



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANA CRISTINA SILVA GOMES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ESTUDO SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES 5G

Campina Grande
2018

ANA CRISTINA SILVA GOMES

ESTUDO SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES 5G

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Engenheira
Eletricista.*

Área de Concentração: Telecomunicações

Orientador:

Professor José Ewerton de Pombo Farias, D. Sc.

Campina Grande
2018

ANA CRISTINA SILVA GOMES

ESTUDO SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES 5G

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Engenheira
Eletricista.*

Área de Concentração: Telecomunicações

Aprovado em / /

Professor Wamberto José Lira de Queiroz, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Convidado, UFCG

Professor José Ewerton de Pombo Farias, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar aos meus pais Jurandir e Josefa, por acreditar, investir e me apoiar em toda a graduação, permitindo assim a conclusão deste trabalho.

Agradeço imensamente ao meu orientador, professor Dr. José Ewerton, pela sua dedicação, suporte e conselhos para realização deste trabalho.

Agradeço também a toda minha família, em especial minha tia, Rosenilda Maria, por sempre estar ao meu lado, me incentivando e nunca medindo esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida.

A todos os meus amigos e colegas de curso, gostaria de externar minha alegria de ter convivido com vocês todos esses anos, em especial Júnior Pereira, Fidelis Júnior, Luiz Paulo, Samara Chaves, Lívyá Nunes, Mariane Sampaio, Grace Colaço, Priscila Nascimento, Alana Santiago, Yanna Gomes e Ivana Crisóstomo, vocês foram essenciais para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada.

Especialmente agradeço, ao meu namorado, amigo e colega de curso Alan Soares, por ser o meu porto seguro, pessoa em que posso recorrer e contar a qualquer hora, sempre me dando força e confiança para enfrentar os obstáculos.

Enfim, agradeço a todos os bons professores, que passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

RESUMO

A quinta geração (5G) dos sistemas de comunicações móveis celulares encontra-se no presente momento em estágio avançado rumo à padronização. Uma vez recebida a chancela da ITU-R, 5G será denominada por IMT-2020 (International Mobile Telecommunications - 2020). Hoje muito já se sabe como será a 5G, inclusive que não representará mais um passo evolutivo em relação à geração anterior de sistemas móveis. O que se demanda da 5G é a realização de um avanço tecnológico bem maior do que aquele verificado em gerações anteriores de sistemas móveis. Várias metas de desempenho para a 5G estão colocadas. Uma delas: a **eficiência energética** da 5G deverá ser **100 vezes maior** do que aquela alcançada por sistemas de quarta geração. O presente trabalho de conclusão de curso investiga aspectos de como tal meta poderá ser alcançada. Um esforço no sentido de quantificar esse parâmetro de desempenho foi realizado. Ficou evidenciado o papel preponderante dos amplificadores de potência em RF usados em estações rádio base na eficiência energética global de uma rede 5G.

Palavras-chave: Eficiência energética, 5G, MIMO maciço, células pequenas, onda milimétrica, D2D, M2M, amplificador de potência de RF, rastreamento de envelope.

ABSTRACT

The fifth generation (5G) of cellular mobile communication systems is currently in the final stages towards standardization. Once it is approved by ITU-R, 5G will be designated as IMT-2020 (International Mobile Telecommunications - 2020). Presently much is already known about how will 5G be, including the fact that 5G will represent not just another evolutive step as compared to the previous generations of mobile systems. What is required for 5G is the realization of a technological breakthrough much bigger than those achieved between previous generations of mobile systems. Several performance targets have been imposed on 5G. One of them: the **energy efficiency** for 5G must be **100 times** that achieved by 4G systems. This work has investigated some aspects concerning how this target can be realized. An effort has been spent in order to quantify energy efficiency for 5G systems. It has become clear the important role of the RF PAs (power amplifiers) used in the radio base stations on the global energy efficiency of a 5G network.

Keywords: Energy efficiency, 5G, massive MIMO, small cells, millimeter wave, D2D, M2M, RF power amplifier, envelope tracking.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Arquitetura proposta para rede 5G.....	14
Figura 2 – Arquitetura básica do sistema de rastreamento de envelope.....	26
Figura 3 – Eficiência Energética com $f(\delta(Pt)) = \log_2(1 + \delta)$ [bits/s] e $\eta = 53,13\%$.	29
Figura 4 – Eficiência Energética com $f(\delta(Pt)) = \log_2(1 + \delta)$ [bits/s] e $\eta = 30\%$	30
Figura 5 – Eficiência Energética com $f(\delta(Pt)) = \log_2(1 - e^{-\delta})$ [bits/s] e $\eta = 53,13\%$	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	Amplificador de Potência
BS	Base Station
BER	Bit Error Rate
D2D	Device-to-device
DC	Direct Current
EE	Eficiência Energética
ET	Envelope Tracking
GEE	Global Efficient Energy
M2M	Machine-to-Machine
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
PAE	Power Added Efficiency
PAPR	Peak to Average Power Ratio
RAN	Radio Access Network
RF	Radiofrequência
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
UWB	Ultra Wideband
VLC	Visible Light Communication

SUMÁRIO

1	Introdução	11
1.1	Objetivos	11
1.2	Motivação	11
2	Fundamentação Teórica	13
2.1	Topologia proposta para redes 5G	13
2.1.1	Células pequenas	15
2.1.2	MIMO Massivo	15
2.1.3	Ondas milimétricas	16
2.1.4	Conectividade de dispositivo a dispositivo (D2D).....	17
2.1.5	Comunicações de máquina para máquina (M2M)	18
2.2	Eficiência energética em redes 5G.....	19
2.2.1	Alocação de recursos	19
2.2.2	Planejamento e Implantação de rede	20
2.2.3	Colheita e Transferência de energia	20
2.2.4	Soluções de Hardware	21
3	Materiais e Métodos.....	23
3.1	Tensão de alimentação controlada pela eficiência.....	24
4	Resultados.....	29
5	Conclusão.....	32
	Referências.....	33

1 INTRODUÇÃO

Constituindo-se parte fundamental da infraestrutura de tecnologias da informação e da comunicação, as redes de telecomunicações do futuro precisarão melhorar os serviços oferecidos e, ao mesmo tempo, melhorar seus desempenhos do ponto de vista do uso de energia.

O consumo de energia tornou-se uma preocupação importante no projeto e na operação de sistemas de comunicações sem fio. O advento da quinta geração de redes móveis, com uma expectativa de um crescimento explosivo do número de dispositivos conectados, reforça tal preocupação.

