

INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Introdução à Teoria de Ramsey em Grafos

V. S. Souza

C. N. Campos

Relatório Técnico - IC-PFG-16-01 - Projeto Final de Graduação

December - 2016 - Dezembro

The contents of this report are the sole responsibility of the authors.
O conteúdo do presente relatório é de única responsabilidade dos autores.

Projeto Final de Graduação

Introdução à Teoria de Ramsey em Grafos

Aluno: Victor Seixas Souza
Supervisora: Christiane Neme Campos ¹

19 de dezembro de 2016

¹Instituto de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 13081-970 Campinas

Prefácio	iii
1 Introdução	1
1.1 Noções de Grafos	2
1.2 Números de Ramsey	6
2 Números de Ramsey Clássicos	11
2.1 Pequenos Números de Ramsey	11
2.2 Limitantes Superiores	15
2.3 Números de Ramsey Multicoloridos	17
3 Números de Ramsey para outros Grafos	22
3.1 Grafos Bipartidos	22
3.2 Caminhos e Ciclos	24
3.3 Árvores	25
4 Método Probabilístico	26
4.1 Probabilidade Discreta	26
4.2 Limitantes Inferiores	29
4.3 Pequenas Alterações	31
4.4 O Lema Local de Lovász	33

A Teoria de Ramsey é uma área da matemática que unifica o tema: desordem completa é impossível. Mais especificamente, observamos que se uma estrutura é grande o suficiente, então ela possui uma subestrutura bem especial e ordenada. Este fenômeno ocorre em diversos campos da Matemática, como Combinatória, Geometria e Teoria dos Números. Este projeto aborda conceitos básicos e alguns dos resultados clássicos em Teoria de Ramsey aplicada a grafos.

O exemplo mais simples de tal corpo teórico é frequentemente apresentado na seguinte história: em uma festa com pelo menos seis pessoas, três delas se conhecem mutuamente ou três delas não se conhecem mutuamente. Se enxergarmos a relação de conhecer como simétrica, o mesmo pode ser traduzido para linguagem de Teoria de Grafos como: todo grafo com pelo menos seis vértices possui um triângulo, ou, então, o seu grafo complementar possui um triângulo. A Teoria de Ramsey inicia-se pela generalização sucessiva deste enunciado para grafos e hipergrafos.

A Teoria de Ramsey tem seu nome em homenagem ao matemático e filósofo britânico Frank P. Ramsey, por seu trabalho, em lógica, publicado em 1930 [17], mas apenas adquiriu um corpo teórico coeso na década de 1970. A área vem recebendo grande atenção nos últimos vinte anos por suas conexões com diversos campos da matemática e, ainda assim, muito dos seus problemas fundamentais permanecem sem solução. Além disso, não muito da teoria propagou-se para os livros didáticos em nível de graduação. Entretanto, é possível abordar parte da teoria sem recorrer ao ferramental mais avançado.

Considerando a lacuna da literatura citada anteriormente, este texto tem por objetivo apresentar conceitos básicos da Teoria de Ramsey em grafos em um nível introdutório e em língua portuguesa. Além disso, planeja-se completar este texto com a apresentação de um ou dois tópicos mais avançados da área, que serão selecionados dentre: o método probabilístico; o lema da regularidade de Szemerédi; ou aplicações em Teoria dos Números.

CAPÍTULO 1

Introdução

No primeiro dia de aula em uma escolinha de matemática, a professora preparou uma gincana para entrosar os alunos. Ela os sorteou em grupos de seis, e cada grupo deveria sentar-se em mesas separadas. O objetivo era que os alunos conversassem entre si sobre o que fizeram durante as férias e, potencialmente, criassem novas amizades. Alguns alunos haviam sido colegas nos anos anteriores e, portanto, já se conheciam; outros alunos vieram de turmas diferentes, então não conheciam a todos. Além disso, novos alunos entram na escola todo ano para aprender matemática!

Após o sorteio, a professora supervisionou atentamente os grupos e observou que em algumas mesas, três alunos já se conheciam. Já em outras mesas, até quatro alunos já se conheciam. Preocupada se a gincana teria o efeito desejado, ela adotou outra estratégia e focou apenas nos alunos que ainda não se conheciam. Em algumas mesas, havia três alunos que ainda não se conheciam, mas outras pareciam menos promissoras, não havendo nem três alunos que não se conheciam. O fato curioso era que nestas mesas havia três alunos que se conheciam. Sendo uma professora de matemática, ela se perguntou se existia algum motivo para isto acontecer. Será que se ela fizesse outro sorteio, poderia haver uma mesa em que nenhum grupo de três alunos se conhecessem e nenhum grupo de três alunos não se conhecessem? Por sorte, a professora havia estudado Teoria de Grafos e conseguiu verificar o seguinte fato:

Fato 1. *Em uma mesa com seis alunos, três alunos se conhecem ou três alunos não se conhecem.*

Vamos ver agora como que a professora percebeu este fato. Considere que você seja um dos seis alunos da mesa. Dos cinco restantes, você conhece uma quantidade, digamos c , e também não conhece uma quantidade n . Sabemos que $c + n = 5$. Isto nos dá que, ou $c \geq 3$, ou $n \geq 3$. De fato, se $c \leq 2$ e $n \leq 2$ ocorrerem simultaneamente, $5 = c + n \leq 4$, o que é absurdo. Suponha $c \geq 3$, isto significa que você conhece pelo menos três dos outros alunos, digamos Alberto, Bruna e Carlos. Se existe alguma amizade entre eles, digamos, Alberto

e Carlos são amigos, então a mesa possui um grupo de três alunos que se conhece, você, Alberto e Carlos. Caso isto não ocorra, então Alberto, Bruna e Carlos formam um grupo de três alunos que não se conhecem. O caso $n \geq 3$ segue do mesmo raciocínio.

O Fato 1 pode ser considerado o primeiro resultado na Teoria de Ramsey e possui generalizações interessantes. Além disso, ele possui uma formulação mais clara em termos de coloração de grafos. Na próxima seção, introduzimos os conceitos da Teoria de Grafos que são necessários para adentrar o universo da Teoria de Ramsey em grafos. Um leitor familiarizado com grafos é convidado a fazer uma leitura rápida da seção para se familiarizar à notação utilizada neste texto.

1.1 Noções de Grafos

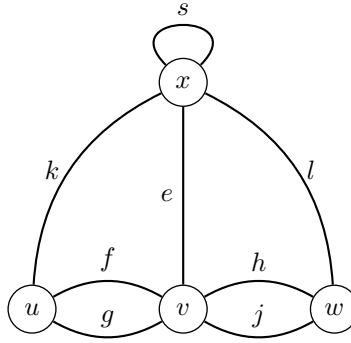
Um *grafo* G é um par ordenado $(V(G), E(G))$, que consiste em um conjunto $V(G)$ de *vértices* e um conjunto $E(G)$ de *arestas*, disjunto de $V(G)$, acompanhado de uma função de incidência Ψ_G que associa cada aresta de $E(G)$ a um par de vértices de $V(G)$, não necessariamente distintos. Uma aresta $e \in E(G)$ e vértices $u, v \in V(G)$ são ditos *incidentes* se $\Psi_G(e) = \{u, v\}$. Neste caso, diz-se ainda que u e v são as *extremidades* de e . A incidência relaciona elementos de conjuntos distintos, neste caso, vértices e arestas. Uma outra relação é a de adjacência, que se aplica para elementos de mesma natureza. Dois vértices u e v são ditos *adjacentes* em G se existe uma aresta e em G tal que $\Psi_G(e) = \{u, v\}$. Duas arestas e e f são ditas *adjacentes* em G se existe um vértice v em G tal que $v \in \Psi_G(e) \cap \Psi_G(f)$, isto é, se existe um vértice v que incide simultaneamente em e e f .

Vamos construir um grafo $G = (V(G), E(G))$ para ilustrar estas definições. O conjunto de vértices será $V(G) = \{u, v, w, x\}$ e o conjunto de arestas será $E(G) = \{e, f, g, h, j, k, l, s\}$. Falta definir a função de incidência Ψ_G , que associa as arestas aos vértices:

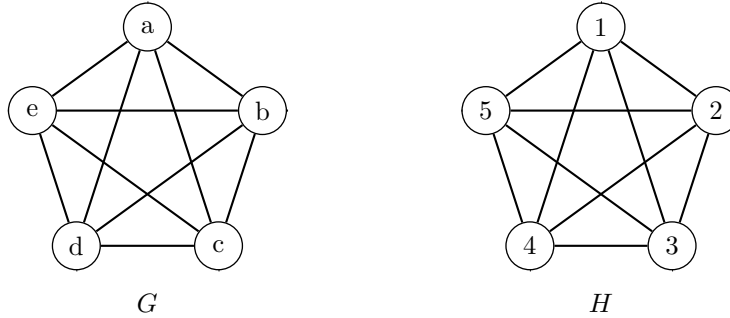
$$\begin{array}{llll} \Psi_G(e) = \{v, x\} & \Psi_G(f) = \{u, v\} & \Psi_G(g) = \{u, v\} & \Psi_G(h) = \{v, w\} \\ \Psi_G(j) = \{v, w\} & \Psi_G(k) = \{u, x\} & \Psi_G(l) = \{w, x\} & \Psi_G(s) = \{x\} \end{array}$$

Isto completa a definição do grafo G . Uma maneira interessante de representar grafos é por meio de um desenho. A Figura 1 representa o grafo G da seguinte maneira: os vértices são indicados por círculos e as arestas são indicadas por linhas que unem os círculos que correspondem aos vértices nos quais a aresta incide. A representação gráfica é muito importante pois nos permite criar uma intuição sobre a estrutura dos grafos. Vale a pena notar que um mesmo grafo pode possuir mais de um desenho: basta desenhar os vértices em posições diferentes do plano. De fato, a posição dos vértices e das arestas não é importante, é a relação entre os vértices e as arestas que caracteriza a estrutura do grafo.

O desenho de um grafo pode ser um bom representante da estrutura, mas dois grafos com o mesmo desenho não são necessariamente iguais. Do ponto de vista formal, dois grafos G e H são idênticos quando $G = H$ no sentido da Teoria de Conjuntos, isto é, $V(G)$ e $V(H)$ são o mesmo conjunto, $E(G)$ e $E(H)$ são o mesmo conjunto e Ψ_G e Ψ_H são a mesma função. Por exemplo, os grafos G e H da Figura 2 não são idênticos pois $V(G) \neq V(H)$, no entanto, eles possuem, efetivamente, a mesma estrutura.

Figura 1: Representação gráfica do grafo G .

Esta noção de igualdade de grafos é, como vimos, muito restritiva. Para capturar a noção de que dois grafos diferentes possuem a mesma estrutura, definimos um *isomorfismo* entre dois grafos G e H como um par de bijeções $\theta : V(G) \rightarrow V(H)$ e $\phi : E(G) \rightarrow E(H)$ tais que elas preservam a relação de incidência, isto é, $\Psi_G(e) = \{u, v\}$ se e somente se $\Psi_H(\phi(e)) = \{\theta(u), \theta(v)\}$. Quando existe um isomorfismo entre dois grafos G e H , dizemos que eles são *isomorfos*, e escrevemos $G \simeq H$.

Figura 2: Dois grafos não idênticos G e H que são isomorfos.

Grafos isomorfos possuem essencialmente a mesma estrutura e são considerados como iguais para todos os efeitos práticos. Com efeito, muitas vezes, os nomes que os vértices possuem não tem nenhuma importância. Quando abrimos mão de definir os nomes dos vértices, temos um *grafo não rotulado*, em contrapartida aos *grafos rotulados*. Muitas vezes, apenas nos interessa a interconectividade dos vértices, então consideramos grafos não rotulados e nomeamos os vértices e arestas conforme necessário.

Formalmente, a relação de isomorfismo \simeq é uma relação de equivalência na classe de todos os grafos. As classes de equivalência são compostas por grafos rotulados que são equivalentes sob a relação de isomorfismo. Grafo não rotulado é um nome que damos a uma destas classes de equivalência, não sendo um grafo propriamente dito, e sim uma entidade abstrata que carrega em si a estrutura de um grafo sem incluir os rótulos dos vértices e das arestas.

O que nos permite escolher um representante dentro desta classe sem perda de generalidade é o fato de que a maioria das propriedades estudadas pela Teoria de Grafos é invariante por isomorfismo, isto é, se um grafo tem determinada propriedade, qualquer grafo isomorfo a ele possui a mesma propriedade. Portanto, ao rotular vértices e arestas de um grafo não rotulado, podemos fazer o mesmo de forma arbitrária e sem perda de generalidade.

Uma outra noção fundamental é a de *subgrafo*. Seja G um grafo, dizemos que H é um subgrafo de G , se H for um grafo tal que $V(H) \subset V(G)$, $E(H) \subset E(G)$ e Ψ_H é restrição de Ψ_G . Quando H é subgrafo de G , também dizemos que G possui H , ou que existe uma cópia de H em G . Em geral, diremos que H é um subgrafo de G quando existir subgrafo de G isomorfo a H .

