

Otimização de Recursos Rádio para Redes de Acesso Sem Fio baseadas em Rádio sobre Fibra*

Pedro Henrique Gomes¹, Nelson L. S. da Fonseca¹, Omar C. Branquinho²

¹Instituto de Computação
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Campinas – SP – Brasil

²Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas)
Campinas – SP – Brasil

psilva@lrc.ic.unicamp.br, nfonseca@ic.unicamp.br
branquinho@puc-campinas.edu.br

Abstract. *In this article, we introduce a model based on integer linear programming (ILP) for minimizing the use of radio resources of networks based on Radio Over Fiber (RoF). The proposed architecture arranges cells based on a multi-layer structure, with cells in each layer providing different coverage radii. The model performs dynamic cell splitting to improve network capacity in congested areas and cell merging in areas with low demand. The computational demand of the proposed model increases proportionally to the number of layers of RAUs in the infrastructure. Results indicate that two layers of RAUs give the best trade-off between computational demand and quality of results, for network cost reduction as well as operator revenue increase.*

Resumo. *Este artigo introduz um modelo baseado em programação linear inteira (PLI) para a minimização do uso de recursos rádio em redes sem fio baseadas em Rádio Sobre Fibra (RoF). A arquitetura proposta organiza as células em uma estrutura multicamadas, cada camada com um raio diferente de cobertura. O algoritmo de otimização realiza divisão de células de forma dinâmica para melhorar a capacidade em áreas congestionadas e a fusão de células em áreas com pouca demanda. A demanda computacional do modelo proposto aumenta proporcionalmente ao número de camadas de antenas consideradas na infraestrutura. Os resultados indicam que duas camadas de RAUs fornecem a melhor relação entre custo computacional e qualidade de resultados.*

1. Introdução

A arquitetura de Rádio sobre Fibra (*Radio-over-Fiber* - RoF) integra as tecnologias de rádio e de fibra óptica, capitalizando o melhor de ambas para a concepção de redes de acesso sem fio eficientes. Nas redes RoF, a parte óptica fornece confiabilidade e um meio de transmissão de alta capacidade, enquanto a parte rádio (sem fio) permite a mobilidade dos usuários e fornece uma tecnologia de acesso com baixo custo. Nestas redes, os sinais de radiofrequência (RF) são transportados em fibras ópticas, sem qualquer tipo de conversão de banda. As infraestruturas de RoF envolvem uma ou mais Estações Base de

*O presente trabalho foi realizado com o apoio da FAPESP, processo número 2008/08779-9

Controle (*Base Station Controllers* - BSC) e várias Unidades de Antena Remota (*Remote Antenna Units* - RAUs) interligadas através de um *backhaul* óptico [Gomes et al. 2009]. A maior parte dos componentes de RF são centralizados nas BSCs e as RAUs são responsáveis apenas pela conversão eletro-óptica dos sinais de RF. Todos os equipamentos de rádio, conhecidos como Estações Base (*Base Stations* - BSs), ficam localizados na BSC e podem ser dinamicamente distribuídos ao longo da rede, permitindo que diferentes configurações de células possam ser implantadas. As características de centralização dos recursos da rede e configuração dinâmica das células proporcionam uma melhor cobertura a custos reduzidos, principalmente quando a rede possui demandas de usuários bastante dinâmicas [Al-Raweshidy and Komaki 2002].

As infraestruturas de redes de futuras gerações (*beyond-3G*) deverão fornecer soluções de alta taxa de dados e com ótima relação custo-benefício para um grande número de usuários móveis. No entanto, não há, em redes reais, um balanceamento destas demandas ao longo da rede. As redes celulares tradicionais são, normalmente, baseadas na alocação estática de recursos e no gerenciamento destes recursos de uma forma centralizada na rede (*system-centric*). Os recursos, como os canais, códigos de multiplexação, sub-portadoras e faixas de tempo, são alocados, primeiramente, para cada uma das Estações Base, considerando o custo da rede e a qualidade global de serviço, e em seguida, atribuídos aos usuários, em uma abordagem de divisão e conquista (*divide-and-conquer*). A alocação estática de recursos não é eficiente, especialmente em rede móveis, dinâmicas e com grandes requisitos de largura de banda, uma vez que as demandas dos usuários podem estar concentradas em regiões específicas e essas regiões, por sua vez, podem mudar de localização com a mobilidade dos usuários. Novas abordagens na alocação de recursos de redes móveis sem fio, centralizadas nos usuários (*user-centric*) [Djukic et al. 2009], permitem que a alocação seja feita de acordo com as demandas, alocando primeiro os recursos com base nos requisitos dos usuários e, somente em seguida, procurando a melhor Estação Base para fornecer a conectividade.

O problema de alocação de recursos em redes celulares vem ganhando atenção dos operadores de redes devido ao crescimento exponencial no número de usuários móveis e da demanda destes. O consumo de energia de uma rede celular média, com até 15.000 sites e duas tecnologias (2G e 3G) chega a ser equivalente ao consumo de uma cidade com 168.000 habitantes [Amanna 2009]. Boa parte dessa energia é gasta pelos geradores, sistemas de refrigeração e equipamentos de rede existentes nas Estações Base, que permanecem em funcionamento mesmo em células ociosas. Esses fatores têm levantado a necessidade de se desenvolver meios de comunicações verde (*Green Communications*) e as redes sem fio de dados (como Wi-Fi, WiMAX e 3G) têm grande importância nessa discussão, já que respondem pelo maior crescimento nos últimos anos no setor de telecomunicações. Soluções como a arquitetura RoF e o gerenciamento dos recursos rádio de forma centralizada nas demandas dos usuários móveis são propostas viáveis para a implantação de redes sem fio eficientes e econômicas.

Este artigo apresenta uma solução para o problema de alocação de recursos rádio centralizada no usuário. A solução proposta baseia-se em um modelo de Programação Linear Inteira (PLI). A infraestrutura de rede considerada consiste de várias Unidades de Antena Remota interligadas por fibras ópticas a uma Estação Base de Controle, onde está localizado um número limitado de equipamentos de rádio (Estações Base). A solução do

problema é encontrar uma configuração otimizada de recursos rádio (BSs) e RAUs que melhor atenda o objetivo do sistema. Definimos dois objetivos diferentes que podem ser utilizados no modelo. O primeiro objetivo minimiza o custo da rede, que é representado pelo número de BSs utilizadas. O segundo objetivo maximiza a receita do operador, que é representada pelo somatório de receitas fornecidas por todos os usuários atendidos.