Os sistemas 5G atenderão a bilhões de dispositivos conectados à rede, fornecendo alta velocidade, redução de latência e um novo modelo de conectividade, englobando não só as comunicações entre pessoas, mas também as comunicações de máquinas.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo sobre eficiência energética em infraestruturas de redes móveis da quinta geração.

Dessa forma, espera-se apresentar abordagens úteis para aumentar a eficiência energética das redes sem fio da quinta geração, adotando uma topologia de referência para a rede, elegendo e especificando detalhadamente os parâmetros físicos envolvidos.

1.2 MOTIVAÇÃO

Tendo em vista o aumento significativo na quantidade de usuários que se conectam às redes móveis sem fio todos os anos, o desejo insaciável das pessoas por um acesso móvel mais rápido à Internet e o avanço das tecnologias em celulares e computadores, exige-se cada vez mais dos sistemas de comunicação, maior capacidade, alto desempenho e disponibilidade para novos serviços.

Contudo, um desafio fundamental é reduzir o consumo de energia nos sistemas de comunicação sem fio. Atualmente, muitos desses sistemas utilizam fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis e maximizam sua capacidade elevando a potência de transmissão. Dessa forma, o crescimento vertiginoso do número de dispositivos resultará em um aumento no consumo de energia que está indiretamente relacionado ao aumento das emissões de dióxido de carbono (CO_2), sendo essa uma grande ameaça ao meio ambiente. Observa-se então, que inicialmente nos sistemas sem fio 4G, a eficiência energética não foi levada em consideração, mas que depois a mesma surgiu como um problema. (WANG, 2014)

Além disso, energia custa caro tanto para os usuários quanto para as operadoras de serviços celulares, que estão passando por uma crescente demanda por maiores taxas de dados, maior mobilidade, maior capacidade de atendimento de usuários, maior eficiência espectral e energética. No entanto, as redes existentes atualmente não são capazes de acomodar os desafios encontrados. Nessa perspectiva, as redes móveis de quinta geração têm sido pensadas para solucionar estes desafios.

No desenvolvimento do trabalho, no Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica que explicita as diversas tecnologias envolvidas na topologia de uma rede móvel da quinta geração e abordagens úteis para aumentar a eficiência energética. Posteriormente, no Capítulo 3, é introduzida a metodologia utilizada e são descritos os parâmetros envolvidos na determinação da eficiência energética. Em seguida, Capítulo 4, é feita uma análise e discussão dos resultados obtidos. O trabalho é finalizado no Capítulo 5, com o encaminhamento das conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TOPOLOGIA PROPOSTA PARA REDES 5G

É necessária uma grande mudança na topologia das redes móveis atuais para que se possa superar os desafios já mencionados, assim como atender aos requisitos do sistema 5G. Atualmente, a arquitetura de redes móveis não leva em consideração se os usuários encontram-se em ambientes fechados ou ao ar livre. Portanto, é necessário que os usuários internos se comuniquem com uma BS (Base Station) externa, desse modo os sinais terão que passar por vários obstáculos, como paredes e janelas, por exemplo, gerando uma elevada perda de penetração, que reduz o nível de potência do sinal, prejudicando assim a eficiência energética das transmissões sem fio.

Logo, uma das propostas para topologia da rede 5G, é separar os ambientes externos e internos, para que dessa maneira seja evitada a perda de penetração através de obstáculos em geral. (WANG, 2014)

Segundo Andrews (2014) e Boccardi (2014), algumas das tecnologias revolucionárias para redes 5G serão:

1. Células pequenas para aumento da eficiência espectral. Com uma arquitetura de rede heterogênea composta por micro células de raio <1 km, pico-células de raio <100 m, fento-células de raio <10 m. Redes com colheita de energia, definidas por *software* e de acesso em nuvem. Sistemas de antenas distribuídas e uma comunicação cooperativa.
2. MIMO Massivo para aumento da eficiência espectral, com um elevado número de antenas.
3. Ondas milimétricas. Comprimentos de onda entre 1 e 10 mm ou seja, frequências centrais entre 30-300 GHz.
4. Conectividade de dispositivo a dispositivo (D2D), com serviços distribuídos e rejeição de interferência avançada.
5. Comunicação máquina para máquina (M2M), com enlaces altamente confiáveis durante praticamente todo o tempo. Operação em tempo real,

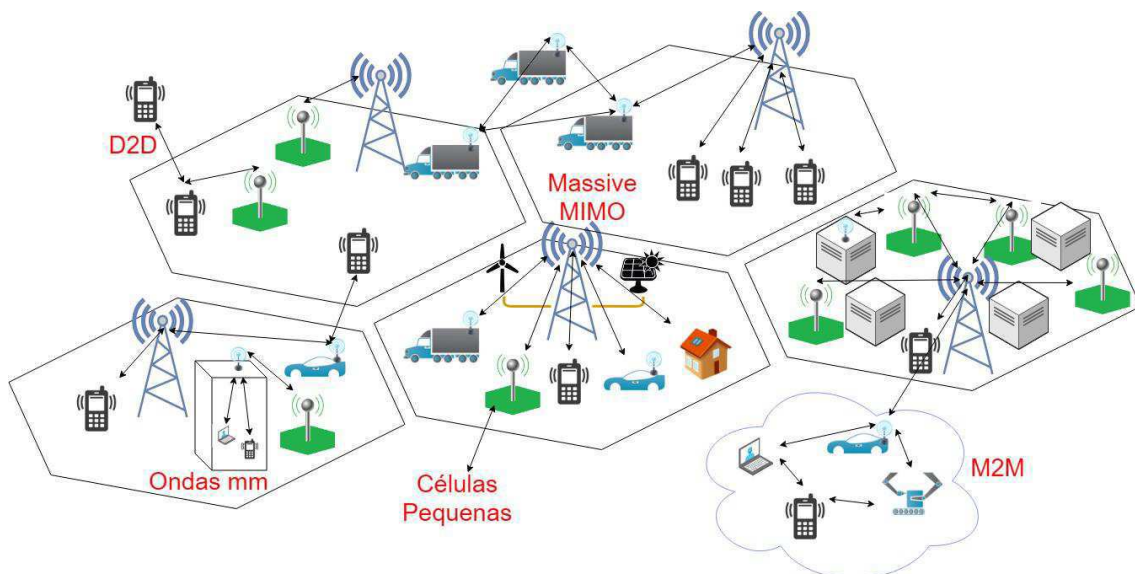
latência muito baixa e baterias com longa vida útil, entre 10 e 15 anos. (MÄMMELÄ, 2015)

Além disso, os serviços 5G irão proporcionar conectividade com uma imensa variedade de aplicativos e serviços que superarão, em grande parte, as capacidades operacionais atuais e que exigem indicadores de alto desempenho. De acordo com o relatório ITU-R M.2083, algumas das principais capacidades das redes 5G serão:

- Máxima taxa de dados (Gbit/s)
- Capacidade de tráfego por área (Mbit/s/m²)
- Densidade de conexão (Número total de dispositivos conectados e/ou acessíveis por unidade de área / km²)
- Latência (ms)
- Eficiência Espectral (bits/s/Hz)
- Mobilidade (km/h)
- Taxa de dados experimentada pelo usuário (Mbit/s)
- Eficiência Energética

Este trabalho tem como ponto central a Eficiência Energética. A arquitetura da rede 5G proposta é ilustrada na Figura 1.

