

ANÁLISE DE UM MODELO DE CLUSTERIZAÇÃO PARA MINIMIZAÇÃO DE INTERFERÊNCIA ENTRE FEMTOCÉLULAS CO-CANAIS: UMA ABORDAGEM BASEADA EM SIMULAÇÃO

Welton Vasconcelos Araújo

Universidade Federal do Pará
Rua Augusto Corrêa,, 1 - Guamá, Belém - PA, 66075-110
weltonmax007@gmail.com

Marcelino Silva da Silva

Universidade Federal do Pará
Rua Augusto Corrêa,, 1 - Guamá, Belém - PA, 66075-110
marcelino@ufpa.br

Carlos Renato Lisboa Francês

Universidade Federal do Pará
Rua Augusto Corrêa,, 1 - Guamá, Belém - PA, 66075-110
rfrances@ufpa.br

Diego Lisboa Cardoso

Universidade Federal do Pará
Rua Augusto Corrêa, 1 - Guamá, Belém - PA, 66075-110
dlisboacardoso@gmail.com

RESUMO

O uso de femtocélulas como alternativa para melhoria no sinal de conexão tem sido um grande aliado no âmbito das telecomunicações, contudo com sua proliferação, o estudo da interferência gerada entre elas e seu impacto nos tráfegos, principalmente em grandes redes, é condição *sine qua non* para a ampliação dos serviços. A clusterização das femtocélulas e sua divisão em canais adjacentes tem sido apontado como a solução mais adequada para minimização destas adversidades, todavia poucos testes foram realizados para validação desta abordagem e principalmente, focando no comportamento das aplicações. Neste sentido, foram implementadas simulações no MATLAB e OPNET com o intuito de avaliar, através de um estudo de sensibilidade, o comportamento deste algoritmo. Os resultados obtidos demonstram melhoria no Signal to interference plus noise ratio (SINR), de até 20dB, e parâmetros básicos de QoS. Demonstrando o impacto positivo trazido pelo algoritmo.

PALAVRAS CHAVE. Clusterização, Femtocélula, Simulação.

ABSTRACT

The use of femtocells as an alternative to mitigate the load on the cellular mobile networks has been a great ally in the telecommunications field, yet with their proliferation, the analysis of the interference generated between them and their impact on traffic, especially in large networks is condition *sine qua non* for the expansion of the services of such networks. The femtocells clustering and its division into adjacent channels has been touted as the best solution to minimize these adversities, but few tests were performed to validate this approach and the analysis of the applications behavior has been neglected. In this way, simulations were implemented in MATLAB and OPNET in order to assess through a sensitivity study the behavior of this algorithm. The results showed improvement in Signal to interference plus noise ratio (SINR) of up to 20dB, and basic parameters of QoS. Demonstrating the positive impact brought by the algorithm.

KEYWORDS. Clustering, Femtocell, Simulation.

1. Introdução

Motivada, principalmente, pela necessidade dos usuários finais, cada vez mais ávidos por novos serviços, a comunidade técnico-científica investiu massivamente no desenvolvimento de novas tecnologias, as quais fizeram com que as redes móveis evoluíssem de forma espantosa nos últimos anos. Assim, com a implantação das redes 4G, foi possível aumentar a capacidade de usuários conectados e de chamadas simultâneas em uma determinada área de cobertura, além de melhorar a qualidade do serviço para o usuário.

No Brasil, dados divulgados pela ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) indicam que o país registrou, em Janeiro de 2015, 281,7 milhões de linhas ativas na telefonia móvel, com uma densidade de 138,3 cel./100hab. A banda larga móvel totalizou 103,11 milhões de acessos, dos quais 1,31 milhões são terminais 4G (ANATEL, 2014a).

Mesmo com tantos avanços, existem locais em que o sinal de comunicação é fraco, não satisfazendo o usuário final e trazendo problemas nas comunicações por voz e, principalmente, nas por dados. Uma alternativa vem ganhando força no mundo inteiro na resolução deste problema, o uso de femtocélulas. Essa solução faz uso de dispositivos que são pequenos rádios que atuam como estações bases das redes móveis. Suas principais vantagens são: o baixo custo de implementação, boa qualidade de sinal para ligações por voz e alta taxa de transmissão de dados.

Tais componentes são considerados individuais ou para poucos membros, sendo necessário que existam pelo menos um deles em casa residência, apartamento ou escritório. Nesse contexto, é possível imaginar locais em que existirão várias miniestações base, causando interferência umas nas outras, ocasionando uma considerável queda na qualidade de comunicação.

Assim, tornou-se necessário encontrar soluções para os seguintes questionamentos: o que se pode fazer para controlar essa interferência? Como a rede se comporta com a realização de mudanças focadas na melhoria da interferência? Existem experimentos com resultados concretos depois da realização de tais mudanças?