A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 3 apresenta a arquitetura proposta. A Seção 4 apresenta a formulação do problema baseado em programação linear inteira. A Seção 5 ilustra o uso do método proposto e apresenta os resultados obtidos. A Seção 6, então, conclui o artigo.

2. Trabalhos relacionados

As técnicas de gerenciamento de recursos rádio (*Radio Resource Management - RRM*) têm sido amplamente utilizadas no planejamento de redes celulares e, atualmente, também são empregadas na implantação de redes sem fio, como o Wi-Fi e o WiMAX. Nestas técnicas, um dos principais problemas refere-se ao posicionamento das Estações Base na rede de forma a otimizar o uso dos recursos rádio. As soluções para este problema, geralmente, são baseadas em métodos estáticos e podem implicar no desperdício de recursos, principalmente, em redes dinâmicas, como as redes sem fio móveis. Algumas novas técnicas de RRM têm sido propostas para redes móveis, onde o agrupamento dinâmico dos usuários é contabilizado durante a distribuição dos recursos [Feng et al. 2005]. Em seguida, alguns trabalhos sobre técnicas de RRM são brevemente analisados.

Em [Hills and Friday 2004], soluções para os problemas de alocação dinâmica de canais, controle dinâmico de potência de transmissão e balanceamento de carga, são propostos para redes Wi-Fi baseadas em agentes centrais de gerenciamento. Em [Wright 1998] e [Hurley 2002], o problema de posicionamento de Estações Base é estudado. Em [Wright 1998] a viabilidade de soluções para o problema com base no método de Nelder-Mead é investigado e em [Hurley 2002] mostra-se uma modelagem bem detalhada do problema, bem como uma solução através da técnica de arrefecimento simulado (*simulated annealing*). Em [Djukic et al. 2009], os autores argumentam que as técnicas de RRM centralizadas na rede (*system-centric*) apresentam uma abordagem que pode ser potencialmente ineficiente para redes móveis e sugerem o desenvolvimento de algoritmos centralizados nos usuários (*user-centric*).

Em [Sarkar et al. 2006b] e [Sarkar et al. 2006a], é tratado o problema de posicionamento de RAUs em redes sem fio baseadas em RoF. Um algoritmo guloso para resolver este problema é proposto em [Sarkar et al. 2006a] e comparado com algumas abordagens aleatórias e deterministas. Baseado em um conjunto de posições pré-estabelecidas, o algoritmo tenta minimizar a distância euclidiana entre RAUs e usuários da rede. Em [Sarkar et al. 2006b], uma solução baseada em arrefecimento simulado é proposta; os resultados mostram uma significativa redução dos custos da rede. Todas estas soluções, no entanto, têm como objetivo prover o acesso de última milha para usuários sem fio fixos e não são adequadas para se tratar usuários móveis em redes dinâmicas, já que nesse tipo de redes a aglomerações de usuários não é uniforme na área de cobertura e pode sofrer grandes alterações ao longo do tempo.

Os trabalhos até hoje desenvolvidos não consideram ambientes dinâmicos e as demandas dos usuários. A solução proposta neste trabalho trata especificamente os casos

de redes sem fio com mobilidade. Este trabalho mostra um exemplo da aplicação do conceito de técnicas de RRM centralizadas nos usuários, já que se baseia nas demandas dinâmicas dos mesmos para fazer a otimização dos recursos da rede.

3. Arquitetura proposta

A distância entre as antenas e os usuários móveis é um dos principais fatores limitantes para se obter eficiência no uso do espectro e, conseqüentemente, para se alcançar altas taxas de dados. Dessa forma, implantações eficientes de redes sem fio devem considerar um grande número de células e sistemas co-localizados, possibilitando o reuso eficiente do espectro e maior confiabilidade. Os sistemas co-localizados podem empregar diferentes tecnologias de redes sem fio ou mesmo uma única tecnologia com um conjunto diferente de parâmetros de configuração, como o raio da célula, número de canais, tipo de antena, etc., de forma que seja possível obter células com características diferentes. Um exemplo de tal infraestrutura é mostrado na Figura 1. O exemplo é constituído de duas BSCs com diversas BSs, ligadas a um certo conjunto de RAUs espalhadas na área de cobertura. As BSs empregam diferentes tecnologias de rede, como Wi-Fi, WiMAX, GSM e HSPA e podem implantar vários tipos de redes de acesso, com áreas de cobertura diversificadas, além de diferentes capacidades e custos. No exemplo da Figura 1, as RAUs 2, 3 e 7 implantam microcélulas baseadas na tecnologia WiMAX, que possuem grande capacidade e cobertura média; a RAU 6 implanta uma pico-célula baseada em Wi-Fi, com capacidade média e pequena cobertura; por fim, a RAU 5 implanta uma macrocélula baseada em HSPA, com pequena capacidade e cobertura de grandes dimensões. O tipo de tecnologia e localização das células são dinamicamente escolhidos levando em consideração toda a infraestrutura disponível e a demanda dos usuários. As RAUs 1 e 4, por exemplo, permanecem desassociadas e inutilizadas, já que a carga da rede é baixa em suas localidades.

Outra forma de se obter uma arquitetura flexível para rede móveis é através do emprego de uma única tecnologia sem fio e uso de técnicas como a divisão e a fusão de células. A técnica de divisão celular consiste em dividir células de grande raio em um número maior de células com pequena cobertura e, dessa forma, aumentar a capacidade da rede em áreas congestionadas. O aumento do número de células, no entanto, causa o aumento do número de BSs utilizadas na rede e, como conseqüência, o custo desta. Uma solução típica é o uso de células com tamanhos diferentes e a adoção de células com pequena cobertura apenas quando estritamente necessárias. A implantação de células com tamanhos diferentes, porém, ainda pode levar ao desperdício de recursos em redes móveis, já que a demanda da rede pode mudar muito ao longo da área de cobertura e ao longo do tempo de operação da rede. Conseqüentemente, é necessário o uso de um processo dinâmico de divisão e fusão das células, de acordo com as demandas dinâmicas dos usuários móveis.

