

## CODIFICAÇÃO DE REDE PARA OTIMIZAÇÃO NA TRANSMISSÃO DE PACOTES

Douglas Reis da Silva Fermino, Faculdade de Tecnologia, Americana  
douglas.fermino@fatec.sp.gov.br

Maxwel Vitorino da Silva, Faculdade de Tecnologia, Americana  
maxwel.silva3@fatec.sp.gov

### Resumo

Este artigo apresenta o estudo de uma nova maneira de aumentar a taxa de transferência de dados em redes wireless utilizando esquema de codificação de rede. Sendo assim, apresenta-se um protocolo de roteamento que se utiliza de novos métodos no cálculo de entrega dos pacotes aplicando novos cabeçalhos podendo realizar o tráfego de N pacotes em uma mesma transmissão. Percebe-se a partir da aplicação do uso da codificação na restauração de mínimo armazenamento resultados que atingem um aumento na velocidade de transferência da rede sem grandes mudanças físicas.

**Palavras-chave:** Restauração de mínimo armazenamento. taxa de transferência. codificação de rede.

### Abstract

*This article presents the study of a new way to increase the data transfer rate in wireless networks using network coding scheme. Thus, it is presented a routing protocol that uses new methods to calculate the delivery of packets, applying new headers that can carry out the traffic of N packets in the same transmission. It can be seen from the application of the use of coding in the restoration of minimal storage that it achieves an increase in network transfer speed without major physical changes.*

**Keywords:** *Minimun-Storage. Regenerating. throuhput. network coding.*

## INTRODUÇÃO

O avanço da comunicação em redes de multiusuários hoje pede uma evolução constante na área de velocidade de transmissão e confiabilidade da informação, visando sempre uma rede cada vez mais segura e com maior velocidade. Esse avanço constante da tecnologia em redes wireless trouxe uma nova área de estudos em roteamentos de pacotes, implementando uma nova visão para os roteadores.

Tipicamente as funções dos roteadores se resumem em armazenar as informações da porta de entrada e encaminhá-las para a porta de saída, conforme apresenta-se na Figura 1.

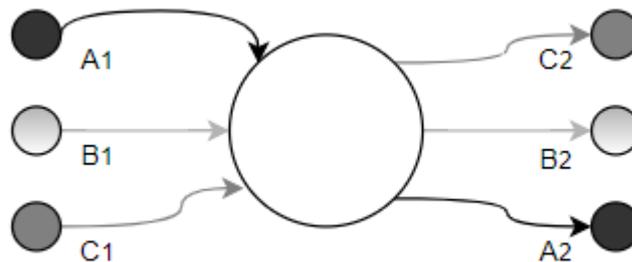


Figura 1 – Encaminhamento típico de roteador

Os estudos aplicados nas teorias matemáticas dos meios de comunicação juntamente com os métodos de roteamento, demonstraram que a utilização dos roteadores no processo de codificação traz um grande ganho na velocidade de transmissão.

Dando aos roteadores capacidade de processar os dados antes do encaminhamento das informações ao próximo destino, possibilitando efetuar a comunicação de forma cooperativa entre os nós presentes na rede.

O roteador em sua concepção original trabalha de forma isolada aos demais, ou seja, somente encaminha as informações recebidas do nó de origem, porém, quando está operando em um sistema cooperativo, os demais nós transmitidos não somente sua própria informação, como também as informações dos restantes dos nós que possuem o mesmo destino em comum, conforme observa-se na Figura 2.

