetuado.

Outro artigo, onde os autores também propõem um sistema automático de julgamento de situações de impedimento nos jogos de futebol, é o publicado no IEEE por Hashimoto e Ozawa (2006). Entretanto, a proposta de hardware para rastrear os jogadores em campo difere da apresentada por D’Orazio *et al.* (2009), pelo fato de que Hashimoto e Ozawa (2006) utilizarem cerca de 16 câmeras fixas e espalhadas nos dois lados do campo, ao invés de 6, para cobrir a maior área possível e evitar qualquer tipo de obstrução dos jogadores, que segundo os autores é a principal dificuldade das análises das condições de impedimento.

Na visão geral do sistema, o algoritmo é desenvolvido pelo método de detecção da bola por coordenadas 3D e suas relações espaciais com os jogadores, a técnica de cálculo da linha de impedimento, com base no rastreamento homográfico e classificação dos jogadores e, por fim, na integração dos resultados das duas etapas para determinar se de fato houve o impedimento. (HASHIMOTO; OSAWA, 2006).

A Figura 7 demonstra a resposta da construção homográfica feita pela análise das 16 câmeras do sistema projetado pelos autores Hashimoto e Ozawa (2006), onde os pontos amarelos representam uma equipe, os pontos azul-escuros outra equipe, a bola é ilustrada pelo ponto branco e os juizes pelo ponto azul-claro. Na situação é traçado uma linha de impedimento amarela e verificado que os atacantes de azul-escuros estão em posição legal.

Figura 7 – Resultado homográfico das análises de Hashimoto e Osawa

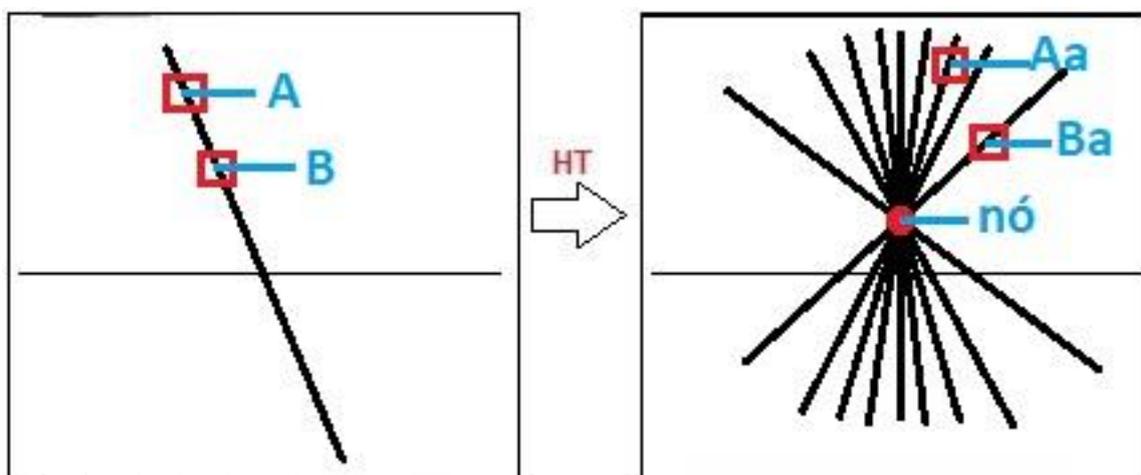


Fonte: (HASHIMOTO; OSAWA, 2006).

Em média, os artigos relacionados a uma análise de situações de impedimento em jogos de futebol e o desenvolvimento de um algoritmo que construa, no plano, uma linha virtual dessa circunstância, utiliza uma técnica baseada na Transformada de Hough (HT). Por definição, conforme Hough (1962), a HT é uma técnica para a detecção de características analíticas, linhas, círculos, em imagens binarizadas.

Historicamente, o método foi criado por Paul Hough (1962) e patenteado pela *International Business Machines Corporation* (IBM). Segundo Hough (1962), ao aplicar a HT em um segmento de reta, cada um dos pontos deste segmento possui uma representação de uma linha no plano da transformada e, ainda neste, se uma série de pontos fazem parte de um segmento de reta, suas respectivas representações no plano da transformada se cruzam em um ponto, denominado de “nó”, que representa este segmento. Na Figura 8, é exemplificado um segmento de reta com os pontos A e B e, após ser aplicado a HT, suas representações no plano da transformada e o ponto de interseção que representa a reta que passa pelos 2 pontos.

Figura 8 – Representação do plano da Transformada de Hough



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nesse contexto, originalmente, Hough (1962) utilizava parametrizações baseadas em coordenadas cartesianas e a equação da reta (1), onde m é o coeficiente angular (inclinação), b o coeficiente linear (intersecção) e x e y os valores dos pontos no plano. Entretanto, Duda e Hart (1972) verificaram que o método apresentava problemas ao detectar linhas verticais, devido ao crescimento ilimitado do coeficiente angular da reta. Nesse sentido, Duda e Hart (1972) propuseram a utilização da

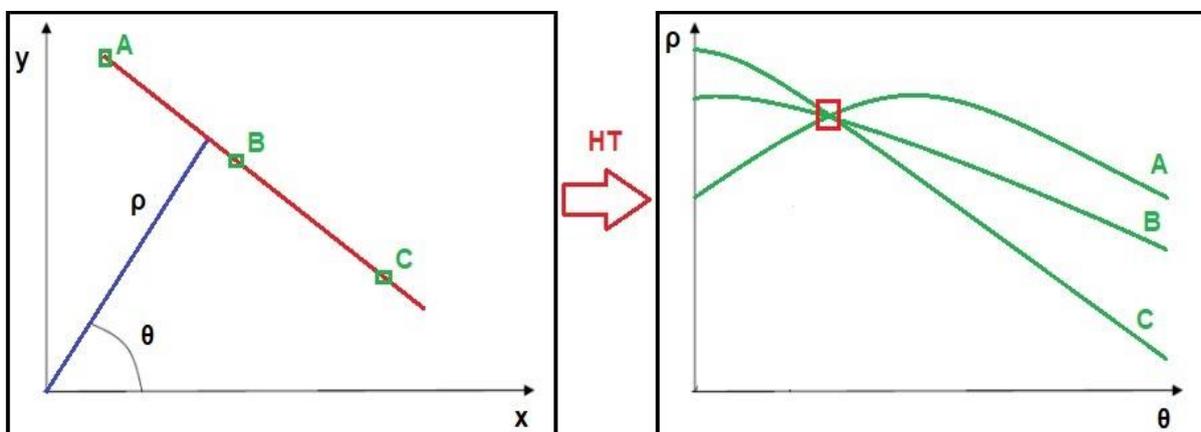
parametrização através de coordenadas polares, por meio da equação (2), onde ρ é a distância da reta até a origem e θ é o ângulo formado entre a normal dessa reta e o eixo x , que são especificações utilizadas até hoje para a técnica.

$$y = mx + b \quad (1)$$

$$\rho = x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta \quad (2)$$

De tal forma, ao ser aplicada em uma imagem, para cada pixel na posição (x_n, y_n) da imagem, uma matriz acumuladora é formada na representação de uma função senoidal, no plano da transformada, de modo que uma linha pode ser identificada conforme as intersecções (nós) das curvas de cada ponto. Na Figura 9, é apresentado a exibição de uma reta com coordenadas polares e a representação no plano da transformada.

Figura 9 – Representação de uma reta em coordenadas polares e no plano da Transformada de Hough



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nesse contexto, em linguagem de programação, a Transformada de Hough se tornou uma ferramenta popular para detectar linhas em imagens. Entretanto, o método é bastante lento para ser usado em tempo real e existem técnicas mais rápidas. Um exemplo, é o método de detecção de linhas por coordenadas paralelas “PClines” (DUBSKÁ *et al.*, 2012).

Sendo assim, em artigo publicado na Springer, Dubská *et al.* (2012) elaboraram

um algoritmo baseado na parametrização PClines, para detectar linhas em tempo real e, também, utilizaram a *engine Compute Unified Device Architecture (CUDA)*, desenvolvida pela Nvidia para usar todo o poder de processamento de uma placa de vídeo, para comparar a performance do método desenvolvido com diversos outros hardwares computacionais.

Como resultado, Dubska *et al.* (2012), concluíram que o algoritmo é eficiente como método de detecção de linhas e adequado para sistemas computacionais com processadores gráficos atuais, mesmo analisando imagens de alta resolução. Também, descrevem que, para imagens de baixa resolução, o algoritmo pode ser utilizado em dispositivos embarcados e de baixo consumo de energia.

Nesse contexto, a adequação do método PClines, é um ponto interessante de análise para a criação de linhas virtuais em situações de impedimento no futebol. À vista disso, a técnica é implementada no projeto proposto e no próximo capítulo é explicado a sua parametrização, assim como demonstrado a funcionabilidade dos demais algoritmos utilizados para o desenvolvimento da ferramenta.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do sistema proposto de linhas virtuais para análise gráfica em situações de impedimento nos jogos de futebol, é utilizado a linguagem de programação Python e a biblioteca de técnicas de processamento digital de sinais por tratamento de imagens *Open Source Computer Vision Library* (OpenCV). Além disso, o algoritmo é compilado no software *Spyder*, um *Integrated Development Environment* (IDE), ambiente de desenvolvimento integrado traduzido para o português, e também uma plataforma de programação em Python (SPYDER, 2018).

O arquivo utilizado como dado de entrada, para a análise do sistema, é um vídeo extraído da última partida do Campeonato Brasileiro de Futebol do ano de 2020, entre os Sport Club Internacional e o Sport Club Corinthians Paulista. Na figura 10, é apresentado o primeiro frame do vídeo, onde, no lance, a equipe do Internacional está realizando um ataque e, em determinado momento, um de seus jogadores está em posição irregular ao receber a bola de um cruzamento, finalizando a jogada com um gol.

Figura 10 – Início do lance de impedimento como entrada do sistema



Fonte: Internacional x Corinthians, Brasileirão 2020, transmitido pela Rede Globo.

Ao longo deste capítulo, são apresentadas as etapas e as técnicas utilizadas para o desenvolvimento e análise do sistema, conforme a Tabela 1, assim como os fluxogramas da metodologia e aplicação e, também, as respostas obtidas conforme o processamento de cada passo.

Tabela 1 – Etapas do projeto

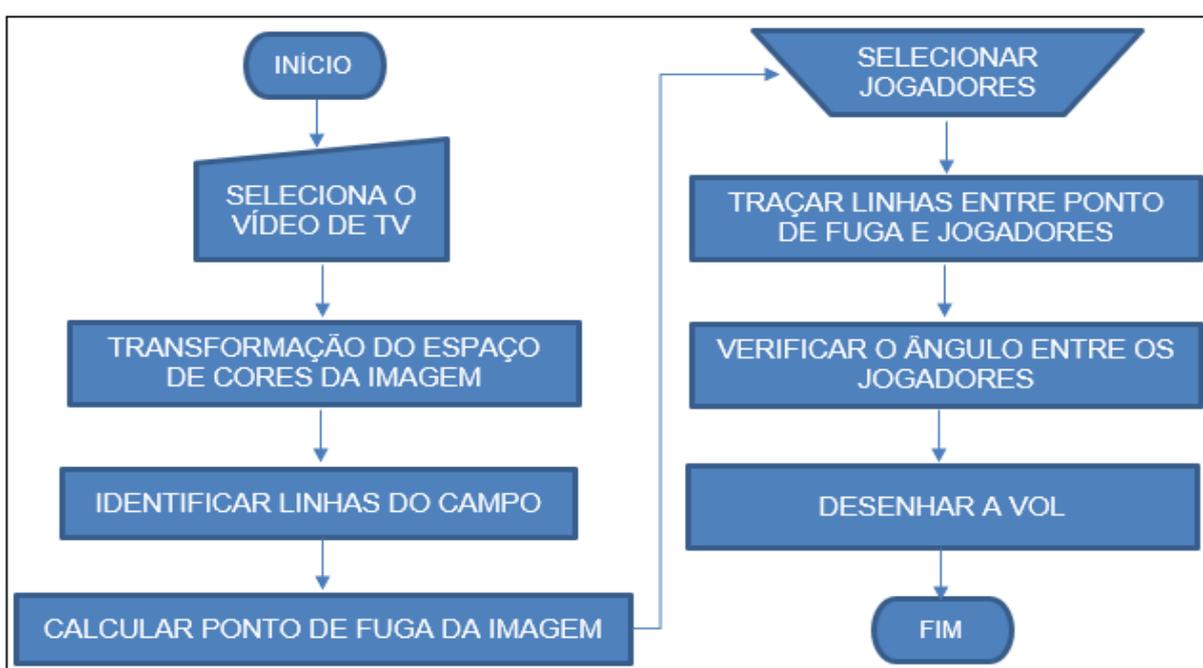
Etapas	Descrição	Ações
Etapa 1	Identificação das linhas paralelas a linha de fundo do campo	Determinação da área do jogo; Detecção das linhas do campo;
Etapa 2	Identificação do Ponto de Fuga da imagem	Cálculo do Ponto de Fuga;
Etapa 3	Identificação dos jogadores	Marcação dos jogadores;
Etapa 4	Desenhar a linha virtual de Impedimento	Demarcação da linha virtual de impedimento na imagem;

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1 Fluxogramas

Para um melhor entendimento das etapas do projeto, é apresentado na Figura 11 um fluxograma que representa o passo a passo do funcionamento da metodologia do sistema projetado.