Na arquitetura proposta, as RAUs são organizadas em uma estrutura multicamadas de forma que cada camada possa implantar células com raios diferentes, como ilustrado na Figura 2. O processo de divisão celular pode formar um aglomerado (*cluster*) de n células menores na camada N a partir de uma célula da camada $N - 1$, e o processo de fusão celular pode fazer o contrário. Se uma RAU de uma camada superior estiver ativa, todas as RAUs localizadas em sua cobertura em um nível inferior devem ser desativadas, o que economiza energia e evita a sobreposição de canais, facilitando o reuso de frequência.

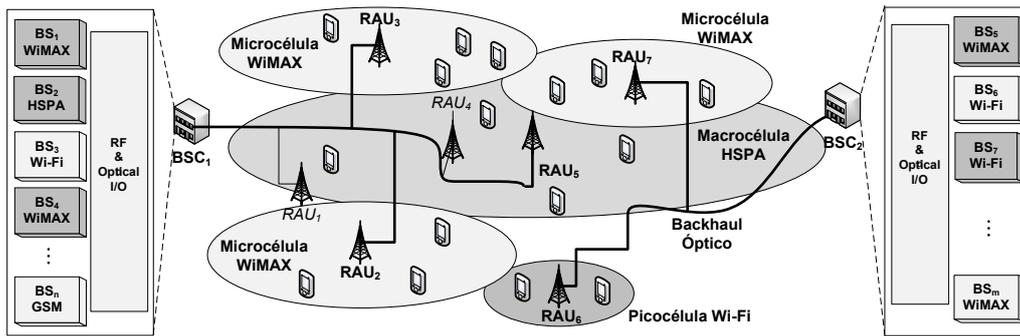


Figura 1. Arquitetura centralizada de rede sem fio baseada em várias tecnologias.

Na próxima seção, o algoritmo para ativação e desativação de RAUs para lidar com a configuração dinâmica da rede é proposto.

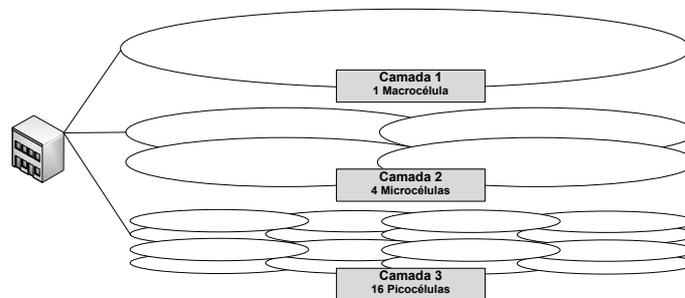


Figura 2. Arquitetura multicamada de células utilizada no processo de divisão celular.

4. Modelo de otimização dos recursos rádio

O algoritmo de otimização proposto tem como objetivo implantar células com pequeno raio de cobertura em áreas congestionadas da rede e células com cobertura maior em áreas com pouca densidade de usuários, de forma que os recursos rádio possam ser otimizados e ainda seja proporcionada uma boa qualidade de transmissão. O algoritmo associa os recursos de rede (centralizados na BSC) às RAUs, configurando dinamicamente a disposição das células da rede, a fim de lidar com a mobilidade dos usuários e com as mudanças dinâmicas de suas demandas. É suposto que existe um número suficientemente grande de RAUs instaladas na área de cobertura e que estas podem ser dinamicamente “ligadas” e “desligadas”, criando novas células, ou dividindo-as, quando elas forem necessárias e fundindo células pequenas em maiores quando elas não forem mais necessárias. A rede é constituída por uma única tecnologia de rede sem fio e a divisão/fusão celular é realizada em uma estrutura de RAUs multicamada, ou seja, com a possibilidade de implantação de células com diferentes raios em diferentes camadas.

As BSCs são representadas pelo conjunto $\mathcal{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$. As BSs são representadas pelo conjunto $\mathcal{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_o\}$ e sua principal característica é sua capacidade c_i , que pode ser expressa através do número máximo de canais, da taxa de dados máxima ou pelo número máximo de usuários suportados. As RAUs são representadas pelo conjunto $\mathcal{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$. Suas principais características são a localização

geográfica (X_{R_i}, Y_{R_i}) e o seu raio de cobertura r_i . As Estações Móveis (*Mobile Stations* - MSs) são representadas pelo conjunto $\mathcal{M} = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$ e suas principais características são a localização geográfica (X_{M_i}, Y_{M_i}) , sua demanda d_i , que pode corresponder ao número de canais necessários ou à vazão de dados mínima exigida por todos os fluxos da MS, e sua classe de serviço w_i , que corresponde à receita que o operador terá ao servir o usuário M_i .

A solução para o problema de otimização determina:

- As BSCs que devem operar na rede;
- As BSs que devem ser ativadas nas BSCs em operação;
- As RAUs associadas às BSs ativas;
- As MSs que devem ser servidas pelas RAUs associadas.

O problema é formulado com um modelo de programação linear inteira (PLI). Apresentamos dois possíveis objetivos de serem utilizados no modelo proposto.

A seguinte notação é usada na formulação do problema:

$\mathcal{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$: conjunto de Estações Base de Controle (BSCs);

$\mathcal{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_o\}$: conjunto de Estações Base (BSs);

$\mathcal{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$: conjunto de Unidades de Antena Remota (RAUs);

$\mathcal{M} = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$: conjunto de Estações Móveis (MSs);

v : porcentagem mínima de MSs atendidas;

t : número de camadas de RAUs;

\mathcal{U}_i : conjuntos de RAUs pertencentes à camada i , $i \leq t$;

q : número de RAUs por cluster;

$a_{i,j}$: 1 se a BS B_i está localizada na BSC C_j ; 0 caso contrário;

c_i : capacidade da BS B_i ;

$b_{i,j}$: 1 se a RAU R_i é ligada por fibra à BSC C_j ; 0 caso contrário;

r_i : radio de cobertura da RAU R_i ;

$P_{R_i} = (X_{R_i}, Y_{R_i})$: localização geográfica da RAU R_i ;

d_i : demanda da MS M_i ;

w_i : classe de serviço da MS M_i ;

$P_{M_i} = (X_{M_i}, Y_{M_i})$: localização geográfica da MS M_i ;

$dist_{i,j} = \sqrt{(X_{M_i} - X_{R_j})^2 + (Y_{M_i} - Y_{R_j})^2}$: distância entre a MS M_i e a RAU R_j ;

$x_{i,j,k}$: 1 se a RAU R_i é associada à BS B_j , localizada na BSC C_k ; 0 caso contrário;

$y_{i,j}$: 1 se a MS M_i é servida pela RAU R_j ; 0 caso contrário.