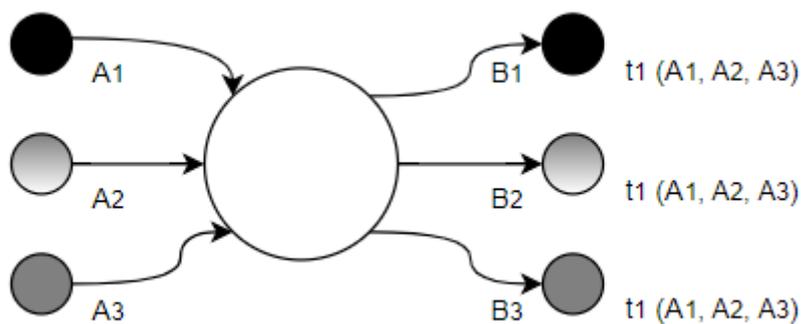


Figura 2 - Codificação

## 1. Referencial Teórico

### 1.1 Camadas OSI

Para prosseguir com o entendimento e desenvolvimento do assunto referente a codificação de rede faz-se necessário passar pelas camadas de rede e enlace descritas no modelo OSI, responsáveis pela entrega individual dos pacotes. Conforme cita Farouzan (2000, p.546):

A camada de rede é responsável pela entrega de um pacote, de sua origem até seu destino, possivelmente por meio de várias redes (links). Enquanto a camada de enlace de dados supervisiona a entrega do pacote entre dois sistemas na mesma rede (links), a camada de rede garante que cada um dos pacotes vá de seu ponto de origem até seu destino (FAROUZAN, 2010).

A comunicação entre dois pontos na rede só é possível com a montagem do cabeçalho dos pacotes onde se armazena todas as informações referente ao dono do pacote e quem necessita receber, junto com outros protocolos e indicadores que garantem a entrega com confiabilidade e integridade, conforme lista a RFC 791 [3]. Na Figura 3 apresenta-se o cabeçalho IPv4.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Version		IHL		TOS				Total Length																							
Identification										Flags		Fragment Offset																			
TTL				Protocol				Header Checksum																							
Source Address																															
Destination Address																															
(Options + Padding)																															
Data																															

Figura 3 – Especificação do cabeçalho IPv4

Os cabeçalhos dos datagramas (pacotes) de rede operam com um total de 20 a 60

bytes que são divididos conforme demonstrado na Figura 3, utilizados pelos roteadores para ser possível a comutação dos pacotes entre as redes, possibilitando a troca de informações de diferentes hosts em distantes localidades.

Versão: Valor que identifica a versão do pacote.

IHL (Tamanho do cabeçalho de Internet): Contém o número de palavras de 32 bits no cabeçalho.

TOS (Tipo de serviço): Utilizado para determinar a prioridade do pacote, muito utilizado em mecanismos de QoS.

Comprimento Total: Indica o tamanho total do pacote.

Identificação: Identifica exclusivamente o segmento de um pacote de IP original.

Flags: Indica como o pacote será fragmentado, auxiliando na reconstrução do pacote posteriormente.

Fragment Offset (Deslocamento de fragmento): Indica a ordem do fragmento na hora da reconstrução do pacote.

TTL (Tempo de vida): Contém um número que indica o tempo de vida do pacote, que se altera de forma decrescente conforme é processado por cada roteador indicando um salto.

Protocolo: Identifica o tipo de protocolo que o pacote está transmitindo

Checksum do cabeçalho: Utilizado para verificar possíveis erros no cabeçalho.

Endereço de Origem: Contém o endereço IP de origem do pacote.

Endereço de Destino: Contém o endereço IP de destino do pacote.

### **1.1.1 Roteamento de datagramas**

O roteamento é a escolha do caminho que os pacotes vão percorrer até a chegada ao host de destino, podendo ser feita de forma estática, ou seja, manualmente escolhida pelo administrador da rede ou então dinâmica onde a tabela de roteamento guarda os endereços de saída para as redes de forma automática pelos protocolos de roteamento. Conforme descrito por Farouzan (2000, p.546):

Nesse tipo de rede, cada roteador (ou comutador de pacotes) tem uma tabela de roteamento que se baseia no endereço de destino. As tabelas de roteamento são dinâmicas e são atualizadas periodicamente. Os endereços de destino e as portas de saída de encaminhamento correspondentes são registrados nessas tabelas. (FAROUZAN, 2010).

