

Impacto do tráfego *background* nas variantes BBR e CUBIC do protocolo TCP

*G. L. H. Rincão W. G. da Cruz D. M. Casas-Velasco
N. L. S. da Fonseca*

Relatório Técnico - IC-PFG-20-36

Projeto Final de Graduação

2021 - Abril

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO

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

Impacto do tráfego *background* nas variantes BBR e CUBIC do protocolo TCP

Guilherme Lima Hernandez Rincão* William Gonçalves Da Cruz†
Daniela M. Casas-Velasco† Nelson L. S. da Fonseca†

Resumo

Algoritmos de controle de congestionamento são uma parte crucial do desempenho do protocolo TCP. Esses algoritmos tem como objetivo evitar o congestionamento pelo controle do tráfego emitido. Foram propostas, no passado, várias soluções diferentes para esse problema, sendo estas analisadas perante abordagens diferentes de metrificacão. Este relatório tem como objetivo avaliar o impacto do tráfego *background* nas duas variantes do TCP conhecidas como BBR e CUBIC e também como elas influenciam o desempenho do outro protocolo quando compete por banda passante. Foram realizados testes de transferência de dados em um enlace gargalo com capacidade de 100Mbps e 300Mbps. As métricas de vazão por conexão e uso do enlace indicaram que não há competição significativa por banda entre os dois protocolos e, na presença de tráfego *background*, o TCP BBR utiliza eficientemente a banda disponível no enlace, enquanto o TCP CUBIC não demonstra eficiência equivalente.

1 Introdução

Algoritmos de controle de congestionamento são responsáveis por adaptar o funcionamento dos emissores de dados frente à diferentes situações de congestionamento da rede. Os algoritmos de congestionamento empregados nas variantes do protocolo TCP são determinantes para o desempenho das conexões de transporte. Nas últimas décadas, múltiplas variações foram propostas, como por exemplo TCP RENO [7] e BIC[8], e elas coexistem na Internet, atualmente. Assim sendo, é importante analisar o funcionamento desses protocolos comparativamente.

O objetivo do presente trabalho é avaliar duas implementações atuais de mecanismos de congestionamento das variantes TCP CUBIC e TCP BBR, frente ao impacto de tráfego *background* na vazão, bem como na utilização do enlace gargalo.

Foram realizados testes de transferência de dados entre servidor e cliente conectados por um enlace gargalo, configurado com capacidade de 100Mbps e 300Mbps. Os testes incluíram TCP RENO e TCP CUBIC isolados e mesclas de porcentagens dos mesmos. Durante a

*Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 13083-852 Campinas, SP.

†Instituto de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 13081-970 Campinas, SP.

execução dos testes, foram coletados dados sobre utilização, vazão e retransmissões no enlace.

Resultados indicaram que o BBR utiliza eficientemente a banda disponível no enlace mesmo frente a presença de tráfego *background*, sendo que o CUBIC não demonstra eficiência equivalente.

2 Variantes Protocolo TCP

2.1 TCP CUBIC

O TCP CUBIC emprega um algoritmo de controle de congestionamento atualmente difundido na Internet. Baseado na resolução de congestionamento por meio da resposta à perda de pacotes, o protocolo TCP CUBIC é uma alternativa moderna aos protocolos do padrão AIMD (*additive-increase / multiplicative-decrease*), como por exemplo, o TCP RENO.

Diferentemente de seus predecessores, CUBIC utiliza uma função cúbica no tempo para o aumento da janela de congestionamento frente aos eventos de perda de pacotes, sendo que diversas outras variantes empregam uma função linear. Além disso, o crescimento da janela ocorre em tempo-real[9]. Essas características diferenciam o CUBIC de outros algoritmos e fazem com que ele responda mais assertivamente a eventual perda de pacotes, sem restringir significativamente o crescimento da janela de congestionamento quando não há perda de pacotes.

O incremento da janela acontece de acordo com a equação 1:

$$cwnd = C(T - K)^3 + w_{max}$$

$$\text{onde } K = \sqrt[3]{\frac{w_{max}(1 - \beta)}{C}} \quad (1)$$

- β : Fator multiplicativo de decrescimento (Valor estipulado de 0.7 pela RFC 8312[5])
- C : Constante (Valor estipulado de 0.4 pela RFC 8312[5])
- w_{max} : Tamanho da janela antes da última redução
- T : Tempo desde a última redução da janela
- $cwnd$: A janela de congestionamento atual

2.2 TCP BBR

O TCP BBR[4] (*Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time*) emprega um algoritmo de congestionamento proposto pela *Google* e divulgado como uma solução *plug-and-play* para aumento de vazão em conexões instáveis[3]. Em vez de responder prioritariamente a perda de pacotes, o algoritmo segue seu próprio conjunto de regras, que inclui não exclusivamente a perda de pacotes, mas também RTT, largura de banda, entre outras medidas. Com base em todos esses parâmetros, calcula-se uma nova medida chamada de

pacing_gain, derivada para definir os valores do intervalo entre envio de pacotes e a janela de congestionamento.

Como consequência de sua abordagem, o protocolo BBR não responde instantaneamente à perda de pacotes, por conta de ser dependente da variação do *pacing_rate*. Desta forma, o funcionamento do BBR controla o número de pacotes em trânsito em vez de diretamente o tamanho da janela, através do *pacing_rate*. Essa abordagem traz benefícios como vazões maiores e justiça ao algoritmo[1].

Além disso, o BBR difere de outros algoritmos por evitar ativamente o congestionamento na rede, por conta de seu controle do número de pacotes em trânsito. Por outro lado, algoritmos como o CUBIC aumentam o número de pacotes em trânsito até que o gargalo seja atingido, o que pode ser um problema quando muitos pacotes acabam enfileirados em *buffers* grandes dos roteadores, também conhecido como *bufferbloat* [2].

Uma máquina de estados é utilizada para variar os parâmetros de controle do BBR. Ela age de forma a maximizar a vazão, minimizar a latência e garantir um compartilhamento justo da banda[6].

3 Experimentos realizados

Foram realizados experimentos com diferentes mesclas de TCP BBR e TCP CUBIC em enlaces gargalo de 100Mbps e 300Mbps, além de testes com os algoritmos de congestionamento isolados.

3.1 Ambiente e cenários

O ambiente utilizado nos experimentos será descrito a seguir.

A topologia utilizada nos cenários foi a topologia *Dumbbell* . Uma topologia que inclui o enlace gargalo entre o emissor e o receptor[14].

O cenário emulado está representada na Figura 1. Os clientes TCP a esquerda geram tráfego com destino a seu par na outra extremidade do enlace gargalo. Há também tráfego UDP *background* no mesmo sentido.

A plataforma utilizada foi a Cloud.IC[10], a nuvem computacional do Instituto De Computação da Unicamp. Foram executados testes em uma *VM* com 8GB de *RAM* , 4 *vCPUs* dedicadas e sistema operacional Linux Ubuntu 18.04.1 *kernel* 4.15.0-38 64 bits.

Foi usado *iPerf3* [11] para a geração de tráfego TCP e UDP, e também *Mininet* [12] para emular a rede. No *Mininet* é possível programar uma topologia e executar código configurável em *Python* [13] nas máquinas virtuais.

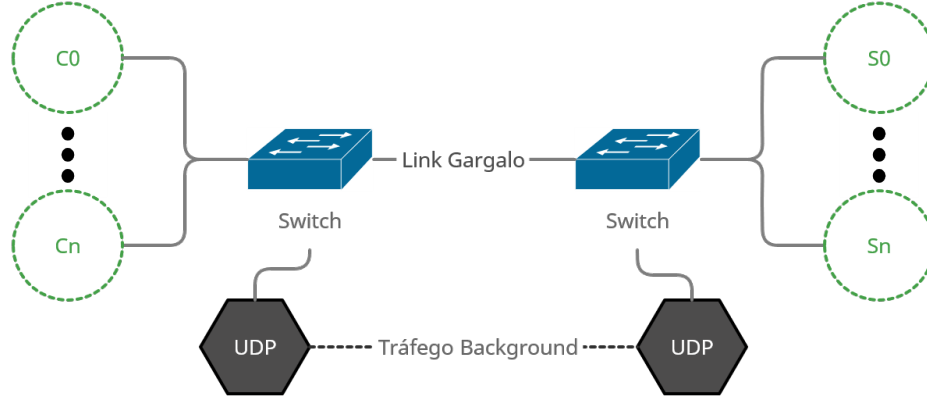


Figura 1: Topologia *Dumbbell*. Os nós verdes representam os clientes e servidores do tráfego TCP. Em preto, está representado o tráfego UDP *background*.

3.2 Parâmetros dos experimentos

Os experimentos realizados empregam os valores dos parâmetros descritos na tabela 1. Todas as possíveis combinações de configurações exibidas na tabela foram exploradas nos experimentos. Para cada configuração, foram realizadas 30 repetições do mesmo experimento, com o intuito de gerar um intervalo de confiança para os valores médios plotados no gráfico.

Os valores de alguns parâmetros foram fixados, como tamanho do *buffer*, *Interflow gap* e RTT, que configuram a comunicação para todas as conexões em todos experimentos. Dentre os parâmetros variáveis, a variação da largura de banda do enlace objetiva avaliar o impacto do tráfego *background* com diferentes disponibilidades de banda. Foram utilizados fluxos pequenos e grandes (*mice* e *elephant*) para criar um cenário mais realista, em que fluxos de diferentes tamanhos, como vídeos, textos, imagens, etc trafegam pelo mesmo enlace.

Os experimentos foram organizados em 5 categorias: testes somente com o protocolo TCP CUBIC; somente com o protocolo TCP BBR; fluxos igualmente distribuídos entre os dois protocolos (50% CUBIC, 50% BBR); majoritariamente BBR (75% BBR, 25% CUBIC); majoritariamente CUBIC (25% BBR, 75% CUBIC). Essa separação foi feita para visualizar a interferência dos algoritmos em diferentes cenários. Por fim, a porcentagem de tráfego UDP também foi variada, o que é importante para medir o impacto da concorrência por banda desses algoritmos, conforme o crescimento do tráfego UDP, que não adota mecanismos de controle de congestionamento, e compõe o tráfego *background*.

3.3 Métricas

As métricas coletadas nos experimentos foram vazão, utilização do enlace e número de retransmissões. A vazão (*throughput*) é definida pela quantidade de bits transmitidos pela conexão durante seu tempo de vida. Nos experimentos, essa métrica é extraída a partir das informações das conexões do *iPerf3*.

