



MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO

**ANÁLISE DE TÉCNICAS DE SLEEP MODE COMO MÉTODO DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA NO CONTEXTO DAS REDES CELULARES VERDES**

Ismael Ithalo Barbosa Pinto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Faculdade de Tecnologia

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO

**ANÁLISE DE TÉCNICAS DE SLEEP MODE COMO MÉTODO DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA NO CONTEXTO DAS REDES CELULARES VERDES**

Ismael Ithalo Barbosa Pinto

*Monografia de Projeto Final de Graduação submetida ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Redes
de Comunicação*

Banca Examinadora

Prof. Paulo Henrique Portela de Carvalho, _____

EnE/UnB

Orientador

Prof. Leonardo Aguayo, _____

EnE/UnB

Examinador Interno

Prof. Robson Domingos Vieira, _____

EnE/UnB

Examinador Interno

RESUMO

As técnicas de economia de energia hoje são um elemento fundamental da arquitetura das redes móveis, uma vez que a quantidade de usuários e dispositivos conectados tem crescido a uma velocidade impressionante, elevando tanto o consumo energético da rede quanto os custos operacionais decorrentes. Além disso, a temática de economia de energia e redução das emissões de gases estufa está em pauta em praticamente todas as áreas, dado o contexto onde parte da atenção de todo o globo está voltada para causas como o aquecimento global e outros impactos climáticos. Inserido nesse contexto, o campo de estudo das Redes Celulares Verdes aborda técnicas e tecnologias que promovem tanto eficiência energética quanto sustentabilidade nas redes celulares. Este trabalho tem como foco uma dessas técnicas, denominada *Sleep Mode*, onde determinados componentes da arquitetura da rede móvel são desligados ou colocados em um modo de espera profunda, com o propósito de economizar energia. O trabalho apresenta um modelo simulado através da ferramenta NS-3, que permite o desenvolvimento e avaliação de técnicas de *Sleep Mode*, implementando um cenário base que utiliza a tecnologia LTE, as ferramentas necessárias para coletar os parâmetros de consumo energético e qualidade do serviço da rede, um modelo de como avaliar e comparar esses parâmetros e uma função de *Sleep Mode* base para validação dos resultados.

Palavras-chave: Redes Celulares Verdes, Sleep Mode, Projeto EARTH, NS-3, LTE, Eficiência Energética.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	CONTEXTO GERAL	1
1.2.	OBJETIVOS.....	3
1.3.	ESTRUTURA DOCUMENTAL	4
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1.	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O SETOR TIC.....	5
2.2.	REDES CELULARES VERDES	7
2.2.1.	DESLIGAMENTO SLETIVO DE COMPONENTES.....	10
2.2.2.	REDES HETEROGÊNEAS	14
2.2.3.	PROJETO EARTH	16
2.3.	TECNOLOGIAS VIABILIZADORAS	20
2.3.1.	GERAÇÕES DE REDES MÓVEIS PASSADAS.....	20
2.3.2.	4G E A VIRTUALIZAÇÃO DA REDE	21
2.3.3.	5G E A DESAGREGAÇÃO DA RAN.....	24
2.3.4.	OPEN RAN	27
3.	FERRAMENTAS E IMPLEMENTAÇÕES.....	30
3.1.	NS-3.....	30
3.1.1.	ENERGY FRAMEWORK	31
3.1.2.	MÓDULO LTE.....	32
3.2.	AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	33
3.3.	MÓDULO DE ENERGIA LTE.....	36
3.4.	FUNÇÃO DE SLEEP MODE	38
4.	RESULTADOS.....	40
5.	CONCLUSÕES E PRÓXIMOS PASSOS.....	44
6.	BIBLIOGRAFIA	46

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Siglas

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
ASM	<i>Sleep Mode Avançado</i>
CP	<i>Control Plane</i>
CSG	<i>Closed Subscriber Group</i>
CU	<i>Central Unit</i>
DRX	<i>Discontinuous reception</i>
DTX	<i>Discontinuous transmission</i>
DU	<i>Distributed Unit</i>
E3F	<i>Energy Efficiency Evaluation Framework</i>
eMBB	<i>enhanced Mobile Broadband</i>
eNB	<i>Evolved Node B</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
GHG	<i>Green House Gases</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HetNets	<i>Heterogeneous Networks</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
ICT	<i>Information and Communications Technology</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LESS	<i>Low Energy Scheduler Solution</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MBH	<i>Mobile Backhaul</i>
MIMO	<i>Multiple Input, Multiple Output</i>
MIMO	<i>Multiple-input and multiple-output</i>
mMTC	<i>massive Machine-Type Communications</i>
NF	<i>Network Functions</i>
NFV	<i>Network Functions Virtualization</i>
NR	<i>New Radio</i>
NV	<i>Network Virtualization</i>
O-CU	<i>Open-Central Unit</i>

O-DU	<i>Open-Distributed Unit</i>
O-RU	<i>Open-Radio Unit</i>
OFDMA	<i>Orthogonal frequency-division multiple access</i>
OPEX	<i>Operational expenditure</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RICs	<i>RAN Intelligent Controllers</i>
RN	<i>Relay Nodes</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RSRP	<i>Reference Signal Received Power</i>
RSRQ	<i>Reference Signal Received Quality</i>
RU	<i>Radio Unit</i>
SDGs	<i>Sustainable Development Goals</i>
SDN	<i>Software Defined Network</i>
SM	<i>Sleep Mode</i>
UE	<i>User Entity ou User Equipment</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
UP	<i>User Plane</i>
URLLC	<i>Ultra Reliable and Low Latency Communications</i>
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i>
WCDMA	<i>Wide-Band Code-Division Multiple Access</i>

1. INTRODUÇÃO

O mundo das telecomunicações está sempre em constante evolução, e com os avanços tecnológicos em questão de máquinas autônomas, da quantidade de dispositivos conectados, e dos requisitos cada vez mais precisos dos serviços e aplicações de rede, essa evolução se faz mais do que necessária. Contudo, ao mesmo tempo que o campo das telecomunicações tem crescido de maneira tão rápida, as consequências ambientais desse progresso têm crescido junto. Este capítulo visa estabelecer uma ponte entre a evolução das gerações de comunicações móveis, as tecnologias emergentes nesse cenário e o fator de impacto climático decorrente, de maneira a introduzir o tema central do trabalho. Dessa forma, a distribuição do capítulo se resume a uma contextualização geral, seguida da apresentação dos objetivos gerais e específicos e por último uma descrição da estrutura do trabalho como um todo.

1.1.CONTEXTO GERAL

As grandes inovações de cada nova geração de comunicações móveis transformaram o mundo da tecnologia em suas respectivas épocas. A primeira geração, ou 1G, possibilitou ligações de voz entre aparelhos sem fio, porém inicialmente eram equipamentos de alto custo e ainda sem uma padronização em relação à faixa de frequência utilizada [1].

A segunda geração foi responsável pela democratização do acesso às redes celulares, e isso foi possível devido principalmente ao GSM (*Global System for Mobile Communications*), um padrão de telefonia móvel que possibilitou uma maior compatibilidade entre os dispositivos. E diferente da primeira geração, que é uma tecnologia analógica, o 2G já era uma tecnologia digital.

A terceira geração trouxe para os aparelhos de telefonia móvel a consolidação do acesso à internet. A tecnologia utilizada no 3G, UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), é capaz de alcançar uma taxa de 2 Mbps, um aumento considerável levando em consideração os 97 kbps da geração anterior.

A quarta geração trouxe um incremento significativo na capacidade de transmissão de dados, possibilitando atividades que antes eram inviáveis nas redes móveis, como *streaming* de vídeo em alta definição, jogos online para aparelhos celulares e vídeo conferências estáveis. O LTE (*Long Term Evolution*), a tecnologia que permitiu essa evolução, foi a primeira a apresentar características de virtualização em sua infraestrutura, algo que tem fundamentado o caminho para as próximas gerações.

A última lançada até então, o 5G, ou quinta geração de comunicações móveis, se propõe a conectar uma quantidade muito maior de dispositivos em uma rede mais robusta e personalizada, abrangendo tecnologias de conexão de dispositivos em massa como IoT (*Internet of Things*), aplicações de baixa latência como comunicação V2V (*Vehicle-to-Vehicle*) e usos que necessitam de elevadas taxas de transmissão como *streaming* de vídeo em 4K. O NR (*New Radio*), tecnologia por trás do 5G, consegue implementar uma rede completamente flexível e com características significativamente distintas por conta de sua estrutura virtualizada e desagregada.

As palavras “personalizada” e “flexível” são termos que dificilmente poderiam ser utilizados para definir características das gerações anteriores, pois vieram junto das grandes disruptões que foram o fim da estrutura monolítica da Rede de Acesso via Rádio (RAN - *Radio Access Network*), que aconteceu no 5G, e o processo de virtualização e desagregação da rede, que se iniciou no 4G e tem se consolidado no 5G [2]. A virtualização viabilizou outras novidades como a vinda das Redes Definidas por Software (SDN - *Software Defined Network*) para as comunicações móveis e a possibilidade de implantar recursos de código aberto. A desagregação viabilizou aproximar ou distanciar diferentes componentes da rede em relação aos usuários, para que dados que tivessem a necessidade de um processamento mais rápido pudessem ser transmitidos através de distâncias mais curtas, entre outras vantagens.

Apesar de tudo isso, novas características da rede também resultam em novas necessidades, como a padronização das interfaces de comunicação dos diferentes componentes e funcionalidades da rede, para beneficiar a interoperabilidade de componentes de diferentes origens, ou mesmo aproveitar tecnologias emergentes como o uso de Inteligência Artificial e aplicações de Aprendizado de Máquina para otimizar o uso de recursos e ampliar a possibilidade de serviços. Essas e outras propostas fazem parte do grande projeto de *framework* para a RAN denominado Open RAN [3].

Contudo, em uma discussão sobre as evoluções tecnológicas dos últimos anos, uma pauta indispensável é a eficiência energética e sustentabilidade, principalmente considerando toda a atenção que a academia tem dado para essas questões. A adoção do Acordo de Paris, um tratado internacional de 2015 que visa combater as mudanças climáticas, colocou um foco nunca antes visto em medidas contra a emissão de gases estufa, e de acordo com estudos recentes [4], o setor de TIC (Tecnologia da Informação e Comunicação, do inglês ICT - *Information and Communications Technology*) é responsável por cerca de 3% das emissões globais desses gases. Por ser a primeira geração a nescer nesse contexto, a eficiência energética

do 5G deixa de ser apenas uma preocupação e passa a ser um pré-requisito para desenvolvimento, padronização e implementação [5].

1.2.OBJETIVOS

Dado esse contexto, o trabalho em questão se aprofunda nas relações entre o setor das telecomunicações e o cenário que trouxe à tona as discussões relacionadas à necessidade de ampliar os recursos de eficiência energética nas rede celulares, procurando estabelecer um senso de urgência e responsabilização.

Em meio a essa discussão, o trabalho tem como objetivo geral explorar uma abordagem específica de redução do consumo energético nas redes móveis denominada *Sleep Mode*. O estudo dessa abordagem será realizado utilizando o simulador de redes NS-3, com foco em desenvolver um modelo capaz de propiciar implementações e avaliações de técnicas de *Sleep Mode* em um cenário de rede móvel convencional (no caso do estudo, uma rede que utiliza a tecnologia LTE).

Para que esse objetivo geral seja alcançado, três objetivos específicos precisam ser concretizados, sendo eles:

- Realização da modelagem, dimensionamento e desenvolvimento de um ambiente de rede móvel LTE no NS-3 para servir de base para a simulação;
- Implementação de um modelo de *Sleep Mode* que seja funcional;
- Possibilitar a avaliação do consumo energético e dos parâmetros de qualidade da rede.

A Figura 1 apresenta um resumo dos objetivos do projeto, distribuídos de forma hierárquica.

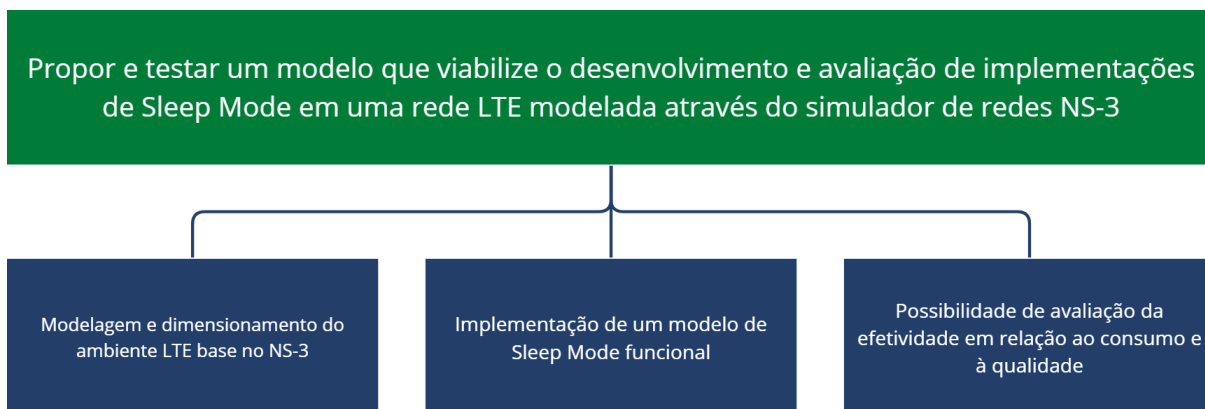


Figura 1 - Objetivos do trabalho

1.3. ESTRUTURA DOCUMENTAL

O primeiro capítulo se refere à introdução, onde são apresentadas as motivações iniciais, contextualização do trabalho e seus objetivos gerais e específicos. O segundo capítulo é dedicado à fundamentação dos conceitos que serão explorados, se aprofundando na temática das mudanças climáticas e o contexto que levou à criação do campo das Redes Celulares Verdes. Além dessas discussões, o capítulo também apresenta as definições relacionadas ao *Sleep Mode* e como ele vem sendo implementado ao longo das últimas gerações de redes móveis. O terceiro capítulo apresenta a ferramenta utilizada para realização das simulações e as implementações executadas a partir dela visando os objetivos propostos. Ainda no terceiro capítulo, é descrito todo o cenário e modelo base para as simulações. O quarto capítulo se dedica à análise dos resultados obtidos, comprovando que foi possível cumprir com o objetivo principal. O quinto capítulo conclui o raciocínio desenvolvido, enquanto explora possíveis evoluções para o trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No decorrer dos últimos anos, pesquisas confirmaram que o aquecimento global e outras mudanças climáticas foram causadas por atuação humana, especialmente a partir da emissão de gases estufa (GHG – Green House Gases) [6]. E ainda assim, pelo ritmo do crescimento dessa atuação, a tendência é que as consequências dessas emissões se tornem cada vez mais catastróficas [6]. Este capítulo tem como foco apresentar o fenômeno das mudanças climáticas trazendo para o contexto das telecomunicações, enquanto aborda iniciativas que foram tomadas para mitigar os impactos e consequências desses anos de emissões de GHG através da promoção da eficiência energética nas redes móveis. Ainda nesse capítulo, é apresentada a técnica de redução do consumo energético das redes celulares na qual todo o trabalho é baseado, além de explorar como ela vem sendo implementada ao longo das últimas gerações de redes móveis, e as tecnologias que permitiram esse processo.

Sendo assim, a distribuição do capítulo é dada em três partes. A primeira parte se resume a um estudo do contexto das mudanças climáticas, levando em conta a área de telecomunicações. A segunda parte se inicia na conceituação do campo das Redes Celulares Verdes, com foco nos conceitos que envolvem as técnicas de *Sleep Mode*, passando pela definição de Redes Heterogêneas e a apresentação de um projeto na área de eficiência energética das redes móveis cujas propostas foram utilizadas no vigente trabalho. A terceira e última parte explora de maneira mais profunda as últimas gerações de redes móveis, detalhando tecnologias e conceitos determinantes para a evolução das telecomunicações. Ainda nesse parte, é descrito como as técnicas de *Sleep Mode* vêm sendo implementadas nos últimos anos, além de trazer um aprofundamento maior sobre o projeto Open RAN.

