



**UNILAB**

**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA  
AFRO-BRASILEIRA  
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS**

**BENVINDO DIKIZEKO LUKOKI**

**ESTUDO DO CONSUMO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES 5G**

**REDENÇÃO-CE**

**2021**

BENVINDO DIKIZEKO LUKOKI

ESTUDO DO CONSUMO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES 5G

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias do Instituto de engenharias e desenvolvimento sustentável da Universidade da integração internacional da lusofonia afro-brasileira, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias.

Orientador: Prof. Dr. SABI YARI MOÏSE BANDIRI

REDENÇÃO-CE

2021

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Lukoki, Benvindo Dikizeko.

L98e

Estudo do consumo e eficiência energética em redes 5G / Benvindo Dikizeko Lukoki. - Redenção, 2021.  
48f: il.

Monografia - Curso de Engenharia De Energias, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2021.

Orientador: Prof. Dr. SABI YARI MOÏSE BANDIRI.

1. Eficiência energética. 2. Quinta geração - Conexão 5G. 3. Consumo de Energia. 4. Internet of Things(IoT). I. Título

CE/UF/Dsibiuni

CDD 333.79160

---

BENVINDO DIKIZEKO LUKOKI

ESTUDO DO CONSUMO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES 5G

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias do Instituto de engenharias e desenvolvimento sustentável da Universidade da integração internacional da lusofonia afro-brasileira, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Dr. SABI YARI MOÏSE  
BANDIRI (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da  
Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



---

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CACERES  
COAQUIRA

Universidade da Integração Internacional da  
Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



---

Prof. M.Sc. RAMON MAYOR MARTINS  
Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

À minha filha, por ser a força motriz durante esta caminhada. Aos meus pais por me apoiarem, acreditarem e investirem em mim. À minha noiva com a sua forte presença e apoio em todos os momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Mário Lukoki e Mankela Lukoki, por tanto se dedicarem em apoiar durante esta minha trajetória.

Agradeço a minha irmã e meu cunhado Felicidade Pedro e Sambo Pedro, pelo incentivo desde o princípio.

Agradeço também a minha noiva Ricarda Trindade que me acompanhou durante estes 5 longos anos, por ter me dado muita força, motivação, inspiração, e que sempre esteve ao meu lado nos momentos difíceis.

Agradeço a minha filha Analu Lukoki, que por mesmo que seja ainda uma bebê, serviu-me como maior incentivo para superação de barreiras durante este percurso.

Agradeço ao meu professor e orientador Sabi Bandiri, pela excelente orientação, dedicação, suporte, e conselhos na qual agregaram exponencialmente para realização deste trabalho.

Agradeço à todos os professores e técnicos de laboratórios que fizeram parte desta minha trajetória acadêmica.

Agradeço aos meus familiares e amigos que direta ou indiretamente contribuíram para esta conquista.

“Nenhuma Engenharia constrói caráter, mas com caráter se faz os melhores engenheiros.”

(Jordan Lucas)

## RESUMO

Com o passar dos anos, o mundo tem se desenvolvido cada vez mais, e em função disso, as redes de telefonia móvel têm acompanhado este ritmo, na qual começou com a primeira geração (1G) em 1980 e nos dias de hoje estamos na quinta geração (5G), geração esta que nos proporciona maior velocidade, baixa latência, alta compatibilidade com diversos dispositivos. Tendo isso em conta, o consumo de energia tornou-se um fator preocupante, pois apesar das inúmeras vantagens, o 5G acaba consumindo mais energia em relação as gerações anteriores. O presente trabalho apresenta um estudo bibliográfico sobre o consumo de energia e eficiência energética em redes 5G, apresentando possíveis soluções de modo a reduzir o consumo de energia e aumentar a eficiência energética, na qual esta eficiência está relacionada com o número bit transmitidos para cada um joule, proporcionando assim um grande valor ecológico e menores gastos operacionais.