Rede	Mascara	Gateway	interface
10.1.10.0	/24	-	X1
10.1.20.0	/24	192.168.1.2	X2
10.1.30.0	/24	192.168.3.2	X3
10.1.40.0	/24	192.168.4.2	X4



Figura 4 – Tabela de Roteamento

O roteamento ocorre na camada três do modelo OSI (Camada de Rede), onde se encontra também o protocolo IP que é utilizado para dar identidade aos dispositivos dentro da rede. Todas as operações de leitura, escrita ou cálculos realizados pelos roteadores são utilizando os endereçamentos IP armazenados nas tabelas de roteamento, podendo ser usados diferentes tipos de protocolos de roteamento, entre eles os mais utilizados são MPLS e BGP.

O protocolo MPLS (*Multi Protocol Label Switching*) surgiu como uma solução para melhorar o desempenho das redes das provedoras de internet que estão sempre em constante expansão utilizando a identificação dos pacotes por meio de Labels. A MPLS analisa os rótulos, ao invés dos protocolos de camada de rede.

Desta maneira o rótulo de um pacote de saída é verificado e comparado com um rótulo do banco de dados. Com a informação encontrada, um novo rótulo é anexado ao pacote e transmitido para a interface de destino (MORGAN e LOVERING, 2008).

BGP (*Border Gateway Protocol*) é um protocolo de roteamento de borda que atua em sistemas autônomos, que são grupos de redes que compartilham uma mesma política de roteamento. O BGP é normalmente utilizado pelas provedoras de internet, conforme explica Peterson. (2003, p.306):

O BGP tem como finalidade interligar sistemas autônomos de diferentes operadoras, compartilhando informações de roteamento de forma mais restrita. Tem como finalidade também segmentar sistemas autônomos para que roteadores não tenham uma base de rotas ou estados de link muito grande, quando pertencente a uma mesma empresa. Sendo assim, um roteador core de uma empresa não terá armazenado em sua tabela de rota os estados de links de um roteador core de outra operadora, nem quando é rompido algum enlace ou adicionado algum roteador de um sistema autônomo vizinho, isto possibilita uma maior segurança entre os provedores (PETERSON; DAVIE, 2003).

## 2. Codificação de Rede

Atualmente o método mais comum de envio de informação de um ponto a outro em uma rede, é através de técnicas de roteamento, que, basicamente, baseia-se na escolha de um caminho da fonte até o destino para cada pacote. Existem várias técnicas para calcular o melhor caminho de uma fonte até o destino que são baseadas em algoritmos de roteamento (MONFREDINHO, 2011). Por exemplo, os protocolos BGP e MPLS citados acima.

Porém os algoritmos utilizados para descobrimento de novas rotas ou cálculo de melhor caminho acaba causando um tráfego na rede, ocupando parte da banda que poderia ser utilizada para transmissão de pacotes dos usuários finais, com esse problema na limitação das taxas de transferência surgiu o estudo da codificação de rede.

A codificação de rede é uma nova área de pesquisa que pode ter aplicações industriais em sistemas de rede práticos. Baseia-se em algoritmos nos quais o objetivo é melhorar a vazão e o desempenho da rede, para que sistemas de comunicação, tais como telefonia, internet e redes móveis, aproveitem melhor a capacidade do canal de comunicação entre o transmissor e o receptor (SILVA et al., 2017).

A codificação propõe que em muitas situações é possível aumentar a taxa de transmissão fim-a-fim sem aumentar a taxa de transmissão ponto-a-ponto da rede. O princípio básico é realizar combinações entre pacotes de tal modo que o destino consiga decodificá-los. Com a transmissão de um pacote combinado, a rede apresentará menos pacotes trafegando no mesmo período, porém com a mesma quantidade de informação (VALLE et al., 2014).