2.1.MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O SETOR TIC

De acordo com o Relatório de Síntese (SYR - *Synthesis Report*) do Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*) [6], a principal referência para assuntos relacionados ao clima em escala global, a temperatura do planeta atingiu cerca de 1.1 °C acima da média entre 2011 e 2020, e a emissão de GHG tem aumentado de maneira nunca antes vista, com um dos principais contribuidores desses números sendo o uso de energia insustentável. A Figura 2 apresenta uma representação gráfica do crescimento das emissões de GHG ao longo dos anos de atuação humana desde a industrialização, e é possível observar uma elevação

considerável na inclinação da curva após 1950, além de uma elevação ainda maior após os anos 2000.

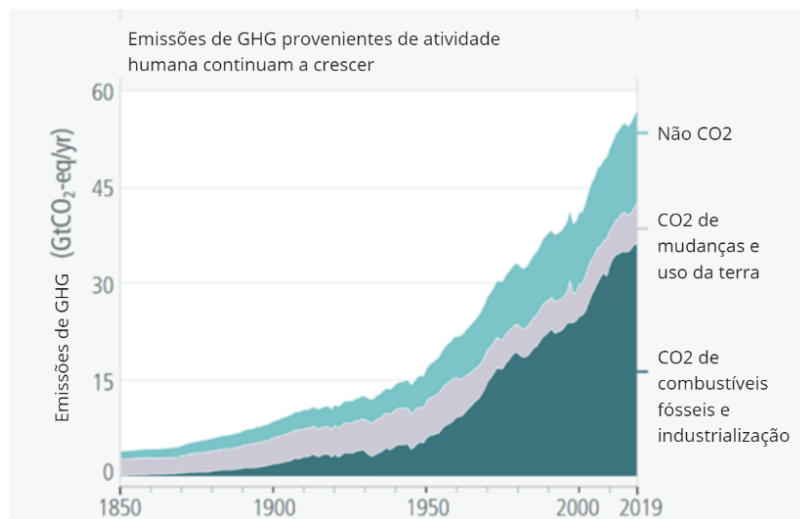


Figura 2 - Emissões de GHG proveniente de ação humana [6]

Diante dessa situação, ao longo das últimas três décadas, acordos internacionais como o Protocolo de Kyoto (1997) e o Acordo de Paris (2015), voltados para conscientizar os países do globo sobre ações climáticas que devem ser tomadas foram concretizados, sendo esse último, em especial, o que deu origem à Agenda 2030. Essa agenda é composta por 17 objetivos denominados Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (SDG - *Sustainable Development Goals*), que são metas globais interconectadas baseadas nas maiores dificuldades a serem superadas para garantir um crescimento sustentável global até o ano de 2030 [6]. Dentre todas as metas, vale destacar a de número 13: Ação contra a mudança global do clima, que se resume em mitigar diretamente as emissões de GHG. Os outros objetivos podem ser observados na Figura 3.



Figura 3 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (SDG) [7]

Trazendo para o contexto das telecomunicações, estudos recentes apontam que as emissões de GHG do setor de Tecnologia, Informação e Comunicação (ICT - *Information Communication Technology*) caracterizam cerca de 3% de toda contribuição global [8], o que supera, por exemplo, o setor inteiro de aviação. O cálculo dessas emissões são relativos a extração dos materiais para construção dos equipamentos, a manufatura desses equipamentos, a poluição operacional (o que inclui o consumo energético) e o descarte desses equipamentos. Nas telecomunicações, o consumo, e junto dele as emissões, crescem de maneira diretamente proporcional ao crescimento da quantidade de usuários, ou também se para uma mesma quantidade de usuários o acréscimo for o consumo, e nos últimos anos temos passado pelos dois fenômenos simultaneamente.

Por volta de 2010, a quantidade de assinantes nas comunicações móveis já ultrapassava os 4 bilhões [9] e atualmente já estamos próximos de alcançar a marca de 9 bilhões de assinaturas [4]. Além disso, com os eventos relativos a COVID-19, todas as restrições físicas ou presenciais que foram impostas levaram as pessoas a utilizar cada vez mais de recursos baseados em rede, seja para trabalho, estudo, entretenimento, entre outras questões. Para atender a essa demanda, as redes móveis devem não apenas prover a cobertura necessária como também fornecer a capacidade correspondente, o que possui custos energéticos e conseqüentemente financeiros e ambientais.

2.2.REDES CELULARES VERDES

Desde sua introdução no final da década de 70, a estrutura das redes celulares sempre foi voltada principalmente para eficiência espectral e Qualidade do Serviço (QoS - *Quality of Service*), nem sempre priorizando a eficiência energética [11]. Por conta disso, gastos relacionados ao consumo de energia das redes móveis compõem uma parcela significativa do custo operacional (OPEX - *operational expenditure*) dos provedores de serviço. Levando em conta essa questão, e o contexto das iniciativas voltadas para controle das emissões de GHG, houve uma unificação dessas disciplinas visando os ganhos “tanto para o planeta quanto para o bolso”, e esse processo deu início a um novo campo de pesquisa denominado Redes Celulares Verdes (*Green Cellular Networks*) ou apenas Redes Verdes (*Green Networks*), de maneira mais generalizada. O termo “verde” é normalmente associado a iniciativas voltadas para redução das emissões de GHG, e no contexto das redes móveis o propósito é diretamente a redução do consumo energético e seus gastos decorrentes, o que indiretamente também engloba o conceito geral.

Para entender o foco do trabalho de pesquisa no campo das Redes Celulares Verdes, é necessário entender a distribuição do consumo energético em uma rede móvel. A Figura 4 [4] ilustra onde a energia é consumida em uma arquitetura de rede celular convencional, além de detalhar quais componentes apresentam o maior consumo dentro de cada seção.

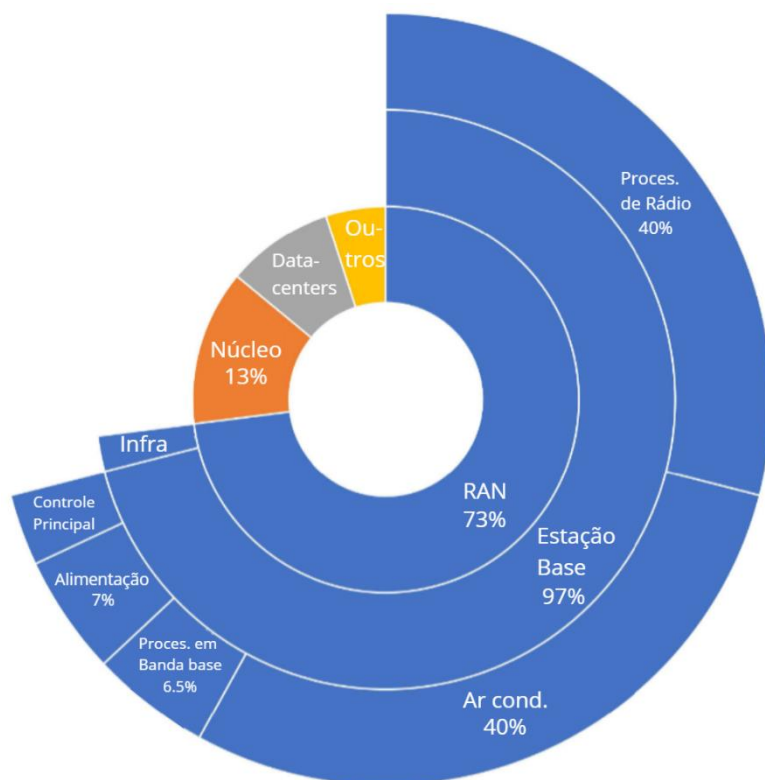


Figura 4 - Energia consumida nas diferentes seções de uma rede móvel. Com adaptações. [4]

A estrutura de uma rede móvel pode ser dividida em três componentes principais: A Rede de Acesso via Rádio (RAN - *Radio Access Network*), o Backhaul Móvel (MBH - *Mobile Backhaul*) e o Núcleo da Rede (*Network Core*). Um exemplo de disposição desses elementos na rede está ilustrado na Figura 5. A RAN é composta pelas estações base (BS - *Base Station*), estruturas responsáveis pela transmissão e recepção de ondas de rádio, processamento de sinais em banda base (*BB Processing*) e uma série de outras funções, e as células que elas servem, nas quais se conectam os usuários da rede móvel (quase sempre caracterizados pelos seus dispositivos utilizados para estabelecer a comunicação com as células e referidos pelo termo em inglês UE - *User Entity* ou *User Equipment*). O MBH é aquele que conecta a RAN ao Core, e em alguns casos é descrito como fazendo parte da estrutura da RAN. O Core é responsável pelo ciclo de vida da conexão de cada UE, como questões relacionadas ao registro no provedor de serviços, além de mediar a conexão da e para a internet [2]. A distribuição das funções de

cada parte da rede em seus elementos específicos pode variar de uma geração de rede móvel para outra, porém de maneira geral, a estrutura descrita modela bem um sistema genérico.

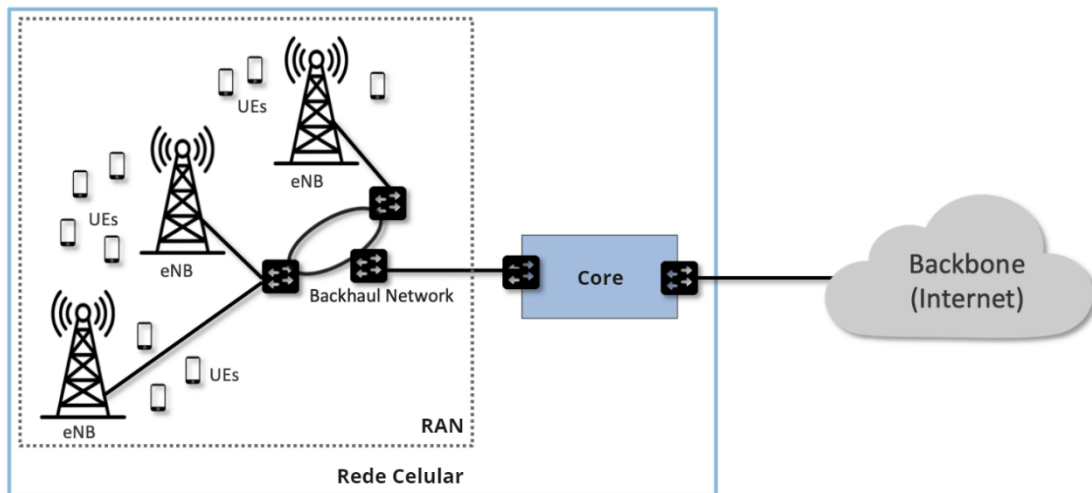


Figura 5 - Estrutura de uma rede móvel convencional [10]

Tendo estabelecido as definições dos elementos presentes em uma arquitetura de rede celular, é possível explorar mais a fundo os dados representados na Figura 4. A RAN caracteriza 73% do consumo total de energia, enquanto o *Core* representa apenas 13%. Do consumo apresentado pela RAN, cerca de 97% é referente às estações base, enquanto os outros 3% caracterizam o consumo da infraestrutura. Se aprofundando no consumo das estações base, 40% é referente a refrigeração, 40% processamento de rádio, 7% alimentação, 6.5% processamento de banda base e 3.5% controle [4].

Dessa forma, a missão das Redes Celulares Verdes fica mais clara. Se o consumo da rede é majoritariamente dado pela RAN que, por sua vez, é majoritariamente dado pelas estações base, qualquer ação que reduza o consumo das BSs afeta de maneira significativa o consumo total. O papel das Redes Celulares Verdes é encontrar a melhor forma de reduzir o consumo das estações base sem afetar a performance, consequentemente reduzindo o OPEX e, mesmo que pouco, as emissões de GHG.

Em [11], o autor classifica as diferentes abordagens de redução de consumo energético nas redes móveis em 5 diferentes tipos:

1. **Aumento da eficiência energética dos componentes de hardware:**
Abordagens dessa categoria envolvem desenvolver componentes de hardware de maneira a ampliar o desempenho do consumo energético, uma vez que elementos como amplificadores de potência têm mais de 80% de sua energia consumida dissipada em calor.

2. **Desligamento seletivo de componentes:** Abordagens dessa categoria envolvem desligar determinados componentes da rede visando economizar energia. O critério de escolha de quando desligar determinado componente varia de modelo para modelo, geralmente envolvendo momentos fora do horário de pico.
3. **Otimização do processo de transmissão via rádio:** Abordagens dessa categoria trabalham nas camadas Física e MAC (*Media Access Control*) aplicando técnicas como MIMO (*Multiple-input and multiple-output*), retransmissão cooperativa e rádio cognitivo, tudo com o objetivo de ampliar a eficiência energética.
4. **Implantação de Células Heterogêneas:** Abordagens dessa categoria envolvem a implantação de células pequenas na topologia, como micro, pico e femto células. Células pequenas são capazes de suprir pequenas áreas de tráfego denso consumindo menos energia que as células convencionais, porém sendo necessária uma quantidade maior delas para cobrir maiores áreas, o que pode ocasionar em interferência e até aumento do consumo, uma vez que diferentes cenários caracterizam diferentes prioridades.
5. **Utilização de energia de fontes renováveis:** Abordagens dessa categoria não necessariamente visam a eficiência energética em si, e sim o uso de fontes renováveis como energia solar, eólica ou hídrica. Essas matrizes são tão capazes de suprir as necessidades energéticas quanto as fontes convencionais, porém com o benefício de gerar menos ou nenhum GHG.

Podemos considerar cada uma das categorias propostas como um diferente campo de pesquisa das Redes Celulares Verdes, ainda que elas possuam alguma correlação. Para que seja possível um aprofundamento mais detalhado, e para garantir o fundamento necessário para o objetivo do trabalho, o mesmo aborda de maneira concreta apenas a segunda e quarta categoria.

2.2.1. DESLIGAMENTO SELETIVO DE COMPONENTES

O desligamento seletivo de componentes da rede móvel é uma das principais técnicas quando se trata de economizar energia. Porém, se determinado componente não fosse necessário ligado, em primeiro lugar ele nem estaria presente. Dessa forma, é fato que existe alguma consequência decorrente da desativação, um *trade-off*, onde na maioria dos casos é a redução da capacidade da rede de uma forma ou de outra, por isso esse recurso é utilizado geralmente fora dos horários de pico de tráfego.

Apesar da palavra “desligamento”, essas estratégias podem se basear tanto em desligar completamente determinados elementos, quanto colocar os componentes em um estado de espera profunda e baixo consumo de energia, também chamado de estado ou modo de repouso (*Low-power Mode*, *Deep Idle Mode* ou *SM – Sleep Mode*) [11]. Esse tipo de técnica é comumente aplicada em componentes das estações base, por exemplo amplificadores de potência, equipamentos de refrigeração, transceptores, processadores de rádio e até estações base inteiras. Esse tipo de abordagem ainda carrega a vantagem de, em BSs mais modernas, poder ser implementada via software, o que resulta em um custo menor de instalação em relação a outras técnicas de redução do consumo energético, visto que não exige a troca dos componentes de hardware.