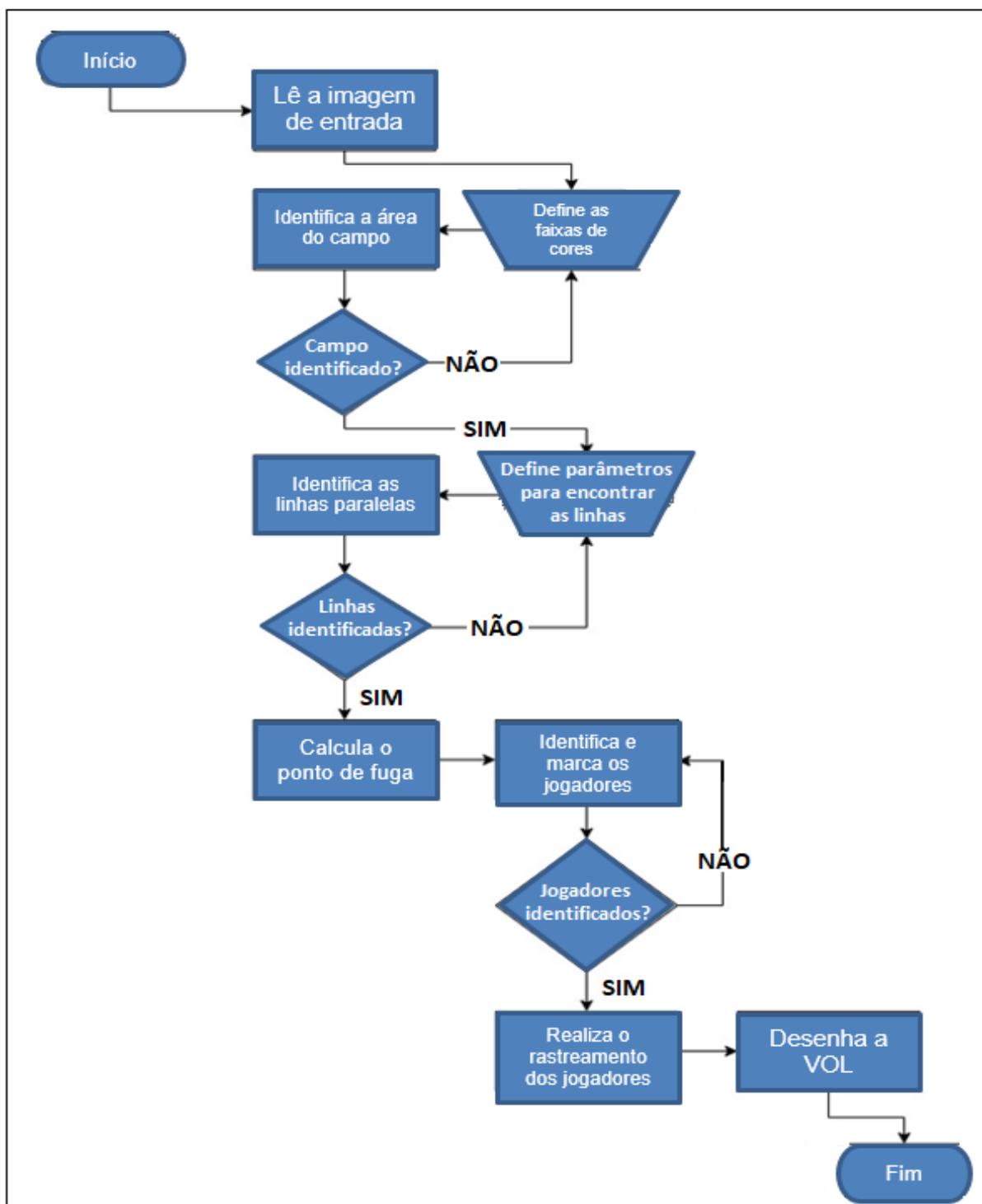
Figura 11 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Da mesma forma, para um entendimento do funcionamento do algoritmo, é apresentado na Figura 12 um fluxograma que representa a estrutura da programação do sistema.

Figura 12 – Fluxograma da aplicação



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2 Identificação das linhas paralelas a linha de fundo do campo

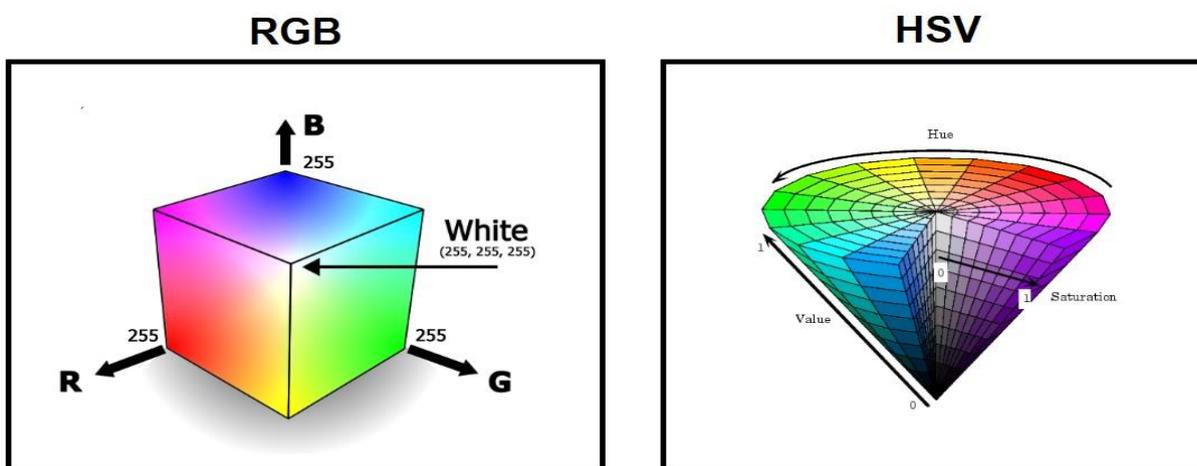
Como citado na seção 2.2.4 Linha virtual de impedimento (VOL), uma VOL é a representação gráfica, no plano do campo de futebol, de uma linha, paralela a linha de fundo, que marca a posição do último jogador de uma equipe em seu campo de defesa. Com isso, para poder futuramente traçar uma VOL, primeiramente é necessário identificar o campo e suas marcações dentro da imagem que serve como dado de entrada.

3.2.1 Determinação da área do jogo

Ao analisar a imagem de entrada, pelo fato de ter sido retirada de uma transmissão televisiva, a imagem apresenta outras informações do lugar como, por exemplo, os torcedores e outras áreas. Ainda nesse, conforme a IFAB (2019), o campo de jogo deve ser natural ou artificial, necessariamente de cor predominantemente verde. Sendo assim, para poder identificar a região de análise, é necessário separar o campo das demais áreas.

Nesse contexto, primeiramente, é mudado o “espaço de cores” da imagem. Por padrão, a biblioteca do OpenCV trabalha com o sistema *Red, Green and Blue* (RGB) e, à vista disso, a imagem é transformada para o sistema *Hue, Saturation e Value* (HSV), que possui uma maior abrangência sobre as cores do espectro do campo. Na Figura 13, é apresentado a representação dos espaços de cores RGB e HSV.

Figura 13 – Representação dos espaços de cores RGB e HSV



Fonte: Adaptado de Cunha (2016)

A conversão do espaço de cores de uma imagem facilita a identificação de determinados objetos, pois intensifica determinadas informações que no espaço original são pouco destacadas. Nesse sentido, na Figura 14 é apresentado a imagem convertida do sistema RGB para o HSV, que ao realizar testes práticos, apresentou os melhores resultados para a identificação do campo.

Figura 14 – Imagem de entrada no sistema HSV



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em seguida, é convertido a imagem da Figura 14 em tons de cinza. Ou seja, é transformada a imagem do espaço HSV para uma imagem monocromática, com uma camada de informação apenas. Sendo assim, é definido um intervalo de valores que representam as faixas de cores do espectro verde, em que o campo de futebol se encontra, no sistema HSV correlacionando com os valores da imagem em tons de cinza. Posteriormente, para realizar a extração do campo, é utilizado uma técnica chamada *thresholding*.

A técnica de *thresholding*, também chamada de limiarização, utiliza uma imagem em tons de cinza e classifica seus pixels de modo que separe o fundo a uma característica específica da imagem. Para isso, compara todos os pixels da imagem original com um critério de seleção T , e os altera conforme for parametrizado esse critério (OPENCV, 2013). Nesse sentido, conforme (3), seja $F(x, y)$ uma imagem em tons de cinza e cada pixel da imagem caracterizado por $F(x_i, y_i)$, é aderido o valor máximo de 255 para os pixels com valor de intensidade maior ou igual ao critério de

seleção T estabelecido, e o valor 0 caso contrário.

$$F(x_i, y_i) = \begin{cases} 255, & \text{se } F(x_i, y_i) \geq T \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

Como resultado, obtém-se uma imagem binária, na qual os pixels do local onde encontram-se a linha, ou objeto, que se deseja identificar são realçados em branco e as demais áreas com a cor preta, criando, assim, uma “máscara” da região. Na Figura 15, é apresentado a máscara gerada pela função de *thresholding*, aplicada conforme a parametrização da faixa de cor verde para a detecção do campo.

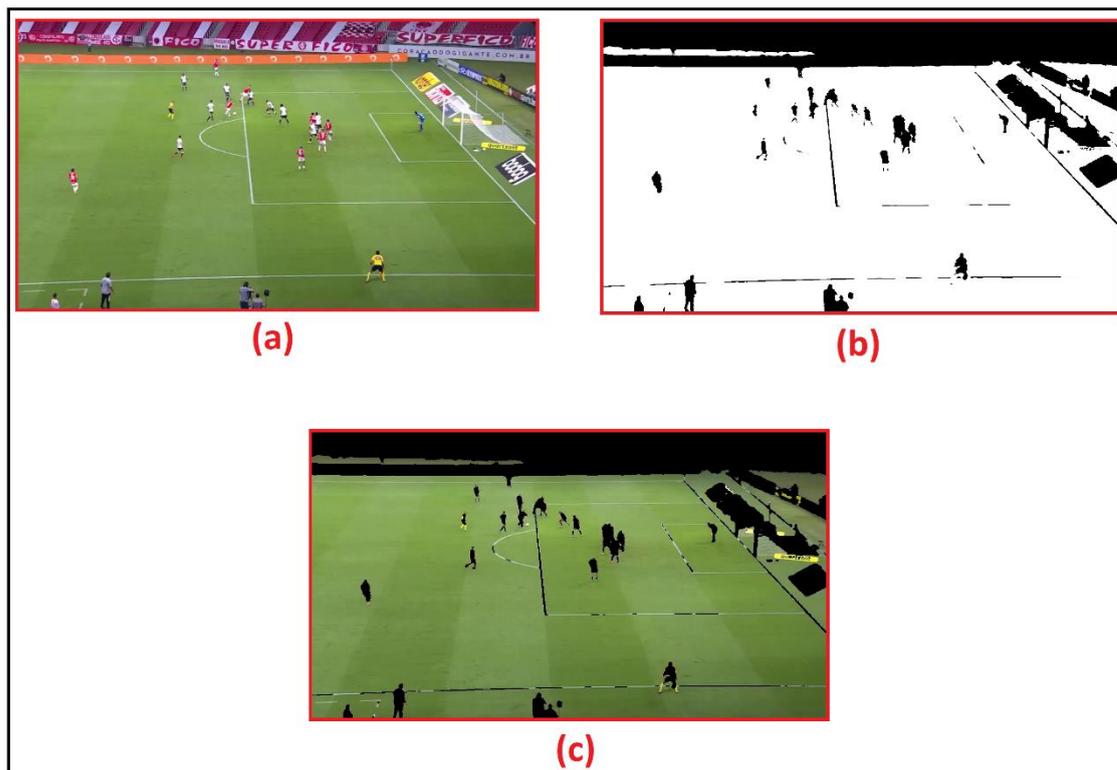
Figura 15 – Máscara da área do campo



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Assim sendo, para a demonstração do campo, é utilizado a função “*bitwise_and*”, que recebe, como entrada, a imagem principal e aplica a máscara criada pelo *thresholding*, comparando bit a bit os dois parâmetros e tendo, como resultado, uma imagem colorida apenas dentro dos intervalos definidos. Na Figura 16, é apresentado a imagem de entrada (a), a máscara aplicada (b) e como fica a imagem de saída da função *bitwise_and* (c).