A codificação de rede traz algumas vantagens na parte de transmissão de pacotes utilizando o operador lógico XOR, podendo realizar a entrega de mais de um pacote em uma só transmissão, aumentando assim a velocidade de comunicação sem alterar o tráfego na rede utilizando métodos de roteamento já existentes.

Quando um nó recebe  $n$  pacotes para um mesmo destino do nó vizinho é possível realizar a codificação dos pacotes aplicando o operador XOR combinando o conteúdo de dois pacotes diferentes e encaminhando em uma mesma transmissão conforme apresenta-se a operação lógica XOR da Figura 5.

Pacote N1	11100101	00110010
Pacote N2	11000101	01111011
Pacote XOR N1,2	00100000	01001001

Figura 5 – Operador XOR

Assim então é manipulado os dados dentro do próprio pacote, para combinar as informações. Usa-se dois padrões de bits e executa a operação lógica em cada par de bits correspondentes, atribuindo o número um (1), se os dois bits forem diferentes, e zero (0) se forem iguais, os zeros (0) e uns (1) são os códigos (ou a evidência), que permitem a uma estação final (ou nó) com a inteligência necessária para deduzir a mensagem recebida do remetente. Assim, a codificação de rede possibilita efetivamente que os nós de destino recebam múltiplas mensagens sem aumento do número de pacotes recebidos ou atingir capacidade geral da rede.

### 2.1 *Minimun-Storage Regenerating (MSR)*

Alguns algoritmos de codificação já são estudados e dimensionados com diferentes vantagens entre eles, o método tratado nesse trabalho será o Minimun-Storage Regeneration (MSR), por seu diferencial ser a confiabilidade e mínimo uso de espaço dos nós.

Os códigos de regeneração para armazenamento distribuído atraíram muitos interesses de pesquisa na última década. Esses códigos trocam a largura de banda necessária para reparar um nó com falha com a quantidade total de dados armazenados na rede. MSR são uma classe importante de códigos de regeneração ideais que minimizam primeiro a quantidade de dados armazenados por nó e então a largura de banda de reparo.

O objetivo do sistema de MSR é armazenar os dados resultantes da codificação de forma confiável e pelo tempo necessário, distribuído entre os nós que estão espalhados na rede, podendo recuperar partes perdidas de diferentes locais garantindo a entrega da mensagem.

Para que a replicação da informação garanta a disponibilidade da mensagem e o melhor armazenamento entre os nós, os pacotes são divididos em um arquivo de tamanho **M** em **k** pedaços, cada um com tamanho **M/k**, então são recodificados em **n** pedaços (**n, k**) e armazenado em **n** nós. Assim o arquivo original pode ser recuperado de qualquer conjunto de **k** partes codificadas (DIMAKIS et al., 2010). O protocolo de reparação segue o esquema apresentado na figura 6.