Uma noção ligeiramente distinta de subgrafo é a de *subgrafo induzido*. Seja $G = (V, E)$ um grafo e $S \subset V$ um subconjunto de vértices. O grafo $G[S]$ é o grafo cujo conjunto de vértices é S e cujo conjunto de arestas consiste nas arestas de G que possuem ambas extremidades em S . Dizemos que $G[S]$ é um subgrafo de G *induzido* pelo conjunto S .

Até agora, a definição de grafos que temos é bastante abrangente e permite algumas situações que não gostaríamos de considerar em nosso estudo. A primeira situação especial ocorre quando duas arestas e e f incidem nos mesmos vértices, isto é, $\Psi_G(e) = \Psi_G(f)$, neste caso dizemos que e e f são *arestas paralelas*. No grafo exemplificado na Figura 1, f e g são arestas paralelas. A segunda situação é quando e incide em apenas um vértice v , isto é, $\Psi_G(e) = \{v\}$, como é o caso da aresta s da Figura 1, e dizemos que esta aresta é um *laço*. Um grafo no qual não existem arestas paralelas ou laços é dito um *grafo simples*. Neste estudo, consideraremos apenas grafos simples.

Seja G um grafo simples e u e v dois vértices de G . Se u e v forem adjacentes, então existe uma única aresta e em G com $\Psi_G(e) = \{u, v\}$. Portanto podemos identificar e por $\{u, v\}$. De fato, quando G é simples, a função de incidência Ψ_G fica definida implicitamente e nomeamos as arestas por suas extremidades. Dessa forma, ao definir grafos simples, pode-se omitir a função de incidência Ψ , definindo o conjunto das arestas $E(G)$ como um subconjunto de pares de vértices. Para tal propósito, dado um conjunto S , definimos o conjunto de pares de elementos de S por $\binom{S}{2}$; assim, podemos ver um grafo como um par $G = (V(G), E(G))$ no qual $E(G) \subset \binom{V(G)}{2}$. Em geral, denotamos o conjunto de todos os subconjuntos de S com k elementos por $\binom{S}{k}$, e temos a propriedade $\left| \binom{S}{k} \right| = \binom{|S|}{k}$.

Para simplificar a notação, quando não houver ambiguidade, podemos nos referir ao conjunto de vértices apenas por V e o conjunto de arestas por E em um grafo $G = (V, E)$. A quantidade de vértices de um grafo é chamada de *ordem* do grafo e costuma ser denotada por n ou $v(G)$. Já a quantidade de arestas em um grafo é chamada de *tamanho* do grafo, e é denotada por m ou $e(G)$. Se G é um grafo simples, observamos que $E \subset \binom{V}{2}$, o que implica que $m \leq \binom{n}{2} = O(n^2)$, isto é, um grafo simples tem uma quantidade de arestas limitada ao quadrado do seu número de vértices.

Se v é um vértice de um grafo simples G , então a *vizinhança* $N_G(v)$ de v é o conjunto dos vértices adjacentes a v . O *grau* de um vértice $d_G(v)$ é a cardinalidade de sua vizinhança¹,

¹Esta definição de grau de um vértice está restrita a grafos simples. No caso geral, o grau de um vértice v é a quantidade de vezes que arestas incidem nele, isto é, o o número de arestas que incidem em v com os laços contados duas vezes.

isto é, $d_G(v) = |N_G(v)|$. Quando o grafo for conhecido pelo contexto, utilizamos apenas $N(v)$ e $d(G)$. Quando todos os vértices de um grafo possuem o mesmo grau, ele é dito *regular*. Um grafo regular no qual todo vértice possui grau k é dito k -regular.

Seja $G = (V, E)$ um grafo simples, vamos contar o número de arestas de duas maneiras distintas, utilizando uma técnica chamada contagem dupla. Cada vértice v incide em $d(v)$ arestas, portanto, consideramos a soma $\sum_{v \in V} d(v)$, isto é, a soma dos graus de todos os vértices de G . No entanto, cada aresta incide em exatamente dois vértices, já que o grafo é simples. Isto nos dá que a soma conta todas as arestas exatamente duas vezes, logo $\sum_{v \in V} d(v) = 2|E|$. Este resultado é conhecido por *handshaking lemma*, e é demasiadamente útil. Uma primeira aplicação é a observação de que um grafo simples só pode ter uma quantidade par de vértices de grau ímpar. De fato, o resultado anterior nos dá que a soma dos graus dos vértices de G é sempre par, e se A é o conjunto de vértices de grau ímpar, temos $\sum_{v \in V} d(v) \equiv |A| \equiv 0 \pmod{2}$.

Algumas vezes, grafos que possuem algum tipo de estrutura em comum são agrupados em *famílias* e recebem um nome que é inspirado por suas propriedades ou em homenagem ao matemático que primeiro as estudou. Um aspecto importante da Teoria de Grafos é que ela se trata, essencialmente, do estudo de estruturas e, portanto, é importante que se tenha à disposição um grande arsenal de famílias de grafos bem conhecidas e estudadas.

A primeira família de grafos a ser estudada é a dos grafos completos. Um grafo G é dito *completo* quando ele é um grafo simples no qual todos os vértices são adjacentes. Denota-se o grafo completo com n vértices por K_n . A Figura 3 contém desenhos de alguns grafos completos pequenos. Ao definir uma família de grafos, é comum estudar um pouco de suas propriedades. Por exemplo, podemos ver que $e(K_n) = \binom{n}{2}$, pois K_n é um grafo simples e qualquer par de vértices é adjacente.

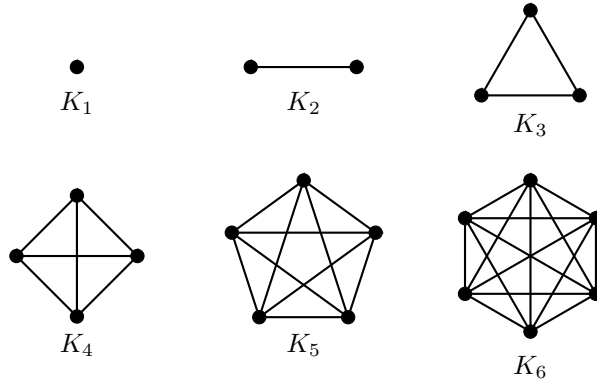


Figura 3: Grafos completos de ordem 1 até 6.

Uma outra família de grafos importante na Teoria de Ramsey é, surpreendentemente, a família dos *grafos vazios*. Um grafo G é vazio quando ele não possui nenhuma aresta. É importante notar que um grafo vazio ainda pode ter vértices.

Uma maneira de relacionar os grafos completos e vazios é por meio da operação de complementação. Seja $G = (V, E)$ um grafo simples. O *complemento* de G é um grafo \overline{G} com o mesmo conjunto de vértices V , no qual dois vértices são adjacentes em \overline{G} se e

somente se eles não são adjacentes em G . Em outras palavras, o conjunto de arestas de \overline{G} é o complemento de E em relação à $V^{(2)}$. Portanto, podemos escrever apenas $\overline{G} = (V, \overline{E})$ e notamos que para todo grafo simples G , $\overline{\overline{G}} = G$. Temos então que o grafo vazio com n vértices é o complemento de K_n , logo o denotamos por $\overline{K_n}$.

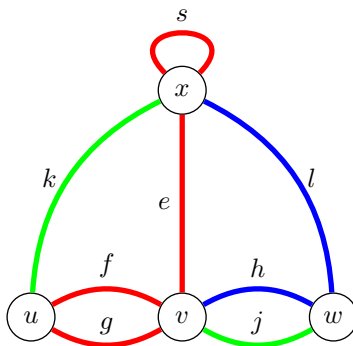


Figura 4: Exemplo de coloração de arestas com três cores.

Finalmente, o último conceito necessário nesta introdução é o de coloração de arestas. A noção de coloração é muito importante em Teoria de Grafos, sendo intimamente relacionada ao surgimento da mesma. A idéia principal de colorações é mapear o conjunto de vértices ou de arestas em um conjunto de cores \mathcal{C} . Utiliza-se cores no lugar de índices ou números para enfatizar a ausência de estrutura no conjunto. Assim, se $G = (V, E)$ é um grafo, então uma *coloração de arestas* de G com k cores é um mapa entre E e um conjunto de k cores, isto é, uma função $c : E(G) \rightarrow \mathcal{C}$, no qual $\mathcal{C} = \{C_1, \dots, C_k\}$ é um conjunto de k cores. Uma coloração de arestas com k cores também é chamada de *k-coloração de arestas*. Podemos explicitar quais cores são utilizadas na coloração chamando de *RB-coloração* uma 2-coloração de arestas nas cores R e B , por exemplo. Note que se considerarmos apenas arestas de cor C em c , temos um subgrafo de G , que é denotado por G_C . Neste texto, quando alguma notação incluir G_C como índice, podemos simplificar para apenas C . Por exemplo, a vizinhança do vértice v no grafo G_C pode ser denotada por $N_C(v)$ em vez de $N_{G_C}(v)$.

Note também que uma coloração de arestas pode ser vista como uma partição do conjunto de arestas nas partes $c^{-1}(C_i)$. Desta forma, estamos particionando as arestas do grafo em classes determinada pela cor. Por exemplo, a Figura 4 exemplifica uma coloração de arestas em três cores do grafo construído no início desta seção. Esta coloração particiona o conjunto de arestas em $\{k, j\}$, $\{e, f, g, s\}$ e $\{h, l\}$.

1.2 Números de Ramsey

No início do capítulo, vimos o problema das mesas, para o qual mostramos que em mesas de seis alunos, três alunos se conhecem ou três alunos não se conhecem. Consideremos, agora, um grafo G no qual os vértices são os seis alunos na mesa e uma aresta conecta dois alunos quando eles se conhecem. Note que \overline{G} é o grafo em que dois alunos são adjacentes quando

não se conhecem. O problema das mesas, então, nos diz que se G possui 6 vértices, então G ou \overline{G} possui um triângulo como subgrafo.

Observar o mesmo fato em termos de colorações é ainda mais vantajoso. Novamente, considere G como o grafo em que os vértices são as seis pessoas na festa, mas, desta vez, considere o grafo completo. Realizamos uma coloração das arestas de G em duas cores, $c : E(G) \rightarrow \{R, B\}$ (R e B denotam vermelho e azul, respectivamente²), de forma que $c(xy) = R$, se x e y são pessoas que se conhecem e $c(xy) = B$, se x e y são pessoas que não se conhecem. Assim, o objetivo é mostrar que G possui um triângulo monocromático, isto é, um triângulo no qual todas as três arestas tem a mesma cor. Equivalentemente, podemos dizer que G_R ou G_B possuem um triângulo. Considerando esta formalização por colorações de arestas, podemos reformular o Fato 1.

Proposição 2. *Se G é um grafo completo com 6 vértices e $c : E(G) \rightarrow \{R, B\}$ é uma coloração de arestas, então G possui um triângulo monocromático.*

Demonstração. Seja $v \in V(G)$ um vértice arbitrário e seja $N(v)$ a sua vizinhança. O vértice v se liga aos vértices de $N(v)$ utilizando arestas vermelhas ou azuis. Logo $N(v) = N_R(v) \cup N_B(v)$. Como o grau de v é 5, então $d_R(v) + d_B(v) = 5$. Pelo princípio das casas dos pombos, alguma cor dentre R e B , digamos R , é tal que $d_R(v) \geq 3$. Agora, observe que se existem dois vizinhos de v ligados por uma aresta vermelha, então eles formam um triângulo vermelho com v . Caso contrário, isto é, não existem dois vizinhos de v ligados por aresta vermelhas, toda aresta com ambas as extremidades em $N_R(v)$ é azul, o que garante a existência de um triângulo azul em G . Desta forma, em ambos os casos, G possui um triângulo monocromático. \square

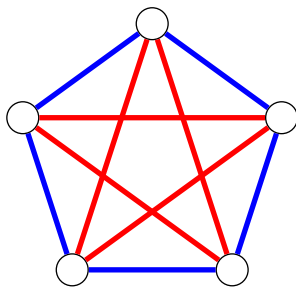


Figura 5: Coloração do K_5 sem K_3 monocromáticos.

Algo interessante de notar é que, com cinco vértices, este fato pode ser evitado: existe uma coloração das arestas do K_5 que não possui triângulos monocromáticos, como podemos observar na Figura 5. Com esta observação, concluímos que seis é o menor número de vértices que um grafo completo precisa ter de forma que qualquer coloração de suas arestas com duas cores possua um triângulo monocromático.

Agora que entendemos em que condições uma coloração de arestas em duas cores necessariamente possui um triângulo monocromático, podemos estudar quando é possível evitar

²Estes símbolos estão sendo usados porque R e B são tradicionais na Teoria de Ramsey e referem-se aos nomes das cores vermelho (*red*) e azul (*blue*).

a existência de outros grafos completos como subgrafo monocromático, o que nos leva a definição dos números de Ramsey a seguir.