Figura 1- Arquitetura proposta para rede 5G.



Fonte: o próprio autor

2.1.1 CÉLULAS PEQUENAS

As células pequenas possuem estações base pequenas e portáteis que utilizam pouca energia para operar e podem ser colocadas a algumas centenas de metros de distância em todas as cidades. O principal objetivo de seu uso é evitar que a potência dos sinais seja reduzida ao longo de seu percurso. Uma cidade pode ser coberta com milhares dessas células, formando assim uma **rede densa** que age na distribuição e retransmissão dos sinais roteando dados para usuários em qualquer local.

Uma das grandes vantagens das células pequenas é que suas antenas podem ser bem menores do que as antenas tradicionais, quando utilizadas na transmissão de ondas milimétricas, facilitando assim a sua instalação em locais como postes de luz e topos de edifícios. Além disso, esse tipo de estrutura de rede deve fornecer um uso mais direcionado e eficiente do espectro.

O uso de muitas estações implica em uma melhor reutilização das frequências, já que a frequência que uma estação usa para se conectar a um dispositivo em sua pequena área de transmissão pode ser utilizada também por outra estação em uma área diferente para atender outro cliente. (NORDRUM, 2017)

2.1.2 MIMO MASSIVO

Os sistemas MIMO consistem em múltiplas saídas para múltiplas entradas, seguindo o princípio de uma rede sem fio que permite a transmissão e recepção de vários sinais de dados simultaneamente pelo por vários canais.

A maioria das redes MIMO atuais empregam aproximadamente duas ou quatro antenas, em contrapartida, o MIMO massivo é um sistema que possui uma quantidade elevada de antenas. “Por exemplo, a Huawei, a ZTE, e o Facebook demonstraram sistemas MIMO massivos com até 96 a 128 antenas.” (MUNDY, 2017)

A partir do momento que mais antenas são adicionadas tanto no transmissor quanto no receptor, é adicionado também um maior grau de liberdade ao sistema. Dessa forma, é obtida uma melhoria significativa de desempenho nos aspectos de taxa de dados, eficiência espectral e energética.

A principal vantagem de um sistema MIMO massivo em redes móveis sem fio é o aumento da capacidade ergódica sem que haja a necessidade de mais espectro. Assim

como, uma melhoria na cobertura, pois o sistema é sensível a dispositivos que transmitem em bandas de frequências mais altas.

As redes móveis 4G compartilham o mesmo grupo de espectro com todos os usuários localizados nas proximidades, prejudicando seu desempenho em áreas muito povoadas. Por outro lado, as redes MIMO massivas utilizarão a tecnologia de conformação ou moldagem de feixes (*beamforming*). Essa tecnologia foca o sinal em uma direção específica, onde um ou mais dispositivos estão conectados.

Devido à sua grande capacidade de atender vários usuários e dispositivos simultaneamente em áreas bastante povoadas, mantendo um alto desempenho e taxas de dados elevadas, faz com que o sistema MIMO maciço seja uma tecnologia chave para atender os requisitos das redes móveis 5G.

2.1.3 ONDAS MILIMÉTRICAS

De acordo com a arquitetura proposta, os usuários localizados em ambientes internos não necessitarão se comunicar por meio de uma BS externa, mas com pontos de acesso internos, por meio de antenas instaladas no exterior do ambiente, como casas, edifícios e veículos, utilizando tecnologias ideais para comunicações de curto alcance e que forneçam elevada taxa de dados.

“Alguns exemplos dessas tecnologias incluem *Wi-Fi*, pico-células, *ultra wideband* (UWB), comunicações por ondas milimétricas (3-300 GHz) e comunicações por luz visível (VLC) (400-490 THz).” (WANG, 2014)

É importante mencionar que as tecnologias baseadas em ondas milimétricas e VLC utilizam frequências mais altas do que as comumente usadas nas comunicações móveis tradicionais. O problema da utilização dessas ondas em aplicações externas e de longa distância é que elas possuem comprimentos de onda muito pequenos quando comparados às dimensões dos obstáculos encontrados no meio físico. Isto resulta em uma baixa penetração em materiais sólidos. Além disso tais ondas eletromagnéticas são fortemente atenuadas por absorção devido à chuva. (NAGATSUMA, 2016).

No entanto, a utilização das ondas milimétricas em ambientes internos pode aumentar significativamente a taxa de transmissão de dados. Além de ocupar um novo espectro que não é usado nas comunicações móveis tradicionais, solucionando o problema da escassez de espectro.

2.1.4 CONECTIVIDADE DE DISPOSITIVO A DISPOSITIVO (D2D)

Nas redes de celulares convencionais, os dispositivos não são habilitados para comunicarem diretamente entre si e todas as comunicações só acontecem por meio de estações base. Devido à grande demanda por maiores taxas de dados e capacidade, é necessária uma visão não convencional para os sistemas 5G.

Nesse contexto, as comunicações cooperativas representam um novo modelo de comunicação sem fio em que os nós da rede cooperam na retransmissão de informações de modo a obter vantagens da diversidade espacial. (TEHRANI, 2014)

“Na retransmissão os dispositivos em uma rede atuam como estações relay uns para os outros” (TEHRANI, 2014), formando assim uma enorme rede. Isso, é possível por meio da comunicação de dispositivo para dispositivo (D2D), que possibilita a comunicação entre dispositivos próximos, sem nenhum ou pouco envolvimento das estações bases, usando uma largura de banda licenciada.

Entretanto, nas redes móveis atuais, a comunicação D2D não está incluída. Isso em grande parte ocorreu porque as operadoras de telefonia celular acreditavam que essa tecnologia reduziria o custo da prestação de serviços locais. Principalmente, com o surgimento de novas aplicações sem fio, a visão das operadoras em relação à funcionalidade D2D vêm mudando. Atualmente, existem aplicativos que necessitam de comunicação com dispositivos vizinhos, logo com a disponibilidade de tal funcionalidade o custo de comunicação entre dispositivos seria reduzido.