É importante destacar que estratégias para o desligamento seletivo de componentes (onde se incluem as técnicas *Sleep Mode*) são uma categoria dentro do campo de pesquisa das Redes Celulares Verdes. Já o desligamento ou desativação de componentes em si (*Component Deactivation*) é apenas um recurso utilizado para implementar estratégias específicas, como descrito em [9]. Outro fator a ser considerado é a associação realizada entre os conceitos de desligamento seletivo e o próprio *Sleep Mode*, que por muitas vezes são tratados como sinônimos. Para fins de definição, neste trabalho o termo *Sleep Mode* será generalizado para o estado que determinado elemento é colocado visando a economia de energia, seja ele um modo de espera profunda ou o desligamento completo. Já as técnicas de *Sleep Mode*, se referem às diversas estratégias de desligamento seletivo, enquanto o desligamento seletivo em si é o que dá nome à categoria de redução do consumo energético nas Redes Celulares Verdes. A Figura 6 foi feita para representar visualmente a relação entre os conceitos apresentados.

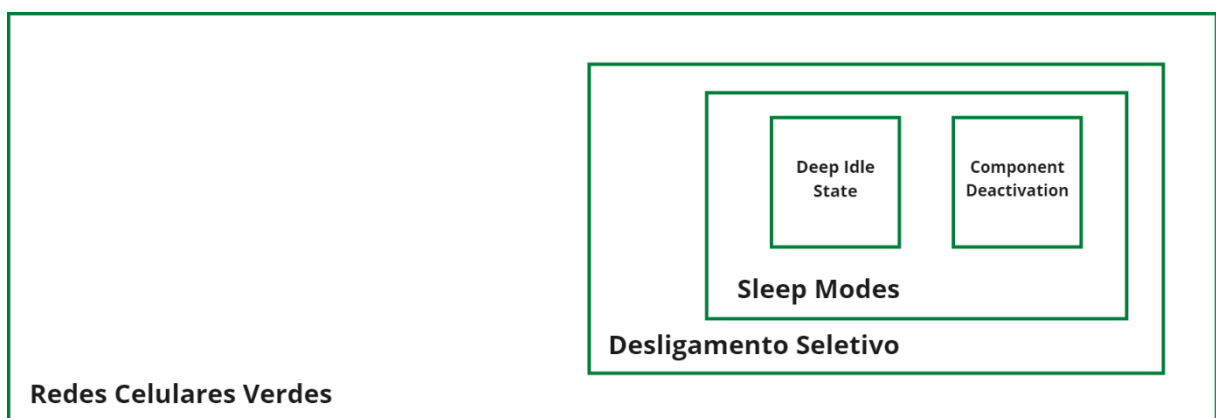


Figura 6 - Representação visual da relação entre os conceitos relacionados à definição de *Sleep Mode*.

2.2.1.1. SLEEP MODES

Tendo definido o que significa *Sleep Mode*, é possível agora apresentar abordagens de diferentes autores para técnicas de implementação do mesmo, a fim de expandir e solidificar o conceito. Em [12], o autor exemplifica o *Sleep Mode* como “quando um recurso da rede, por exemplo uma portadora de frequência, não é necessário para garantir o QoS, ele é desligado para reduzir o consumo de energia global”. Nesta proposta podemos observar duas particularidades: o componente escolhido para entrar em *Sleep Mode* foi uma portadora de frequência, e o *Sleep Mode* definido foi o desligamento do elemento. Em [13], o autor aborda duas diferentes definições, sendo a primeira: “Sleep modes, que consistem em desligar a estação base por um certo período de tempo”. Nessa perspectiva, SM também é dado como desligamento e o componente escolhido foi a BS inteira. Uma diferença dessa proposta para a do outro autor é a presença do parâmetro tempo, algo crucial para a definição e que será debatido mais a frente. Além dessa primeira definição o autor ainda traz “Sleep Mode Avançado (ASM). Consiste em uma desativação progressiva dos componentes da estação base de acordo com o tempo necessário para cada um desativar e reativar novamente”. Nessa abordagem há a presença de características mais complexas, como a inclusão de vários componentes no processo de desativação e o fato desse processo acontecer progressivamente, ou seja, em etapas. Em [9], o autor apresenta o *Sleep Mode* como dois diferentes processos: Micro SM, onde a estação base suspende a transmissão na ordem de milissegundos, e SM Profundo (*Deep SM*), onde os transmissores da estação base são desligados por extensos períodos de tempo. Com esse novo conceito podemos incluir o parâmetro tempo na definição de *Sleep Mode*, onde ele pode ser aplicado em escalas maiores de tempo, economizando mais energia, porém levando mais tempo para reativar os componentes se necessário, e escalas menores de tempo, o que pode não economizar tanta energia quanto a primeira opção, porém torna o processo de reativação mais ágil e menos custoso. Uma outra proposta que vale a pena citar é apresentada em [11]. Por se tratar de um *survey*, inúmeros modelos de implementação são descritos, mas o de Saker propõe mais um conceito útil para a definição de *Sleep Mode*, sendo ele: “Eles propuseram dois esquemas. O primeiro é o dinâmico, onde as BSs são colocadas para dormir ou acordar baseado no número instantâneo de usuários na célula (a escala de tempo de dormir/acordar corresponde a minutos), enquanto o segundo é um semi-estático, onde os recursos precisam permanecer em um modo por pelo menos 10 minutos, ou até mesmo por horas, com o propósito de reduzir os comandos de dormir/acordar”. Aqui temos adicionado ao conceito de *Sleep Mode* o fator gatilho, ou critério de início, onde este pode ser dado de maneira

dinâmica, considerando alguma variável da rede como o volume de tráfego ou a quantidade de UEs associados, ou de uma maneira estática, como por exemplo em horários agendados, porém considerando um período de histerese para minimizar a quantidade de operações consecutivas.

Para concluir a definição base das diferentes implementações de *Sleep Mode*, uma última regra precisa ser adicionada. Apesar do propósito das técnicas apresentadas ser economizar a maior quantidade de energia possível, pelo menos uma célula precisa permanecer ativa por região de cobertura, ou seja, nunca se deve iniciar um processo de *Sleep Mode* em todas as estações base de determinada área, pois o propósito de uma rede móvel é garantir que os dispositivos possam se conectar mesmo em deslocamento, independente do horário, e nunca se sabe qual região estará em seu trajeto. Tendo isso em vista, uma outra estratégia pode ser utilizada para minimizar essa limitação, enquanto permite uma maior liberdade para as técnicas de *Sleep Mode*, que é o uso das chamadas Redes Heterogêneas (HetNets - *Heterogeneous Networks*). Utilizando células de tamanhos diferentes, seria possível ter uma macro-célula que cobre determinada região e diversas células menores internas para locais de tráfego mais denso. Quando não estiverem sendo utilizadas de maneira que faça sentido deixá-las ativas, seria possível colocar as células pequenas em *Sleep Mode* enquanto a macro-célula cuida de cobrir a região. Um aprofundamento maior sobre as HetNets será realizado em um tópico posterior.

Nem todas as definições apresentadas se tratam do estado-da-arte quando se discute sobre técnicas de *Sleep Mode*, porém foram elas que fundamentaram o conceito, definiram as regras base e contribuíram para que ele fosse estabelecido como é hoje. Perceba que em nenhum momento da discussão foi citado o fator geração de redes móveis, pois a ideia deste tópico foi centralizar o conceito apresentando uma definição iterativa e convergente, e não uma série de conceitos contrapostos como é feito em boa parte da literatura sobre o tema. As Tabelas 1, 2 e 3 resumem as variações e classificações apresentadas para as técnicas de *Sleep Mode*.

Tabela 1 - Classificações do *Sleep Mode* quanto ao gatilho

Gatilho	Estático: O <i>Sleep Mode</i> é ativado de maneira pré-programada.	Dinâmico: O <i>Sleep Mode</i> é ativado com base em um critério variável.
----------------	--	---

Tabela 2 - Classificações do Sleep Mode quanto à sua duração

Duração	Micro: Na escala de milissegundos.	Profundo: Na escala de minutos ou até horas.
----------------	------------------------------------	--

Tabela 3 - Classificações do Sleep Mode quanto à sua complexidade

Complexidade	Simple: Afeta um único componente, que varia entre ativo e dormente.	Avançado: Pode afetar diversos componentes e é ativado em etapas.
---------------------	--	---

2.2.2. REDES HETEROGÊNEAS

Como descrito anteriormente, as demandas de tráfego têm crescido consideravelmente nos últimos anos, e para determinadas áreas, cujas necessidades se aproximam dos limites teóricos, se faz necessária a densificação da quantidade de estações na rede. Essa necessidade foi instaurada não na atual geração de redes móveis, mas ainda na geração anterior, onde o conceito das Redes Heterogêneas passou a ser implementado em larga escala.

Em uma distribuição relativamente espaçada de estações base na topologia, o acréscimo de uma ou outra estação não aumenta de maneira significativa a interferência entre as células. Contudo, em regiões com uma distribuição mais densa, a adição de novas células pode afetar consideravelmente a performance da rede como um todo [14]. E além disso, a aquisição de novos sites em áreas urbanas de tráfego denso pode ser excessivamente custoso financeiramente.

Uma possível solução para esses desafios seria preencher as lacunas de cobertura ou locais com uma grande demanda concentrada com células de baixa potência de transmissão, uma vez que, se distribuídas corretamente no espaço, com o reuso correto das frequências, e por serem de baixa potência, não causam muita interferência, além de normalmente, por alguns tipos serem consideravelmente menores que as estações convencionais, não possuem a necessidade de refrigeração ativa, e por estarem localizadas dentro dos sites não há necessidade de adquirir novas locações.

Outro ponto a favor dessa estratégia é o fato de mais de 70% do tráfego total de dados em uma rede móvel ser gerado em ambientes *indoor*, ou seja, locais fechados [15]. Nesse cenário, o uso de células menores e com uma potência de transmissão limitada para cobrir locais fechados se torna algo eficiente tanto do ponto de vista energético quanto do ponto de vista financeiro.

Uma rede que consiste de uma mistura de de macro-células e células de baixa potência é referida como uma Rede Heterogênea (HetNet - *Heterogeneous Network*) [14]. A Figura 7 [9] ilustra um exemplo de instalação de uma HetNet que possui células de diferentes classificações por tamanho e função.

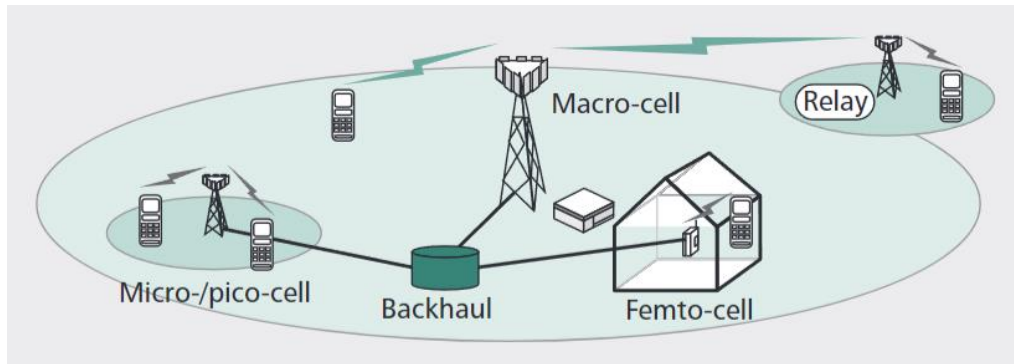


Figura 7 - Exemplo de instalação de uma Rede Heterogênea [9]

Como citado, as células de uma HetNet podem ser classificadas de acordo com seu tamanho (potência ou área de cobertura) e também sua função. De acordo com [15] podemos atribuir a elas as seguintes definições:

- **Macro-células:** Provém uma grande área de cobertura na rede móvel. Suas antenas podem ser posicionadas em estruturas dedicadas, telhados, e locações do tipo. Macro-células têm sua cobertura relativa à frequência utilizada, variações de terreno, entre outros fatores. Elas são compostas por estações base convencionais com uma potência de transmissão que varia, em média, de 20 W a 160 W (utilizando a tecnologia da quarta geração de redes móveis), com um alcance de 1 km a 20 km. É importante citar que por conta de variações das condições de canal, macro-células podem não garantir QoS (*Qualidade do Serviço*) em locais fechados (*indoor*).
- **Micro-células:** Provém suporte de cobertura e capacidade em regiões onde o número de usuário é mais elevado, por exemplo centros comerciais. Uma micro-célula cobre, em média, 10% da área de uma macro-célula. Suas antenas são menores e podem facilmente se camuflar em meio às estruturas dos prédios, reduzindo a poluição visual. Micro-células possuem uma potência de transmissão que varia de 2 W a 20 W, e um alcance que varia de 500 m a 2 km. Normalmente possuem um MBH dedicado.
- **Pico-células:** Provém uma cobertura mais localizada, e normalmente são instaladas dentro dos prédios, onde a cobertura mais é fraca ou o volume de tráfego é mais intenso, como aeroportos, rodoviárias e shoppings. Pico-células

são compostas por estações base tecnologicamente equivalentes às convencionais, porém com uma potência de transmissão muito reduzida, indo de 50 mW a 1 W. Seu alcance fica por volta de 200 m ou menos. Normalmente são conectadas entre si e às Macro-células através de cabos.

- Femto-células: Provém uma pequena área de cobertura através de uma baixa potência de transmissão. São estações instaláveis pelo próprio cliente e utiliza da sua infraestrutura de conexão com a internet. Células desse tipo possuem um grupo restrito de usuários que podem se associar (CSG – *Closed Subscriber Group*), e sua potência de transmissão é limitada entre 10 mW e 200 mW.
- Nós de retransmissão (RN – *Relay Nodes*): São utilizados para aumentar a performance das redes heterogêneas em termos de cobertura e taxa de transmissão. Eles estendem o alcance para novas áreas e normalmente são temporários, utilizados, em sua maioria, nas bordas das macro-células.

As HetNets são uma abordagem inovadora para resolver problemas provenientes do fenômeno da densificação das redes móveis, apesar de não terem surgido tão recentemente. Se tratam de sistemas eficientes tanto do ponto de vista econômico quanto do ponto de vista energético, mesmo ainda enfrentando adversidades inevitáveis como a interferência entre células e outras questões não abordadas neste tópico, cabendo aos provedores de serviço determinar com qual foco serão utilizadas. A Tabela 4 resume a relação de alcance e consumo para cada tipo de célula.

Tabela 4 - Comparação entre os diferentes tipos de células de uma HetNet [15]

Tipo de Célula	Cobertura média	Potência média de Transmissão
Macro	1 – 30 km	20 W ~ 160 W
Micro	500 m – 2 km	2 W ~ 20 W
Pico	4 – 200 m	250 mW ~ 2 W
Femto	10 m	10 mW ~ 200 mW

2.2.3. PROJETO EARTH

Ainda no contexto apresentado sobre mudanças climáticas e o impacto do setor de telecomunicações nas emissões globais de GHG, há alguns anos (de janeiro de 2010 a junho de 2012) ocorreu um projeto conduzido pela Comissão Europeia, uma instituição da própria União Europeia, denominado EARTH. O projeto tinha como objetivo principal desenvolver soluções

que, em conjunto, reduziriam o consumo energético das redes móveis em 50% sem que fosse degradada a qualidade do serviço. O projeto movimentou a academia europeia através de diversos estudos teóricos das soluções individuais e provas de conceito, tudo para que fosse alcançada uma solução integrada que contribuisse com o objetivo determinado, visando um crescimento sustentável das redes do futuro.

Não seria um absurdo dizer que o projeto EARTH foi o que deu início ao conceito das Redes Celulares Verdes, já que foi durante esse projeto que as primeiras análises a respeito de questões voltadas para sustentabilidade no contexto das redes móveis aconteceram. O projeto deu origem a metodologias, frameworks e indicadores para que fosse possível acompanhar o andamento dos resultados das soluções propostas. Um exemplo de resultado do projeto foram os hardwares de transceptores muito superiores do ponto de vista energético do que os que haviam na época. Medições dos protótipos mostraram resultados de um acréscimo de eficiência maior do que dois dígitos.

