CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ANALISANDO A ROBUSTEZ DE REDES DE PASSES EM FUTEBOL USANDO REDES COMPLEXAS

Balthazar da Silva Cunha Paixão

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre.

Orientadores:
Prof. D.Sc. Glauco Fiorott Amorim

Rio de Janeiro,

12 de junho de 2026

Analisando a Robustez de Redes de Passes em Futebol usando Redes Complexas

Dissertação de Mestrado em Ciência da Computação, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ.

Balthazar da Silva Cunha Paixão

Aprovada por:

Presidente, Prof. Glauco Fiorott Amorim, D.Sc. (orientador)

Pedro Henrique González da Silva, D.Sc.

Cláudio Miceli de Farias, D.Sc.

Rio de Janeiro,

12 de junho de 2026

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

P149 Paixão, Balthazar da Silva Cunha
Analisando a robustez de redes de passes em futebol usando redes complexas / Balthazar da Silva Cunha Paixão. — 2026.
65f. : il. color. , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2026.
Bibliografia : f. 61-65
Orientador: Glauco Fiorott Amorim

1. Futebol. 2. Futebol - Treinamento técnico. 3. Teoria dos grafos. 4. Redes de computadores . I. Amorim, Glauco Fiorott. (Orient.). II. Título.

CDD 796.334

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

DEDICATÓRIA

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação ao meu pai, Marcelus Paixão (*in memoriam*), que sempre me motivou e incentivou a ingressar na área da computação, acompanhando de perto o início da minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe e ao meu irmão pelo apoio; aos amigos que sempre estiveram ao meu lado — cada um com a sua importância; ao meu orientador Prof. D.Sc. Glauco Fiorott Amorim, pelos ensinamentos e pela parceria; ao meu primeiro orientador Marcel, pelos direcionamentos acadêmicos e de vida; à minha psicóloga pelos incentivos; às demais pessoas que participaram e colaboraram em minha vida; e, por fim, ao órgão de fomento responsável por apoiar esta pesquisa.

RESUMO

Analisando a Robustez de Redes de Passes em Futebol usando Redes Complexas

Balthazar da Silva Cunha Paixão

Orientadores:
Prof. D.Sc. Glauco Fiorott Amorim

Resumo da Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre.

Este trabalho investiga a relação entre a estrutura das redes de passes no futebol e o sucesso competitivo das equipes ao longo de uma temporada. Partindo da hipótese de que propriedades estruturais dessas redes estão associadas ao sucesso competitivo, operacionalizado pela posição final na classificação, o futebol é modelado como um sistema complexo de interações coletivas. As redes de passes são representadas como grafos direcionados e ponderados, nos quais os vértices correspondem aos jogadores e as arestas aos passes realizados entre eles. Propõe-se a Importância de Homogeneidade de Grau (IHG), uma métrica fundamentada no intervalo interquartil da distribuição de passes, desenhada para mensurar a homogeneidade na participação dos atletas na rede de passes. A análise empírica considera cinco das principais ligas europeias — La Liga, Premier League, Ligue 1, Serie A e Bundesliga — na temporada 2015/16. Para cada equipe e partida, são construídas redes em estado integral, a partir das quais são calculadas métricas estruturais clássicas e aplicadas perturbações progressivas por meio da remoção de nós e arestas até um limite mínimo estrutural. Os dados sugerem que a IHG constitui um indicador estável para associar a organização da rede basal ao sucesso competitivo. Os resultados indicam que múltiplas propriedades topológicas apresentam associação com a posição final das equipes, embora com padrões distintos entre as ligas analisadas. Em particular, métricas associadas à conectividade global, coesão estrutural e reciprocidade mostram associações mais fortes em ligas como a Serie A e a Bundesliga. Por outro lado, a Premier League apresenta menor sensibilidade às métricas globais tradicionais, sendo a IHG a medida mais consistentemente associada ao desempenho, resultado interpretado à luz das especificidades da temporada atípica de 2015/16. A análise sob perturbação revela que a robustez estrutural não se distribui de maneira uniforme entre as métricas, sendo que apenas um subconjunto — sobretudo aqueles associados à coesão estrutural e, em menor grau, à eficiência de transporte — preserva capacidade discriminativa após a degradação da rede. Os achados indicam que não existe uma única propriedade estrutural determinante do sucesso competitivo, mas sim um conjunto de características topológicas cuja relevância depende do contexto competitivo. Por fim, o trabalho estabelece uma abordagem integrada para a análise estrutural e de robustez em redes de passes, permitindo avaliar não apenas a organização coletiva das equipes, mas também sua capacidade de preservar propriedades funcionais sob perturbações.

Palavras-chave: futebol; redes complexas; redes de passes; robustez em redes.

Rio de Janeiro,

12 de junho de 2026

ABSTRACT

Analyzing the Robustness of Passing Networks in Football Using Complex Networks

Balthazar da Silva Cunha Paixão

Advisors:
Prof. D.Sc. Glauco Fiorott Amorim

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of master.

This work investigates the relationship between the structure of passing networks in football and the competitive success of teams over a season. Starting from the hypothesis that structural properties of these networks are associated with competitive success, operationalized by final league standing, football is modeled as a complex system of collective interactions. Passing networks are represented as directed and weighted graphs, in which nodes correspond to players and edges represent passes exchanged between them. The Importance of Degree Homogeneity (IHG) metric is proposed, grounded in the interquartile range of structural importance measures, designed to quantify the homogeneity in players' participation within the network. The empirical analysis considers five major European leagues — La Liga, Premier League, Ligue 1, Serie A, and Bundesliga — in the 2015/16 season. For each team and match, passing networks are constructed, from which classical structural metrics are computed, followed by the application of progressive perturbations through node and edge removal until a minimum structural threshold is reached. The data suggest that IHG constitutes a stable indicator for associating network organization with competitive success. The results indicate that multiple topological properties are associated with teams' final standings. In particular, metrics related to global connectivity, structural cohesion, and reciprocity show stronger associations in leagues such as Serie A and Bundesliga. In contrast, the Premier League exhibits lower sensitivity to traditional global metrics, with IHG emerging as the measure most consistently associated with performance. The analysis under perturbation reveals that structural robustness is not uniformly distributed across metrics, as only a subset — particularly those associated with structural cohesion and, to a lesser extent, transport efficiency — preserves discriminative capacity after network degradation. The findings indicate that competitive success does not depend on a single structural property, but rather on a set of topological characteristics whose relevance varies according to the competitive context. Finally, this work establishes an integrated framework for structural and robustness analysis in passing networks, enabling the evaluation not only of teams' collective organization but also of their ability to preserve functional properties under perturbations.

Key-words: football; complex networks; passing networks; network robustness.

Rio de Janeiro,

12 de junho de 2026

Sumário

I Introdução **1**

II Referencial Teórico **5**

II.1 Teoria dos Grafos e Representação de Interações 5

II.1.1 Ciência de Redes e Sistemas Complexos 7

II.2 Robustez em Redes Complexas 8

II.3 Métricas 9

II.3.1 Seleção de Ataque por Métricas 9

II.3.2 Métricas de Avaliação da Robustez da Rede 10

II.3.3 Contribuição Original: Importância de Homogeneidade de Grau (IHG) 13

II.3.4 Considerações sobre o Escopo de Métricas e Testes Estatísticos 14

III Trabalhos relacionados **16**

III.1 Estratégia de Busca e Seleção de Estudos 16

III.1.1 Critérios de Inclusão e Exclusão 17

III.1.2 Fluxo de Seleção dos Estudos 18

III.2 Tabela Síntese dos Trabalhos 19

III.3 Consolidação metodológica e evolução das aplicações 20

III.4 Estrutura topológica e desempenho competitivo 20

III.5 Predição, contexto e estrutura fina das interações 21

III.6 Robustez estrutural e lacuna de pesquisa 21

IV Metodologia **23**

IV.1 Delimitação do Estudo e Ambiente Metodológico 24

IV.1.1 Critérios de Seleção e Origem dos Dados 24

IV.1.2 Ecossistema de Ferramentas 24

IV.2 Processamento de Dados e Construção da Rede 25

IV.2.1 Ingestão e Tratamento de Dados 25

IV.2.2 Tabela Transacional e Escopo de Análise 25

IV.2.3 Construção da Rede Direcionada e Ponderada 26

IV.3 Avaliação de Robustez por Perturbação Progressiva 26
IV.4 Inferência Estatística e Fluxo de Análise 27
IV.4.1 Coeficiente de Correlação de Spearman 27
IV.4.2 Algoritmo de Processamento 28

V Resultados 31
V.1 Topologia da Rede e Sucesso Competitivo 31
V.1.1 Eficiência de Transporte e Fluidez Tática 31
V.1.2 Coesão Estrutural e o Papel da Reciprocidade 33
V.1.3 A Importância de Homogeneidade de Grau como Indicador Estrutural 33
V.1.4 Sensibilidade ao Número de Jogadores na Rede Basal 36
V.1.5 Divergências entre Ligas: o Caso da Premier League 37
V.1.6 Resultados sob Remoções Progressivas até o Limite Mínimo Estrutural 38
V.1.7 Comparação entre Rede Completa e Rede sob Perturbação 48
V.1.8 Implicações Teóricas para a Robustez em redes de passes 52
V.1.9 Limitações da Análise Estática e Robustez Algébrica 54
V.2 Síntese Geral dos Resultados 54

VI Conclusão 57

Referências 61

Lista de Figuras

II.1 Tipos fundamentais de grafos aplicados à modelagem de sistemas. 6

II.2 Representação de redes distintas por meio de um mesmo grafo subjacente [Barabási, 2016] 7

II.3 Rede de passes do Brasil na final da Copa do Mundo de 1958 contra a Suécia [Paixão, 2024] 8

III.1 Fluxograma de seleção de estudos baseado no protocolo PRISMA 18

IV.1 Fluxo metodológico da análise de redes de passes 23

V.1 Distribuição do intervalo interquartil (IQR) da participação estrutural dos jogadores em função da posição final para Bundesliga (acima) e Premier League (abaixo). As linhas tracejadas representam a tendência linear em cada liga. 34

V.2 Exemplo ilustrativo da degradação progressiva das métricas estruturais sob remoção de nós (Bundesliga, 13 jogadores). As curvas representam a evolução média das métricas à medida que a fração de jogadores removidos aumenta, considerando estratégias aleatórias e direcionadas (grau e `betweenness`). 39

V.3 Exemplo ilustrativo da degradação progressiva das métricas estruturais sob remoção de arestas (Bundesliga, 13 jogadores). As curvas representam a evolução média das métricas à medida que a fração de conexões removidas aumenta, considerando estratégias aleatórias, por peso e por betweenness. 40

V.4 Proporção de resultados estatisticamente significativos por métrica e cenário de remoção. 50

Lista de Tabelas

II.1 Resumo das métricas estruturais 15

III.1 Distribuição temporal dos artigos retornados pela busca na Scopus 17

III.2 Síntese dos trabalhos relacionados 19

IV.1 Parâmetros do Método de Remoção 27

V.1 Correlação de Spearman entre métricas estruturais e posição final nas ligas (2015/16) 32

V.2 Síntese do número de cenários significativos por configuração de jogadores na rede basal (de um total de 10 cenários) 37

V.3 Síntese interpretativa dos padrões observados na rede completa e após remoções 49

V.4 Proporção de resultados estatisticamente significativos por métrica na rede completa e após remoções (percentuais arredondados) 50

Lista de Acrônimos

ACELab	Analytics for Competitive Excellence Laboratory.
CEFET/RJ	Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.
FAME	Football Analytics and Modeling Experience.
IHG	Importance of Degree Homogeneity.
IHG	Importância de Homogeneidade de Grau.
LSCC	Largest Strongly Connected Component.
SAFE	Symposium on Analytics for Football Excellence.
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais.
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Capítulo I Introdução

A compreensão do próprio desempenho e do comportamento dos adversários constitui um elemento central para a tomada de decisão no esporte de alto rendimento, pois permite adaptação estratégica e otimização do desempenho coletivo. Essa perspectiva está presente de forma explícita e implícita em diferentes áreas da pesquisa esportiva, abrangendo desde análises táticas até estudos em psicologia do esporte [Rogowska and Tataruch, 2024; Gredin et al., 2023; Konings et al., 2019]. Em modalidades coletivas, essa compreensão emerge não apenas de atributos individuais, mas sobretudo das interações entre os jogadores e das dinâmicas coletivas que se estabelecem ao longo das partidas.

Além de sua relevância esportiva, o futebol constitui um fenômeno global com impacto significativo em dimensões econômicas, sociais e culturais. Do ponto de vista econômico, o futebol movimenta anualmente centenas de bilhões de dólares em receitas diretas e indiretas, abrangendo direitos de transmissão, patrocínios e transferências internacionais de atletas, configurando-se como uma indústria global altamente estruturada Gammelsæter [2021]; Liu et al. [2016]; Singh [2020]. Sob a perspectiva social, o futebol atua como um elemento de integração entre diferentes culturas, atuando como um mecanismo de coesão social com impacto transversal em diferentes contextos culturais que transcendem as fronteiras geográficas e linguísticas Li and Mateos [2022]; Félix et al. [2020].

Nesse contexto, compreender os mecanismos estruturais que sustentam o desempenho coletivo das equipes torna-se uma questão não apenas esportiva, mas também científica, especialmente sob a ótica de sistemas complexos.

O crescimento exponencial na produção de dados, impulsionado pelo advento da internet e pela evolução da capacidade de processamento dos computadores, facilitou a coleta e o armazenamento de informações esportivas em níveis sem precedentes. A combinação desses fatores permitiu que a área de análise esportiva evoluísse de observações puramente subjetivas para abordagens baseadas em evidências quantitativas. Atualmente, observa-se uma proliferação de publicações na área, tanto em periódicos acadêmicos quanto em plataformas digitais, onde analistas independentes e entusiastas integram competências técnicas de manipulação de dados com o conhecimento prático da modalidade, especialmente no futebol [Van Roy et al., 2020; Singh, 2020].

Os esportes coletivos de invasão são definidos pelo objetivo de invadir o território adversário para

marcar pontos, ao mesmo tempo em que se defende a própria área [Azzopardi et al., 2022]. Sob essa definição, o futebol se enquadra como um esporte coletivo de invasão caracterizado pela interação contínua entre múltiplos jogadores, decisões estratégicas em tempo real e elevada densidade de eventos durante uma partida. Considerando o número de agentes envolvidos, a variedade de ações possíveis e o caráter dinâmico do jogo, a análise do futebol configura-se como uma tarefa de alta complexidade [Arriaza-Ardiles et al., 2018; Estanislau, 2016]. Essa complexidade torna inadequadas abordagens puramente individuais, reforçando a necessidade de métodos capazes de capturar o comportamento coletivo e relacional das equipes.

Como o esporte mais popular do mundo, atraindo anualmente bilhões de espectadores [Félix et al., 2020; Li and Mateos, 2022], o futebol gera um interesse que vai além do entretenimento, impulsionando um enorme mercado de análise de desempenho. Identificar padrões de jogo, prever resultados e avaliar a performance individual e coletiva para explicar o sucesso ou fracasso das equipes faz parte tanto do debate popular quanto da prática profissional [Cintia et al., 2015; Hewitt et al., 2016; Van Roy et al., 2020]. Nesse contexto, treinadores e comissões técnicas buscam explorar os pontos fortes de suas equipes e as fragilidades dos adversários como estratégia fundamental para alcançar melhores resultados competitivos.

Ainda que se trate de uma tarefa multifacetada, o desenvolvimento de novas metodologias de análise é parte integrante do cotidiano das principais equipes deste esporte [Arriaza-Ardiles et al., 2018; Llana et al., 2020; Forcher, 2023]. Entre os focos de observação mais recorrentes estão a análise de passes, sequências de passes, agrupamentos espaciais, movimentos coletivos e interações entre jogadores [Malqui et al., 2019; Marcelino et al., 2020; Gudmundsson and Wolle, 2014]. Além disso, aspectos táticos podem ser categorizados em estratégias defensivas, ofensivas, individuais, coletivas e sistemas de jogo, ampliando ainda mais o espaço analítico disponível [Moura, 2011]. Esses elementos reforçam o caráter sistêmico do futebol e a necessidade de abordagens que considerem o jogo como um todo integrado.

Nesse sentido, diversas técnicas computacionais têm sido aplicadas ao estudo do futebol para lidar com a complexidade inerente à modalidade. Destacam-se o uso de métodos de agrupamento (*clustering*) para a identificação de padrões de movimento e estilos de jogo [Gudmundsson and Wolle, 2014; Malqui et al., 2019], a engenharia de atributos para o treinamento de modelos de aprendizado de máquina [Forcher et al., 2023; Merckx et al., 2021], e a análise de séries temporais voltada à compreensão da dinâmica e da evolução dos sistemas esportivos [Moura, 2011]. Tais abordagens oferecem uma base sólida para a interpretação quantitativa de dados brutos, permitindo transformar registros de eventos em conhecimento tático estruturado.

Dentre essas abordagens, a Ciência de Redes Complexas destaca-se como particularmente adequada para a modelagem do futebol, por permitir representar explicitamente as interações entre

jogadores e capturar a estrutura relacional do jogo [Buldú et al., 2018; Passos et al., 2011; Rodrigues, 2017]. Essa abordagem fundamenta-se na representação das equipes como grafos, nos quais os atletas são visualizados como vértices (nós) e suas interações — sejam trocas de passes ou relações de proximidade espacial — são configuradas como arestas (*links*). Essa perspectiva sistêmica permite a extração de métricas topológicas, tais como grau de conectividade, centralidade e detecção de comunidades, fornecendo inferências críticas sobre a coesão coletiva, a organização tática e a robustez das equipes frente ao adversário.

Apesar dos avanços na análise de redes aplicadas ao futebol, a literatura ainda apresenta uma limitação relevante: a maioria dos estudos concentra-se na caracterização estrutural das redes de passes, sem investigar de forma explícita sua relação com a robustez do sistema sob diferentes condições.

Em particular, permanece pouco explorada a conexão entre a organização estrutural basal das interações e a capacidade das equipes de preservar o desempenho diante de perturbações, como a neutralização de jogadores-chave ou a interrupção de padrões de jogo.

Diante dessa lacuna, este trabalho propõe investigar *se propriedades estruturais das redes de passes podem atuar como indicadores indiretos de robustez e, consequentemente, de sucesso competitivo.*

Neste trabalho, o conceito de robustez é tratado sob duas perspectivas complementares:

- **Robustez estrutural basal**: refere-se às propriedades intrínsecas da rede observada, sem qualquer perturbação, refletindo o quão eficiente, conectada e coesa é a estrutura de interações da equipe.
- **Robustez sob perturbação**: refere-se à capacidade da rede de preservar suas propriedades estruturais quando submetida à remoção progressiva de nós ou arestas, simulando cenários de falha ou neutralização de elementos-chave.

Enquanto a robustez basal descreve o estado estrutural da rede, a robustez sob perturbação captura sua resiliência dinâmica frente a disrupções.

Como contribuição original, este trabalho propõe a IHG como uma nova medida para capturar a distribuição da importância estrutural entre os jogadores em redes de passes. Diferentemente de métricas tradicionais que enfatizam centralidade ou intensidade de interações, a IHG busca quantificar o grau de concentração ou dispersão da participação dos jogadores no sistema.

Essa abordagem permite interpretar a rede não apenas em termos de eficiência, mas também de dependência estrutural, oferecendo um indicador indireto da robustez da equipe. Redes com maior homogeneidade na distribuição de interações tendem, sob essa perspectiva, a apresentar menor vulnerabilidade à perda de jogadores específicos.

Os resultados obtidos sugerem associações estatisticamente significativas entre métricas estruturais das redes de passes e o desempenho das equipes ao longo das competições analisadas, indicando que a organização relacional do jogo desempenha um papel relevante no sucesso esportivo. Esses achados contribuem para a compreensão do futebol sob a perspectiva de sistemas complexos e reforçam o potencial da Ciência de Redes como ferramenta analítica no contexto esportivo.

Neste trabalho, a robustez é abordada como uma propriedade estrutural emergente, investigada inicialmente por meio da caracterização do estado basal das redes de passes e da validação de métricas capazes de capturar padrões associados à resiliência coletiva. Essa etapa estabelece a base necessária para análises dinâmicas futuras envolvendo a remoção progressiva de nós e arestas, demonstrada posteriormente.

Apesar do rigor metodológico adotado, este estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados.

Em relação aos dados, a utilização do *StatsBomb Open Data* implica restrições inerentes à cobertura e ao nível de detalhamento das informações disponíveis. Em particular, a base não contempla dados completos de todas as competições e temporadas, além de não incluir informações contínuas de posicionamento dos jogadores (*tracking data*), o que limita a modelagem de aspectos espaciais mais refinados das interações em campo. Dessa forma, a análise restringe-se a eventos discretos de passe, não capturando integralmente o contexto tático e defensivo das equipes.

No que diz respeito à modelagem, a representação do jogo como uma rede de passes constitui uma simplificação do sistema real, desconsiderando outros tipos de interação relevantes, como movimentações sem bola, pressão defensiva e ocupação espacial. Adicionalmente, a definição de um conjunto analítico restrito aos jogadores com maior tempo em campo, embora necessária para garantir estabilidade estatística, pode introduzir viés ao sub-representar contribuições de jogadores com menor tempo em campo, como substituições.

Do ponto de vista metodológico, a análise baseia-se em correlações entre métricas estruturais e posição final nas ligas, o que não permite inferir relações causais entre estrutura de rede e desempenho esportivo. Além disso, a agregação das métricas ao nível da equipe ao longo da temporada pode suavizar variações importantes entre partidas individuais.