Uma outra vantagem para as operadoras é utilizar a comunicação D2D, como forma de amenizar um possível congestionamento da rede em uma área local, como em grande evento ou centros comerciais, estabelecendo uma transmissão direta entre dispositivos. Além disso, a comunicação D2D também pode ter um papel crucial nos casos de desastres naturais, onde a rede de comunicação é danificada. Pela funcionalidade D2D, uma comunicação urgente pode ser estabelecida rapidamente.

Do ponto de vista de eficiência energética do sistema, as comunicações D2D têm uma grande relevância, já que a potência de transmissão necessária para uma transmissão direta entre dispositivos próximos é pequena se comparada com a potência usada para a comunicação por meio de uma estação base.

2.1.5 COMUNICAÇÃO MÁQUINA PARA MÁQUINA (M2M)

A comunicação máquina para máquina (M2M) é uma nova classe de comunicação sem fio que possibilita uma conectividade universal entre várias máquinas sem nenhum ou com pouco envolvimento humano. Dessa maneira, uma conexão independente propicia o surgimento de várias aplicações M2M inteligentes. Essas aplicações podem fornecer uma melhoraria na qualidade de vida das pessoas em diversas áreas, como saúde, transporte e vigilância.

A comunicação M2M é umas das tecnologias promissoras na arquitetura de rede 5G, por se tratar de uma tecnologia com número elevado de dispositivos conectados e que geralmente transmitem um volume relativamente baixo de dados sem atrasos.

Um requisito importante que deve ser considerado na M2M é a confiabilidade, uma vez que em qualquer comunicação é necessário que os dados sejam transferidos de forma confiável dentro de um determinado intervalo de tempo. Por esse motivo, sistemas usados para controle crítico, como segurança, foram dominados pela conectividade por fio, em grande parte porque os enlaces sem fio não ofereciam o mesmo grau de confiança. “À medida que esses sistemas se transportam de rede fixa para *wireless*, torna-se necessário que o enlace sem fio seja operado de forma confiável praticamente o tempo todo ” (BOCCARDI, 2014). Um exemplo característico é a conectividade, em que a segurança do trânsito pode ser melhorada por meio da entrega oportuna de mensagens críticas.

As comunicações M2M implicam em milhões de dispositivos diferentes (desde sensores a carros) conectados diretamente em diversas aplicações, como na medicina, em que o monitoramento remoto de pacientes pode ser feito por meio de sensores que enviam dados do paciente para o médico em tempo real. Comparando a M2M com as comunicações humano a humano, existem diversas vantagens nas comunicações M2M, porém alguns fatores devem ser considerados, sendo um deles, a Eficiência Energética (EE).

A maioria dos dispositivos usados nas comunicações M2M utilizam baterias para seu funcionamento, e muitas vezes a recarga ou substituição dessas baterias não são comuns ou são impossíveis. Então, pode-se notar que é importante ter baixo consumo de energia nas comunicações M2M. Uma maneira de fazer com que o sistema dure o maior tempo possível é maximizando o tempo de vida útil das baterias, que pode chegar a 15 anos nos sistemas M2M. (MÄMMELÄ, 2015)

2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES 5G

Novas abordagens para topologia e operação das redes sem fio serão fundamentais para que futuramente não ocorra uma crise energética. O ponto principal, e consensual entre pesquisadores, comparando com a rede 4G, é que a rede 5G irá atingir 1000 vezes a capacidade do sistema e 100 vezes a eficiência energética.

Com base nesses fatos é introduzida a métrica eficiência energética expressa em bits-por-joule, que é “definida como a quantidade de informação que pode ser transmitida de forma confiável por Joule de energia consumida, sendo um indicador de desempenho chave para redes 5G.” (BUZZI, 2016)

As abordagens úteis para aumentar a eficiência energética das redes sem fio podem ser divididas em quatro classes da seguinte forma:

- Alocação de Recursos
- Planejamento e Implantação de redes
- Colheita e Transferência de energia
- Soluções em Hardware

2.2.1 ALOCAÇÃO DE RECURSOS

Uma nova visão surgiu a partir do momento em que a eficiência energética passou a ser considerada um indicador de desempenho das redes 5G. Os sistemas de comunicações anteriores eram otimizados somente para aumentar a quantidade de informação que é transmitida de forma confiável, agora são otimizados para aumentarem a quantidade de informação que é transmitida de forma confiável por Joule de energia consumida.

No sentido amplo, pode-se definir a eficiência de um sistema qualquer como a relação entre o ganho obtido pela utilização de determinado recurso e o seu custo correspondente. Aplicando essa definição a um enlace de comunicação sem fio, o custo “corresponde à quantidade total de energia consumida, na qual inclui a energia irradiada, a perda de energia ocasionada pelo uso de amplificadores de potência, assim como a energia dissipada nos demais circuitos do sistema.” (BUZZI, 2016)

O ganho de um sistema pode ser expresso por meio de algumas funções de desempenho, que são utilizadas com objetivo de medir a quantidade de dados transmitidos de maneira confiável em um intervalo de tempo T.

Vale ressaltar que a eficiência energética abordada refere-se apenas a um único enlace de comunicação. Ao se considerar toda rede de comunicação, a relação entre a soma de todos os ganhos individuais para os diferentes enlaces e a energia total consumida na rede é definida como **Eficiência Energética Global (GEE)**.

2.2.2 PLANEJAMENTO E IMPLANTAÇÃO DE REDES

Muitas tecnologias foram propostas para o planejamento, implantação e operação de redes 5G.

As redes heterogêneas densas são uma das propostas, essa configuração permite organizar todas as porções de rede diferentes para atender à grande variedade de recursos em uso, aumentando a quantidade de nós de infraestrutura em uma área, que podem ir desde BSs macro até fento-células instaladas e ativadas de acordo com a demanda, formando assim uma rede com uma topologia de rede irregular.

Contudo, é muito difícil prever de modo determinístico a localização dos nós ao modelar as redes heterogêneas densas. Em vez disso, são usadas variáveis aleatórias com uma determinada distribuição de probabilidade para modelar os locais dos nós.

Outra proposta é a tecnologia MIMO massivo, no que diz respeito à eficiência energética. O MIMO massivo tem mostrado resultados bastante satisfatórios, ao “reduzir a potência transmitida por um fator proporcional à raiz quadrada do número de antenas implantadas, mantendo a taxa de dados inalterada.” BUZZI (apud NGO, 2013)

As técnicas de navegação serão outra proposta chave nas redes 5G, fundamental para aumentar a capacidade e a eficiência energética das futuras redes. Em particular, podem ser destacadas as seguintes técnicas: Comunicação de dispositivo para dispositivo (D2D), comunicações de máquina para máquina (M2M), ondas milimétricas e Comunicações por luz visíveis (VLC).