Figura 16 – Imagem demonstrando a área de jogo



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como pode ser visualizado na Figura 16 (c), há uma redução da influência de pixels indesejados na parte superior da imagem, resultando, superficialmente, uma imagem apenas da área de jogo. Desse modo, auxilia para que o método de detecção de linhas identifique as linhas que limitam o campo.

3.2.2 Detecção das linhas do campo

Após ter eliminado as zonas que não são interessantes para o desenvolvimento do projeto, aplica-se um operador *Sobel* para realçar as linhas mais verticais possíveis, ou seja, aquelas que se aproximam do paralelismo com a linha de fundo do campo. Por fim, para identificar essas linhas, são necessárias mais duas funções: o *Canny Edge detector* e o detector de linhas baseado no PClines de Dubska *et al.* (2012).

Conforme a documentação do OpenCV (2013), o operador *Sobel* é uma função conjunta de suavização e diferenciação Gaussiana. Primeiramente, o algoritmo filtra possíveis ruídos na imagem e, em seguida, são aplicadas convoluções nas direções

horizontais (x) e verticais (y), onde com o resultado encontramos o gradiente de intensidade e a direção das bordas de cada pixel, conforme as equações (4) e (5), respectivamente. A vantagem de utilizar este operador, é que se pode especificar a direção das derivadas a serem tomadas, vertical ou horizontal, conforme parametrização de ordem y e ordem x , respectivamente (OPENCV, 2013).

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (4)$$

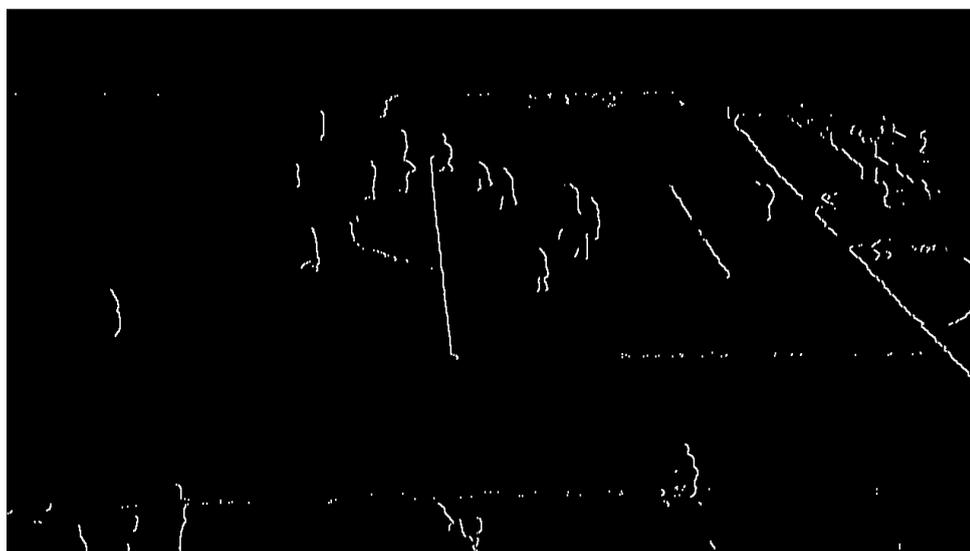
$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (5)$$

Onde:

- G_x, G_y = gradiente nos pontos x e y .
- G = magnitude pixels
- θ = direção da normal de cada pixel

Na Figura 17, é demonstrado o resultado da função, aplicada após ter mudado a escala de cores (Figura 16 (c)) para uma escala de cinza, da mesma forma utilizada na seção 3.2.1 Determinação da área do jogo, onde se pode notar a predominância de linhas verticais.

Figura 17 – Resultado da função Sobel

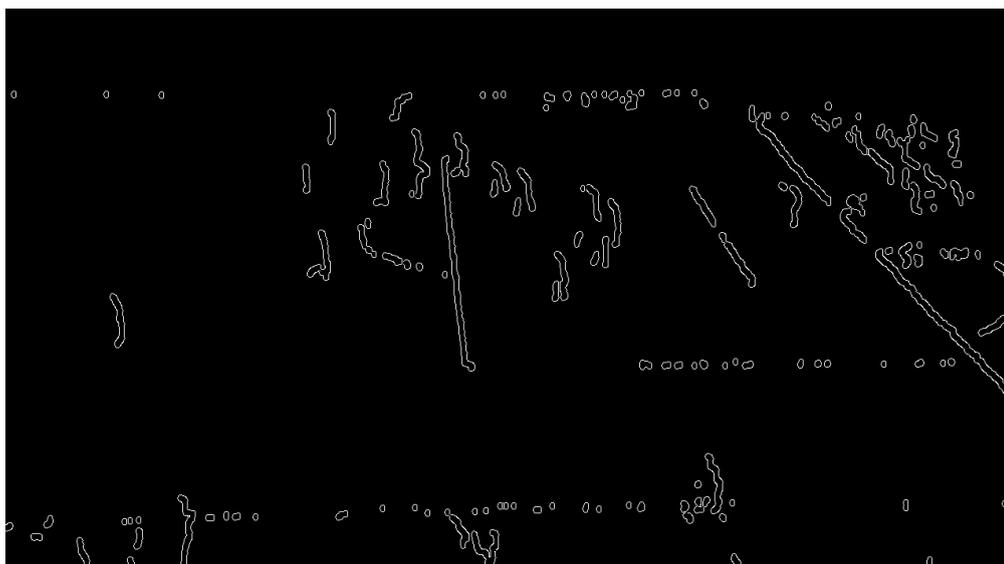


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Já o *Canny Edge detector*, detector de Bordas Canny traduzido para o português, segundo o OpenCV (2013), foi desenvolvido por John F. Canny em 1986, e visa, matematicamente, detectar possíveis arestas existentes em uma imagem. Na primeira etapa do método, é utilizado um filtro Gaussiano também, da mesma forma que o *Sobel* e, no próximo passo, após verificado os valores dos gradientes da imagem, é aplicado uma “supressão não máxima”, ou seja, é realizada uma varredura na imagem e em cada pixel é verificado se é um valor máximo de gradiente com o seu pixel vizinho. Assim, caso não sejam, esses pixels não são considerados como uma borda e são suprimidos.

Por fim, ainda é utilizado um operador de corte com dois valores limites, um máximo e um mínimo, para reduzir os pontos falsos. Se o gradiente do pixel for maior que o valor máximo ele é considerado como uma borda, se estiver abaixo do valor mínimo ele é descartado, e se estiver entre máximo e mínimo ele será considerado apenas se estiver conectado com um outro pixel de valor acima do máximo, resultando uma imagem binária com bordas finas apenas (OPENCV, 2013). Na Figura 18, é apresentado a resposta da aplicação da função *Canny* na imagem da Figura 17.

Figura 18 – Resposta da função de detector de Bordas Canny

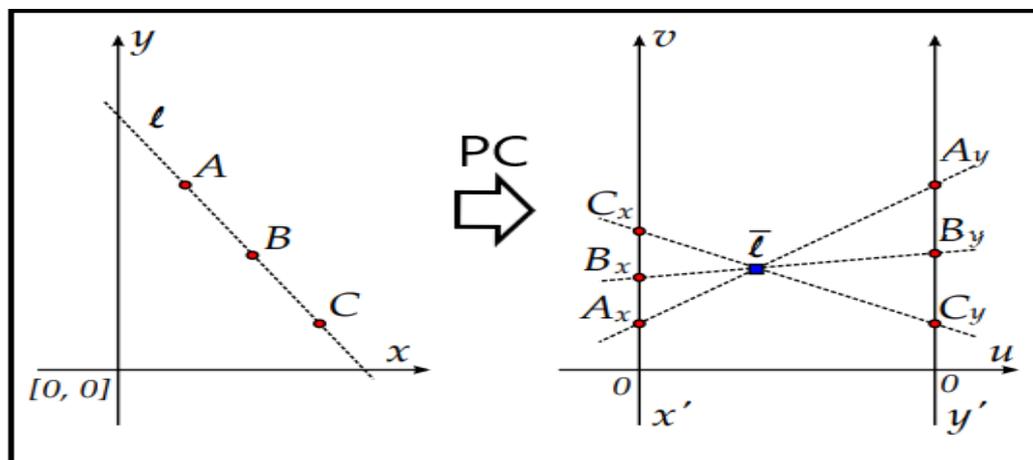


Fonte: Elaborado pelo Autor.

O último estágio é a utilização do método de detecção de linhas baseado em coordenadas paralelas, PClines, que, como citado na seção 2.3 Estado da arte, é uma

ferramenta de análise mais rápida do que a popular Transformada de Hough. Teoricamente, o sistema de coordenadas paralelas, segundo Dubská *et al.* (2012), representa o espaço vetorial, por eixos que são mutuamente paralelos, em um plano euclidiano, com um sistema de coordenadas cartesianas $u - v$, para definir posições de pontos no espaço de coordenadas paralelas. Ou seja, cada vetor em um determinado espaço vetorial N -dimensional é representado por exatamente $N - 1$ linhas conectando os eixos no sistema de coordenadas. De tal forma, no caso bidimensional, por exemplo, os pontos no espaço $x - y$ são representados como linhas, no espaço das coordenadas paralelas, entre os eixos x' e y' , e representações colineares se cruzam em um único ponto. Assim, é possível definir um mapeamento entre o espaço $x - y$ original e o espaço $u - v$ das coordenadas paralelas (DUBSKÁ *et al.*, 2012). Na Figura 19, esquerda, é exemplificado um segmento de reta ℓ , com três pontos colineares no plano cartesiano, e a direita o espaço das coordenadas paralelas, onde a linha ℓ é representada pelo ponto $\bar{\ell}$.

Figura 19 – Representação do plano de coordenadas paralelas



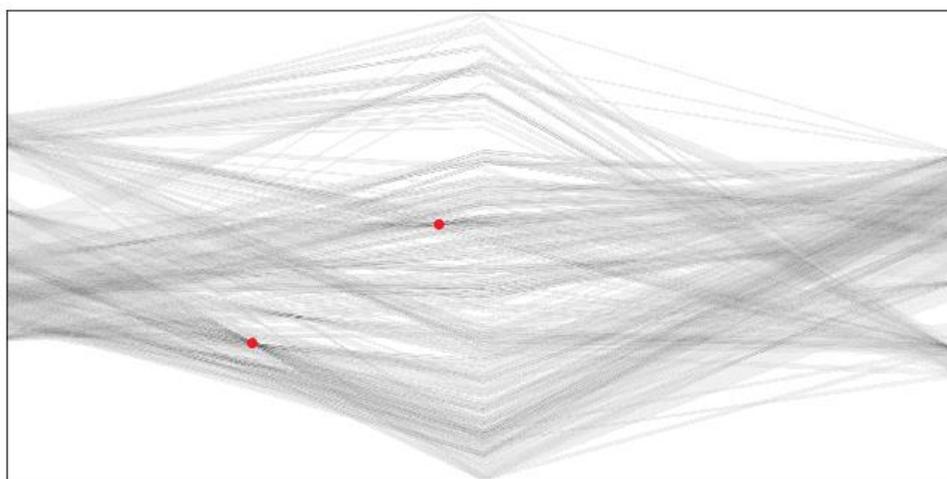
Fonte: Adaptado de Dubská *et al.* (2012).

Nesse contexto, além do espaço de coordenadas paralelas x' , y' (também referido como "*straight*" (S), ou "reto" traduzido para o português), os autores Dubská *et al.* (2012), propuseram o uso de um sistema "*twisted*" (T), "torcido" traduzido para o português, x' , $-y'$, que é idêntico ao espaço reto, exceto que o eixo y está invertido, e por fim, combina os dois espaços, reto e torcido, construindo o plano TS. Sendo assim, para detectar as linhas na imagem, no algoritmo do PClines, duas linhas são

rasterizadas para cada pixel de entrada: uma analisando o espaço reto S , uma analisando o espaço torcido TS .