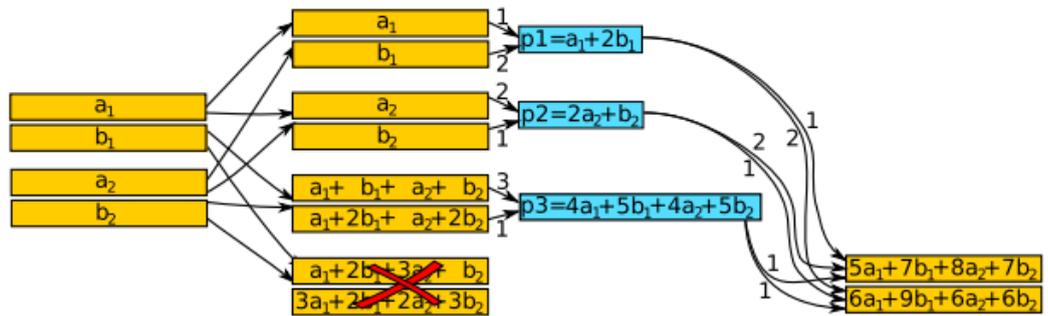


Figura 6 – Exemplo de reparação com dois nós

Todos os pacotes (caixas) da Figura 6 têm tamanho de 0,5 MB e cada nó armazena dois pacotes. Observe que quaisquer dois nós têm quatro equações que podem ser usadas para recuperar os dados,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ . Os pacotes de paridade  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  são usados para criar os dois pacotes do recém-chegado, exigindo largura de banda de reparo de 1,5 MB. Os coeficientes de multiplicação são selecionados aleatoriamente e o exemplo é mostrado sobre os inteiros para simplificar (embora qualquer campo suficientemente grande seja o suficiente).

O ponto principal é que os nós não enviam suas informações, mas geram pacotes de paridade de seus dados e os encaminha para o nó recém-chegado, que os mistura ainda mais para gerar dois novos pacotes. Observe que os coeficientes selecionados também precisam ser incluídos nos pacotes, o que introduz alguma sobrecarga.

O grande ponto desse método de codificação é o aumento da disponibilidade dos dados, gerando muitos nós replicadores sem causar o aumento massivo de dados pela rede, seguindo os seguintes passos para gerar os resultados.

A configuração é a seguinte, a redundância esperada requer  $n$  nós de armazenamento ativos na rede, cada um deles armazenando  $\alpha$  bits, quando um nó apresenta falha, o novo nó recém-chegado baixa  $\beta$  bits de qualquer nó sobrevivente  $d$ , sendo assim a largura de banda total utilizada na recuperação é  $\gamma = d\beta$ .

- Propriedade de recuperação de dados: um arquivo  $F$  pode ser recuperado usando o conteúdo de qualquer  $k$  dos  $n$  nós.
- Propriedade de reparo: o conteúdo de qualquer nó pode ser recuperado usando o conteúdo de um conjunto auxiliar de qualquer  $d$  outros nós auxiliares, onde cada nó transmite  $\beta$  número de símbolos para o nó de substituição.

### 3. Resultados e Discussões

#### 3.1 Procedimentos

Podemos dividir um arquivo de tamanho  $M$  em  $k$  pedaços, cada um de tamanho  $M/k$ , codificá-los em  $n$  peças codificadas usando um código  $(n, k)$  e armazená-las em  $n$  nós. Então o arquivo original pode ser recuperado de qualquer conjunto de  $k$  partes codificadas.

Sendo positivo em termos de redundância-confiabilidade porque  $k$  peças, cada uma de tamanho  $M/k$ , fornecem o mínimo de dados para recuperar o arquivo, que é de tamanho  $M$ .

$$\alpha^*(d, \gamma) = \begin{cases} \frac{M}{k}, & \gamma \in [f(0), +\infty) \\ \frac{M-g(i)\gamma}{k-i}, & \gamma \in [f(i), f(i-1)), \end{cases}$$

$$f(i) \triangleq \frac{2Md}{(2k-i-1)i + 2k(d-k+1)},$$

$$g(i) \triangleq \frac{(2d-2k+i+1)i}{2d}.$$

$$\gamma_{\min} = f(k-1) = \frac{2Md}{2kd - k^2 + k}.$$

Onde  $f(\cdot)$  é função de armazenamento por nó e  $g(\cdot)$  é função da largura de banda de recuperação por nó.

Os parâmetros  $n, k, d$  devem ser inteiros enquanto, e  $\alpha, \beta, \gamma$  são valores reais.

$\gamma_{\min}$  representa a largura de banda mínima para recuperação dos dados.

### 3.2 Resultados

Apresentado os parâmetros anteriormente é possível a aplicação dos valores abaixo para se obter a largura de banda mínima de reparo, utilizando o *software* MATLAB para elaboração dos gráficos demonstrando a evolução na curva de armazenamento por nó.