Dentre as diferentes soluções originárias do projeto EARTH, uma das mais notáveis é o framework de análise de eficiência energética E3F (Energy Efficiency Evaluation Framework) que tem como principal ponto o foco nos parâmetros e variáveis que não eram levados em consideração nos modelos da época, como flexibilidade para uma análise precisa da eficiência energética tanto em cenários de alta carga de tráfego quanto em cenários de baixa ou zero carga, ou considerar na análise de eficiência mais elementos do que somente a potência de transmissão em rádio frequência. Mais detalhes sobre o funcionamento do modelo podem ser encontrados em [16].

Além de complementar o plano de fundo das Redes Celulares Verdes, o projeto EARTH está sendo referenciado neste trabalho por conta do uso de um de seus modelos construídos para analisar a eficiência de uma solução de economia de energia no contexto de uma rede móvel.

Como descrito, o projeto EARTH visa reduzir o consumo das redes móveis enquanto preserva a qualidade do serviço. No entanto, como visto nos modelos de Sleep Mode apresentados, algumas técnicas de eficiência energética exigem um *trade-off*, que normalmente é traduzido na forma de redução da capacidade da rede, porém também pode surgir na forma de impacto no QoS. Tendo essa característica em mente, pode ser benéfico ser capaz de analisar o quanto uma solução de redução do consumo energético é eficaz mesmo com determinada degradação na qualidade do serviço, e uma função de utilidade pode ser utilizada com esse propósito. Definido em [17], “Na economia, utilidade é uma métrica de satisfação relativa. Com essa métrica, é possível dizer de forma significativa sobre o aumento ou diminuição da

utilidade, e assim explicar o comportamento econômico em termos de tentativas de aumentar a própria utilidade”.

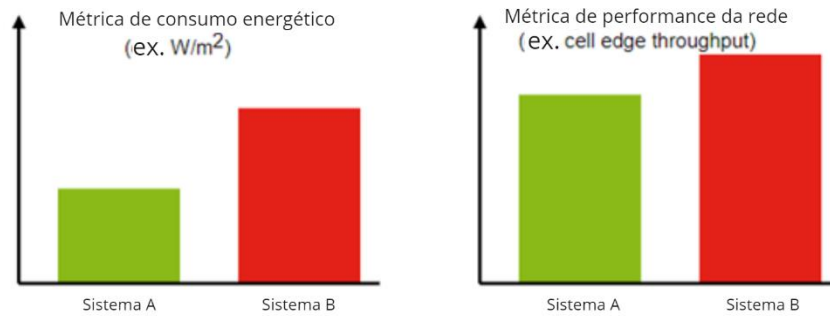


Figura 8 - Exemplo de comparação de dois sistemas quanto à performance e consumo energético [17]

Para que fique mais claro, observemos a Figura 8. Nesta figura temos os dados relativos ao consumo energético e qualidade do serviço de dois sistemas (A e B), onde no sistema A foi implementada uma técnica de economia de energia, e no sistema B, não. É possível observar no primeiro gráfico que o consumo energético apresentado no sistema A foi bem menor em relação ao do sistema B, porém, no segundo gráfico temos a informação de que o indicador de performance do sistema B é superior ao do sistema A. Nessa situação, como definir qual sistema é mais apropriado para ser implementado? Primeiro seria necessário definir a contribuição de cada parâmetro (economia de energia e qualidade) nas necessidades da rede, e então calcular o resultado para cada sistema.

Dessa forma, para que seja possível estabelecer a contribuição de cada parâmetro na comparação, é necessário comparar os valores com um caso base e obter uma métrica em porcentagem primeiro, resultando em quanto determinado parâmetro se distancia do valor de referência. No caso do projeto EARTH o caso base definido é o próprio sistema de referência EARTH. Porém, para uso do modelo em outras comparações, o caso base que deve ser escolhido é aquele sem qualquer implementação de técnica de eficiência energética, uma vez que se deseja calcular a utilidade do sistema que economiza energia sob determinada degradação do desempenho, em relação ao sistema que não economiza energia porém também não degrada.

Para o caso do indicador de consumo energético, o valor do caso de referência é dado por E_{ref} , enquanto o valor do caso avaliado é dado por E . Para o indicador de qualidade a lógica aplicada é a mesma, o caso de referência é dado por Q_{ref} , e o caso avaliado é dado por Q . Assim

podemos calcular a contribuição na função de utilidade do parâmetro energia consumida, definido na eq. (1) e do parâmetro qualidade do serviço, definido na eq. (2).

$$\Delta U_E = -100 (E - E_{ref})/E_{ref} \quad (1)$$

$$\Delta U_Q = 100 (Q - Q_{ref})/Q_{ref} \quad (2)$$

Tendo calculado a contribuição dos parâmetros na forma de porcentagem, é necessário introduzir uma relação de pesos entre eles, que irá determinar qual parâmetro estabelecerá uma contribuição maior na utilidade. Esses pesos, α_Q e α_E , devem ser escolhidos de forma que $\alpha_Q + \alpha_E = 1$. Juntado esses elementos obtemos a função de utilidade definida na eq. (3).

$$U = 100 + (\alpha_E \Delta U_E) + (\alpha_Q \Delta U_Q) \quad (3)$$

O resultado da função de utilidade é um valor que representa, dada a devida ponderação, o quanto o cenário avaliado é útil em relação a um cenário base de utilidade 100. A escolha dos parâmetros α_Q e α_E é subjetiva, logo não seria possível definir um conjunto de parâmetros que se encaixam em qualquer cenário. Ainda assim, para comparações simples, é razoável que um valor padrão possa servir. Dessa forma, foi proposto no projeto EARTH o uso dos valores $\alpha_Q = 0.9$ e $\alpha_E = 0.1$, assim a qualidade está definida com uma contribuição de 90% para a utilidade, enquanto a economia de energia equivale a 10%. Além disso, também foi disponibilizada uma tabela com exemplos de ponderações para diferentes cenários com diferentes densidades de nós e disponibilidade de serviços, que foram colocados na Tabela 5. Mais detalhes sobre a descrição e funcionamento do modelo podem ser encontrados em [17].

Tabela 5 - Exemplos de ponderações para função de utilidade

	Urbano denso	Urbano	Suburbano	Rural	Pouco populado
α_E	0.1	0.1	0.3	0.3	0.5
α_Q	0.9	0.9	0.7	0.7	0.5

O estudo das Redes Celulares Verdes não é algo novo, principalmente levando em conta um mundo como o nosso, onde as coisas têm evoluído tão rápido. Mesmo assim, tais estudos permanecem completamente relevantes, uma vez que as questões relacionadas ao impacto das

emissões de GHG originárias de ação humana estão mais vigentes do que nunca. Sendo assim, é necessário utilizar todo o conhecimento possível para viabilizar que os sistemas atuais e do futuro sejam sustentáveis no longo prazo. Para que isso seja possível, não podemos ignorar a questão da eficiência energética, e são técnicas e sistemas como os que foram descritos que vão atuar nisso.

2.3. TECNOLOGIAS VIABILIZADORAS

Como discutido anteriormente, foram necessárias diversas gerações de comunicações móveis para que determinadas aplicações fossem possíveis, e isso se deu por meio do desenvolvimento de novas tecnologias e paradigmas. Este tópico tem como objetivo explorar algumas das tecnologias que servirão ou já estão servindo de base para a evolução das redes móveis, além de se aprofundar no *Sleep Mode*, agora aplicado à gerações específicas e como ele é utilizado atualmente.

2.3.1. GERAÇÕES DE REDES MÓVEIS PASSADAS

As gerações de redes móveis mais antigas, 3G e seus antecessores, estabeleceram as bases para a conectividade móvel. Contudo, suas abordagens em relação à economia de energia tornaram-se um desafio considerável, uma vez que nos padrões de rede como WCDMA, HSPA e anteriores (por exemplo GSM), tanto o UE quanto as estações base (BSs) precisam estar em comunicação constante, mesmo que apenas sinais piloto e de controle. Esse processo se mantém mesmo quando não há transmissão de dados do usuário, sendo apenas as BSs se comunicando. Como resultado, para implementações de *Sleep Mode*, toda a estação base precisa ser desligada para alcançar economia de energia, o que é uma operação bastante complexa e dispendiosa. Isso ocorre porque, em muitos desses padrões mais antigos, não há a capacidade de desligar partes individuais da estação base, sendo necessário desativar o sistema inteiro para economizar energia. Isso não apenas exige um consumo considerável de energia, mas também resulta em custos operacionais mais altos devido à complexidade do desligamento e reinicialização de toda a estação base [11].

Ao considerar as gerações mais recentes, como o LTE e além, a otimização da eficiência energética tornou-se um ponto focal crucial. Essas tecnologias oferecem abordagens mais avançadas para lidar com a economia de energia, permitindo não apenas a redução do consumo de energia em momentos de inatividade, mas também a capacidade de desligar componentes

individuais de estações base ou até mesmo adotar estratégias dinâmicas de gerenciamento de energia para atender à demanda em tempo real.

2.3.2. 4G E A VIRTUALIZAÇÃO DA REDE

A tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) foi definida como a base da quarta geração de redes móveis e é caracterizada por deixar completamente a comutação por circuito e possuir apenas comutação de pacotes. É um padrão desenvolvido pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), uma associação que une diversas organizações desenvolvedoras de padrões de telecomunicações, e lançado em 2009 como um sucessor direto do 3G [1].

Outra mudança em relação às gerações anteriores é a união da BS com o RNC (*Radio Network Controller*), surgindo a chamada eNB (*Evolved Node B*) ou (*E-UTRAN Node B*). E-UTRAN é um termo que se refere à evolução da UMTS *Terrestrial Radio Access Network*, o conjunto de equipamentos que conectam os dispositivos móveis ao Core das redes celulares. No caso do 3G, é o conjunto de RNC + node B [2].

A rede LTE é dividida em duas partes: eNB e EPC (*Evolved Packet Core*). O eNB assume tanto as responsabilidades de controle de acesso à rede, atribuição dos recursos físicos do canal (*uplink* e *downlink*), quanto proteção da integridade dos dados, e se comunica diretamente tanto com o Core (EPC) quanto com os UEs. O EPC é responsável pela autenticação, alocação das chaves de segurança e conexão da rede móvel à internet. A Figura 9 apresenta a distribuição dos componentes em uma arquitetura LTE.

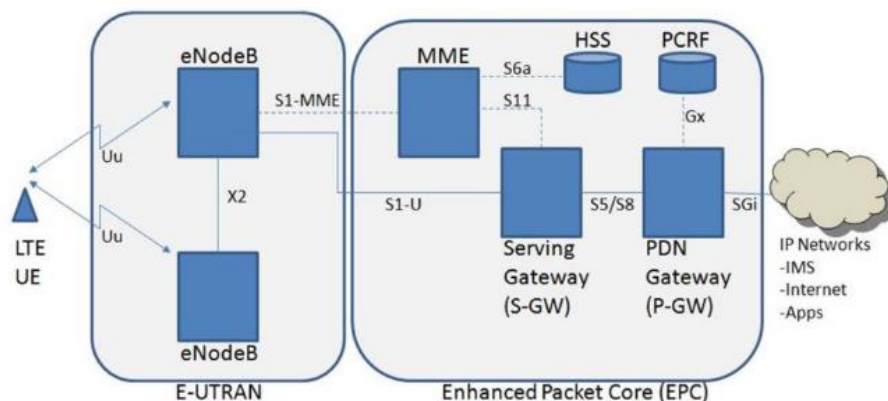


Figura 9- Arquitetura da rede LTE (4G) [18]

O LTE (4G) trouxe grandes incrementos em relação à taxa de transmissão, latência e quantidade de dispositivos conectados, e seu sucessor, o 5G, o fez mais ainda. Essas melhorias tornaram o *backhaul* do 4G cada vez mais difícil de gerenciar, principalmente utilizando hardware proprietário [19]. O uso de hardware proprietário pode facilitar implementações específicas na rede, por serem considerados *plug and play*, contudo, essa facilidade também

traz prejuízos. Para facilitar a implementação, esse tipo de equipamento limita de maneira significativa as possibilidades de reconfiguração, resultando em um uso ineficiente dos recursos pois a rede não pode ser personalizada para suas reais necessidades.

Como uma solução para esse tipo de problema, foram trazidos para as redes celulares recursos de virtualização e programabilidade. A virtualização da rede (NV – *Network Virtualization*) [19], permite que diversas redes virtuais compartilhem a mesma infraestrutura física. Os provedores de serviço podem customizar e gerenciar essas redes virtuais para necessidades e aplicações fim-a-fim. A virtualização das funções de rede (NFV – *Network Functions Virtualization*) é uma aplicação do conceito de NV para as funções de rede (NF – *Network Functions*), aplicações que desempenham um papel específico na rede e possuem um propósito bem definido. E ao invés das funções de rede convencionais, o modelo NFV propõe uma migração dessas aplicações de um hardware “caixa-preta” para um modelo containerizado em um hardware feito para aplicações genéricas, podendo estar localizadas tanto localmente no provedor de serviços quanto na nuvem.

O processo de customização e controle das redes virtuais pode ser implementado por meio de um paradigma conhecido como Redes Definidas por Software (SDN – *Software Defined Networks*). O principal conceito do SDN se baseia na separação do plano de controle (a tomada de decisões por trás do fluxo de pacotes de dados na rede) do plano de dados (o tráfego de informações através dos dispositivos de rede, como roteadores e switches). Nas Redes Definidas por Software, o plano de controle é centralizado em uma unidade lógica denominada Controlador SDN (*SDN Controller*) e o plano de dados se resume aos dispositivos controlados pelo Controlador SDN através de interfaces programáveis. De maneira geral, podemos analisar a arquitetura SDN através de três camadas: a camada de infraestrutura, onde se estabelece o plano de dados, a camada de controle, onde ficam localizados diversos Controladores SDN, e a camada de aplicação, onde ficam uma ou mais aplicações como segurança e monitoramento da rede [19]. A Figura 10 ilustra um modelo de arquitetura SDN.

Olhando para as inovações do ponto de vista energético, nos padrões de rede 4G, como LTE e LTE-Advanced, houveram avanços notáveis na gestão de energia, solidificando técnicas como transmissão descontínua (DTX) e recepção descontínua (DRX), juntamente com esquemas de multiplexação, como o acesso múltiplo por divisão ortogonal de frequência (OFDMA). Esses avanços permitiram o desligamento individual de transceptores sempre que não há dados para transmitir ou receber [11].