A utilização do enlace é definida pela quantidade de bits transmitidos no enlace durante os experimentos. Ela é extraída diretamente da interface de rede de um *switch* do enlace gargalo por meio do comando *ifconfig*. Essa métrica mede todos os bits que atravessam o enlace, enquanto a vazão diz respeito a uma conexão.

O número de retransmissões diz respeito aos segmentos TCP que precisaram ser retransmitidos devido a perda ou corrupção de pacotes. Essa métrica também é extraída a partir dos dados do *iPerf3*.

Largura de banda do enlace gargalo	100, 300 Mbps
Tamanho do <i>buffer</i>	1 BDP
RTT	50ms
<i>Interflow gap</i>	0.1 ms
Fluxos pequenos (<i>mice</i>)	300 KB
Fluxos grandes (<i>elephant</i>)	30 MB
Proporção entre fluxos	20% <i>elephant</i> 80% <i>mice</i>
Tráfego UDP <i>background</i>	10, 20, 30 % do enlace gargalo
Distribuição fluxo TCP CUBIC/BBR	100/0 0/100 25/75 50/50 75/25 % de todo o fluxo

Tabela 1: Configurações para os cenários dos experimentos. Itens em negrito foram variados nos experimentos.

4 Resultados Numéricos

A seguir, são apresentados os resultados obtidos nos experimentos, plotam-se gráficos de utilização e vazão, e tabelas de impacto do tráfego UDP na vazão, separados por banda de enlace e algoritmo de congestionamento.

Para todos os gráficos, plotam-se intervalos de confiança para os pontos da curva, com 90% de nível de confiança. Cada ponto no gráfico representa a média dos resultados de todos os experimentos, então é necessária a visualização da margem de confiança onde se encaixaram os valores exibidos.

Nas tabelas de impacto do tráfego UDP na vazão, são apresentadas as vazões para 5, 10, 15, 20 e 30 conexões, com 10, 20 e 30% de tráfego UDP. A variação com relação à vazão em 10% de tráfego UDP do mesmo algoritmo de congestionamento é especificada, podendo ser positiva ou negativa, indicando o impacto do tráfego *background* na vazão por conexão.

4.1 Enlace gargalo de 100Mbps

4.1.1 TCP CUBIC

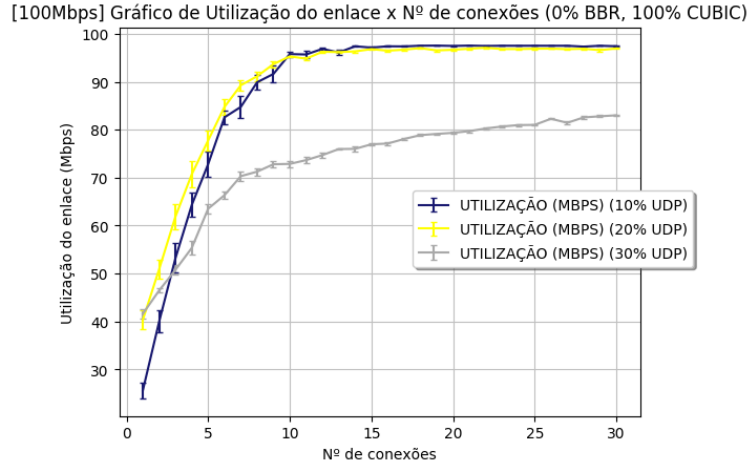


Figura 2: Utilização em função do número de conexões para enlace de 100Mbps e TCP CUBIC.

A Figura 2 mostra que para 10% e 20% de UDP, o enlace chega em 95% de uso com 10 conexões e se estabiliza em 97% após 15 conexões. Para 30% de UDP, a utilização é de 72% para 10 conexões, crescendo levemente de forma linear a partir desse ponto e não há saturação do enlace no intervalo dos testes.

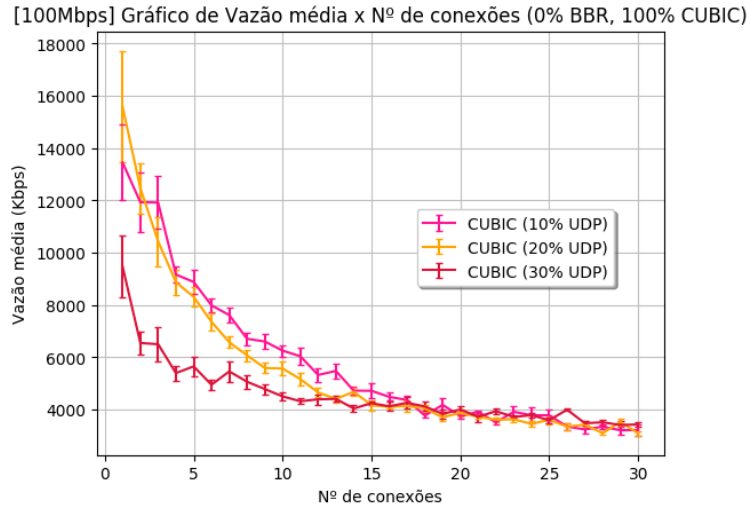


Figura 3: Vazão média em função do número de conexões para enlace de 100Mbps e TCP CUBIC.

Na Figura 3, a vazão para uma conexão no enlace é de 17Mbps para 10% e 20% de tráfego UDP, atingindo 6Mbps para 10 conexões e 3,8Mbps na saturação do enlace. Para 30% de tráfego UDP, a vazão inicial decresce a 9Mbps devido ao tráfego *background*, chegando em 4,2Mbps para 10 conexões e 3,8Mbps na saturação do enlace.

Conexões	Vazão/Variação em 10% UDP	Vazão/Variação em 20% UDP	Vazão/Variação em 30% UDP
5	8868,5 / 0%	8934,1 / +0,7%	6027,7 / -32,0%
10	6125,7 / 0%	5607,3 / -8,5%	4476,1 / -26,9%
15	4719,0 / 0%	4173,8 / -11,6%	4359,7 / -7,6%
20	3749,3 / 0%	3878,4 / +3,4%	4006,4 / +6,9%
30	3218,4 / 0%	3093,4 / -3,9%	3432,9 / +6,7%

Tabela 2: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 100Mbps e TCP CUBIC.

A Tabela 2 mostra maior impacto na vazão para 30% de tráfego UDP para 5 e 10 conexões.

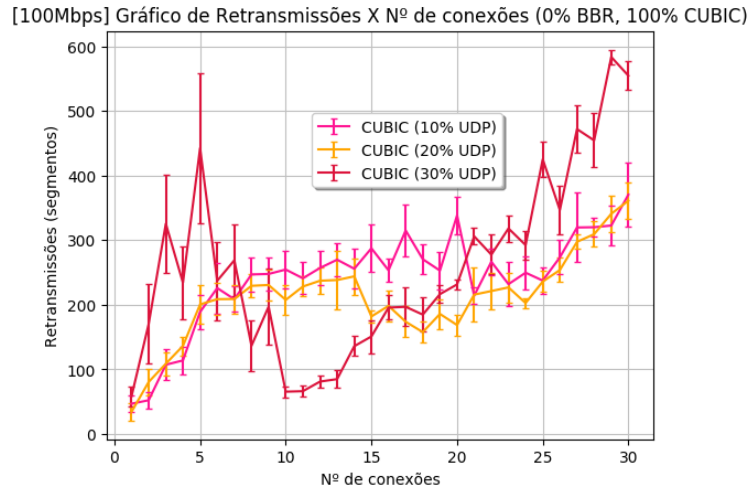


Figura 4: Retransmissões em função do número de conexões para enlace de 100Mbps e TCP CUBIC.

Na Figura 4, o número de retransmissões de segmentos para 10% de tráfego UDP cresce aproximadamente linearmente até 10 conexões, mantém-se próximo a 250 transmissões até 25 conexões e cresce linearmente até 400 retransmissões para 30 conexões.

Para 20% de tráfego UDP, há semelhança com a linha de 10% de tráfego UDP no nos extremos, mas entre 7 e 25 conexões, a maior porcentagem de tráfego UDP tem menor número de retransmissões.

Para 30% de tráfego UDP, há um aumento de 400% do número de retransmissões por conexão quando se tem 5 conexões, seguido de queda até 13 conexões para então uma subida linear, mais acentuada que as outras porcentagens de UDP até 30 conexões.

4.1.2 BBR

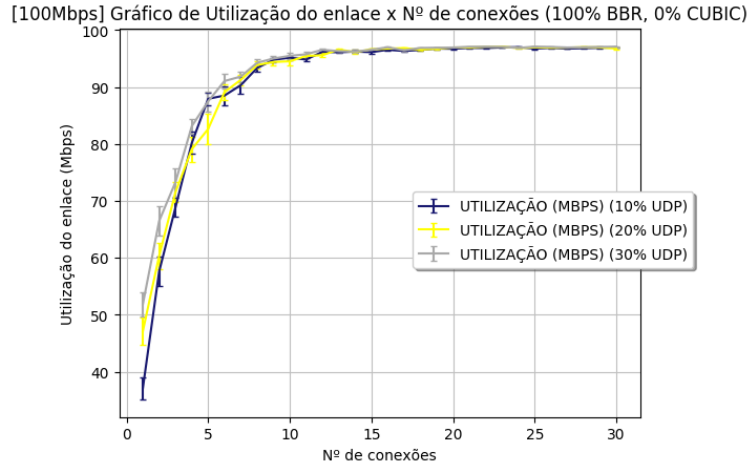


Figura 5: Utilização em função do número de conexões para enlace de 100Mbps e TCP BBR.

Na Figura 5, a utilização para uma conexão no enlace é de 36Mbps para 10% de tráfego UDP e 49Mbps para 20% e 30% de tráfego UDP. Para 10 conexões, a utilização do enlace é semelhante para todas as porcentagens de tráfego *background* testadas: 95,5%, estabilizando em 97% após 15 conexões.