Após rastrear todos os pontos, o algoritmo identifica quais são os locais de máxima, ou seja, onde tem mais intersecções de linhas, e define a região como uma possível linha no plano original. Por fim, as coordenadas horizontais dos pontos finais das linhas, no sistema de coordenadas paralelas, são fixas e as coordenadas verticais são diretamente as coordenadas x , y e $-y$ do ponto original. Na Figura 20, é apresentado o espaço de coordenadas paralelas, obtido conforme a parametrização utilizada para a detecção de linhas da imagem de entrada do sistema, com pontos vermelhos representando as linhas detectadas.

Figura 20 – Espaço de coordenadas paralelas da imagem de entrada



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nesse sentido, após obter as coordenadas das linhas no plano original, através dos pontos identificados no espaço TS , o algoritmo traça uma linha, graficamente, em uma imagem de livre escolha. Sendo assim, utilizando a resposta da função *Canny* como entrada para a aplicação da função *PClines*, na Figura 21, em vermelho, é ilustrado o resultado das linhas detectadas, que foram projetadas sobre a imagem original.

Figura 21 – Resposta das linhas detectadas pela função PClines



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ainda nesse, para a obtenção do resultado da Figura 21, foi necessária uma parametrização específica de definição de uma distância mínima entre os pontos, para que possam ser considerados como uma linha na função PClines, para obter apenas a detecção da linha de fundo e a linha, paralela, do extremo da grande área do campo. Desse modo, pode-se observar que as linhas detectadas na imagem, mesmo sendo fisicamente paralelas, possuem uma angulação entre si.

3.3 Identificação do Ponto de Fuga da imagem

Como citado na seção 2.3.4 Linha virtual de impedimento (VOL), a distorção de ângulo gerado pelas câmeras de transmissão é uma das maiores dificuldades na hora de analisar situações de impedimento. Dessa forma, para traçar uma linha de impedimento virtual que seja geometricamente paralela a linha de fundo, é necessário, primeiramente, encontrar o ponto de fuga da imagem e, após isso, criar uma reta em que as coordenadas do último defensor e o ponto de fuga da imagem pertençam.

3.3.1 Cálculo do ponto de fuga

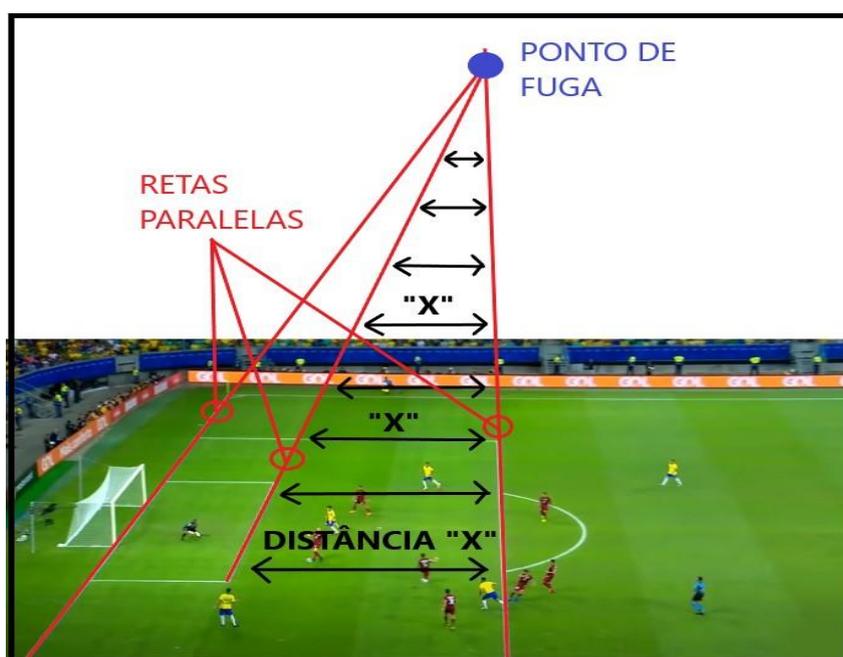
Geometria Projetiva e Geometria Descritiva são campos de estudos da matemática, correlacionados, em que analisam as relações estabelecidas entre um objeto real e a sua imagem projetada ou desenhada em perspectiva. Historicamente,

esses ramos surgiram na busca da fundamentação matemática das técnicas de desenho em perspectiva por artistas dos séculos passados, e suas fundamentações podem ser consideradas como parte da chamada Perspectiva Matemática (GONÇALVES, 2013). Nesse contexto, um dos principais conceitos da Perspectiva Matemática é a definição de “ponto de fuga”.

Assim como na visão humana, quanto mais distante um objeto está de seu observador, menor é o seu ângulo de visão. Nesse sentido, ao se observar linhas paralelas, perceber-se que, devido a perspectiva, as retas causam a impressão de que a distância entre elas diminui gradativamente e, conseqüentemente, se encontram em um determinado ponto no infinito, apesar desse ponto não existir de fato. Sendo assim, ponto de fuga, é um ponto imaginário, existente no plano da perspectiva, onde há a intersecção da projeção de retas paralelas (GONÇALVES, 2013).

Da mesma forma, ao relacionar os conceitos com o projeto proposto, nota-se que as câmeras das transmissões televisivas causam distorções nos ângulos das imagens e criam pontos de fuga em perspectiva também. Na Figura 22, é apresentado uma imagem como exemplificação da representação de linhas paralelas em perspectiva nos jogos de futebol.

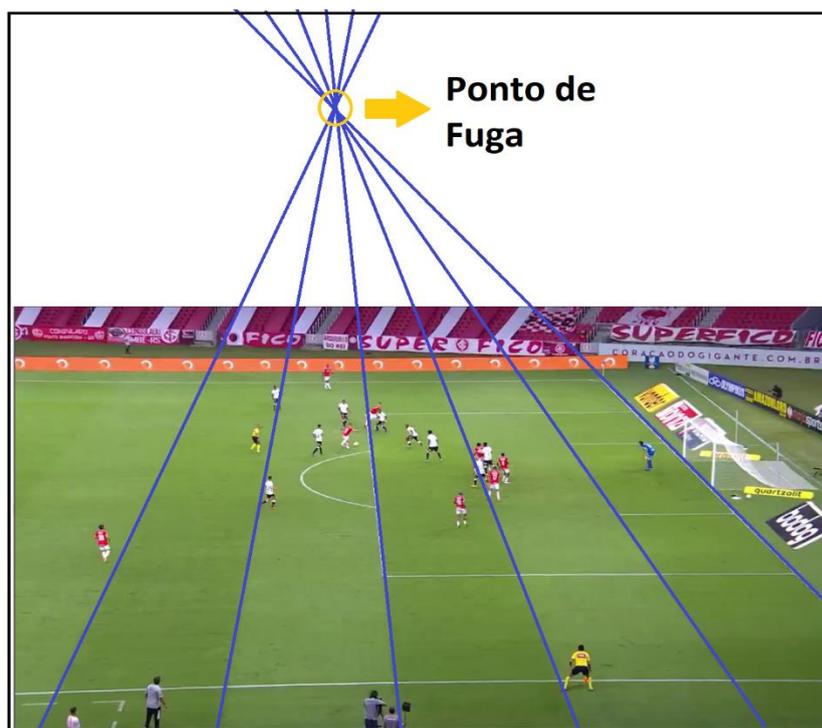
Figura 22 – Exemplo de imagem em perspectiva



Fonte: Adaptado de Brasil x Venezuela, Copa América 2019, transmitida pela Rede Globo.

Nesse sentido, a imagem de entrada do sistema também possui um ponto de fuga, gerado da distorção dos ângulos criados durante a captura do vídeo. Na Figura 23, é apresentado a representação do ponto de fuga gerado na imagem de entrada (Figura 10).

Figura 23 – Ponto de fuga da imagem de entrada



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Sendo assim, ao traçar uma reta em qualquer ponto da imagem, e que passe pelo ponto de fuga também, obtém-se uma linha paralela a linha de fundo, como por exemplo uma linha de impedimento. Nesse contexto, primeiramente, é necessário descobrir as coordenadas do ponto de fuga.

Portanto, para o cálculo do ponto de fuga da imagem, é utilizado a equação da reta (4) e o resultado da função PClines da seção 3.2.2 Detecção das linhas do campo. Com base nos pontos das linhas encontradas pela função, é calculado a equação da reta de cada linha e, após isto, se iguala as funções para descobrir em qual momento é possível ter o mesmo valor para a coordenada y e, analogamente, a coordenada x . Ou seja, ao se igualar as funções das retas, é possível descobrir em que momento há uma intersecção destas retas e, portanto, a determinação do ponto de fuga.

3.4 Identificação dos jogadores

Como citado na seção 2.1.2 Regra de Impedimento, no futebol, para um jogador estar em posição de impedimento, o atacante deve estar no lado do campo do oponente e localizado entre o último defensor e o goleiro da equipe adversária. Nesse sentido, para que seja possível reconhecer essa situação, primeiramente é necessário identificar os jogadores das equipes. Sendo assim, esta seção apresenta os métodos utilizados para a marcação dos atletas dentro do campo.

3.4.1 Marcação dos jogadores

Existem muitas bibliotecas e técnicas no OpenCV voltadas para a detecção e marcação de objetos em imagens. Alguns métodos, por exemplo, utilizam imagens de bancos de dados e realizam uma comparação da ilustração em análise com a do banco, para identificar o específico objeto. Já outros métodos, utilizam técnicas de detecção com base nas cores dos elementos envolvidos, onde uma cor, pré-definida, identifica as características desejadas e os dados de entrada são examinados de forma que se verifique se possui, ou não, determinado aspecto. Todavia, como neste projeto o dado de entrada é um arquivo de vídeo, em que há movimentação dos participantes do lance, para marcar os jogadores, utiliza-se a técnica de detecção com base no rastreamento de objetos selecionados.

Assim como nos jogos em que há a necessidade da utilização do VAR para análises de impedimentos, neste projeto a intenção é de que o operador do sistema já saiba quais são os jogadores envolvidos no lance específico, ou seja, qual atacante pode estar em posição irregular e qual defensor que dá condição para a infração. Em vista disso, a detecção dos jogadores se dá pela função *Tracker*, que rastreia marcações efetuadas pelo operador em determinado momento desejado e acompanha estas marcações até o término do vídeo. Nesse sentido, a função *Tracker* possui diversas programações que executam o rastreamento, cada um com suas peculiaridades e eficiência de acordo com objeto que deseja ser acompanhado. O algoritmo escolhido para o sistema foi o *CSRT*, um dos que possuem os melhores resultados.

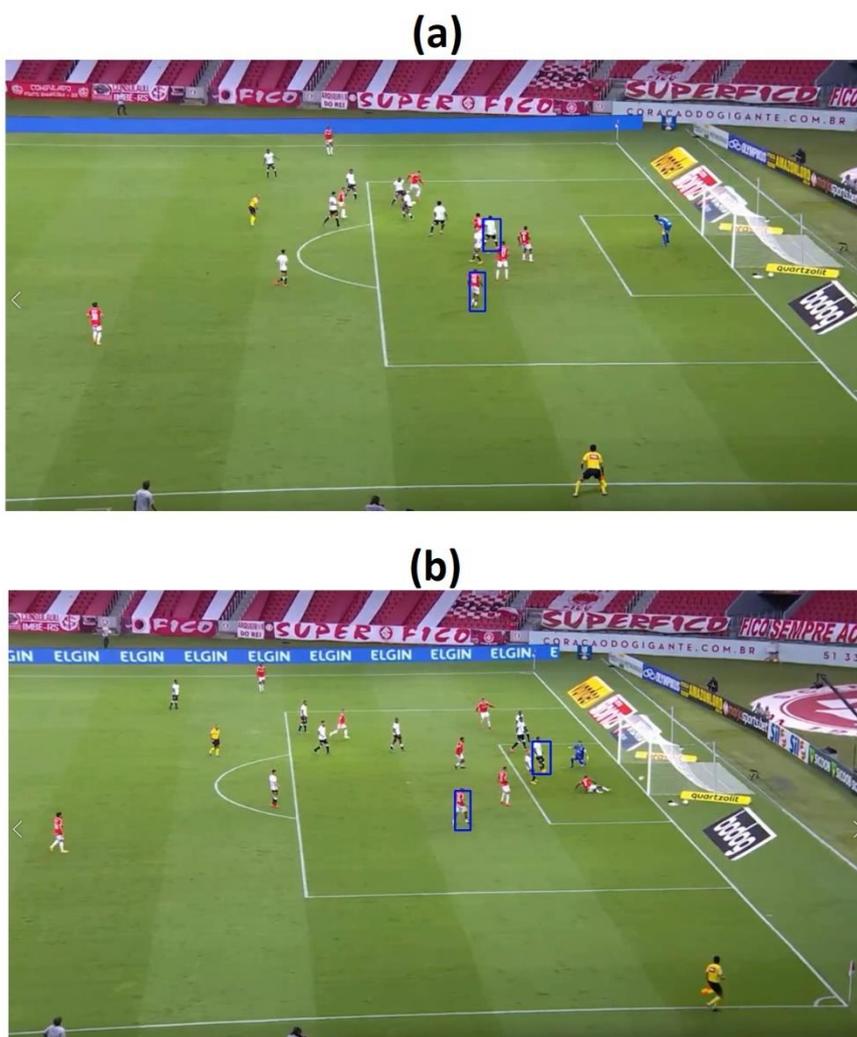
Portanto, após ter selecionado o algoritmo *CSRT*, para dar início ao rastreamento é necessário, logo no primeiro frame do vídeo, selecionar os objetos a

serem analisados. Para isso, é utilizado a função *SelectROI*, delimitando manualmente uma área no objeto e se armazenando seu valor em uma variável.