O restante desta dissertação de mestrado está organizado da seguinte forma: o Capítulo II apresenta o referencial teórico que fundamenta o trabalho; o Capítulo III discute os principais trabalhos relacionados; o Capítulo IV descreve a metodologia adotada; o Capítulo V apresenta e analisa os resultados obtidos; e o Capítulo VI discute as conclusões, limitações e direções para trabalhos futuros.

Capítulo II Referencial Teórico

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que sustentam esta dissertação, estabelecendo a base conceitual necessária para a modelagem, análise e interpretação das redes de passes no futebol. A discussão inicia-se pela Teoria dos Grafos, introduzindo os elementos formais essenciais à representação das interações entre jogadores, e avança para a Ciência de Redes, responsável por estender esse formalismo à análise de sistemas complexos reais. Em seguida, são abordados os conceitos de robustez estrutural e as métricas utilizadas para caracterizar a degradação das redes, culminando na apresentação da contribuição original deste trabalho.

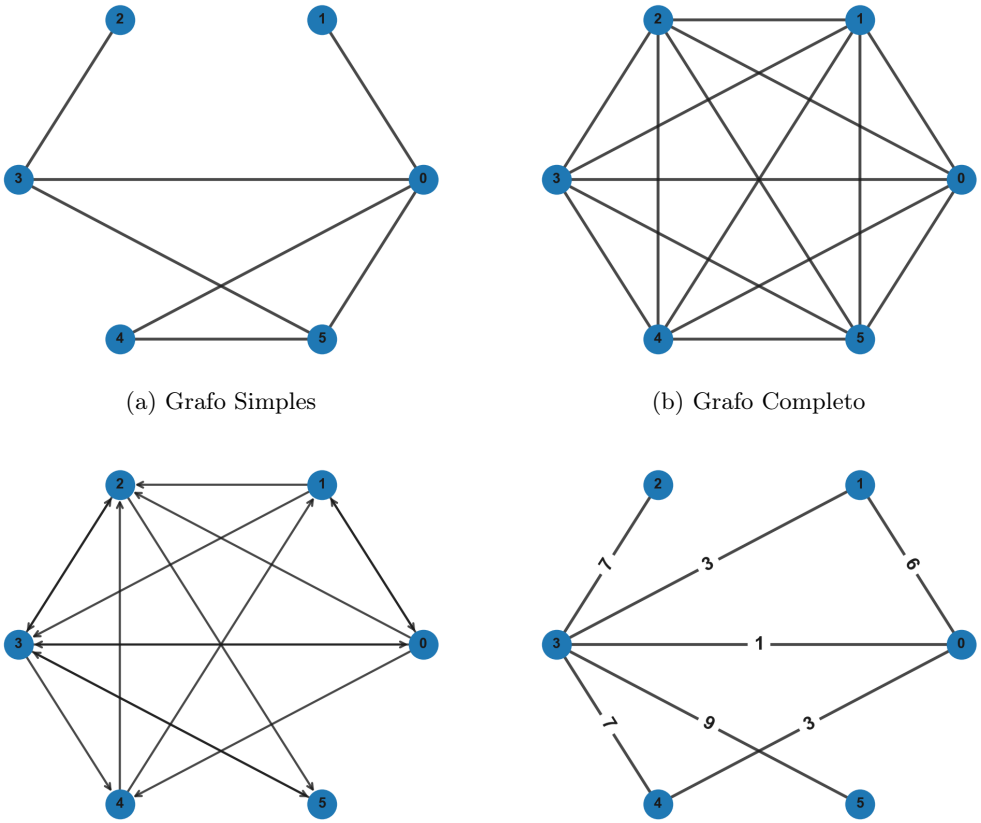
II.1 Teoria dos Grafos e Representação de Interações

A Teoria dos Grafos constitui um ramo da Matemática Discreta dedicado à representação de sistemas formados por entidades discretas e pelas relações estabelecidas entre elas [Papakitsos et al., 2015]. Historicamente, seu desenvolvimento é associado ao trabalho de Leonhard Euler, em 1735, a partir da formulação do problema das Sete Pontes de Königsberg. Desde então, os grafos consolidaram-se como uma ferramenta formal capaz de abstrair fenômenos do mundo real em estruturas matemáticas, permitindo a análise sistemática de conectividade e organização estrutural [Barabási, 2016].

Formalmente, um grafo é definido como uma estrutura $G = (V, E)$, em que V representa o conjunto de vértices e $E \subseteq V \times V$ representa o conjunto de arestas. No caso particular desta pesquisa, as redes de passes são modeladas como grafos dirigidos e ponderados, podendo ser representadas por $G = (V, E, W)$, em que $W : E \to \mathbb{R}^+$ associa a cada aresta um peso correspondente à intensidade da interação observada.

- **Grafos simples**, nos quais não são permitidos laços (uma aresta que conecta um vértice a ele mesmo) nem múltiplas arestas entre um mesmo par de vértices;
- **Grafos completos**, nos quais existe uma aresta entre todo par de vértices, representando conectividade máxima;
- **Grafos direcionados**, nos quais as arestas possuem orientação, permitindo representar o sentido das interações;

- **Grafos ponderados**, nos quais pesos associados às arestas quantificam a intensidade das relações.



(a) Grafo Simples

(b) Grafo Completo

(c) Grafo dirigido

(d) Grafo Ponderado

Figura II.1: Tipos fundamentais de grafos aplicados à modelagem de sistemas.

Embora a Teoria dos Grafos forneça um formalismo matemático rigoroso, sua aplicação direta apresenta limitações na descrição de sistemas reais de grande escala, nos quais padrões globais e comportamentos coletivos emergem da interação entre múltiplos componentes. Tais limitações motivam o emprego de abordagens mais abrangentes, capazes de capturar propriedades estatísticas e estruturais não triviais observadas em sistemas complexos.

No contexto desta dissertação, os conceitos da Teoria dos Grafos não são explorados em sua generalidade abstrata, mas operacionalizados especificamente para a modelagem das interações coletivas no futebol. A utilização de grafos direcionados e ponderados permite representar simultaneamente o sentido e a intensidade dos passes, enquanto a ausência de laços e arestas múltiplas reflete restrições naturais do jogo. Dessa forma, a Teoria dos Grafos fornece o alicerce formal necessário para a construção das redes de passes analisadas ao longo do trabalho.

II.1.1 Ciência de Redes e Sistemas Complexos

A Ciência de Redes, também denominada Ciência das Redes Complexas, estende os fundamentos da Teoria dos Grafos para a análise de sistemas reais caracterizados por padrões de conectividade não aleatórios [Barabási, 2016]. Essa abordagem permite identificar propriedades emergentes — como medidas estruturais, presença de hubs, modularidade e efeitos de mundo pequeno — que não podem ser explicadas apenas pela conectividade local.

Uma característica central da Ciência de Redes é a possibilidade de representar sistemas distintos por meio de um mesmo grafo subjacente, conforme ilustrado na Figura II.2. Na imagem, o mesmo grafo representa em: a) uma rede de computadores, b) atores que participaram dos mesmos filmes, c) redes de proteínas, e d) o grafo em si. Nessa perspectiva, a topologia da rede sintetiza a estrutura relacional do sistema, independentemente da natureza específica de seus componentes.

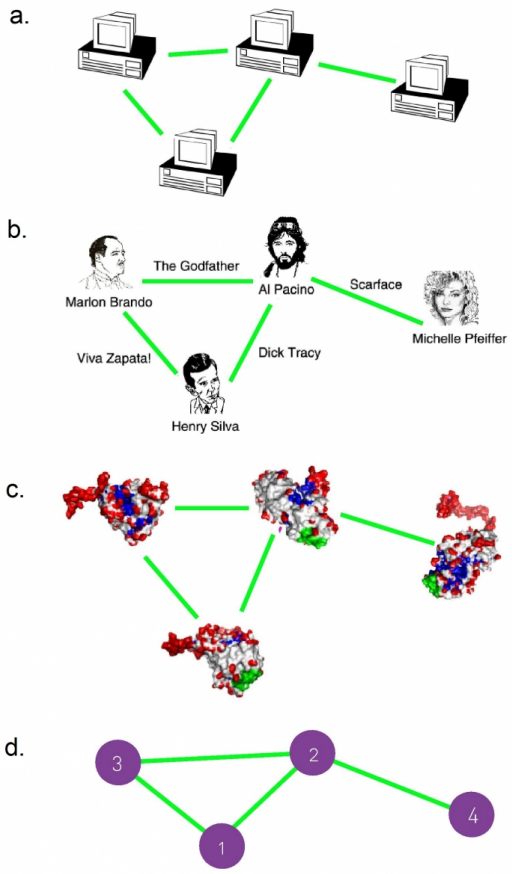


Figura II.2: Representação de redes distintas por meio de um mesmo grafo subjacente [Barabási, 2016]

No futebol, as redes de passes emergem de processos táticos, decisões estratégicas e restrições espaciais específicas do jogo, não sendo resultado de conexões aleatórias. Assim, a abordagem de redes complexas mostra-se particularmente adequada para capturar padrões coletivos de organização

e dependência estrutural entre jogadores, indo além de métricas puramente locais.

Nesse contexto, a rede de passes não deve ser interpretada como um objeto estático, mas como uma representação dinâmica do fluxo de posse de bola. A análise dessas redes exige métricas topológicas capazes de revelar a importância estrutural dos jogadores e a eficiência coletiva do sistema frente às ações do adversário, conforme ilustrado na Figura II.3. Nessa imagem é possível observar cada jogador da seleção brasileira como os vértices em amarelo e seus respectivos números das camisas em azul, as setas bidirecionais representam as arestas e o seu sentido, a espessura das arestas é proporcional à quantidade de passes trocados, e por fim a posição de cada vértice no campo é a posição média de onde saíram os passes dos jogadores.

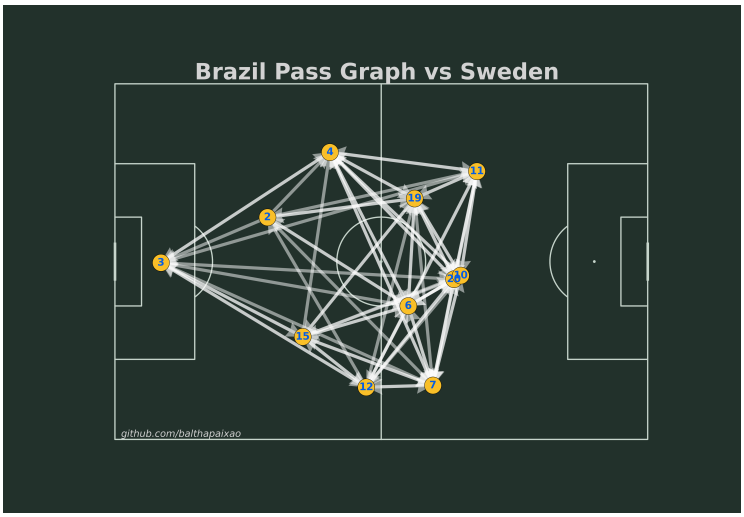


Figura II.3: Rede de passes do Brasil na final da Copa do Mundo de 1958 contra a Suécia [Paixão, 2024]

II.2 Robustez em Redes Complexas

Em sistemas complexos, a robustez está associada à capacidade de preservar funcionalidades essenciais mesmo diante de perturbações estruturais [Barabási, 2016]. Uma rede é considerada robusta quando suas propriedades globais — como conectividade, eficiência ou capacidade de fluxo — degradam-se de forma gradual frente à remoção de elementos, em oposição a colapsos abruptos observados em estruturas vulneráveis.

No estudo de redes, distinguem-se dois tipos principais de perturbação: falhas aleatórias, que simulam eventos imprevisíveis, e ataques direcionados, nos quais a remoção é guiada por métricas de importância estrutural. Esses conceitos fornecem o arcabouço teórico para a análise de resiliência em diversos domínios.

No futebol, a robustez pode ser interpretada como a capacidade da equipe de manter padrões funcionais de circulação e conectividade mesmo diante de interrupções táticas, como marcações direcionadas, expulsões ou neutralização de jogadores-chave. Sob essa perspectiva, a robustez deixa

de ser apenas uma propriedade abstrata da rede e passa a representar a capacidade funcional do coletivo, orientando a escolha das métricas de avaliação e a concepção dos experimentos de perturbação adotados neste estudo.

II.3 Métricas

Neste trabalho, a caracterização estrutural das redes de passes é realizada por meio de um conjunto de métricas provenientes da Ciência de Redes, selecionadas por sua capacidade de capturar diferentes dimensões da organização coletiva das equipes. Essas medidas incluem descritores de conectividade, eficiência de circulação, coesão estrutural e padrões de interação entre os jogadores, permitindo uma análise integrada tanto da configuração global da rede quanto de aspectos funcionais relevantes para o desempenho esportivo.

II.3.1 Seleção de Ataque por Métricas

Antes da aplicação de perturbações estruturais, cada rede é caracterizada por meio de métricas clássicas adequadas a grafos direcionados e ponderados. Essas métricas capturam propriedades complementares relacionadas à conectividade, à proeminência dos nós e à coesão estrutural, servindo como referência conceitual para a interpretação dos processos de degradação analisados posteriormente.

Neste trabalho, destacam-se duas métricas amplamente consolidadas na literatura:

- **Centralidade de Intermediação (*Betweenness*)**, que quantifica a frequência com que um nó ou aresta participa dos caminhos mais curtos entre pares de nós, sendo interpretada como um indicador de gargalos ou pontos de articulação estrutural;
- **Grau Ponderado**, que expressa a intensidade total das interações incidentes a um nó, refletindo sua participação global na circulação da bola.

A opção por essas métricas como critérios principais de remoção, em detrimento de medidas como PageRank ou centralidade de autovetor, deve-se à sua interpretação mais direta no contexto do futebol, permitindo associar os processos de ataque a cenários táticos plausíveis, como a neutralização de organizadores centrais ou distribuidores primários de passes. No entanto, medidas derivadas do PageRank permanecem conceitualmente relevantes como descritores auxiliares da concentração de influência estrutural, sendo consideradas neste trabalho apenas por meio da amplitude de sua distribuição, e não como eixo principal de análise ou seleção de ataque.

II.3.2 Métricas de Avaliação da Robustez da Rede

A avaliação da integridade estrutural das redes de passes é realizada por meio de um conjunto de medidas que capturam dimensões complementares da conectividade, da coesão, da eficiência e da organização global do sistema. Em conjunto, essas medidas permitem descrever tanto a configuração basal da rede quanto as alterações observadas sob processos de degradação estrutural.

Considerações sobre Métricas de Rede

Embora o termo "métricas" seja amplamente utilizado na literatura de redes complexas para descrever medidas estruturais de grafos, é importante destacar que muitas dessas medidas não constituem métricas no sentido estrito da matemática. Uma métrica formal deve satisfazer propriedades como não-negatividade, identidade dos indiscerníveis, simetria e desigualdade triangular.

Diversas das medidas utilizadas neste trabalho — como eficiência global, densidade e reciprocidade — não atendem simultaneamente a todos esses axiomas, sendo mais apropriadamente classificadas como funções de avaliação estrutural ou pseudométricas. No entanto, o uso consolidado do termo "métricas" na literatura justifica sua adoção neste contexto, desde que interpretado em sentido amplo.

Comprimento Médio do Caminho Mais Curto

O comprimento médio do caminho mais curto quantifica a distância geodésica média entre pares de nós alcançáveis, refletindo o grau de integração topológica da rede. Em redes de passes dirigidas, essa medida é calculada apenas sobre pares alcançáveis, evitando distorções associadas a distâncias infinitas. Valores reduzidos indicam estruturas mais integradas e com maior fluidez potencial de circulação, enquanto aumentos progressivos sugerem fragmentação e perda de eficiência topológica.

$$L = \frac{1}{|\mathcal{P}|} \sum_{(i,j)\in\mathcal{P}} d(i,j)$$

em que $\mathcal{P} = \{(i,j) \in V \times V : i \neq j \text{ e } d(i,j) < \infty\}$ representa o conjunto de pares ordenados alcançáveis, e $d(i,j)$ denota a distância do caminho mais curto entre os nós i e j.

Densidade da Rede

A densidade expressa a proporção de conexões existentes em relação ao número máximo teoricamente possível. Em redes de passes, densidades mais elevadas sugerem maior diversidade de interações, enquanto valores reduzidos refletem estruturas mais seletivas ou hierarquizadas.

$$D = \frac{|E|}{|V|(|V|-1)}$$

em que $|E|$ representa o número de arestas observadas e $|V|(|V|-1)$ corresponde ao número máximo de arestas possíveis nesse tipo de rede, considerando grafos dirigidos simples sem laços.

Eficiência Global

A eficiência global mede a capacidade média da rede de transmitir interações por meio de caminhos curtos, penalizando menos fortemente pares desconectados e enfatizando a contribuição das rotas mais eficientes.

$$E_{\text{glob}} = \frac{1}{|V|(|V|-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d(i,j)}$$

em que, por convenção, $1/d(i,j) = 0$ quando não existe caminho dirigido entre i e j.

Maior Autovalor da Matriz de Adjacência

O maior autovalor da matriz de adjacência sintetiza aspectos de densidade, heterogeneidade e concentração de interações, estando associado à coesão estrutural global da rede.

$$\lambda_{max} = \max\{\lambda_i : \lambda_i \in \sigma(A)\}$$

em que $\sigma(A)$ denota o espectro da matriz de adjacência A, isto é, o conjunto de seus autovalores.

Fração do Maior Componente Fortemente Conexo (LSCC)

A fração do maior componente fortemente conexo representa a proporção de nós pertencentes ao núcleo estrutural no qual a circulação bidirecional de passes é possível, refletindo o grau de integração direcional do sistema.

$$LSCC = \frac{|C_{max}|}{|V|}$$

em que C_{max} representa o maior componente fortemente conexo da rede.

Alcançabilidade

A alcançabilidade quantifica a proporção de pares ordenados de nós para os quais existe ao menos um caminho dirigido conectando o nó de origem ao nó de destino. Trata-se de uma medida particularmente sensível à presença de assimetrias estruturais e à fragmentação direcional da rede.

$$R = \frac{1}{|V|(|V|-1)} \sum_{i \neq j} \mathbb{I}(i \rightsquigarrow j)$$

em que $\mathbb{I}(i \rightsquigarrow j)$ é uma função indicadora que assume valor 1 quando existe um caminho dirigido de i para j, e 0 caso contrário.

Reciprocidade

A reciprocidade mede a proporção de arestas direcionadas que possuem uma aresta correspondente no sentido oposto, refletindo o grau de mutualidade nas interações da rede. Em redes de passes, essa métrica está associada à presença de trocas bidirecionais entre jogadores, indicando padrões mais equilibrados de circulação da bola.

$$\rho_{rec} = \frac{|\{(i,j) \in E : (j,i) \in E\}|}{|E|}$$

em que E representa o conjunto de arestas direcionadas da rede. O numerador contabiliza o número de arestas que possuem uma aresta recíproca correspondente, enquanto o denominador corresponde ao número total de arestas.

Valores mais elevados indicam maior presença de relações bidirecionais entre pares de nós, sugerindo estruturas mais colaborativas e menos hierarquizadas.

Segundo Menor Autovalor do Laplaciano

O segundo menor autovalor da matriz Laplaciana, denotado por λ_2, é uma medida espectral associada à conectividade global da rede, sendo frequentemente interpretado como um indicador de coesão estrutural e resistência à fragmentação [Boccaletti et al., 2006; Herrera-Diestra et al., 2020; Ichinose et al., 2021].

$$\lambda_2 = \text{segundo menor valor de } \sigma(L)$$

em que L representa a matriz Laplaciana da rede e $\sigma(L)$ denota o conjunto de seus autovalores. A matriz Laplaciana é definida como $L = D - A$, em que D é a matriz diagonal de graus e A é a matriz de adjacência. Para fins de análise, essa formulação é aplicada sobre a representação não direcionada da rede, de modo a preservar a interpretação clássica da conectividade algébrica.

No contexto deste trabalho, essa medida é interpretada como um descritor espectral da coesão global da rede, sendo sensível à presença de gargalos estruturais e à redundância de caminhos. Valores mais elevados de λ_2 indicam maior conectividade global, enquanto valores próximos de zero sugerem estruturas mais vulneráveis à fragmentação.

Para fins de análise, essa métrica é calculada a partir da representação laplaciana adotada para a rede, compatível com a modelagem estrutural considerada.

Amplitude do PageRank

Embora o PageRank não seja utilizado neste trabalho como métrica principal de análise ou critério de seleção de ataque, sua formulação serve de base para um descritor auxiliar da concentração

de influência estrutural na rede. Originalmente proposto para avaliar relevância em redes direcionadas, o PageRank atribui maior importância a nós que recebem conexões provenientes de outros nós também relevantes. Em redes de passes, essa lógica pode ser interpretada como uma forma de prestígio ou influência estrutural dirigida.

Sua formulação pode ser expressa como:

$$PR(i) = \frac{1-\alpha}{|V|} + \alpha \sum_{j \in M(i)} \frac{PR(j)}{k_j^{out}}$$

em que $PR(i)$ representa o valor de PageRank do nó i, $\alpha \in (0,1)$ é o fator de amortecimento, $M(i)$ é o conjunto de nós que possuem arestas direcionadas para i, e k_j^{out} corresponde ao grau de saída do nó j.

A partir dessa medida, define-se a amplitude do PageRank como a diferença entre o maior e o menor valor observado na rede:

$$A_{PR} = \max_{i \in V} PR(i) - \min_{i \in V} PR(i)$$

em que A_{PR} representa a amplitude da distribuição de PageRank.