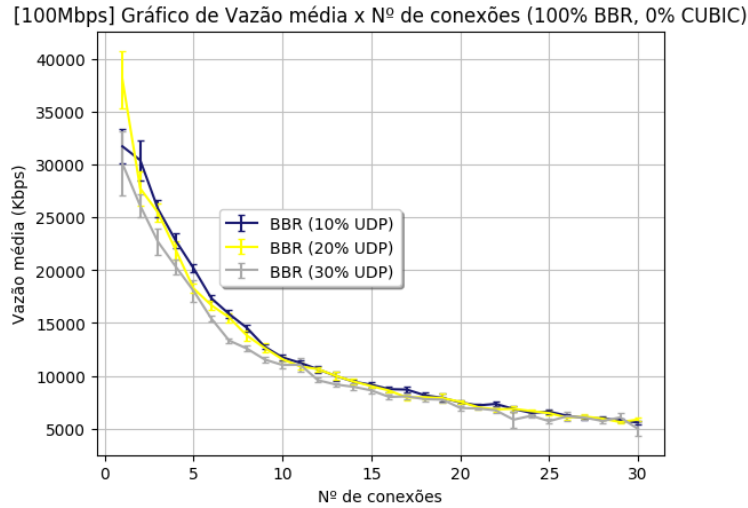


Figura 6: Vazão média em função do número de conexões para enlace de 100Mbps e TCP BBR.

A vazão na Figura 6 também é semelhante para todas as porcentagens de tráfego UDP no enlace, porém entre 2 e 10 conexões, a presença de tráfego *background* acarreta em uma leve queda de vazão por conexão. Ao atingir 95% de utilização do enlace, para 10 conexões, a vazão é de 12Mbps, caindo para 9Mbps para 15 conexões e chegando em 5Mbps para 30 conexões.

Conexões	Vazão/Variação em 10% UDP	Vazão/Variação em 20% UDP	Vazão/Variação em 30% UDP
5	20185,9 / 0%	18270,5 / -9,5%	18041,2 / -10,6%
10	11744,8 / 0%	11577,0 / -1,4%	11026,3 / -6,1%
15	9158,2 / 0%	9027,7 / -1,4%	8624,2 / -5,8%
20	7488,3 / 0%	7551,1 / +0,8%	6961,3 / -7,0%
30	5589,6 / 0%	5868,4 / +5,0%	5597,5 / +0,1%

Tabela 3: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 100Mbps e TCP BBR.

A Tabela 3 mostra uma variação máxima de -10,6% para 5 conexões e 30% de tráfego UDP.

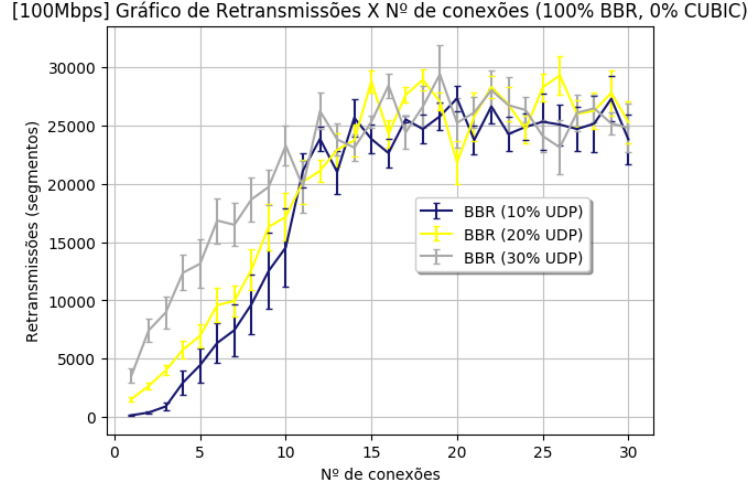


Figura 7: Retransmissões em função do número de conexões para enlace de 100Mbps e TCP BBR.

Na Figura 7, o número de retransmissões cresce linearmente até 20000 retransmissões, ao atingir 95% de utilização do enlace para 10 conexões. A partir de 15 conexões, com o enlace saturado, variam com limitante superior em aproximadamente 30000 retransmissões.

4.1.3 25% TCP BBR, 75% TCP CUBIC

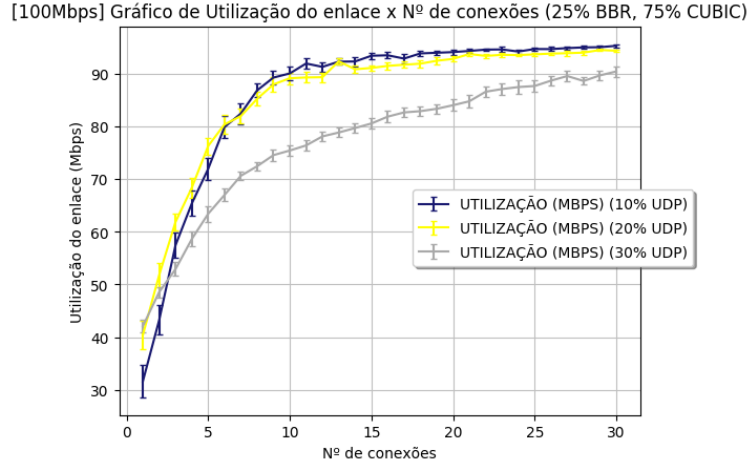


Figura 8: Utilização em função do número de conexões para enlace de 100Mbps e 25% TCP BBR, 75% TCP CUBIC.

Na Figura 8, para as proporções 10 e 20% de tráfego UDP, a utilização alcança 90% para 10 conexões e atinge 95% para 20 conexões. Porém, na variação de 30% UDP seu crescimento é bem mais lento, apenas atingindo a marca de 90% às 25 conexões.

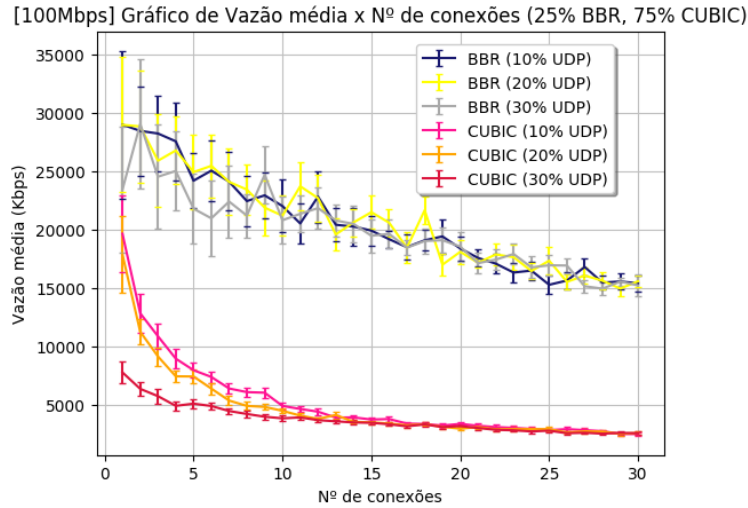


Figura 9: Vazão média em função do número de conexões para enlace de 100Mbps e 25% TCP BBR, 75% TCP CUBIC.

Para o protocolo TCP CUBIC, na Figura 9, há diferenciação na vazão inicial. Para 10 e 20% de tráfego UDP a vazão é de 17,5Mbps, enquanto 30% de tráfego UDP começa

por volta de 7,5Mbps. As curvas do TCP CUBIC estabilizam por volta de 10 conexões em 5Mbps. Já para o TCP BBR, as curvas coincidem, culminando em 15Mbps para 30 conexões.

Conexões	Vazão/Variação em 10% UDP	Vazão/Variação em 20% UDP	Vazão/Variação em 30% UDP
5	7978,6 / 0%	7291,1% / -8,6%	5114,8 / -35,9%
10	4918,3 / 0%	4521,1 / -8,1%	3857,2 / -21,6%
15	3755,8 / 0%	3509,8 / -6,5%	3475,6 / -7,5%
20	3382,2 / 0%	2970,7 / -12,2%	3194,3 / -5,6%
30	2509,9 / 0%	2628,6 / +4,7%	2582,8 / +2,9%

Tabela 4: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 100Mbps e 75% TCP CUBIC.

Conexões	Vazão/Variação em 10% UDP	Vazão/Variação em 20% UDP	Vazão/Variação em 30% UDP
5	24213,4 / 0%	24684,9 / +1,9%	21818,3 / -9,9%
10	22039,4 / 0%	20808,4 / -5,6%	20825,3 / -5,5%
15	19938,3 / 0%	21545,6 / +8,1%	19497,4 / -2,2%
20	18408,1 / 0%	18183,3 / -1,2%	18571,7 / +0,9%
30	15420,3 / 0%	15649,5 / +1,5%	15244,6 / -1,1%

Tabela 5: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 100Mbps e 25% TCP BBR.

Os resultados nas Tabelas 4 e 5, apresentam impacto consistentemente negativo de 5 a 20 conexões para o TCP CUBIC, chegando a -35,9% para 30% de tráfego UDP. Para o TCP BBR, o impacto é menor, limitado a -9,9% em 30% de tráfego UDP para 5 conexões.

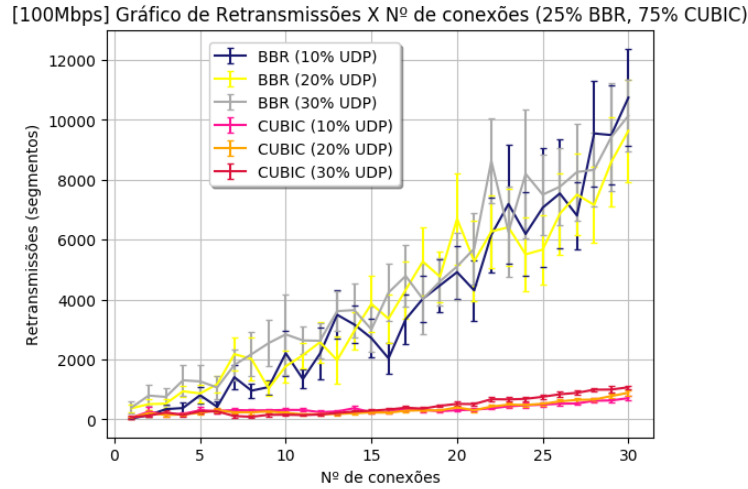


Figura 10: Retransmissões em função do número de conexões para enlace de 100Mbps e 25% TCP BBR, 75% TCP CUBIC.

Na Figura 10, o número de retransmissões do TCP CUBIC cresce linearmente até 600 para 30 conexões. Para o TCP BBR, o crescimento também é linear porém mais acentuado, atingindo 5000 para 20 conexões, até 9000 por volta de 27 conexões.