Diversos trabalhos na literatura buscaram responder, em partes, estes questionamentos. Dentre os estudados, vale destacar o trabalho de (Yu, 2009) e (Li, 2010). O primeiro busca reorganizar o espectro de frequência em que uma parte servirá apenas para macrocélulas e a outra parte será dividida entre femtocélulas e macrocélulas. Já o segundo tem como base um algoritmo de clusterização, distribuindo as femtocélulas em grupos que possuirão, cada um, uma sub-banda única.

Assim, este trabalho visa ampliar os estudos realizados por (Li, 2010), o qual vem sendo amplamente utilizado na literatura. Esse trabalho tem o foco de recriar o algoritmo disponibilizado no trabalho de Li e a partir daí realizar cenários mais amplos e, através da utilização de uma ferramenta de simulação de redes, mostrar o comportamento da rede e das aplicações dos usuários como um todo, focando no benefício que o algoritmo consegue trazer.

2. Interferência entre Femtocélulas

É notória a grande evolução que ocorreu nas redes móveis, fato este que foi auxiliado pela evolução dos *smartphones* e outros dispositivos móveis. Com a criação de aparelhos mais sofisticados, tanto em processamento quanto em armazenamento, a demanda por maiores velocidades na internet móvel tornou-se recorrente.

Um estudo detalhado com usuários do Reino Unido mostrou que 19% de proprietários de celulares encontram problemas de cobertura em casa. Desses, 53% se queixam de pobre cobertura dentro de casa, em que tal problema ocorre em alguns cômodos. (Saunders, 2009). Isso ocorre por dois motivos principais. O primeiro é a área de cobertura não alcançar tais locais e o segundo é acontecer o aparecimento dos chamados pontos cegos (locais inseridos na área de cobertura, mas que não possuem sinal satisfatório por existir diversos obstáculos impedindo a passagem das ondas que carregam o sinal de transmissão). Exemplos desses pontos são túneis, elevadores, estacionamentos e áreas subterrâneas em que geralmente se perde a conexão com a operadora.

Dada a necessidade de boa conexão móvel em locais fechados, criou-se a ideia de femtocélula, que segundo (Chandrasekhar, 2008), são pequenas estações base utilizadas em

tecnologias celulares de 3ª e 4ª geração (3G e 4G) com a mesma funcionalidade que as macro-estações, porém as mesmas possuem potência para atenderem somente um ambiente restrito (50 metros), suportam uma pequena quantidade de usuários e, geralmente, são instaladas pelos próprios usuários para uma melhor recepção de voz e dados em ambientes fechados. Esta tecnologia reduz o problema de cobertura em ambientes fechados e possui outras vantagens como baixo custo e alta eficiência energética.

Com a popularização das femtocélulas, existe uma grande preocupação em relação a interferência gerada por elas, que pode acontecer em cenários onde existam vários desses dispositivos operando, compartilhando a mesma banda e tendo cruzamento de sinal por estarem próximos uns dos outros. Os dois tipos de interferências básicas em sistemas de comunicação são a interferência co-canal e de canal adjacente. A diferença entre esses dois tipos está relacionada com quais sub-bandas os dispositivos, que estão se interferindo, estão alocados. Basicamente, se a interferência acontece em uma mesma sub-banda, é denominada de co-canal. Caso sejam sub-bandas próximas, é chamada de canal adjacente.

O reuso de frequência implica em que, em uma dada área de cobertura, existam algumas células que utilizam um mesmo conjunto de frequências. A interferência entre essas células é denominada interferência co-canal. (Rappaport, 2001). Este tipo de interferência diminui o Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio (SINR), o qual muitas vezes chega a um nível que torna a comunicação inviável.

Problemas desse tipo são solucionados realizando uma filtragem correta e, principalmente, realizando uma organização de células adequada, que é caracterizada por alocar células vizinhas que não possuem sub-bandas adjacentes.

3. Metodologia

O trabalho de Wei Li (Li, 2010) serviu como base para a realização deste trabalho. Primeiramente implementou-se o algoritmo de clusterização na ferramenta MATLAB, para fins de validação e estudo de sensibilidade do algoritmo. Após esta fase, implementou-se um cenário em um simulador de redes para análise do comportamento das aplicações.

Dentre os diversos simuladores existentes na literatura, o OPNET foi escolhido para a realização da simulação do sistema. Suas vantagens são: interface gráfica atrativa e ser um simulador conhecido na literatura (Silva, 2014)(Shehade, 2013), pela eficiência e confiabilidade na geração de resultados.

3.1. Algoritmo de Clusterização das Femtocélulas

O primeiro passo é a obtenção da posição geográfica de todas as antenas e a interferência individual entre elas. Para isso, cria-se um vetor V no qual são armazenados os valores das posições geográficas e uma matriz W , na qual guarda-se os valores de interferência.

Cada linha da matriz W possui todos os valores de interferência causada na femtocélula de mesmo valor que seu índice, calculada através da potência do nó fonte e a potência de cada nó interferente. O valor de interferência é dado por:

$$W_{ij} = \frac{P_i}{P_j} \quad (1)$$

Onde W_{ij} significa a interferência que j causa em i e P_i e P_j são a potência do sinal da fonte e de interferência, respectivamente.