Valores elevados de A_{PR} indicam maior concentração de influência estrutural em um subconjunto reduzido de nós, sugerindo uma organização mais hierarquizada e potencialmente mais dependente de poucos jogadores estruturalmente relevantes. Em contraste, valores reduzidos indicam distribuição mais homogênea dessa influência.

No contexto desta dissertação, a amplitude do PageRank é empregada como contraponto conceitual à IHG. Enquanto A_{PR} enfatiza a concentração hierárquica de prestígio estrutural, a IHG busca capturar a dispersão da participação ponderada entre os jogadores. Essa oposição é particularmente relevante para a discussão dos resultados, pois permite comparar duas perspectivas distintas sobre dependência estrutural: uma centrada na concentração de influência e outra na distribuição funcional da carga relacional.

Ressalta-se que os valores individuais de PageRank não são utilizados diretamente nas análises estatísticas, sendo considerados apenas como base para o cálculo da amplitude de sua distribuição.

II.3.3 Contribuição Original: Importância de Homogeneidade de Grau (IHG)

Adicionalmente às métricas clássicas, propõe-se neste trabalho uma métrica inédita destinada a quantificar a homogeneidade da importância estrutural dos jogadores na rede de passes. Parte-se da hipótese de que equipes com distribuição mais homogênea das interações tendem a apresentar maior potencial de resiliência estrutural ao longo da competição. Essa métrica, denominada Importância de Homogeneidade de Grau (IHG), é empregada como descritor estrutural complementar.

Cálculo da Homogeneidade via Intervalo Interquartil

A métrica IHG fundamenta-se na distribuição empírica do grau ponderado dos nós, utilizando o intervalo interquartil como medida robusta de dispersão. Sua formulação é dada por:

$$IHG = Q_3(\{k_1^w, k_2^w, \ldots, k_n^w\}) - Q_1(\{k_1^w, k_2^w, \ldots, k_n^w\})$$

em que k_i^w representa o grau ponderado do nó i (quantidade de passes), enquanto Q_1 e Q_3 correspondem, respectivamente, ao primeiro e ao terceiro quartis da distribuição desses valores.

Valores reduzidos indicam maior homogeneidade estrutural e menor dependência de jogadores dominantes, características interpretadas neste trabalho como indícios de maior equilíbrio funcional do sistema. Ressalta-se que, para o cálculo da IHG, a direção das arestas não é considerada, uma vez que o objetivo da métrica é avaliar o equilíbrio global da participação dos jogadores, independentemente do sentido das interações.

Nesse sentido, a IHG não busca medir prestígio estrutural ou centralidade hierárquica, mas sim o grau de concentração da participação ponderada entre os jogadores. Essa distinção é central para a proposta desta dissertação, pois desloca a análise da identificação de nós dominantes para a avaliação da distribuição funcional da carga relacional no sistema coletivo.

II.3.4 Considerações sobre o Escopo de Métricas e Testes Estatísticos

Embora outras métricas — como centralidade de proximidade, autovetor, PageRank, ou medidas baseadas em comunidades — tenham sido consideradas no delineamento inicial do estudo, optou-se por restringir o núcleo principal da análise às métricas apresentadas. No caso do PageRank, não se utiliza o valor individual da centralidade como variável analítica principal, mas apenas a amplitude de sua distribuição, com o objetivo de capturar a concentração hierárquica de influência estrutural. Essa decisão fundamenta-se na consolidação dessas métricas na literatura sobre robustez em redes complexas e na necessidade de manter um escopo analítico controlado, priorizando clareza interpretativa e profundidade analítica.

Tabela II.1: Resumo das métricas estruturais

Métrica	**Dimensão estrutural**	**Interpretação no futebol**
Comprimento médio do caminho mais curto	Integração topológica	Fluidez potencial da circulação
Densidade	Saturação relacional	Diversidade de conexões de passe
Eficiência global	Eficiência funcional	Facilidade de transmissão das interações
Maior autovalor	Coesão global	Intensidade e organização estrutural
LSCC	Conectividade forte	Núcleo bidirecional de circulação
Alcançabilidade	Acessibilidade dirigida	Potencial de propagação entre jogadores
Reciprocidade	Mutualidade relacional	Trocas bidirecionais de passe
Segundo menor autovalor	Coesão algébrica	Sensibilidade a gargalos estruturais
Amplitude do PageRank	Hierarquia de influência	Concentração desigual de importância estrutural
IHG	Dispersão da participação	Não dependência estrutural de jogadores-chave

Para os testes estatísticos buscando encontrar a correlação entre as métricas de rede utilizadas e a classificação final das equipes no campeonato, foi utilizado o coeficiente de correlação de postos de Spearman (ρ). A escolha por este teste não paramétrico justifica-se por dois motivos centrais: primeiro, a variável de desempenho (posição na tabela) possui natureza estritamente ordinal; segundo, as métricas de redes complexas frequentemente apresentam distribuições não normais e a presença de *outliers* (como jogadores com grau de conectividade muito acima da média, atuando como *hubs*), cenário no qual Spearman é ideal para capturar relações monótonas [Moore et al., 2017; Dancey and Reidy, 2017].

Como alternativas a esse método, tínhamos os testes de correlação de Pearson (r) e o coeficiente Tau de Kendall (τ). O teste de Pearson foi desconsiderado por ser um método paramétrico que assume a normalidade da distribuição dos dados e exige uma relação estritamente linear entre variáveis contínuas, premissas que são violadas pela estrutura assimétrica das redes e pela natureza ordinal do ranqueamento [Akoglu, 2018]. Por outro lado, o Tau de Kendall, embora seja uma alternativa não paramétrica válida e aplicada na literatura para comparar ordenações [Criado et al., 2013], foi preterido em favor de Spearman por este último ser mais sensível à magnitude das diferenças entre os postos.

Capítulo III Trabalhos relacionados

A aplicação da Ciência de Redes à análise do futebol tem se consolidado progressivamente ao longo da última década, impulsionada pelo aumento da disponibilidade de dados de eventos e pelo interesse crescente em compreender o jogo como um sistema coletivo complexo. Esse crescimento, no entanto, não ocorreu de maneira homogênea: a maior parte da literatura concentra-se na modelagem de redes de passes em sua forma integral, na caracterização de propriedades topológicas e na investigação de associações entre métricas estruturais e desempenho esportivo, enquanto a análise explícita da robustez estrutural sob perturbação permanece relativamente pouco explorada.

Em geral, os estudos podem ser organizados em quatro eixos complementares: (i) revisões e consolidações metodológicas (Seção III.3), (ii) associação entre propriedades topológicas e desempenho (Seção III.4), (iii) predição, contexto e estrutura fina das interações (Seção III.5), e (iv) análise de robustez por perturbações estruturais (Seção III.6). Este capítulo sintetiza os trabalhos mais próximos do escopo desta dissertação e organiza a literatura de acordo com esses quatro eixos analíticos.

III.1 Estratégia de Busca e Seleção de Estudos

A identificação dos trabalhos relacionados foi conduzida por meio de uma busca estruturada na base de dados *Scopus*, utilizando a seguinte *query string* aplicada aos campos de título, resumo e palavras-chave:

```
TITLE-ABS-KEY (
    ("football" OR "soccer")
    AND ("passing network" OR "pass network" OR "passing networks")
    AND ("complex networks" OR "network analysis" OR "graph theory"
        OR "network science"))
```

A consulta foi realizada em 26 de Janeiro de 2026, retornando um total de 50 artigos. A distribuição temporal das publicações evidencia um crescimento progressivo do interesse na área, conforme apresentado a seguir:

Tabela III.1: Distribuição temporal dos artigos retornados pela busca na Scopus

Ano	Número de publicações
2013	1
2014	1
2017	3
2018	4
2019	8
2020	5
2021	6
2022	3
2023	5
2024	4
2025	10

Observa-se um crescimento relativamente consistente do campo até 2019, seguido de uma leve retração em 2020, possivelmente associada a fatores externos como a interrupção de competições esportivas. A partir de 2021, há uma retomada e consolidação do crescimento, atingindo seu maior volume em 2025, indicando maturidade e consolidação da área.

Com o objetivo de investigar especificamente o tema de robustez estrutural, foi realizada uma segunda consulta, adicionando o termo *robustness* à busca:

```
TITLE-ABS-KEY (("football" OR "soccer")
    AND ("passing network" OR "pass network" OR "passing networks")
    AND ("complex networks" OR "network analysis" OR "graph theory"
        OR "network science")
    AND ("robustness"))
```

Essa consulta retornou apenas um artigo: Ichinose et al. [2021], já identificado previamente. Esse resultado evidencia de forma direta a lacuna existente na literatura no que se refere à análise de robustez em redes de passes no futebol.

III.1.1 Critérios de Inclusão e Exclusão

A partir dos 50 artigos inicialmente identificados, foi realizado um processo de filtragem baseado na leitura de títulos e resumos, seguido por leitura completa dos trabalhos selecionados. Os critérios adotados foram:

Critérios de inclusão:

- Estudos que modelam explicitamente redes de passes entre jogadores;
- Uso de conceitos de Teoria dos Grafos ou Ciência de Redes;
- Foco em análise estrutural interpretável ou relação explícita com desempenho coletivo.

Critérios de exclusão:

- Estudos focados exclusivamente em aprendizado de máquina sem interpretação estrutural da rede;
- Trabalhos voltados apenas à análise individual de jogadores;
- Abordagens que não utilizam redes de passes (ex.: tracking puro sem modelagem em grafos);
- Estudos cujo objetivo principal é predição sem análise estrutural interpretável da rede.

Como resultado, 37 artigos foram excluídos por não atenderem diretamente ao escopo desta pesquisa. Os 13 artigos restantes foram analisados em profundidade. De forma geral, observa-se que a maioria dos estudos selecionados adota abordagens baseadas em redes integrais (isto é, sem perturbação), com foco na caracterização estática da estrutura de passes e na associação com métricas de desempenho. Abordagens que exploram explicitamente a dinâmica de degradação estrutural ou a resposta da rede a perturbações são significativamente menos frequentes.

III.1.2 Fluxo de Seleção dos Estudos

O processo de seleção seguiu as diretrizes do protocolo PRISMA, conforme representado no fluxograma a seguir:

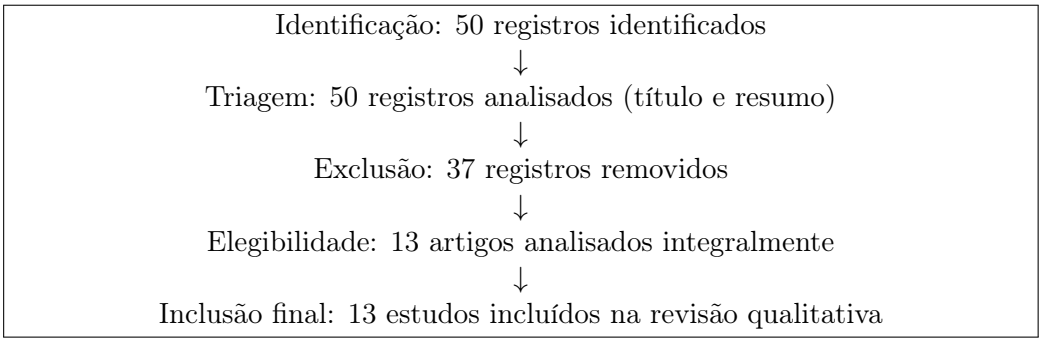


Figura III.1: Fluxograma de seleção de estudos baseado no protocolo PRISMA

Os 13 artigos selecionados foram organizados em quatro categorias analíticas, que estruturam as seções seguintes: (i) consolidação metodológica; (ii) estrutura e desempenho; (iii) predição e contexto; e (iv) robustez. Não foram identificados registros duplicados na base consultada, e não foram aplicados filtros adicionais de qualidade metodológica além dos critérios de inclusão e exclusão definidos.

III.2 Tabela Síntese dos Trabalhos

Tabela III.2: Síntese dos trabalhos relacionados

Referência	Objetivo	Método	Resultado	Limitação
Caicedo-Parada et al. [2020]	Revisão	Sistemática	Consolidação	Não avalia robustez estrutural
Alves et al. [2025b]	Revisão SNA	Sistemática	Métricas coletivas	Redes estáticas
Pina et al. [2017]	Performance	Redes	Coesão relevante	Não avalia robustez estrutural
Nath et al. [2024]	Avaliação	Métricas	Estrutura importa	Não considera cenários de perturbação
Yang et al. [2024]	Contexto	Redes	Diferença casa–fora	Não avalia robustez estrutural
Zhou et al. [2023]	Nova rede	Modelagem	Melhor sensibilidade	Sem resiliência
Kanbata et al. [2019]	Centralidade	Métrica nova	Impacto estrutural	Não relaciona a métrica ao desempenho coletivo
Lee et al. [2025]	Predição	Grafos	Boa previsão	Sem análise estrutural
Xiao et al. [2025]	Contexto	Estatística	Diferenças estruturais	Não avalia robustez estrutural
Clemente et al. [2020]	Posição	Redes	Papel variável	Sem visão sistêmica
Li et al. [2025]	Motifs	Subestruturas	Padrões locais	Não relaciona a métrica ao desempenho coletivo
Ichinose et al. [2021]	Robustez	Remoção	Degradação estrutural	Não relaciona a métrica ao desempenho coletivo
Alves et al. [2025a]	Posição	Redes	Influência posicional relevante	Não avalia robustez estrutural

A Tabela III.2 sintetiza os principais trabalhos identificados e evidencia um padrão recorrente na literatura: predominam estudos voltados à caracterização estrutural das redes de passes, à análise de desempenho e à incorporação de contexto competitivo, enquanto a robustez estrutural sob perturbação permanece pouco investigada. De modo geral, observa-se que as contribuições existentes avançam na descrição topológica e em aplicações preditivas, mas ainda são limitadas no que diz respeito à integração entre estrutura basal, degradação da rede e sucesso competitivo agregado ao longo de competições completas.

Em particular, observa-se que apenas Ichinose et al. [2021] aborda explicitamente a degradação da rede sob perturbações, ainda assim sem estabelecer uma conexão direta com o desempenho competitivo ao longo de uma temporada. Esse resultado reforça a lacuna identificada e justifica a proposta metodológica desta dissertação, que integra análise estrutural, robustez e desempenho em um mesmo arcabouço analítico.

Diante disso, esta dissertação se posiciona como uma extensão dos estudos de redes de passes orientados a desempenho, incorporando explicitamente a avaliação de robustez e explorando métricas que capturam a dispersão da participação estrutural, em contraste com abordagens centradas na concentração de influência entre jogadores, como forma de investigar propriedades associadas ao

sucesso competitivo.

III.3 Consolidação metodológica e evolução das aplicações

Duas revisões sistemáticas recentes ajudam a organizar o estado da arte e evidenciam tendências metodológicas do uso de redes no futebol. Caicedo-Parada et al. [2020] revisam a relação entre redes de passes e ação tática, destacando como métricas estruturais vêm sendo utilizadas para caracterizar padrões coletivos e sua variação conforme contexto e fase do jogo. Mais recentemente, Alves et al. [2025b] realizam uma revisão sistemática abrangente sobre a análise de redes sociais (SNA) no futebol, destacando como as métricas de rede evoluíram para capturar nuances táticas que a estatística tradicional tende a não representar adequadamente. O estudo enfatiza que a transição de métricas centradas em indivíduos para métricas coletivas é relevante para compreender o desempenho da equipe como um sistema integrado.

Em conjunto, essas revisões sustentam a relevância do formalismo de redes para descrever a organização coletiva e apontam limitações recorrentes na literatura: (i) predominância de redes integrais (sem perturbação) e (ii) foco em cenários específicos (por exemplo, futebol masculino de elite).

III.4 Estrutura topológica e desempenho competitivo

Uma parte substancial da literatura busca relacionar propriedades das redes de passes com desempenho esportivo. Pina et al. [2017] analisam partidas da UEFA *Champions League* e sugerem que redes associadas a desempenho bem-sucedido exibem características estruturais que podem ser descritas por métricas globais de conectividade e organização. Em linha semelhante, Nath et al. [2024] propõem uma abordagem baseada em análise de redes para avaliar performance em partidas, reforçando o uso de métricas topológicas como descritores do comportamento coletivo.

Adicionalmente, trabalhos recentes exploram recortes específicos e comparações contextuais. Yang et al. [2024] analisam clubes da *Premier League* considerando diferenças casa–fora em redes de passes, sugerindo que o contexto competitivo pode alterar padrões de conectividade e participação. Zhou et al. [2023] propõem uma variação de rede de passe voltada à avaliação de performance de equipes, com ajustes na construção e representação para capturar de forma mais sensível aspectos do desempenho coletivo. Em termos de mensuração, Kanbata et al. [2019] propõem um novo indicador para medições de centralidade em redes de passes, reforçando que a escolha da métrica impacta diretamente a interpretação sobre protagonismo e influência estrutural.

III.5 Predição, contexto e estrutura fina das interações

Além da descrição e associação com performance, parte da literatura utiliza redes de passes como insumo para modelos preditivos. Lee et al. [2025] discutem abordagens orientadas a grafos para predição de resultados de partidas a partir de redes de passes, indicando que representações estruturais podem carregar sinal informativo útil para tarefas de previsão.

Complementarmente, Xiao et al. [2025] investigam como fatores contextuais modulam métricas de redes de passes ao comparar competições masculinas e femininas em Copas do Mundo, utilizando modelos estatísticos para avaliar diferenças condicionais por ranking, estágio e posição. Clemente et al. [2020] analisam relações entre posição e centralidade em redes de passes, comparando cenários de vitória e derrota, reforçando a hipótese de que a função estrutural de certos papéis pode variar com o desfecho da partida.

Há ainda estudos que exploram padrões em nível mais fino de estrutura. Li et al. [2025] utilizam análise de motivos (*motifs*) para investigar comportamento de passe, sugerindo que subestruturas recorrentes podem capturar assinaturas táticas não observáveis por métricas globais. Esse tipo de análise é particularmente relevante para discutir redundância local e padrões de circulação que potencialmente influenciam estabilidade estrutural.

O trabalho de Alves et al. [2025a] aprofunda essa linha ao correlacionar a influência posicional dos jogadores na rede com os desfechos das partidas. Em conjunto, esses estudos corroboram a hipótese desta dissertação de que propriedades estruturais da rede, como eficiência e densidade de conexões, podem estar associadas ao desempenho competitivo, embora com variações de acordo com o contexto analisado [Pina et al., 2017; Nath et al., 2024; Yang et al., 2024].

III.6 Robustez estrutural e lacuna de pesquisa

Apesar do crescente uso da Ciência de Redes no futebol, a avaliação da *robustez estrutural* — ou seja, a resposta da rede a falhas e ataques via remoções progressivas de nós e arestas — é rara no corpus analisado. Entre os trabalhos retornados, Ichinose et al. [2021] é o mais diretamente alinhado a essa perspectiva. Contudo, seu escopo trabalha sob diferentes perspectivas da modelagem de redes e objetiva a comparação com redes sintéticas clássicas no contexto de redes.

A ausência dessa abordagem é confirmada por revisões sistemáticas recentes da área [Caicedo-Parada et al., 2020; Alves et al., 2025b], que sequer identificam ou abordam o tema da robustez sob perturbação. A escassez de pesquisas nesse nicho pode ser justificada pela complexidade metodológica de se transpor testes de ataque para o futebol e interpretá-los. Avaliar a resiliência dinâmica de uma equipe exige simular colapsos estruturais estabelecendo limites táticos realistas (como o número mínimo de jogadores operantes em campo) e depende de um volume massivo de dados longitudinais

para reavaliar a rede partida a partida de forma consistente.

Embora a tolerância a falhas seja um pilar clássico da Ciência de Redes teórica [Albert et al., 2000; Boccaletti et al., 2006], e a modelagem por redes complexas já venha sendo amplamente aplicada para avaliar a organização tática em outras modalidades coletivas — como o basquetebol [Fewell et al., 2012], o beisebol [Saavedra et al., 2010] e o rugby [Cintia et al., 2016] —, a aplicação de testes de disrupção e colapso estrutural (remoção de nós e arestas) no ecossistema esportivo ainda é incipiente.

É exatamente nesta lacuna que esta dissertação se insere. O presente trabalho avança no estado da arte ao articular a caracterização estrutural ao potencial de resiliência sob perturbação, conectando a robustez da rede e a distribuição da sua carga relacional diretamente ao sucesso competitivo.

Capítulo IV Metodologia

No presente capítulo, detalha-se o percurso metodológico adotado para responder à pergunta de pesquisa desta dissertação. O estudo investiga propriedades estruturais das interações de passes no futebol, com foco na caracterização estrutural das redes e na análise de sua robustez sob perturbações progressivas. A análise é conduzida no nível da unidade *equipe–partida*, em que cada confronto gera redes específicas processadas independentemente sob critérios rigorosos de qualidade e padronização.

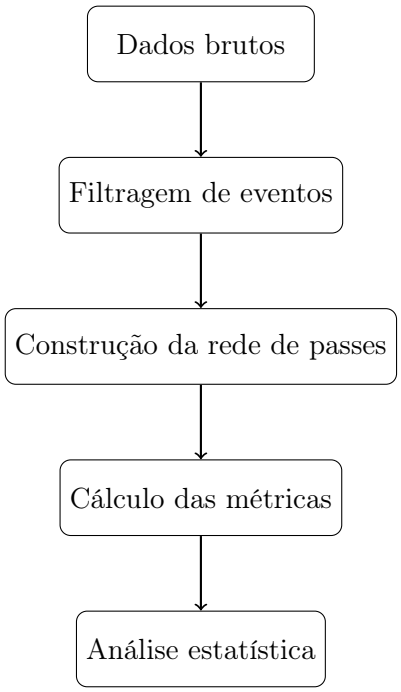


Figura IV.1: Fluxo metodológico da análise de redes de passes

O fluxo apresentado na Figura IV.1 representa de forma abstrata as etapas do processo analítico. Em termos operacionais, cada etapa envolve decisões metodológicas específicas: (i) filtragem de eventos com base em critérios de sucesso e relevância tática, (ii) definição do conjunto analítico de jogadores, (iii) construção de redes direcionadas e ponderadas a partir de interações discretas, (iv) cálculo de métricas estruturais e (v) aplicação de testes estatísticos para inferência sobre desempenho competitivo.