4.1.4 50% TCP BBR, 50% TCP CUBIC

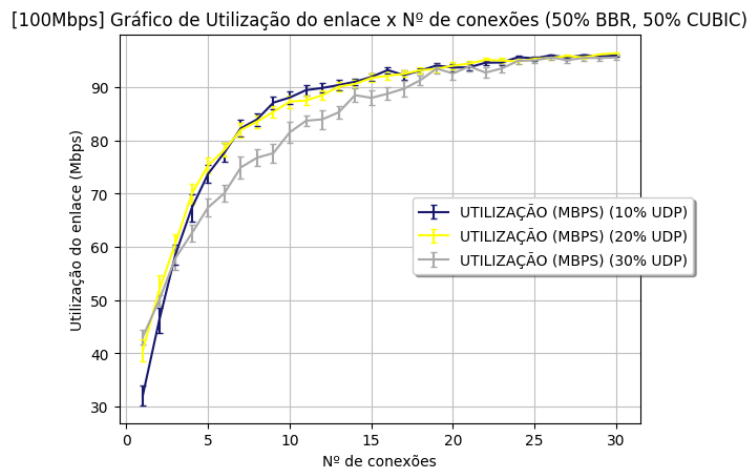


Figura 11: Utilização em função do número de conexões para enlace de 100Mbps e 50% TCP BBR, 50% TCP CUBIC.

Seguindo o padrão da utilização, na Figura 11, as curvas de 10 e 20% de tráfego UDP são similares as anteriores. Contudo, a utilização para 30% de tráfego UDP consegue atingir

90% por volta de 17 conexões, e chega a 95% para 25 conexões.

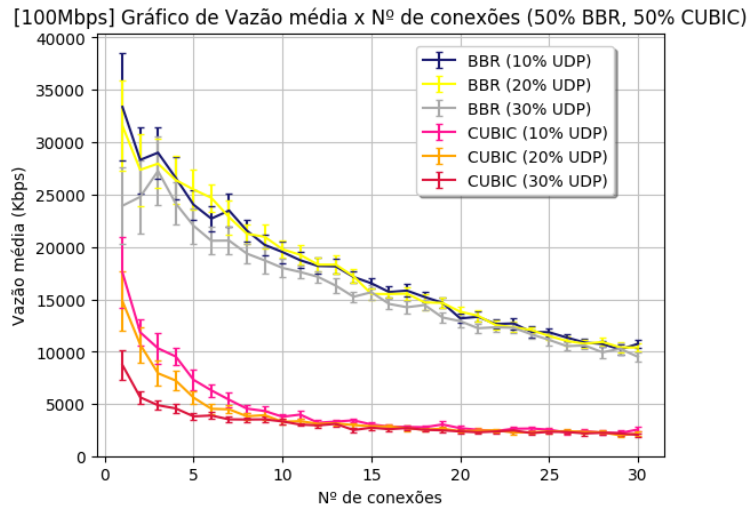


Figura 12: Vazão média em função do número de conexões para o enlace de 100Mbps e 50% TCP BBR, 50% TCP CUBIC.

Na Figura 12, para o TCP CUBIC, não há grandes variações em relação ao gráfico de vazão, enquanto que para o TCP BBR, é perceptível um decréscimo considerável da vazão por volta dos 25Mbps para 5 conexões, 15Mbps para 15 conexões, finalizando em 10Mbps para 30 conexões.

Conexões	Vazão/Variação em 10% UDP	Vazão/Variação em 20% UDP	Vazão/Variação em 30% UDP
5	7313,2 / 0%	5615,7 / -23,2%	3823,7 / -47,7%
10	3787,0 / 0%	3303,9 / -12,8%	3337,7 / -11,9%
15	3049,6 / 0%	2878,8 / -5,6%	2743,5 / -10,0%
20	2693,5 / 0%	2405,6 / -10,7%	2383,8 / -11,5%
30	2571,1 / 0%	2188,2 / -14,9%	2061,7 / -19,8%

Tabela 6: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 100Mbps e 50% TCP CUBIC.

Conexões	Vazão/Variação em 10% UDP	Vazão/Variação em 20% UDP	Vazão/Variação em 30% UDP
5	24035,5 / 0%	25487,9 / +6,0%	22024,8 / -8,4%
10	19514,8 / 0%	19780,2 / +1,4%	17998,8 / -7,8%
15	16530,7 / 0%	15517,1 / -6,1%	15675,2 / -5,2%
20	13175,8 / 0%	13816,1 / +4,9%	12913,8 / -2,0%
30	10749,4 / 0%	10392,3 / -3,3%	9499,1 / -11,6%

Tabela 7: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 100Mbps e 50% TCP BBR.

Nas Tabelas 6 e 7, o TCP CUBIC apresenta novamente impacto negativo constante do aumento do tráfego *background* na vazão por conexão, chegando a -47,7% para 30% de tráfego UDP para 5 conexões. No TCP BBR, o impacto para 20% de tráfego UDP é pequeno, e constantemente negativo para 30% de tráfego UDP, com maior variação, de -11,6%, para 30 conexões e 30% de tráfego UDP.

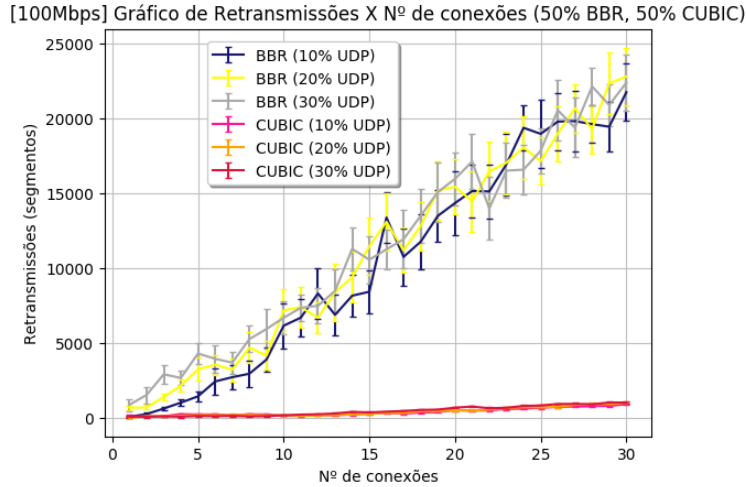


Figura 13: Retransmissões em função do número de conexões para enlace de 100Mbps e 50% TCP BBR, 50% TCP CUBIC.

Pela Figura 13, nessa variação do experimento não há grandes alterações nos resultados em relação ao anterior, as curvas mantêm-se lineares.

4.1.5 75% TCP BBR, 25% TCP CUBIC

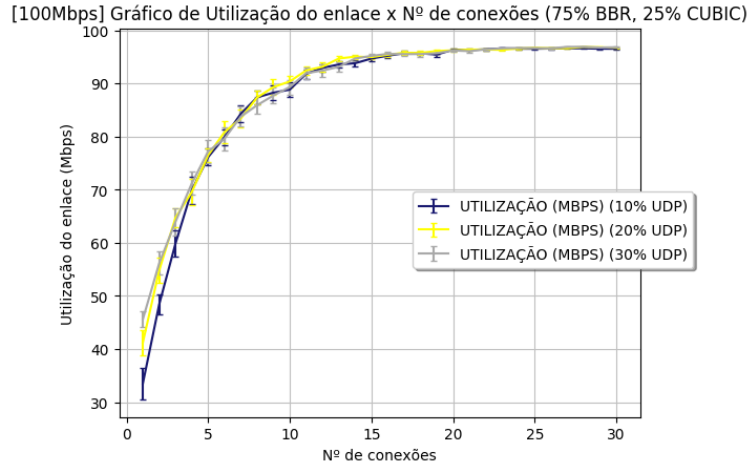


Figura 14: Utilização em função do número de conexões para enlace de 100Mbps e 75% TCP BBR, 25% TCP CUBIC.

Na Figura 14, a utilização de todas as curvas, independentemente do fluxo UDP em *background*, atinge 90% para 10 conexões e 95% às 20 conexões.

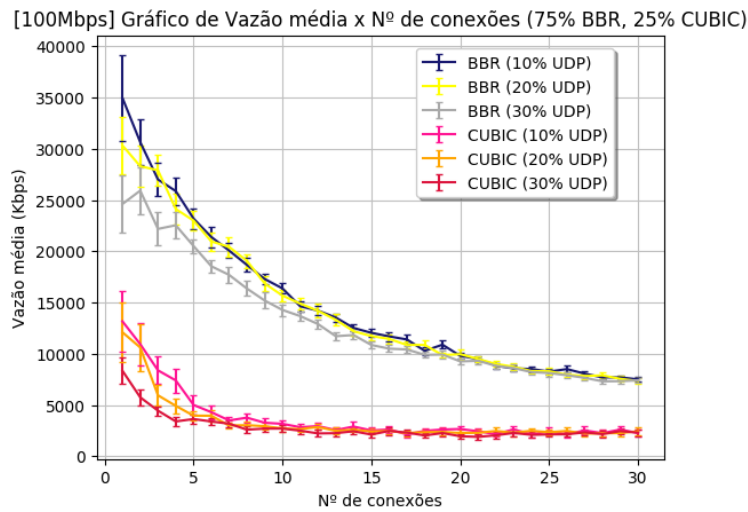


Figura 15: Vazão média em função do número de conexões para enlace de 100Mbps e 75% TCP BBR, 25% TCP CUBIC.

Na Figura 15, a vazão para o TCP BBR inicia por volta de 25Mbps para 30% de tráfego UDP, 30Mbps para 20% e 35Mbps para 10%, decrescendo até coincidirem para 18 conexões e finalizando em 7,5Mbps para 30 conexões.

Para o TCP CUBIC, a vazão inicial para 30% de tráfego UDP é de 8Mbps e para 20 e 10% é de 14Mbps. As curvas coincidem para 9 conexões e mantêm vazão de 2,5Mbps até 30 conexões.

Conexões	Vazão/Varição em 10% UDP	Vazão/Varição em 20% UDP	Vazão/Varição em 30% UDP
5	5002,3 / 0%	3953,8 / -21,0%	3624,9 / -27,5%
10	3159,8 / 0%	2713,3 / -14,1%	2697,2 / -14,6%
15	2514,2 / 0%	2408,3 / -4,2%	2111,8 / -16,0%
20	2653,7 / 0%	2264,7 / -14,7%	1947,4 / -26,6%
30	2259,4 / 0%	2430,4 / +7,6%	2303,0 / +1,9%

Tabela 8: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 100Mbps e 25% TCP CUBIC.