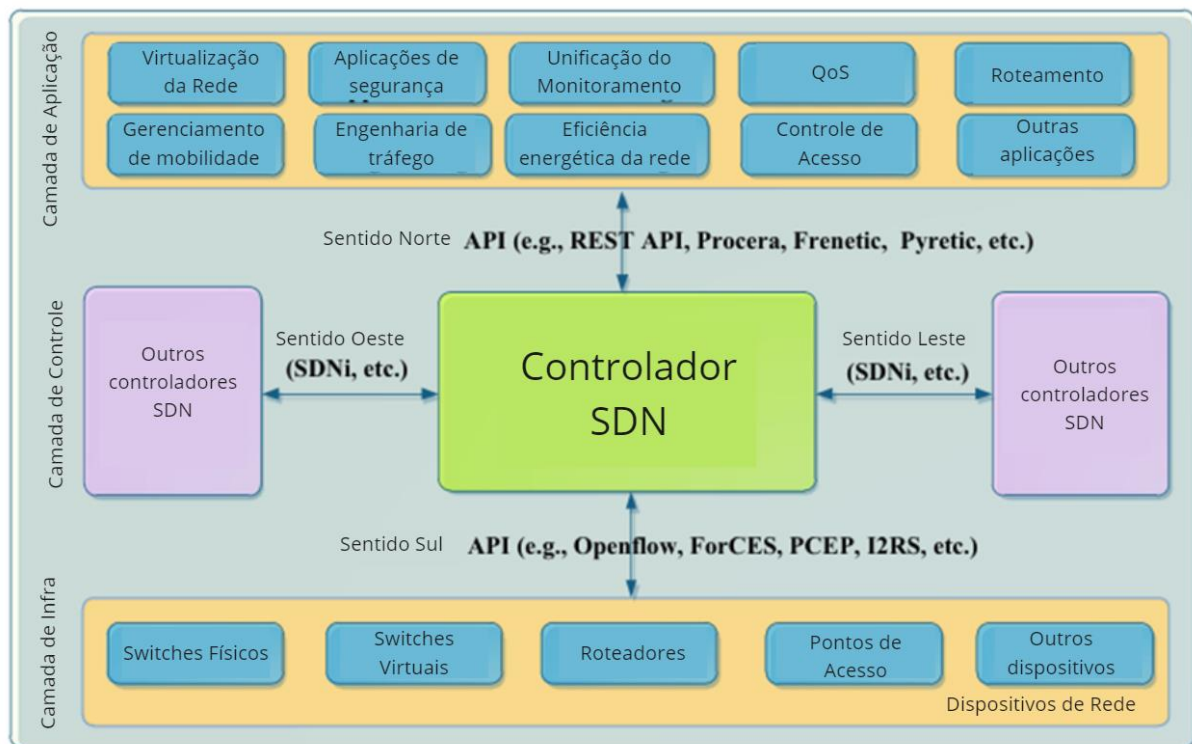


Figura 10 - Arquitetura SDN [19]

Essas inovações geraram diversas propostas para reduzir o consumo de energia nas redes LTE, aproveitando os esquemas DTX e DRX para colocar certos componentes consumidores de energia em modo de repouso (*Sleep Mode*) durante os períodos de inatividade. Basicamente, tanto o DTX quanto o DRX reduzem o ciclo de trabalho do transceptor enquanto ele está em operação ativa e não há transmissão de pacotes. Enquanto o DRX se concentra na transmissão de *uplink* e no consumo de energia do UE, o DTX trabalha no *downlink* e, portanto, é relevante para o consumo de energia das estações base.

Essa abordagem mais refinada da gestão de energia permite não apenas reduzir o consumo durante os períodos de inatividade, mas também adaptá-lo dinamicamente de acordo com a demanda real. Focando especificamente no DTX, essa técnica desempenha um papel crucial na otimização do consumo de energia das estações base, permitindo que sejam desligados componentes individuais quando não estão ativamente envolvidos na transmissão de dados. Esse refinamento representa um avanço significativo em comparação com os padrões anteriores, onde o desligamento completo da estação base era muitas vezes a única opção para economia de energia com base em *Sleep Mode*. Esse período de espera em que o transceptor não está consumindo uma quantidade significativa de energia deu origem a uma nova técnica de *Sleep Mode*, aperfeiçoada na geração seguinte.

2.3.3. 5G E A DESAGREGAÇÃO DA RAN

A tecnologia NR (*New Radio*), também definida pelo 3GPP e lançada em 2019, é o padrão utilizado pela quinta geração de comunicações móveis, o 5G. Como sucessor direto do 4G, o 5G propõe grandes evoluções em relação a geração anterior, isso em torno de 4 grandes eixos [20]:

1. Banda larga móvel aprimorada (eMBB - *enhanced Mobile Broadband*): Foram definidas altíssimas taxas de transmissão, podendo chegar a 1 Gbps teórico para o *downlink* e metade desse valor para o *uplink*.
2. Comunicações Ultraconfiáveis e de Baixa Latência (URLLC - *Ultra Reliable and Low Latency Communications*): Foi definida uma latência de 50 ms com uma confiabilidade de 99,9999%.
3. Comunicações massivas do Tipo Máquina (mMTC - *massive Machine-Type Communications*): Foi definido um tráfego extremamente denso de dispositivos, considerando os aspectos básicos necessários para redes IoT (*Internet of Things*).
4. Operações de Rede Flexíveis: Para permitir as diferentes formas da rede especificadas nos itens anteriores e a seleção entre elas para os usuários, foram definidos recursos como fatiamento da rede (*network slicing*), escalabilidade, densificação, etc.

Conforme especificado, o 5G exigirá uma flexibilidade sem precedentes, que não pode ser provida de maneira sustentável e escalável pela estrutura monolítica característica da quarta geração e suas anteriores, e nem por uma arquitetura baseada em caixas-pretas cujas limitações foram discutidas na seção anterior. A softwarização, virtualização e a desagregação das funcionalidades da rede serão as chaves para possibilitar essa flexibilidade. Os processos de softwarização e virtualização foram especificados na seção anterior, dessa forma o foco deste tópico é trabalhar o processo de desagregação das redes 5G.

Uma das principais inovações apresentadas no NR é a divisão da pilha de protocolos e funções de rede da 5G RAN, ou Rede de Acesso via Rádio do 5G, em duas diferentes unidades denominadas Unidade Centralizada (CU – *Central Unit*) e Unidade Distribuída (DU - *Distributed Unit*) [2]. Na Unidade Distribuída, as funções da RAN são distribuídas em nós mais próximos das estações rádio base, onde cada DU é responsável pelo processamento de sinal, modulação e demodulação, agendamento de recursos de rádio e outras funções relacionadas à camada física do sistema de comunicação sem fio. A Unidade Centralizada é responsável pelas funções de controle da RAN, como gerenciamento de rádio, coordenação de células, alocação

de recursos e decisões de mobilidade. Essa unidade centralizada permite uma visão mais ampla e coerente da rede, facilitando o gerenciamento e otimização dos recursos em toda a infraestrutura do 5G. A Unidade de Rádio é a interface de rádio física e é responsável por transmitir e receber os sinais de rádio para as BSs. A desagregação da RU permite uma maior flexibilidade na implementação das antenas e dos equipamentos de rádio, possibilitando a otimização da cobertura e capacidade da rede. A Figura 11 ilustra a distribuição dos elementos em uma RAN desagregada.

A arquitetura desagregada permite que operadoras de telecomunicações ajustem e atualizem facilmente as diferentes unidades da RAN conforme suas necessidades, sem a necessidade de atualizar toda a infraestrutura, e com a distribuição das funções da RAN em unidades menores, as operadoras podem otimizar os recursos de hardware e energia, resultando em uma redução nos custos operacionais.

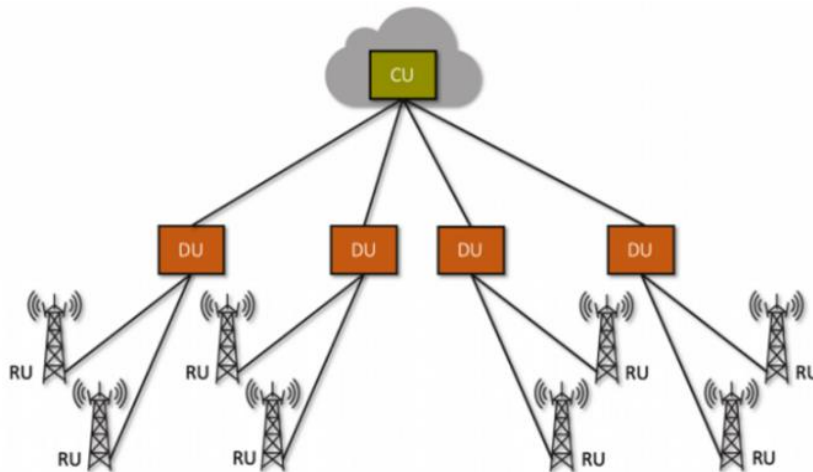


Figura 11 - Arquitetura da RAN Desagregada [21]

A flexibilidade do 5G também proporcionou a implementação de *Sleep Modes*, com o objetivo de eliminar recursos subutilizados, já que as redes móveis são implantadas para atender às demandas de horário de pico e não necessariamente sempre estão nesse estado. Essencialmente, quando os recursos não estão em uso, são desligados para economizar energia. O design enxuto da portadora do 5G permite o desligamento de diferentes componentes da estação base ou apenas períodos mais longos entre sinais. Entre esses dois estados, existem 5 possíveis etapas, nomeadas no artigo [4]:

1. Desligamento de Símbolos (*Symbol shutdown*): Isso envolve a desativação periódica do amplificador de potência da RU. Espera-se que seja reduzido o consumo de energia em até 30% com esse recurso. A sinalização sempre ativa reduzida no 5G permite períodos mais longos de micro *Sleep Mode*, indo até 160

ms com tráfego intermitente. No entanto, para uma portadora do 5G, a periodicidade padrão é de 20 ms, que é aproximadamente 100 vezes mais longa em comparação com uma portadora do LTE. Isso resulta em um período de silêncio significativo, mas reduz o consumo de energia, apesar de adicionar uma leve latência na transmissão.

2. **Moldagem de Tráfego (Traffic shapin):** No 5G, é possível criar símbolos, slots e subquadros vazios por meio de decisões inteligentes de agendamento. Isso permite moldar o tráfego para períodos mais longos de desligamento de símbolos. Técnicas como o *Low Energy Scheduler Solution* (LESS) reprogramam transmissões de downlink para dados não críticos, melhorando a eficiência do desligamento de símbolos em até 15%.
3. **Sleep Mode MIMO:** Envolve a desativação de partes do conjunto de antenas em períodos de baixo tráfego. Por exemplo, em 8x8 MIMO ou 4x4 MIMO, a RU pode ser reconfigurada para o modo 2x2 MIMO, reduzindo a capacidade da célula durante esses períodos.
4. **Muting mMIMO:** Desliga canais em períodos de baixo tráfego, resultando em perda de cobertura e redução de capacidade da célula. Espera-se que seja reduzido o consumo de energia em até 20% com este método.
5. **Desligamento Completo da Portadora (*Complete carrier shutdown*):** Nesta implementação do *Sleep Mode*, as células com foco em capacidade são desligadas, mantendo apenas as células da com foco em cobertura. Isso implica em menor ganho em comparação com o desligamento de símbolos e pode ter um impacto maior no custo operacional. Este modo desliga componentes de hardware por períodos mais longos (*Sleep Mode Profundo*), adaptando-se a variações de longo prazo da célula (*Sleep Mode Dinâmico*), mas implica em maior latência devido ao tempo necessário para reiniciar o sistema inteiro.

Essas implementações de *Sleep Mode*, como o *Advanced Sleep Mode* (ASM), progressivamente desligam a estação base dependendo dos tempos de ativação e desativação dos diferentes componentes. Eles representam uma evolução significativa na gestão de energia, permitindo a adaptação dinâmica do consumo para reduzir o desperdício de recursos em períodos de baixo tráfego.

2.3.4. OPEN RAN

Inicialmente proposto pela O-RAN Alliance, uma organização criada em 2018 com o propósito de trabalhar os conceitos de desagregação, “softwarização” e virtualização em redes 3GPP LTE e NR RANs, o Open RAN é uma iniciativa que propõe interfaces bem definidas e abertas entre os componentes desagregados da RAN (como descrito no tópico anterior), baseando-se na *Release 7.2* do 3GPP [3].

O Open RAN propõe uma arquitetura padronizada para promover a desagregação horizontal e padronização das interfaces da RAN [22]. Uma vez padronizadas e abertas as interfaces que conectam os diferentes componentes da RAN, a interoperabilidade dos elementos se torna viável, o que abre o mercado para novos competidores.

O foco na interoperabilidade vem como oposição às soluções caixa-preta, que caracterizam uma reconfigurabilidade limitada da RAN, trava de fornecedor, entre outras dificuldades para uma arquitetura de rede, como já descrito em tópicos anteriores.

Dessa forma, a arquitetura O-RAN parte da *Release 7.2* do 3GPP, onde é definida a desagregação das funcionalidades da estação base em Unidades Centralizada (CU), Distribuída (DU) e de Rádio (RU).

Nas especificações da O-RAN, as unidades de desagregação da estação base recebem o nome de O-CU, O-DU e O-RU. A Unidade Centralizada Aberta (O-CU) é dividida em dois outros componentes lógicos, uma para o Plano de Controle (CP – *Control Plane*) e outra para o Plano de Usuário (UP – *User Plane*) e essa divisão permite que diferentes funcionalidades sejam executadas em diferentes locais da rede. As outras unidades (O-RU e O-DU) dividem as operações de camada física, sendo a Unidade de Rádio Aberta (O-RU) executando funções no domínio do tempo (ex: *Cyclic Prefix*) e algumas no domínio da frequência (FFT - *Fast Fourier Transform*) enquanto a Unidade Distribuída Aberta (O-DU) cuida de recursos como da camada MAC e do RLC (*Radio Link Control*) [22].

Outra característica extremamente importante na arquitetura O-RAN é a presença de dois Controladores Inteligentes da RAN, os chamados RICs (*RAN Intelligent Controllers*), um para operações de tempo quase real (10 ms a 1 s), denominado *Near-real-time* RIC, e o outro para escalas de tempo não tão instantâneas (maiores que 1 s), denominado *Non-real-time* RIC. O *Near-real-time* RIC é dado por um conjunto de microsserviços que cumprem propósitos customizados, como estabelecimento de políticas para gerenciamento de rádio, os chamados xApps. Os RICs introduzem à rede O-RAN componentes programáveis que são capazes de otimizar rotinas e orquestrar a RAN. Os dois RICs processam os dados dos KPMs (*Key*

Performance Measurements), como número de usuários, *throughput* e uso dos recursos, através de Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina (ML – *Machine Learning*) para determinar e aplicar políticas e ações na RAN como um todo. A Figura 12 apresenta a distribuição e relação dos componentes da arquitetura proposta pela O-RAN Alliance.

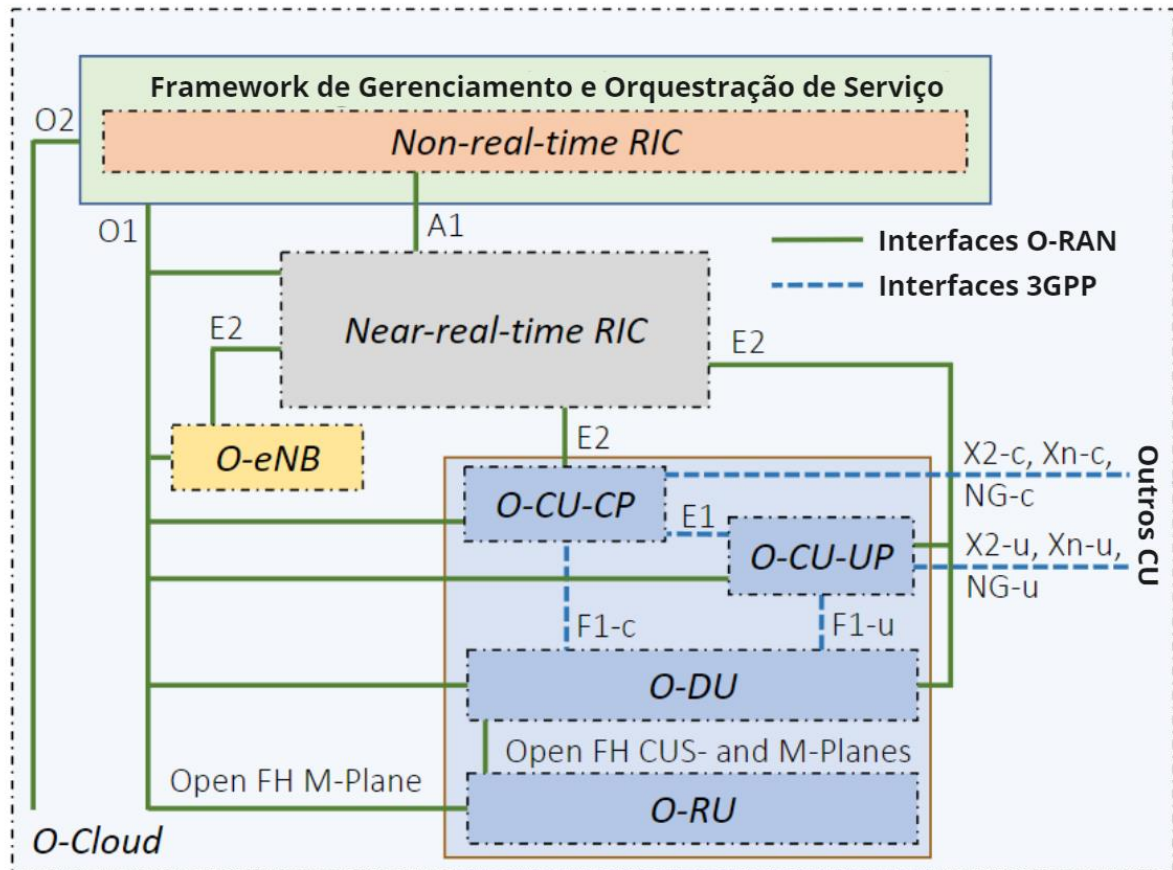


Figura 12 - Arquitetura O-RAN com componentes e interfaces O-RAN e 3GPP [3]

Todos os componentes da arquitetura proposta pela O-RAN podem funcionar em uma nuvem computacional denominada O-Cloud, que se resume a uma infraestrutura virtualizada em um conjunto de computadores que podem estar todos juntos ou distribuídos em diversos *Data Centers*. Por se tratar de estruturas virtualizadas, padronizadas e abertas, os computadores da O-Cloud podem ser caracterizados como servidores *white box*, ou seja, generalizados e não necessariamente proprietários.