Código MATLAB:

Para  $k = 5$  e  $n = 10$ :

```
clear all;
clc;

%%%%%%%%%% curve 1 n=10,k=5 e d=9 %%%%%%%%%%%
n=10;
k=5;
d=9;
K=1;

for i = 1:k

    f_i = @(i) (2*d*K)/((2*k-i-1)*i+2*k*(d-k+1));
```

```
g_i= @(i)((2*d-2*k+i+1)*i)/(2*d);

r2_i=@(i)(K-g_i*f_i)/(k-i);
end

z=0:k-1
h=z(:)

for c=1:k
r1(c)= f_i(z(c))
r2(c)= g_i(z(c))
gamma = fliplr(r1)
r3(c) = (K- r2(c)*r1(c))/(k-z(c))
alpha = fliplr(r3)
end
plot(gamma,alpha, '*')
grid minor;
line(gamma,alpha)

title ('Curva de desempenho k = 5 e n = 10')
xlabel('Largura de banda \gamma')
ylabel('Armazenamento por nó \alpha')
xlim([0.25 0.37])
ylim ([0.19 0.301])
```

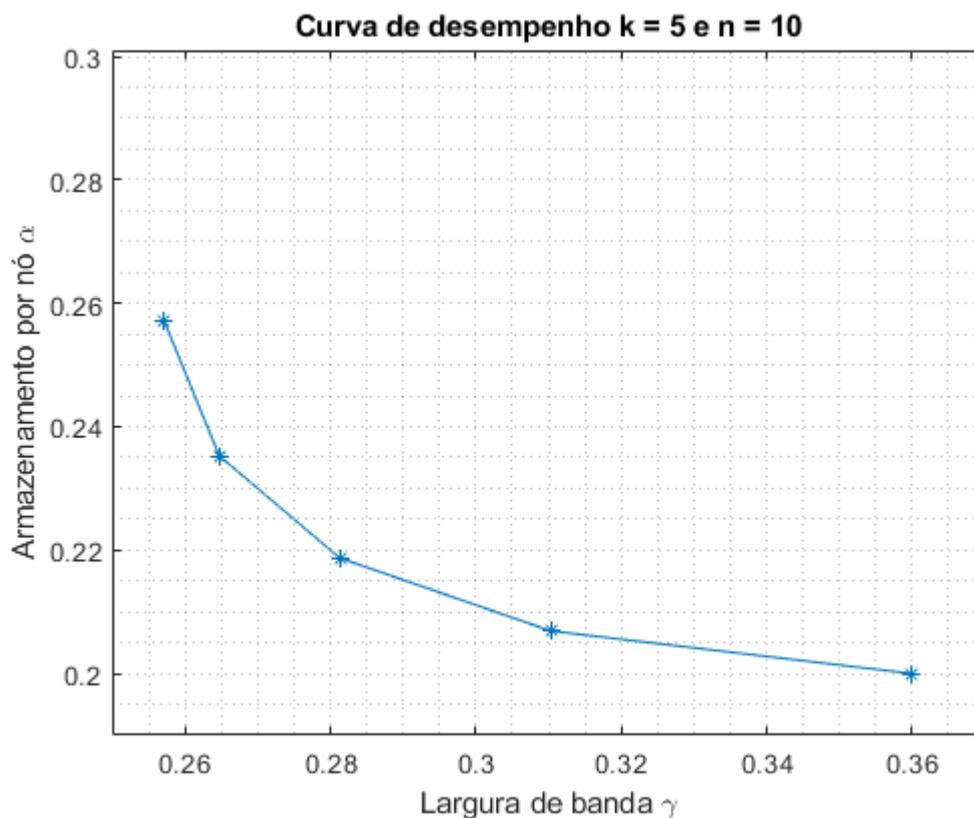


Figura 7 – MSR para o armazenamento mínimo de 0.2 será necessária uma largura de banda relativa de 0.36 para  $k = 5$  e  $n = 10$ .