Em seguida, é iniciado a função *Tracker* com a variável do objeto delimitado e a imagem de entrada. Neste caso, o vídeo com o lance para a análise de impedimento. Posteriormente, após ter selecionado o objeto e iniciado a função, é analisado o vídeo e, a cada *frame*, é realizado uma atualização, que de fato realiza o processo de rastreamento e altera a variável de delimitação do objeto. Para demonstrar o objeto no vídeo, desenha um novo retângulo com a função *rectangle*.

Na Figura 24, é apresentado o resultado das funções aplicadas para poder rastrear os jogadores. Efetivamente, pode ser observado o acompanhamento de um jogador da equipe do Corinthians e um do Internacional, onde na Figura 24 (a) é visto o início do vídeo e (b), o fim, com os mesmos jogadores identificados no início.

Figura 24 –Jogadores marcados e rastreados



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em síntese, o método apresentou ser eficaz e as marcações dos jogadores servem como base para a criação de Linhas Virtuais de Impedimento (VOL). Entretanto, é necessário ter cuidado com a área demarcada no início do algoritmo, pois o sistema pode apresentar resultados indesejáveis caso haja a obstrução dos jogadores selecionados pelo *SeleçROI*, por outros jogadores da mesma equipe.

3.5 Desenhar a linha virtual de Impedimento

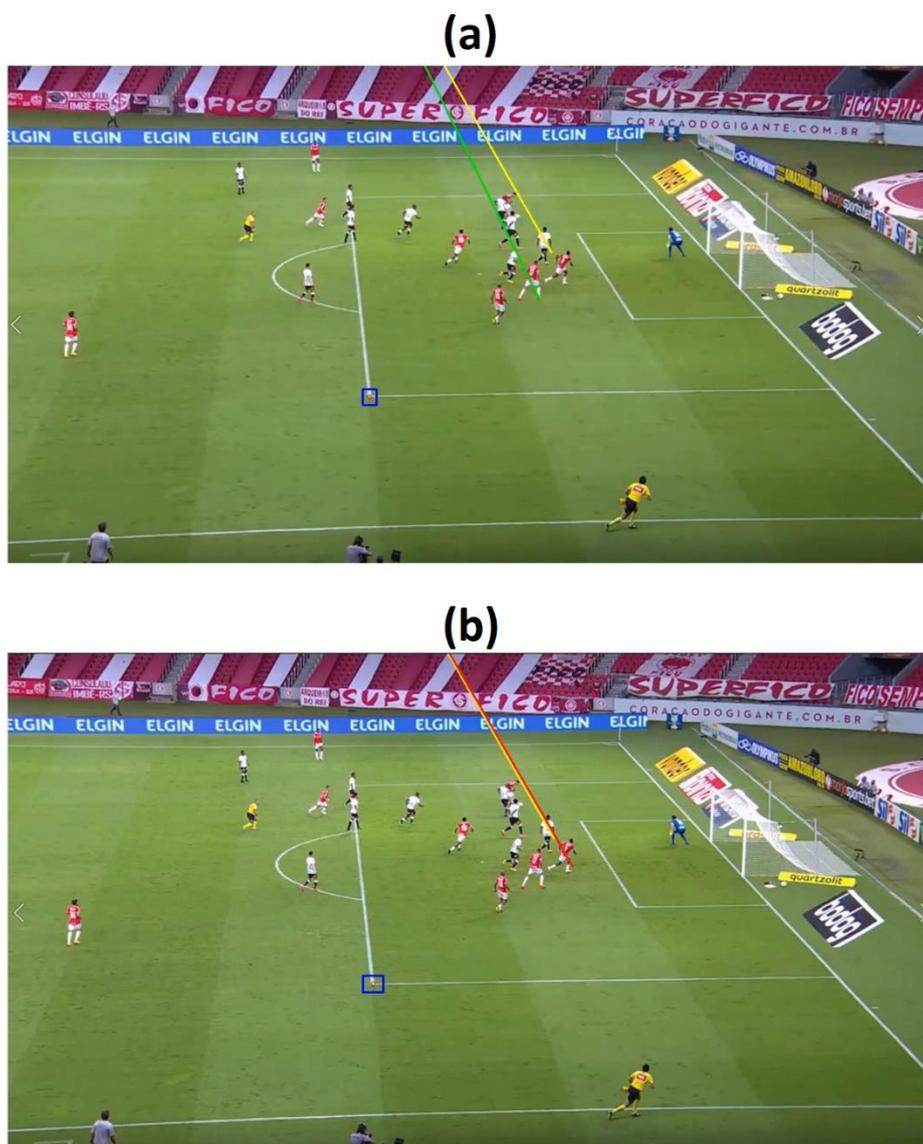
Conforme citado na seção 2.2.4 Linha virtual de Impedimento (VOL), uma VOL é uma linha sobreposta graficamente em uma imagem do campo, que auxilia na verificação se jogadores envolvidos em determinado lance estão ou não em uma posição de irregularidade. Ainda, o projeto proposto tem a caracterização de criar uma VOL em tempo real, durante o tempo em que o lance está sendo analisado, diferentemente do método utilizado pelo VAR. Nesse contexto, nesta seção, será apresentado os métodos utilizados para a criação de uma VOL automaticamente.

3.5.1 Demarcação da linha virtual de impedimento na imagem

Após calcular o ponto de fuga da imagem, e identificar as posições dos atletas analisados no momento do lance, o último passo é traçar, de fato, uma Linha Virtual de Impedimento (VOL). Portanto, para executar este passo, é criada uma ordem para a marcação dos jogadores: primeiramente, localiza-se o atacante, e por segundo, o defensor da equipe rival, com exceção do goleiro.

Nesse contexto, como cada marcação possui coordenadas no plano da imagem, é atribuído um algoritmo que possibilita traçar uma linha do ponto mais próximo da linha de fundo de cada marcação, até o ponto de fuga, calculado conforme a seção 3.3.1 Cálculo do ponto de fuga. Além disso, é calculada a angulação que essas linhas fazem entre si, tendo a linha do defensor como eixo inicial. Caso o ângulo calculado seja positivo, o atacante em análise está impedido e a sua linha, até o ponto de fuga, passa a ser da cor vermelha. Caso o ângulo seja negativo, ou igual a zero, o atacante está em posição legal e é atribuído a cor verde à sua linha. Na Figura 25, é apresentado os possíveis resultados finais do projeto, com a representação de uma VOL, e a explicação gráfica de cada situação.

Figura 25 – Resultado Final



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nesse contexto, como pode ser observado na Figura 25, temos uma VOL, gerada automaticamente pelo sistema, satisfazendo as especificações do regulamento oficial do futebol e definindo que, conforme (a), o jogador selecionado não está em posição irregular, ao analisar com o último defensor no momento do passe e que, conforme (b), o atacante da equipe do Internacional, que dá seguimento a jogada ao realizar o gol, está definitivamente em posição de impedimento, cometendo uma infração e anulando a jogada.

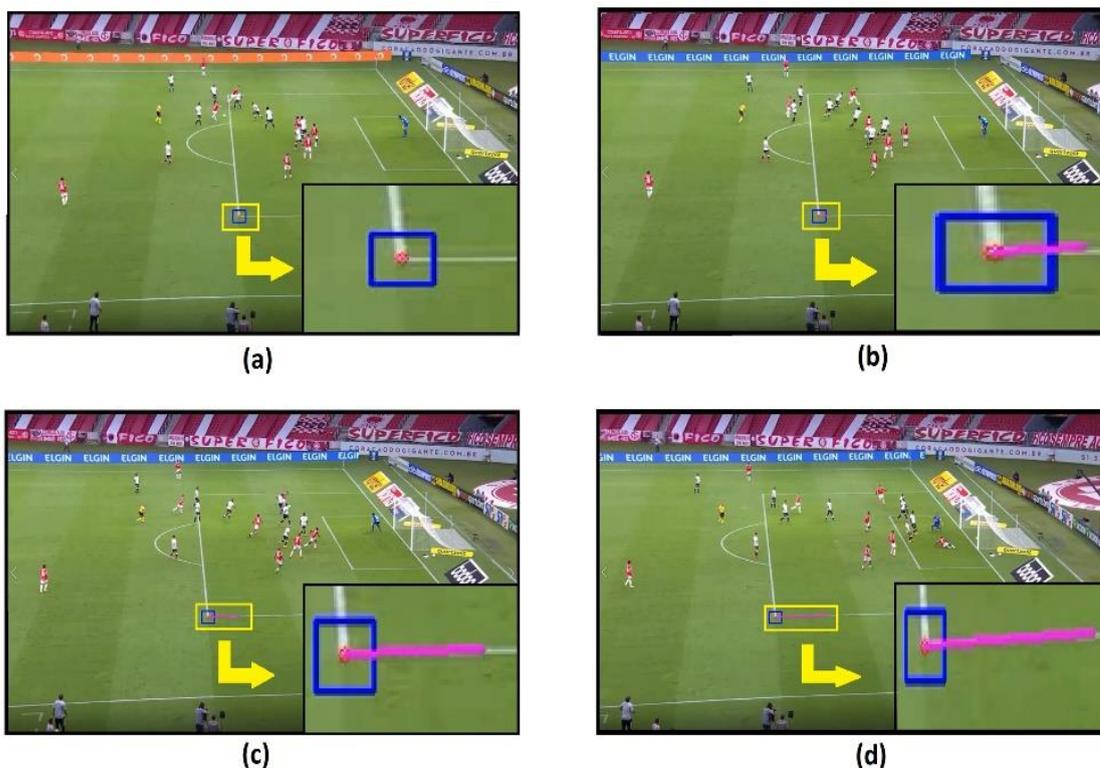
3.6 Calibração

Durante a execução do sistema, os primeiros modelos apresentam problemas nos resultados em relação às coordenadas do ponto de fuga calculados na seção 3.3.1 Cálculo do ponto de fuga. Como o arquivo de entrada é um vídeo transmitido por uma rede televisiva, ele segue a dinâmica que a câmera está sempre se movimentando, de um lado para o outro, seguindo a posição da bola e o atual lance no jogo. Ainda nesse, ao calcular as coordenadas x e y do ponto de fuga através das linhas paralelas identificadas no primeiro frame do vídeo, obtém-se um ponto fixo no plano, seja ele dentro ou fora da representação da imagem. Nesse contexto, o problema se dá pelo fato de que a movimentação da câmera e a distorção de ângulos gerados por ela, fazem com que o campo de jogo mostrado, esteja sempre variando a sua posição na tela, ou seja, as linhas paralelas estão a cada frame mudando a sua posição e angulação e, conseqüentemente, o ponto de fuga também, fazendo com que as coordenadas calculadas inicialmente sirvam apenas para o primeiro frame.

Para resolver esta situação, pode-se fazer o cálculo do ponto de fuga a cada *frame* do vídeo. Entretanto, em testes utilizando este método, o mesmo apresentou uma demora para demonstrar o resultado do sistema, de aproximadamente 10 segundos ao comparar com outras técnicas. Esta diferença, é devida a necessidade de realizar diversas vezes os cálculos a cada segundo, tornando o sistema lento para apresentar uma resposta. Sendo assim, o método de calibração criado é baseado na função *Tracker* apresentada na seção 3.4.1 Marcação dos jogadores.

Deste modo, antes da escolha dos jogadores a serem analisados, a função *Tracker* é utilizada para rastrear uma posição conhecida no plano do campo como, por exemplo, o encontro da linha de fundo com a linha horizontal da pequena área, ou até mesmo a base de uma das traves no campo e, a partir da escolha do ponto, seu deslocamento é analisado na representação da transmissão. Deste modo, é possível reconhecer as novas coordenadas do ponto de calibração e calcular o quanto o ponto de fuga se desloca a cada *frame*. Na Figura 26, é apresentado o rastreamento do ponto de calibração durante o vídeo em análise, onde se pode observar o deslocamento do campo conforme os *frames* vão passando de (a) até (d).