De posse da matriz W , com o mapeamento completo entre todos os dispositivos existentes no cenário, parte-se para o próximo passo que está relacionado com o cálculo da quantidade de *clusters* necessários. Para esse processo é necessário realizar cálculos relacionados com interferência, onde é levado em conta os valores de SINR, que são calculados, também, para cada nó. Conforme observado abaixo:

$$\text{SINR} = \frac{\text{Pot}_{\text{fonte}}}{\sum \text{Pot}_{\text{inter}} * \lambda + N_0} \quad (2)$$

Onde o valor do numerador remete à potência da fonte, enquanto que no denominador existem três componentes: o somatório abrange todos os valores de nós interferentes, N_0 é o valor do ruído branco do canal e λ é a densidade, que indica a porcentagem de femtocélulas ligadas em um determinado momento.

Com os valores de SINR de todos os nós, o cálculo de *clusters* é feito da seguinte maneira. Se o valor do SINR for menor que o Limiar mínimo estabelecido para o SINR (L), então um novo cluster é adicionado, caso seja igual ou maior, não se adiciona nenhum cluster.

Dessa forma, é definido o número de *clusters* e como próximo passo é realizado a organização de todos os nós em seus respectivos grupos. Possuindo o valor M de *clusters* criados, é necessário organizar, de forma decrescente, as femtocélulas de acordo com o nível de interferência sofrida por cada uma.

Somando todos os valores de cada linha da matriz W , é obtido o valor total de interferência causada àquela antena representada pela linha somada, todos os valores são guardados em um vetor H . Com esses valores, o algoritmo segue da seguinte forma:

- Primeiramente é feita uma pilha organizada de forma decrescente de acordo com os valores do vetor H .
- É selecionado M femtocélulas e distribuídas nos M clusters diferentes, esse processo é feito para que nós que mais sofrem com interferência fiquem separados.
- Neste momento é selecionado um nó de cada vez, feita a comparação com cada cluster existente para verificar em qual deles a inserção desse nó causará menos interferência.
- Ao realizar a inserção de um nó em uma femtocélula, é feita a atualização dos dados de interferência em que o peso de interferência do cluster se torna: peso atual + peso do novo nó.
- Os dois últimos passos são repetidos até a pilha esvaziar.

Com o término desses passos, a clusterização se completa e todos os nós ficam organizados em seus respectivos grupos.

3.2. Validação e Estudo de Sensibilidade

O cenário de simulação foi feito em uma área aberta, possuindo 10.000 m², no qual as femtocélulas serão alocadas de forma aleatória, de acordo com o quantitativo desejado, dentro desse campo. Todas as posições geográficas são guardadas no vetor V .

Para o cálculo da potência do sinal, foi utilizado o modelo de propagação de espaço livre. A perda associada a comunicação é definida na equação 3.

$$\text{perda} = 32.44 + 20 * \log_{10} d + 20 * \log_{10} f \quad (3)$$

Onde d é a distância entre os dispositivos em quilômetros e f é a frequência da onda utilizada em Mhz. Para chegar ao valor da potência recebida é só subtrair a potência máxima do valor da perda; neste trabalho é usado 10dBm como potência máxima.

Com o objetivo de caracterizar a melhoria que o algoritmo fornece, comparou-se o algoritmo desenvolvido com outro tradicionalmente utilizado na literatura, este baseado na distância euclidiana (DE) dos nós (Viana, 2004). Cada cenário possui uma composição fixa da posição em que os nós (femtocélulas) estarão. Para realizar uma comparação mais justa, são realizadas 30 simulações para cada composição dos cenários e a média (do valor de SINR) dessas iterações, para cada femtocélula, é usada para realizar as comparações necessárias.

Os parâmetros que foram utilizados em ambos os cenários podem ser observados na tabela abaixo:

Tabela 1: Parâmetros utilizados em todos os cenários do MATLAB (Li, 2010).

Parâmetros		Valores
Sistema	Frequência da Portadora/Largura de Banda	2GHz/10 MHz
	Densidade	0.5 (50%)
	Limiar (L) SINR	6mW
	Desvio-padrão do somreamento lognormal	-8dB~8dB
	Sub-carrier bandwidth	15kHz
Macro célula	Classificação	Omni-directional
	Altura	32m
	Raio	288 m
	Potência Máxima	46dBm
Femto célula	Potência Máxima	20dBm
	Usuários por Femto célula	1

Os dois cenários apresentados acima possuem subdivisões que estão ligadas diretamente ao número de femto células e de sub-bandas utilizadas. Três composições diferentes foram definidas, são elas: 50, 100 e 300 femto células, nas quais serão utilizadas 4, 6 e 12 sub-bandas respectivamente. A figura 1 ilustra a posição fixa dos nós para as composições com 300 antenas.