Definição 3. *O k -ésimo número de Ramsey, $R(k)$, é o menor inteiro positivo n tal que qualquer coloração de arestas em duas cores do grafo K_n possui um K_k monocromático.*

Com esta definição, podemos reescrever o enunciado da Proposição 2 como $R(3) \leq 6$, uma vez que ele nos mostra que 6 vértices são suficientes para encontrar um triângulo monocromático. A Figura 5 mostra que $R(3) > 5$, logo obtemos $R(3) = 6$. Este resultado apareceu pela primeira vez como um problema da competição de matemática universitária Putnam³, em 1953.

Observamos também que $R(1) = 1$, uma vez que um K_1 monocromático é simplesmente um vértice qualquer e que $R(2) = 2$ pois um K_2 monocromático é uma aresta qualquer da coloração.

Antes de estudar outros valores conhecidos de $R(k)$ e seguintes generalizações deste conceito, é importante mostrar que eles estão bem-definidos. Ou seja, precisamos verificar que, para todo k , realmente existe um número n tal que qualquer coloração de arestas do K_n possui um K_k monocromático. Esta questão não é trivial; poderia ser o caso de que se k fosse suficientemente grande, fosse possível evitar a existência de K_k monocromáticos em alguma coloração com n arbitrariamente grande. Como vamos ver a seguir, este não é o caso. De fato, vamos encontrar um limitante superior para o número de Ramsey, que é suficiente para determinar que $R(k)$ está bem definido.

Teorema 4 (Ramsey 1930). *Para todo $k \in \mathbb{N}$, $R(k) \leq 2^{2k-2} < 4^k$. Em particular, $R(k)$ está bem definido.*

Demonstração. Esta prova consiste em sucessivas aplicações do princípio da casa dos pombos. Seja $G = G^1$ um grafo completo com $n \geq 2^l$ vértices e com uma RB-coloração c . Vamos encontrar uma cópia monocromática de K_k em G se fizermos n grande o suficiente e escolhendo l de forma apropriada.

Seja $v_1 \in V(G^1)$. Por definição, $|N(v_1)| = n - 1$. Considere as vizinhanças disjuntas $N_R(v_1)$ e $N_B(v_1)$ e note que $N_R(v_1) \cup N_B(v_1) = N(v_1)$. Pelo Princípio da Casa dos Pombos, ou $|N_R(v_1)| \geq 2^{l-1}$, ou $|N_B(v_1)| \geq 2^{l-1}$. Note que não é possível que $|N_R(v_1)| < 2^{l-1}$ e $|N_B(v_1)| < 2^{l-1}$ simultaneamente pois $(2^{l-1} - 1) + (2^{l-1} - 1) = 2^l - 2 < n - 1$. Denote por C_1 a cor que possui a maior vizinhança a partir de v_1 . Seja $G^2 = G^1[N_{C_1}(v_1)]$, isto é, o subgrafo de G^1 induzido pela maior vizinhança de v_1 . Por construção, $|V(G^2)| \geq 2^{l-1}$.

Seja $v_2 \in V(G^2)$. Repetindo o raciocínio usado para construir G^2 , obtemos uma cor C_2 e um subgrafo $G^3 = G^2[N_{C_2}(v_2)]$ tal que $|V(G^3)| \geq 2^{l-2}$. Por indução, repetimos este processo e obtemos o subgrafo G^t com $|V(G^t)| \geq 2^{l+1-t}$. Enquanto $2^{l+1-t} \geq 1$, existe alguma vizinhança colorida não vazia, e podemos continuar o processo. Portanto, quando

³A *William Lowell Putnam Mathematical Competition*, comumente referida apenas por Putnam Competition, é uma competição anual de matemática para alunos de graduação no Canadá e nos Estados Unidos. No ano de 1953, a segunda questão do primeiro dia enunciava: *Six points are in general position in space (no three in a line, no four in a plane). The fifteen line segments joining them in pairs are drawn and then painted, some segments red, some blue. Prove that some triangle has all its sides the same color.* [3]

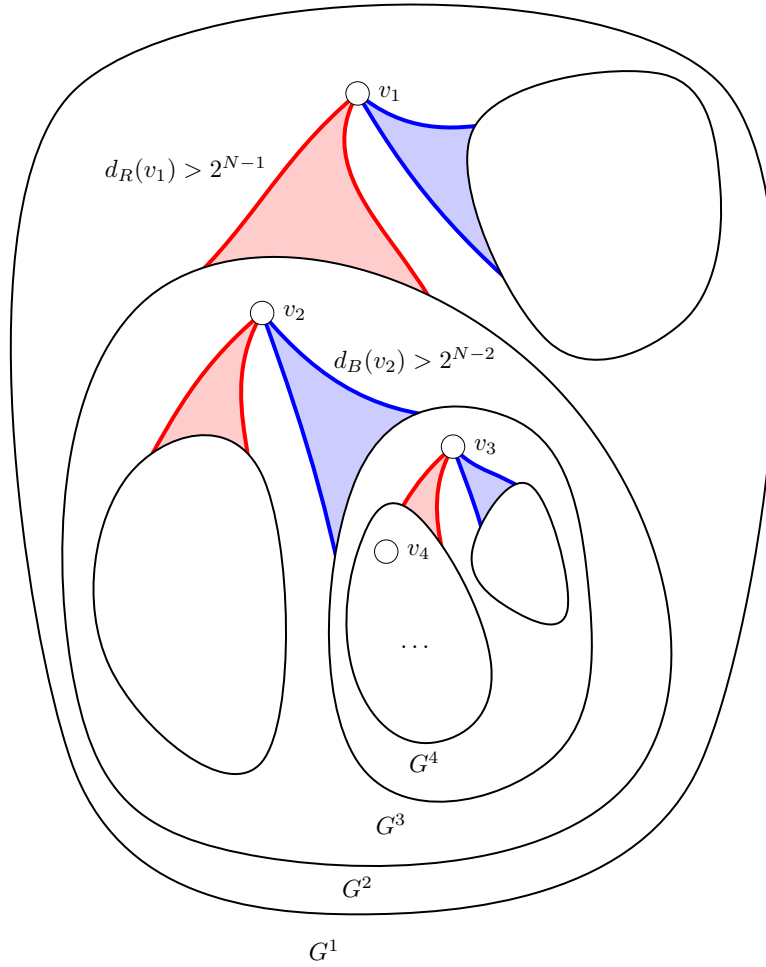


Figura 6: Construção recursiva da sequência de vértices v_i e cores.

$t = l + 1$, garantimos que G^{l+1} possui um vértice, o qual denotamos v_{l+1} e não podemos mais continuar o processo.

Desta forma, obtemos: uma sequência de grafos G^1, G^2, \dots, G^{l+1} tal que $|V(G^i)| \geq 2^{l+1-i}$; uma sequência de vértices v_1, v_2, \dots, v_{l+1} com $v_i \in V(G^i)$; e cores C_1, \dots, C_l , com a propriedade de que o vértice v_i se conecta a todos os outros vértices seguintes nesta sequência com a cor C_i , isto é, $C(v_i v_j) = C_i$ se $j > i$. A Figura 6 ilustra este processo.

Finalmente, escolhendo $l = 2k - 2$, obtemos uma sequência de $2k - 1$ vértices e $2k - 2$ cores. Pelo Princípio da Casa dos Pombos, alguma cor aparece pelo menos $k - 1$ vezes, digamos que a cor C ocorra nos índices $C_{a_1} = C_{a_2} = \dots = C_{a_{k-1}}$. Isto implica que os vértices $v_{a_1}, v_{a_2}, \dots, v_{a_{k-1}}$ formam um K_{k-1} monocromático. No entanto, recorde que o último vértice v_{l+1} recebe arestas de cor C dos vértices v_{a_i} , portanto, podemos adicioná-lo ao K_{k-1} para obter um K_k monocromático, como queríamos. Com isto, concluímos que $R(k) \leq 2^{2k-2} < 4^k$. \square

Embora este teorema seja associado a Frank P. Ramsey, um matemático e filósofo britânico que estudou Lógica, ele não foi provado nesta forma e nem utilizando este método. O teorema, na forma como ele provou [17], era sobre conjuntos infinitos, mas a prova original se assemelha em estrutura à prova aqui apresentada.

Agora, com o Teorema 4, sabemos não só que os números de Ramsey estão bem-definidos mas também estabelecemos uma cota superior concreta para o seu valor. Nos próximos capítulos, vamos ver generalizações deste resultado, em conjunto com algumas técnicas mais recentes.

Antes de estudar os números $R(k)$ para valores maiores de k , é conveniente generalizar nossas definições. Até agora, definimos os números de Ramsey da seguinte maneira: $R(k)$ é o menor inteiro positivo n , tal que qualquer coloração de arestas em duas cores do K_n possui um K_k monocromático. Existem diversas maneiras de generalizar esta definição, a primeira delas está explicitada a seguir.

Definição 5. $R(k, s)$ é o menor inteiro positivo n , tal que qualquer coloração de arestas em duas cores do grafo K_n possui um K_k da primeira cor ou um K_s da segunda cor.

Note que esta definição contém a antiga pois $R(k) = R(k, k)$, que são chamados de *números de Ramsey diagonais*. Ressaltamos que não é preciso demonstrar novamente que estes números estão bem-definidos, uma vez que segue da definição que $R(k, s) \leq R(\max\{k, s\}) < \infty$.

2.1 Pequenos Números de Ramsey

Vamos analisar inicialmente alguns valores de números de Ramsey que são imediatos de determinar. Por exemplo $R(1, k) = 1$ para qualquer valor de k , uma vez que é impossível evitar um K_1 monocromático em qualquer cor quando o grafo possui vértices. Além disso, temos $R(2, k) = k$, dado que não possuir K_2 em alguma cor significa que ela não está presente na coloração. Como temos a simetria $R(k, s) = R(s, k)$, os valores realmente interessantes são obtidos para $k, s \geq 3$; o primeiro deles, $R(3, 3) = 6$, já apresentado.

Vamos agora estudar o número $R(3, 4)$, utilizando um argumento semelhante ao do $R(3, 3)$, porém ligeiramente mais sofisticado. O número $R(3, 4)$ foi determinado em 1955, por Greenwood e Gleason [12], e está apresentado a seguir. Neste trabalho, os autores obtiveram outros resultados e alguns destes também estão apresentados a seguir.

Proposição 6 (Greenwood, Gleason [12]). $R(3, 4) \leq 9$.

Demonstração. Seja G um grafo completo com nove vértices e c uma RB -coloração. Suponha que não exista K_3 vermelho ou K_4 azul. Seja $v \in V(G)$ um vértice qualquer. Considere as vizinhanças $N_R(v)$ e $N_B(v)$ de tamanhos $d_R(v)$ e $d_B(v)$, respectivamente. Assim, temos que $d_R(v) + d_B(v) = 8$. Suponha que $d_R(v) \geq 4$. Se existirem $x, y \in N_R(v)$ tais que $c(xy) = R$, então formamos um triângulo vermelho unindo as extremidades desta aresta com v , o que é absurdo. Por outro lado, se esta aresta for azul, temos um K_4 azul em $N_R(v)$. Concluimos que $d_R(v) \leq 3$, o que implica $d_B(v) \geq 5$.

Suponha que $d_B(v) \geq 6$. Como sabemos que $R(3, 3) = 6$, $N_B(v)$ possui um triângulo monocromático. Como G não possui K_3 vermelho, então $N_B(v)$ possui um K_3 azul. Contudo, isto nos dá uma contradição, pois unindo este K_3 com o vértice v , temos um K_4 azul. Portanto, podemos concluir que $d_B(v) = 5$ e $d_R(v) = 3$. Isto, no entanto, vale para qualquer vértice de G , em particular, implica que G_R possui 9 vértices de grau ímpar. Entretanto, pelo *handshaking lemma*, sabemos que a quantidade de vértices de grau ímpar em um grafo precisa ser par, e então chegamos num absurdo.

Portanto, em qualquer caso, contradizemos a hipótese de que não existe K_3 vermelho ou K_4 azul e, assim, concluimos que $R(3, 4) \leq 9$. \square

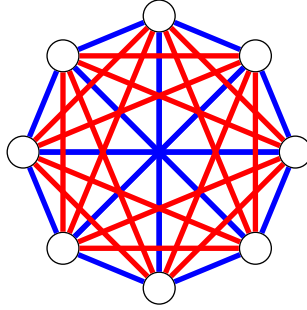


Figura 7: Coloração de arestas do K_8 sem K_4 vermelho e sem K_3 azul.

A Proposição 6 estabelece uma cota superior para $R(3, 4)$. Uma forma de obter uma cota inferior é por meio da construção de uma coloração de arestas em duas cores de um grafo completo sem K_3 vermelho e sem K_4 azul. A Figura 7 exibe uma tal coloração com 8 vértices. Isto implica que $R(3, 4) > 8$, que em conjunto com a Proposição 6, implica que $R(3, 4) = 9$. Embora apenas evidenciar uma coloração seja suficiente, existem $2^{\binom{8}{2}} = 2^{28} = 268435456$ colorações de arestas do K_8 em duas cores, o que nos deixa intrigados em saber como obter uma coloração com esta propriedade.