Figura 26 – Ponto de calibração

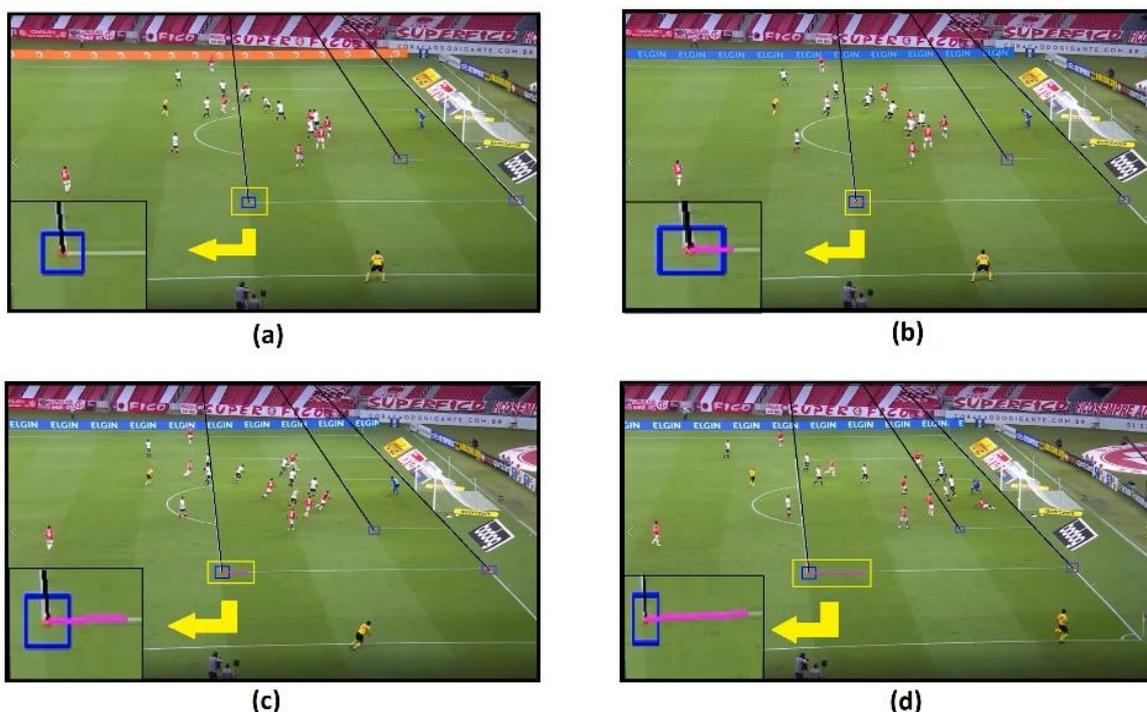


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como pode ser observado na Figura 26, o centro do retângulo azul, que identifica o ponto de calibração, visualmente, continua marcando o encontro entre as linhas horizontal inferior e vertical esquerda da grande área do time defensor e, em rosa, uma linha que demonstra o quanto este ponto se deslocou no plano da imagem. Esta distância percorrida pelo ponto é o que, de fato, realiza a compensação do ponto de fuga e atualiza seu valor.

Nesse contexto, se for marcado outra posição fixa do campo, ao invés de um jogador, logo após a marcação do ponto de calibração, é possível analisar o paralelismo desta posição com a linha de fundo do campo e, assim, verificar a efetividade do método. Na Figura 27, é apresentada a eficácia do ponto de calibração, onde além do ponto de calibração, são marcados demais pontos fixos do campo e verificado se a atualização do ponto de fuga está correta conforme os *frames* vão passando de (a) até (d).

Figura 27 – Validação do ponto de calibração



Fonte: Elaborado pelo Autor.

De mesmo modo, na Figura 27, nota-se que o sistema permanece atualizando o ponto de fuga corretamente apesar de seu deslocamento, uma vez que foram demarcados pontos específicos da linha de fundo, pequena área e grande área, e traçado linhas automaticamente da cor preta até o ponto de fuga. Ainda nessa imagem, pode-se observar que, mesmo com o deslocamento, representado pela cor rosa também, as linhas pretas parecem sobrepôr as linhas brancas do campo, o que indica, conforme a seção 3.5.1 Demarcação da linha virtual de Impedimento na imagem, que são linhas paralelas.

Em suma, a visibilidade do ponto de calibração e sua validação não é importante para a análise da situação de Impedimento, pois são métodos voltados para o ajuste do ponto de fuga e verificação da funcionalidade do projeto, respectivamente. Sendo assim, suas representações não são demonstradas nos resultados do sistema.

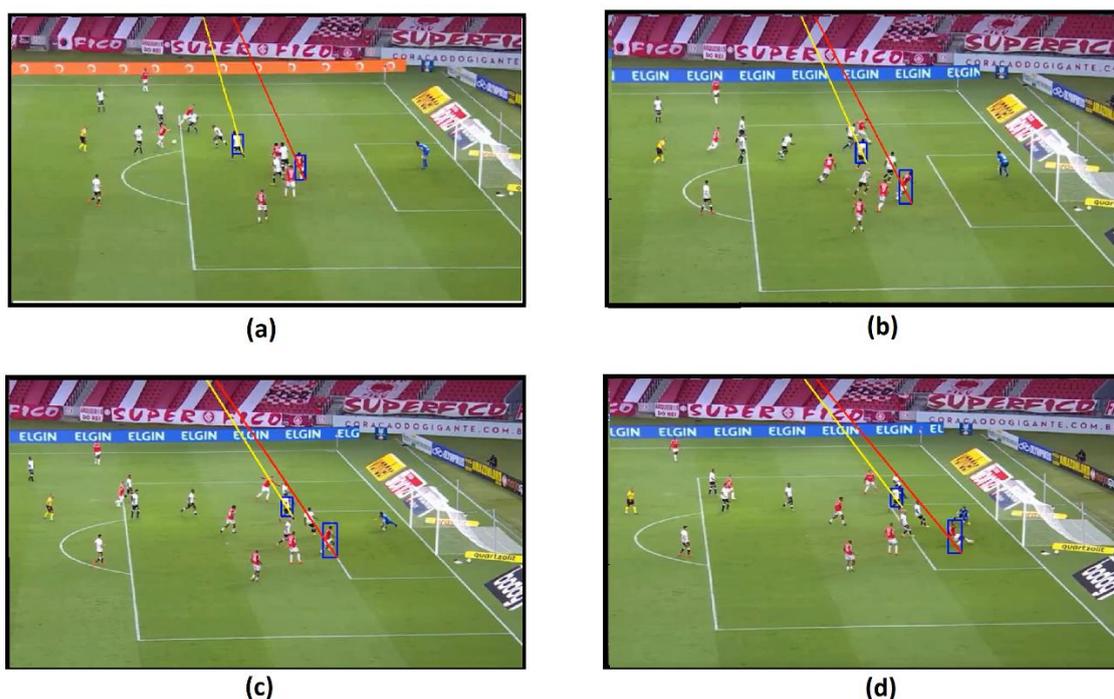
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o objetivo de analisar o desempenho do sistema proposto, conforme os parâmetros citados na seção 3.5.1 Demarcação da linha virtual de Impedimento na imagem, é realizado uma série de simulações, em diversas situações, cujos resultados mais relevantes são apresentados neste capítulo. Em um primeiro momento, utilizando o mesmo dado de entrada exemplificado na metodologia, verifica-se as características que definem uma situação de impedimento, assim como variações do caso. Em seguida, utiliza-se outros vídeos com lances da infração, como método de validação do sistema.

4.1 Simulações

Para demonstrar que o sistema apresentado obedece as regras de jogo do futebol, foram simuladas 4 possíveis diferentes situações de jogo. Sendo assim, a Figura 28 ilustra o resultado do sistema para uma situação em que sempre há o Impedimento, conforme os *frames* do vídeo vão passando de (a) até (d).

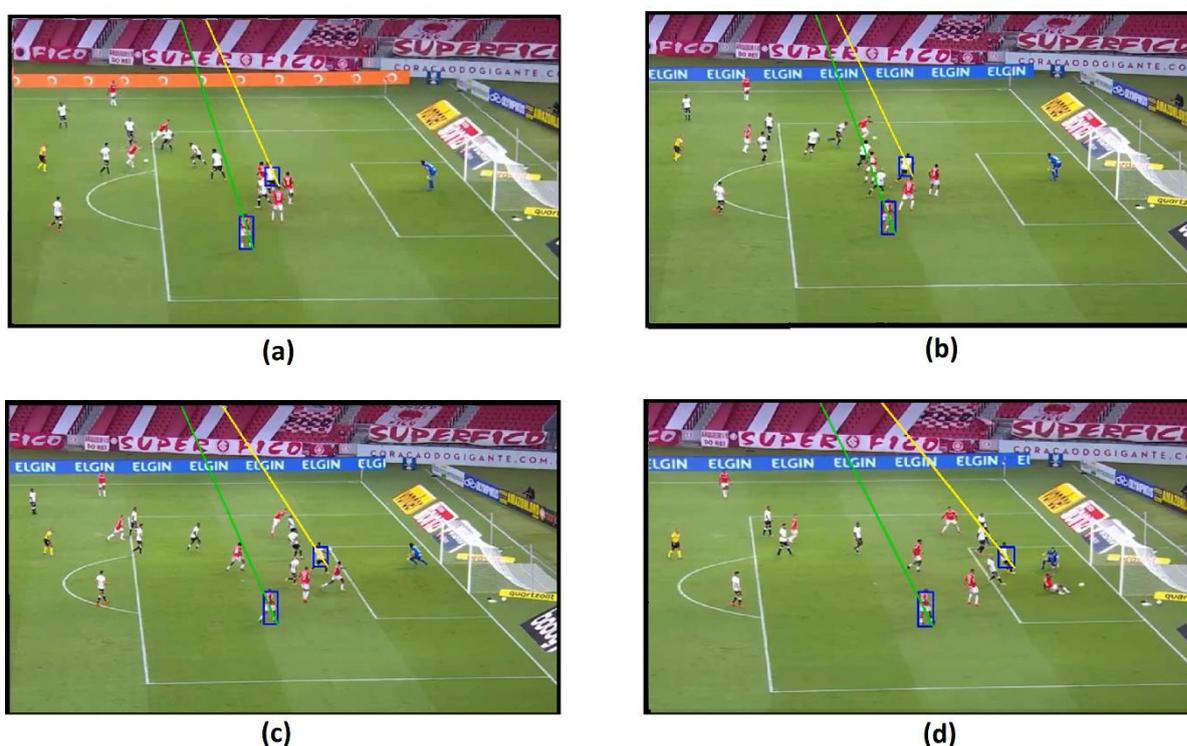
Figura 28 – Situação “Sempre Impedido”



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como pode ser visualizado na Figura 28, o jogador marcado da equipe do Internacional, time que estava atacando no momento, está sempre adiantado em relação ao defensor adversário, ou seja, sempre em posição de Impedimento. Portanto, a VOL permanece da cor vermelha do início ao fim da resposta. Já na Figura 29, verifica-se uma situação contrária à Figura 28, com uma situação em que o jogador atacante está sempre em posição legal.