2.2.3 COLHEITA E TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA

Uma possibilidade que atrai a atenção na operação das redes 5G é a colheita de energia do meio ambiente, convertendo-a em energia elétrica. Essa proposta permitirá

que as estações bases, dispositivos terminais, elementos de rede e a rede sejam alimentadas por fontes de energias renováveis. Nesse contexto, destaca-se a colheita de energia do meio de transmissão e a colheita de energia RF.

A colheita de energia do meio ambiente é uma forma sustentável de manter a operação de redes, porém fontes de energia como sol e ar são caracterizadas por processos estocásticos, por não se ter o conhecimento prévio da quantidade de energia disponível em qualquer momento, o que pode ocasionar picos ou quedas de energia em determinados instantes.

Da mesma forma ocorre com a colheita de energia de radiofrequência, já que a energia eletromagnética também não é determinística, sendo, portanto, uma variável aleatória no sistema. Porém, existe uma possibilidade de amenizar os efeitos da aleatoriedade para as colheitas RF. “A ideia é combinar a colheita de energia com técnicas de transferência de energia sem fio, permitindo assim que os nós de rede compartilhem energia uns com os outros.” BUZZI (apud LIU, 2013)

Logo, pode-se perceber que aleatoriedade nas colheitas de energia é um grande desafio a ser enfrentado para sua implantação nas redes 5G.

2.2.4 SOLUÇÕES EM HARDWARE

A maioria dos problemas associados ao consumo de energia, terão soluções por meio de hardwares eficientes em termos de consumo de energia, o que engloba uma ampla categoria de estratégias que compreendem o projeto eficiente de equipamentos RF, o uso de estruturas de transmissor/receptor simplificados e, também, um novo projeto de rede baseado em uma arquitetura de acesso de rádio (RAN) baseada em nuvem.

Segundo Buzzi (2016), a implementação de uma RAN baseada em nuvem é uma tecnologia fundamental para que as redes 5G sejam mais eficientes em termos energéticos. Essa tecnologia segue o princípio de que muitas das funções que atualmente são executadas na BS podem ser transferidas para um centro de dados remoto e implementadas via software.

Também foi dada atenção ao projeto eficiente de energia dos amplificadores de potência RF por meio de técnicas que visam o aprimoramento da sua eficiência. Entre as técnicas existentes pode-se destacar o rastreamento de envelope que estabelece um fornecimento dinâmico de tensão aos amplificadores, resultando assim em um aumento

de sua eficiência. Mais adiante neste trabalho são abordados detalhes a respeito dessa técnica.

Para as comunicações por ondas milimétricas, dada a grande quantidade de elementos de antena necessários e da grande largura de banda, sua eficiência energética será crucial. Além disso, “é essencial estabelecer uma relação de compromisso entre ter muitas células pequenas ou poucas macrocélulas dado seus consumos de energia muito diferentes.” (ANDREWS, 2014)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Segundo (I, 2014) pode-se definir o consumo total de potência de um sistema como a soma da potência transmitida P_t , com a potência referente ao consumo de energia nos circuitos RF P_c , isto é,

$$P = \frac{P_t}{\eta} + P_c, \quad (1)$$

em que η é a eficiência do amplificador de potência RF.

Em uma BS convencional, o consumo de energia dos amplificadores é proporcional à carga de tráfego e ao tipo de BS. Para uma BS macro, os amplificadores podem corresponder a 60% do consumo de energia total, enquanto para nós de baixa potência o consumo de energia chega a ser inferior a 30%.

Tendo em vista o consumo de energia dos circuitos, em componentes como filtros, misturadores e sintetizadores, assim como em operações de banda base, como conversão digital, pré-codificação, combinação de receptores, codificação/decodificação de canal e estimativa de canal, a eficiência energética precisa ser definida como quantidade de informação transmitida por unidade de energia.

Uma primeira abordagem para estabelecer a quantidade de informação transmitida é usando a capacidade do sistema em um intervalo de tempo T, definida como,

$$TB \log_2(1 + \delta), \quad (2)$$

em que B representa a largura de banda de comunicação e δ a relação sinal-interferência-ruído (SINR) do sistema.

No entanto, essa abordagem não inclui a probabilidade de erro de bit (BER) existente em uma comunicação real. Por este motivo, outra função é proposta,

$$TR \log_2(1 - e^{-\delta}), \quad (3)$$

em que R é a taxa de transmissão e $(1 - e^{-\delta})$ uma aproximação da BER (Bit Error Rate).

Uma característica comum nestas métricas apresentadas é que elas dependem da SINR. Então, pode-se atribuir uma função genérica f dependente da SINR, a ser especificada de acordo com o sistema particular considerado. Finalmente, pode-se definir eficiência energética como a quantidade de informação que pode ser transmitida de forma confiável por Joule de energia consumida:

$$\begin{aligned} EE &= \frac{Tf(\delta)}{T\left(\frac{P_t}{\eta} + P_c\right)} \\ &= \frac{f(\delta)}{\left(\frac{P_t}{\eta} + P_c\right)}. \end{aligned} \quad (4)$$

3.1 TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO CONTROLADA PELA EFICIÊNCIA

O amplificador de potência (AP) é utilizado para amplificar o sinal para um nível de potência de saída desejado. Em uma estação base, os APs são responsáveis pela maior parte do consumo de energia DC de todo o sistema, sem mencionar os problemas de desempenho relacionados ao aquecimento/dissipação nos circuitos. Então, surge a necessidade de projetar APs eficientes em termos de energia.

A eficiência de um AP pode ser definida em termos de balanço energético. Para se ter a maior eficiência, a dissipação de calor deve ser mínima. Logo, a eficiência de dreno pode ser representada como a razão da potência de saída RF pela potência de alimentação contínua,

$$\eta_{DE} = \frac{P_{out}}{P_{DC}}. \quad (5)$$

Na eficiência total também é considerada a potência do sinal de entrada do amplificador, acrescentada à potência contínua fornecida ao circuito,

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{DC} + P_{in}}. \quad (6)$$

Outra maneira de representar a eficiência é levar em consideração a potência RF que é acrescentada ao sinal. Esta abordagem torna-se particularmente adequada quando o ganho do AP é relativamente baixo. Sendo definida como eficiência de potência acrescentada (PAE),

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}}. \quad (7)$$

Em geral, nos sistemas de comunicação, a linearidade é um ponto muito importante porque os sinais não devem ser distorcidos durante a transmissão e nem causar interferência em canais adjacentes. Normalmente a maior eficiência do amplificador de potência é próxima da potência de saída máxima, ou seja, da saturação. Porém, para evitar os efeitos não-lineares o PA é forçado a operar em uma região mais linear.