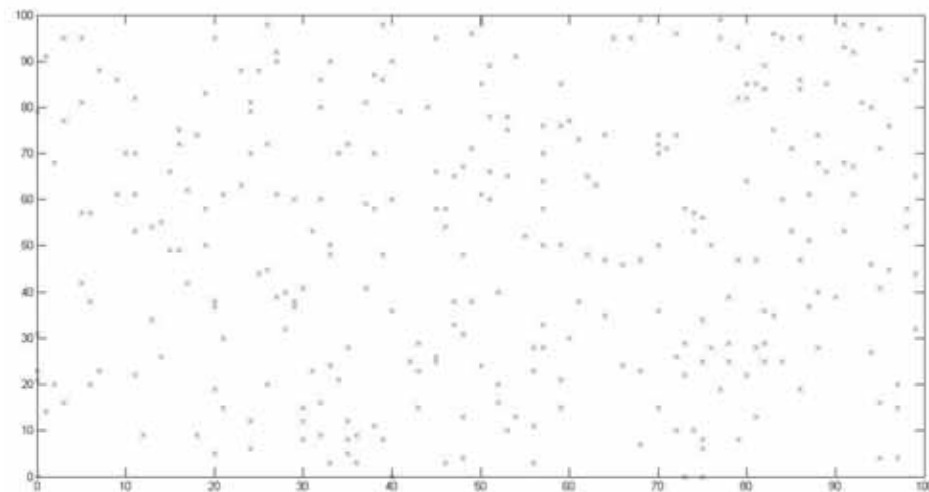


Figura 1: ilustração do cenário fixo com 300 nós.

3.3. Simulação no OPNET

Assim como no item 2.2, também é realizada a comparação da rede com e sem clusterização. Devido limitações de Hardware, foi criado um cenário menor, se comparado com os que foram utilizados no modelo analítico. 14 femto células foram distribuídas em duas colunas paralelas, a distância dos nós de uma mesma coluna é de 5 metros e a distância entre as duas colunas é de 10 metros.

As mesmas posições geográficas foram utilizadas tanto na simulação como no modelo analítico implementado no item 2.2. Assim usa-se o algoritmo para realizar a clusterização nos 14

nós, foram utilizados apenas 3 *clusters* no agrupamento. Após a execução completa do algoritmo, cada antena é ajustada alocando-a em sua faixa de frequência mostrada nos valores da matriz e assim o processo de clusterização se completa.

Foram utilizados 3 usuários, um para cada uma das 3 antenas que geraram maior interferência. Assim, com a clusterização, cada usuário ficará em um *cluster* diferente. As faixas de frequência utilizadas são de largura igual a 20Mhz, tanto para *downlink* quanto para *uplink*, e são adjacentes, suas especificações podem ser visualizadas na tabela 2.

Tabela 2: Distribuição das faixas de frequência utilizadas no OPNET.

Sub-banda	Faixa <i>Downlink</i>	Faixa <i>Uplink</i>	Largura de banda
Número 1	1920-1940 Mhz	2110-2130 Mhz	20Mhz
Número 2	1940-1960 Mhz	2130-2150 Mhz	20Mhz
Número 3	1960-1980 Mhz	2150-2170 Mhz	20Mhz

Foram utilizados 2dBi no ganho das antenas e 0.1 Watts de máxima potência de transferência. Além de se utilizar o modelo de espaço livre (Silva, 2014). Resumidamente, as conexões utilizadas na simulação foram:

- **PPP_adv**: É uma conexão *wireless* que utiliza o *Point-to-Point Protocol* (PPP).
- **PPP_DS3**: Caracterizada por ser uma conexão cabeada, que também utiliza o protocolo PPP, possuindo a capacidade de 44,5 Mbps.
- **100BaseT**: É uma conexão *ethernet* que alcança a capacidade 100 Mbps.

A ilustração do cenário pode ser vista na figura 2, esta possui as 14 femtocélulas ligadas a uma nuvem IP (IP_Cloud), através de conexões PPP_adv, que servirão de *backbone* para a rede. Os mesmos parâmetros utilizados nas femtocélulas conforme as tabelas 1 e 2 foram considerados.