A formulação das restrições do problema é apresentada a seguir:

$$x_{i,j,k} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{B}, \forall k \in \mathcal{C} \quad (\text{R1})$$

$$y_{i,j} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{M}, \forall j \in \mathcal{R} \quad (\text{R2})$$

$$x_{i,j,k} \leq b_{i,k} \quad \forall i \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{B}, \forall k \in \mathcal{C} \quad (\text{R3})$$

$$x_{i,j,k} \leq a_{j,k} \quad \forall i \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{B}, \forall k \in \mathcal{C} \quad (\text{R4})$$

$$\sum_{j \in \mathcal{B}} \sum_{k \in \mathcal{C}} x_{i,j,k} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{R} \quad (\text{R5})$$

$$\sum_{i \in \mathcal{R}} \sum_{k \in \mathcal{C}} x_{i,j,k} \leq 1 \quad \forall j \in \mathcal{B} \quad (\text{R6})$$

$$\sum_{i \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{R}} y_{i,j} \leq n.v \quad (\text{R7})$$

$$\sum_{j \in \mathcal{R}} y_{i,j} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{M} \quad (\text{R8})$$

$$\sum_{l \in \mathcal{B}} \sum_{k \in \mathcal{C}} x_{j,l,k} \geq y_{i,j} \quad \forall i \in \mathcal{M}, \forall j \in \mathcal{R} \quad (\text{R9})$$

$$y_{i,j} \cdot \text{dist}_{i,j} \leq r_j \quad \forall i \in \mathcal{M}, \forall j \in \mathcal{R} \quad (\text{R10})$$

$$\sum_{i \in \mathcal{M}} y_{i,j} \cdot d_i \leq \sum_{l \in \mathcal{B}} \sum_{k \in \mathcal{C}} x_{j,l,k} \cdot c_l \quad \forall j \in \mathcal{R} \quad (\text{R11})$$

$$\sum_{f \in \mathcal{R}} \sum_{g \in \mathcal{C}} (x_{k,f,g} + x_{\lfloor k/q^j - i \rfloor, f, g}) \leq 1 \quad \forall i, j \in N^+ | i < t, i + 1 < j \leq t, \forall k \in \mathcal{U}_i \quad (\text{R12})$$

As duas funções objetivo possíveis para o problema são apresentadas a seguir:

$$\text{Minimizar} \sum_{i \in \mathcal{R}} \sum_{j \in \mathcal{B}} \sum_{k \in \mathcal{C}} x_{i,j,k} \quad (\text{O1})$$

$$\text{Maximizar} \sum_{i \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{R}} y_{i,j} \cdot w_i \quad (\text{O2})$$

As restrições R1 e R2 expressam os valores das variáveis de decisão x e y , que representam a associação entre RAUs, BSs, BSCs e MSs. A restrição R3 afirma que as RAUs só podem ser associadas a uma determinada BS localizada em uma BSC se existe um link de fibra que liga a RAU à BSC em questão. A restrição R4 estabelece que uma RAU só pode ser associada a uma BS em uma determinada BSC se a BS estiver, de fato, localizada na BSC. As restrições R5 e R6 exigem que exista uma associação um-para-um entre as RAUs e as BSs associadas. A restrição R7 garante que uma porcentagem mínima ($v\%$) de usuários sejam servidos. A restrição R8 garante que todas as MSs são servidas por exatamente uma RAU. A restrição R9 garante que apenas as RAUs já associadas a uma BS podem servir os usuários. A restrição R10 impõe que RAUs só pode servir os usuários na sua área de cobertura. A restrição R11 especifica que a demanda agregada de todos os usuários servidos por uma RAU deve ser igual ou inferior à capacidade da BS associada a esta RAU. Finalmente, a restrição R12 impede que RAUs de duas camadas diferentes sejam usadas em um determinado cluster.

O objetivo O1 minimiza o número de Estações Base (BS) utilizadas, reduzindo o custo de operação e manutenção da rede. O objetivo O2 maximiza a receita do operador ao servir o número máximo possível de estações móveis e priorizar os usuários de classes de serviço mais caras.

5. Avaliação da proposta

Para avaliar a eficácia da abordagem proposta, diferentes cenários foram avaliados. Em seguida, os resultados desta avaliação são discutidos.

5.1. Descrição dos cenários

O modelo de otimização foi implementado usando a linguagem de programação C e a biblioteca de otimização FICO Xpress 7.0 [Xpr]. Todos os experimentos foram executados em uma estação de trabalho com processador Intel Core 2 Quadcore a 2,6 GHz, 3 GB de memória RAM e sistema operacional Debian GNU/Linux com kernel 2.6.23.1.

A infraestrutura de rede RoF utilizada nos testes consiste de uma BSC e várias RAUs distribuídas uniformemente em uma área de 2km x 2km. As RAUs são organizadas de uma forma multicamada com 4 camadas e agrupamentos (*cluster*) com 4 células cada. A camada mais alta (camada 1) é constituída por uma única RAU com raio de cobertura de 1420m. A segunda camada é constituída por 4 RAUs com raio de 710m, dispostas em uma grade de 2 x 2. A terceira camada possui 16 RAUs com raio de 360m. E a camada mais baixa (quarta camada) envolve 64 RAUs com raio de 180m. Para cobrir uma determinada área, só as RAUs de uma determinada camada podem estar ativas. No pior dos casos, a rede irá operar com 64 BSs, o que acontece se todas as RAUs da camada mais baixa são ativadas. A Figura 3 ilustra a infraestrutura considerada.