Conexões	Vazão/Varição em 10% UDP	Vazão/Varição em 20% UDP	Vazão/Varição em 30% UDP
5	23182,7 / 0%	22986,6 / -0,8%	20506,7 / -11,5%
10	16372,7 / 0%	15670,2 / -4,3%	14269,2 / -12,8%
15	12036,8 / 0%	11716,1 / -2,7%	10854,4 / -9,8%
20	9789,8 / 0%	9955,2 / +1,7%	9249,3 / -5,5%
30	7498,0 / 0%	7341,2 / -2,1%	7410,0 / -1,2%

Tabela 9: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 100Mbps e 75% TCP BBR.

Das Tabelas 8 e 9, novamente observa-se maior impacto do tráfego *background* no TCP CUBIC, chegando a -27,5% para 30% de tráfego UDP para 5 conexões. O TCP BBR tem menor impacto, com uma queda máxima de -12,8% para 30% de tráfego UDP para 10 conexões.

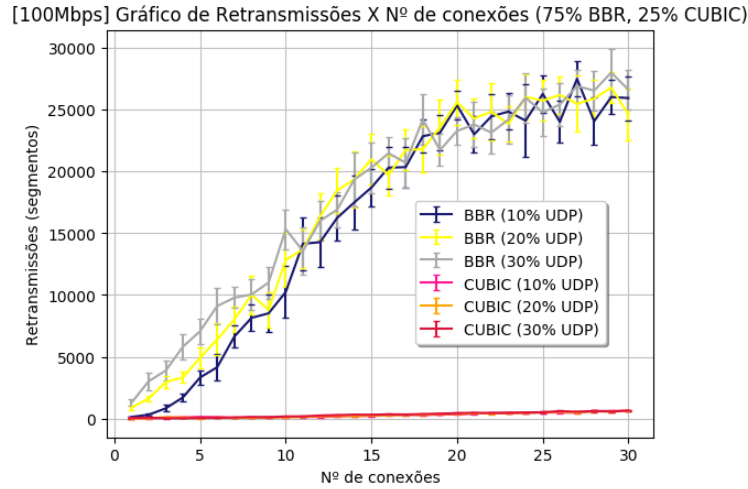


Figura 16: Retransmissões em função do número de conexões para enlace de 100Mbps e 75% TCP BBR, 75% TCP CUBIC.

Observa-se na Figura 16 que o número de retransmissões para os algoritmos cresce linearmente, tendo o TCP CUBIC menos de 1000 retransmissões de segmentos e o TCP BBR atingindo 27000 retransmissões para 30 conexões.

4.2 Enlace gargalo de 300Mbps

4.2.1 TCP CUBIC

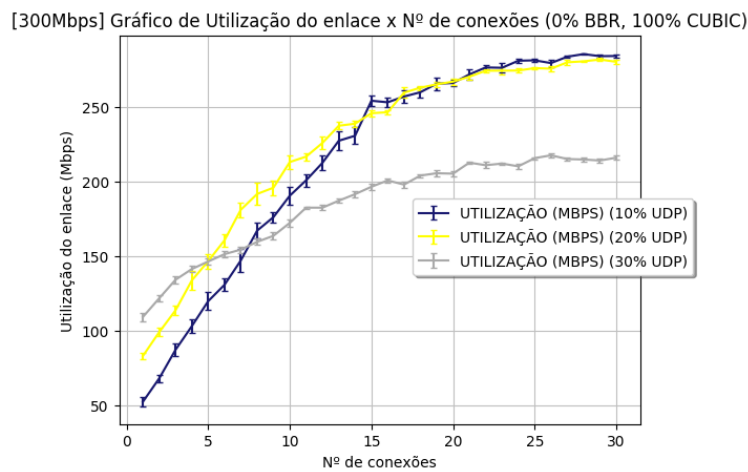


Figura 17: Utilização em função do número de conexões para enlace de 300Mbps e TCP CUBIC.

Na Figura 17, para o enlace gargalo de 300Mbps, o TCP CUBIC apresenta, semelhantemente ao enlace de 100Mbps, crescimento de utilização parecido para 10% e 20% de tráfego UDP, e um crescimento menor para 30% de tráfego UDP.

Para 10% e 20% de tráfego UDP, o enlace chega a 95% de utilização para 20 conexões e 97% de uso para 28 conexões. Com 30% de tráfego UDP, a utilização do enlace para 21 conexões é de 68,3% e para 38 conexões é de 73%.

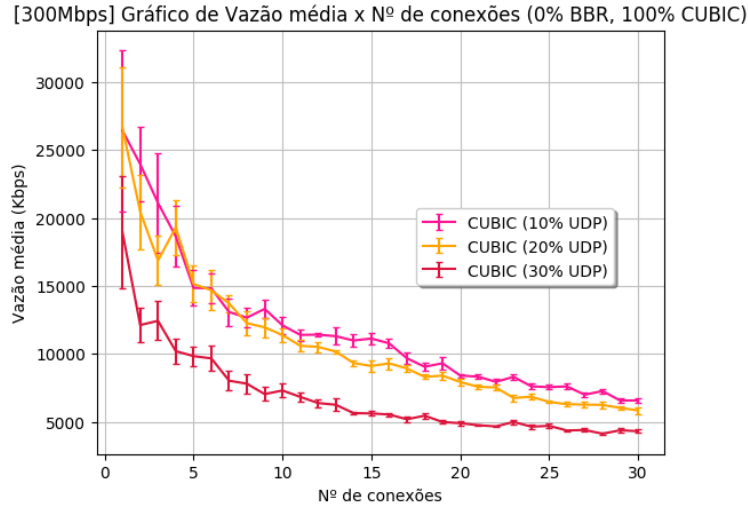


Figura 18: Vazão média em função do número de conexões para enlace de 300Mbps e TCP CUBIC.

Na Figura 18, a vazão para 10 conexões é de 13Mbps para 10% de tráfego UDP, 11Mbps para 20% de tráfego UDP e 7Mbps para 30% de tráfego UDP.

Com 95% de uso do enlace, para 21 conexões, a vazão é de 8,5Mbps para 10% de tráfego UDP, 8Mbps para 20% de tráfego UDP e 5Mbps para 30% de tráfego UDP.

Conexões	Vazão/Variação em 10% UDP	Vazão/Variação em 20% UDP	Vazão/Variação em 30% UDP
5	14573,2 / 0%	14939,5 / +2,5%	11758,5 / -19,3%
10	12853,8 / 0%	11232,7 / -12,6%	7116,6 / -44,6%
15	11126,0 / 0%	9105,3 / -18,2%	5764,8 / -48,2%
20	8401,4 / 0%	8687,8 / +3,4%	4896,1 / -41,7%
30	6571,1 / 0%	5835,0 / -11,2%	4304,2 / -34,5%

Tabela 10: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 300Mbps e TCP CUBIC.

Na Tabela 10, o impacto na vazão aproxima-se de -40% de 10 a 30 conexões com 30% de tráfego UDP.

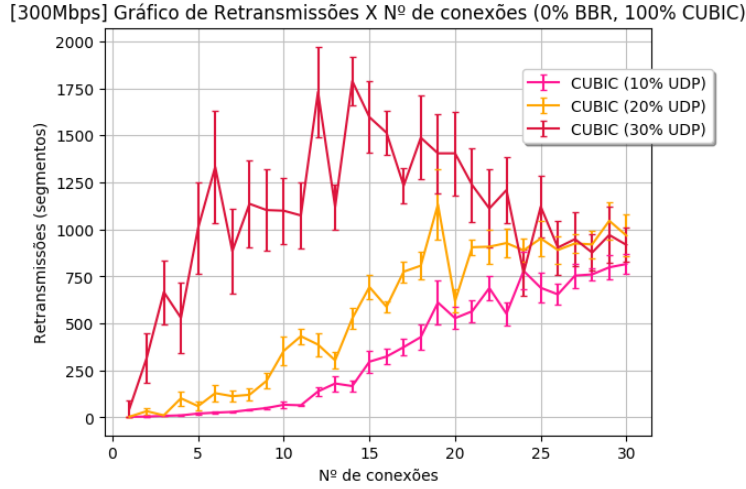


Figura 19: Retransmissões em função do número de conexões para enlace de 300Mbps e TCP CUBIC.

Na Figura 19, para 10% e 20% de tráfego UDP, o número de retransmissões aumenta linearmente a partir de 8 conexões chegando a 1000 retransmissões. Para 30% de tráfego UDP, há um aumento mais brusco até 2000 retransmissões para 8 conexões, diminuindo até 1000 para 30 conexões.

4.2.2 TCP BBR

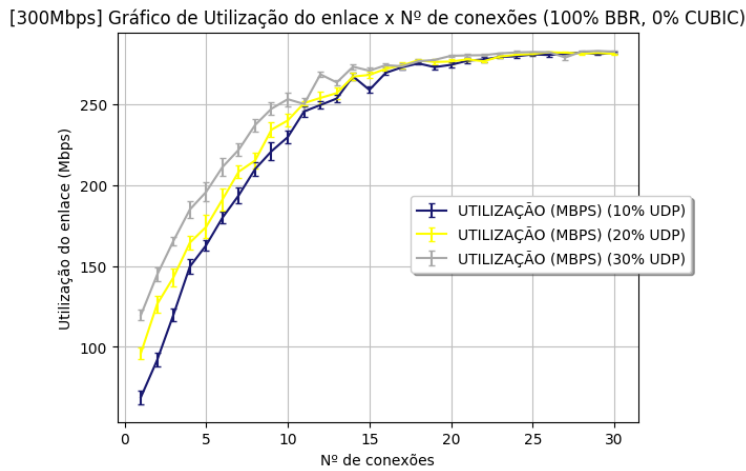


Figura 20: Utilização em função do número de conexões para enlace de 300Mbps e TCP BBR.

Na Figura 20, o TCP BBR no enlace gargalo de 300Mbps apresenta crescimento da utilização do enlace semelhante para todas as porcentagens de tráfego UDP, diferenciados

por uma constante até a saturação do enlace. Para 20 conexões o enlace tem 95% de utilização.