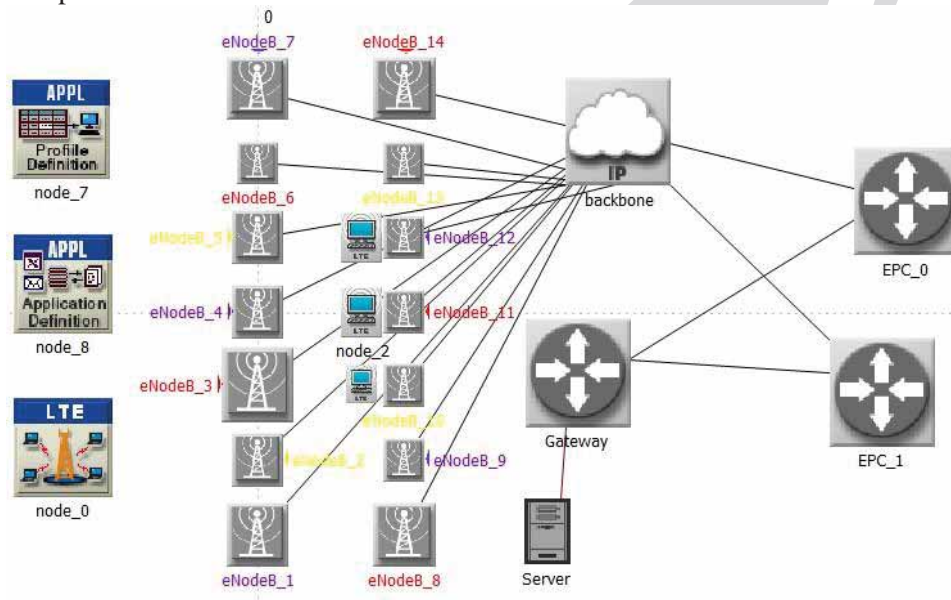


Figura 2: Cenário criado no OPNET.

A aplicação utilizada para os testes foi de videoconferência de alta resolução, foram utilizados 5 minutos de simulação em que cada usuário realiza comunicação com o servidor multitarefa através de um único nó ao qual está interligado.

4. Resultados

Nesta seção serão apresentados resultados de simulações realizadas tanto no MATLAB quanto no OPNET. Para cada programa foi realizado uma coleta diferente de métricas; no modelo analítico, o foco principal é o cálculo de SINR, sabendo que quanto maior essa métrica em um determinado dispositivo melhor será a comunicação através do mesmo. Enquanto que na simulação são coletados alguns dados como vazão e atraso.

Neste primeiro cenário (MATLAB) é caracterizado por ser uma comparação entre o algoritmo proposto e o de Distância Euclidiana (DE). Cada cenário contém um número fixo de componentes na rede (50, 100 e 300 femtocélulas).

4.1. Simulações com 50 nós e máximo de 4 clusters

A figura 3 ilustra os valores médios de SINR, por cada femto, nas 30 simulações executadas. É possível notar que o algoritmo recriado possui o maior pico, contudo perde no conjunto, no qual 66% das femtocélulas obtiveram melhores resultados de SINR no algoritmo de DE. Fato recorrente na média total, no qual o algoritmo recriado possui uma média inferior em 8% em comparação com o algoritmo DE. Esses valores podem ser visualizados na tabela 3.

Figura 3: Comparação de SINR do algoritmo recriado e baseado na DE (50 nós).

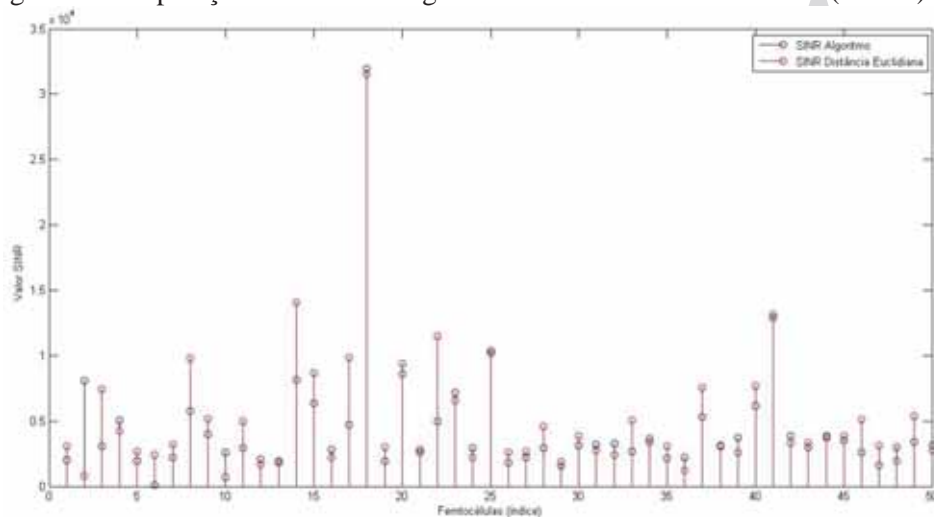


Tabela 3: Resultados na comparação entre os dois algoritmos (50 nós).

Parâmetro	Algoritmo DE	Algoritmo Recriado
Média total	5.209	4.436
Maior Pico (nó)	31547,16 (18)	31959,90 (18)
Intervalo de Confiança	[3216.96, 7200.48]	[2577.95, 6293.61]
Qtd. de nós com maior SINR	33	17

Nesta primeira comparação o algoritmo recriado apresentou um comportamento inferioridade para pequenas redes. Nesse caso, apesar de possuir o maior pico por uma pequena diferença, todas as métricas que demonstram melhorias na rede de uma forma geral possuíram maiores valores com o uso do algoritmo DE.