A vantagem dessas abordagens revolucionárias tem dois caminhos: o fato de ser aberto permite que pesquisadores analisem as soluções em um ambiente próximo ao real, e permite que operadores de telecom interajam diretamente com equipamentos de rede. A programabilidade permite que algoritmos avançados otimizem a performance da rede através

de uma alocação dinâmica e eficiente dos recursos e controle das funcionalidade de hardware e software, até em tempo real.

Quando se trata de técnicas de *Sleep Mode* no contexto do paradigma Open RAN, ainda há muito caminho a ser percorrido e praticamente não se encontram especificações nas documentações e literatura. Ainda assim, por mais que não tenha sido especificada uma implementação de *Sleep Mode* concreta, nada impede que os recursos de inteligência e controle potencializem as técnicas descritas nos tópicos anteriores.

3. FERRAMENTAS E IMPLEMENTAÇÕES

Foram definidos como objetivos específicos deste trabalho a modelagem e dimensionamento de um ambiente de simulação LTE, tendo neste uma implementação funcional de um modelo de *Sleep Mode* e a possibilidade de avaliação desse cenário quanto ao consumo energético e à qualidade. Neste tópico serão exploradas as ferramentas utilizadas para composição do ambiente de simulação, em questão de software e módulos, as modificações e adaptações necessárias nelas para que fosse possível extrair os dados a serem analisados, o dimensionamento e modelagem do ambiente de simulação de acordo com os parâmetros estabelecidos, e por último as especificações do método de *Sleep Mode* implementado.

3.1.NS-3

O NS-3, ou Network Simulator Version 3, é um software escrito em C++, gratuito e de código aberto, com licença do tipo GNU-GPL versão 2. É um simulador de eventos discretos normalmente utilizado via linha de comando, e é amplamente utilizado por pesquisadores para desenvolvimento de novos protocolos e análise de sistemas complexos. Por se tratar de um sucessor direto do NS-2, possui uma comunidade sólida desde o início, onde há contribuidores tanto da indústria quanto da academia, que enriqueceram sua estrutura base com uma série de módulos que expandiram ainda mais os recursos da ferramenta, que pode simular redes cabeadas, sem fio, protocolos e algoritmos [23].

Os diferentes módulos disponibilizados podem ser agregados para modelar diversos cenários de diferentes tipos de rede, tornando a ferramenta útil para uma análise multi camada de situações que vão desde as mais cotidianas até cenários de extrema complexidade.

Por se tratar de uma ferramenta escrita em C++ e de código aberto, é possível tanto modificar os módulos existentes quanto desenvolver novos módulos. Porém, apesar de utilizar um design orientado a objetos, o que normalmente facilita o uso da aplicação, a modificação dos módulos existentes se torna uma tarefa difícil, uma vez que é necessário entender todos os atributos e propriedades dos objetos e como eles se relacionam entre si para que uma modificação não comprometa o funcionamento da ferramenta.

Para que uma simulação possua os atributos necessários, de forma que os dados extraídos delas façam sentido para realizar provas de conceito de sistemas próximos ao real, é necessário utilizar uma série de módulos que implementam o comportamento de cada aspecto da rede.

3.1.1. ENERGY FRAMEWORK

Considerando a relevância do consumo energético dos nós da simulação, existe um módulo do NS-3 dedicado para esse tipo de análise, estando especificado em [24]. O módulo fornece para o usuário a base necessária para extração de dados relacionados ao consumo de energia e é dividido principalmente em três partes:

1. Modelos de Fonte de Energia (*EnergySource*): Referente a fontes como baterias e capacitores. Os nós podem ter mais de uma fonte de energia, e as fontes podem estar conectadas a mais de um dispositivo. A classe base *EnergySource* mantém uma lista dos dispositivos conectados (Objetos *DeviceEnergyModel*) e também suas captadoras (Objetos *EnergyHarvester*), que alimentam as fontes de energia.
2. Modelos de Consumo de Energia (*DeviceEnergyModel*): Referente a elementos que consomem energia dentro dos dispositivos, como sensores e transceptores. O modelo é desenhado partindo do princípio de que os dispositivos possuem um determinado número de estados, em que cada estado é associado a um nível de consumo energético. Quando um dispositivo muda de estado, seu modelo de consumo notifica o modelo da fonte, e a mesma calcula o gasto energético equivalente.
3. Modelos de Captação de Energia (*EnergyHarvester*): Referente a dispositivos que fornecem energia para as fontes de energia, como painéis solares e carregadores, levando em consideração o ambiente, por exemplo a radiação solar no caso de painéis solares, e é especificado por meio da eficiência de conversão e o consumo interno.

Para utilizar o framework de energia do NS-3 é necessário implementar uma fonte de energia para o nó de interesse, e o modelo de consumo de energia relativo ao dispositivo associado ao nó. Em alguns casos também é necessária a implementação de um captador de energia. A Figura 13 apresenta a estrutura das classes presentes no módulo *Energy Framework*, incluindo modelos prontos para alguns tipos de dispositivos.

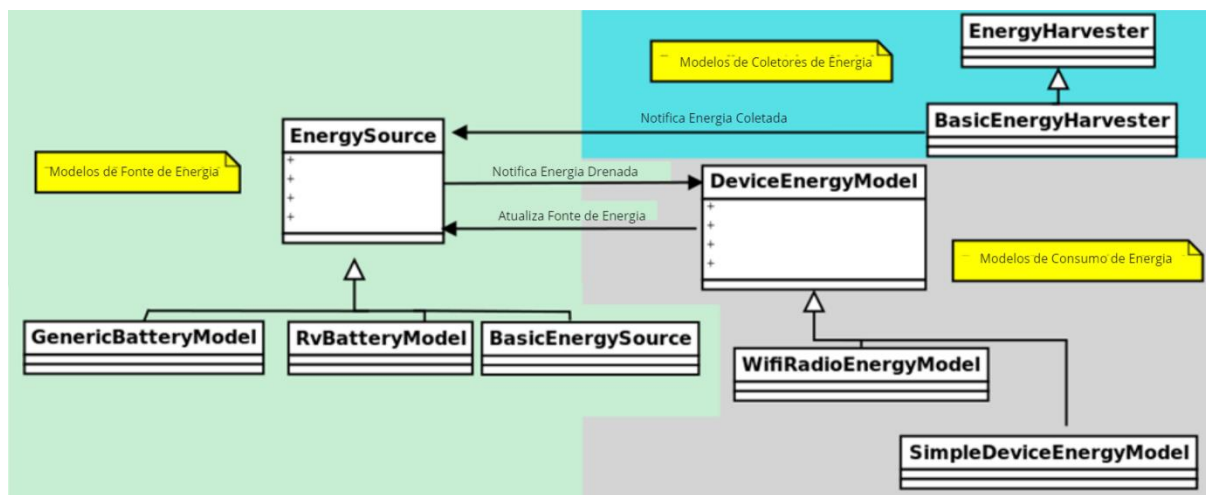


Figura 13 - Estrutura das classes do Framework de Energia do NS-3 [24]

3.1.2. MÓDULO LTE

O Módulo de LTE do NS-3 [25] foi desenvolvido para viabilizar a simulação de redes móveis a partir do padrão LTE. Entre os diversos recursos, os principais fornecidos são:

- Gerenciamento dos Recursos de Rádio
- Agendamento de pacotes com reconhecimento de QoS
- Coordenação de Interferência Inter-célula
- Acesso ao Espectro Dinâmico

Desenvolvendo esses tópicos de maneira mais aprofundada, o módulo oferece modelos realistas de canal, permitindo a simulação de diferentes condições de propagação e mobilidade. Além disso, inclui modelos de mobilidade para os UEs se movimentarem na área de cobertura da estação base. O módulo também implementa procedimentos de *handover* (transferência de conexão entre células) e algoritmos de alocação de recursos, essenciais para a eficiência e a qualidade de serviço. Suporta a modelagem de antenas e técnicas avançadas de transmissão, como MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*). Pode ser integrado a outros módulos do NS-3, como protocolos de camada de transporte e ferramentas da camada de aplicação, possibilitando simulações complexas de sistemas fim-a-fim.

O módulo pode ser utilizado de duas maneiras, uma mais simples onde são modelados apenas os eNBs e os UEs, e uma mais complexa onde o EPC também é configurado, o garante uma rede mais personalizada e com mais recursos disponíveis, por exemplo o uso da interface X2. A Figura 14 ilustra os elementos disponíveis no módulo e como eles se relacionam na arquitetura LTE.

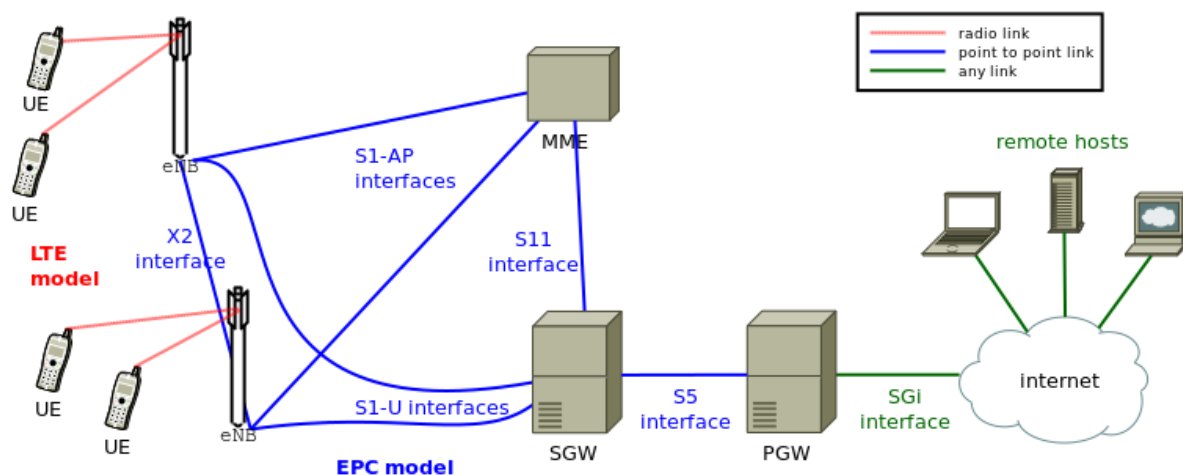


Figura 14 - Elementos disponíveis no módulo LTE do NS-3 [25]

3.2.AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Levando em conta as discussões levantadas a respeito das Redes Celulares Verdes e as técnicas de *Sleep Mode*, para ser capaz de analisar a eficiência desse método de redução do consumo energético é necessário antes construir uma simulação que corresponda a um cenário em que a implementação do mesmo faça sentido. Para que isso seja alcançado, o primeiro passo é desenvolver um ambiente que simule uma rede móvel funcional, de maneira que as implementações das características que serão analisadas possam ser feitas de maneira iterativa.

Apesar de não ser a tecnologia de redes móveis mais recente, o LTE possui uma série de características semelhantes à estrutura do 5G, além de ser algo que de forma alguma está em desuso. Além disso, como apresentado anteriormente, o LTE possui uma implementação nativa e estável no NS-3, o que a fez ser a tecnologia escolhida para a simulação realizada.

O ambiente que será modelado representa o cenário de um único pavimento de um shopping em um local movimentado. Para se aproximar de resultados que fazem jus a um cenário real, será utilizado como base o Shopping Conjunto Nacional, localizado em Brasília. O Conjunto Nacional possui uma área de 81.592 m² e 4 pavimentos. Dessa forma, podemos considerar que cada andar possui uma área estimada de 20.398 m². Aproximando o formato para um quadrado com lados de 150 m, temos para a simulação um espaço retangular de 150 x 150 = 22.500 m².

Como descrito na definição das macro-células, apesar da extensa área de cobertura, quando se trata de locais *indoor* elas não possuem uma garantia de cobertura concreta, logo na simulação será utilizada uma célula pequena. De acordo com a Tabela 4, a partir da comparação entre as áreas de cobertura dos diferentes tamanhos de células, para cobrir uma área de 150 m

x 150 m seria possível utilizar 1 Macro-célula, ou 1 Micro-célula, ou n Pico-células ou N Femto-células, com $n < N$. Para garantir uma análise mais robusta em relação aos fenômenos de uma rede móvel, como os processos de mobilidade e *handover*, além da própria análise do consumo energético, é mais indicado um número maior que 1 de células, o que descarta o uso de Macro-células ou Micro-células, e utilizar um número muito grande de células pode dificultar a análise dos dados, o que descarta o uso de Femto-células.

Dessa forma, foi escolhido o uso de 4 Pico-células para cobrir a área da simulação, que distribuídas igualmente no espaço nos dá uma distância de 50 m entre cada uma delas, formando uma grade 2x2, onde os 50 m são entre cada célula com sua célula vizinha e com as bordas da construção, como ilustrado na Figura 15.

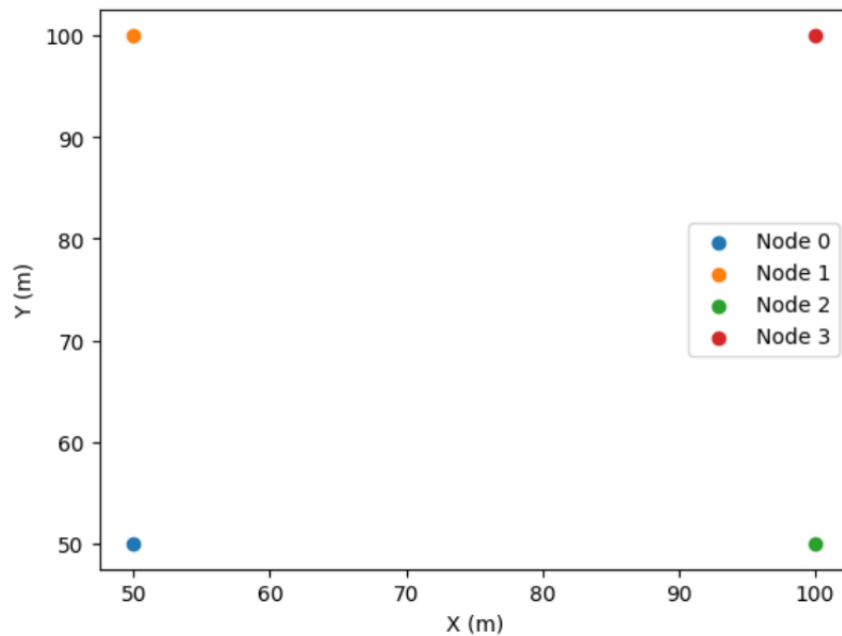


Figura 15 - Distribuição das Pico-células na topologia

Para garantir um volume de tráfego razoável nas células, foram posicionados 90 UEs na simulação. Eles foram distribuídos aleatoriamente por um modelo de alocação do NS-3 denominado *ns3::RandomDiscPositionAllocator* e em torno do espaço determinado com ponto de referência no centro na construção. Os dispositivos deslocam-se pelo espaço a partir de um modelo de mobilidade do NS-3 denominado *ns3::RandomWalk2dMobilityModel*, onde a cada 1 s de simulação cada UE é realocado a 1 m de distância da sua posição anterior, a partir de um parâmetro de normalização, garantindo assim uma movimentação próxima do real. Dessa forma, um UE se deslocando a 1 m/s poderia atravessar o Shopping em 150 s, desde que ele andasse em linha reta, porém devido a obstáculos e ao fluxo de pessoas em determinadas áreas

isso normalmente não é possível. A Figura 16 ilustra um exemplo de distribuição inicial dos 90 UEs, onde os pontos pretos mais evidentes representam as eNBs.