IV.1 Delimitação do Estudo e Ambiente Metodológico

Esta seção delimita o escopo empírico e descreve o ambiente metodológico no qual a análise foi conduzida. Apresentam-se os critérios adotados para a seleção das competições e da temporada analisada, bem como as fontes de dados utilizadas e suas respectivas funções no processo analítico. Essas definições são fundamentais para garantir consistência estatística, comparabilidade entre amostras e validade das inferências realizadas nas etapas subsequentes.

IV.1.1 Critérios de Seleção e Origem dos Dados

O escopo empírico compreende cinco das principais ligas nacionais europeias referentes à temporada 2015/16: *La Liga* (Espanha), *Premier League* (Inglaterra), *Ligue 1* (França), *Serie A* (Itália) e *Bundesliga* (Alemanha). A seleção desse recorte baseia-se em três pilares metodológicos:

Isonomia Estatística: O formato de pontos corridos (*round-robin*) garante que todas as equipes disputem o mesmo número de partidas, assegurando volume de dados equilibrado e comparabilidade direta.

Consistência Estrutural: Diferentemente de torneios eliminatórios, em que estratégias de curto prazo tendem a predominar, campeonatos de longa duração evidenciam identidades táticas e padrões de interação mais estáveis.

Variável Ordinal de Desempenho: O formato gera um ranqueamento contínuo de 1 a N, condição essencial para as análises de correlação entre a estrutura da rede e o sucesso competitivo.

Os dados de eventos procedem do ***StatsBomb Open Data***, um repositório público amplamente utilizado na literatura acadêmica para análises quantitativas do futebol, que fornece registros detalhados com informações espaciais e temporais de cada ação de jogo. Complementarmente, os dados de classificação final e desempenho das equipes foram coletados a partir da plataforma *Transfermarkt*, utilizada neste trabalho exclusivamente como fonte descritiva e agregadora de informações oficiais de competições, permitindo a estruturação das variáveis ordinais empregadas nos testes de correlação de *Spearman*.

IV.1.2 Ecossistema de Ferramentas

A manipulação e análise dos dados foram implementadas em linguagem ***Python***. A escolha justifica-se pela maturidade de bibliotecas específicas:

- ***NetworkX*:** utilizada para a modelagem de grafos dirigidos e ponderados, permitindo o cálculo de métricas estruturais e a implementação dos algoritmos de robustez.

- ***Pandas e NumPy*:** empregadas na limpeza, transformação e harmonização das tabelas transacionais.
- ***SciPy*:** responsável pela execução dos testes estatísticos de correlação e significância.

IV.2 Processamento de Dados e Construção da Rede

IV.2.1 Ingestão e Tratamento de Dados

A fonte primária de dados consiste em registros estruturados de eventos de partida, nos quais cada observação descreve uma ação técnica com ou sem posse de bola, acompanhada de metadados temporais, identificação de equipe, jogadores envolvidos e coordenadas espaciais de origem e destino. Dados contextuais complementares, como informações sobre a comissão técnica, são integrados por meio de identificadores únicos de partida e equipe.

As partidas são processadas sequencialmente por competição e temporada, assegurando tratamento homogêneo dos dados e reprodutibilidade em lote. Considerando variações ocasionais no esquema dos arquivos de eventos, a etapa de ingestão adota uma estratégia conservadora de retenção de variáveis, preservando apenas atributos estritamente necessários para as etapas subsequentes. Convenções consistentes de nomenclatura e tipagem são aplicadas para harmonizar todas as tabelas intermediárias.

IV.2.2 Tabela Transacional e Escopo de Análise

A base analítica é construída a partir de passes bem-sucedidos. Cada interação é modelada como uma aresta direcionada entre jogadores.

Para definição do conjunto de nós, adotou-se como abordagem principal a seleção dos 11 jogadores com maior minutagem em cada unidade *equipe–partida*, garantindo representatividade da estrutura tática predominante e reduzindo ruídos associados a participações marginais.

Adicionalmente, foram conduzidos testes exploratórios considerando redes com 12 e 13 jogadores, com o objetivo de avaliar a sensibilidade das métricas estruturais à expansão do conjunto de nós. No entanto, tais configurações, em sua maior parte, não produziram resultados estatisticamente relevantes tampouco melhorias quando comparadas ao estado da rede com 11 jogadores.

Verificou-se também uma limitação empírica importante: diversas partidas não apresentam número suficiente de jogadores com minutagem comparável para compor redes com 12 ou 13 nós de forma consistente, em função de substituições, lesões e variações táticas. Esse fator compromete a comparabilidade entre amostras e introduz viés estrutural.

Dessa forma, a escolha por redes com 11 jogadores não é arbitrária, mas fundamentada em evidência empírica e pode ser interpretada como um mecanismo de controle de rigorosidade meto-

dológica na definição do conjunto de nós.

Adicionalmente, impôs-se um limiar mínimo de dois passes por par de jogadores, evitando a inclusão de interações espúrias, uma vez que esse cenário representa menos de 10% dos cenários de passes no conjunto de dados. Este limiar visa reduzir a influência de interações ocasionais ou ruído amostral, garantindo que apenas relações minimamente recorrentes contribuam para a estrutura da rede.

IV.2.3 Construção da Rede Direcionada e Ponderada

Para cada amostra qualificada, constrói-se uma rede direcionada e ponderada $G = (V, E, W)$, na qual os nós representam jogadores, as arestas indicam a ocorrência de passes direcionados e os pesos correspondem à frequência absoluta dessas interações no escopo temporal considerado. Especificamente, são consideradas apenas redes com pelo menos 11 nós no estado basal, garantindo consistência estrutural entre as amostras analisadas.

Os grafos são modelados como dirigidos, uma vez que a direção do passe carrega informação semântica essencial sobre a dinâmica do jogo. A modelagem não dirigida implicaria perda dessa informação, reduzindo a capacidade de capturar assimetrias estruturais entre jogadores.

No que se refere à caracterização da distribuição estrutural das interações, adota-se uma abordagem complementar às métricas direcionadas. Nesse contexto, a métrica IHG é calculada exclusivamente no estado basal da rede, desconsiderando a direcionalidade e não sendo atualizada ao longo das etapas de perturbação.

Adicionalmente, para o cálculo do IHG, a rede é considerada em sua forma não direcionada, uma vez que o objetivo da métrica é avaliar a dispersão global das interações, independentemente da direção dos passes. Dessa forma, a métrica abstrai o fluxo direcionado da bola e concentra-se exclusivamente na distribuição da carga relacional entre os jogadores.

A agregação das métricas ao nível da equipe é realizada por meio da média, assumindo-se que variações extremas são limitadas pelo processo de filtragem e pela padronização das redes, o que permite utilizar essa medida como estimador representativo do comportamento típico.

IV.3 Avaliação de Robustez por Perturbação Progressiva

A robustez é avaliada por meio de simulações de perturbação progressiva, nas quais nós e arestas são removidos iterativamente segundo diferentes estratégias. Após cada etapa de remoção, a estrutura da rede é reavaliada por meio das métricas definidas no Capítulo II, permitindo observar padrões de degradação estrutural ao longo do processo.

As estratégias de remoção consideram: (i) remoção aleatória, (ii) remoção baseada em centralidade de intermediação (*betweenness*) e (iii) remoção baseada em grau ponderado, aplicadas

separadamente a nós e arestas conforme o tipo de perturbação analisado.

A análise considera tanto o estado basal das redes quanto sua evolução sob perturbação, permitindo investigar não apenas a configuração estrutural inicial, mas também a resiliência do sistema frente a falhas e ataques direcionados.

Tabela IV.1: Parâmetros do Método de Remoção

Método	**Limite Mínimo**	**Justificativa Técnica**
Remoção de Nós	7 Jogadores	Regra 3 da IFAB (mínimo de jogadores para continuidade da partida).
Remoção de Arestas	42 Arestas	Máximo de arestas possíveis em uma rede dirigida com $n = 7$ ($n(n-1)$).

IV.4 Inferência Estatística e Fluxo de Análise

A análise comparativa entre ligas é conduzida principalmente sobre as redes completas (estado *baseline*), sendo esta a referência para a inferência estatística entre métricas estruturais e desempenho competitivo. As simulações de perturbação são utilizadas complementarmente para avaliar a robustez estrutural das redes, sendo também analisadas no estado final de degradação, com o objetivo de avaliar se propriedades estruturais residuais mantêm associação com desempenho competitivo.

Para consolidar os dados longitudinais do campeonato, os valores das métricas estruturais — extraídos tanto das redes completas quanto dos cenários de degradação final — são agregados por meio da média aritmética de todas as partidas disputadas por cada equipe. Esse indicador médio representativo é, então, submetido ao teste de correlação com a classificação final do time no torneio. A opção pela média como medida de tendência central justifica-se empiricamente: testes exploratórios preliminares demonstraram que a utilização da mediana atenuava as variações estruturais de forma excessiva, resultando em perda de significância estatística na maior parte das associações investigadas.

IV.4.1 Coeficiente de Correlação de Spearman

Conforme descrito no Algoritmo 2, a inferência estatística baseia-se no coeficiente de correlação de Spearman (ρ), apropriado para variáveis ordinais e relações monótonas não lineares. A escolha por esse teste não paramétrico justifica-se pela natureza das métricas de rede, que frequentemente apresentam distribuições não normais e a presença de *outliers*. O teste é aplicado para avaliar a associação entre métricas estruturais das redes e a posição final das equipes nas ligas, sendo a significância estatística avaliada por meio do *p-value*, com base em níveis convencionais de confiança [Moore et al., 2017].

A magnitude das associações foi classificada em três faixas: fraca ($0{,}10 \leq |\rho| \leq 0{,}30$), moderada ($0{,}31 \leq |\rho| \leq 0{,}69$) e forte ($0{,}70 \leq |\rho| \leq 0{,}99$). Valores de $|\rho| < 0{,}10$ indicam ausência de tendência monotônica relevante entre as variáveis no contexto analisado.

IV.4.2 Algoritmo de Processamento

O procedimento metodológico adotado pode ser dividido em duas etapas complementares. A primeira corresponde à construção das redes de passe e à simulação das perturbações estruturais. A segunda consiste na agregação dos resultados ao nível das equipes e na realização da inferência estatística.

O Algoritmo 1 descreve o processo de construção das redes para cada unidade equipe–partida. Inicialmente, são selecionados os jogadores que compõem a rede basal, sendo então construída uma rede dirigida e ponderada a partir das interações de passe observadas. Sobre essa estrutura são calculadas as métricas topológicas utilizadas na análise. Paralelamente, a rede é convertida para uma representação não direcionada exclusivamente para o cálculo da IHG, uma vez que o objetivo dessa métrica é capturar a distribuição global da participação estrutural dos jogadores, independentemente da direção das interações.

Após a caracterização da rede basal, são executadas as simulações de perturbação. Para cada combinação entre tipo de remoção (nós ou arestas) e estratégia de ataque (aleatória, grau ponderado ou *betweenness*), a rede é degradada iterativamente até que seja atingido o respectivo limite mínimo estrutural definido na Tabela IV.1. Embora as métricas sejam recalculadas ao longo de todo o processo de remoção, apenas os valores observados no estado basal e no estado final degradado são utilizados nas análises estatísticas subsequentes.

Algorithm 1 Construção das Redes e Simulação de Perturbações

Input: Conjunto de partidas $\mathcal{M}$
Output: Métricas basais e métricas após degradação

for *cada partida* $m \in \mathcal{M}$ **do**
  for *cada equipe* $t \in \mathcal{T}_m$ **do**
    Filtrar passes válidos
    Definir conjunto de jogadores $V_{t,m}$
    Construir rede basal dirigida e ponderada

$$G^0_{t,m} = (V_{t,m}, E_{t,m}, W_{t,m})$$

    Calcular métricas estruturais basais

$$\Phi^0_{t,m} = \{\phi(G^0_{t,m}) : \phi \in \mathcal{F}\}$$

    Converter a rede para representação não direcionada
    Calcular

$$IHG_{t,m} = IHG((G^0_{t,m})^{und})$$

    for *cada tipo de remoção* $q \in \{nó, aresta\}$ **do**
      for *cada estratégia* $s \in \mathcal{S}_q$ **do**
        Inicializar

$$G^{(0)}_{t,m,q,s} = G^0_{t,m}$$

        while *limite mínimo não atingido* **do**
          Remover elemento segundo q e s
          Atualizar a rede

$$G^{(k+1)} = G^{(k)} \setminus x^{(k)}$$

        end
        Armazenar rede degradada final

$$G^*_{t,m,q,s}$$

        Calcular métricas finais

$$\Phi^*_{t,m,q,s} = \{\phi(G^*_{t,m,q,s}) : \phi \in \mathcal{F}\}$$

      end
    end
  end
end
return Φ^0, IHG *e* Φ^*

Concluída a etapa de processamento individual das partidas, os resultados são consolidados ao nível das equipes. O Algoritmo 2 descreve essa fase de agregação e inferência estatística. Para cada equipe, os valores das métricas são agregados por meio da média aritmética ao longo de todas as partidas disputadas na temporada. Testes exploratórios utilizando a mediana também foram realizados, porém apresentaram redução substancial do número de associações estatisticamente

significativas, razão pela qual não foram adotados na análise principal.

Em seguida, os valores médios de cada métrica são correlacionados com a posição final das equipes utilizando o coeficiente de correlação de Spearman. Esse procedimento é executado separadamente para o estado basal e para cada cenário de degradação analisado, permitindo comparar quais propriedades estruturais permanecem associadas ao desempenho competitivo mesmo após a aplicação das perturbações.

Algorithm 2 Agregação das Métricas e Inferência Estatística

Input: Métricas basais Φ^0, métricas degradadas Φ^*, valores de IHG, ranking final $r(t)$
Output: Coeficientes de Spearman e respectivos p-valores

for *cada equipe* $t \in \mathcal{T}$ **do**
  Calcular média das métricas basais

$$\bar{\Phi}_t^0 = \frac{1}{|\mathcal{M}_t|} \sum_{m \in \mathcal{M}_t} \Phi_{t,m}^0$$

  Calcular média do IHG

$$\overline{IHG}_t = \frac{1}{|\mathcal{M}_t|} \sum_{m \in \mathcal{M}_t} IHG_{t,m}$$

  for *cada cenário de degradação* (q, s) **do**
    Calcular

$$\bar{\Phi}_{t,q,s}^* = \frac{1}{|\mathcal{M}_t|} \sum_{m \in \mathcal{M}_t} \Phi_{t,m,q,s}^*$$

  end
end
for *cada métrica* $\phi \in \mathcal{F}$ **do**
  Calcular correlação de Spearman para o estado basal

$$\rho_\phi^0 = Spearman(\{\bar{\phi}_t^0\}, \{r(t)\})$$

  for *cada cenário* (q, s) **do**
    Calcular

$$\rho_{\phi,q,s}^* = Spearman(\{\bar{\phi}_{t,q,s}^*\}, \{r(t)\})$$

  end
end
Calcular

$$\rho_{IHG} = Spearman(\{\overline{IHG}_t\}, \{r(t)\})$$

return *Coeficientes de correlação e significância estatística*

A partir da metodologia descrita neste capítulo, o capítulo seguinte investiga empiricamente como diferentes propriedades estruturais das redes de passe se relacionam com o desempenho competitivo e com a capacidade de preservação da estrutura sob processos de degradação.

Capítulo V Resultados

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir da modelagem das redes de passes em seu estado basal e após a aplicação de perturbações progressivas. A análise foca na identificação de padrões estruturais associados ao sucesso competitivo nas cinco ligas europeias estudadas, com o objetivo de avaliar quais métricas são relevantes tanto para a caracterização inicial da organização coletiva quanto para a compreensão de sua robustez estrutural sob degradação.

V.1 Topologia da Rede e Sucesso Competitivo

A análise fundamenta-se no cálculo do coeficiente de correlação de Spearman (ρ) entre as métricas estruturais e a classificação final das equipes. É importante ressaltar que a variável de desempenho adotada corresponde à posição final no campeonato, na qual valores menores indicam melhor desempenho competitivo (posição 1 = campeão). Assim, uma correlação negativa entre uma métrica estrutural e o ranking indica que valores mais elevados dessa métrica tendem a estar associados a melhores posições na tabela. No entanto, a interpretação substantiva dessa associação depende do significado operacional de cada métrica analisada.

A Tabela V.1 sintetiza esses resultados, destacando o nível de significância estatística observado.

A interpretação dos resultados é organizada a partir de três dimensões topológicas principais, que estruturam a análise ao longo deste capítulo: (i) eficiência de transporte e fluidez tática, associada à capacidade de circulação da bola na rede; (ii) coesão estrutural e reciprocidade, relacionada à organização global e à intensidade das interações; e (iii) conectividade direcional e núcleo estrutural, que descreve a integridade da rede em termos de alcance e componentes fortemente conectados. De forma complementar, incorpora-se a métrica de homogeneidade estrutural da participação (IHG), que captura a distribuição da carga relacional entre os jogadores. Essa organização permite distinguir não apenas quais propriedades estão associadas ao desempenho competitivo, mas também como essas propriedades se comportam sob perturbações estruturais.

V.1.1 Eficiência de Transporte e Fluidez Tática

Observa-se uma correlação negativa consistente para métricas de conectividade e eficiência em três ligas, com destaque para a **Serie A**. Em particular, o comprimento médio do caminho mais

Tabela V.1: Correlação de Spearman entre métricas estruturais e posição final nas ligas (2015/16)

Métrica	**Liga**	**Spearman**	**Correlação**	**p-valor**	**Significância**
Caminho médio mais curto	Bundesliga	-0.5872	Moderada	0.010403	*
	La Liga	-0.5564	Moderada	0.010842	*
	Ligue 1	-0.4707	Moderada	0.036215	*
	Premier League	-0.3233	Moderada	0.164390	ns
	Serie A	-0.8842	Forte	< 0.001	***
Densidade da rede	Bundesliga	-0.5212	Moderada	0.026566	*
	La Liga	-0.5038	Moderada	0.023538	*
	Ligue 1	-0.2406	Fraca	0.306861	ns
	Premier League	-0.1955	Fraca	0.408819	ns
	Serie A	-0.6752	Moderada	0.001089	**
Eficiência global	Bundesliga	-0.5170	Moderada	0.028006	*
	La Liga	-0.5308	Moderada	0.016035	*
	Ligue 1	-0.1925	Fraca	0.416206	ns
	Premier League	-0.2195	Fraca	0.352346	ns
	Serie A	-0.6962	Moderada	< 0.001	***
Maior autovalor	Bundesliga	-0.7007	Forte	0.001199	**
	La Liga	-0.6241	Moderada	0.003274	**
	Ligue 1	-0.4692	Moderada	0.036897	*
	Premier League	-0.3835	Moderada	0.095124	ns
	Serie A	-0.8722	Forte	< 0.001	***
LSCC	Bundesliga	-0.2074	Fraca	0.408854	ns
	La Liga	-0.4962	Moderada	0.026051	*
	Ligue 1	0.0323	Fraca	0.892324	ns
	Premier League	-0.0556	Fraca	0.815774	ns
	Serie A	-0.0887	Fraca	0.709921	ns
Alcançabilidade	Bundesliga	-0.2178	Fraca	0.385396	ns
	La Liga	-0.5143	Moderada	0.020346	*
	Ligue 1	0.0173	Fraca	0.942291	ns
	Premier League	-0.0932	Fraca	0.695829	ns
	Serie A	-0.0902	Fraca	0.705213	ns
Reciprocidade	Bundesliga	-0.5604	Moderada	0.015569	*
	La Liga	-0.5925	Moderada	0.005910	**
	Ligue 1	-0.4842	Moderada	0.030508	*
	Premier League	-0.2902	Fraca	0.214500	ns
	Serie A	-0.8722	Forte	< 0.001	***
Segundo menor autovalor	Bundesliga	0.0960	Fraca	0.704812	ns
	La Liga	-0.4000	Moderada	0.080554	ns
	Ligue 1	-0.1955	Fraca	0.408819	ns
	Premier League	0.1233	Fraca	0.604509	ns
	Serie A	-0.1865	Fraca	0.431195	ns
IHG	Bundesliga	-0.6925	Moderada	0.001448	**
	La Liga	-0.4256	Moderada	0.061385	ns
	Ligue 1	-0.4586	Moderada	0.041954	*
	Premier League	-0.6180	Moderada	0.003681	**
	Serie A	-0.4842	Moderada	0.030508	*
Amplitude de PageRank	Bundesliga	-0.06501	Fraca	0.79771	ns
	La Liga	-0.0766	Fraca	0.74793	ns
	Ligue 1	-0.0315	Fraca	0.89485	ns
	Premier League	-0.3699	Moderada	0.10840	ns
	Serie A	-0.1789	Fraca	0.45032	ns

Nota: **Significância**: *** $p < 0{,}001$; ** $p < 0{,}01$; * $p < 0{,}05$; ns: não significativo.
Correlação: Fraca ($|\rho| < 0{,}3$), Moderada ($0{,}3 \leq |\rho| < 0{,}7$) e Forte ($|\rho| \geq 0{,}7$).

curto apresenta correlação forte na Serie A ($\rho = -0{,}88$, $p < 0{,}001$) e correlações moderadas com significância na Bundesliga, La Liga e Ligue 1. De forma análoga, a eficiência global também apresenta associações negativas e significativas nessas mesmas ligas (Bundesliga, La Liga e Serie A).