4.2. Simulações com 100 nós e máximo de 6 clusters

A comparação entre os dois algoritmos é ilustrada pela figura 4, apesar de o maior pico (maior SINR) estar no algoritmo de DE, o algoritmo criado possui um pico bem próximo (ver nó 69 e 76). As desvantagens do algoritmo criado param por aí, pois se for considerado o quantitativo de nós que possuem maior SINR, o algoritmo criado possui 64, dos 100, com melhores índices.

Em percentuais, significa um aumento que 64% das conexões seriam melhores se utilizassem esse algoritmo de clusterização. Outro fator importante é a média geral, em que o algoritmo criado também sai vencedor. Uma última análise é feita pelo intervalo de confiança dos valores em que os limites superiores são bastante próximos, mas os inferiores possuem uma grande diferença em que o algoritmo criado sai vencedor por possuir um valor bem maior, tais valores podem ser vistos na tabela 4.

Figura 4: Comparação de SINR do algoritmo recriado e baseado na DE (100 nós).

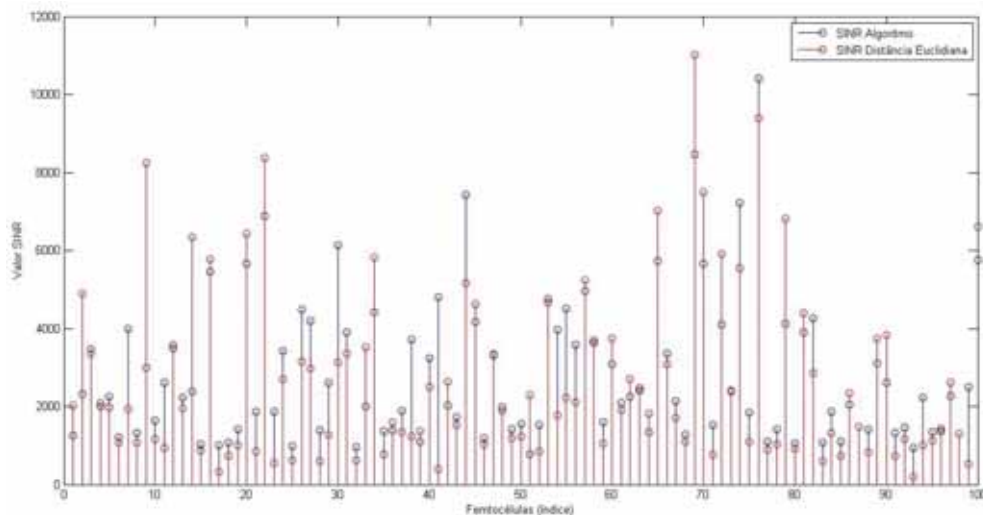


Tabela 4: Resultados na comparação entre os dois algoritmos (100 nós).

Parâmetro	Algoritmo DE	Algoritmo Recriado
Média total	2666.918	2816,86
Maior Pico (nó)	11027,92 (69)	10416,92 (76)
Intervalo de Confiança	[1769.12, 3564.71]	[2078.43, 3555.28]
Qtd. de nós com maior SINR	36	64

Com base nos resultados encontrados, é possível notar que o algoritmo DE tem a tendência de criar ótimos locais (grandes picos), enquanto o algoritmo recriado possui características que mostram uma evolução mais igualitária e distribuída, causando a melhora da rede como um todo, assim é notável a evolução do algoritmo recriado para redes maiores e mais complexas.

4.3. Simulações com 300 nós e máximo de 12 clusters

No cenário com 300 nós aconteceram vitórias por parte do algoritmo recriado, nos quatro quesitos de análise. Primeiramente sobre o maior pico de SINR, que esteve na femtocélula

1 nos dois casos; o algoritmo recriado possui um valor de 10% maior do que o algoritmo de DE. Em relação à média total, o fator mais positivo recai também para o algoritmo recriado que detém um valor aproximadamente 6% maior do alcançado pelo algoritmo de DE.

Sobre o intervalo de confiança, o algoritmo recriado possui maiores valores tanto no limite inferior quanto superior. Assim pode-se imaginar que a maioria dos valores encontrados para o algoritmo recriado será maior do que no algoritmo de DE. Visualizando a a quantidade de femtocélulas que possuíram melhor SINR, pode-se comprovar a tese criada através do intervalo de confiança. São 179 nós (aproximadamente 60% dos casos) que ganham nesse quesito.

Estes valores podem ser visualizados, de forma literal, na tabela 5, assim como o gráfico que serve de comparativo entre os dois algoritmos estão ilustrados na figura 5.

Figura 5: Comparação de SINR do algoritmo recriado e baseado na DE (300 nós).