Proposição 7 (Greenwood, Gleason [12]). $R(3, 4) > 8$.

Demonstração. Vamos construir a coloração de arestas do grafo G da Figura 7. Seja $V(G) = \{v_0, \dots, v_7\}$. Considere a seguinte relação em \mathbb{Z}_8 : dizemos que $i \sim j$, se $i - j \equiv \pm 2$ ou $\pm 3 \pmod{8}$. Note que $i \sim j$ implica em $j \sim i$ e em $i + k \sim j + k$, para todo k . A coloração c é então definida da seguinte maneira:

$$c(v_i v_j) = \begin{cases} \text{vermelho,} & \text{se } i \sim j; \\ \text{azul,} & \text{se } i \not\sim j. \end{cases}$$

Inicialmente, vamos mostrar que não existe K_4 vermelho em G . Suponha que v_i, v_j, v_k, v_w formem um K_4 vermelho em G . Sem perda de generalidade, podemos supor $w = 0$, uma vez que esta relação é invariante por translações. Portanto, temos que $i \sim 0$, $j \sim 0$ e $k \sim 0$. Isto nos dá que $i, j, k \in \{-3, -2, 2, 3\}$ e uma vez que eles são distintos, algum par dentre $\{-3, -2\}$ e $\{2, 3\}$ está coberto pelos i, j ou k . No entanto, $-3 \not\sim -2$ e $3 \not\sim 2$, o que implica que estas arestas não são vermelhas, impedindo a existência de um K_4 vermelho.

Para concluir a demonstração, vamos mostrar que não existe K_3 azul. Suponha que v_i, v_j, v_k formem um K_3 azul em G . Como $i \not\sim j$ implica $i + k \not\sim j + k$, podemos novamente supor que $k = 0$, o que nos dá que $i, j \in \{-1, 1, 4\}$. No entanto, temos que $-1 \sim 1$, $-1 \sim 4$ e $1 \sim 4$. Ou seja, quaisquer que sejam os valores de i e j , a aresta $v_i v_j$ não será azul. Portanto, não existe K_3 azul em G . \square

Ainda explorando este tipo de abordagem, Greenwood e Gleason [12] avançaram um pouco mais e determinaram o valor de $R(4, 4)$, como consequência dos dois resultados apresentados a seguir.

Proposição 8 (Greenwood, Gleason [12]). $R(4, 4) \leq 18$.

Demonstração. Seja G um grafo completo com 18 vértices e c uma RB-coloração. Suponha que não exista K_4 monocromático. Seja $v \in V(G)$. Considere as vizinhanças $N_R(v)$ e $N_B(v)$ de tamanhos $d_R(v)$ e $d_B(v)$, respectivamente. Assim, temos que $d_R(v) + d_B(v) = 17$. Alguma destas duas vizinhanças possui pelo menos nove vértices, digamos, $d_R(v) \geq 9$. Com isto, como $R(3, 4) = 9$ temos que $N_R(v)$ possui um K_3 vermelho ou um K_4 azul. Como supusemos que não existe K_4 monocromático em G , então $N_R(v)$ possui um K_3 vermelho. No entanto, unindo este K_3 com o vértice v , obtemos um K_4 vermelho, contrariando nossa hipótese de que não existe K_4 monocromático. Assim, concluímos que $R(4, 4) \leq 18$. \square

A Proposição 9 para o $R(4, 4)$ é o análogo da Proposição 7 para o $R(3, 4)$, considerando a coloração exibida na Figura 8.

Proposição 9 (Greenwood, Gleason [12]). $R(4, 4) > 17$.

Demonstração. Vamos construir a coloração de arestas do grafo G da Figura 8. Desta vez, trabalhamos no corpo \mathbb{Z}_{17} , com $V(G) = \{v_0, \dots, v_{16}\}$. Definimos a seguinte relação em \mathbb{Z}_{17} : dizemos que $i \sim j$ se $i - j$ for um resíduo quadrático, isto é, se existe $x \in \mathbb{Z}_{17}$ tal que $i - j \equiv x^2 \pmod{17}$. Note que $i \sim j$ implica em $j \sim i$ pois $-1 \equiv 4^2 \pmod{17}$. Temos também que $i \sim j$ implica em $i + k \sim j + k$ para todo k e em $a^2 i \sim a^2 j$. Construímos a coloração c , então, da seguinte maneira:

$$c(v_i v_j) = \begin{cases} \text{vermelho,} & \text{se } i \sim j; \\ \text{azul,} & \text{se } i \not\sim j. \end{cases}$$

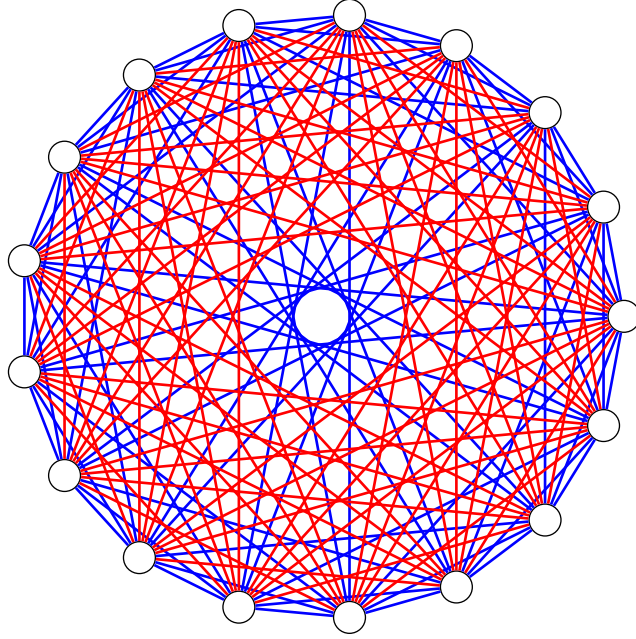


Figura 8: Coloração do K_{17} sem K_4 monocromáticos.

Agora, vamos mostrar que não existe K_4 monocromático em G . Suponha que v_i, v_j, v_k, v_w formem um K_4 monocromático em G . Sem perda de generalidade, podemos supor $w = 0$ uma vez que esta relação é invariante à translações. Portanto, temos que os números $i, j, k, i - j, i - k, j - k$ são todos resíduos quadráticos ou são todos resíduos não-quadráticos. Suponha que todos eles sejam resíduos quadráticos. Como 17 é primo, \mathbb{Z}_{17} é um corpo, logo o elemento $i \neq 0$ possui inverso i^{-1} e ele também é resíduo quadrático. Definindo $a = i^{-1}j$, $b = i^{-1}k$, temos que os números $1, a, b, 1 - a, 1 - b, a - b$ são todos resíduos quadráticos, uma vez que os resíduos quadráticos são fechados por multiplicação.

Se os números forem todos resíduos não-quadráticos, então i^{-1} também é resíduo não-quadrático. Definindo a e b da mesma maneira, obtemos que os números $1, a, b, 1 - a, 1 - b, a - b$ são todos resíduos quadráticos em \mathbb{Z}_{17} . Isto se deve ao fato de que em \mathbb{Z}_p , com p primo, o produto de dois resíduos não-quadráticos é um resíduo quadrático¹.

Em ambos os casos, temos que $1, a, b, 1 - a, 1 - b, a - b$ são resíduos quadráticos em \mathbb{Z}_{17} . Os resíduos quadráticos são $1, 2, 4, 8, 9, 13, 15$ e 16 , e não é possível escolher a e b de maneira que todos os números sejam simultaneamente resíduos. Isto pode ser verificado pelo raciocínio a seguir. Suponha que $a = 4$, então $1 - a \equiv 14 \pmod{17}$, que não é resíduo quadrático. O mesmo verificamos se $a = 8, a = 13$ e $a = 15$, obtendo $1 - a \equiv 10 \pmod{17}$, $1 - a \equiv 5 \pmod{17}$ e $1 - a \equiv 3 \pmod{17}$ respectivamente, todos os casos não sendo resíduos

¹Lembre o símbolo de Legendre, se p é um primo ímpar e a não é múltiplo de p , definimos $\left(\frac{a}{p}\right) = 1$ se a é resíduo quadrático em \mathbb{Z}_p e $\left(\frac{a}{p}\right) = -1$ caso contrário. Como o símbolo de Legendre é uma função completamente multiplicativa, se a e b são resíduos não quadráticos, temos que $\left(\frac{ab}{p}\right) = \left(\frac{a}{p}\right)\left(\frac{b}{p}\right) = (-1)(-1) = 1$, logo ab é um resíduo quadrático. Veja mais no capítulo 5 do livro *Introdução à Teoria dos Números* por José Plínio de Oliveira Santos [7].

quadráticos. Se $a = 9$ então $1 - a \equiv a \pmod{17}$ e os índices não são distintos. Portanto, a única escolha restante é $a = 2$ e $b = 16$. Entretanto, $1 - a \equiv 16 \equiv b \pmod{17}$ e novamente não temos índices distintos. \square

k \ s	3	4	5	6	7	8	9	10
3	6	9	14	18	23	28	39	40 42
4		18	25	36 41	49 61	58 84	73 115	92 149
5			43 49	58 87	80 143	101 216	126 316	144 442
6				102 165	113 298	132 495	169 780	179 1171
7					205 540	217 1031	241 1713	289 2826
8						282 1870	317 3583	6090
9							565 6588	581 12677
10								798 23556

Tabela 1: Valores e limitantes para $R(k, s)$ com $3 \leq k \leq s \leq 10$.

É natural, agora, tentar determinar $R(k, s)$ para outros valores de k e s . No entanto, a dificuldade em determinar os valores de $R(k, s)$ cresce muito rapidamente com s e k . Por exemplo, o valor de $R(5, 5)$ não é conhecido e o valor de $R(4, 5) = 25$ foi encontrado por uma busca computacional extensiva em 1995 [15]. Existe um compêndio dinâmico dos resultados conhecidos sobre números de Ramsey pequenos, mantido por Radziszowski [16], os melhores valores conhecidos para $R(k, s)$ estão na Tabela 1.

2.2 Limitantes Superiores

Um fato interessante que podemos observar em todos os números que encontramos na seção anterior é que o argumento utilizado na prova do limitante superior é bem semelhante. De fato, podemos condensar esta idéia em um resultado à parte.

Teorema 10 (Greenwood, Gleason [12]). $R(k, s) \leq R(k, s - 1) + R(k - 1, s)$.

Demonstração. Sejam G um grafo completo com n vértices e c uma RB-coloração. Suponha que não exista K_k vermelho e nem K_s azul. Seja $v \in V(G)$ um vértice qualquer. Consideremos as vizinhanças $N_R(v)$ e $N_B(v)$ de tamanhos $d_R(v)$ e $d_B(v)$, respectivamente. Assim, temos que $d_R(v) + d_B(v) = n - 1$. Se $d_R(v) \geq R(k - 1, s)$, então em $N_R(v)$ possui um K_s azul ou um K_{k-1} vermelho, que em conjunto com v forma um K_k vermelho, contradizendo

nossa hipótese. Concluimos que $d_R(v) \leq R(k-1, s) - 1$. Similarmente, mostramos que $d_B(v) \leq R(k, s-1) - 1$. Portanto:

$$\begin{aligned} d_R(v) + d_B(v) &\leq R(k-1, s) + R(k, s-1) - 2 \\ n &\leq R(k-1, s) + R(k, s-1) - 1. \end{aligned}$$

Dessa maneira, escolhendo $n = R(k-1, s) + R(k, s-1)$ obtemos uma contradição, e portanto, concluimos que G possui um K_k vermelho ou um K_s azul. Ou seja, $R(k, s) \leq R(k, s-1) + R(k-1, s)$, como queríamos. \square

Observe que desta resulta que $R(3, 3) \leq R(2, 3) + R(3, 2) = 3 + 3 = 6$ e $R(4, 4) \leq R(3, 4) + R(4, 3) = 18$. No entanto, ela não é justa para muitos valores de k e s . Por exemplo, $R(3, 4) \leq R(3, 3) + R(2, 4) = 10$. O argumento que foi utilizado para demonstrar que $R(3, 4) \leq 9$ também pode ser generalizado na proposição seguir.

Teorema 11 (Greenwood, Gleason [12]). *Se $R(k, s-1)$ e $R(k-1, s)$ forem pares, então $R(k, s) < R(k, s-1) + R(k-1, s)$.*

Demonstração. Seja $R(k, s-1) = 2a$ e $R(k-1, s) = 2b$. Sejam G um grafo completo com $n = 2a + 2b - 1$ vértices e c uma RB-coloração. Suponha que não exista K_k vermelho e nem K_s azul. Fixe um vértice v arbitrário. Seguindo o raciocínio da prova anterior, temos que $d_B(v) \leq 2a - 1$ e $d_R(v) \leq 2b - 1$. Como $d(v) = n - 1 = 2a + 2b - 2$, temos que $d_B(v) = 2a - 1$ e $d_R(v) = 2b - 1$. Isto vale para qualquer vértice v . Consequentemente, os grafos G_R e G_B possuem uma quantidade ímpar de vértices de grau ímpar, o que é impossível pelo *handshaking lemma*. Isto, então, contradiz a hipótese de que não existe K_k vermelho e K_s azul, concluindo que $R(k, s) \geq n = 2a + 2b - 1$, o que finaliza a demonstração. \square

Esta proposição nos dá cotas ligeiramente mais precisas para alguns casos, por exemplo, chegamos em $R(3, 4) \leq 9$. Outra consequência interessante da desigualdade do Teorema 10 é um limitante superior genérico, que por sua vez nos permite obter uma versão ligeiramente melhor do Teorema 4.