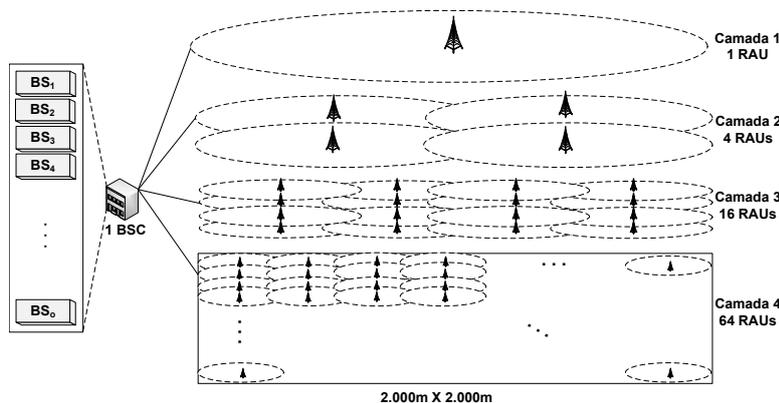


Figura 3. Infraestrutura de Rádio sobre Fibra utilizada nos testes.

Para avaliar os resultados com cenários móveis realistas foi empregado o modelo de mobilidade Random Trip Model [Le Boudec and Vojnovic 2005], para redes veiculares. As ruas utilizadas para Random Trip Model representam um cenário real da cidade de Houston, no Texas/E.U.A., perto da West University (<http://www.cs.rice.edu/~amsaha/Research/MobilityModel/>). A velocidade média foi definida como 5m/s, o valor de variação (delta) da velocidade como 2m/s; o tempo de pausa e a variação do tempo de pausa foram definidos como 20s e 50s, respectivamente.

Todos os experimentos tiveram duração máxima de 1000s, durante a qual o algoritmo de otimização foi executado a cada 100s. A topologia de rede foi alterada dinamicamente para lidar com as novas exigências dos usuários durante o tempo de operação da rede. Para cada experimento, pelo menos 10 amostras foram usadas para calcular as estatísticas desejadas e intervalos com 95% de confiança foram obtidos. Em todos os experimentos, quatro diferentes infraestruturas de RAUs foram consideradas: a *Infraestrutura 1* envolve apenas a camada mais baixa de RAUs (64 RAUs); a *Infraestrutura 2* é constituída pelas 2 camadas mais inferiores (64 + 16 RAUs); a *Infraestrutura 3* é composta por 3 camadas (64 + 16 + 4 RAUs) e, por fim, a *Infraestruturas 4* envolve o uso de todas as 4 camadas (64 + 16 + 4 + 1 RAUs). Ao considerar as quatro infraestruturas, é possível avaliar os benefícios da estruturação das RAUs de forma hierárquica. Ao ativar uma RAU em uma camada superior as RAUs na mesma região de cobertura em camadas inferiores devem ser desativadas. Infraestruturas que envolvem um maior número de camadas tem mais flexibilidade para encontrar uma combinação que otimiza o uso dos recursos da rede, mas, em contrapartida, exigem mais poder de processamento para encontrar soluções ótimas.

5.2. Resultados numéricos

Os experimentos foram separados em dois grupos. O primeiro grupo foi ajustado com a função objetivo de minimização do custo da rede. Para este grupo de experimentos a infraestrutura de rede utilizada constituiu-se de 1 BSC com 64 BSs e a mesma organização de RAUs apresentada na Figura 3. O número de MSs variou de 1 até 1000 e o algoritmo foi configurado para atender 100% dos usuários. O segundo grupo de experimentos foi ajustado com a função objetivo de maximização da receita. Para este grupo a infraestrutura utilizada foi de 1 BSC com um número variável de BSs (de 1 até 64) e a mesma organização de RAUs da Figura 3. Foram dispostos 1000 usuários e não foi ajustado nenhuma porcentagem mínima de MSs a serem atendidas.

5.2.1. Minimização do custo da rede

A Figura 4 mostra o custo de rede obtido nos experimentos. A *Infraestrutura 1*, com apenas uma camada de RAUs, apresenta o maior custo de rede, exigindo um número muito maior de BSs ativas. Para números de MSs menores do que 100, enquanto a *Infraestrutura 1* exige de 30 a 40 BSs ativas, a *Infraestrutura 3* e a *Infraestrutura 4* exigem apenas 5 BSs. Até 400 MSs, a diferença de exigência de BSs entre a *Infraestrutura 1* e as outras é constante e na média de 35 BSs. Para números de usuários menores do que 400 é possível concluir que as células são fundidas nas camadas superiores e um grande número de RAUs nas camadas inferiores não são associadas.

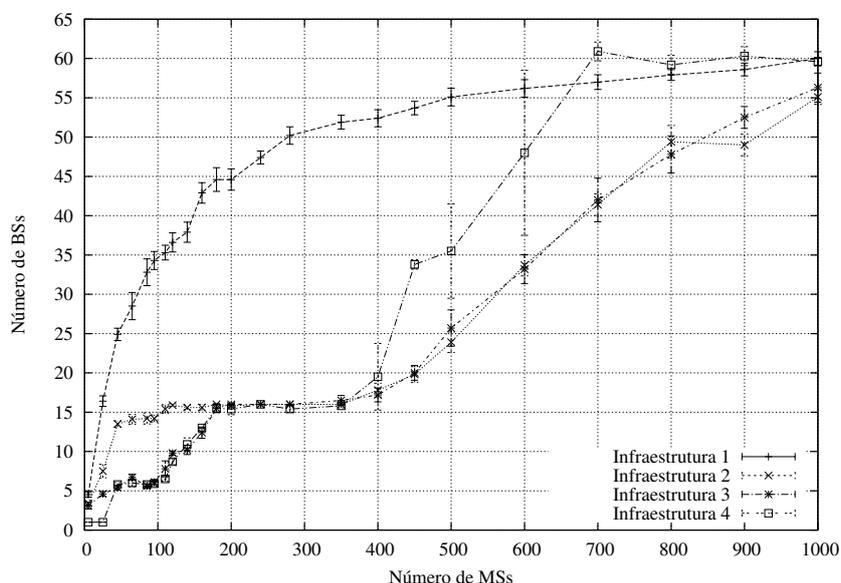


Figura 4. Número de BSs usadas em função do número de MSs na rede - Minimização do custo.