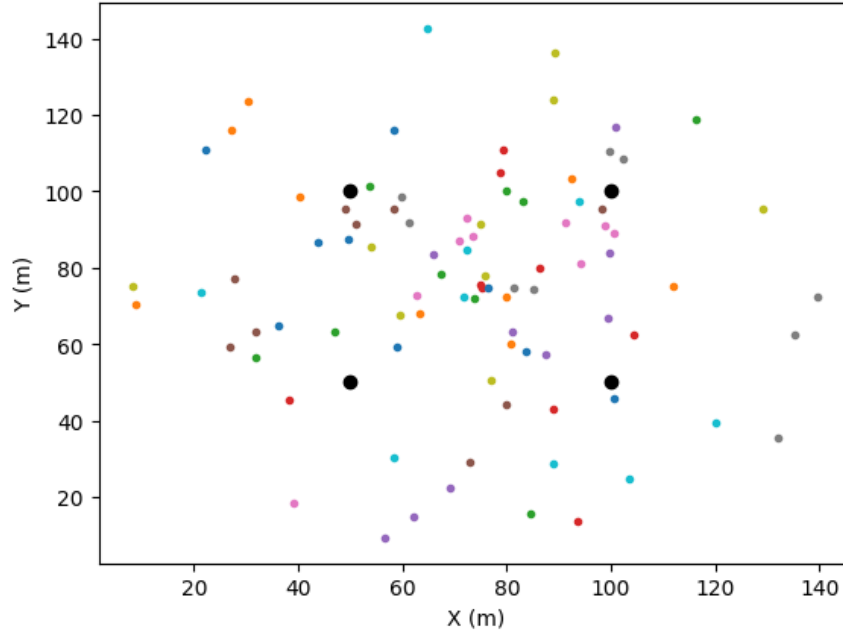


Figura 16 - Distribuição inicial dos UEs e eNBs na topologia

Outra característica importante da simulação é a implementação de um EPC simples, o que permitiu a conexão das estações base através da interface X2, que por sua vez possibilitou o uso de um processo de *handover* denominado pelo NS-3 de “Célula mais Forte”. Esse *handover* tem como gatilho o momento em que a métrica de qualidade de conexão do UE com a célula vizinha ultrapassa um limiar pré-determinado. Essa métrica de qualidade é denominada Qualidade do Sinal de Referência Recebido (RSRQ - *Reference Signal Received Quality*), eq. (4), que por sua vez é calculada a partir da Potência do Sinal de Referência Recebido (RSRP - *Reference Signal Received Power*), a quantidade de Blocos de Recurso (*Resource Blocks*), representada na equação como N, e o Indicador de Força do Sinal Recebido (RSSI - *Received Signal Strength Indicator*).

$$RSRQ = \frac{N * RSRP}{RSSI} \quad (4)$$

A interface X2, do plano de controle, é usada no procedimento de *handover*, especialmente para sua preparação e realização. Um *handover* X2 é realizado através da interface X2, e essa categoria de *handover* não envolve outros componentes além dos próprios eNodeB e UE. A Tabela 6 apresenta os parâmetros utilizados na configuração da simulação. Os

parâmetros que não estão presentes não foram diretamente configurados, logo seguem os valores padrão do NS-3. Mais detalhes sobre as configurações e uso dos módulos estão presente no código construído [26].

Tabela 6 - Parâmetros da simulação realizada no NS-3

Parâmetro	Valor
Número de UEs	90
Número de eNBs	4
Distância eNBs	50 m
Potência Tx	20 dBm
Velocidade UE	1 m/s
Alocação UE	<i>RandomDiscPositionAllocator</i>
Mobilidade UE	<i>RandomWalk2dMobilityModel</i>
Mobilidade eNB	<i>ConstantPositionMobilityModel</i>
Handover	<i>A3RsrpHandoverAlgorithm</i>
Bearer	<i>NGBR_VIDEO_TCP_DEFAULT</i>
Aplicação UE	<i>UdpSocketFactory</i>

3.3.MÓDULO DE ENERGIA LTE

Como descrito no tópico sobre o Framework de Energia do NS-3, é possível utilizá-lo para gerar dados relacionados ao consumo energético de nós da simulação. No entanto, o único modelo de rede sem fio que está implementado no NS-3 é o que representa o Wi-Fi. Para realizar a análise do consumo na simulação da rede LTE desenvolvida, foi necessário não somente desenvolver o modelo de consumo do eNB, como também adaptar o NS-3 para que isso fosse possível.

Ainda citando o tópico do Framework de Energia, foi descrito que para utilizar o módulo é necessário possuir uma fonte de energia e associar um nó com um modelo de consumo a essa fonte. Conforme o nó associado ao modelo de consumo muda de estado, diferentes níveis de consumo são notificados para a fonte. Nativamente no NS-3, não é possível acessar os estados assumidos por um eNB através da simulação. Por conta disso, foi necessário modificar a estrutura da classe que modela a camada física das eNB. O modelo de eNB disponível possui os seguintes estados já modelados: IDLE = 0, TX_DL_CTRL = 1, TX_DATA = 2, TX_UL_SRS

= 3, RX_DL_CTRL = 4, RX_DATA = 5, RX_UL_SRS = 6. Sendo IDLE o intervalo entre duas transmissões consecutivas, e TX_ e RX_ os estados relacionados a pacotes de controle e de informação para os canais de transmissão e recepção respectivamente, e todos os estados controlados de maneira independente para *downlink* e *uplink*.

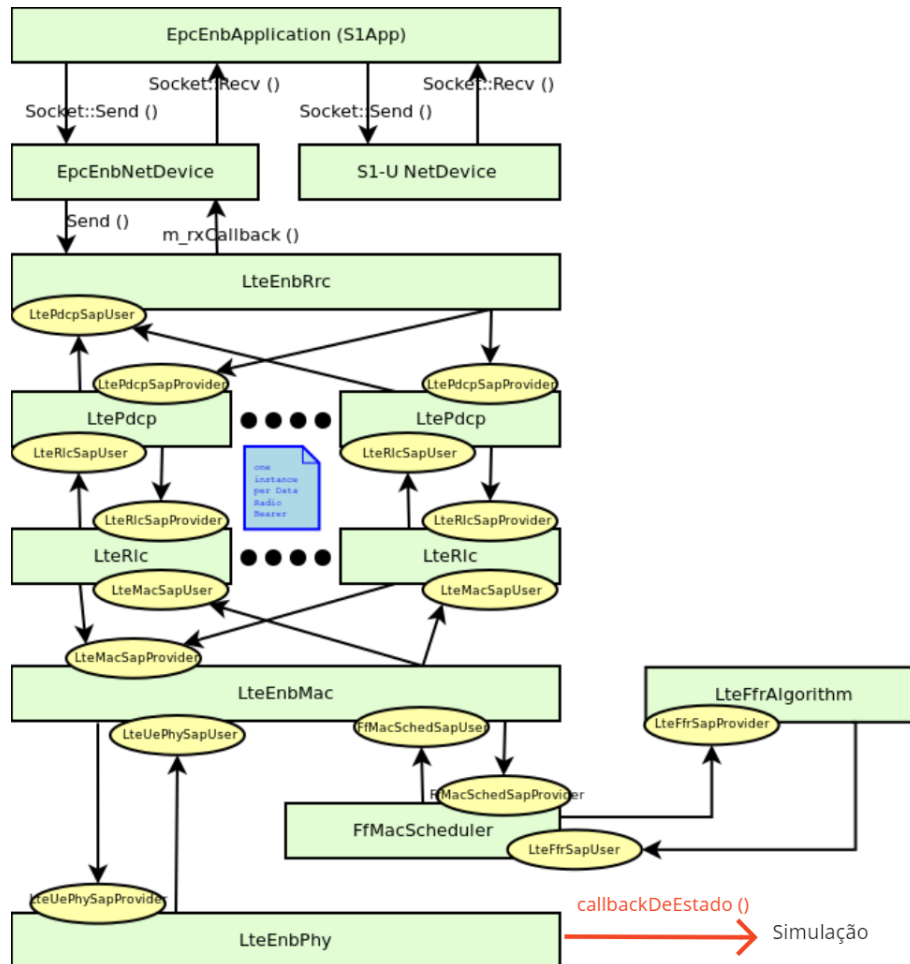


Figura 17 - Estrutura da Classe lteEnb ilustrando o recurso alterado no NS-3 [25]

A modificação desenvolvida implantou uma maneira de exportar para a simulação os valores de cada estado, para que eles pudessem ser utilizados de base para o modelo de consumo do módulo de energia. Esse processo foi feito alterando a classe *LteEnbPhy*, de maneira que os valores de estado se tornassem rastreáveis ao mesmo tempo que as demais classes que utilizam a *LteEnbPhy* não fossem prejudicadas. A Figura 17 apresenta a estrutura de classes do *lteEnb* e ilustra o processo de extração dos dados de estado (seta em vermelho).

Já dentro da simulação, os estados de RX (recepção) e TX (transmissão) foram resumidos a um único estado de cada, e um novo estado foi criado para modelar o *Sleep Mode*, que será descrito no próximo tópico.

Sendo assim, o modelo de consumo do eNB foi desenvolvido com base em 4 estados: IDLE, RX, TX e SLEEP. O consumo energético atribuído a cada estado foi baseado na análise feita em [27], onde é descrito um valor de consumo para diferentes tamanhos de células, incluindo pico-células. Dessa forma, os valores utilizados para a construção do modelo foram: IDLE = 1.5 W, TX = 6.9 W, RX = 2.3 W e SLEEP = 0.2 W. O cálculo do consumo é realizado de maneira individual para *uplink* e *downlink* de cada eNB, de maneira que no decorrer da simulação, ao alternar entre os estados, cada eNB utiliza de sua maneira a energia de uma bateria (que no caso funciona como uma fonte), que é modelada por um reservatório de 1.000.000.000 J.

3.4.FUNÇÃO DE SLEEP MODE

Após a implementação de um ambiente LTE dinâmico e funcional, além de uma maneira de medir o consumo apresentado por ele, o próximo passo foi desenvolver um recurso capaz de modelar uma técnica de *Sleep Mode*.

Para esta simulação em específico, devido ao princípio seguido de trabalhar de maneira iterativa, foi implementado inicialmente uma técnica de *Sleep Mode* que é o primeiro passo para técnicas mais robustas, sendo ela o *Sleep Mode* estático, simples e profundo. Ou seja, com o gatilho baseado em agendamento, afetando um único componente de cada vez e durando mais que alguns milissegundos. Este modelo foi escolhido pois já apresenta resultados visíveis sem a necessidade de implementações mais complexas, além de que para evoluir a função implementada é necessário apenas trabalhar no gatilho e replicar para vários elementos.

O recurso desenvolvido funciona da seguinte maneira: Em um momento pré-determinado da simulação, a estação base escolhida para entrar em *Sleep Mode* tem sua potência de transmissão definida para 0 dBm, e seu estado de consumo energético é definido para o já citado estado SLEEP. Quando isso ocorre, todos os dispositivos associados a essa estação sofrem um *handover* forçado para a estação vizinha que possua o maior valor de RSRQ e RSRP. O propósito dessa implementação é simular o *Sleep Mode* não da estação inteira, e sim de um componente de portadora, e que no caso da estação modelada, existe apenas 1.

O consumo total da simulação, dado que foi agendado o *Sleep Mode* para uma estação, é calculado de acordo com base na eq. (5) [11]:

$$P_{elemento} = f_{sleep}P_{sleep} + f_{ativo}P_{ativo} \quad (5)$$

Ou seja, o consumo energético total de um dispositivo é dado pela fração do tempo em que o dispositivo está em *Sleep Mode* vezes o consumo desse modo, somado da mesma multiplicação para o período ativo. Porém, para o caso simulado, é necessário repartir o caso ativo entre a fração e o consumo de todos os estados, como demonstrado na eq. (6):

$$P_{elemento} = f_{sleep}P_{sleep} + f_{RX}P_{RX} + f_{TX}P_{TX} + f_{idle}P_{idle} \quad (6)$$

Para calcular o consumo total da simulação é necessário apenas somar o consumo individual de cada elemento.

O propósito dessa implementação é abrir caminho para evoluções futuras, onde o critério de qual estação entrará em *Sleep Mode* poderá ser definido de maneira inteligente, além do gatilho deixar de ser agendado e passar a ser dinâmico. Ainda assim, para fins de demonstração da funcionalidade, o modelo desenvolvido cumpre o propósito.

4. RESULTADOS

Na seção anterior, foram apresentados os conceitos, modelos e parâmetros que compuseram a parte prática deste trabalho, uma simulação capaz de produzir dados mediante os objetivos estabelecidos. Um desses objetivos é possibilitar a avaliação da efetividade do cenário de economia de energia implementado quanto à qualidade e ao consumo. Sendo assim, este tópico visa analisar os dados coletados a partir das simulações, a fim de concretizar se a avaliação da efetividade é possível a partir dos modelos propostos. A análise será realizada em três partes, um levantamento dos valores relativos à qualidade, um levantamento dos valores relativos ao consumo energético e uma correlação dessas duas informações.

Foram simulados diversos cenários do modelo descrito, todos com os mesmos parâmetros, alterando apenas quando e qual estação base seria colocada em *Sleep Mode*. A fração do tempo que as estações permaneceram em *Sleep Mode* foi de 50% do tempo total da simulação, ou seja, os outros 50% foram divididos nos outros estados que a estação pode assumir.

O objetivo das simulações nesses diferentes cenários foi demonstrar como o ambiente construído se comporta com o *Sleep Mode* de cada estação, a fim de provar sua funcionalidade. Além de, em conjunto, trabalhar a eficiência do método de *Sleep Mode* escolhido. Para tal fim, foram coletados os dados de RSRQ (Qualidade do Sinal de Referência Recebido) de 6 casos simulados, sendo eles: Sem qualquer *Sleep Mode* ativo, *Sleep Mode* da primeira célula, *Sleep Mode* da segunda célula, *Sleep Mode* da terceira célula, *Sleep Mode* da quarta célula e *Sleep Mode* em rodízio de células. Após essas simulações, foi calculado o RSRQ médio por célula para que fosse possível visualizar graficamente que, olhando para a simulação como um todo, ao desligar a componente de portadora de uma célula no meio da simulação, forçando os UEs associados a iniciarem o processo de *handover* com uma célula vizinha, é gerada uma disparidade de qualidade do serviço total prestado pela célula em *Sleep Mode* em relação às demais. Utilizando esse valor de RSRQ médio para comparar com as demais simulações, é possível entender se existe alguma diferença de resultado dependendo da célula colocada em *Sleep Mode*, mesmo em um cenário relativamente igual para todas elas.