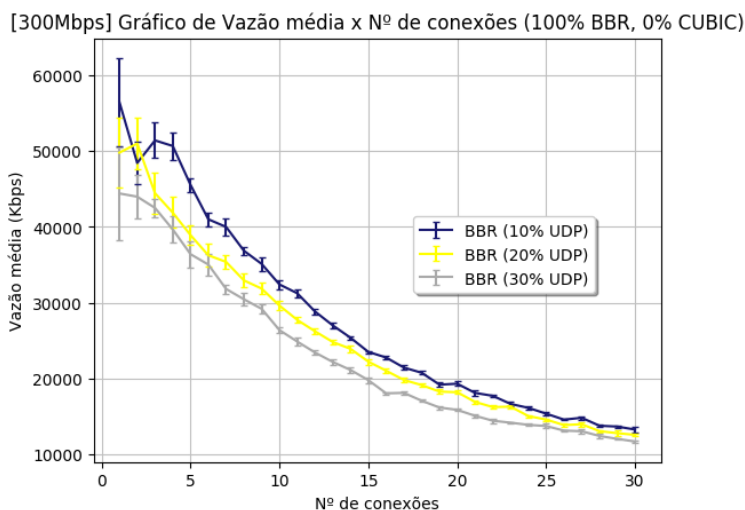


Figura 21: Vazão média em função do número de conexões para enlace de 300Mbps e TCP BBR.

Na Figura 21, a vazão para 20 conexões é de 19Mbps para 10% e 20% de tráfego UDP. Para 30% de tráfego UDP a vazão é de 16Mbps. Até 30 conexões a vazão decresce para aproximadamente 12Mbps.

Conexões	Vazão/Variação em 10% UDP	Vazão/Variação em 20% UDP	Vazão/Variação em 30% UDP
5	48225,3 / 0%	36980,4 / -23,3%	35628,8 / -26,1%
10	31835,5 / 0%	30111,3 / -5,4%	26382,9 / -17,1%
15	23754,7 / 0%	22242,5 / -6,4%	19800,1 / -16,6%
20	19333,5 / 0%	18209,2 / -5,8%	15887,3 / -17,8%
30	13294,2 / 0%	13288,0 / 0,0%	11714,8 / -11,9%

Tabela 11: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 300Mbps e TCP BBR.

Na Tabela 11, o impacto é maior se comparado com a Tabela 3, do enlace de 100Mbps, chegando a -26,1% para 30% de tráfego UDP para 5 conexões.

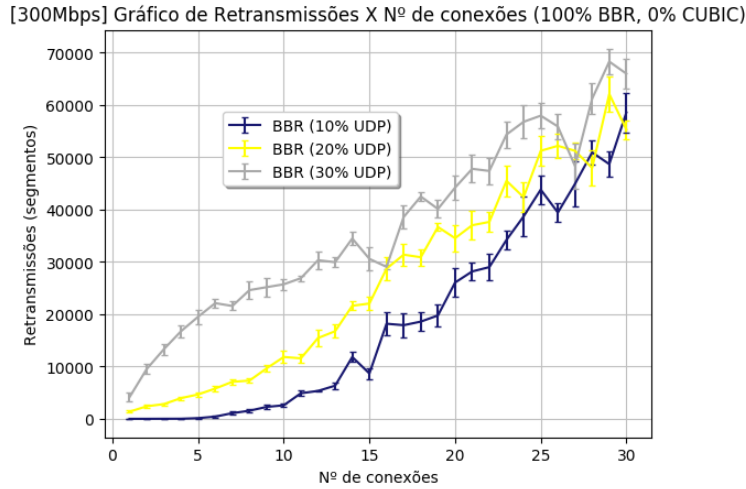


Figura 22: Retransmissões em função do número de conexões para enlace de 300Mbps e TCP BBR.

Na Figura 22, para 10% de tráfego *background*, não há retransmissões entre 1 e 6 conexões. A partir de 13 conexões, há um crescimento linear até 60000 segmentos retransmitidos. Para 20% e 30% de tráfego UDP, há um crescimento linear das retransmissões em todo o intervalo de testes, chegando a 70000 retransmissões.

4.2.3 25% TCP BBR, 75% TCP CUBIC

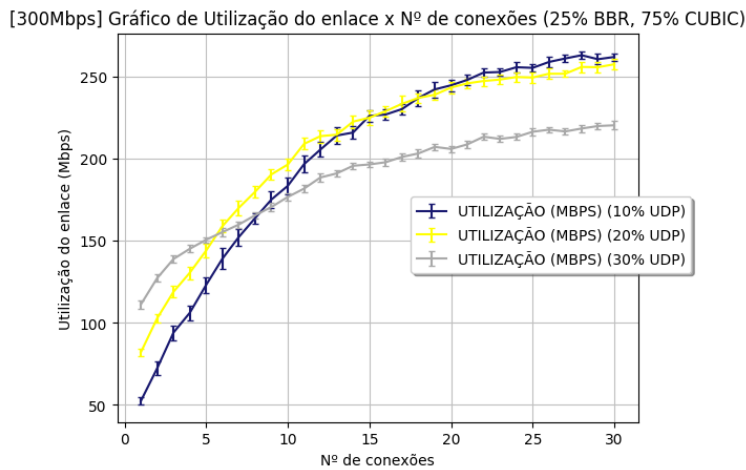


Figura 23: Utilização em função do número de conexões para enlace de 300Mbps e 25% TCP BBR, 75% TCP CUBIC.

Na Figura 23, as curvas de 10 e 20% de tráfego UDP *background* têm valores de 80% de utilização para 25 conexões, e não crescem muito além dessa marca. Para 30% de tráfego UDP, o crescimento é menor, chegando a 75% para 30 conexões, seu maior valor atingido.

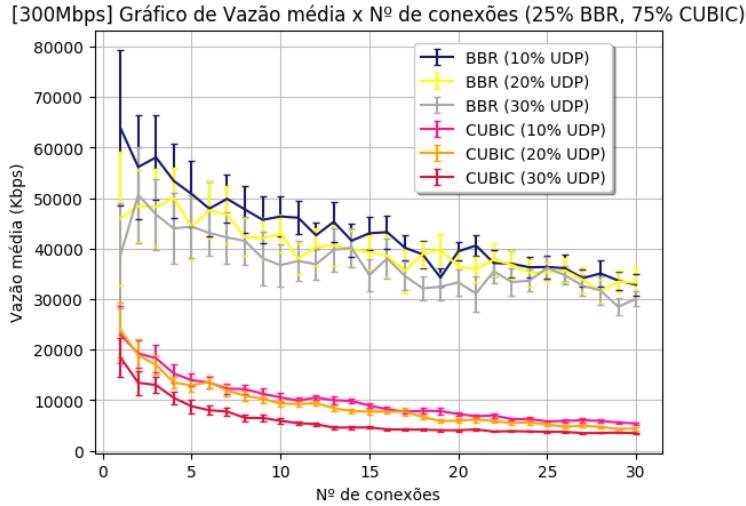


Figura 24: Vazão média em função do número de conexões para enlace de 300Mbps e 25% TCP BBR, 75% TCP CUBIC.

A vazão média do TCP CUBIC, na Figura 24, segue a mesma lógica para as curvas de 10 e 20% de tráfego UDP, começando por volta 20Mbps para uma conexão, passando por 10Mbps para 15 conexões, calhando em 50Mbps para 30 conexões. No caso de 30% de tráfego UDP, o formato da curva é similar, porém com valores pouco menores, por exemplo, 5Mbps para 15 conexões. Para o TCP BBR, seus valores absolutos são maiores, e o decrescimento da curva também é mais acentuado. Para 5 conexões, a vazão está por volta de 50Mbps, para 15 são 40Mbps, calhando em 30Mbps para 30 conexões.

Conexões	Vazão/Variação em 10% UDP	Vazão/Variação em 20% UDP	Vazão/Variação em 30% UDP
5	13961,5 / 0%	12910,2 / -7,5%	8797,2 / -37,0%
10	10544,8 / 0%	9330,1 / -11,5%	5914,3 / -43,9%
15	8931,1 / 0%	7743,0 / -13,3%	4606,6 / -48,4%
20	7266,3 / 0%	5938,8 / -18,3%	4040,3 / -44,4%
30	5404,0 / 0%	4379,4 / -19,0%	3471,8 / -35,8%

Tabela 12: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 300Mbps e 75% TCP CUBIC.

Conexões	Vazão/Variação em 10% UDP	Vazão/Variação em 20% UDP	Vazão/Variação em 30% UDP
5	50814,5 / 0%	44304,6 / -12,8%	44364,1 / -12,7%
10	46348,0 / 0%	42995,3 / -7,2%	36717,3 / -20,8%
15	43021,6 / 0%	39277,8 / -8,7%	34762,8 / -19,2%
20	39458,9 / 0%	36423,4 / -7,7%	33303,0 / -15,6%
30	32857,0 / 0%	33217,5 / +1,1%	30047,8 / -8,5%

Tabela 13: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 300Mbps e 25% TCP BBR.

Nas Tabelas 12 e 13, o impacto no TCP CUBIC é negativo para todos os casos, chegando a -48,4% para 15 conexões e 30% de tráfego UDP. Para o TCP BBR, o impacto é menor, chegando a -20,8% para 10 conexões e 30% de tráfego UDP.

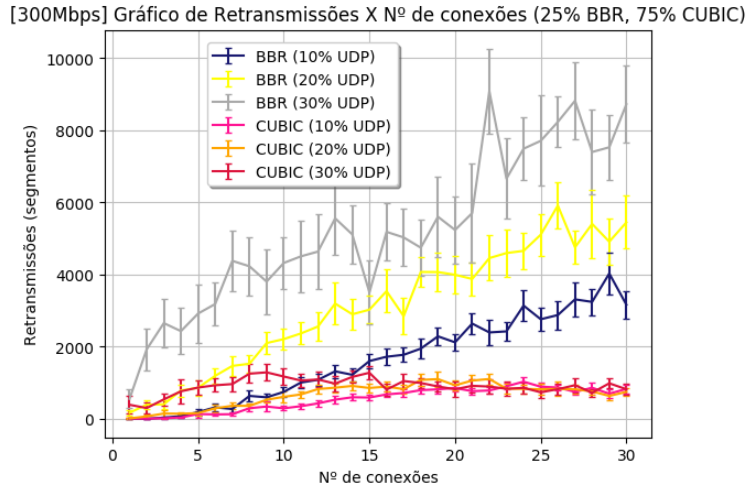


Figura 25: Retransmissões em função do número de conexões para enlace de 300Mbps e 25% TCP BBR, 75% TCP CUBIC.