No caso do comprimento médio do caminho mais curto, valores menores estão associados a estruturas mais integradas e eficientes. Portanto, a correlação negativa observada indica que equipes melhor posicionadas tendem a apresentar caminhos médios mais curtos, refletindo maior conectividade e fluidez estrutural na rede de passes.

V.1.2 Coesão Estrutural e o Papel da Reciprocidade

O maior autovalor (λ_1) e a reciprocidade destacam-se como as métricas mais consistentemente associadas ao desempenho competitivo entre as ligas analisadas. No caso do maior autovalor, observam-se correlações particularmente elevadas na Serie A ($\rho = -0{,}87$) e na Bundesliga ($\rho = -0{,}70$), sugerindo que equipes mais bem classificadas tendem a apresentar redes caracterizadas por maior coesão estrutural e intensidade global de interações. Como essa métrica sintetiza aspectos relacionados à conectividade e à organização global da rede, seus resultados indicam que estruturas mais integradas estão associadas a melhor desempenho competitivo.

A reciprocidade também apresentou associações relevantes em diferentes contextos competitivos. Nas ligas em que os resultados foram estatisticamente significativos, como Serie A, La Liga, Bundesliga e Ligue 1 ($\rho = -0{,}48$), equipes com maiores níveis de trocas mútuas entre jogadores tendem a ocupar posições superiores na classificação final. Esse padrão sugere que a presença de relações bidirecionais de passe e de mecanismos de apoio recíproco entre os jogadores constitui uma característica recorrente das equipes mais bem-sucedidas. Em conjunto, esses resultados reforçam a importância da coesão estrutural e da colaboração relacional como dimensões relevantes para a compreensão do sucesso competitivo no futebol.

V.1.3 A Importância de Homogeneidade de Grau como Indicador Estrutural

Entre as métricas analisadas, a IHG destaca-se como uma contribuição metodológica central deste trabalho. Diferentemente das métricas topológicas clássicas — que capturam propriedades globais da rede, como conectividade média, eficiência ou coesão espectral — a IHG foi concebida para quantificar a homogeneidade estrutural da participação dos jogadores na rede de passes, a partir da distribuição de medidas de importância estrutural.

No caso da La Liga, embora a correlação observada para a IHG apresente magnitude comparável à das demais ligas, o valor de p não atinge o limiar convencional de significância estatística ($p < 0{,}05$). Esse resultado deve, portanto, ser interpretado com cautela, sendo caracterizado como evidência sugestiva de associação, mas não conclusiva. Ainda assim, a consistência do sinal e da

ordem de grandeza da correlação em relação às demais ligas reforça a plausibilidade estrutural da métrica, indicando a necessidade de investigações adicionais com amostras ampliadas ou abordagens complementares.

Do ponto de vista conceitual, esses resultados indicam que a dispersão da participação estrutural contém informação relevante sobre o desempenho competitivo. Como a IHG é operacionalizada pelo intervalo interquartil, a correlação negativa observada sugere que equipes melhor classificadas tendem a apresentar valores mais elevados de dispersão, refletindo uma distribuição funcional diferenciada dos papéis na circulação da bola

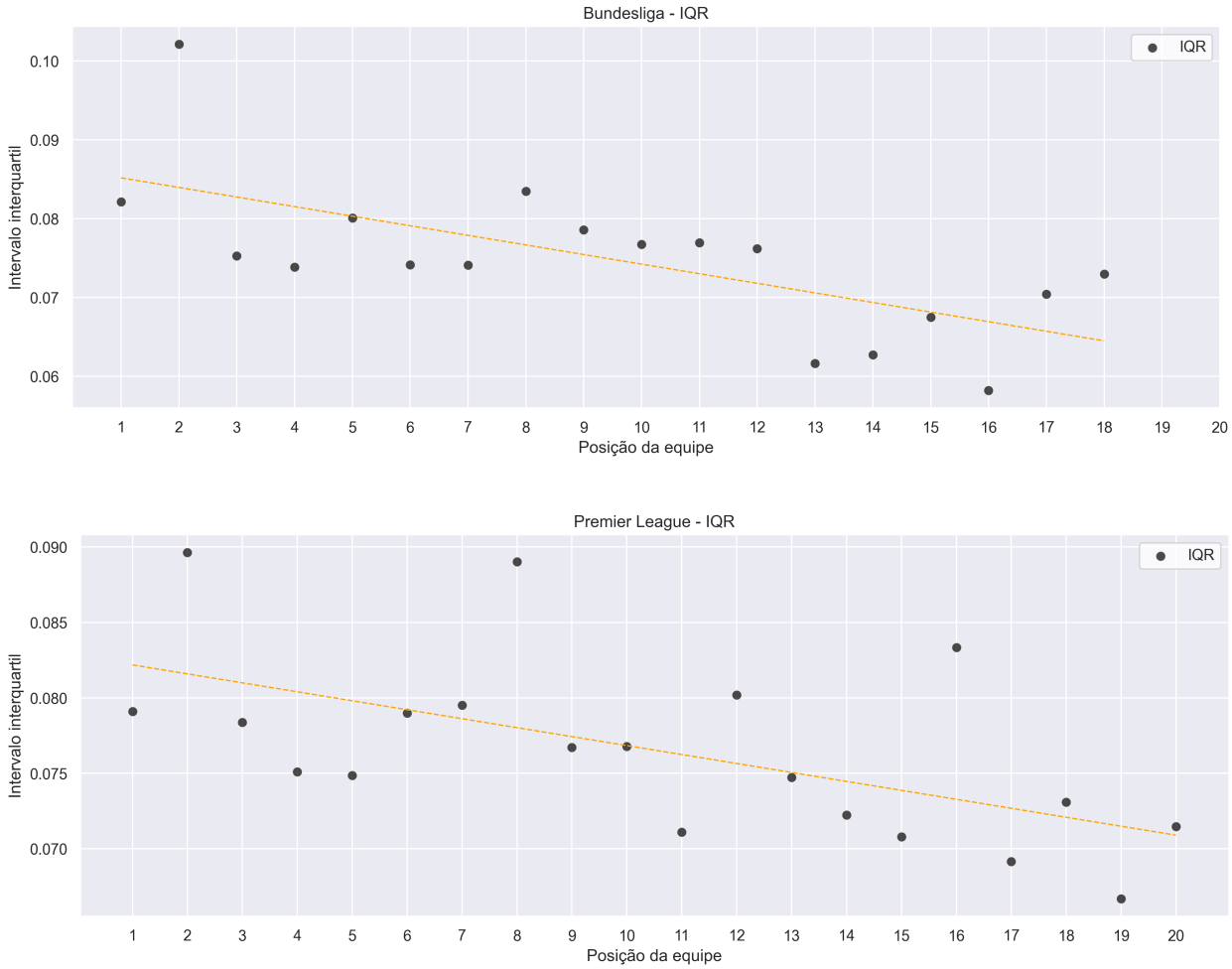


Figura V.1: Distribuição do intervalo interquartil (IQR) da participação estrutural dos jogadores em função da posição final para Bundesliga (acima) e Premier League (abaixo). As linhas tracejadas representam a tendência linear em cada liga.

A Figura V.1 apresenta a relação entre o intervalo interquartil (IQR) da participação estrutural dos jogadores e a posição final das equipes para Bundesliga e Premier League, destacando dois contextos competitivos com comportamentos distintos ao longo deste estudo.

No caso da Bundesliga, observa-se a tendência negativa bem definida, indicando que equipes melhor classificadas tendem a apresentar maior dispersão na distribuição das interações. Esse padrão contraria a interpretação inicial baseada em maior homogeneidade e indica que, nesse recorte,

equipes melhor classificadas apresentam maior dispersão na participação estrutural dos jogadores.

Na Premier League, embora a tendência geral também seja negativa, a dispersão dos pontos é consideravelmente maior, indicando maior variabilidade estrutural entre equipes com desempenhos semelhantes. Esse comportamento está alinhado com a análise anterior da liga, caracterizada por menor aderência das métricas topológicas globais ao desempenho competitivo, considerando a temporada em questão.

A comparação entre as duas ligas é particularmente relevante. Enquanto na Bundesliga a relação entre dispersão da participação estrutural e desempenho se apresenta de forma mais clara e estável, na Premier League essa relação é mais difusa, embora ainda presente como tendência. Esse contraste reforça a interpretação de que a IHG captura uma propriedade estrutural relevante, mas cuja manifestação empírica é sensível ao contexto competitivo.

Essas evidências visuais complementam os resultados de correlação apresentados anteriormente, mostrando que a associação entre menor homogeneidade estrutural e melhor desempenho não se limita a um artefato estatístico, mas se manifesta como um padrão observável na organização das redes de passes.

A escolha do intervalo interquartil como base estatística para a construção da IHG mostrou-se particularmente adequada, pois captura dispersão de forma não paramétrica, reduzindo a influência de valores extremos e favorecendo comparabilidade entre redes com diferentes regimes de interação. Dessa forma, a métrica sintetiza a homogeneidade estrutural de maneira sensível ao contexto específico de cada equipe e partida.

Comparativamente, observa-se que a IHG preserva sinal negativo em todas as ligas analisadas e alcança significância estatística em quatro das cinco competições, com exceção pontual da La Liga, onde o resultado permanece próximo ao limiar convencional de significância. Em contraste, diversas métricas globais tradicionais exibem significância apenas em contextos específicos, como ocorre de forma mais marcada na Serie A. Esse resultado sugere que a distribuição da participação estrutural constitui uma propriedade transversal do sucesso competitivo, menos dependente de estilos táticos dominantes e mais associada à organização coletiva subjacente.

Assim, a IHG emerge como um indicador complementar às métricas clássicas de redes complexas, oferecendo uma perspectiva adicional sobre o desempenho coletivo ao enfatizar não apenas *quanto* uma equipe se conecta, mas *como* essa conectividade é distribuída entre seus participantes. Essa característica torna a métrica particularmente promissora para análises de robustez estrutural e para estudos futuros baseados em perturbações progressivas da rede, especialmente como variável explicativa ex-ante da capacidade de resistência estrutural observada nos experimentos de remoção.

É importante destacar que a IHG foi utilizada exclusivamente na análise da rede basal. Como sua formulação busca capturar a distribuição estrutural original da participação entre os jogadores,

a métrica não foi recalculada ao longo das etapas de remoção progressiva. Por essa razão, sua interpretação concentra-se na caracterização inicial da rede e em seu potencial de antecipar maior ou menor vulnerabilidade estrutural.

Embora a IHG não tenha sido incorporada às análises sob remoção progressiva, seus resultados no estado basal sugerem que a distribuição da participação estrutural pode atuar como um fator preditivo da robustez estrutural observada posteriormente. Redes caracterizadas por maior homogeneidade tendem, do ponto de vista teórico, a apresentar menor dependência de vértices específicos, o que pode favorecer a preservação da organização global sob remoções direcionadas. Assim, a métrica apresenta potencial como indicador ex-ante de resiliência estrutural, ainda que sua validação direta sob perturbação permaneça como agenda para investigações futuras.

V.1.4 Sensibilidade ao Número de Jogadores na Rede Basal

Com o objetivo de verificar a sensibilidade dos resultados ao tamanho do conjunto de nós da rede, foram realizados testes adicionais considerando redes basais com 12 e 13 jogadores, além da configuração principal com 11 jogadores. Essa análise complementar buscou avaliar se a ampliação do escopo de jogadores por equipe-partida produziria ganhos consistentes na identificação de associações entre métricas estruturais e desempenho competitivo.

De modo geral, os resultados indicam que a ampliação para 12 ou 13 jogadores não produziu ganhos consistentes e sistemáticos na capacidade discriminativa das métricas. Em algumas ligas específicas, observaram-se variações pontuais no número de resultados estatisticamente significativos, como a entrada da IHG na La Liga com 12 jogadores. No entanto, esses ganhos não se mantiveram de forma homogênea entre as competições nem foram suficientes para justificar a substituição da configuração principal.

Essa limitação empírica foi especialmente relevante nas redes ampliadas. Para a configuração com 12 jogadores, registraram-se partidas com quantidade insuficiente de jogadores em três ligas: Bundesliga (1), La Liga (2) e Premier League (2). O problema tornou-se mais acentuado na configuração com 13 jogadores, com perdas de observações em Bundesliga (15), La Liga (12), Ligue 1 (11), Premier League (29) e Serie A (2). Esses valores evidenciam que o aumento do número de nós compromete de forma não uniforme a cobertura amostral entre ligas, enfraquecendo a comparabilidade dos resultados.

Esses resultados reforçam a adequação da escolha metodológica por redes com 11 jogadores como configuração principal da análise basal. Essa definição preserva representatividade tática, consistência entre partidas e estabilidade inferencial, ao mesmo tempo em que evita a introdução de ruído estrutural associado à inclusão de jogadores com participação marginal.

Assim, a análise basal apresentada nas subseções anteriores permanece ancorada na configuração

Tabela V.2: Síntese do número de cenários significativos por configuração de jogadores na rede basal (de um total de 10 cenários)

Liga	**11 jogadores**	**12 jogadores**	**13 jogadores**
Bundesliga	6	6	6
La Liga	7	8	7
Ligue 1	4	0	3
Premier League	1	2	2
Serie A	6	6	6

com 11 jogadores, enquanto os testes com 12 e 13 nós cumprem papel complementar de verificação de sensibilidade metodológica.

Embora a ampliação do número de jogadores tenha produzido variações pontuais — como no caso da IHG — o padrão geral dos resultados permaneceu estável, reforçando que a evidência estrutural observada não depende de forma decisiva da expansão do conjunto de nós.

V.1.5 Divergências entre Ligas: o Caso da Premier League

Um resultado particularmente relevante emerge da análise da **Premier League**, que se mostra menos sensível às métricas topológicas globais quando comparada às demais ligas europeias analisadas. Embora diversas métricas apresentem correlação negativa com a posição final — como densidade, eficiência global e reciprocidade — nenhuma delas atinge significância estatística no contexto da liga inglesa. Em contraste, a IHG apresenta correlação moderada e estatisticamente significativa ($\rho = -0{,}62$, $p < 0{,}01$), sugerindo que, nesse ambiente competitivo, a distribuição estrutural da carga de passes entre jogadores é mais discriminante do sucesso do que medidas globais clássicas de conectividade.

Esse comportamento pode ser interpretado à luz das especificidades da temporada 2015/16 da Premier League, amplamente reconhecida como uma das mais atípicas da história recente da competição, conforme documentado em análises jornalísticas e relatos históricos [McMahon, 2016]. Do ponto de vista quantitativo, o título foi conquistado com 81 pontos, a segunda menor pontuação de um campeão nas últimas duas décadas, enquanto todas as equipes tradicionalmente dominantes (o denominado *Big Six*) encerraram a temporada com 71 pontos ou menos, conforme registros oficiais da Premier League [2026]. Esse cenário reflete elevado grau de imprevisibilidade competitiva e distribuição de desempenho menos concentrada do que em temporadas típicas.

O caráter excepcional dessa temporada é ainda evidenciado pelas probabilidades atribuídas ao Leicester City no início da competição. Antes do início do campeonato, a equipe era considerada uma das menos prováveis candidatas ao título, com probabilidades estimadas em aproximadamente 5000:1 para a conquista da Premier League, amplamente reportadas em registros históricos e jornalísticos [Tanner, 2021]. Esse valor ilustra o desalinhamento entre expectativa pré-temporada e

desempenho efetivo ao longo da competição, reforçando o grau de ruptura observado naquele ano.

Do ponto de vista tático, o Leicester City apresentou baixos índices médios de posse de bola, organização defensiva compacta e uma estratégia ofensiva orientada a transições rápidas e ações verticais, priorizando eficiência situacional em detrimento de controle territorial prolongado [Bird, 2015]. Essas características diferem de modelos baseados em circulação contínua e dominância posicional, usualmente associados a métricas globais de coesão e eficiência estrutural em redes de passes.

Nesse contexto, a menor sensibilidade da Premier League às métricas topológicas globais observada neste estudo pode ser interpretada, ao menos em parte, como reflexo de um ambiente competitivo em que estratégias menos dependentes de organização coletiva sustentada e mais orientadas à exploração eficiente de oportunidades específicas se mostraram particularmente eficazes.

Diferentemente das demais ligas analisadas — nas quais a organização coletiva sustentada pela circulação contínua da bola tende a se refletir em métricas globais de coesão e eficiência — o contexto inglês daquela temporada favoreceu modelos de jogo menos baseados em controle posicional prolongado e mais orientados à exploração de momentos específicos, como contra-ataques, bolas longas e acelerações individuais. Nesse cenário, métricas que capturam intensidade média ou densidade global tornam-se menos informativas para discriminar equipes bem-sucedidas.

A significância da IHG na Premier League sugere que, mesmo em um ambiente tático heterogêneo e menos previsível, equipes com melhor desempenho tendem a apresentar uma distribuição mais equilibrada da participação estrutural na rede de passes, reduzindo a dependência excessiva de poucos jogadores. Esse resultado indica que, no contexto específico de 2015/16, a robustez associada à distribuição da carga relacional — e não necessariamente à maximização da eficiência global — constitui um fator estrutural relevante para o sucesso competitivo.

Esses achados reforçam a hipótese de que a relação entre topologia da rede de passes e desempenho esportivo é sensível ao contexto competitivo e às características táticas predominantes de cada liga e temporada, destacando a importância de análises comparativas multi-liga e temporalmente contextualizadas.

A análise da rede completa, portanto, estabelece o ponto de partida interpretativo para a etapa seguinte, em que se investiga quais dessas propriedades permanecem associadas ao desempenho competitivo após a degradação progressiva da estrutura.

V.1.6 Resultados sob Remoções Progressivas até o Limite Mínimo Estrutural

Esta subseção examina o comportamento das métricas estruturais após a aplicação de remoções progressivas de nós e arestas até o alcance do limite mínimo estrutural adotado, definido por redes com pelo menos 42 arestas ou 7 nós remanescentes. Assim, a análise apresentada não acompanha

toda a trajetória intermediária de degradação, mas concentra-se especificamente no estado final da rede após a sequência completa de remoções permitida pelos limiares metodológicos estabelecidos.

Degradação sob Remoção de Nós

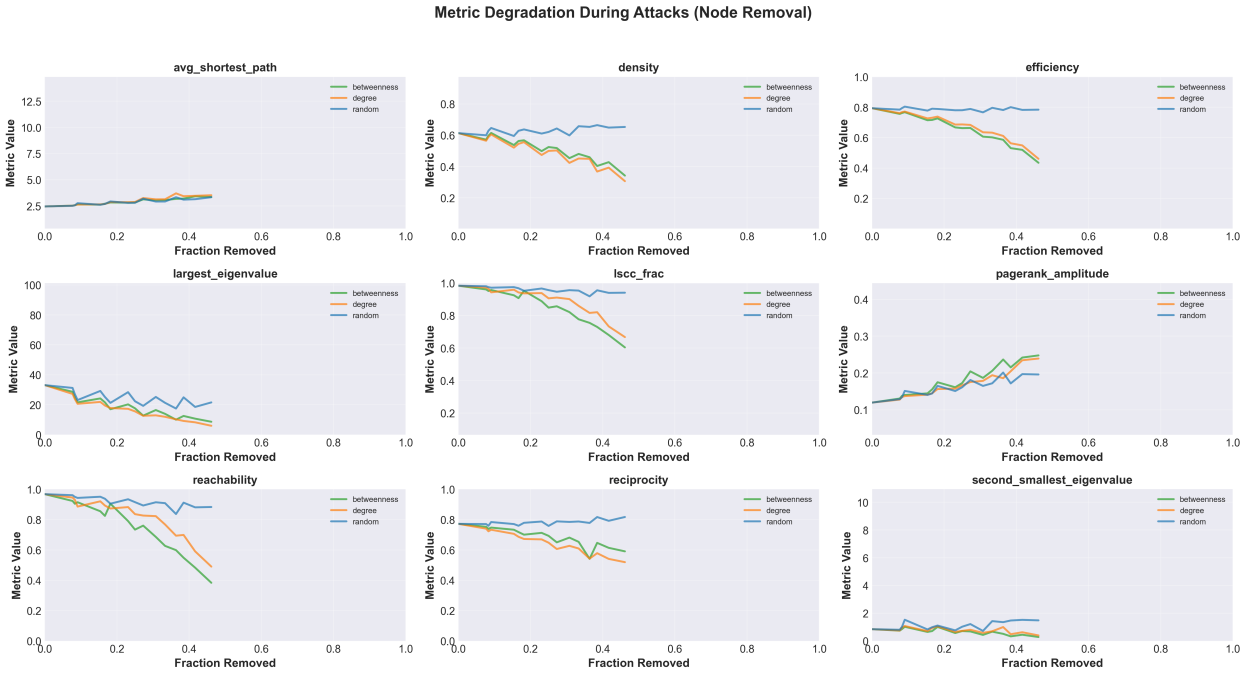


Figura V.2: Exemplo ilustrativo da degradação progressiva das métricas estruturais sob remoção de nós (Bundesliga, 13 jogadores). As curvas representam a evolução média das métricas à medida que a fração de jogadores removidos aumenta, considerando estratégias aleatórias e direcionadas (grau e `betweenness`).