Segundo (BRÄCKLE, 2014), as classes de AP tradicionais (A, AB e B) apresentam eficiências até 50% no caso de um amplificador de classe A e 78% para um amplificador de classe B. Porém essa eficiência máxima é atingida em um único nível de energia, geralmente próximo da saturação, ocasionando distorção nos sinais. Uma maneira de diminuir essa distorção é usando técnicas de linearização. Todavia, para evitar esta distorção é necessário operar o AP em níveis de potência de recuo, ou *back-off*, mas isso, por sua vez, diminui significativamente a eficiência. Assim, métodos para aumentar a eficiência em níveis de recuo foram desenvolvidos.

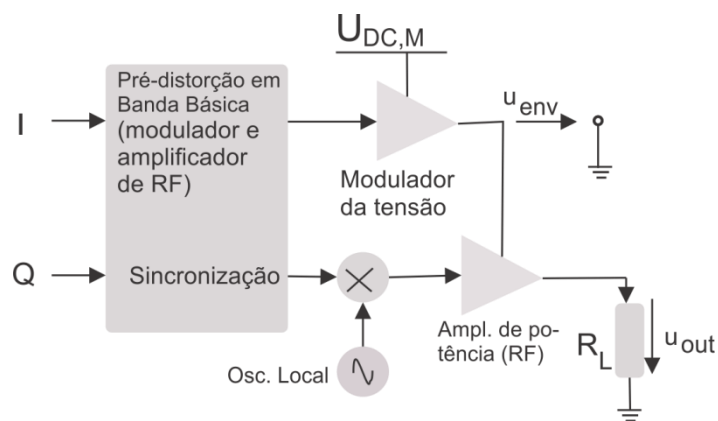
Nos sistemas sem fio da quinta geração (5G), as frequências das portadoras e a largura de banda do sinal devem aumentar significativamente em comparação as alocações de banda atuais, e seus sinais de alta capacidade resultam em uma alta relação de potência de pico- potência média (PAPR), que pode fazer com que o amplificador de potência opere dentro de uma região não linear. “Todos esses fatores estão contribuindo para superar os desafios de aumentar a eficiência do AP do transmissor.” (POPOVIC, 2017)

Têm sido propostas várias técnicas de aprimoramento da eficiência para os APs RF sem afetar a linearidade, tais como, a arquitetura Doherty e arquitetura Outphasing. A arquitetura Doherty possui vantagens em relação a Outphasing, por apresentar uma topologia mais simples, já que não é necessário separar o sinal em múltiplos sinais modulados em fase e amplitude, aumentando assim o número de componentes necessários e portanto seu custo. Entretanto, outra possibilidade de melhorar a eficiência dos APs é pelo rastreamento de envelopes.

Atualmente existe uma diversidade de aparelhos na faixa de frequência de microondas de até 2 GHz, que possui como elemento a modulação de fonte de alimentação ou rastreamento de envelope (Envelop Tracking). O diagrama de blocos da Figura 2 representa a arquitetura básica do sistema ET.

“A ideia básica do ET é adaptar dinamicamente a tensão de alimentação do AP ao nível de potência de saída instantânea. Com isso, o consumo de energia DC é reduzido sem afetar a potência de saída de RF, o que resulta em maior eficiência.” BRÄCKLE (2014).

Figura 2- Arquitetura básica do sistema de rastreamento de envelope



Fonte: o próprio autor

Com o rastreamento de envelopes, a tensão de alimentação aplicada ao amplificador é ajustada continuamente, de modo a que o amplificador funcione sempre no pico de sua eficiência, em contraste com técnicas de projeto de amplificador mais convencionais em que o fornecimento de tensão de alimentação fixa funciona de forma mais eficiente somente quando se opera em níveis de potência de recuo.

No entanto, a eficiência geral do sistema inclui perdas tanto no amplificador quanto no modulador de tensão que é responsável por fornecer dinamicamente a tensão de alimentação adequada à potência de saída instantânea, de modo que o AP sempre opere na região de mais alta eficiência. Dessa forma, segundo (BRÄCKLE, 2014) para obter um nível elevado de eficiência no AP, a eficiência do modulador de tensão η_{mod} deve ser a mais alta possível. A eficiência geral do sistema pode ser calculada por,

$$\eta_{tot} = \eta \times \eta_{mod}. \quad (8)$$

Logo, uma alta eficiência do modulador de tensão é muito importante para assim obter alta eficiência usando ET. Mais recentemente, demonstrou-se um ET com maior largura de banda I/Q de 100 MHz para um de banda X com um modulador de envelope com 70% de eficiência POPOVIC (apud KIMBALL, 2015).

Outro ponto importante é que a largura de banda do modulador precisa ser suficientemente grande para seguir o envelope do sinal de RF.

Devido ao aumento de complexidade assim como uma necessidade de linearização adicional, todas as abordagens que incluem rastreamento de envelope devem ter um ganho de desempenho grande para compensar a maior complexidade e custo. Foram apresentados resultados de experimentos em POPOVIC (2017) em que foi comparado o desempenho para o mesmo AP de nitreto de gálio (GaN) em dois casos, um utilizando um fornecimento constante de tensão (32 V para um processo GaN de 0,25 μm) e o outro utilizando um fornecimento dinâmico da tensão.

Os resultados estão resumidos na Tabela 1. Observa-se que no caso em que o fornecimento da tensão foi dinâmico o resultado obtido para PAE foi de 52,5% e eficiência de dreno de 75,9%, em comparação com 30% para o caso de tensão constante.

Observando o calor dissipado para os dois casos, pode-se tirar uma conclusão interessante. A dissipação do AP é reduzida de 9,8 W para apenas 2,7 W, reduzindo assim também os requisitos de resfriamento e fazendo com que o transistor no AP opere com 72,5% menos de calor.

Tabela 1- Comparação de desempenho para tensões de alimentação constante e variável em um PA GaN.