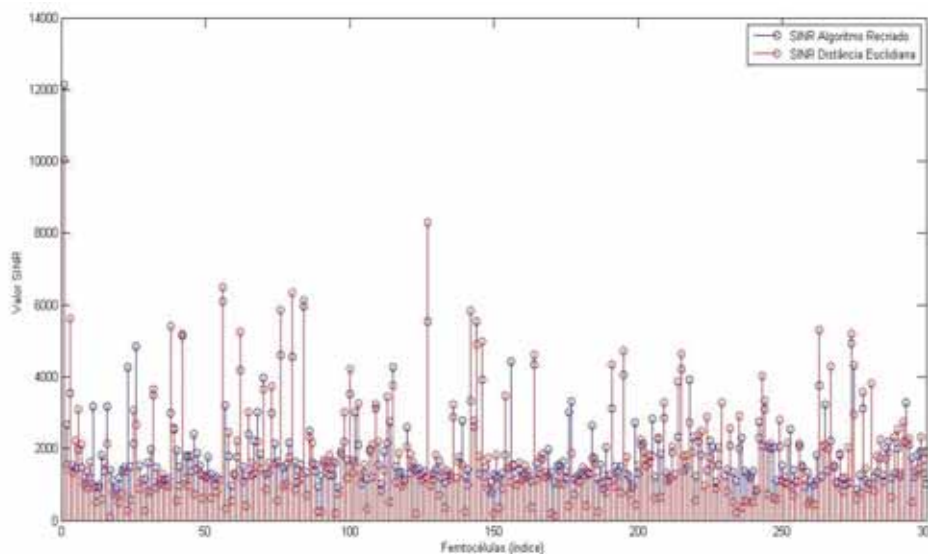


Tabela 5: Resultados na comparação entre os dois algoritmos (300 nós).

Parâmetro	Algoritmo DE	Algoritmo Recriado
Média total	1733	1902,53
Maior Pico (nó)	10050,88 (1)	12132,45 (1)
Intervalo de Confiança	[1180.35, 2285.29]	[1443.06, 2362]
Qtd. de nós com maior SINR	121	179

4.4. Resultado OPNET

As figuras 6 e 7, assim como a tabela 6 demonstra o comportamento da vazão e atraso globais. É possível perceber que houve, pelo menos, uma triplicação da vazão de dados trafegados pela rede, isso se deve pela diminuição da interferência com a utilização dos clusters.

Outro fator positivo com a clusterização é a pouca variação na taxa de dados, enquanto que o não clusterizado varia de forma bastante acentuada, ficando entre 3,5Mbps a 4,5Mbps. O clusterizado fica, praticamente, constante em aproximadamente 13Mbps.

Outro importante ponto a ser frisado está ligado ao fato de um dos três usuários finais não conseguir gerar tráfego algum sem a utilização do algoritmo, pois existe um aumento exacerbado da interferência, o que inviabiliza a transmissão.

O atraso causado na rede também é um fator importante para ser analisado. No gráfico é possível perceber que ocorre um crescimento do atraso, de quase o dobro, quando não se utiliza o algoritmo para clusterização. Em números, com a utilização do algoritmo, existe um atraso geral de 15 ms, enquanto que sem seu uso essa métrica fica entre 25 ms e 30 ms. Para uma aplicação de videoconferência essa diferença não é considerada prejudicial, mas para outros tipos de aplicação em tempo real, qualquer aumento no atraso da distribuição de pacotes precisa ser considerado.

Figura 6: Comportamento da atraso, em downlink, global.

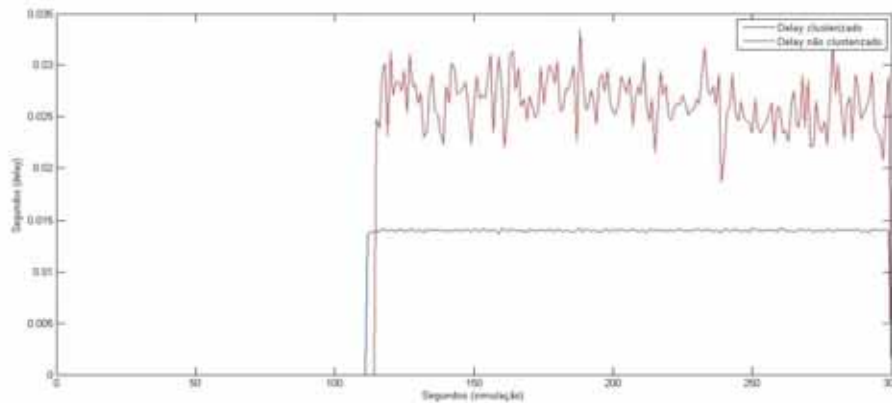


Figura 7: Comportamento da vazão, em downlink, global.