A Figura 18 representa graficamente os dados coletados, porém, como o valor do RSRQ é dado em dB e é um valor negativo, para que o gráfico não ficasse invertido, todos os valores foram multiplicados por -1. Dessa forma, os valores maiores no gráfico representam valores menores na simulação.

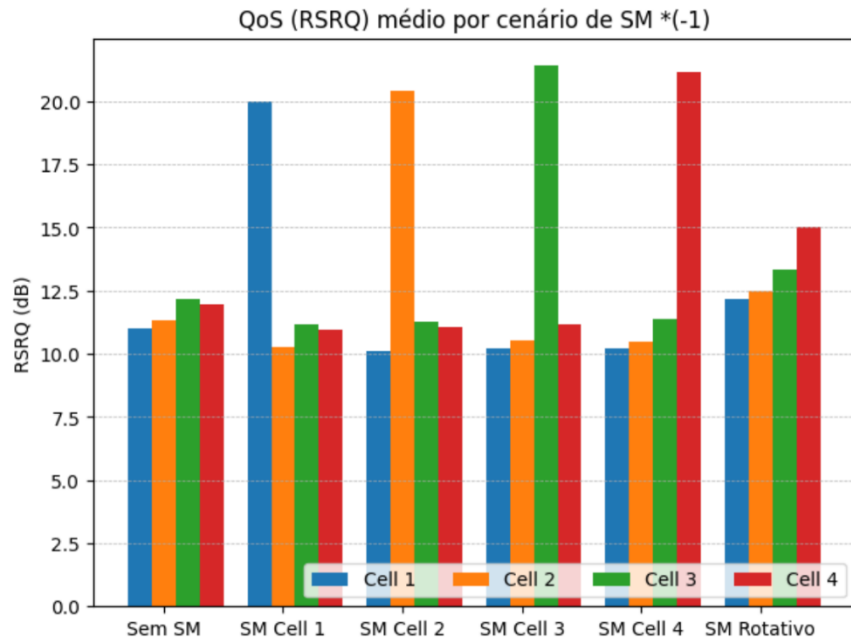


Figura 18 - Visualização das médias de QoS (RSRQ) por célula e por simulação

Além dos dados de qualidade do canal, também foram coletados os dados correspondentes ao consumo energético total para cada simulação realizada, e sua distribuição gráfica se deu exatamente da mesma forma, para facilitar a comparação entre os parâmetros. A Figura 19 apresenta a visualização das informações referentes ao consumo energético (potência consumida) das simulações realizadas.

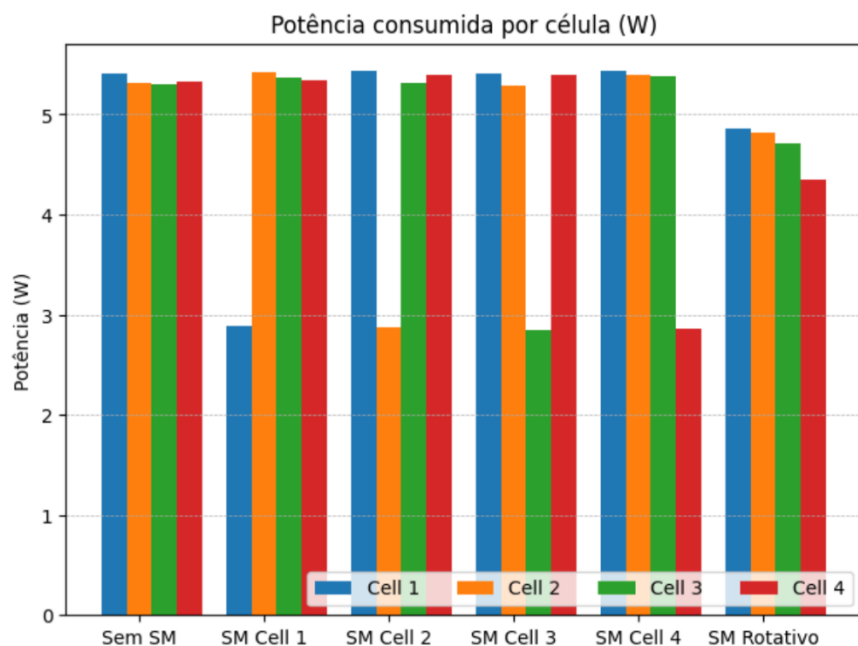


Figura 19 - Visualização do consumo energético total por célula e por simulação

Comparando as duas figuras é possível visualizar que, conforme o esperado, as células que foram colocadas em *Sleep Mode* tiveram uma redução considerável em seu consumo, mas ainda assim tiveram uma piora no indicador de qualidade média do canal. Apesar desse último valor não servir para uma análise concreta do real impacto tanto quanto parâmetros como perda de pacotes ou jitter, ele ainda funciona para uma comparação entre diferentes simulações.

Porém, com apenas esses gráficos, não é possível dizer qual cenário se saiu melhor do que o outro, e foi justamente por esse motivo que a função de utilidade foi introduzida nesse trabalho. Para o cálculo da contribuição de cada propriedade na função de utilidade, é necessário obter apenas um valor de cada característica por simulação, ou seja, um único valor para a qualidade e um único valor para consumo energético. Por este motivo, foi calculada a média mais um vez, obtendo os valores de RSRQ médio por simulação, que representa a informação do quanto a ausência das células que estiveram em *Sleep Mode* prejudicaram a média das células ativas, e consumo energético total por simulação, que representa a informação de quanta energia foi economizada por conta da técnica de *Sleep Mode* utilizada. Os valores para qualidade resultaram, na mesma ordem do gráfico: [-11.53, -12.99, -13.11, -13.25, -13.21, -13.15], enquanto os valores de consumo energético resultaram: [21.36, 19.02, 19.01, 18.95, 19.06, 18.74].

O cenário em que nenhuma técnica de *Sleep Mode* foi utilizada foi considerado o caso base, assim como descrito na seção referente à função de utilidade. Dessa forma, foram calculados os parâmetros de contribuição dos demais cenários, resultando para a qualidade, ainda na mesma ordem do gráfico, porém sem o caso base: [-12.72, -13.71, -14.91, -14.59, -14.11]. Apenas com esses valores já é possível visualizar que o primeiro valor, correspondente ao *Sleep Mode* da célula 1, degradou menos a qualidade do canal na média, o que significa que utilizar um peso que favoreça muito a qualidade pode acabar revelando esse cenário como o mais útil. Para o parâmetro de contribuição do consumo energético na utilidade temos: [10.95, 11.00, 11.28, 10.77, 12.26]. Com esses valores, é possível observar que o último cenário, ou seja, o *Sleep Mode* em rodízio, trouxe uma maior economia, logo um peso que favoreça mais a economia de energia pode caracterizar o último cenário como sendo o mais útil.

Calculando a função de utilidade com $\alpha_Q = 0.9$ e $\alpha_E = 0.1$, ou seja, a qualidade contribuindo em 90% para a utilidade e a economia de energia contribuindo 10%, temos:

- U para SM da Célula 1 : 89.64
- U para SM da Célula 2: 88.76
- U para SM da Célula 3: 87.71

- U para SM da Célula 4: 87.94
- U para SM em Rodízio: 88.53

Neste cenário, a função de utilidade revelou a simulação onde houve *Sleep Mode* da Célula 1 como o mais útil, assim como previsto, porém não seria recomendado que, para o critério de ponderação escolhido, qualquer uma das alternativas fossem implementadas, já que degradação da qualidade é bastante significativa, uma vez que o caso base possui $U = 100$.

Calculando a função de utilidade com $\alpha_Q = 0.7$ e $\alpha_E = 0.3$, temos:

- U para SM da Célula 1 : 94.38
- U para SM da Célula 2: 93.7
- U para SM da Célula 3: 92.95
- U para SM da Célula 4: 93.01
- U para SM em Rodízio: 93.8

Neste cenário, a função de utilidade manteve o caso do *Sleep Mode* da célula 1 como o mais útil, o que vai contra a previsão, provavelmente porque a qualidade ainda mantém uma importância muito alta no critério. Apesar disso, para esse conjunto de pesos de contribuição, já seria mais razoável a implementação de algumas das alternativas, uma vez que o valor de utilidade não se revelou tão baixo em relação ao caso base.

5. CONCLUSÕES E PRÓXIMOS PASSOS

É fato que o mundo da tecnologia, e com ele o mundo das telecomunicações, tem mudado muito rápido, e não seria um absurdo dizer que as telecomunicações estão à frente desse movimento todo. Porém, não podemos nos cegar com a inovação e o potencial que o futuro apresenta sem olhar também para as consequências dessa corrida sem limites. Os objetivos de desenvolvimento sustentável estabelecidos pela Organização das Nações Unidas devem ser uma prioridade no campo acadêmico e industrial, uma vez que eles existem por conta da própria ação humana.

Também é fato que o setor de telecomunicações representa uma parcela das emissões globais de GHG, e pelo ritmo de crescimento da quantidade de usuários e do tráfego ao redor do mundo, não seria surpresa se essas emissões crescessem ainda mais. Apesar disso, ao longo dos últimos anos, uma série de iniciativas foram tomadas para que, pelo menos nós da área de telecomunicações, possamos fazer a nossa parte. E elas vão desde grandes projetos com o financiamento de um continente inteiro, ao início de uma área de pesquisa que tem potencial para mudar o mundo. Não somente isso mas tecnologias voltadas para a economia de energia deixaram de ser um detalhe ou um extra e passaram a ser um componente fundamental da arquitetura das redes móveis.

Visando contribuir com o campo das Redes Celulares Verdes, este trabalho apresenta uma implementação de um método de *Sleep Mode* em uma arquitetura LTE simulada através do NS-3. Além da implementação em si, foi apresentado e desenvolvido o ferramental necessário para viabilizar a análise do sistema proposto quanto ao consumo energético, qualidade do serviço e uma correlação desses dois parâmetros.

Uma vez que foi implementado o *Sleep Mode* estático, simples e profundo, para torná-lo dinâmico e avançado não são exigidos muitos passos. Como trabalhos futuros, propõe-se o desenvolvimento de um gatilho dinâmico que, em um primeiro momento, pode verificar a quantidade instantânea de usuários associados à célula, onde caso esteja abaixo de um limiar, a célula pode entrar em *Sleep Mode*, forçando o *handover* de seus usuários associados para as células vizinhas. Com este cenário funcional, poderiam ser aproveitadas as vantagens de uma arquitetura Open RAN, controlando o gatilho do *Sleep Mode* não dinamicamente a partir de uma célula, mas sim visualizando características de todas as células conectadas ao Controlador Inteligente da RAN. Não seria inviável o uso de inteligência artificial, uma vez que os resultados da função de utilidade podem ser utilizados como pesos no treinamento de uma rede neural com foco em aprender quando e qual célula colocar em *Sleep Mode*. Uma outra

abordagem para o futuro do projeto pode se focar em manter o gatilho estático, porém agendando o *Sleep Mode* com uma certa antecedência, considerando uma previsão de como o tráfego se comporta com base no horário do dia.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] MIR, M, KUMAR S. Evolution of Mobile Wireless Technology from 0G to 5G. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, Vol. 6 (3) , 2015.
- [2] BONATI, L. et al. Open, Programmable, and Virtualized 5G Networks: State-of-the-Art and the Road Ahead. *Computer Networks*, v. 182, p. 107516, dez. 2020.
- [3] POLESE, M. et al. Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 25, n. 2, p. 1376–1411, 2023.
- [4] LARSEN, L. M. P. et al. Toward Greener 5G and Beyond Radio Access Networks—A Survey. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, v. 4, p. 768–797, 2023.
- [5] WILLIAMS, L.; SOVACOO, B. K.; FOXON, T. J. The energy use implications of 5G: Reviewing whole network operational energy, embodied energy, and indirect effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 157, p. 112033, abr. 2022.
- [6] CALVIN, K. et al. **IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.** [s.l.] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 25 jul. 2023. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>.
- [7] Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | As Nações Unidas no Brasil. [Online]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>
- [8] FREITAG, C. et al. The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns*, v. 2, n. 9, p. 100340, set. 2021.
- [9] CORREIA, L. M. et al. Challenges and enabling technologies for energy aware mobile radio networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 48, n. 11, p. 66–72, nov. 2010.
- [10] **Peterson, L. Sunay, O. Davie, Bruce. Private 5G: A Systems Approach, 2022.** [Online]. Disponível em: <https://5g.systemsapproach.org>

- [11] WU, J. et al. Energy-Efficient Base-Stations Sleep-Mode Techniques in Green Cellular Networks: A Survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 17, n. 2, p. 803–826, 2015.
- [12] ELAYOUBI, S.-E.; SAKER, L.; CHAHED, T. **Optimal control for base station sleep mode in energy efficient radio access networks**. 2011 Proceedings IEEE INFOCOM. **Anais...** Em: IEEE INFOCOM 2011 - IEEE CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATIONS. Shanghai, China: IEEE, abr. 2011. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5934881/>.
- [13] SALEM, F. E. et al. **Optimal Policies of Advanced Sleep Modes for Energy-Efficient 5G networks**. arXiv, , 19 set. 2019. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1909.09011>.
- [14] DAMNJANOVIC, A. et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks. **IEEE Wireless Communications**, v. 18, n. 3, p. 10–21, jun. 2011.
- [15] SALMAN, H. A. et al. **Topological Planning and Design of Heterogeneous Mobile Networks in Dense Areas**. 2015 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI). **Anais...** Em: 2015 INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL SCIENCE AND COMPUTATIONAL INTELLIGENCE (CSCI). Las Vegas, NV, USA: IEEE, dez. 2015. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7424182/>.
- [16] G. Auer et al. Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown. EARTH PROJECT. 2010.
- [17] 1. M. A. Imran et al. Most suitable efficiency metrics and utility functions. EARTH PROJECT. 2012.
- [18] TABBANE, S. IoT Standards Part II: 3GPP Standards, 2010. [Online]. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/Documents/Events/2018/IoT-BDG/7. IoT Standards Part II - Sami Tabbane.pdf>
- [19] NGUYEN, V.-G.; DO, T.-X.; KIM, Y. SDN and Virtualization-Based LTE Mobile Network Architectures: A Comprehensive Survey. **Wireless Personal Communications**, v. 86, n. 3, p. 1401–1438, fev. 2016.

- [20] Sultan, A. **5G System Overview**, 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview>
- [21] Moniem Tech. What is RAN Disaggregation?, 2021. [Online]. Disponível em: <https://moniem-tech.com/2021/02/16/what-is-ran-disaggregation/>
- [22] Barreto P, Saraiva Jr R, Ferreira G, Carvalho P. Open RAN e os Desafios da sua Experimentação em Plataformas de Código Aberto. XL SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS (2022).
- [23] MEZZAVILLA, M. et al. End-to-End Simulation of 5G mmWave Networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 20, n. 3, p. 2237–2263, 2018.
- [24] NS-3. **Energy Framework**. [Online]. Disponível em: <https://www.nsnam.org/docs/models/html/energy.html>
- [25] NS-3. **LTE Module**. [Online]. Disponível em: <https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte.html>
- [26] Pinto, I. Github. “NS3”, 2023. [Online]. Disponível em: <https://github.com/ismaelithalo/NS3/blob/NS3.37-oran-EST-mmWave/src/energy-saving/examples/es-topology.cc>
- [27] DEBAILLIE, B.; DESSET, C.; LOUAGIE, F. **A Flexible and Future-Proof Power Model for Cellular Base Stations**. 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring). **Anais...** Em: 2015 IEEE 81ST VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC SPRING). Glasgow, United Kingdom: IEEE, maio 2015. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7145603/>