Com o aumento do número de MSs na rede a divisão dinâmica de células é executada e clusters de 4 células com raios menores são criados, substituindo células com grandes raios. Este processo de divisão continua com o aumento do número de MSs, até que apenas poucas RAUs nas camadas superiores sejam utilizadas, aumentando o custo da rede, mas fornecendo mais recursos para a demanda crescente de usuários. Além disso,

mesmo para as situações de redes mais congestionadas (acima de 500 MSs) as infraestruturas multicamada ainda conseguem reduzir o número de BSs ativas, já que em áreas com menor número de usuários as camadas superiores ainda são utilizadas, o que mostra o grande benefício de se configurar dinamicamente a rede.

Durante todos os experimentos, foi ajustado o tempo máximo de execução do programa de otimização para 90s. Quando a execução do programa atinge esse limite, o melhor resultado inteiro encontrado é retornado. Esse limite leva a soluções, quando utilizando a *Infraestrutura 4*, longe do ideal, já que a complexidade do problema com 4 camadas é muito maior do que a complexidade dos outros problemas e demanda maiores tempos médios de execução. Além disso, pode-se notar que há uma diferença muito pequena nos resultados obtidos pela *Infraestrutura 2* e *Infraestrutura 3*. Em resumo, não vale a pena ter um número de camadas superiores a 3, dado os requisitos de poder computacional dessas infraestruturas. Além disso, a infraestrutura com 2 camadas é boa suficiente para produzir grande economia de recursos.

A Figura 5 mostra o número médio de MSs por RAU. Com a *Infraestrutura 1* (com apenas 1 camada) o número de MSs por RAU aumenta linearmente e é consideravelmente menor do que nas outras 3 infraestruturas. No entanto, o número médio de MSs por RAU dada pelas outras infraestruturas ainda é bastante razoável para manter níveis aceitáveis de congestionamento e qualidade de transmissões. As configurações com 2 ou 3 camadas produzem o mesmo número médio de MSs por RAU.

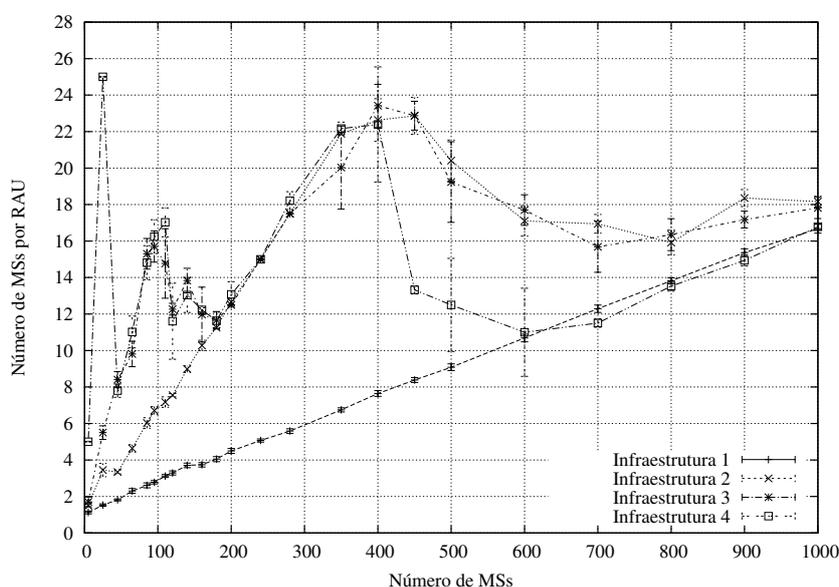


Figura 5. Número de MSs por RAU em função do número de MSs na rede - Minimização do custo.

A Figura 6 mostra o tempo de execução do programa de otimização. O tempo necessário para produzir soluções com a infraestrutura mais simples (com uma camada) não é significativo em todos os casos, o que é uma vantagem quando há limitações restritivas de tempo máximo para a produção de uma solução. O tempo de execução da infraestrutura com 4 camadas pode ser seis vezes maior do que o da infraestrutura com 2 camadas e o tempo de execução para a infraestrutura com 3 camadas pode ser duas vezes maior do que o da infraestrutura com 2 camadas. Houve um limite máximo ajustado para o tempo

de execução em 90s, já que os intervalos entre as reconfigurações da rede são de 100s.

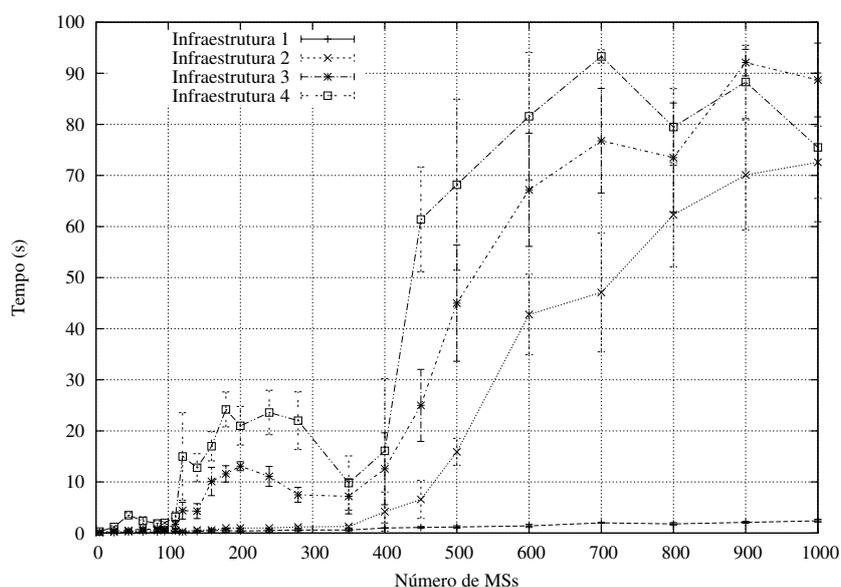


Figura 6. Tempo de execução do programa - Minimização do custo.

De forma geral, pode-se concluir que a *Infraestrutura 2* apresenta a melhor relação custo x benefício para o problema de minimização de custo da rede, devido à baixa demanda computacional e boa economia de recursos da rede.