A Figura V.2 ilustra o comportamento das métricas estruturais sob remoção progressiva de nós, evidenciando um padrão de degradação relativamente sistemático e diferenciado entre estratégias. De forma geral, observa-se que a remoção direcionada — especialmente por betweenness — produz impactos mais acentuados na maioria das métricas, indicando maior sensibilidade da estrutura à retirada de vértices centrais.

No caso da eficiência global e da densidade da rede, a redução ocorre de maneira aproximadamente monotônica, com declínio mais pronunciado nas estratégias direcionadas. Esse comportamento sugere que a eficiência funcional da rede depende fortemente de jogadores que atuam como intermediários estruturais, cuja remoção compromete diretamente a capacidade de circulação da bola.

A métrica maior autovalor apresenta queda consistente à medida que a fração removida aumenta, indicando perda progressiva de coesão global. Esse resultado destaca a interpretação de que a organização estrutural das equipes não está distribuída de forma homogênea, mas concentrada em subconjuntos de jogadores cuja remoção afeta de maneira desproporcional a integridade da rede.

Em contraste, métricas como amplitude do PageRank tendem a aumentar ao longo das remoções, refletindo uma concentração crescente da influência nos nós remanescentes. Esse comportamento é consistente com processos de fragmentação estrutural, nos quais a rede residual se torna mais hierarquizada e menos distribuída.

Outro ponto relevante é que a remoção aleatória apresenta degradação mais lenta e estável em comparação às estratégias direcionadas. Esse padrão sugere que a robustez estrutural das redes de passes está associada não apenas à presença de redundância, mas à distribuição dessa redundância ao longo da estrutura. Em redes mais robustas, a perda aleatória de jogadores não compromete imediatamente a organização global, enquanto a remoção de vértices estratégicos revela fragilidades latentes.

Em síntese, a Figura V.2 demonstra que a degradação sob remoção de nós é altamente dependente da centralidade estrutural dos jogadores removidos, evidenciando que a robustez das redes de passes está fortemente relacionada à distribuição funcional dos papéis dentro da equipe.

Degradação sob Remoção de Arestas

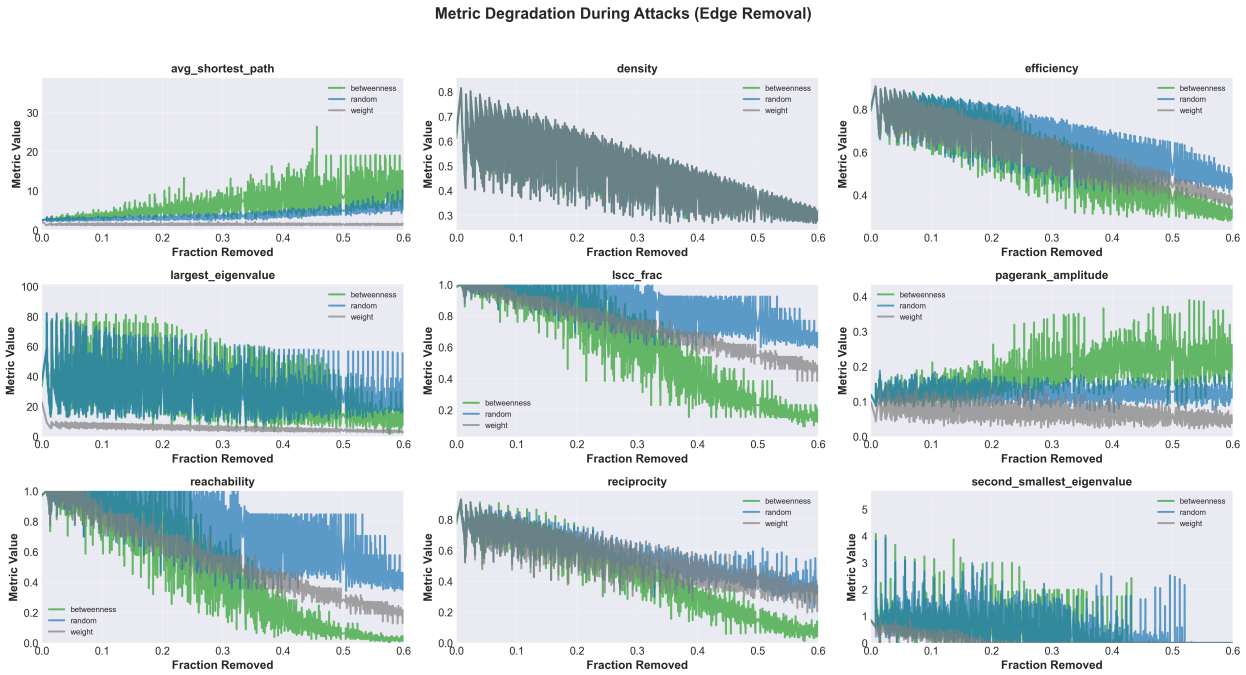


Figura V.3: Exemplo ilustrativo da degradação progressiva das métricas estruturais sob remoção de arestas (Bundesliga, 13 jogadores). As curvas representam a evolução média das métricas à medida que a fração de conexões removidas aumenta, considerando estratégias aleatórias, por peso e por betweenness.

A Figura V.3 apresenta a degradação das métricas estruturais sob remoção progressiva de arestas, revelando um padrão não tão distinto daquele observado na remoção de nós. De maneira geral, observa-se que a redução das métricas ocorre de forma mais gradual e menos abrupta, indicando

que a rede apresenta maior resistência estrutural à perda de conexões individuais do que à remoção de vértices completos.

As métricas densidade da rede e eficiência global exibem declínio consistente com o aumento da fração removida, porém com diferenças relativamente pequenas entre estratégias. Isso sugere que, ao contrário do caso nodal, a estrutura da rede não depende criticamente de um subconjunto específico de arestas, mas sim da manutenção de um volume global de conexões.

A métrica comprimento médio do caminho mais curto apresenta crescimento progressivo, refletindo o aumento da distância média entre os nós remanescentes à medida que conexões são removidas. Esse comportamento é esperado em processos de esparsificação da rede e indica perda de eficiência na circulação da bola.

Um aspecto particularmente relevante é que as diferenças entre estratégias — aleatória, por peso e por betweenness — são menos pronunciadas do que na remoção de nós. Isso sugere que a remoção de arestas, mesmo quando direcionada, tende a produzir um efeito mais difuso sobre a estrutura, sem atingir de forma tão direta os elementos críticos da organização da rede.

Adicionalmente, métricas como LSCC e alcançabilidade apresentam declínio progressivo, mas não abrupto, indicando que a conectividade global se degrada de forma mais gradual sob remoção de arestas. Esse resultado reforça a ideia de que a robustez estrutural das redes de passes está menos associada à redundância de conexões individuais e mais à presença de caminhos alternativos distribuídos.

Por fim, observa-se que a amplitude do PageRank tende a aumentar moderadamente, indicando leve concentração de influência conforme a rede perde conexões. No entanto, esse efeito é menos acentuado do que na remoção de nós, sugerindo que a fragmentação estrutural é mais limitada nesse tipo de perturbação.

Em síntese, a Figura V.3 evidencia que a remoção de arestas produz uma degradação mais gradual e menos seletiva da estrutura, indicando que as redes de passes apresentam maior resistência estrutural à perda de conexões do que à remoção de jogadores, especialmente quando estes ocupam posições estruturalmente centrais.

A comparação entre as Figuras V.2 e V.3 evidencia que a robustez das redes de passes é fortemente dependente do tipo de perturbação considerada, sendo significativamente mais sensível à remoção de nós do que à remoção de arestas. Esse resultado sugere que a organização estrutural das equipes está mais ancorada na presença de jogadores-chave do que na manutenção de conexões específicas.

As curvas de degradação apresentadas nas figuras anteriores oferecem uma leitura dinâmica do colapso estrutural. A partir desse ponto, a análise passa a enfocar o estado final das redes degradadas, isto é, o momento em que cada estrutura atinge o limite mínimo metodológico estabelecido.

Essa mudança de foco permite avaliar não apenas como a rede se deteriora ao longo do processo, mas sobretudo quais propriedades ainda preservam capacidade de discriminar desempenho competitivo após a perturbação máxima considerada.

Antes de discutir os resultados por famílias de métricas, é necessário explicitar um ponto central: a maior parte das correlações estimadas neste cenário *não* é estatisticamente significativa. Adicionalmente, deve-se considerar que o elevado número de testes realizados aumenta a probabilidade de ocorrência de resultados significativos por acaso (erro do tipo I). Embora não tenha sido aplicada uma correção formal para múltiplas comparações — como Bonferroni ou FDR — optou-se por uma abordagem interpretativa baseada na consistência dos padrões ao longo de múltiplos cenários, em vez da valorização de resultados isolados. Considerando o conjunto completo de resultados, apenas uma parcela minoritária das associações apresenta significância estatística, o que indica que o processo de remoção reduz substancialmente a evidência estatística associada às propriedades estruturais observada na análise da rede completa. Essa constatação impõe uma postura interpretativa mais restritiva. Assim, nesta subseção, os resultados significativos são tratados como evidência mais robusta, enquanto os resultados não significativos são discutidos apenas como tendências eventuais ou sinais fracos, sem que lhes seja atribuído valor conclusivo.

Outro aspecto importante é que a variável que representa o número de jogadores na rede basal corresponde ao tamanho do conjunto de nós antes do início das remoções. Esse detalhe é relevante porque os resultados indicam que redes basais maiores tendem a apresentar menor estabilidade estatística após o processo de degradação. Em particular, os cenários com número de jogadores = 13 exibem perda mais acentuada de significância do que aqueles com 11 ou 12 jogadores, o que sugere que parte do aumento da complexidade inicial da rede não se traduz em maior robustez inferencial quando a estrutura é reduzida até o limiar mínimo adotado.

Eficiência de Transporte e Fluidez Tática sob Remoções

O primeiro eixo interpretativo reúne as métricas comprimento médio do caminho mais curto, densidade da rede e eficiência global, entendidas como descritores da capacidade de transporte da rede e da fluidez tática do sistema de passes. Na análise da rede completa, esse conjunto já havia se mostrado relevante para distinguir equipes mais bem colocadas. Após as remoções, contudo, o quadro se torna mais seletivo.

Entre essas três métricas, comprimento médio do caminho mais curto é a que melhor preserva sinal estatístico. Trata-se, inclusive, de uma das métricas mais estáveis de todo o conjunto analisado após degradação. Isso indica que, mesmo sob perda progressiva de elementos estruturais, a capacidade de manter caminhos relativamente curtos entre os vértices remanescentes continua associada ao desempenho competitivo em parte importante dos cenários. Em termos topológicos, isso sugere

que a vantagem das equipes mais fortes não depende apenas da densidade bruta da rede original, mas também da manutenção de uma arquitetura residual capaz de sustentar rotas eficientes de circulação.

Ainda assim, essa preservação de sinal não deve ser superestimada. Embora a taxa de significância de comprimento médio do caminho mais curto permaneça relativamente alta, há variação considerável entre ligas e estratégias. O comportamento é mais consistente em Serie A, Bundesliga e La Liga, mas perde força em Ligue 1 e praticamente desaparece em Premier League. Isso significa que a interpretação da métrica como marcador robusto de qualidade estrutural residual é válida apenas em certos contextos competitivos, e não como propriedade universal das redes de passes sob ataque.

No caso de densidade da rede e eficiência global, a leitura precisa ser ainda mais cautelosa. Ambas mantêm correlações médias negativas, mas com proporção de significância inferior àquela observada para comprimento médio do caminho mais curto. Isso indica que o sentido estrutural esperado permanece presente como tendência geral — isto é, equipes melhor posicionadas tendem a apresentar valores relativamente mais elevados dessas métricas (associados a melhores posições no ranking) —, embora essa relação não se sustente de forma estatisticamente consistente na maioria dos cenários. Em outras palavras, essas métricas não desaparecem completamente como instrumentos interpretativos, mas deixam de funcionar como indicadores consistentemente robustos.

A comparação entre remoções de nós e remoções de arestas ajuda a esclarecer esse ponto. Sob remoção nodal, as correlações médias tendem a ser mais intensas, sobretudo para comprimento médio do caminho mais curto. Isso sugere que a retirada de jogadores evidencia de forma mais clara a capacidade de certas equipes de conservar estruturas de transporte relativamente compactas. Já nas remoções por arestas, especialmente por peso, há maior enfraquecimento do sinal. A remoção das conexões mais intensas parece comprometer diretamente a infraestrutura funcional da circulação, produzindo redes residuais nas quais diferenças entre equipes tornam-se menos estáveis do ponto de vista inferencial.

Portanto, no bloco da fluidez tática, a principal conclusão não é que todas as métricas continuam explicando o desempenho após remoção, mas sim que o comprimento médio do caminho mais curto preserva poder discriminativo relevante, enquanto densidade da rede e eficiência global passam a operar mais como indicadores parcialmente sensíveis e menos universalmente estáveis.

Coesão Estrutural e o Papel da Reciprocidade sob Remoções

O segundo eixo reúne maior autovalor e reciprocidade, duas métricas que expressam, por caminhos distintos, a ideia de coesão estrutural. Aqui, o quadro pós-remoção é mais forte do que no bloco anterior. Entre todas as famílias topológicas analisadas, esta é a que melhor resiste à perda

de elementos da rede.

A métrica maior autovalor é a que apresenta o comportamento mais consistente de todo o conjunto. Sua taxa de significância permanece elevada e suas correlações médias são fortemente negativas, sobretudo em remoções nodais e nas ligas em que o sinal estrutural já era mais forte na rede completa. Isso indica que o maior autovalor continua sintetizando de forma eficaz a qualidade da organização residual da rede após perturbação. Mesmo quando a estrutura é reduzida até o limite mínimo, equipes mais bem colocadas tendem a conservar uma rede remanescente mais intensa, mais organizada e mais coesa do ponto de vista global.

Essa persistência é teoricamente importante porque sugere que a robustez estrutural não se manifesta apenas como preservação de conexões, mas como manutenção de uma forma global de organização. O maior autovalor parece captar precisamente esse aspecto: não a simples existência de vínculos, mas a permanência de uma arquitetura relacional que ainda guarda coerência sistêmica mesmo após a remoção de partes relevantes da rede.

A reciprocidade, por sua vez, apresenta um comportamento também substantivo, embora menos uniforme. Sua proporção de resultados significativos é menor que a de maior autovalor, mas ainda suficientemente alta para sustentar uma interpretação robusta em parte importante dos cenários. O que esse resultado sugere é que as equipes mais competitivas não apenas conservam intensidade estrutural, mas também preservam melhor a troca mútua entre os jogadores remanescentes. Assim, a coesão residual não parece depender exclusivamente de concentração ou dominância de alguns vértices, mas também da manutenção de relações bidirecionais de passe.

A comparação entre essas duas métricas é especialmente útil. Enquanto maior autovalor mostra que a rede residual das equipes mais fortes continua mais organizada em termos globais, reciprocidade mostra que essa organização preserva uma dimensão relacional importante: a mutualidade das interações. Juntas, elas oferecem uma das evidências mais sólidas da subseção inteira. Se há um eixo topológico que continua discriminando de forma relativamente consistente o desempenho competitivo após remoções, esse eixo corresponde à coesão estrutural.

Ainda assim, essa conclusão deve ser qualificada por liga. O padrão é muito claro em Serie A, La Liga e Bundesliga, mas enfraquece em Ligue 1 e é bastante fraco em Premier League. Portanto, a consistência empírica dessa família de métricas é evidente, mas dependente do contexto competitivo.

Conectividade Direcional e Núcleo Estrutural sob Remoções

A situação muda de forma clara quando se passa ao eixo formado por LSCC, alcançabilidade e segundo menor autovalor. Aqui, o traço dominante não é a preservação de sinal, mas justamente sua perda. A maioria dos resultados é não significativa, e isso precisa ser assumido como resultado substantivo, não como ruído secundário.

No caso de LSCC, a baixa proporção de resultados significativos sugere que a fração do maior componente fortemente conexo deixa de distinguir, de forma confiável, as equipes mais e menos bem classificadas após a degradação da rede. A conectividade forte permanece relevante em termos topológicos, mas, sob o critério de parada adotado, não se configura como marcador estatisticamente estável de desempenho competitivo. Em outras palavras, parte das equipes pode preservar um núcleo fortemente conexo relativamente amplo, mas essa preservação não se distribui de maneira suficientemente sistemática para sustentar uma associação robusta com a posição final.

A alcançabilidade conduz a uma leitura muito semelhante. Embora apresente correlações médias negativas, sua taxa de significância é baixa, o que impede interpretações fortes. A capacidade de alcançar vértices por caminhos direcionados continua existindo nas redes residuais, mas essa propriedade, por si só, não parece discriminar de modo consistente o sucesso competitivo após remoções. Isso sugere que a mera preservação da alcançabilidade não basta para explicar a robustez observada; mais importante do que continuar alcançável é continuar funcionalmente eficiente e estruturalmente coeso.

O caso de segundo menor autovalor é ainda mais claro. A proporção de resultados significativos é muito baixa e o sinal estatístico praticamente desaparece em boa parte dos cenários. Isso indica que a conectividade algébrica, ao menos na forma em que foi operacionalizada nesta pesquisa, não constitui um eixo interpretativo robusto para o cenário pós-remoção. A conclusão aqui é forte justamente pela ausência de suporte estatístico: essa métrica não deve ocupar papel central na discussão dos resultados sob perturbação.

Entre as ligas, apenas La Liga preserva algum sinal mais visível nesse bloco. Nas demais, sobretudo Premier League e Ligue 1, o comportamento é majoritariamente não significativo. Assim, diferentemente da coesão estrutural e da fluidez tática, a conectividade direcional estrita não emerge como um fundamento estável da robustez competitiva no cenário analisado.

A comparação entre tipos de remoção mostra um padrão relativamente claro. As remoções de nós evidenciam, em média, correlações mais intensas e maior proporção de resultados significativos do que as remoções de arestas, ao amplificar o contraste estrutural entre equipes após a perturbação. Isso ocorre sobretudo nas métricas de coesão estrutural e, em menor grau, nas métricas de fluidez tática.

Essa diferença não deve ser lida de forma simplista. Ela não significa que a remoção de nós seja menos destrutiva; ao contrário, do ponto de vista topológico, ela pode ser mais severa. O que os resultados sugerem é que esse tipo de perturbação expõe mais claramente as diferenças entre equipes. Ao remover um jogador, elimina-se simultaneamente um conjunto inteiro de relações incidentes, o que reestrutura a rede de maneira mais profunda e torna mais visível a capacidade de certas equipes de conservar organização residual.

Nas remoções por arestas, especialmente quando guiadas por peso, a capacidade discriminativa das métricas se enfraquece mais rapidamente. Isso sugere que o corte seletivo de conexões intensas embaralha mais a leitura comparativa das redes, produzindo estados residuais em que a relação entre estrutura e desempenho se torna menos estável do ponto de vista estatístico.

Comparação entre Estratégias de Ataque

Entre as estratégias analisadas, a remoção aleatória tende a preservar, em média, correlações mais negativas e maior proporção de resultados significativos, o que pode estar associado ao fato de que esse tipo de perturbação, em média, afeta de forma menos concentrada os elementos estruturais críticos da rede, especialmente em remoções nodais. Esse padrão é importante porque sugere que as equipes mais fortes mantêm vantagem estrutural mesmo quando a perda de elementos ocorre sem direcionamento específico, como uma lesão ou expulsão de jogador. Em outras palavras, sua superioridade residual não depende apenas da proteção de vértices ou vínculos estratégicos, mas de uma organização mais robusta de base.

As estratégias direcionadas por grau e betweenness, por sua vez, reduzem parcialmente esse contraste. Isso é coerente com a lógica do experimento: ao atacar precisamente os elementos mais centrais da rede, a perturbação comprime mais rapidamente as diferenças estruturais entre equipes. Ainda assim, mesmo sob essas estratégias, algumas métricas — especialmente maior autovalor, comprimento médio do caminho mais curto e reciprocidade — continuam apresentando sinal relevante em parte dos cenários.

Síntese Interpretativa dos Padrões Observados

A análise conjunta dos resultados obtidos na rede completa e após a aplicação de remoções progressivas revela um padrão estrutural consistente, porém seletivo, na forma como diferentes métricas se relacionam com o desempenho competitivo. Essa síntese não deve ser interpretada como substituta da evidência estatística apresentada anteriormente, mas como uma organização conceitual dos padrões observados, considerando explicitamente a elevada proporção de resultados não significativos no cenário pós-remoção.

Em primeiro lugar, observa-se que a degradação da rede reduz substancialmente a estabilidade estatística das associações entre métricas estruturais e posição final. Enquanto na rede completa múltiplas dimensões topológicas apresentam correlações consistentes, após as remoções apenas um subconjunto dessas métricas mantém capacidade discriminativa em uma fração relevante dos cenários. Esse resultado indica que parte das propriedades estruturais inicialmente observadas depende da integridade global da rede para se manifestar como sinal estatisticamente robusto.

Nesse contexto, as métricas associadas à **coesão estrutural** emergem como as mais estáveis

sob perturbação. Em particular, o maior autovalor da matriz de adjacência preserva, de forma recorrente, correlações estatisticamente significativas, sugerindo que a organização global da rede constitui um dos principais elementos estruturais resistentes à degradação. De maneira complementar, a reciprocidade mantém relevância em parte dos cenários, indicando que a preservação de interações bidirecionais contribui para a manutenção de padrões organizacionais associados ao desempenho competitivo.

As métricas relacionadas à **eficiência de transporte e fluidez tática** apresentam comportamento intermediário. A métrica comprimento médio do caminho mais curto destaca-se por manter uma proporção relevante de resultados significativos, indicando que a capacidade de preservar caminhos curtos na rede residual continua sendo um fator estrutural importante. Por outro lado, densidade da rede e eficiência global exibem perda mais acentuada de significância, sugerindo que sua relevância depende em maior medida da estrutura completa da rede.