Na Figura 25, as retransmissões no TCP CUBIC são semelhantes por volta de 1000 em 15 conexões e mantendo esse valor adiante na curva. Por outro lado, o TCP BBR tem grandes diferenças de valores com diferentes tráfegos UDP, porém mantém o formato da curva entre todos eles. Por exemplo, pra 10 conexões, 10% está em 100, 20% está em 2000 e 30% está em 4000 retransmissões.

4.2.4 50% TCP BBR, 50% TCP CUBIC

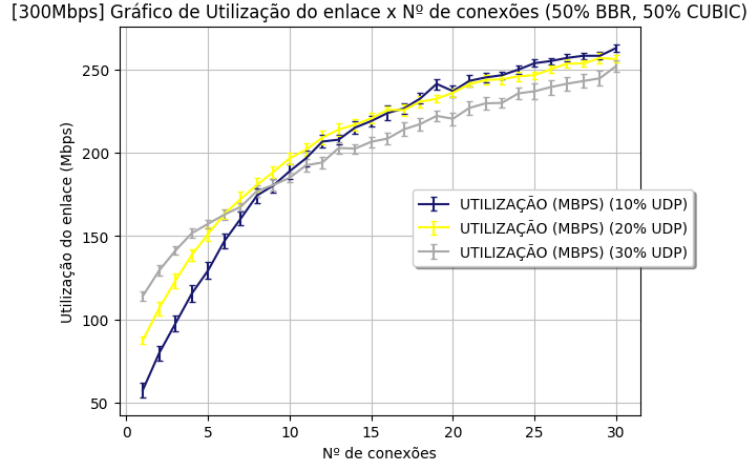


Figura 26: Utilização em função do número de conexões para enlace de 300Mbps e 50% TCP BBR, 50% TCP CUBIC.

Na Figura 26, as curvas de utilização mantêm seu formato, porém o crescimento da utilização para 30% de tráfego UDP é maior, atingindo 80% de utilização para 30 conexões.

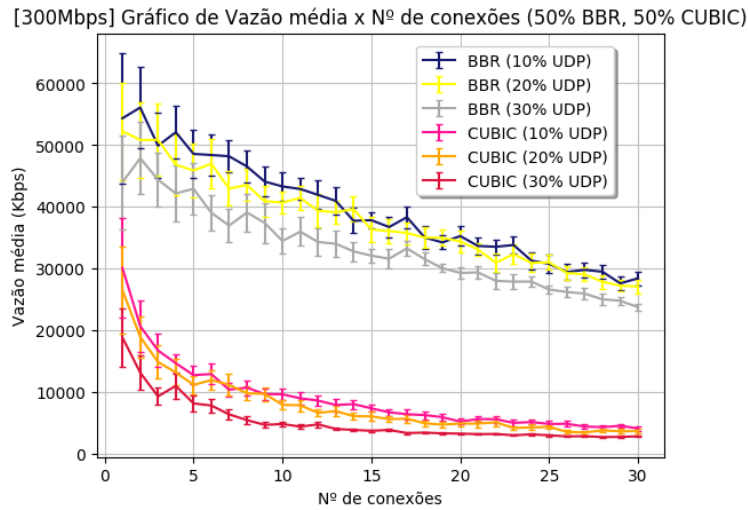


Figura 27: Vazão média em função do número de conexões para enlace de 300Mbps e 50% TCP BBR, 50% TCP CUBIC.

Na Figura 27, o formato das curvas se mantém para os dois algoritmos, apenas com o TCP BBR tendo diferenças nos valores absolutos da vazão, chegando a cair até 25Mbps para 30 conexões.

Conexões	Vazão/Varição em 10% UDP	Vazão/Varição em 20% UDP	Vazão/Varição em 30% UDP
5	12728,7 / 0%	11143,0 / -12,5%	8140,4 / -36,0%
10	9624,6 / 0%	7911,9 / -17,8%	4810,9 / -50,0%
15	7346,1 / 0%	6049,9 / -17,6%	3702,7 / -49,6%
20	5193,3 / 0%	4873,8 / -6,2%	3249,0 / -37,4%
30	4089,0 / 0%	3658,4 / -10,5%	2806,2 / -31,4%

Tabela 14: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 300Mbps e 50% TCP CUBIC.

Conexões	Vazão/Varição em 10% UDP	Vazão/Varição em 20% UDP	Vazão/Varição em 30% UDP
5	48577,7 / 0%	45891,6 / -5,5%	42922,1 / -11,6%
10	43306,2 / 0%	40699,9 / -6,0%	34467,4 / -20,4%
15	37832,7 / 0%	36322,0 / -4,0%	32087,5 / -15,2%
20	35266,7 / 0%	34397,0 / -2,5%	29297,0 / -16,9%
30	28423,5 / 0%	27084,7 / -4,7%	23729,0 / -16,5%

Tabela 15: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 300Mbps e 50% TCP BBR.

Nas Tabelas 14 e 15, o impacto é constantemente negativo para ambos os algoritmos de congestionamento, com o TCP CUBIC sendo mais afetado que o TCP BBR em todos os pontos.

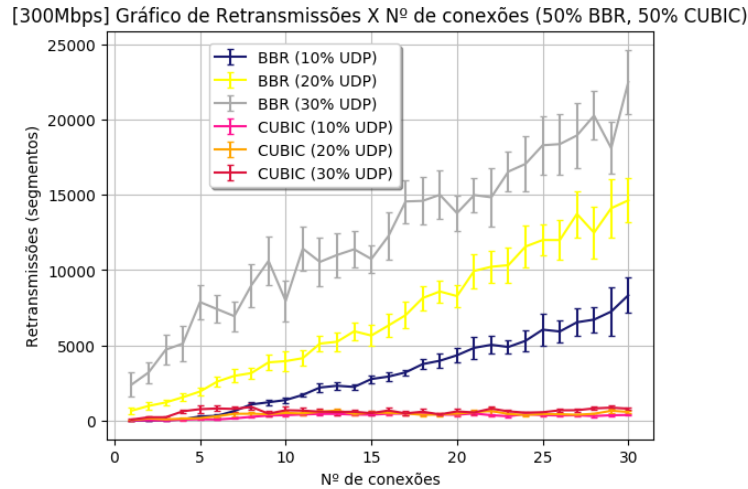


Figura 28: Retransmissões em função do número de conexões para enlace de 300Mbps e 50% TCP BBR, 50% TCP CUBIC.

Na Figura 28, o TCP CUBIC mantém por volta de 500 retransmissões para todas as conexões. O TCP BBR, apesar das curvas separadas, também mantém formato linear, com

maior taxa de crescimento para maiores porcentagens de tráfego UDP.

4.2.5 75% TCP BBR, 25% TCP CUBIC

[300Mbps] Gráfico de Utilização do enlace x N° de conexões (75% BBR, 25% CUBIC)

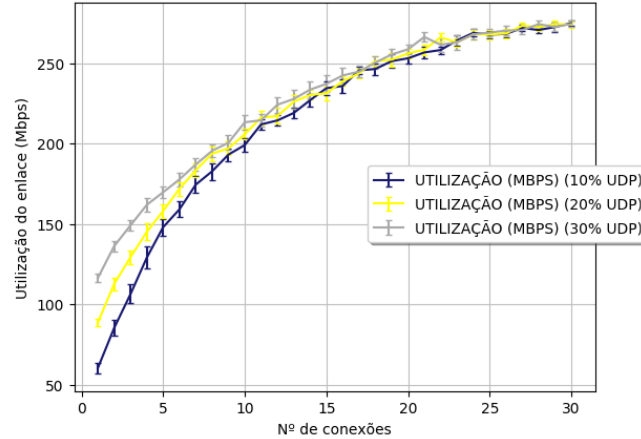


Figura 29: Utilização em função do número de conexões para enlace de 300Mbps e 75% TCP BBR, 25% TCP CUBIC.

Na Figura 29, as utilizações são equiparáveis, alcançando a marca de 90% de utilização do enlace para 25 conexões em todas as curvas.

[300Mbps] Gráfico de Vazão média x N° de conexões (75% BBR, 25% CUBIC)

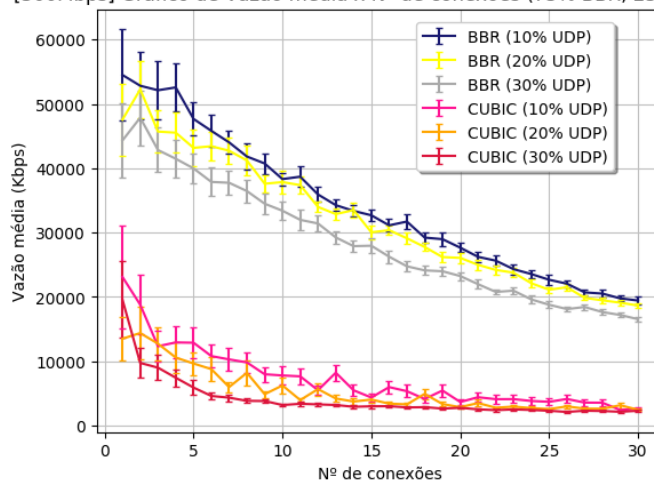


Figura 30: Vazão média em função do número de conexões para enlace de 300Mbps e 75% TCP BBR, 25% TCP CUBIC.

Na Figura 30, novamente na vazão do TCP CUBIC é observável a manutenção dos valores entre as curvas, com estas convergindo para seu estado de 5Mbps para 10 conexões para 30% de tráfego UDP, e 4Mbps para 30 conexões em todas as porcentagens de tráfego *background*. Para o TCP BBR, também é vista uma queda de vazão conforme as conexões, estando por volta de 45Mbps para 5 conexões, passando por 30Mbps para 15 conexões, culminando em 20Mbps para 30 conexões.

Conexões	Vazão/Variação em 10% UDP	Vazão/Variação em 20% UDP	Vazão/Variação em 30% UDP
5	12887,7 / 0%	9656,4 / -25,1%	5920,8 / -54,1%
10	7800,6 / 0%	6309,6 / -19,1%	3206,2 / -58,9%
15	4370,6 / 0%	3736,6 / -14,5%	3009,6 / -31,1%
20	3677,2 / 0%	2901,6 / -21,1%	2774,6 / -24,5%
30	2664,2 / 0%	2459,6 / -7,7%	2315,1 / -13,1%

Tabela 16: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 300Mbps e 25% TCP CUBIC.