Figura 29– Situação “Sempre em Posição Legal”

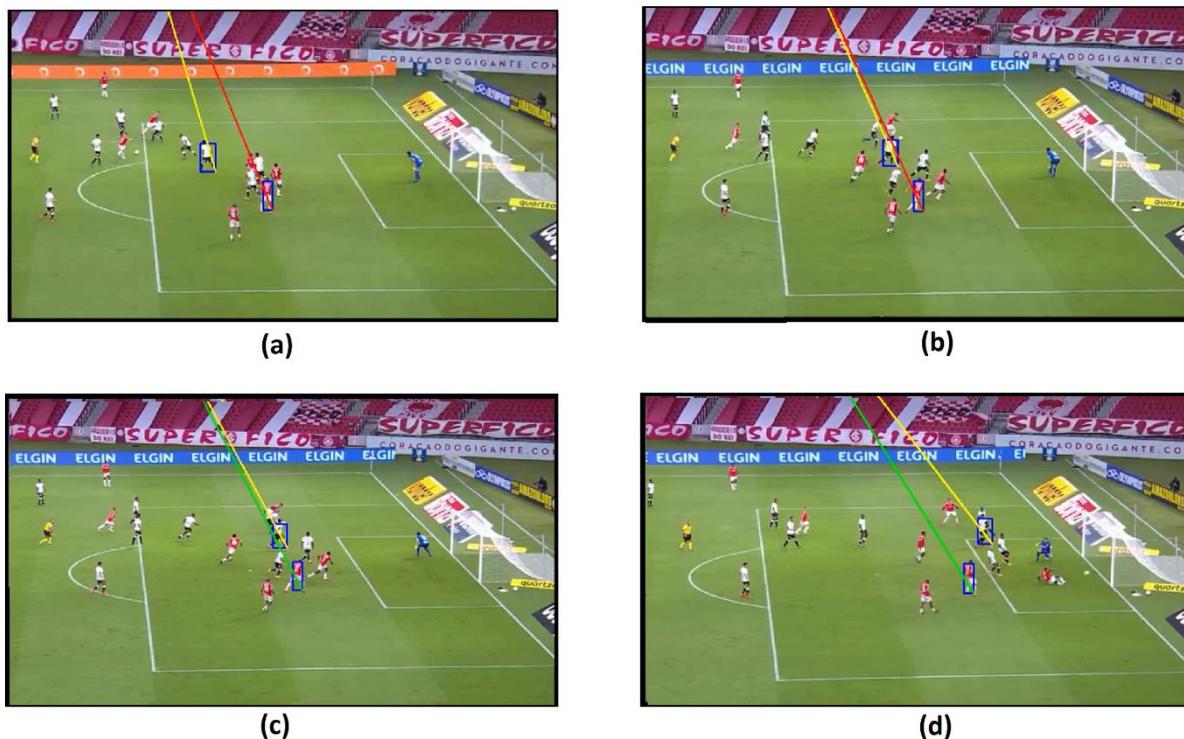


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como pode ser observado na Figura 29, o atacante selecionado está sempre em uma posição atrás da linha do defensor adversário em relação ao campo, ou seja, sempre em posição legal. Portanto, a VOL permanece da cor verde do início ao fim da resposta.

Para demonstrar que o algoritmo também funciona em momentos em que há a possibilidade de transição de um jogador de um estado para outro, na Figura 30 é apresentada uma situação de transição de uma posição de Impedimento para uma posição legal, que ocorre conforme os frames vão passando de (a) até (d).

Figura 30 – Transição “Impedido para posição legal”

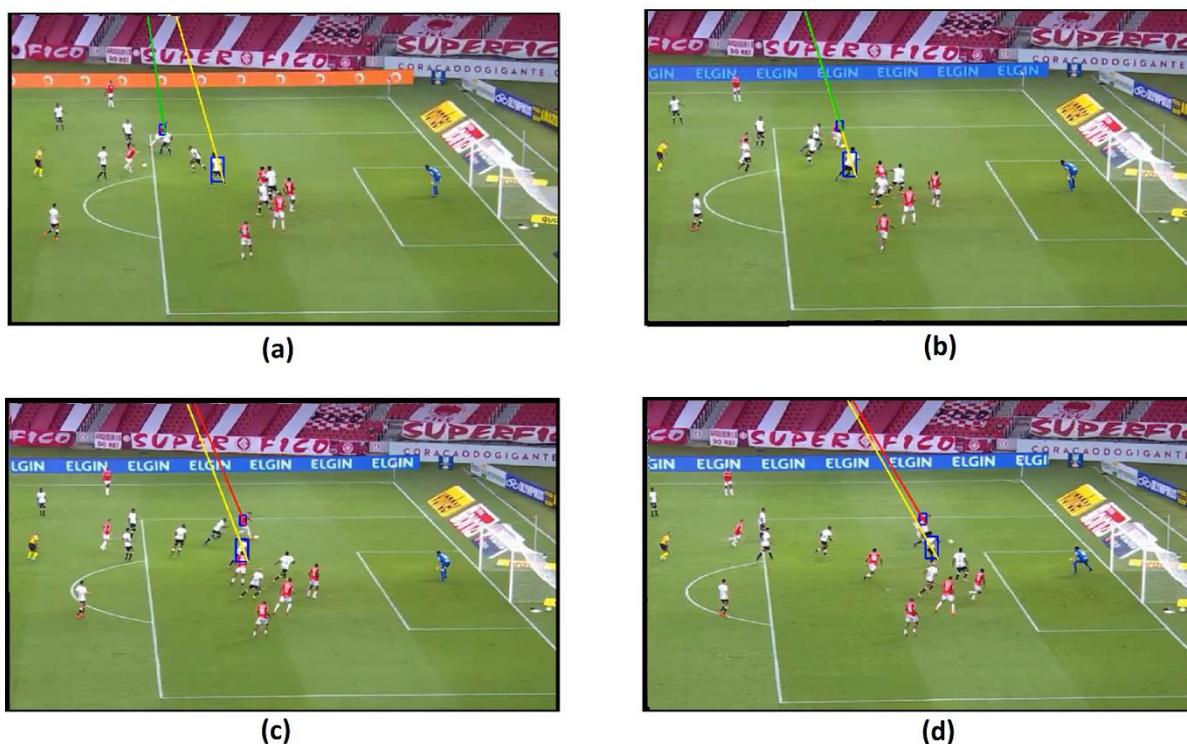


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como pode ser visualizado na Figura 30, o jogador da equipe do Internacional estava em posição irregular e, com o passar do tempo, se movimentou para uma posição em que não estaria cometendo mais a infração. Ou seja, a VOL estava da cor vermelha e passou para verde no momento em que o atacante e defensor rival estavam na mesma linha e, posteriormente, o defensor estando mais próximo da sua linha de gol.

Em contrapartida, na Figura 31, ocorre outra situação de transição, onde o atacante estava em posição legal e passa a estar impedido. Portanto, a VOL estava da cor verde, e passou para vermelha no momento em que o mesmo ultrapassou o defensor adversário.

Figura 31 – Transição “Posição legal para impedido”



Fonte: Elaborado pelo Autor.

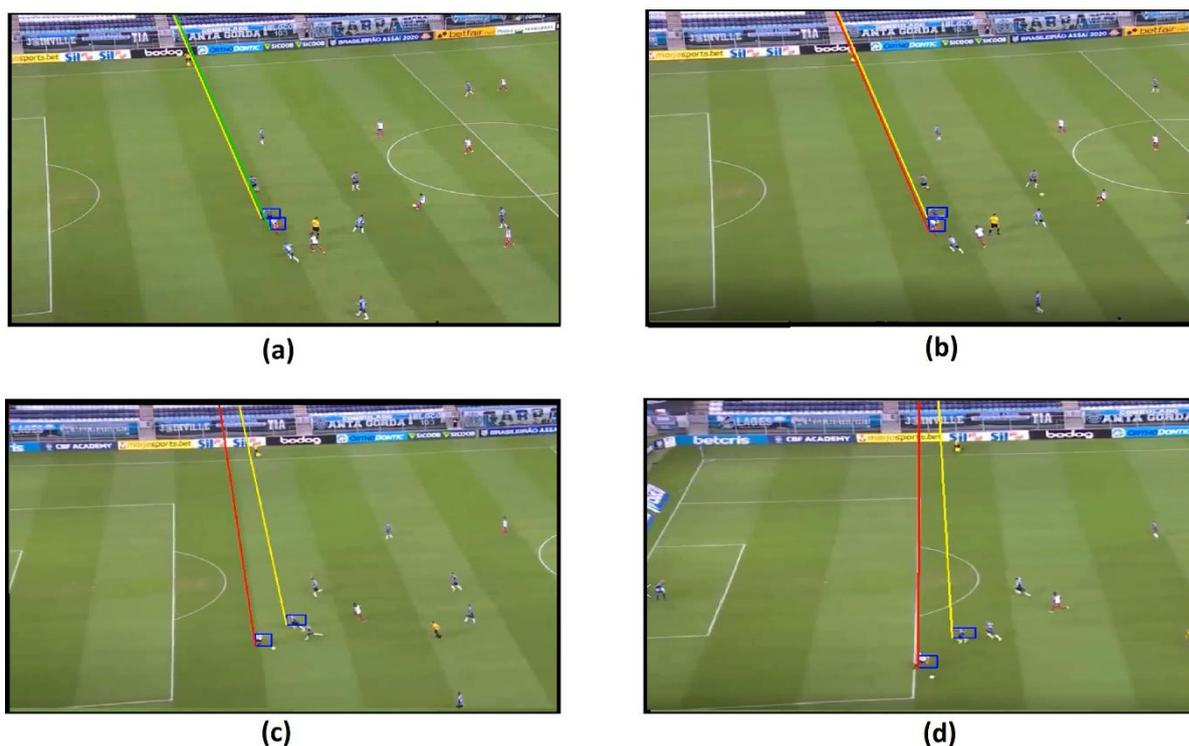
Todavia, o sistema funciona de forma rápida e prática em circunstâncias claras de impedimento, conforme os resultados apresentados. Entretanto, como citado na seção 3.4.1 Marcação dos jogadores, há a necessidade de saber corretamente quais são os jogadores envolvidos no ato e também, assim como no VAR, quando há uma situação duvidosa é preciso pausar o vídeo no exato momento que define a irregularidade.

Por fim, para validar e averiguar se o algoritmo do sistema funciona em qualquer partida de futebol que tenha algum lance com ou sem a infração, a estratégia foi testada em outros jogos oficiais de clubes brasileiros. Nesse contexto, como pode-se perceber, as análises, até o momento, foram realizadas em uma sequência de imagens em que a jogada se passa no campo defensor a direita do vídeo. Por esse motivo, também foi criado uma derivação do código para que possam ser analisadas as transmissões de partidas em que os lances de ataque ocorrem a esquerda do sentido do jogo.

Na Figura 32, é possível observar uma situação em uma partida entre Grêmio Foot-Ball Porto Alegre e Esporte Clube Bahia, pelo campeonato brasileiro de 2020,

em que o atacante do clube do Bahia está exatamente na mesma linha que o defensor gremista ao receber um lançamento, ou seja, em posição legal e que na sequência acaba fazendo o gol. Lance este que foi validado também durante o jogo na época em que ocorreu.

Figura 32 – Sistema no lado esquerdo do campo

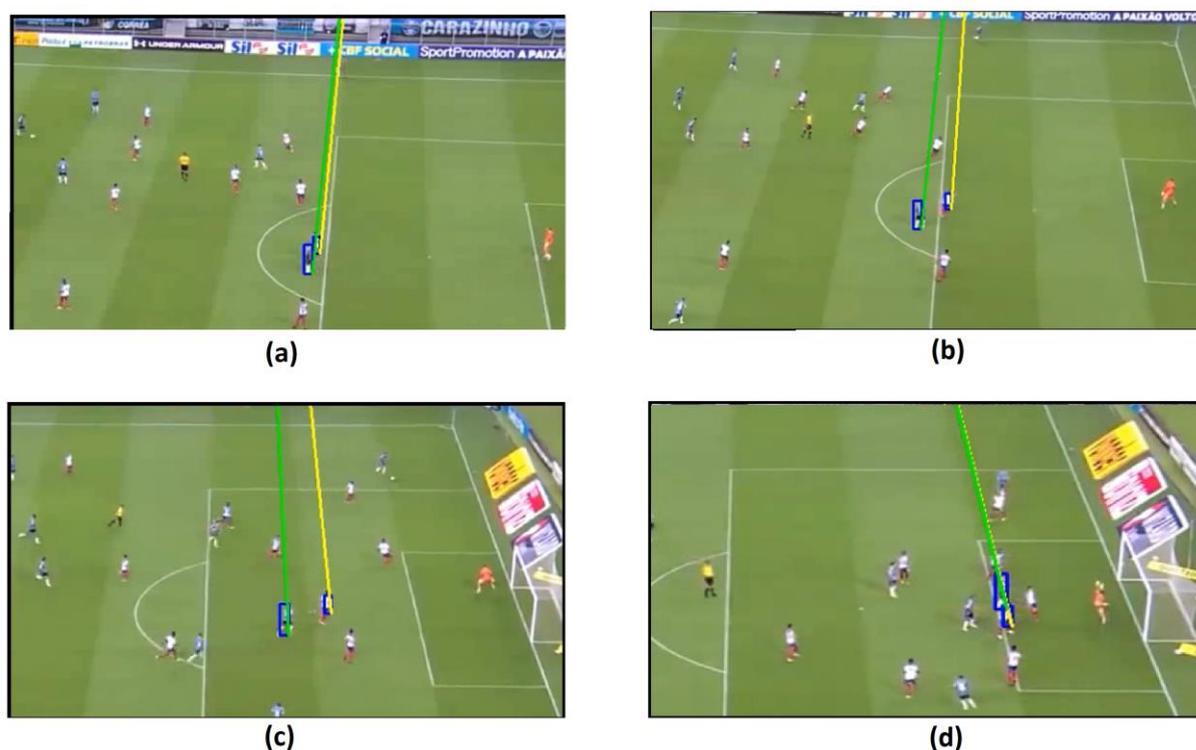


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nesse sentido, na Figura 32, apesar de no final da jogada a VOL estar dar cor vermelha, este é outro exemplo de uma situação de transição de estado, mas que pelo regulamento é um lance legal, pois na análise o que importa é a posição do atacante no exato momento em que irá receber o passe.