Teorema 12 (Erdős, Szekeres [9]). *Para k e s inteiros positivos, temos:*

$$R(k, s) \leq \binom{k+s-2}{k-1}$$

Demonstração. Se $k = 1$ temos $R(1, s) = 1 = \binom{s-1}{0}$. Se $k = 2$, temos $R(2, s) = s = \binom{s}{1}$. Procedemos agora por indução em $s + k$. Temos

$$\begin{aligned} R(k, s) &\leq R(k, s-1) + R(k-1, s) \\ &\leq \binom{k+s-3}{k-2} + \binom{k+s-3}{k-1} = \binom{k+s-2}{k-1}. \end{aligned}$$

\square

Corolário 13 (Erdős, Szekeres [9]). *Para $k \rightarrow \infty$, temos*

$$R(k+1, k+1) \leq (1 + o(1)) \frac{4^k}{\sqrt{k\pi}}.$$

Demonstração. Para transformar o limitante dado pelo Teorema 12 em um limitante assintótico para os números de Ramsey diagonais, vamos utilizar a aproximação de Stirling $n! = (1 + o(1))\sqrt{2n\pi} \left(\frac{n}{e}\right)^n$, com $n \rightarrow \infty$, obtendo:

$$\begin{aligned} R(k+1, k+1) &\leq \binom{2k}{k} = \frac{(2k)!}{k!^2} = (1 + o(1)) \frac{\sqrt{4k\pi} \left(\frac{2k}{e}\right)^{2k}}{2k\pi \left(\frac{k}{e}\right)^{2k}} \\ &= (1 + o(1)) \frac{4^k}{\sqrt{k\pi}}. \end{aligned}$$

□

Note que este limitante é ligeiramente melhor que o obtido no Teorema 4 por causa da presença do termo \sqrt{k} no denominador. Isto nos indica que os números de Ramsey diagonais crescem no máximo exponencialmente e com expoente estritamente menor que 4. Poucas melhoras substanciais neste limitante são conhecidas, sendo o melhor atual

$$R(k+1, k+1) \leq k^{-\alpha \frac{\log k}{\log \log k}} \binom{2k}{k},$$

para alguma constante α adequada, devido a David Conlon em 2009 [6]. Note que o termo $k^{\alpha \frac{\log k}{\log \log k}}$ é subexponencial. Logo, este limitante não melhora a constante 4^k implicada pelo coeficiente binomial central $\binom{2k}{k}$.

2.3 Números de Ramsey Multicoloridos

Uma maneira muito natural de generalizar os números de Ramsey é considerar colorações de arestas com um número maior de cores. Estes números são conhecidos por *números de Ramsey multicoloridos*.

Definição 14. $R(t_1, \dots, t_k)$ é o menor inteiro positivo n tal que qualquer coloração de arestas em k cores do grafo K_n possui, para algum $1 \leq i \leq k$, um K_{t_i} da i -ésima cor.

Algumas observações são imediatas, por exemplo, se algum $t_i = 1$, então $R(t_1, \dots, t_k) = 1$, pois um K_1 é um K_1 de qualquer cor, em particular, da cor C_i . Se algum $t_i = 2$, então a cor C_i não pode estar presente na coloração. Assim, podemos remover este parâmetro: $R(t_1, \dots, t_{k-1}, 2) = R(t_1, \dots, t_{k-1})$. Além disso, os números de Ramsey possuem a seguinte simetria: se σ é uma permutação de k , então $R(t_{\sigma(1)}, \dots, t_{\sigma(k)}) = R(t_1, \dots, t_k)$. Vamos ver que algumas propriedades dos números de Ramsey com duas cores podem ser estendidas para mais cores sem muito esforço. Por exemplo, em analogia ao Teorema 10, temos o resultado a seguir.

Teorema 15 (Greenwood, Gleason [12]). *Para todos os inteiros positivos t_i , $1 \leq i \leq k$, temos:*

$$R(t_1, \dots, t_k) \leq \sum_{i=1}^k R(t_1, \dots, t_i - 1, \dots, t_k) - k + 2.$$

Demonstração. Sejam G um grafo completo com n vértices e c uma k -coloração de arestas nas cores C_1, \dots, C_k . Suponha que não exista K_{t_i} da cor C_i para todo $1 \leq i \leq k$. Seja $v \in V(G)$ um vértice qualquer. Consideramos as vizinhanças $N_{C_i}(v)$, que possuem $d_{C_i}(v)$ vértices. Assim, temos que $\sum_{i=1}^k d_{C_i}(v) = n - 1$.

Se $d_{C_i}(v) \geq R(t_1, \dots, t_i - 1, \dots, t_k)$ para algum i , então em $N_{C_i}(v)$ possui um K_{t_i-1} de cor C_i , pois G não possui K_{t_j} de cor C_j para nenhum $j \neq i$. No entanto, unindo v ao K_{t_i-1} de cor C_i formamos um K_{t_i} de cor C_i . Contradizemos então nossa hipótese e temos que $d_{C_i}(v) \leq R(t_1, \dots, t_i - 1, \dots, t_k) - 1$ para todo i . Portanto

$$n = \sum_{i=1}^k d_{C_i}(v) + 1 \leq \sum_{i=1}^k R(t_1 - 1, \dots, t_i - 1, \dots, t_k) - k + 1.$$

Dessa maneira, escolhendo $n = \sum_{i=1}^k R(t_1 - 1, \dots, t_i - 1, \dots, t_k) - k + 2$ obtemos uma contradição, e obtemos o resultado. \square

Analogamente ao Corolário 12, transformamos a desigualdade deste teorema em um limitante com um coeficiente multinomial:

Corolário 16 (Greenwood, Gleason [12]). *Para todos os inteiros positivos t_i , $1 \leq i \leq k$, temos:*

$$R(t_1 + 1, \dots, t_k + 1) \leq \binom{t_1 + \dots + t_k}{t_1, \dots, t_k} = \frac{(t_1 + \dots + t_k)!}{t_1! \dots t_k!}.$$

Podemos agora estimar o primeiro número multicolorido não-trivial (com todos os parâmetros maiores que 2), que é o $R(3, 3, 3)$. Utilizando o Teorema 15, temos:

$$\begin{aligned} R(3, 3, 3) &\leq R(2, 3, 3) + R(3, 2, 3) + R(3, 3, 2) - 1 \\ &= 3R(3, 3, 2) - 1 = 3R(3, 3) - 1 = 17. \end{aligned}$$

De fato, temos que $R(3, 3, 3) = 17$. Para demonstrar este fato, precisamos construir uma 3-coloração de arestas de um K_{16} sem que haja triângulos monocromáticos. Isto foi feito pela primeira vez por Greenwood e Gleason [12], mas apresentamos uma construção simplificada por Sun e Cohen [20].

Proposição 17. $R(3, 3, 3) > 16$.

Demonstração. Vamos construir a coloração de arestas do grafo G exibida na Figura 9. Desta vez trabalhamos no corpo $\mathbb{Z}_2^4 = \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$. Vamos particionar o conjunto dos elementos não nulos de \mathbb{Z}_2^4 em três partes:

$$\begin{aligned} S_1 &= \{(1, 1, 0, 0), (0, 0, 1, 1), (1, 0, 0, 1), (1, 1, 1, 0), (1, 0, 0, 0)\}, \\ S_2 &= \{(1, 0, 1, 0), (0, 1, 0, 1), (0, 1, 1, 0), (1, 1, 0, 1), (0, 1, 0, 0)\}, \\ S_3 &= \{(0, 0, 0, 1), (0, 0, 1, 0), (0, 1, 1, 1), (1, 0, 1, 1), (1, 1, 1, 1)\}. \end{aligned}$$

Cada uma destas partes S_i possui a seguinte propriedade: se $a, b \in S_i$, então $a + b \notin S_i$. Seja $V(G) = \{v_a : a \in \mathbb{Z}_2^4\}$. Definimos a coloração de arestas c em três cores da seguinte maneira:

$$c(v_a v_b) = \begin{cases} \text{vermelho,} & \text{se } a + b \in S_1; \\ \text{azul,} & \text{se } a + b \in S_2; \\ \text{verde,} & \text{se } a + b \in S_3. \end{cases}$$

Esta coloração está bem definida pois os S_i são disjuntos e cobrem todos os elementos não nulos de \mathbb{Z}_2^4 e que se $a, b \in \mathbb{Z}_2^4$ com a e b distintos, então $a + b \neq 0$. De fato, existe uma coordenada em que eles diferem, então, esta coordenada será 1 na soma $a + b$, logo $a + b \neq 0$.

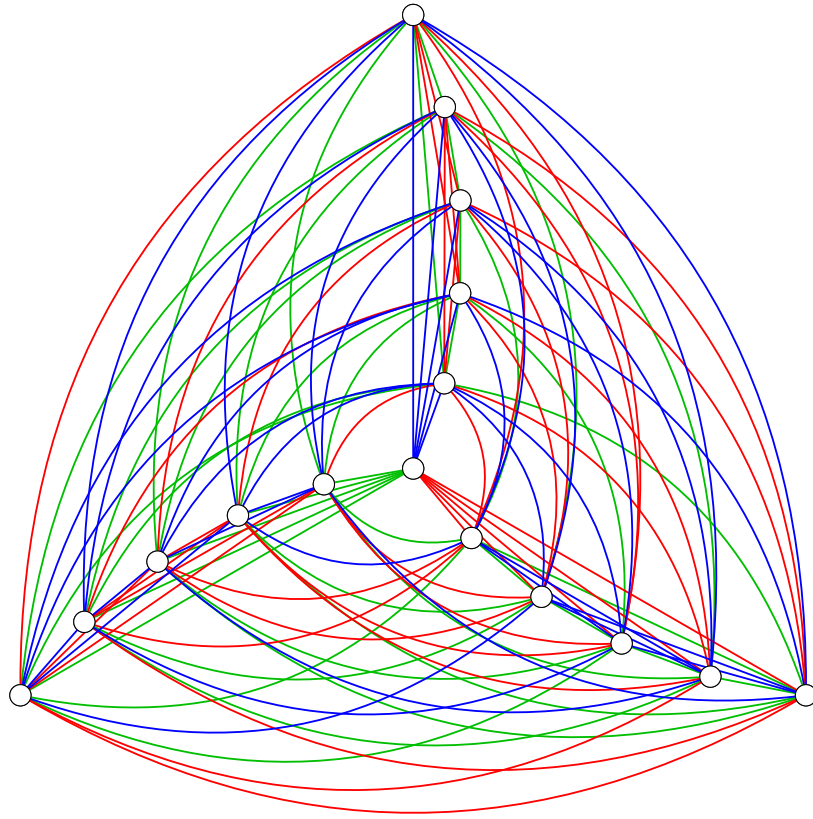


Figura 9: Coloração do K_{16} em três cores sem K_3 monocromáticos.

Agora vamos ver que a coloração c não possui triângulos monocromáticos. Sejam v_x, v_y, v_z os vértices de um triângulo qualquer. Suponha que duas das arestas sejam da mesma cor, digamos $c(v_x v_y) = c(v_x v_z)$. Vamos ver que a terceira aresta tem uma cor distinta. Temos para algum i , que $x + y, y + z \in S_i$. Utilizando a propriedade da soma de elementos de S_i , temos que $(x + y) + (y + z) = x + z + 2y = x + y \notin S_i$. Portanto, $c(v_y v_z) \neq c(v_x v_y)$. Portanto, c não possui triângulos monocromáticos. \square

Uma coleção de números de Ramsey é de bastante interesse é dos números multicoloridos para triângulos. Denotamos por $R_r(3)$ o número de Ramsey r -colorido $R(3, 3, \dots, 3)$ com r termos. De fato, já mostramos que $R_2(3) = 6$ e $R_3(3) = 17$. O número $R_4(3) = R(3, 3, 3, 3)$ sabe-se que está entre 51 e 62. Em geral, temos as seguintes estimativas.