Para  $k = 10$  e  $n = 15$ :

```
clear all;
clc;

n=15;
k=10;
d=5;
K=1;

for i = 1:k

    f_i = @(i) (2*d*K)/((2*k-i)*i+2*k*(d-k+1));

    g_i= @(i)((2*d-2*k+i+1)*i)/(2*d);

    r2_i=@(i)(K-g_i*f_i)/(k-i);
end
z=0:k-1
```

```

h=z(:)
for c=1:k
r1(c)= f_i(z(c))
r2(c)= g_i(z(c))
gamma = fliplr(r1)
r3(c) = (K- r2(c)*r1(c))/(k-z(c))
alpha = fliplr(r3)
end
plot(gamma,alpha, '*')
grid minor;
line(gamma,alpha)

title ('Curva de desempenho k=10,n=15 e d=5')
xlabel('Largura de banda \gamma')
ylabel('Armazenamento por nó \alpha')
xlim([0.14 0.30])
ylim ([0.0955 0.155])

```

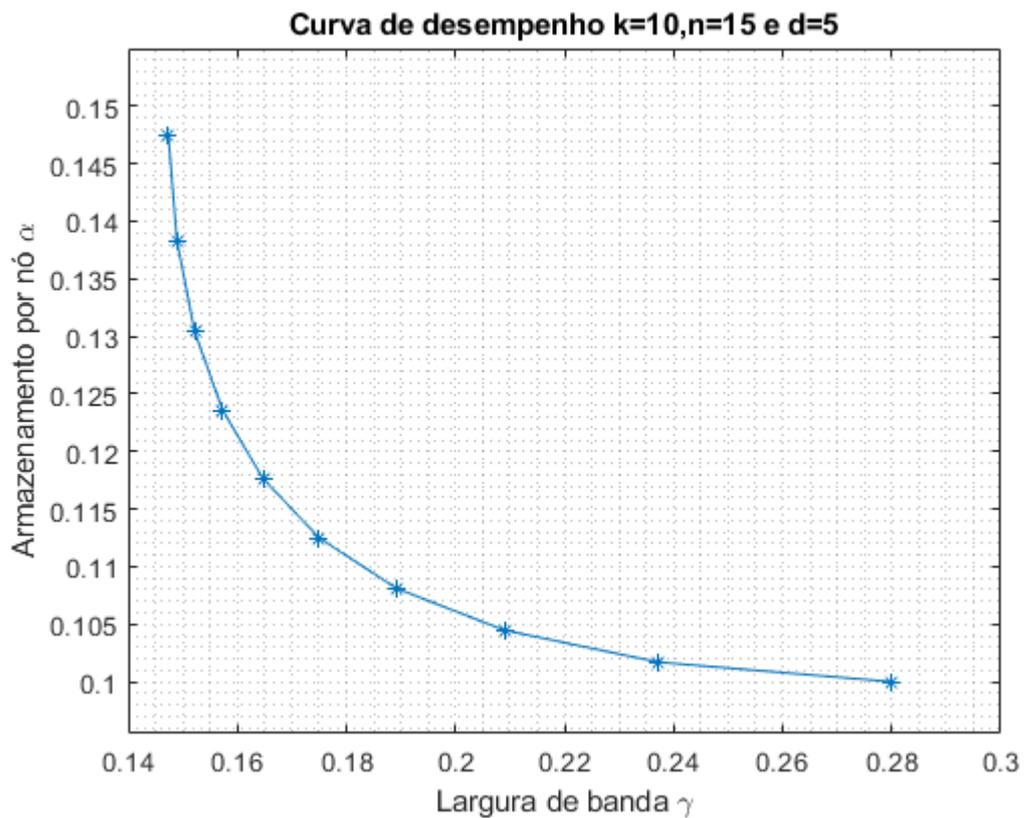


Figura 7 – MSR para o armazenamento mínimo de 0.1 será necessária uma largura de banda relativa de 0.28 para  $k = 5$  e  $n = 10$ .