5 MHz WCDMA PAPR= 7 dB	Tensão de alimentação constante	Tensão de alimentação variável
Pico/média Pout	40W/8W	40W/8W
Eficiência do modulador	–	70%
Eficiência do AP (2,14 GHz GaN)	30%	75,9%
PAE	30%	52,5%
Potência consumida pelo transmissor	28,3W	16,2W
Dissipação de calor AP	9,8W	2,7W

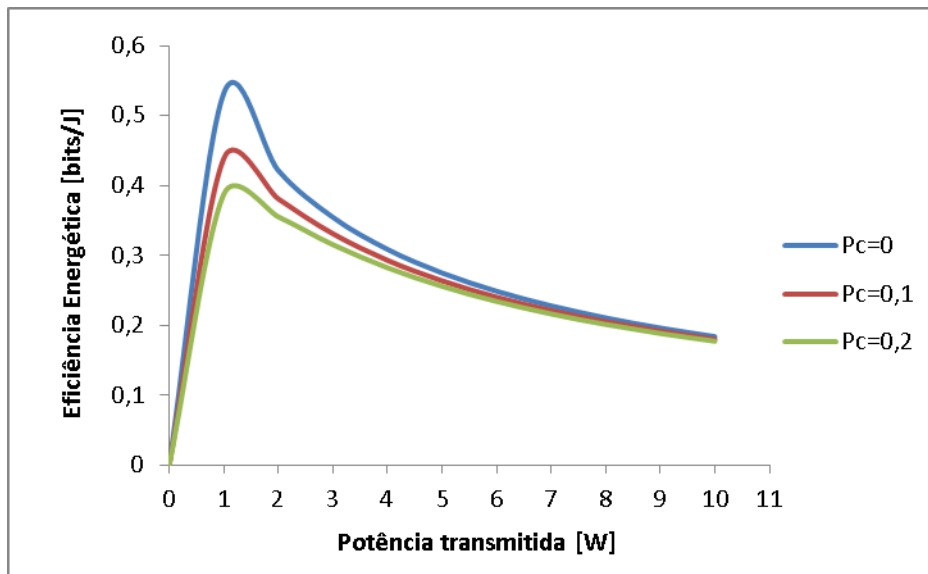
Fonte: (POPOVIC, 2017)

A eficiência total obtida com uso do fornecimento dinâmico de tensão é calculada por meio da Equação (8) e seu valor corresponde a 53,13%, resultando assim em um aumento de 77,1% na eficiência total do AP.

4 RESULTADOS

Na Figura 3 é apresentado o gráfico da eficiência energética em função da potência de transmissão, com $\eta = 53,13\%$ obtido com o uso de fornecimento dinâmico de tensão no amplificador de potência.

Figura 3- Eficiência Energética com $f(\delta(P_t)) = \log_2(1 + \delta)$ [bits/s] e $\eta = 53,13\%$



Fonte: o próprio autor

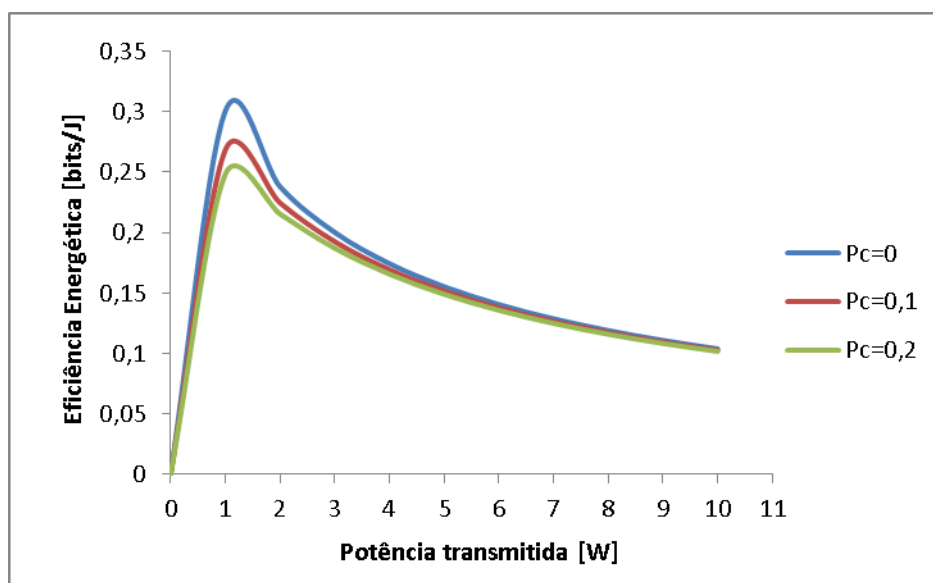
Observa-se na Figura 3 que a eficiência energética diminui com o aumento do consumo de potência pelos circuitos do sistema (P_c). Como resultado, devem ser aprimoradas várias técnicas com intuito de reduzir ao máximo essas perdas, para que desse modo possa-se maximizar a eficiência energética. O consumo de potência pelos circuitos geralmente é modelado como uma constante, sendo independente da taxa de dados.

Verifica-se também que a eficiência energética aumenta até um ponto máximo e depois tende para zero. Esta é a característica fundamental que permite economizar energia com a alocação de recursos. Em contrapartida às medidas tradicionais de desempenho, que geralmente são otimizadas utilizando toda a potência disponível, na eficiência energética, o nível de potência de transmissão que permite sua maximização é, geralmente, inferior ao máximo de potência viável. Por exemplo, na Figura 3, a eficiência

energética é maximizada em 1,2 W, logo o transmissor usará exatamente esse nível de potência, mesmo que seja inferior ao máximo de potência viável. Este nível de potência ideal representa o melhor equilíbrio entre a obtenção de uma comunicação rápida e confiável e a economia de energia.

De modo a observar a influência dos amplificadores de potência RF na eficiência energética, na Figura 4, nela é apresentado o gráfico da eficiência energética em função da potência de transmissão, com $\eta = 30\%$ obtido com o uso de fornecimento constante de tensão no amplificador de potência.

Figura 4- Eficiência Energética com $f(\delta(P_t)) = \log_2(1 + \delta)$ [bits/s] e $\eta = 30\%$