Já na Figura 33, pode-se visualizar um lance do mesmo jogo entre Grêmio e Bahia, mas desta vez com um ataque gremista e do lado direito do campo, onde é verificado se o atacante está em posição de Impedimento conforme os frames vão passando de (a) até (d). De tal forma, é possível perceber na imagem que em nenhum momento a VOL muda de cor, o que significa que o jogador está em posição legal do início ao fim da jogada.

Figura 33 – Resposta do sistema com outro dado de entrada



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ainda, ao todo, foram selecionados 10 lances diferentes de análise de impedimento em partidas de futebol, sendo eles 5 do lado esquerdo e 5 do lado direito. Em cada vídeo, devido aos problemas de angulação de imagem e tonalidades diferentes de cada campo, foi necessário ajustar os parâmetros específicos para a as técnicas de identificação da área do jogo e detecção das linhas do campo. Por fim, em todos os vídeos foi possível identificar o ponto de fuga da imagem e realizar uma VOL.

5 DISCUSSÃO

Foram apresentadas diversas situações possíveis, com e sem a infração de impedimento (regulamentada pelas regras oficiais do futebol), em alguns lances de partidas de clubes brasileiros. Ainda, é demonstrado o desenvolvimento, passo a passo, da criação de uma linha virtual de impedimento em uma jogada específica de ataque do Sport Club Internacional, pelo Campeonato Brasileiro do ano de 2020. De modo geral, em todos os casos o projeto proposto provou ser uma ferramenta útil e eficaz para análises gráficas da irregularidade e que pode, de fato, ser utilizado para o benefício do esporte.

Atualmente, o sistema utilizado pelo VAR, em jogos oficiais, é disponibilizado por poucas empresas voltadas ao ramo tecnológico e também, como citado na seção 2.2.4 Linha virtual de Impedimento (VOL), para que o sistema seja validado, ele passa por uma bateria de testes executados pela FIFA. Durante a partida, para que o sistema funcione corretamente, a FIFA exige, também, que o campo de jogo passe por uma calibração específica de suas dimensões. Ou seja, para cada campo que utiliza a tecnologia, existe uma parametrização específica e única, o que, conseqüentemente, torna o sistema do VAR extremamente preciso em relação às posições dos jogadores no campo. Entretanto, em conversas com dirigentes de clubes profissionais de futebol, em especial com os representantes do Clube Esportivo Aimoré (RS), a calibração do campo, para a utilização do sistema do VAR, custa da ordem de R\$ 100 mil e, além disso, a utilização do sistema, a cada partida, custa da ordem de R\$ 20 mil para cada clube o que, definitivamente, acaba inviabilizando o sistema para clubes com menores orçamentos.

Nesse sentido, comparando o projeto proposto com o sistema oficial do VAR, é possível analisar duas grandes relações importantes entre eles. A primeira, é que o sistema apresentado não precisa de uma calibração do campo, pois utiliza as câmeras de TV's e, a partir das imagens, traça as linhas virtuais de impedimento. O resultado desta aplicação é um sistema com menores custos financeiros. A segunda, em contrapartida, é que o sistema não é muito preciso. Ele funciona bem para a maioria dos casos, mas para situações de impedimento onde a posição dos jogadores for uma diferença milimétrica, ou lances em que há uma obstrução muito grande de jogadores, ele não obterá o resultado desejado, o que torna o sistema do VAR mais preciso e confiável.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A irregularidade de impedimento, nos jogos de futebol sempre foi um caso polêmico e gera discussões e divergências de opiniões entre praticantes e fãs do esporte. À vista disso, juntamente com o avanço da tecnologia, diversos estudos e métodos foram criados para solucionar os dilemas envolvidos no assunto. Atualmente, o único mecanismo oficial, regularizado pelas instituições responsáveis pelo esporte (FIFA e IFAB), é a análise gráfica de imagens e criação de linhas virtuais de impedimento adotadas pelo VAR. Com esse recurso, a confiabilidade de uma arbitragem justa, nas partidas, aumentou consideravelmente. Entretanto, trouxe complicações relacionadas a demora da apresentação de seus resultados, durante o jogo, e a necessidade de um grande investimento econômico para a sua utilização. Nesse sentido, é proposto uma ferramenta de análise com baixo custo de investimento, que permita melhorar as análises de lances de impedimento no futebol e tornar o sistema mais autônomo possível.

Ao analisar as respostas do sistema, se observa que em todos os casos foi possível criar uma linha virtual de impedimento, automática, selecionando manualmente apenas os jogadores envolvidos na situação e que segue uma lógica de acordo com o que as regras oficiais do jogo determinam para a irregularidade. Em outras palavras, caso o atacante selecionado esteja mais próximo da linha de fundo do que o último defensor adversário, selecionado previamente também, o resultado demonstra uma linha paralela a linha de fundo, exatamente nos limites das marcações do atacante, da cor vermelha, validando a posição irregular do atleta. Caso contrário, a linha é da cor verde, confirmando a posição legal. Diante disso, nas análises da saída do sistema, destaca-se, também, que o algoritmo funciona corretamente para qualquer lado de campo de jogo, esquerdo ou direito, sendo capaz de criar uma VOL com considerável precisão e tempo de processamento adequado. Nesse sentido, pode-se concluir que o projeto proposto se tornou satisfatório, tendo em vista que ele exerce corretamente a função da determinação de impedimento e possui um baixo custo de investimento, considerando que todos os dados de entrada do sistema são de imagens televisivas, sem a necessidade de um equipamento específico.

Não obstante, os únicos contrapontos do sistema são que ele não possui uma precisão melhor que a do VAR, pelo próprio fato de não utilizar equipamentos dedicados para a sua calibração, bem como a possibilidade de instabilidade na saída

para lances em que houver uma obstrução nos jogadores envolvidos, ou seja, situações em que alguns atletas passem na frente, sobrepondo a imagem do jogador selecionado. Diante disso, para melhorar a acurácia do sistema e torná-lo mais fidedigno ao do VAR, alguns métodos podem ser melhorados, ou desenvolvidos, em seu algoritmo.

Um procedimento que pode ser implementado é a análise do campo e jogadores em 3 dimensões. Atualmente, o cálculo do ponto de fuga e as posições dos jogadores selecionados estão relacionados em termos de x e y , descartando o eixo z , ou seja, a altura dos objetos. Caso seja analisado essa variável, é possível ter uma precisão melhor dos jogadores, mais próxima da realidade.

Nesse contexto, outro recurso que pode ser aplicado, é fazer com que a VOL criada pelo sistema, fique apenas dentro das extremidades do campo de jogo e possa percorrer todo o campo, sem ir de encontro ao ponto de fuga. Ou seja, fazer a VOL ir de um lado do campo ao outro, sem perder a paralelidade com a linha de fundo, de forma que se tenha uma visão mais clara da linha.

Por fim, outra ideia para que possa ser eliminado o problema de obstrução de jogadores, é a utilização de duas ou mais câmeras fixas, em posições específicas do campo. Com isso, seria possível analisar os lances de outros ângulos, e poderia economizar tempo de processamento de alguns cálculos para o ponto de fuga, tendo em vista que com a câmera fixa, o ponto seria fixo também, sem a alteração de sua posição devido ao movimento das câmeras.

Além disso, os métodos utilizados para o desenvolvimento da ferramenta podem ser aproveitados em outras aplicações que não são do ramo esportivo. Um exemplo, é usar a técnica do cálculo do ponto de fuga para identificar o ponto gerado pelas linhas paralelas de estradas e, assim, implementar um sistema para carros automáticos sempre andarem em linha reta. Ou então, utilizar o método de detecção do campo para detectar peças em linhas de montagem industriais, conforme as características ou cores da peça.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CBF, Acessoria. CBF registra receita e investimento recordes em 2019. **CBF**, [S. l.], 17 mar. 2020. Disponível em: <https://www.cbf.com.br/a-cbf/informes/index/cbf-registra-receita-e-investimento-recordes-em-2019>. Acesso em: 25 mai. 2020.
- CBF. **Demonstrações Financeiras 2019**. [S. l.], [2020]. Disponível em: https://conteudo.cbf.com.br/cdn/202004/20200430123925_68.pdf. Acesso em: 25 mai. 2020.
- D'ORAZIO, Tiziana *et al.* An Investigation into the Feasibility of Real-Time Soccer Offside Detection From a Multiple Camera System. **IEEE**, [S. l.], p. 1804-1818, 2009.
- DUBSKÁ, Markéta. Real-time detection of lines using parallel coordinates and CUDA. **Springer**, [S. l.], 2012.
- DUDA, Richard O.; HART, Peter E. **Use of the Hough Transformation To Detect Lines and Curves in Pictures**. Communications of the ACM, 1972.
- FIFA. **5 Essential Facts You Didn't Know About VAR**. [S. l.], [2018?]. Disponível em: <https://football-technology.fifa.com/en/innovations/var-at-the-world-cup/>. Acesso em: 27 mai. 2020.
- FIFA. **Handbook of Test Methods for Virtual Offside Line Assessment**. [S. l.], jun. 2019. Disponível em: <https://football-technology.fifa.com/media/172213/handbook-virtual-offside-line-assessment.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2020. p. 2.
- FIFA. **VOL Testing Process**. [S. l.], [2018?]. Disponível em: <https://football-technology.fifa.com/en/media-tiles/vol-testing-process/>. Acesso em: 27 mai. 2020.
- FRISSELLI, Ariobaldo; MANTOVANI, Marcelo. **Futebol: teoria e prática**. São Paulo: Phorte, 1999.
- GONÇALVES, Tiago da Silva. **Uma Introdução à Geometria Projetiva para o Ensino Fundamental**. Orientador: Dr. Mario Rocha Retamoso. 2013. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Instituto de Matemática, Estatística e Física, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2013.
- HASHIMOTO, Sadatsugu; OZAWA, Shinji. A System for Automatic Judgment of Offsides in Soccer Games. **IEEE**, [S. l.], p. 1889-1892, 2006.
- HOUGH, Paul V. C. **Method and means for recognizing complex patterns**. US Patent 3069654, 1962.
- IFAB. **Laws of the Game**. [S. l.], 01 jun. 2019. Disponível em: https://static-3eb8.kxcdn.com/documents/793/103202_200519_LotG_201920_EN_SinglePage.pdf. Acesso em: 25 mai. 2020.
- JIANG, Lijung *et al.* Video Based Soccer Ball Tracking. **IEEE**, [S. l.], p.53-56, 2010.

NAIDOO, Wayne C.; TAPAMO, Jules R. Soccer Video Analysis by Ball, Player and Referee Tracking. **SAICSIT**, África do Sul, p. 51, 2006.

OPENCV. **About**. [S. l.], [2020]. Disponível em: <https://opencv.org/about/>. Acesso em: 08 jun. 2020.

OPENCV. **Canny Edge Detector**. [S. l.], [2013]. Disponível em: https://docs.opencv.org/master/da/d5c/tutorial_canny_detector.html. Acesso em: 11 jun. 2020.

OPENCV. **Contours: Getting Started**. [S. l.], [2013]. Disponível em: https://docs.opencv.org/trunk/d4/d73/tutorial_py_contours_begin.html. Acesso em: 11 jun. 2020.

OPENCV. **Hough Line Transform**. [S. l.], [2013]. Disponível em: https://docs.opencv.org/3.4/d9/db0/tutorial_hough_lines.html. Acesso em: 11 jun. 2020.

OPENCV. **Image Gradients**. [S. l.], [2013]. Disponível em: https://docs.opencv.org/master/d5/d0f/tutorial_py_gradients.html. Acesso em: 19 mai. 2021.

OPENCV. **Image Thresholding**. [S. l.], [2013]. Disponível em: https://docs.opencv.org/trunk/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html. Acesso em: 11 jun. 2020.

OPENCV. **Morphological Transformations**. [S. l.], [2013]. Disponível em: https://docs.opencv.org/trunk/d9/d61/tutorial_py_morphological_ops.html. Acesso em: 11 jun. 2020.

OPENCV. **Sobel Derivatives**. [S. l.], [2013]. Disponível em: https://docs.opencv.org/3.4/d2/d2c/tutorial_sobel_derivatives.html. Acesso em: 19 mai. 2021.

SPYDER. **Overview**. [S. l.], [2018]. Disponível em: <https://www.spyder-ide.org/>. Acesso em: 08 jun. 2020.