5.2.2. Maximização da receita da rede

Nos experimentos relatados nessa seção, o algoritmo de otimização busca atender o máximo de usuários possíveis, privilegiando-os segundo o tipo de serviço contratado. Todos os recursos podem ser utilizados para a maximização da receita do operador. Foram consideradas 4 classes de serviço (w), com valores 1, 2, 3, e 4, que representam a proporção de receita obtida. Assim, usuários da classe 4 geram quatro vezes mais receita para o operador do que os usuários da classe 1. A proporção de usuários pertencentes a cada classe foi configurada de 5 formas diferentes para avaliar o impacto no algoritmo proposto. Foram utilizadas as seguintes proporções, respectivamente para as classes 1, 2, 3 e 4:

1. 50%, 30%, 15% e 5%
2. 40%, 30%, 20% e 10%
3. 30%, 20%, 20% e 30%
4. 25%, 25%, 25% e 25%
5. 5%, 15%, 30% e 50%

A Figura 7 mostra os resultados obtidos com a proporção 1 de classes de serviço (50%, 30%, 15% e 5%). Mostra-se a quantidade de MSs atendidas (curvas mais inferiores) e a receita obtida (curvas mais superiores), em função do número de BSs disponíveis na rede. É possível verificar que, apesar do número de MSs atendidas ser praticamente o mesmo para os 4 tipos de infraestruturas, a receita obtida pelas 3 infraestruturas com mais camadas (2, 3 e 4) é maior. Esse aumento de receita ocorre porque as infraestruturas que implantam células maiores tem maior flexibilidade para escolher os usuários e, assim,

escolhem aqueles que contratam os serviços mais caros. A partir de 20 BSs a diferença na receita das infraestruturas diminui, até o ponto em que as 4 infraestruturas apresentam o mesmo resultado, com 35 BSs. É possível notar na Figura 8 o grande aumento no tempo de execução para cenários com mais de 30 BSs para as 3 infraestruturas com mais camadas. Devido ao limite de tempo máximo de 90s, esses cenários deixam de obter resultados ótimos e apresentam apenas soluções factíveis para o problema. A partir de 40 BSs a *Infraestrutura 1* apresenta resultados parecidos com os da *Infraestrutura 2* e da *Infraestrutura 3* e superiores aos da *Infraestrutura 4*. A *Infraestrutura 2* apresenta ao longo de todos os experimentos os melhores resultados, com mais receita que as outras infraestruturas. A partir de 55 BSs os resultados das 4 infraestruturas tornam-se iguais, já que a rede passa a ficar superdimensionada, com mais recursos disponíveis do que demanda dos usuários.

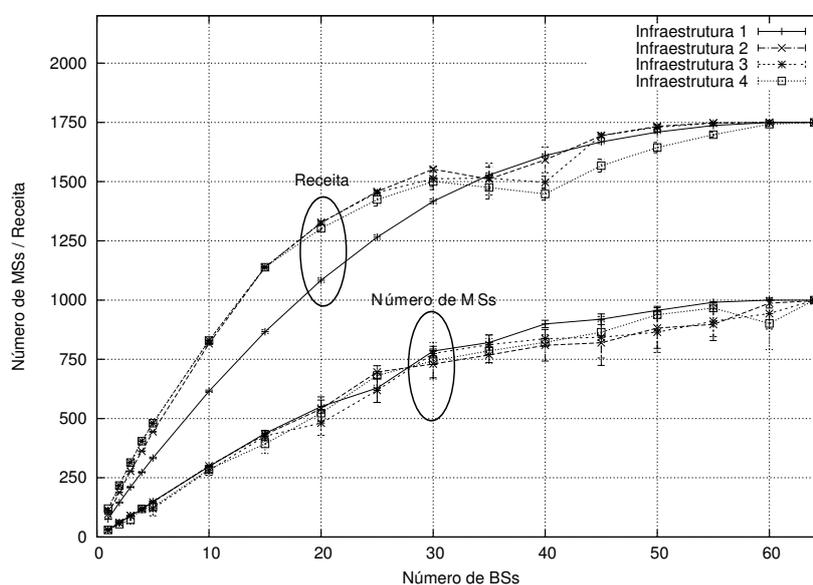


Figura 7. Número de MSs e receita da rede em função do número de BSs disponíveis - Maximização da receita.

A Figura 8 apresenta o tempo de execução do programa. A *Infraestrutura 1* obteve menor tempo de execução que todas outras infraestruturas. A partir de 15 BSs e até 55 BSs o tempo exigido pelas 3 infraestruturas com mais camadas cresceu rapidamente e alcançou o limite de 90s do programa. A partir de 50 BSs o programa passou a exigir menor tempo de execução devido à existência de muitos recursos na rede e pouca demanda a ser atendida. A *Infraestrutura 2* exigiu tempos ligeiramente menores do que a *Infraestrutura 3* e a *Infraestrutura 4*. A *Infraestrutura 2* foi novamente a que ofereceu a melhor relação custo x benefício, por obter grande receita para todas as quantidades de recursos na rede e exigir tempos de execução ligeiramente menores.

Por fim, a Figura 9 apresenta um comparativo da receita obtida pela rede de acordo com a mudança na proporções de usuários pertencente a cada classe de serviço. Os experimentos consideraram apenas a *Infraestrutura 2*. É possível verificar que, com o aumento na porcentagem de usuários com serviços mais caros, a receita obtida pelo operador também aumenta, independentemente do número de recursos na rede. Esse aumento de receita, porém, é mais significativo para redes com mais de 10 BSs.