Teorema 18. *Para todo inteiro $r \geq 2$, temos $5^{r/2} \leq R_r(3) \leq 3r!$.*

Demonstração. Para o limitante superior, aplicamos Teorema 15, obtendo:

$$\begin{aligned} R_r(3) &\leq rR(3, \dots, 3, 2) = rR_{r-1}(3) \\ &\leq r(r-1) \dots 3R_2(3) = 3r!. \end{aligned}$$

Para o limitante inferior, faremos uma construção recursiva partindo da coloração da Figura 5. Suponha que $R_k(3) = n$. Considere o grafo completo G com $5n$ vértices e cores C_1, C_2, \dots, C_{k+2} . Particione $V(G)$ em cinco partes com n vértices: S_1, S_2, S_3, S_4 e S_5 . Podemos colorir as arestas dos subgrafos $G[S_i]$ com as cores C_1, \dots, C_k de existam triângulos monocromáticos, uma vez que $R_k(3) \geq n$. As arestas que faltam colorir incidem em vértices $v_i \in S_i$ e $v_j \in S_j$ com $i \neq j$. Vamos colorir estas arestas nas cores remanescentes C_{k+1} e C_{k+2} utilizando o critério:

$$c(v_i v_j) = \begin{cases} C_{k+1}, & \text{se } i - j \equiv 1 \pmod{5} \\ C_{k+2}, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

A Figura 10 exemplifica esta construção. Note que c não possui triângulo monocromático nas cores C_1, \dots, C_k , uma vez que construímos a coloração em $G[S_i]$ desta maneira. Além disso, c também não possui triângulo monocromático nas cores C_{k+1} e C_{k+2} por construção.

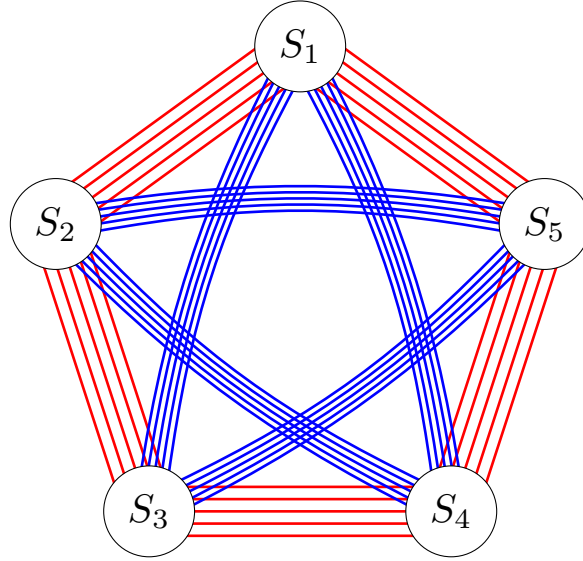


Figura 10: Construção da coloração da Proposição 18.

Desta forma, concluímos que existe uma $k + 2$ -coloração de arestas de G sem triângulo monocromático. Logo $R_{k+2}(3) \geq 5n = 5R_k(3)$. Aplicando esta relação repetidamente, obtemos:

$$\begin{aligned} R_{2k}(3) &\geq 5^{k-1} R_2(3) = 5^{k-1} \cdot 6 \geq 5^k \\ R_{2k+1}(3) &\geq 5^{k-1} R_3(3) = 5^{k-1} \cdot 17 = 5^k \left(\frac{17}{5} \right) \geq 5^{k+1/2} \end{aligned}$$

Em qualquer caso, obtemos $R_r(3) \geq 5^{r/2}$. □

Embora os limitantes encontrados no Teorema 18 não sejam os melhores conhecidos, eles estão próximos. Note que existe uma diferença bem grande em ordem entre $5^{r/2}$ e $3r!$ com $r \rightarrow \infty$. Mesmo assim, sabe-se que o limite

$$\lim_{r \rightarrow \infty} (R_r(3))^{1/r}$$

existe [4], embora possa ser infinito. O Teorema 18 mostra que este limite é pelo menos $\sqrt{5} \approx 2.236$. Não se sabe muito mais sobre os números $R_r(3)$. Para o caso $r = 4$, por exemplo, os melhores limitantes conhecidos são $R_4(3) \geq 51$ [5] e $R_4(3) \leq 62$ [10].

Números de Ramsey para outros Grafos

Uma característica interessante da Teoria de Ramsey é sua capacidade ser generalizada de diversas maneiras. Até agora, sempre consideramos colorações que não tinham o grafo K_r como subgrafo monocromático. Vamos relaxar esta condição e proibir grafos genéricos monocromáticos.

Definição 19. *Sejam G e H grafos simples. Definimos $r(G, H)$ como o menor inteiro positivo n , tal que qualquer coloração de arestas em duas cores do grafo K_n possui um G da primeira cor ou um H da segunda cor.*

Note que por esta definição, $R(k, s) = r(K_k, K_s)$. Também definimos $r(G) = r(G, G)$. Observemos agora que estes números possuem Se G é subgrafo de G' então $r(G, H) \leq r(G', H)$. Assim, estes números estão bem definidos pois $r(G, H) \leq r(K_{v(G)}, K_{v(H)}) = R(v(G), v(H)) < \infty$. De maneira analoga, podemos definir os números de Ramsey para várias cores, $r(G_1, \dots, G_k)$, e adaptar a notação $r_k(G) = r(G, \dots, G)$.

Agora vamos estudar algumas classes de grafos interessantes e seus números de Ramsey. Vale observar que mesmo famílias simples de grafos, os números de Ramsey associados podem ser bem difíceis de se determinar. Por este motivo, muitos dos resultados apresentados nesta seção não incluirão as demonstrações. O texto, no entanto, fornece uma base sólida o suficiente para que o leitor interessado, busque as referências e estudem tais demonstrações por si só.

3.1 Grafos Bipartidos

Seja $G = (V, E)$ um grafo simples. Dizemos que G é um *grafo bipartido* se o conjunto V pode ser particionado em duas partes não vazias X e Y de tal forma que toda aresta em E tem uma extremidade em X a outra em Y . Tal partição (X, Y) é dita uma *bipartição* do grafo G . Um grafo G com bipartição (X, Y) é denotado $G[X, Y]$.

Quando um grafo bipartido $G[X, Y]$ é tal que par de vértices $x \in X$ e $y \in Y$ é adjacente, dizemos que $G[X, Y]$ é um *grafo bipartido completo*. Naturalmente, temos uma família de grafos associada. Denotamos por $K_{n,m}$ o grafo bipartido completo $G[X, Y]$ com $|X| = n$ e $|Y| = m$. Temos portanto que $v(K_{n,m}) = n + m$ e $e(K_{n,m}) = nm$.

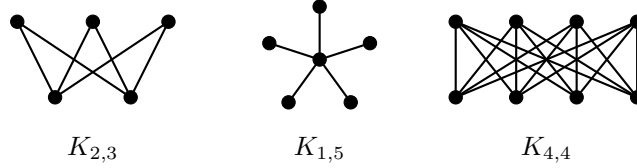


Figura 11: Alguns grafos bipartidos.

Quando o conjunto de vértices de um grafo pode ser particionado em k partes disjuntas e não vazias de tal forma que nenhuma aresta possui as duas extremidades em uma única parte, dizemos que o grafo é *k-partido*. Um grafo bipartido é, portanto, 2-partido. Denotamos por K_{a_1, \dots, a_k} o grafo completo k -partido com partes com a_i vértices. Nas próximas seções, mostramos que a família de grafos k -partidos completo é bem interessante para construir limitantes inferiores para números de Ramsey.

Um subcaso notável dos grafos bipartidos completos são os *grafos estrela* $K_{1,n}$. O desenho do $K_{1,5}$ na Figura 11 evidencia a motivação por trás deste nome. Podemos caracterizar os números de Ramsey $r(K_{1,n}, K_{1,m})$ da seguinte forma.

Teorema 20 (Harary [13]). *Sejam n e m inteiros positivos, temos que*

$$r(K_{1,n}, K_{1,m}) = \begin{cases} n + m, & \text{se } n \text{ ou } m \text{ forem ímpares;} \\ n + m - 1, & \text{se } m \text{ e } n \text{ forem pares.} \end{cases}$$

Demonstração. Primeiramente, note que em uma coloração de arestas, um $K_{1,n}$ monocromático na cor C corresponde a um vértice v tal que $d_C(v) \geq n$.

Considere uma RB -coloração qualquer de um grafo completo G sem $K_{1,n}$ vermelho ou $K_{1,m}$ azul. Temos então que $d_R(v) \leq n - 1$ e $d_B(v) \leq m - 1$ para todo vértice $v \in V(G)$. Isto é impossível se $G = K_{n+m}$, logo $r(K_{1,n}, K_{1,m}) \leq n + m$. Se m e n são pares, considere $G = K_{n+m-1}$. Temos portanto que $d_R(v) = n - 1$ e $d_B(v) = m - 1$ para todo vértice $v \in V(G)$. Logo, o grafo G_R possui todos os vértices de grau ímpar. Mas $v(G_R) = n + m - 1$ também é ímpar. Pelo *handshaking lemma*, não existe grafo com um número ímpar de vértices de grau ímpar. Portanto, $r(K_{1,n}, K_{1,m}) \leq n + m - 1$.

No caso de algum entre n e m ser ímpar, considere sem perda de generalidade que n é ímpar, com $n = 2k + 1$. Considere $G = K_{n+m-1}$ com $V(G) = \{v_0, \dots, v_{n+m-1}\}$. Defina uma RB -coloração c da seguinte maneira.

$$c(v_i v_j) = \begin{cases} \text{vermelho,} & \text{se } i - j \in \{-k, \dots, k\} \pmod{n + m - 1}; \\ \text{azul,} & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Note que nesta coloração, $d_R(v) = 2k = n - 1$ e $d_B(v) = m - 1$ para todo vértice $v \in V(G)$. Portanto, c não possui $K_{1,n}$ vermelho nem $K_{1,m}$ azul, o que implica em $r(K_{1,n}, K_{1,m}) = n + m$.

Suponha agora que ambos n e m são pares. Considere um grafo bipartido $G = G[X, Y]$, com $X = \{x_i : i \in \mathbb{Z}_l\}$ e $Y = \{y_i : i \in \mathbb{Z}_l\}$, tal que os vértices x_i e y_j são adjacentes se e somente se $i - j \in \{1, \dots, k\} \pmod{l}$. Note que G é k -regular, e seu complemento é $(2l - k - 1)$ -regular. Escolhendo $l = \frac{n+m-2}{2}$ e $k = n - 1$, temos que G é um grafo com $n + m - 2$ vértices que é $(n - 1)$ -regular com complementar \overline{G} $(m - 2)$ -regular. Isto corresponde a uma coloração de K_{n+m-2} sem $K_{1,n}$ vermelho nem $K_{1,m}$ azul. Portanto, temos $r(K_{1,n}, K_{1,m}) = n + m - 1$. \square

Este resultado pode ser generalizado com idéias parecidas para o número de Ramsey com diversas cores.

Teorema 21 (Burr, Roberts [2]). *Sejam m_1, \dots, m_k inteiros positivos, t dos quais são pares. Temos que*

$$r(K_{1,m_1}, \dots, K_{1,m_k}) = \sum_{i=1}^k m_i - k + \varepsilon,$$

onde $\varepsilon = 1$ se t é par e $\varepsilon = 2$ caso contrário.

3.2 Caminhos e Ciclos

Um *caminho* é um grafo simples que pode ter seus vértices listados por uma sequência de modo que dois vértices são adjacentes, se e somente se, correspondem a elementos consecutivos na sequência. Similarmente, um *ciclo* é um grafo simples com $n \geq 3$ que pode ter seus vértices listados por uma sequência cíclica de modo que dois vértices são adjacentes, se e somente se, correspondem a elementos consecutivos na sequência.

Estas definições evocam naturalmente uma família de grafos associada. Definimos os *grafos caminhos* P_n são os grafos com n vértices e $n - 1$ arestas que são isomorficos ao grafo $(\{v_1, \dots, v_n\}, \{v_i v_{i+1}\})$. Adicionando a aresta $v_n v_1$ ao grafo anterior, obtemos os *grafos ciclo* C_n , com n vértices e n arestas. Ambas as famílias estão exemplificadas na Figura 12.

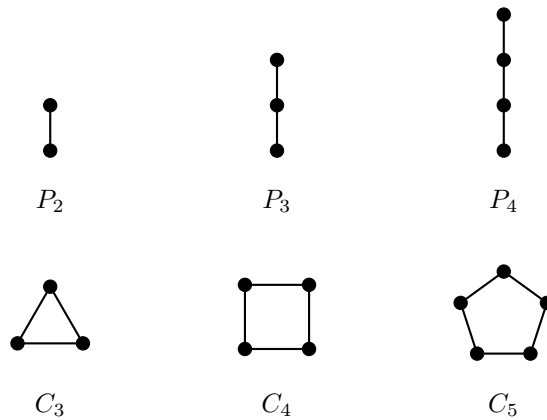


Figura 12: Alguns ciclos e caminhos pequenos.

Se $n > 1$, o grafo P_n possui 2 vértices de grau um, chamados de *extremidades*, os demais $n - 2$ vértices são ditos *internos*, e possuem grau dois. Já o grafo C_n é 2-regular, isto é, possui todos os vértices com grau igual a dois.