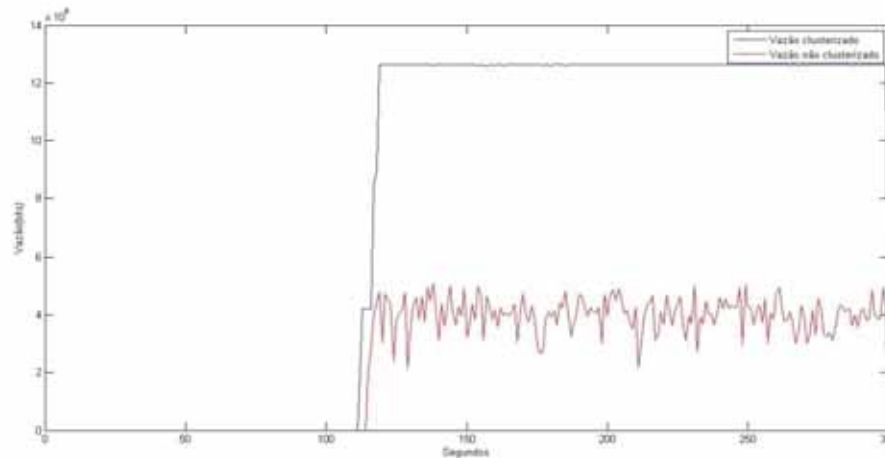


Tabela 6: Comparação da vazão e atrasos médios.

Simulação	Média Vazão global	Média Atraso global
Clusterizada	12.357Mbps	14ms
Não clusterizada	4.0056Mbps	26,5ms

5. Conclusões

Com a realização desse trabalho, foi possível detectar que já existem diversos estudos com resultados concretos em relação à melhoria de interferência em redes móveis, principalmente redes LTE, contudo lacunas foram observadas no que concerne ao comportamento dos algoritmos para grandes redes e ao comportamento das aplicações em cenários mais realistas. Tais estudos são de grande importância pois perpassam pela necessidade de se controlar a interferência entre as femtocélulas em cenários reais e que, caso sejam ignorados, podem inviabilizar a utilização da tecnologia em redes com grande número de nós.

Através dos resultados encontrados é possível enxergar a grande diferença existente em redes que operam com e sem a utilização de clusterização. Com a utilização do modelo de espaço livre e a área de simulação consideravelmente reduzida, é possível perceber baixos valores de SINR, principalmente em redes grandes, com 300 nós por exemplo. Nesse contexto os números mostram o impacto positivo que o algoritmo criado trouxe e sendo bem maior em redes elevado número de antenas.

Em relação à comparação entre os dois algoritmos apresentados neste trabalho os resultados mostram que para redes menores o algoritmo criado perde para o de DE, com o aumento da rede percebe-se que o algoritmo criado gera mais vantagens, obtendo mais vitórias nos quesitos apresentados para comparação.

Na simulação com o OPNET, o algoritmo também trouxe benefícios. No cenário sem clusterização, um dos três usuários utilizados não conseguiu realizar nenhum tipo de comunicação e em redes pequenas o comportamento das aplicações era muito prejudicado devido o alto nível de interferência. Adicionalmente, foi visível o impacto negativo que a interferência causada gera nas métricas coletadas, e que através da utilização da clusterização, tais medidas melhoram consideravelmente. Foi possível perceber uma grande melhora na rede, com uma grande diminuição no atraso e um grande aumento na vazão total de dados, sendo possível enxergar taxas aceitáveis tanto com ou sem clusterização, de acordo com a recomendação G.114 (ITU, 2003).

Referências

- Bouras, Christos.** Interference Management in LTE Femtocell Systems Using an Adaptive Frequency Reuse Scheme. Publicado no *Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*.18-20 de abr. 2012.
- Chandrasekhar, V., Andrews, J. G. e Gatherer A.,** Femtocell Networks: A Survey. *In IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, pp. 59–67, 2008.
- Chowdury, Mostafa.** Network Evolution and QoS Provisioning for Integrated femtocell/macrocell Networks. Publicado no *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*. 13 de Set. 2010.
- ITU, International Telecommunication Union.** *G.114 One-way transmission time*. 2003. Disponível em: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.114-200305-I/en>. Acesso 05 de dez. 2014.
- Li, W., Zheng, W., Xiangming, W. e Su, T.,** Clustering Based Resource Allocation for Interfemtocell Interference Management. *Proc. IEEE 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, pg. 1–5, 23-25 Set. 2010.
- Rappaport, T.,** *Wireless Communications – Principles & Practice*. Editora Prentice Hall, 2001.
- Saunders, R. S.,** *Femtocells Opportunities and Challenges for Business and Technology*. Wiley, 2009.
- Shehade, M., Bo Fu, Thakolsri, S., Kellerer, W.,** QoE-based resource reservation for unperceivable video quality fluctuation during Handover in LTE, In Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), IEEE, pg. 171-177, Jan 2013.
- Silva, K. Frances, C. R., Silva, C. P. A. e Vijaykumar, N. L.** Analysis of handover based on the use of femtocells in LTE networks. *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, v. 2, p. 19-28, 2014.
- Viana, M.,** *Análise de Cluster: Métodos Hierárquicos e De Particionamento*. São Paulo, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2004.
- Wu, Y., Zhang, D., Jiang, H. e Wu, Ye,** A Novel Spectrum Arrangement Scheme for Femtocell Deployment in LTE Macrocells. *Proc. IEEE 20th Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. pg. 6–11, 13-16 de set. 2009.