Conexões	Vazão/Variação em 10% UDP	Vazão/Variação em 20% UDP	Vazão/Variação em 30% UDP
5	47664,5 / 0%	43111,8 / -9,6%	39977,7 / -16,1%
10	38317,1 / 0%	37772,0 / -1,4%	33400,5 / -12,8%
15	32688,7 / 0%	29925,5 / -8,5%	27960,3 / -14,5%
20	27658,0 / 0%	26207,7 / -5,2%	23248,8 / -15,9%
30	19445,6 / 0%	18701,6 / -3,8%	16541,8 / -14,9%

Tabela 17: Impacto do tráfego UDP na vazão para enlace de 300Mbps e 75% TCP BBR.

Nas Tabelas 16 e 17, o impacto é totalmente negativo e maior para o TCP CUBIC, chegando a -58,9% para 10 conexões e 30% de tráfego UDP, o maior impacto observado nos experimentos.

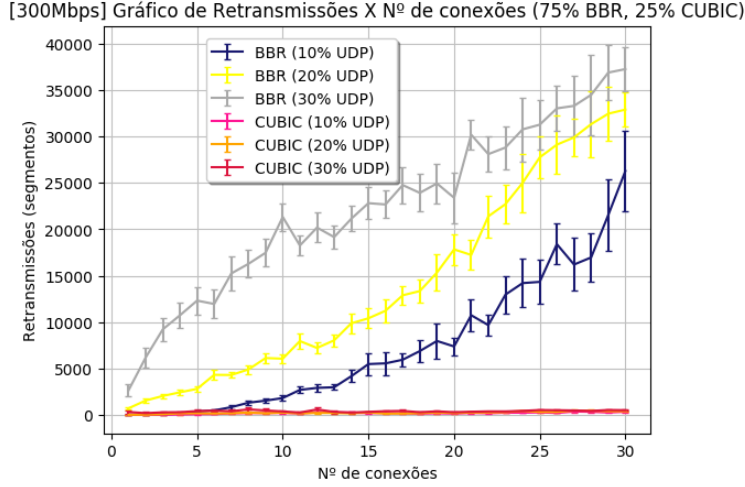


Figura 31: Retransmissões em função do número de conexões para enlace de 300Mbps e 75% TCP BBR, 75% TCP CUBIC.

Na Figura 31, conforme os outros dois cenários em que os algoritmos estão juntos, a quantidade de retransmissões se mantém similar em todos os cenários comparáveis desse experimento.

4.3 Resultados

Primeiramente, é observável o impacto dos diferentes algoritmos referentes a utilização do enlace nos experimentos. Em cenários onde o BBR é mais utilizado, pode-se observar também o rápido crescimento em utilização com o crescente número de conexões. Nas figuras 14 e 8, pode-se ver essa clara relação, ambos a 100Mbps, porém com diferentes porcentagens de BBR, no primeiro a utilização de 95% do enlace chega por volta de 15 conexões, enquanto no segundo acontece por volta de 20 conexões. Essa relação também transparece nos gráficos com apenas um algoritmo atuando (Figuras 2 e 5), com o BBR usando 10% a mais do enlace que o CUBIC em 5 conexões.

Pode-se observar os resultados dos gráficos de vazão para os diferentes cenários. Em todos eles, pode-se observar algumas tendências universais. A primeira delas é de que as curvas são decrescentes, inferindo a diminuição da vazão média com o aumento do número de conexões concorrentes. A segunda é que as curvas de um mesmo algoritmo convergem para valores próximos no enlace saturado, na marca de 30 conexões.

Além disso, pode-se interpretar os resultados na visão da comparação entre algoritmos. Para todas as curvas, pode-se observar uma maior vazão média para o BBR em relação ao CUBIC, mesmo em cenários onde o algoritmo da *Google* possui uma fatia menor de conexões. No entanto, essa relação não parece ser desfavorável ao CUBIC em termos de

justiça, pois mesmos nos gráficos com apenas um algoritmo, CUBIC e BBR mantiveram seus valores de vazão em seus gráficos independentes.

Note na Figura 3 que a vazão no enlace 100% CUBIC varia de 15Mbps até 3Mbps, e seguindo para os testes com 50% BBR, 50% CUBIC e 75% BBR, 25% CUBIC, nas Figuras 15 e 12, vemos o CUBIC também variando entre os mesmos valores.

Destaca-se, também, o comportamento observado nas retransmissões, e consequentemente nas perdas no enlace. Com o CUBIC, na Figura 19, nota-se o crescimento das retransmissões com 30% de UDP até 10 conexões, para então haver uma diminuição até um alinhamento com as outras porcentagens. Devido a esse comportamento, nota-se na Figura 17 o enlace sendo subutilizado. Em contraste, analisando o BBR no mesmo cenário, nota-se em 30 conexões um número 600% maior de retransmissões na Figura 22, porém um enlace saturado na Figura 20.

As tabelas de impacto do tráfego UDP na vazão mostram degradações aproximadamente 10% maiores nas conexões CUBIC com relação as conexões BBR. Como exemplo, vide as tabelas 6 e 7.

5 Trabalhos Relacionados

- *When to use and when not to use BBR: An empirical analysis and evaluation study*[15]

Nesse estudo, é evidenciado que a justiça entre BBR e CUBIC é altamente dependente do tamanho do *buffer*. *Buffers* pequenos resultam em maior vazão para o BBR e *buffers* grandes resultam em maior vazão para o CUBIC. Para os enlaces que testamos, em que o BDP é de 625KB para o enlace de 100Mbps e 1,88MB para o enlace de 300Mbps, devemos notar favorecimento ao BBR, como constatado nos resultados.

- *Impact of TCP BBR on CUBIC Traffic: A Mixed Workload Evaluation*[16]

Aqui vemos que o BBR é excepcional em manter consistente seu uso do enlace para diferentes bandas, porém quando alinhado ao CUBIC, existem configurações que fazem que o *startup* agressivo do BBR prejudique a vazão do CUBIC.

6 Conclusões

Os resultados obtidos indicam que o tráfego *background* tem maior impacto na vazão do CUBIC, com o BBR se mostrando robusto em manter a vazão e uso do enlace.

Também nota-se que o BBR consegue saturar o enlace mesmo na presença de perda de pacotes, enquanto o CUBIC reduz sua vazão afim de diminuir as retransmissões. E não houve competição significativa por banda entre os protocolos em cenários em que ambos

coexistem. No entanto, como visto em estudos relacionados[15], a vazão do BBR se destacou devido ao tamanho do *buffer* utilizado.

Referências

- [1] Aggarwal, A., Savage, S., and Anderson, "T. Understanding the performance of tcp pacing". In Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No. 00CH37064) (2000), vol. 3, IEEE, pp. 1157–1165.
- [2] Gettys, J. "Bufferbloat: Dark buffers in the internet. IEEE Internet Computing", 3 (2011), 96.
- [3] Google Cloud Platform at YouTube. "Faster Networking with TCP BBR (Cloud Performance Atlas)". <https://www.youtube.com/watch?v=PkWleEfaGAU>. Accessed: 2021-01-18.
- [4] N. Cardwell et al., "BBR: Congestion-based congestion control," Queue, vol. 14, no. 5, pp. 50:20–50:53, Oct. 2016.
- [5] Internet Engineering Task Force (IETF). "RFC 8312 - CUBIC for Fast Long-Distance Networks". <https://tools.ietf.org/html/rfc8312>. Accessed: 2021-01-16.
- [6] Internet Engineering Task Force (IETF). "BBR Congestion Control draft-cardwell-iccr-g-bbr-congestion-control-00". <https://tools.ietf.org/id/draft-cardwell-iccr-g-bbr-congestion-control-00.html#rfc.section.3>. Accessed: 2021-04-03.
- [7] Fall, K., and Floyd, "S. Simulation-based comparisons of tahoe, reno and sack tcp". ACM SIGCOMM Computer Communication Review 26, 3 (1996), 5–21.
- [8] Y. T. Li and D. J. Leith, "BicTCP implementation in Linux kernels," Hamilton Inst., Nat. Univ. of Ireland, Maynooth, Kildare, Ireland, Tech. Rep., 2004 [Online]. Available at www.hamilton.ie/net/Lin-uxBicTCP.pdf
- [9] Sangtae Ha; Injong Rhee; Lisong Xu (July 2008). "CUBIC: A New TCP-Friendly High-Speed TCP Variant" (PDF). ACM SIGOPS Operating Systems Review. 42 (5): 64–74. doi:10.1145/1400097.1400105. S2CID 9391153. Archived from the original (PDF) on July 26, 2015. Retrieved September 29, 2015.
- [10] Instituto de Computação da UNICAMP, "Cloud.IC", <https://cloud.ic.unicamp.br/>. Accessed: 2021-01-15.
- [11] S. Srivastava and S. Anmulwar and A. M. Sapkal and T. Batra and A. K. Gupta and V. Kumar, "Comparative study of various traffic generator tools," Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS), pp. 1–6, March 2014.

- [12] De Oliveira, Rogério Leão Santos and Schweitzer, Christiane Marie and Shinoda, Ailton Akira and Prete, Ligia Rodrigues, "Using mininet for emulation and prototyping software-defined networks". In *Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, pp. 1–6, 2010.
- [13] Python Software Foundation. "Python Language Reference, version 3.6.9". <http://www.python.org/>. Accessed: 2021-01-15.
- [14] Sally Floyd e Eddie Kohler. "Internet research needs better models". In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, volume 33, pages 29–34, New York, NY, USA, January 2003. ACM Press.
- [15] Cao, Yi & Jain, Arpit & Sharma, Kriti & Balasubramanian, Aruna & Gandhi, Anshul. (2019). When to use and when not to use BBR: An empirical analysis and evaluation study. *IMC '19: Proceedings of the Internet Measurement Conference*. 130-136. 10.1145/3355369.3355579.
- [16] P. Hurtig et al., "Impact of TCP BBR on CUBIC Traffic: A Mixed Workload Evaluation," 2018 30th International Teletraffic Congress (ITC 30), Vienna, 2018, pp. 218-226, doi: 10.1109/ITC30.2018.00040.