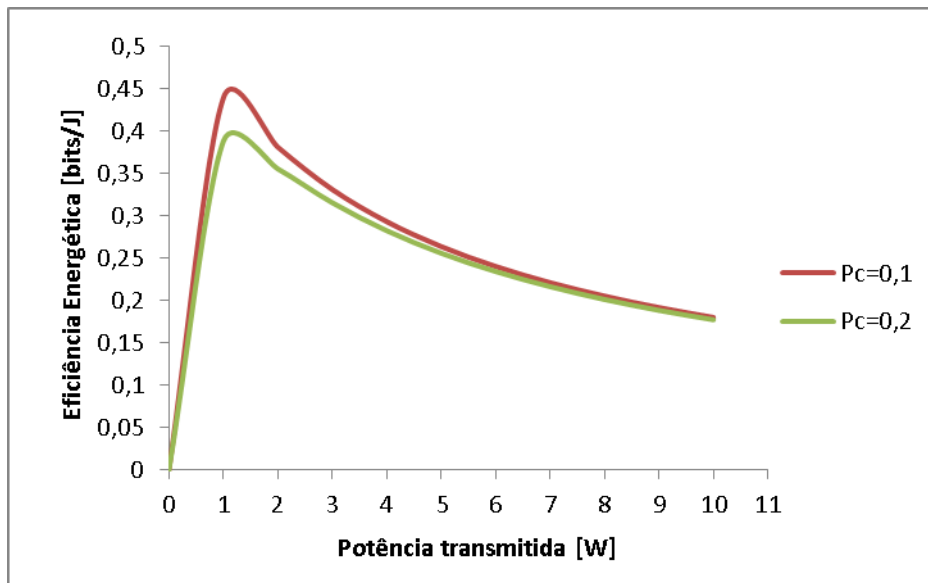
Fonte: o próprio autor

Verifica-se que o ponto de maximização de eficiência energética em 1,2 W corresponde à 0,27 bits/J, quando $P_c = 0,1$. Resultando assim em uma redução de 67% na eficiência energética, se comparado com a Figura 1, na qual para este mesmo ponto foi obtido um valor de eficiência energética de 0,45 bits/J.

Logo, pode-se comprovar a importância da eficiência dos amplificadores de potência RF na maximização da eficiência energética.

Nos dois casos anteriormente analisados, foi utilizada a métrica de capacidade do sistema para fornecer a quantidade de informação transmitida. Na Figura 4, é apresentado o gráfico da eficiência energética em função da potência de transmissão, com $\eta = 53,13\%$ incluindo a probabilidade de erro de bit (BER) existente em uma comunicação real. Ao comparar com a Figura 1, observa-se que elas apresentam eficiências similares.

Figura 5- Eficiência Energética com $f(\delta(P_t)) = \log_2(1 - e^{-\delta})$ [bits/s] e $\eta = 53,13\%$



Fonte: o próprio autor

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma discussão sobre o consumo de energia nas redes de comunicações móveis de quinta geração (5G). A investigação concentrou-se no desempenho das redes 5G quanto ao aspecto **eficiência energética**. As principais conclusões são:

1. A arquitetura de rede 5G permitirá a separação dos ambientes internos e externos, com algumas tecnologias-chave potenciais que podem ser implantadas para satisfazer os requisitos de desempenho esperados, tais como células pequenas, ondas milimétricas, MIMO massivo, D2D e M2M.
2. A eficiência energética é um dos requisitos-chaves para redes 5G, logo abordagens úteis para aumentá-la são apresentadas, como o aumento da quantidade de informação que é transmitida de forma confiável por Joule de energia consumida, redes heterogêneas densas, técnicas de navegação, colheita de energia do meio ambiente e de RF, assim como soluções em hardware.
3. A partir da definição dada para eficiência energética, é constatado a importância de possuir na rede amplificadores de potência RF com alta eficiência para assim maximizar a eficiência energética.
4. A modulação de fonte de alimentação ou rastreamento de envelope (ET) mostrou-se bastante eficaz no aumento da eficiência nos amplificadores de potência RF, chegando a aumentar 77,1% da sua eficiência em relação aos APs tradicionais, o que pode resultar em um aumento de 67% na eficiência energética de um enlace.

REFERÊNCIAS

- 5G INFRASTRUCTURE PUBLIC PRIVATE PARTNERSHIP. *The next generation of communication networks and services*. Disponível em: <<https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2015/02/5g-Vision-Brochure-v1.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2018.
- ANDREWS, J. G. et al. What Will 5G Be?. *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, v. 32, n. 6, p. 1065-1082, jun. 2014.
- BHUSHAN, N. et al. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G. *IEEE Communications Magazine*, v. 52, n. 2, p. 82 - 89, fev. 2014.
- BOCCARDI, F. et al. Five Disruptive Technology Directions for 5G. *IEEE Communications Magazine*, v. 52, n. 2, p. 74 - 80, fev. 2014.
- BRÄCKLE, A. et al. *Power Supply Modulation for RF Applications*. Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International, set. 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6397531/>>. Acesso em: 14 fev. 2018.
- BUZZI, S. et al. A Survey of Energy-Efficient Techniques for 5G Networks and Challenges Ahead. *IEEE Journal On Selected Areas In Communications* v. 34, n. 4, p. 697-709, abr. 2016.
- HUNERLI, HALIL VOLKAN. *A high efficiency and wideband doherty power amplifier for 5g*. 2017. 57p. Dissertação de Mestrado - Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2017.
- I, C. et al. Toward green and soft: a 5G perspective. *IEEE Communications Magazine*, v. 52, n. 2, p. 66 - 73, fev. 2014.
- MATERNIA, M. et Al. *5g ppp use cases and performance evaluation models*. Disponível em: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2014/02/5G-PPP-use-cases-and-performance-evaluation-modeling_v1.0.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2017.
- MÄMMELÄ, Aarne. *Energy efficiency in 5g networks*. Disponível em: <<https://www.irit.fr/networking2015/files/keynote-Mammela.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2017.
- MUNDY, JON. *What is massive mimo technology?*. Disponível em: <<https://5g.co.uk/guides/what-is-massive-mimo-technology/>>. Acesso em: 07 dez. 2017.
- NAGATSUMA, T. et al. “Advances in terahertz communications accelerated by photonics”. *Nature Photonics* , v. 10, p. 371–379, 2016.
- NORDRUM, AMY et Al. *5g bytes: small cells explained*. Disponível em: <<https://spectrum.ieee.org/video/telecom/wireless/5g-bytes-small-cells-explained>>. Acesso em: 11 dez. 2017.
- POPOVIC, Zoya. Amping Up the PA for 5G. *IEEE Microwave Magazine*, v. 18, n. 3, p. 137-149, abr. 2017.
- TEHRANI, M. N. et al. Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions. *IEE Communications Magazine*, v. 52, n. 5, p. 86 - 92, mai. 2014.
- WANG, C. et al. Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks. *IEE Communications Magazine*, v. 52, n. 2, p. 122-130, fev. 2014.
- WU, Q. et al. An Overview of Sustainable Green 5G Networks. *IEEE Wireless Communications*, v. 24, n. 4, p. 72 - 80, ago. 2017.
- ZAPPONE, Alessio; JORSWIECK, Eduard. *Energy Efficiency in Wireless Networks via Fractional Programming Theory*. *Foundations and Trends in Communications and Information Theory*, v. 11, n. 3,

p. 185-396, jun. 2015. Disponível em: <<https://tu-dresden.de/ing/elektrotechnik/ifn/tnt/ressourcen/dateien/Now-Tutorial-EE?lang=en>>. Acesso em: 25 jan. 2018.