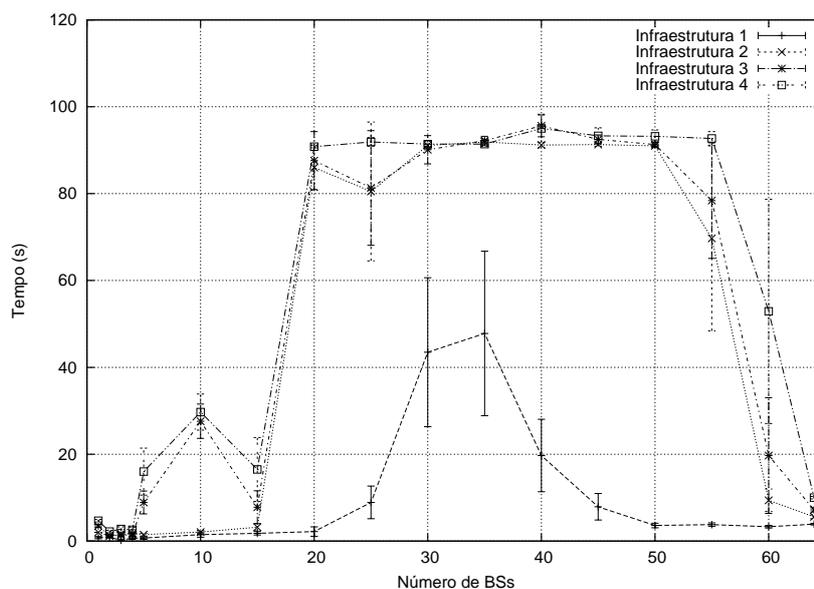


Figura 8. Tempo de execução do programa - Maximização da receita.

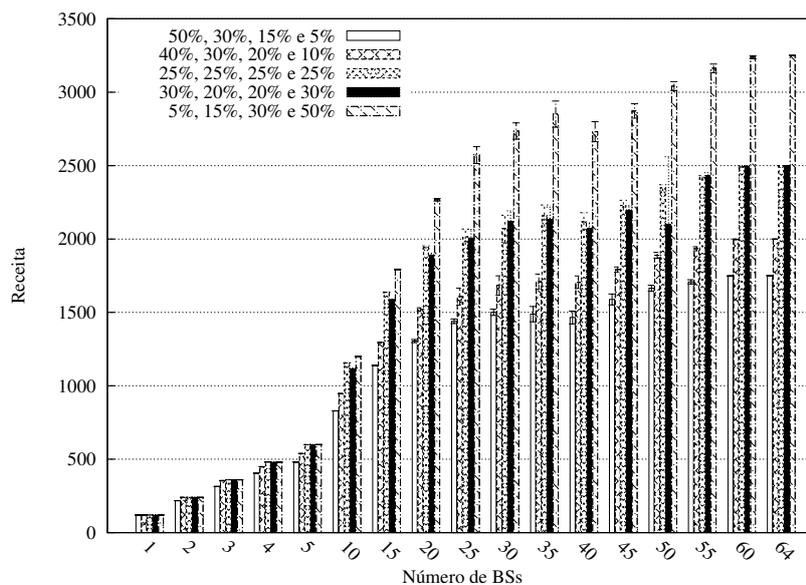


Figura 9. Receita obtida em função do número de BSs para 4 diferentes proporções de classes de serviço - Maximização da receita.

6. Conclusão e trabalhos futuros

Neste trabalho, introduziu-se um modelo de otimização de recursos rádio para redes móveis centralizado nas demandas dos usuários, que consiste em um processo de divisão e fusão celular em uma infraestrutura multicamada de RAUs. O modelo de otimização proposto apresenta grande redução do custo de rede e também aumento de receita, quando mais de uma camada de RAU é utilizada. A demanda computacional para se obter soluções em infraestruturas multicamadas, porém, impõe maiores tempos de execução. Para os dois objetivos propostos neste artigo a *Infraestrutura 2* apresentou os resultados com o melhor compromisso entre custo computacional e benefício, seja na redução do

custo de rede ou no aumento da receita do operador.

Resultados derivados podem ser usados para o planejamento e gestão de redes móveis com RoF através de uma arquitetura centralizada. Os trabalhos futuros concentrarão na avaliação do modelo proposto para tecnologias sem fio como o WiMAX e em redes que implementam várias tecnologias de redes sem fio.

Referências

- [Xpr] FICO XPress Optimization Suite 7 - <http://www.fico.com/en/Products/DMTools/Pages/FICO-Xpress-Optimization-Suite.aspx>.
- [Al-Raweshidy and Komaki 2002] Al-Raweshidy, H. and Komaki, S. (2002). *Radio Over Fiber Technologies for Mobile Communications Networks*. Artech House.
- [Amanna 2009] Amanna, A. (2009). Green Communications- Annotated Literature Review and Research Vision. Technical report, Virginia Tech.
- [Djukic et al. 2009] Djukic, P., Yanikomeroğlu, H., and Zhang, J. (2009). User-centric RRM and Optimizable Protocol Design for beyond-4G RANs. In *Proceedings of Wireless World Research Forum Meeting 22 (WWRF22)*, pages 1 – 5.
- [Feng et al. 2005] Feng, N., Mau, S.-C., and Mandayam, N. (2005). Joint Network-Centric and User-Centric Radio Resource Management in a Multicell System. *IEEE Transactions on Communications*, 53(7):1114–1118.
- [Gomes et al. 2009] Gomes, P. H., da Fonseca, N. L. S., and Branquinho, O. C. (2009). Analysis of performance degradation in Radio-over-Fiber systems based on IEEE 802.16 protocol. In *2009 IEEE Latin-American Conference on Communications*, pages 1–6. IEEE.
- [Hills and Friday 2004] Hills, A. and Friday, B. (2004). Radio resource management in wireless LANs. *IEEE Communications Magazine*, 42(12):S9–14.
- [Hurley 2002] Hurley, S. (2002). Planning effective cellular mobile radio networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 51(2):243–253.
- [Le Boudec and Vojnovic 2005] Le Boudec, J.-Y. and Vojnovic, M. (2005). Perfect simulation and stationarity of a class of mobility models. In *Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, pages 2743–2754. IEEE.
- [Sarkar et al. 2006a] Sarkar, S., Mukherjee, B., and Dixit, S. (2006a). Optimum Placement of Multiple Optical Network Units (ONUs) in Optical-Wireless Hybrid Access Networks. In *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 1–3.
- [Sarkar et al. 2006b] Sarkar, S., Mukherjee, B., and Dixit, S. (2006b). Towards Global Optimization of Multiple ONU Placement in Hybrid Optical-Wireless Broadband Access Networks. In *Proceedings of the Joint International Conference on Optical Internet and Next Generation Network*, pages 65–67. IEEE.
- [Wright 1998] Wright, M. (1998). Optimization methods for base station placement in wireless applications. In *Proceedings of the 48th IEEE Vehicular Technology Conference*, volume 1, pages 387–391. IEEE.