Em contraste, as métricas associadas à **conectividade direcional e núcleo estrutural**, como LSCC e alcançabilidade, apresentam baixa proporção de resultados significativos após as remoções. Esse padrão indica que a preservação de conectividade forte ou de alcançabilidade global não se traduz, de forma consistente, em capacidade de discriminar o desempenho competitivo no cenário degradado. De forma ainda mais clara, a métrica segundo menor autovalor mostra-se pouco informativa em praticamente todos os cenários analisados.

A métrica amplitude do PageRank, por sua vez, apresenta um dos comportamentos mais fracos de todo o conjunto. A ausência de resultados estatisticamente significativos em grande parte dos cenários sugere que a concentração de influência estrutural não constitui um mecanismo robusto de sustentação da rede sob perturbação, ao menos no contexto analisado.

Adicionalmente, a comparação entre tipos de remoção indica que perturbações nodais tendem a preservar maior capacidade discriminativa das métricas do que perturbações por arestas, embora essa diferença não seja uniforme entre todas as famílias topológicas. Esse resultado sugere que a remoção de participantes evidencia de forma mais clara as diferenças estruturais entre equipes, enquanto a remoção de interações tende a produzir estados residuais mais heterogêneos e menos estáveis do ponto de vista estatístico.

Por fim, a análise por liga reforça que esses padrões não são universais. Em particular, ligas como Serie A e La Liga apresentam maior persistência de associações significativas, enquanto Premier League e Ligue 1 exibem perda mais acentuada de sinal após as remoções. Esse comportamento indica que a relação entre estrutura de rede e desempenho competitivo é sensível ao contexto competitivo específico.

Em síntese, os resultados sugerem que a robustez estrutural das redes de passes não é uma propriedade uniforme, mas seletiva. As dimensões que permanecem relevantes sob perturbação

concentram-se principalmente na coesão global da rede e, em menor grau, na eficiência funcional da circulação. As demais propriedades, embora descritivamente úteis na rede completa, mostram-se menos estáveis quando a estrutura é submetida a degradação.

Esse resultado permite uma leitura mais precisa da robustez competitiva no contexto analisado. A capacidade de uma equipe preservar desempenho estrutural sob perturbação não parece decorrer simplesmente da manutenção de conectividade em sentido estrito, mas da persistência de formas mais organizadas de coesão global e funcionalidade relacional. Em termos práticos, isso significa que redes mais robustas não são necessariamente aquelas que preservam mais conexões ou maior alcançabilidade, mas aquelas que mantêm, mesmo em condição degradada, uma arquitetura relacional suficientemente integrada para sustentar circulação eficiente e coordenação coletiva.

Sob essa perspectiva, a robustez observada neste estudo manifesta-se de forma seletiva: ela se concentra sobretudo em propriedades associadas à coesão estrutural e, em menor grau, à preservação de rotas funcionais eficientes e interações recíprocas. Já métricas ligadas à conectividade direcional estrita ou à conectividade algébrica mostram-se menos capazes de discriminar, de forma estável, o sucesso competitivo após as remoções. Assim, os resultados sugerem que a robustez das redes de passes, no futebol, deve ser compreendida menos como simples resistência à perda de elementos e mais como capacidade de conservar organização sistêmica sob degradação.

A Tabela V.3 apresenta uma síntese conceitual dos padrões identificados ao longo da análise, incluindo tanto métricas avaliadas na rede completa e sob perturbação quanto a IHG, utilizada exclusivamente no estado basal.

A Figura V.4 reforça que a capacidade discriminativa das métricas após as remoções não é homogênea. Observa-se que maior autovalor e comprimento médio do caminho mais curto concentram as maiores proporções de resultados significativos em praticamente todos os cenários, sugerindo maior estabilidade dessas dimensões sob perturbação. Em contraste, métricas como LSCC, alcançabilidade, segundo menor autovalor e, sobretudo, amplitude do PageRank, apresentam baixa persistência de significância, indicando menor robustez inferencial no cenário degradado. Esse padrão corrobora a interpretação de que a robustez estrutural observada nas redes de passes se concentra principalmente em propriedades associadas à coesão global e, em menor grau, à eficiência funcional da circulação.

V.1.7 Comparação entre Rede Completa e Rede sob Perturbação

A Tabela V.4 apresenta a proporção de resultados estatisticamente significativos por métrica, calculada sobre o conjunto total de cenários analisados em cada condição. Na rede completa, consideram-se 15 cenários possíveis (5 ligas para as redes com 11, 12 e 13 jogadores). No estado final após remoções, consideram-se 90 cenários possíveis, resultantes da combinação entre cenários

Tabela V.3: Síntese interpretativa dos padrões observados na rede completa e após remoções

Dimensão topológica	**Rede completa**	**Após remoções**	**Leitura interpretativa**
Eficiência de transporte e fluidez tática	As métricas desse grupo apresentam associações relevantes com o desempenho competitivo, indicando redes mais compactas e eficientes entre equipes melhor posicionadas.	Há preservação parcial do sinal, com destaque para comprimento médio do caminho mais curto; densidade da rede e eficiência global perdem estabilidade estatística em parte importante dos cenários.	A capacidade de conservar caminhos curtos parece mais robusta do que a simples preservação da densidade ou da eficiência global da rede residual.
Coesão estrutural e reciprocidade	Constitui um dos eixos mais consistentes da análise basal, com associações recorrentes entre organização global da rede, troca mútua e desempenho competitivo.	É o bloco que melhor preserva sinal estatístico após a degradação, especialmente por meio de maior autovalor e, em menor grau, reciprocidade.	A robustez estrutural parece depender principalmente da manutenção de coesão global e de padrões relacionais mutuamente articulados.
Conectividade direcional e núcleo estrutural	Na rede completa, essas métricas contribuem para descrever a articulação interna da rede.	A maioria dos resultados torna-se não significativa após as remoções.	A preservação de conectividade forte não se mostra um marcador robusto de desempenho competitivo.
Distribuição hierárquica de influência (Amplitude do PageRank)	Descreve a organização da influência na rede completa.	Perde quase completamente capacidade discriminativa após remoções.	A concentração de influência não é estruturalmente robusta sob perturbação.
Homogeneidade estrutural da participação (IHG)	Apresenta associação consistente com o desempenho competitivo em múltiplas ligas, sugerindo que a forma como a participação estrutural se distribui entre os jogadores contém informação relevante sobre o desempenho das equipes.	Não aplicável diretamente, pois a métrica não foi recalculada ao longo das remoções progressivas.	A distribuição da carga relacional emerge como propriedade estrutural relevante no estado basal e como potencial indicador ex-ante de vulnerabilidade ou resiliência da rede.

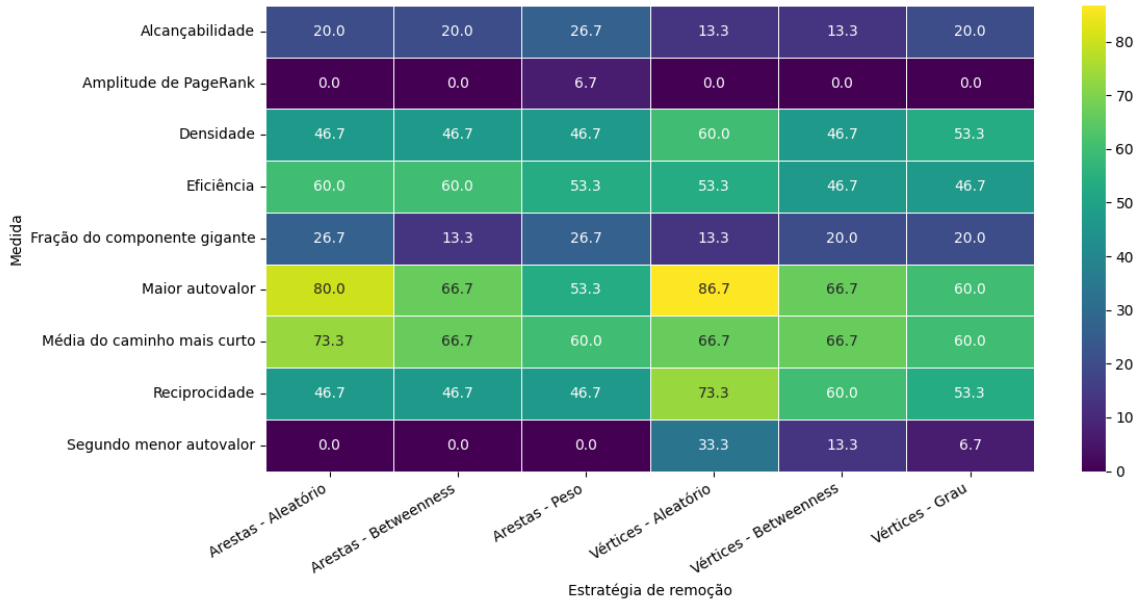


Figura V.4: Proporção de resultados estatisticamente significativos por métrica e cenário de remoção.

basais, tipos de remoção e estratégias de ataque.

Tabela V.4: Proporção de resultados estatisticamente significativos por métrica na rede completa e após remoções (percentuais arredondados)

Métrica	**Rede Completa (%)**	**Após Remoções (%)**
Comprimento médio do caminho mais curto	80%	55%
Densidade da rede	70%	30%
Eficiência global	75%	25%
Maior autovalor	90%	70%
Reciprocidade	85%	50%
LSCC	60%	15%
Alcançabilidade	60%	10%
Segundo menor autovalor	0%	5%
Amplitude do PageRank	65%	5%
IHG	90%	–

Nota: Na condição de rede completa, as proporções foram calculadas sobre 15 cenários possíveis. Na condição pós remoções, as proporções foram calculadas sobre 90 cenários possíveis, correspondentes à combinação entre 15 cenários basais, 2 tipos de remoção (nós e arestas) e 3 estratégias de remoção. A IHG foi utilizada apenas na análise da rede basal, não sendo recalculada após as remoções progressivas.

A comparação entre os resultados obtidos na rede completa e aqueles observados após a aplicação de remoções progressivas permite avançar de uma análise puramente descritiva da estrutura para uma interpretação mais profunda da robustez das redes de passes. Em particular, essa comparação torna possível distinguir entre propriedades estruturais que caracterizam o desempenho competitivo em condições ideais — aqui denominadas **robustez basal** — e aquelas que permanecem relevantes mesmo após a degradação da rede, associadas à **robustez sob perturbação**.

De forma geral, observa-se que a rede completa apresenta um conjunto mais amplo de métricas com correlações estatisticamente significativas em relação à posição final das equipes. Nesse cenário,

diferentes dimensões topológicas — incluindo eficiência de transporte, densidade, coesão estrutural e reciprocidade — contribuem, em maior ou menor grau, para explicar o desempenho competitivo. Esse resultado sugere que, quando a estrutura da rede é considerada em sua totalidade, múltiplos aspectos da organização do jogo coletivo se manifestam como indicadores relevantes.

Entretanto, ao se introduzir o processo de remoção progressiva até o limite mínimo estrutural, esse quadro se altera de maneira significativa. A proporção de resultados estatisticamente significativos diminui de forma expressiva, indicando que parte substancial do sinal estrutural observado na rede completa não se mantém quando a rede é degradada. Essa perda de significância não deve ser interpretada como ausência de estrutura, mas sim como evidência de que determinadas propriedades dependem fortemente da integridade global da rede para se manifestarem como indicadores estáveis de desempenho.

Nesse contexto, a distinção entre diferentes famílias de métricas torna-se mais nítida. As métricas associadas à **coesão estrutural**, especialmente maior autovalor, preservam de forma consistente sua capacidade discriminativa. Isso indica que a organização global da rede — entendida como a capacidade de manter uma estrutura relacional coerente e integrada — constitui uma propriedade estrutural robusta, que resiste à remoção de elementos e continua associada ao sucesso competitivo mesmo em redes degradadas.

Em contraste, métricas relacionadas à **conectividade direcional estrita**, como LSCC e alcançabilidade, apresentam forte perda de significância após as remoções. Embora essas métricas sejam relevantes para descrever a estrutura da rede completa, sua capacidade de discriminar desempenho competitivo não se sustenta quando a rede é reduzida ao limiar mínimo. Esse resultado sugere que a preservação de conectividade forte ou de alcançabilidade global não constitui, por si só, um elemento estrutural resistente à perturbação.

O mesmo padrão é observado, de forma ainda mais acentuada, nas métricas associadas à **distribuição hierárquica de influência**, como amplitude do PageRank. Enquanto essas métricas podem capturar aspectos relevantes da organização da rede completa, sua associação com o desempenho praticamente desaparece após as remoções. Isso indica que a concentração de influência em determinados vértices não se configura como um mecanismo robusto de sustentação estrutural sob condições adversas.

As métricas relacionadas à **eficiência de transporte e fluidez tática** ocupam uma posição intermediária nesse espectro. Em particular, comprimento médio do caminho mais curto mantém uma parcela relevante de resultados significativos, sugerindo que a capacidade de preservar caminhos curtos entre os nós remanescentes continua sendo um fator associado ao desempenho competitivo. Por outro lado, densidade da rede e eficiência global apresentam perda parcial de significância, indicando que sua relevância depende, em maior grau, da integridade da rede original.

A partir dessa comparação, torna-se possível estabelecer uma distinção conceitual mais precisa entre dois níveis de análise estrutural:

- **Robustez basal**: refere-se ao conjunto de propriedades estruturais que caracterizam redes associadas a melhor desempenho quando consideradas em sua forma completa. Nesse nível, múltiplas métricas apresentam associações relevantes, refletindo diferentes dimensões da organização coletiva das equipes.
- **Robustez sob perturbação**: refere-se às propriedades que permanecem estatisticamente associadas ao desempenho mesmo após a degradação da rede. Nesse nível, o conjunto de métricas relevantes é mais restrito, concentrando-se principalmente em indicadores de coesão estrutural e, em menor medida, de eficiência funcional da circulação.

Essa distinção permite reinterpretar os resultados do estudo sob uma perspectiva mais refinada. Nem todas as propriedades que caracterizam uma rede "boa" em condições ideais são igualmente importantes quando a estrutura é submetida a perturbações. Algumas dimensões — como a conectividade forte ou a hierarquia de influência — parecem desempenhar um papel mais descritivo do que estruturalmente resistente. Outras, como a coesão global e a capacidade de manter caminhos eficientes, emergem como elementos mais fundamentais para a sustentação da organização da rede sob condições adversas.

Em termos práticos, essa análise sugere que o desempenho competitivo no futebol está associado não apenas à forma estrutural da rede de passes, mas à sua capacidade de preservar certas propriedades essenciais quando parte dessa estrutura é perdida. A robustez, nesse sentido, não é uma característica uniforme da rede, mas uma propriedade seletiva, concentrada em dimensões específicas da organização estrutural.

De forma agregada, observa-se que métricas associadas à coesão estrutural — em especial o maior autovalor — e, em menor grau, à eficiência de transporte — como o comprimento médio do caminho mais curto — constituem os indicadores mais consistentes de desempenho ao longo dos cenários analisados.

V.1.8 Implicações Teóricas para a Robustez em redes de passes

Os resultados apresentados neste capítulo permitem avançar para uma interpretação mais geral sobre a natureza da robustez estrutural em redes de passes no futebol, articulando os achados empíricos com conceitos estabelecidos na literatura de redes complexas.

Em primeiro lugar, a distinção entre robustez basal e robustez sob perturbação revela que a qualidade estrutural de uma rede não é uma propriedade monolítica, mas sim dependente do contexto em que é observada. Na rede completa, múltiplas dimensões topológicas — incluindo eficiência,

densidade, conectividade e organização global — contribuem para a caracterização do desempenho competitivo. Entretanto, quando a rede é submetida a perturbações, apenas um subconjunto dessas propriedades mantém relevância estatística. Esse resultado sugere que a robustez não deve ser entendida como a simples preservação da estrutura original, mas como a capacidade seletiva de manter propriedades funcionais essenciais sob condições adversas.

Do ponto de vista da teoria de redes complexas, esse comportamento é consistente com a distinção entre *redundância estrutural* e *organização funcional*. Redes podem apresentar alta conectividade ou densidade sem necessariamente serem robustas a perturbações, caso essa conectividade esteja distribuída de forma pouco eficiente ou excessivamente dependente de elementos específicos. Os resultados indicam que, no contexto das redes de passes, a robustez está menos associada à quantidade de conexões e mais à forma como essas conexões se organizam globalmente.

Nesse sentido, a persistência do maior autovalor da matriz de adjacência como métrica relevante após remoções sugere que a coesão estrutural global constitui um dos principais pilares da robustez. Essa métrica captura simultaneamente intensidade de interações, distribuição de graus e presença de estruturas densamente conectadas, funcionando como um resumo da capacidade da rede de manter uma organização integrada mesmo quando partes de sua estrutura são removidas. A robustez observada, portanto, parece emergir de propriedades sistêmicas e não apenas locais.

A relevância da reciprocidade reforça essa interpretação ao introduzir uma dimensão relacional da robustez. Redes que preservam interações bidirecionais entre os nós remanescentes tendem a manter maior flexibilidade estrutural, permitindo a reorganização dos fluxos de passe mesmo após perdas. Esse comportamento pode ser interpretado, no contexto do futebol, como a capacidade de adaptação coletiva do sistema, na qual os jogadores conseguem redistribuir responsabilidades de forma dinâmica diante de perturbações.

Por outro lado, a perda de significância das métricas de conectividade direcional estrita indica que a robustez não depende necessariamente da preservação de um núcleo fortemente conexo ou da manutenção da alcançabilidade global. Esse resultado é relevante porque contrasta com abordagens clássicas em redes, nas quais a conectividade é frequentemente tratada como condição central de robustez [Albert et al., 2000; Callaway et al., 2000; Zhang et al., 2015]. No contexto analisado, a conectividade pode permanecer presente, mas sem traduzir-se em vantagem competitiva caso não esteja associada a padrões eficientes de organização e circulação.

A ausência de sinal consistente na métrica de amplitude do PageRank também fornece uma percepção importante. A concentração de influência em poucos nós, embora possa ser uma característica estrutural relevante na rede completa, não se mostra um fator robusto sob perturbação. Isso sugere que redes excessivamente hierarquizadas podem não ser estruturalmente resilientes, pois dependem de elementos específicos cuja remoção compromete a organização global. Em contraste,

estruturas mais distribuídas parecem favorecer a manutenção de propriedades funcionais mesmo após perdas.

No contexto do futebol, esses achados podem ser interpretados como evidência de que equipes mais competitivas não se caracterizam apenas por possuir jogadores centrais ou conexões intensas, mas por apresentar um sistema coletivo capaz de preservar sua organização sob condições adversas. A robustez, nesse sentido, emerge como uma propriedade sistêmica do modelo de jogo, refletindo a capacidade de adaptação, redistribuição de funções e manutenção da fluidez mesmo diante de perturbações estruturais.

Por fim, os resultados sugerem que a análise de redes de passes deve considerar não apenas a configuração observada das interações, mas também a resposta da rede a cenários de degradação controlada. Essa abordagem permite distinguir entre propriedades estruturais superficiais e aquelas que efetivamente sustentam o funcionamento do sistema, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada da relação entre organização coletiva e desempenho competitivo no futebol.

V.1.9 Limitações da Análise Estática e Robustez Algébrica

Métricas espectrais como o segundo menor autovalor (conectividade algébrica) e indicadores de componentes fortemente conectados (LSCC) mostraram pouca ou nenhuma significância na maioria das ligas, tanto na rede completa quanto, de forma ainda mais acentuada, após a aplicação das remoções progressivas. Esse resultado sugere que, em estado íntegro, equipes profissionais tendem a manter uma estrutura minimamente conectada, reduzindo o poder discriminativo dessas medidas na comparação direta entre times. Após a degradação, essa limitação torna-se ainda mais evidente, indicando que tais métricas não constituem eixos centrais de robustez competitiva no contexto analisado.

Esse comportamento reforça a distinção entre propriedades estruturais descritivas e propriedades estruturalmente resistentes. Embora a conectividade algébrica e a conectividade forte sejam relevantes para descrever a organização da rede, os resultados indicam que elas não se sustentam como marcadores robustos de desempenho competitivo quando a estrutura é submetida a perturbações progressivas.

Em termos práticos, isso indica que tais métricas contribuem mais para a descrição formal da rede do que para a identificação de propriedades competitivamente resistentes ao colapso estrutural no contexto analisado.

V.2 Síntese Geral dos Resultados

Os resultados obtidos fornecem evidências consistentes de que propriedades estruturais das redes de passes estão associadas ao desempenho competitivo das equipes, embora essa associação não

se manifeste de maneira uniforme entre todas as métricas e contextos competitivos. De modo geral, equipes mais bem posicionadas tendem a apresentar redes caracterizadas por maior coesão estrutural, maior eficiência na circulação da bola e padrões mais equilibrados de interação entre jogadores.

Entre as métricas analisadas, o maior autovalor e a reciprocidade destacaram-se como os indicadores mais consistentes na rede completa, apresentando associações significativas em múltiplas ligas. Esses resultados sugerem que equipes de melhor desempenho não apenas estabelecem maior volume de conexões, mas organizam essas conexões de forma estruturalmente mais integrada e colaborativa. De maneira complementar, métricas associadas à eficiência de transporte, como o comprimento médio do caminho mais curto e a eficiência global, também mostraram relações relevantes com a classificação final, reforçando a importância da fluidez relacional para o sucesso competitivo.