O número de Ramsey

Teorema 22 (Gerencsér, Gyárfás [11]). *Sejam $n \geq m \geq 2$ inteiros, então*

$$r(P_n, P_m) = n + \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor - 1.$$

Seja G um grafo simples. Dizemos que dois vértices x e y estão conectados se existe um caminho em G com uma extremidade em x e outra em y . Note que esta relação é uma relação de equivalência no conjunto $V(G)$. Chamamos as classes de equivalência desta relação de *componentes*. Dizemos que G é *conexo* se entre quaisquer dois vértices de G estão conectados, ou seja, G possui apenas uma componente.

Proposição 23. $r(P_k, K_3) = 2k - 1$.

Demonstração. Note que o

□

3.3 Árvores

O *método probabilístico* é uma técnica não-constructiva para demonstração da existência de objetos matemáticos com alguma propriedade específica. Como o próprio nome indica, o argumento tem natureza probabilística, e ele consiste em mostrar que ao escolher um objeto de maneira aleatória, a probabilidade deste objeto ter a propriedade desejada é positiva. Isto garante a existência deste objeto.

Cabe então, antes de entrarmos nos detalhes desta técnica, fazer uma breve revisão de conceitos de probabilidade, em particular, espaços discretos de probabilidade. Referências adicionais recomendadas incluem as notas de aula do Leonardo Rolla [18] e o livro do Barry James [14].

4.1 Probabilidade Discreta

Um modelo probabilístico possui três componentes básicas: um espaço amostral, uma classe de eventos e uma medida de probabilidade. O *espaço amostral* é um conjunto não-vazio Ω , cujos elementos representam os resultados possíveis para um experimento. Uma realização deste experimento consiste na escolha aleatória de um elemento $\omega \in \Omega$. Estaremos interessados exclusivamente no caso em que Ω é um conjunto finito.

Em conjunto com um espaço amostral Ω , se associa uma classe \mathcal{F} apropriada de subconjuntos de Ω . Os elementos de \mathcal{F} são subconjuntos $A \subseteq \Omega$ são os conjuntos quais atribuímos uma probabilidade, e são denominados *eventos* ou *conjuntos mensuráveis*. Definiremos probabilidade apenas para elementos desta classe. Para que isto seja feito de maneira adequada, a classe \mathcal{F} precisa satisfazer algumas propriedades. Mais precisamente, \mathcal{F} precisa formar uma σ -álgebra sobre Ω , veja [14]. No entanto, esta formalidade é facilmente contornada no caso discreto, uma vez que o conjunto de todos os subconjuntos de Ω é uma σ -álgebra sobre Ω quando Ω é finito. O par (Ω, \mathcal{F}) é dito um *espaço mensurável*.

Finalmente, uma *medida de probabilidade*, ou simplesmente *probabilidade*, é uma me-

didada sobre o espaço mensurável (Ω, \mathcal{F}) , ou seja, uma função $\mathbf{P} : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$ com as seguintes propriedades:

(P1) $\mathbf{P}(A) \geq 0$ para todo $A \in \mathcal{F}$.

(P2) $\mathbf{P}(\Omega) = 1$.

(P3) Se $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{F}$ com $A_i \cap A_j = \emptyset, \forall i \neq j$, então $\mathbf{P}(\bigcup_i A_i) = \sum_i \mathbf{P}(A_i)$.

Um *espaço de probabilidade* é uma tripla $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ no qual Ω é um espaço amostral, \mathcal{F} é uma classe de eventos e \mathbf{P} é uma medida de probabilidade sobre (Ω, \mathcal{F}) . Para um espaço de probabilidade, também valem as seguintes propriedades:

1. $\mathbf{P}(\emptyset) = 0$
2. $\mathbf{P}(\overline{A}) = 1 - \mathbf{P}(A)$.
3. Se A e $B \in \mathcal{F}$ e $A \subseteq B$, então $\mathbf{P}(A) \leq \mathbf{P}(B)$.
4. Se A e $B \in \mathcal{F}$ e $A \subseteq B$, então $\mathbf{P}(B \setminus A) = \mathbf{P}(B) - \mathbf{P}(A)$.
5. Para todo $A \in \mathcal{F}$, temos $0 \leq \mathbf{P}(A) \leq 1$.
6. Se $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A}$ c, então $\mathbf{P}(\bigcup_i A_i) \leq \sum_i \mathbf{P}(A_i)$.
7. Se A e $B \in \mathcal{F}$, então $\mathbf{P}(A \cup B) = \mathbf{P}(A) + \mathbf{P}(B) - \mathbf{P}(A \cap B)$.

Existem diversas maneiras de construir espaços de probabilidade, cada uma se adequando a uma situação. Para nossos propósitos, o espaço dos resultados *equiprováveis* é de grande interesse, e é construído da seguinte maneira. Seja Ω um conjunto finito e \mathcal{F} o conjunto de todos os subconjuntos de Ω . Para $A \in \mathcal{F}$, definiremos a probabilidade de A por $\mathbf{P}(A) = \frac{|A|}{|\Omega|}$. O leitor pode verificar que esta definição satisfaz as propriedades (P1), (P2) e (P3) de uma medida de probabilidade. Medidas de probabilidade sobre espaços finitos que satisfazem $\mathbf{P}(A) = \frac{|A|}{|\Omega|}$ também são ditas *uniformes*.

Dado um espaço de probabilidade $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ e A e $B \in \mathcal{F}$, definimos a *probabilidade condicional* de A , dado que B ocorre, $\mathbf{P}(A|B)$, por

$$\mathbf{P}(A|B) = \frac{\mathbf{P}(A \cap B)}{\mathbf{P}(B)}.$$

Quando $\mathbf{P}(B) = 0$, definimos $\mathbf{P}(A|B) = \mathbf{P}(A)$. Desta forma, a função $\mathbf{P}(\cdot|B) : \mathcal{F} \rightarrow \mathbb{R}$ é uma medida de probabilidade em (Ω, \mathcal{F}) .

Dois eventos A e B são ditos *independentes* se $\mathbf{P}(A \cap B) = \mathbf{P}(A)\mathbf{P}(B)$. Usa-se $A \perp B$ para indicar que os eventos A e B são independentes. Intuitivamente, dois eventos são independentes quando a ocorrência ou não de um deles não influencia a probabilidade da ocorrência do outro evento. As proposições a seguir são todas equivalentes:

1. A e B são independentes.

2. A e \overline{B} são independentes.
3. \overline{A} e B são independentes.
4. \overline{A} e \overline{B} são independentes.
5. $\mathbf{P}(A|B) = \mathbf{P}(A)$.
6. $\mathbf{P}(B|A) = \mathbf{P}(B)$.

Seja $\{A_i : i \in I\}$ uma família de eventos, onde I é um conjunto qualquer de índices. A família $\{A_i : i \in I\}$ é dita *independente dois a dois* se A_i é independente de A_j para todo $i, j \in I, i \neq j$. A mesma família é dita *coletivamente independente* se para qualquer subconjunto $J \subset I$ de índices, vale

$$\mathbf{P}\left(\bigcap_{j \in J} A_j\right) = \prod_{j \in J} \mathbf{P}(A_j).$$

Uma *variável aleatória* é uma função $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ que associa a cada elemento do espaço amostral a um valor real. Formalmente, também é requerido que o conjunto $\{\omega \in \Omega : X(\omega) \leq x\}$ seja mensurável, ou seja, $X^{-1}((-\infty, x]) \in \mathcal{F}$. Quando Ω é finito e \mathcal{F} é a classe de todos os subconjuntos de Ω , este requisito sempre é satisfeito. Quando uma variável aleatória X assume uma quantidade finita de valores, ela é dita *simples*.

Utilizaremos variáveis aleatórias para realizar contagens. Chamaremos variáveis aleatórias que só assumem valores inteiros não-negativos de *naturais*. Uma classe de variáveis aleatórias naturais bastante importante é a das *funções indicadoras*. Fixado $A \subset \Omega$, definimos a função indicadora de A , $\mathbb{1}[A]$, por

$$\mathbb{1}[A](\omega) = \begin{cases} 1, & \text{se } \omega \in A; \\ 0, & \text{se } \omega \notin A. \end{cases}$$

Dado uma variável aleatória natural X sobre $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$, definimos a *esperança* de X , denotada $\mathbf{E}[X]$ por

$$\mathbf{E}[X] = \sum_{n=0}^{\infty} n \mathbf{P}(\{X = n\}).$$

Note que para funções indicadoras, temos $\mathbf{E}[\mathbb{1}[A]] = \mathbf{P}(A)$.

A esperança é um *linear* no seguinte sentido. Sejam X_1, \dots, X_n variáveis aleatórias sobre um mesmo espaço de probabilidade, e sejam $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in \mathbb{R}$. Temos que

$$\mathbf{E}\left[\sum_{i=1}^n \alpha_i X_i\right] = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mathbf{E}[X_i].$$

A esperança é *monótona* significando que se X e Y são variáveis aleatórias num mesmo espaço com $X \geq Y$, então $\mathbf{E}[X] \geq \mathbf{E}[Y]$.

A *desigualdade de Markov* é uma importante ferramenta dentro do método probabilístico. Ela nos dá que se X é uma variável aleatória não-negativa, então

$$\mathbf{P}(X \geq a) \leq \frac{\mathbf{E}[X]}{a}.$$

Este apanhado de resultados é suficiente para finalmente introduzirmos o método probabilístico aplicado em Teoria de Ramsey. Aplicações mais refinadas do método, no entanto, requerem conceitos mais avançados de probabilidade, como martingales, concentração de medida, grandes desvios e desigualdade de correlações. O livro *The Probabilistic Method* [1] é a grande referência para o método e contém inúmeras aplicações, tanto em Combinatória quanto em outras áreas da Matemática.

4.2 Limitantes Inferiores

Os limitantes inferiores para os números de Ramsey visto no Capítulo 2 são construtivos, isto é, quando mostramos que $R(4, 4) > 17$, por exemplo, isto passou pela construção de uma coloração de arestas do grafo K_{17} . Para encontrar bons limitante inferiores de maneira mais genérica, vamos precisar de uma abordagem um pouco diferente. Vamos começar pelos números de Ramsey diagonais.

O nosso objetivo é encontrar colorações de arestas de K_n sem K_k monocromáticos com k fixado e n maior possível, para poder concluir que $R(k, k) > n$. Note que não necessariamente precisamos construir tal coloração, basta saber que alguma coloração que satisfaz estas propriedades existe. Vamos introduzir agora o *método probabilístico* para resolver este tipo de problema. O nosso objetivo é provar que uma estrutura com certas propriedades existe. Definimos então um espaço de probabilidade sobre o conjunto destas estruturas de maneira adequada e mostramos que com probabilidade positiva, a propriedade de interesse é satisfeita. Isto nos mostra que o conjunto dos elementos cuja propriedade são satisfeitas não pode ser vazio, caso contrário, a probabilidade seria 0, e mostramos a existência de uma estrutura com esta propriedade.

Esta técnica, embora aplicada pela primeira vez por Szele, foi vastamente explorada pelo matemático Paul Erdős, que utilizou desta técnica para encontrar justamente um limitante inferior para os números de Ramsey diagonais $R(k, k)$ [8]. Estamos interessados em escolher uma RB -coloração do K_n de maneira aleatória e uniforme. O nosso espaço amostral Ω é, portanto, o conjunto de todas as colorações de arestas em duas cores do K_n . Seja $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ o espaço de probabilidade com medida uniforme. Como temos que $|\Omega| = 2^{\binom{n}{2}}$, dado $A \in \mathcal{F}$, temos:

$$\mathbf{P}(A) = \frac{|A|}{2^{\binom{n}{2}}}.$$

Suponha que escolhemos uma coloração $c \in \Omega$ de maneira aleatoria e uniforme, de acordo com o espaço de probabilidade acima. Queremos saber qual é a probabilidade desta coloração possuir uma dada propriedade. Seja $\mathcal{P} \subset \Omega$ o conjunto das colorações que satisfazem a dada propriedade. Temos então que $\mathbf{P}(c \text{ possui a propriedade}) = \mathbf{P}(c \in \mathcal{P}) = |\mathcal{P}| / |\Omega|$, onde \mathbf{P} é a medida de probabilidade.

Em particular, se e é uma aresta, então $|\mathcal{P}| = |\{c \in \mathcal{C} : c(e) = R\}| = 2^{\binom{n}{2}-1}$, o que nos dá $\mathbf{P}(c(e) = R) = \frac{1}{2}$ e também $\mathbf{P}(c(e) = B) = \frac{1}{2}$. Além disso, se e e f são arestas distintas, $\mathbf{P}(c(e) = B \cap c(f) = B) = \frac{1}{4}$, o que nos mostra que os eventos da forma $\{c(e) = C\}$ para alguma aresta e e cor C são independentes.