Curva de troca ideal entre armazenamento e largura de banda de reparo, para  $k = 5$ ,  $n = 10$  e  $k = 10$ ,  $n = 15$ . Para ambos os gráficos  $M = 1$  Mb e  $d = n - 1$ . Conforme o número utilizado nos parâmetros ( $k$ ,  $n$ ,  $d$ ), podemos observar um compromisso entre o armazenamento mínimo  $\alpha$  (MSR) e a largura de banda mínima de reparo  $\gamma$  (MBR).

A escolha de qual define-se como critério dependerá de dois compromissos se o sistema necessita de parâmetros que minimizem a largura de banda mínima (MBR) ou necessidade de armazenamento mínimo (MSR).

#### 4. Considerações finais

Com base na pesquisa realizada para a elaboração do artigo, foi possível perceber o avanço e deslocamento da tecnologia impulsionado pela exigência de maiores taxas de transferência de dados em nosso dia a dia. O que surgiu pensado para troca de mensagens entre instituições acabou chegando para uso comercial e residencial, absorvendo a demanda de tráfego de áudio e vídeo com acesso e compartilhamento entre multiusuários, foi necessário o desenvolvimento de protocolos para que o desempenho conseguisse acompanhar a demanda.

Com isso é apresentado alguns dos principais métodos de roteamento utilizados hoje pelas provedoras de internet, exemplificando seus métodos de tratamento que visam atingir alta taxa de transferência de dados.

É possível concluir com os dados apresentados, que a codificação de rede vem para ser uma tecnologia promissora, podendo ser implantada em grandes provedoras de serviços que estão em nosso dia a dia. Uma aplicação potencial para a regeneração por codificação proposta é em armazenamento de arquivo distribuído ou backup, que pode ser útil para aplicações de *data centers*.

Além disso, essas técnicas de codificação apresentam a vantagem de ser transparente por parte do usuário final, bem como possibilitar o aumento na disponibilidade e confiabilidade de um enlace wireless, entregando ainda mais velocidade sem um significativo aumento de banda de transmissão.

#### Referências

INACIO, JULIANA C. Análise de códigos de rede para sistemas cooperativos multiusuário com topologia de rede em linha. <https://repositorio.ufsc.br>, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/107412/320410.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 25/05/2021.

FAROUZAN, Behrouz A. Comunicação de dados e redes de computadores. 4ª Edição. Porto

Alegre: AMGH ,2010.

Defense Advanced Research Projects Agency. “RFC 791: Darpa Internet Program Protocol Specification”. Setembro 1981

MORGAN, Brian; LOVERING, Neil. CCNP ISCW: Official Exam Certification Guide. Indianapolis, USA: Cisco Press, 2008. 682 p.

PETERSON, L. and DAVIE, B. Computer Networks: A System Approach. 3ª Edição, Morgan Kauffmann, 2003. 306 p.

MONFREDINHO, ANDRE L. MPLS. <http://riut.utfpr.edu.br>, 2011. Disponível em: [http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17254/2/CT\\_GESER\\_1\\_2011\\_06.pdf](http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17254/2/CT_GESER_1_2011_06.pdf). Acesso em: 04/06/2021

SILVA, D. C. C. et al. Estudo da codificação de rede e análise do seu desempenho com fonte de tráfego http. Instituto Nacional de Telecomunicações, 2017.

VALLE, O. T. et al. Codificação de rede na retransmissão oportunista de mensagens em redes de sensores sem fio iee 802.15. 4. 2014.

DIMAKIS, ALEXANDRO G; P BRIGHTEN, GODFREY; WU, YUNNAN; WAINWRIGHT, MARTIN J; RAMCHANDRAN, KANNAN. Network Coding for Distributed Storage Systems. [www.ieeexplore.ieee.org](http://www.ieeexplore.ieee.org) 2010. Acesso em 09/06/2021.

## Agradecimentos