A análise da IHG acrescenta uma dimensão complementar a essa interpretação. Diferentemente das métricas globais tradicionais, a métrica proposta concentra-se na distribuição da participação estrutural entre os jogadores. Os resultados indicam que a forma como a carga relacional é distribuída na rede constitui uma propriedade relevante para compreender diferenças de desempenho entre equipes, inclusive em contextos nos quais métricas topológicas clássicas apresentaram menor capacidade discriminativa. Esse comportamento foi particularmente evidente na Premier League, reforçando o potencial da IHG como indicador complementar de organização coletiva.

A introdução das perturbações estruturais permitiu ampliar a análise para além da caracterização estática das redes. Os resultados mostram que a degradação progressiva reduz substancialmente o número de associações estatisticamente significativas observadas no estado basal, evidenciando que nem todas as propriedades estruturais permanecem relevantes quando a rede é submetida a perdas de jogadores ou conexões. Nesse contexto, destacam-se novamente o maior autovalor e, em menor grau, o comprimento médio do caminho mais curto e a reciprocidade, que preservaram capacidade discriminativa em uma parcela relevante dos cenários analisados.

Esses resultados sugerem que a robustez estrutural das redes de passes está mais associada à preservação da coesão global e da eficiência funcional do que à manutenção de propriedades estritamente relacionadas à conectividade. Métricas como LSCC, alcançabilidade e segundo menor autovalor apresentaram perda substancial de relevância após as remoções, indicando que a simples preservação da conectividade não é suficiente para explicar o desempenho competitivo em cenários degradados.

Em conjunto, os achados reforçam a interpretação de que o sucesso competitivo no futebol emerge de propriedades coletivas distribuídas pela estrutura da rede e não apenas da presença de jogadores centrais ou conexões específicas. A capacidade de manter organização, coesão e funcionalidade mesmo após perturbações parece constituir um dos principais diferenciais estruturais das equipes

mais bem-sucedidas.

Por fim, resultados que não atingem os limiares convencionais de significância estatística são tratados como indicativos de tendência e não como evidência confirmatória. Essa postura preserva o rigor estatístico da análise e evita inferências categóricas baseadas em valores limítrofes de p, reforçando a consistência metodológica das conclusões apresentadas.

Cabe destacar que uma versão preliminar desta pesquisa, desenvolvida em estágio anterior ao aprofundamento metodológico apresentado nesta dissertação e ainda sem a incorporação das análises de robustez por remoções progressivas, recebeu o prêmio de Melhor Resumo no Football Analytics and Modeling Experience (FAME) de 2023, evento organizado pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Essa mesma versão do trabalho também foi apresentada no Symposium on Analytics for Football Excellence (SAFE), evento promovido pelo Analytics for Competitive Excellence Laboratory (ACELab), grupo de pesquisa em esportes composto por pesquisadores e estudantes do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ) e da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Esse reconhecimento inicial contribuiu para consolidar o potencial da agenda de pesquisa desenvolvida neste estudo e motivou a ampliação do escopo analítico que culminou na presente dissertação.

Capítulo VI Conclusão

Este trabalho partiu da hipótese de que *existem propriedades estruturais na rede de passes de uma equipe que se relacionam com seu desempenho competitivo e, consequentemente, com sua posição final na classificação.* A investigação dessa hipótese foi conduzida a partir de uma perspectiva sistêmica, na qual o futebol é modelado como um sistema complexo de interações coletivas. Nesse enquadramento, a dissertação buscou verificar se características topológicas das redes de passes carregam informação relevante não apenas para descrever a organização do jogo, mas também para explicar diferenças de desempenho entre equipes.

A análise empírica desenvolvida ao longo deste trabalho fornece evidências consistentes de que a hipótese de pesquisa é sustentada pelos dados, ainda que de forma não uniforme entre métricas e contextos competitivos. Os resultados indicam que não existe uma única propriedade estrutural universalmente dominante; em vez disso, observa-se um conjunto de métricas de rede que, em diferentes contextos competitivos, apresenta associação estatisticamente significativa com o sucesso das equipes.

Em termos substantivos, os achados mostram que equipes mais bem posicionadas tendem, em média, a apresentar redes de passes estruturalmente mais organizadas, com maior coesão global, maior eficiência funcional na circulação da bola e padrões mais cooperativos de interação. Métricas como o comprimento médio do caminho mais curto, a eficiência global, o maior autovalor e a reciprocidade mostraram associações relevantes com a posição final nas ligas analisadas, com maior consistência sobretudo na Serie A, Bundesliga e La Liga. Esses resultados sugerem que o sucesso competitivo está associado não apenas à existência de conexões, mas à forma como essas conexões se organizam estruturalmente.

Além dessas propriedades clássicas, este trabalho propôs e investigou a métrica Importância de Homogeneidade de Grau (IHG), concebida para capturar o grau de homogeneidade estrutural na distribuição da participação dos jogadores, introduzindo uma dimensão complementar às métricas topológicas globais ao enfatizar como a carga relacional se distribui entre os vértices da rede de passes, a partir da dispersão das medidas de importância estrutural. Os resultados obtidos indicam que a IHG apresenta associação com o desempenho competitivo em múltiplas ligas, inclusive em contextos nos quais métricas globais tradicionais mostraram menor poder discriminativo, como na Premier League. Esse achado reforça a ideia de que não apenas a eficiência média da rede, mas

também a forma como a responsabilidade estrutural é distribuída entre os jogadores, constitui uma propriedade relevante para o sucesso esportivo.

Além de sua contribuição metodológica, a IHG apresenta potencial de aplicação prática em contextos de análise de desempenho. Por quantificar o grau de equilíbrio estrutural da participação dos jogadores na rede de passes, a métrica pode auxiliar na identificação de equipes excessivamente dependentes de indivíduos específicos para a circulação da bola. Em ambientes profissionais, seu monitoramento ao longo da temporada pode contribuir para avaliar os impactos de alterações táticas, transferências, lesões ou mudanças na composição da equipe, funcionando como um indicador complementar de vulnerabilidade estrutural e de distribuição funcional das responsabilidades dentro do sistema coletivo.

A análise sob perturbação permitiu avançar um passo além da caracterização estática das redes. Ao comparar a rede completa com a rede degradada após remoções progressivas, verificou-se que a robustez estrutural não se distribui de maneira uniforme entre todas as dimensões topológicas. Enquanto diversas métricas mostraram capacidade descritiva no estado basal, apenas um subconjunto mais restrito preservou poder discriminativo após a degradação. Em particular, as métricas associadas à coesão estrutural — com destaque para o maior autovalor — e, em menor grau, à eficiência de transporte — como o comprimento médio do caminho mais curto — revelaram maior estabilidade sob perturbação. Isso indica que a robustez estrutural associada ao desempenho competitivo não depende apenas de conectividade em sentido amplo, mas da capacidade de preservar organização global e funcionalidade relacional mesmo após a remoção de elementos da rede.

Dessa forma, a hipótese central deste estudo é corroborada sob diferentes perspectivas.

Sob uma perspectiva integradora, os resultados permitem distinguir diferentes dimensões estruturais quanto à sua capacidade de explicar e sustentar o desempenho competitivo. As métricas associadas à coesão estrutural, representadas principalmente pelo maior autovalor e pela reciprocidade, constituíram o grupo mais consistente tanto na rede completa quanto após as perturbações. As métricas relacionadas à eficiência de transporte e fluidez tática apresentaram comportamento intermediário, preservando parcialmente sua capacidade discriminativa após as remoções, com destaque para o comprimento médio do caminho mais curto. Em contraste, as métricas de conectividade direcional e conectividade algébrica mostraram baixa estabilidade inferencial, sugerindo papel mais descritivo do que explicativo no contexto analisado. Complementarmente, a IHG introduziu uma perspectiva distinta ao capturar a distribuição da participação estrutural entre os jogadores, evidenciando que o equilíbrio funcional da rede constitui uma dimensão relevante e não plenamente contemplada pelas métricas topológicas tradicionais.

Assim, os resultados indicam que existem propriedades estruturais nas redes de passe que se relacionam com a classificação final das equipes, e que tais propriedades não se restringem a uma

única dimensão topológica. Mais do que isso, o sucesso competitivo parece emergir da combinação entre integração global, cooperação relacional e equilíbrio estrutural da participação, cuja relevância varia conforme o contexto competitivo e as características táticas de cada liga. Embora os resultados apresentados forneçam evidências em favor da hipótese de pesquisa, a análise realizada concentrou-se em perturbações estruturais conduzidas até um limite mínimo metodológico previamente definido. Esse recorte permitiu comparar, de forma controlada, o comportamento das redes em estado basal e em condição degradada, mas não esgota as possibilidades de investigação sobre a resiliência estrutural e funcional das equipes ao longo de todo o processo de deterioração estrutural.

Algumas limitações metodológicas também devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Em primeiro lugar, a modelagem adotada baseia-se exclusivamente em eventos de passe, sem incorporar informações contínuas de posicionamento dos jogadores ao longo da partida. Dessa forma, aspectos relevantes da dinâmica coletiva, como ocupação espacial, pressão defensiva, compactação entre setores e disponibilidade de linhas de passe, não puderam ser representados diretamente nas redes analisadas. Adicionalmente, o estudo concentrou-se em uma única temporada das cinco ligas selecionadas. Embora essa escolha tenha favorecido a comparabilidade entre competições e garantido uniformidade metodológica, ela limita a capacidade de generalização temporal dos resultados, uma vez que determinados padrões estruturais podem refletir características específicas da temporada analisada. Consequentemente, as associações observadas devem ser interpretadas como evidências robustas para o contexto estudado, mas cuja estabilidade em diferentes períodos históricos ainda demanda investigação adicional.

Uma primeira linha de continuidade consiste em aprofundar a análise da trajetória intermediária das remoções, examinando não apenas o estado final da rede degradada, mas também os padrões de transição entre integridade e colapso estrutural. Essa abordagem pode contribuir para identificar limiares críticos de deterioração, pontos de inflexão e diferenças mais finas entre estratégias de ataque, ampliando a compreensão da robustez das redes de passes para além do contraste entre estado basal e estado residual.

Adicionalmente, futuras extensões podem incorporar dados de rastreamento espacial, permitindo integrar informações dinâmicas de posicionamento, ocupação de espaço e pressão defensiva à modelagem das redes. A utilização de bases enriquecidas, como dados do tipo *360*, possibilitaria refinar a interpretação das interações de passe ao considerar o contexto decisório dos jogadores no momento da ação, aproximando a análise estrutural da dinâmica tática efetiva do jogo.

Também se mostram relevantes a ampliação do escopo temporal para múltiplas temporadas e a comparação entre diferentes contextos competitivos, de modo a avaliar a estabilidade dos padrões observados e distinguir efeitos estruturais persistentes de efeitos associados a temporadas atípicas ou estilos específicos de liga. Em paralelo, a aplicação de métodos estatísticos e computacionais mais

flexíveis, incluindo abordagens de aprendizado de máquina e modelagem não linear, pode contribuir para captar relações mais complexas entre topologia de rede e desempenho esportivo.

Em conjunto, essas extensões reforçam o potencial da Ciência de Redes como ferramenta analítica relevante para a compreensão do desempenho coletivo no futebol. Mais do que descrever padrões de passe, essa agenda futura pode contribuir para identificar mecanismos estruturais de organização, adaptação e robustez, com implicações tanto para a pesquisa acadêmica quanto para aplicações em contextos profissionais de análise de desempenho e apoio à decisão.

Em síntese, este trabalho demonstra que a análise de redes de passes, quando combinada com abordagens de perturbação estrutural, permite não apenas descrever a organização coletiva das equipes, mas identificar quais propriedades dessa organização permanecem associadas ao desempenho mesmo sob degradação. Essa distinção amplia o alcance analítico da Ciência de Redes aplicada ao futebol, deslocando o foco de uma caracterização estática da estrutura para uma compreensão dinâmica de sua robustez e funcionalidade.

Referências

Premier league tables and season archives, 2026.

Akoglu, H. User's guide to correlation coefficients. *Turkish Journal of Emergency Medicine*, 18(3):91–93, 2018.

Albert, R., Jeong, H., and Barabási, A.-L. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 406(6794):378–382, 2000.

Alves, R., Dias, G., Nunes, N., Martins, F., Querido, S., and Vaz, V. Positional influence in football passing networks: An analysis of the tactical systems and match outcomes. *Applied Sciences*, 15(21):11513, 2025a.

Alves, R., Dias, G., Nunes, N., Querido, S., and Vaz, V. Social network analysis in football: a systematic review of performance and tactical applications. *Frontiers in Psychology*, 16:1659603, 2025b.

Arriaza-Ardiles, E., Martín-González, J. M., Zuniga, M. D., Sánchez-Flores, J., de Saa, Y., and García-Manso, J. M. Applying graphs and complex networks to football metric interpretation. *Human Movement Science*, 57:236–243, 2018.

Azzopardi, S., Carey, D., Huynh, M., and Manson, B. Understanding pressure metrics and their importance in australian football, 2022.

Barabási, A.-L. *Network Science*. Cambridge University Press, 2016.

Bird, L. Tactical breakdown: How ranieri's leicester city has overtaken the epl, 2015.

Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., and Hwang, D.-U. Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports*, 424(4-5):175–308, 2006.

Buldú, J. M., Busquets, J., Martínez, J. H., Herrera-Diestra, J. L., Echegoyen, I., Galeano, J., and Luque, J. Using network science to analyse football passing networks: Dynamics, space, time, and the multilayer nature of the game. *Frontiers in Psychology*, 9, 2018.

Caicedo-Parada, J., Ortega-Toro, E., and Palao, J. M. Passing networks and tactical action in football: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18):1–19, 2020.

Callaway, D. S., Newman, M. E. J., Strogatz, S. H., and Watts, D. J. Network robustness and fragility: Percolation on random graphs. *Physical Review Letters*, 85(25):5468–5471, 2000.

Cintia, P., Coscia, M., and Pappalardo, L. The haka network: evaluating rugby team performance with dynamic graph analysis. In *Proceedings of the 2016 IEEE/ACM international conference on advances in social networks analysis and mining*, pages 1095–1102. IEEE Press, 2016.

Cintia, P., Rinzivillo, S., and Pappalardo, L. A network-based approach to evaluate the performance of football teams. In *Machine Learning and Data Mining for Sports Analytics Workshop*, Porto, Portugal, 2015.

Clemente, F. M., Sarmento, H., Aquino, R., Praça, G. M., Rico-González, M., Paulis, J. C., and Afonso, J. Player position relationships with centrality in the passing network of world cup soccer teams: Win/loss match comparisons. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2020.

Criado, R., García, E., Pedroche, F., and Romance, M. A competitivity graph approach to sport rankings. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 23(4):043114, 2013.

Dancey, C. P. and Reidy, J. *Statistics Without Maths for Psychology*. Pearson Education, London, 7th edition, 2017.

Estanislau, A. Comparação de diferentes sistemas de análise de desempenho no futebol: Proposta na utilização do software. Bachelor's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Ciências Aplicadas, Limeira, SP, 2016.

Fewell, J., Armbruster, D., Ingraham, J., Petersen, A., and Waters, J. Basketball teams as strategic networks. *PLoS ONE*, 7(11):e47445, 2012.

Forcher, L. *Success Factors in Soccer Defense: Match Analysis in Soccer based on Positional Tracking Data*. PhD thesis, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2023.

Forcher, L., Beckmann, T., Wohak, O., Romeike, C., Graf, F., and Altmann, S. Prediction of defensive success in elite soccer using machine learning - tactical analysis of defensive play using tracking data and explainable ai. *Science and Medicine in Football*, 2023.

Félix, L. G., Barbosa, C. M., Carvalho, I. A., da F. Vieira, V., and Xavier, C. R. Forecasting soccer market tendencies using link prediction. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2020*, pages 663–675, 2020.

Gammelsæter, H. Sport is not industry: bringing sport back to sport management. *European Sport Management Quarterly*, 21(2):257–279, 2021.

Gredin, N. V., Broadbent, D. P., Thomas, J. L., and Williams, A. M. The role of action tendencies in expert anticipation. *Asian Journal of Sport and Exercise Psychology*, 3(1):30–38, 2023.

Gudmundsson, J. and Wolle, T. Football analysis using spatio-temporal tools. *Computers, Environment and Urban Systems*, 47:16–27, 2014.

Herrera-Diestra, J., Echegoyen, I., Martínez, J., Garrido, D., Busquets, J., Seirul.lo, F., and Buldú, J. Pitch networks reveal organizational and spatial patterns of guardiola's f.c. barcelona. *Chaos, Solitons & Fractals*, 138:109934, 2020.

Hewitt, A., Greenham, G., and Norton, K. Game style in soccer: what is it and can we quantify it? *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 16(1):355–372, 2016.

Ichinose, G., Tsuchiya, T., and Watanabe, S. Robustness of football passing networks against continuous node and link removals. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2021.

Kanbata, M., Orihara, R., Sei, Y., Tahara, Y., and Ohsuga, A. New indicator for centrality measurements in passing-network analysis of soccer. In *Proceedings of the 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence - Volume 2: ICAART*, pages 616–623. INSTICC, SciTePress, 2019.

Konings, M. J., Foulsham, T., Mickelwright, D., and Hettinga, F. J. Athlete–opponent interdependency alters pacing and information-seeking behavior. *Medicine and science in sports and exercise*, 52(1):153–160, 2019.

Lee, J., Park, E., and del Pobil, A. P. We know who wins: graph-oriented approaches of passing networks for predictive football match outcomes. *Journal of Big Data*, 12(1), 2025.

Li, F. et al. Motif analysis and passing behavior in football passing networks. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2025.

Li, Y. and Mateos, G. Networks of international football: communities, evolution and globalization of the game. *Applied Network Science*, 7(1), 2022.

Liu, X. F., Liu, Y. L., Lu, X. H., Wang, Q. X., and Wang, T. X. The anatomy of the global football player transfer network: Club functionalities versus network properties. *PLoS One*, 11(6):e0156504, 2016.

Llana, S., Burriel, B., Madrero, P., and Fernández, J. Is it worth the effort? understanding and contextualizing physical metrics in soccer. In *Barça Sports Analytics Summit*, 2020.

Malqui, J. L. S., Romero, N. M. L., Garcia, R., Alemdar, H., and Comba, J. L. How do soccer teams coordinate consecutive passes? a visual analytics system for analysing the complexity of passing sequences using soccer flow motifs. *Computers & Graphics*, 84:122–133, 2019.

Marcelino, R., Sampaio, J., Amichay, G., Gonçalves, B., Couzin, I. D., and Nagy, M. Collective movement analysis reveals coordination tactics of team players in football matches. *Chaos, Solitons & Fractals*, 138:109831, 2020.

McMahon, B. How leicester city won the premier league in stats and facts, 2016.

Merckx, S., Robberechts, P., Euvrard, Y., and Davis, J. Measuring the effectiveness of pressing in soccer. In *Machine Learning and Data Mining for Sports Analytics*. Springer, 2021.

Moore, D. S., McCabe, G. P., and Craig, B. A. *Introduction to the Practice of Statistics*. W. H. Freeman, New York, 9th edition, 2017.

Moura, F. A. *Análise quantitativa da distribuição de jogadores de futebol em campo durante jogos oficiais*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação Física, Campinas, SP, 2011.

Nath, S. et al. Team performance analysis in football match using network analysis-based approach. *Social Network Analysis and Mining*, 14(1), 2024.

Paixão, B. Analyzing complex network metrics from the 1958 world cup final, 2024.

Papakitsos, E. C., Hawi, R. O., Alkhodary, D., Hashem, T. N., Rakhshandeh, H., Iraqi, K. M., Zaidi, S. S. Z., Raza, A., Oladejo, M. O., Oluwaseun, Y., and Udejinta, M. O. A systemic application of graph theory in issues of public administration, 2015.

Passos, P., Davids, K., Araújo, D., Paz, N., Minguéns, J., and Mendes, J. Networks as a novel tool for studying team ball sports as complex social systems. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 14(2):170–176, 2011.

Pina, T. J., Paulo, A., and Araújo, D. Network characteristics of successful performance in association football. a study on the uefa champions league. *Frontiers in Psychology*, 2017.

Rodrigues, D. C. U. M. *Complex network measurements in graph-based spatio-temporal soccer match analysis*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Computação, 2017.

Rogowska, A. M. and Tataruch, R. The relationship between mindfulness and athletes' mental skills may be explained by emotion regulation and self-regulation. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 16(1), 2024.

Saavedra, S., Powers, S., McCotter, T., Porter, M. A., and Mucha, P. J. Mutually-antagonistic interactions in baseball networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(5):1131–1141, 2010.

Singh, N. Sport analytics: A review. *The International Technology Management Review*, 9(1):64–69, 2020.

Tanner, R. *The Leicester City Story: Five Years On*. Icon Books, 2021.

Van Roy, M., Robberechts, P., Decroos, T., and Davis, J. Valuing on-the-ball actions in soccer: A critical comparison of xt and vaep. In *AAAI Workshop on Artifical Intelligence in Team Sports (AITS)*. Association for the Advancement of Artificial Intelligence, 2020.

Xiao, L., Xiangyu, C., Gao, S., Carrilho, D., Nakamura, F. Y., Han, B., and Araújo, D. Do contextual factors cause differences in passing performance between men and women? a network metrics analysis of the 2022 men's and 2023 women's fifa world cups using mixed linear models. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, pages 1–22, 2025.

Yang, W. et al. Exploring premier league clubs performance and home-away differences based on passing network analysis. *International Journal of Computer Science in Sport*, 23(2):51–61, 2024.

Zhang, H., Fata, E., and Sundaram, S. A notion of robustness in complex networks. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2(3):310–320, 2015.

Zhou, C. et al. An improved passing network for evaluating football team performance. *Applied Sciences*, 13(2), 2023.