Desta forma, escolher uma coloração $c \in \Omega$ utilizando o espaço de probabilidade $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ é equivalente a escolher uma coloração das arestas de K_n colorindo cada aresta de maneira aleatória, uniforme e independente. Podemos agora introduzir a primeira aplicação do método probabilístico:

Teorema 24 (Erdős, 1947). *Se $\binom{n}{k} 2^{1-\binom{k}{2}} < 1$ então $R(k, k) > n$. Isso nos dá que $R(k, k) > \lfloor 2^{k/2} \rfloor$ para todo $k \geq 3$.*

Demonstração. Suponha que $\binom{n}{k} 2^{1-\binom{k}{2}} < 1$ e considere uma RB -coloração c do grafo completo $G = (V, E) \simeq K_n$ obtida pintando cada aresta de maneira aleatória, uniforme e independente. Fixado um subconjunto $A \in \binom{V}{k}$, ou seja, um subconjunto de V com k elementos, defina o evento $M_A = \{G[A] \text{ é monocromático em } c\}$. Fixando uma cor para as arestas do subgrafo induzido por A , podemos colorir as diversas $\binom{n}{2} - \binom{k}{2}$ arestas de qualquer cor. Como existem duas cores disponíveis, temos:

$$\mathbf{P}(M_A) = \frac{2 \cdot 2^{\binom{n}{2}-\binom{k}{2}}}{2^{\binom{n}{2}}} = 2^{1-\binom{k}{2}}$$

Considere agora a variável aleatória X que conta a quantidade de K_k monocromáticos em K_n . Temos então $X = \sum_{A \in \binom{V}{k}} \mathbb{1}[M_A]$. Vamos avaliar o valor esperado de X .

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[X] &= \mathbf{E} \left[\sum_{A \in \binom{V}{k}} \mathbb{1}[M_A] \right] = \sum_{A \in \binom{V}{k}} \mathbf{E}[\mathbb{1}[M_A]] \\ &= \sum_{A \in \binom{V}{k}} \mathbf{P}(M_A) = \sum_{A \in \binom{V}{k}} 2^{1-\binom{k}{2}} = \binom{n}{k} 2^{1-\binom{k}{2}} < 1 \end{aligned}$$

Pela desigualdade de Markov, $\mathbf{P}(X \geq 1) \leq \mathbf{E}[X] < 1$, portanto $\mathbf{P}(X = 0) > 0$. Portanto, existe alguma coloração de K_n sem K_k monocromático. Com isso, temos $R(k, k) > n$.

Lembre que $\binom{n}{k} \leq n^k/k!$ e suponha que $n = \lfloor 2^{k/2} \rfloor$. Temos então que

$$\binom{n}{k} 2^{1-\binom{k}{2}} \leq \frac{n^k}{k!} 2^{1-\frac{k^2}{2}+\frac{k}{2}} = \frac{n^k 2^{1+\frac{k}{2}}}{k! 2^{\frac{k^2}{2}}} \leq \frac{2^{1+\frac{k}{2}}}{k!} < 1$$

quando $n \geq 3$. Assim, temos $R(k, k) > \lfloor 2^{k/2} \rfloor$ quando $n \geq 3$. \square

Este tipo de idéia pode ser refinada para obter resultados melhores para o limitante inferior. No entanto, não se conhece algum limitante inferior cuja ordem exponencial seja superior à $\sqrt{2^k}$. Vimos na seção anterior, que o melhor limitante superior conhecido possui

ordem exponencial 4^k . Um dos problemas abertos mais importantes em Combinatória é determinar a ordem exponencial correta para o crescimento dos números de Ramsey diagonais. Em particular, não se sabe se o seguinte limite existe [4]:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (R(k, k))^{1/k}.$$

Mostramos que se este limite existir, ele está entre $\sqrt{2}$ e 4.

A diferença entre as ordens de crescimento do limitante inferior e do limitante superior nos mostra o quanto ainda não se sabe sobre estes números. O melhor que podemos fazer para encontrar um K_k monocromático consiste em jogar fora metade do grafo a cada passo, como foi feito no Teorema 4, o que provavelmente é destrutivo demais. A melhor construção que encontramos para uma coloração sem K_k monocromático é uma coloração aleatória. Toda construção explícita conhecida é sub-exponencial. De fato, um importante problema em aberto da Teoria de Ramsey é encontrar uma demonstração construtiva de que $R(k, k) \geq (1 + c)^k$ para alguma constante $c > 0$.

Outro aspecto interessante desta demonstração é que ao alterando a condição para $\binom{n}{k} 2^{1-\binom{k}{2}} \ll 1$, garantimos que $\mathbf{P}(X = 0) \rightarrow 1$. De fato, isso ocorre quando $n = \lfloor 2^{k/2} \rfloor$. Isto possui implicações algorítmicas interessantes. Podemos encontrar de fato uma coloração do K_n sem $K_{2 \log n}$ monocromático com alta probabilidade apenas colorindo as arestas de maneira aleatória. De fato, quando maior n , menor a probabilidade de uma coloração aleatória do K_n possuir um $K_{2 \log n}$ monocromático.

4.3 Pequenas Alterações

Na aplicação do método probabilístico da seção anterior, mostramos que a existência de configurações em que alguma estrutura indesejada não ocorre. Algumas vezes, não conseguimos garantir que estas estruturas não apareçam, mas podemos encontrar configurações em que não existam muitas dessas estruturas ruins. O que podemos fazer em seguida é alterar a configuração afim de remover estas estruturas indesejadas. Este procedimento de realizar alterações nos grafos é bastante utilizado e geralmente permitirá refinar ligeiramente o nosso limitante inferior.

Teorema 25. *Para todo inteiro n , temos $R(k, k) > n - \binom{n}{k} 2^{1-\binom{k}{2}}$.*

Demonstração. Considere uma RB -coloração c do grafo completo $G = (V, E) \simeq K_n$ obtida pintando cada aresta de maneira aleatória, uniforme e independente. Procedendo de maneira idêntica ao Teorema 24, definimos a variável aleatória X que conta a quantidade de K_k monocromáticos em K_n . Calculamos o valor esperado de X e obtivemos:

$$\mathbf{E}[X] = \binom{n}{k} 2^{1-\binom{k}{2}}$$

Isto é suficiente para garantir que existe uma coloração c de K_n com no máximo $\mathbf{E}[X]$ cópias monocromáticas de K_k . Remova do K_n um vértice de cada uma das cópias monocromáticas K_k , e assim, obtemos um grafo livre de K_k monocromático. Removemos no máximo

$\mathbf{E}[X]$ vértices, portanto sobram pelo restam $n - \mathbf{E}[X]$ vértices no grafo. Portanto

$$R(k, k) \geq n - \mathbf{E}[X] = n - \binom{n}{k} 2^{1-\binom{k}{2}}. \quad \square$$

Fazendo uma análise cuidadosa desta desigualdade [19], podemos escolher n de forma a maximizar $n - \binom{n}{k} 2^{1-\binom{k}{2}}$ e obter o seguinte resultado.

Corolário 26. *Para $k \rightarrow \infty$, temos $R(k, k) > (1 + o(1)) \frac{k\sqrt{2}^k}{e}$.*

Até agora, vimos como utilizar o método probabilístico para encontrar limitantes para os números de Ramsey diagonais. Se desejarmos encontrar limitantes para outros números de Ramsey, precisamos alterar o nosso espaço de probabilidade.

Seja Ω o conjunto de todas as RB -colorações do $G = (V, E) \simeq K_n$ e \mathcal{F} o conjunto de todos os subconjuntos de Ω . Vamos construir uma medida de probabilidade que não é uniforme em Ω . Fixe $0 \leq p \leq 1$ e pinte cada aresta de maneira aleatória e independente, com $\mathbf{P}(c(e) = R) = p$ e $\mathbf{P}(c(e) = B) = 1 - p$. Para uma coloração $c \in \Omega$ qualquer, temos então

$$\mathbf{P}(c) = p^{e(G_R)} + (1 - p)^{e(G_B)}.$$

Assim, $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ consiste de um espaço de probabilidade. O espaço uniforme que tínhamos antes é o caso particular em que $p = 1/2$. Podemos generalizar o Teorema 25 para números $R(k, s)$ da seguinte maneira:

Teorema 27. *Para todo inteiro n e $p \in [0, 1]$, temos $R(k, s) > n - \binom{n}{k} p^{\binom{k}{2}} - \binom{n}{s} (1 - p)^{\binom{s}{2}}$.*

Demonstração. Considere uma RB -coloração c do grafo completo $G = (V, E) \simeq K_n$ obtida pintando cada aresta de maneira aleatória e independente de forma que cada aresta é vermelha com probabilidade p e azul com probabilidade $1 - p$. Definimos a variável aleatória X como a quantidade de cópias vermelhas de K_k vem c e Y como a quantidade de cópias azuis de K_s em c . Computando as esperanças de X e Y , obtemos:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[X] &= \binom{n}{k} p^{\binom{k}{2}} \\ \mathbf{E}[Y] &= \binom{n}{s} (1 - p)^{\binom{s}{2}} \end{aligned}$$

Consideramos um grafo proibido como uma cópia vermelha de K_k ou uma cópia azul de K_s . Defina $Z = X + Y$ como a quantidade de grafos proibidos. Note que $\mathbf{E}[Z] = \mathbf{E}[X] + \mathbf{E}[Y]$. Existe, portanto, uma coloração c de K_n com no máximo $\mathbf{E}[Z]$ grafos proibidos. Remova do K_n um vértice de cada um dos grafos proibidos, e obtemos um grafo livre de K_k vermelho e de K_s azul. Removemos no máximo $\mathbf{E}[Z]$ vértices, portanto sobram pelo restam $n - \mathbf{E}[Z]$ vértices no grafo. Portanto

$$R(k, s) > n - \binom{n}{k} p^{\binom{k}{2}} - \binom{n}{s} (1 - p)^{\binom{s}{2}}. \quad \square$$

Esta modificação do resultado nos permite obter limitantes inferiores para outras classes de números. Fazendo escolhas adequadas de n e p no Teorema 27, obtém-se os seguintes corolários

Corolário 28. *O número de Ramsey $R(3, k)$ satisfaz $R(3, k) \geq \Omega\left(\frac{k^{3/2}}{\log^{3/2} k}\right)$.*

Corolário 29. *O número de Ramsey $R(4, k)$ satisfaz $R(4, k) \geq \Omega\left(\frac{k^2}{\log^2 k}\right)$.*

4.4 O Lema Local de Lovász

Referências Bibliográficas

- [1] ALON, NOGA, AND SPENCER, JOEL H. *The Probabilistic Method*, fourth ed. Wiley, New York, 2016.
- [2] BURR, S. A., AND ROBERTS, J. A. On ramsey numbers for stars. *Utilitas Math* 4 (1973), 217–220.
- [3] BUSH, L. E. The william lowell putnam mathematical competition. *The American Mathematical Monthly* 60, 8 (1953), 539–542.
- [4] CHUNG, F., AND GRINSTEAD, C. M. A survey of bounds for classical ramsey numbers. *Journal of Graph Theory* 7, 1 (1983), 25–37.
- [5] CHUNG, F. R. K. On the ramsey numbers $n(3, 3, \dots, 3; 2)$. *Discrete Mathematics* 5, 4 (1973), 317–321.
- [6] CONLON, D. A new upper bound for diagonal ramsey numbers. *Annals of Mathematics* (2009), 941–960.
- [7] DE OLIVEIRA SANTOS, J. P. Introdução à teoria dos números.
- [8] ERDÖS, P. Some remarks on the theory of graphs. *Bull. Amer. Math. Soc.* 53, 4 (04 1947), 292–294.
- [9] ERDÖS, P., AND SZEKERES, G. A combinatorial problem in geometry. *Compositio Mathematica* 2 (1935), 463–470.
- [10] FETTES, S., KRAMER, R., AND RADZISZOWSKI, S. An upper bound of 62 on the classical ramsey number $(3, 3, 3, 3)$. *The Charles Babbage Research Centre: Ars Combinatoria* 72 (2004).
- [11] GERENCSÉR, L., AND GYÁRFÁS, A. On ramsey-type problems. *Ann. Univ. Sci. Budapest. Eötvös Sect. Math* 10 (1967), 167–170.

-
- [12] GREENWOOD, R. E., AND GLEASON, A. M. Combinatorial relations and chromatic graphs. *Canad. J. Math* 7, 1 (1955), 7.
 - [13] HARARY, F. Recent results on generalized ramsey theory for graphs. In *Graph Theory and Applications*. Springer, 1972, pp. 125–138.
 - [14] JAMES, B. R. *Probabilidade: um curso em nível intermediário*. Projeto Euclides. Instituto de Matemática Pura e Aplicada, 2009.
 - [15] MCKAY, B. D., AND RADZISZOWSKI, S. P. $R(4, 5) = 25$. *Journal of Graph Theory* 19, 3 (1995), 309–322.
 - [16] RADZISZOWSKI, S. P., ET AL. Small ramsey numbers. *Electron. J. Combin* 1, 7 (1994).
 - [17] RAMSEY, F. P. On a Problem of Formal Logic. *Proceedings of The London Mathematical Society* s2-30 (1930), 264–286.
 - [18] ROLLA, L. T. Introdução à probabilidade, notas de aula, Abril 2016.
 - [19] SPENCER, J. *Asymptopia*, vol. 71 of *Student Mathematical Library*. American Mathematical Soc., 2014.
 - [20] SUN, H. S., AND COHEN, M. An easy proof of the greenwood-gleason evaluation of the ramsey number $r(3, 3, 3)$.