**Palavras-chave:** Quinta Geração (5G). *Internet of Things(IoT)*. Consumo de Energia. Eficiência Energética.

## ABSTRACT

Over the years, the world has developed more and more, and as a result, mobile phone networks have kept pace with this pace, which started with the first generation (1G) in 1980 and today we are on the fifth generation (5G), generation that provides us with higher speed, low latency, high compatibility with various devices. Taking this into account, energy consumption has become a worrying factor, because despite the numerous advantages, the 5G ends up consuming more energy compared to previous generations. The present work presents a bibliographical study on energy consumption and energy efficiency in 5G networks, presenting possible solutions in order to reduce energy consumption and increase energy efficiency, where this efficiency is related to the number of bits transmitted to each joule, thus providing a great ecological value and lower operating expenses.

**Keywords:** Fifth Generation (5G).Internet of Things(IoT). Energy consumption. Energy efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução das redes móveis . . . . .	19
Figura 2 – Principais elementos da arquitetura SBA de uma rede 5G . . . . .	24
Figura 3 – Diferença entre os nós das redes 5G e 4G . . . . .	25
Figura 4 – Perspectiva global de tráfego de dados móveis por ano . . . . .	27
Figura 5 – Carga de tráfego de rede variável . . . . .	28
Figura 6 – Modelo de consumo de energia da estação base . . . . .	28
Figura 7 – Consumo de energia da estação base 4G LTE ( parte superior) e 5G (parte inferior) . . . . .	29
Figura 8 – Consumo máximo de energia de uma única estação base . . . . .	30
Figura 9 – Diagrama em blocos geral de um receptor de arquitetura de conversão direta.	32
Figura 10 – Comprimento da porta física e Indicador de potência dinâmica em função do tempo. . . . .	34
Figura 11 – Gráfico da Tensão de alimentação em função da Corrente de fuga sublimiar.	35
Figura 12 – Energia eficiente da tecnologia 5G . . . . .	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre os parâmetros 4G e 5G . . . . .	22
Tabela 2 – Consumo de energia ADC em função da largura de banda (BW) . . . . .	33

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1G	Primeira Geração
2G	Segunda Geração
3G	Terceira Geração
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	Quarta Geração
5G	Quinta Geração
AAU	<i>Active Antenna Unit</i>
ADC	Analog-to-Digital Converter
AF	<i>Application Function</i>
AGE	Eficiência de Área Verde
AMF	<i>Access and Mobility Management Function</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
APC	Consumo de Energia Área
AUSF	<i>Authentication Server Function</i>
BB	Banda Base
BBU	Unidade Banda Base
CC	<i>Component Carrier</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i>
DN	<i>Data Network</i>
ECG	Ganho de Consumo de Energia
ECI	Índice de Consumo de Energia
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i>
GSM	<i>Global System for Mobile</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MEC	<i>Multi-Access Edge Computing</i>
MIMO	<i>Multiple-input and multiple-output</i>

MMW	<i>Millimeter-wave</i>
NEF	<i>Network Exposure Function</i>
NF	<i>Network Function</i>
NFV	<i>Network function virtualization</i>
NSSF	<i>Network Slice Selection service</i>
PCF	<i>Policy Control Function</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
SBA	<i>Service-Based Architecture</i>
SMF	<i>Session Management Function</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
UDM	<i>Unified data management</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UPF	<i>User Plane Function</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$E_H$	Economia no modo hibernação
$T_{ocioso}$	período de hibernação
$T_{total}$	período total
$P_{total}$	Consumo médio de energia
$f_A$	fração de tempo de no estado hibernação
$f_H$	fração de tempo no estado ativo
$P_H$	consumo de energia no modo de hibernação
$P_A$	consumo de energia no modo ativo
$ECI$	Índice de consumo de energia
$P_E$	Potência total de entrada
$KPI$	Indicador chave de desempenho
$PI_{rural}$	Indicador de desempenho rural
$PI_{urbano}$	Indicador de desempenho urbano
$A_T$	Área total
$E_c$	Energia consumida
$N_p$	Número de usuários no horário de pico
$E_c$	Consumo de energia área
$ECG$	Ganho de consumo de energia
$K$	Constante de Boltzmann
$T$	Temperatura
$AGE$	Eficiência de área verde
$P_m$	Economia de energia agregada por modo de hibernação ( Primeira camada)
$Pn_n$	Economia de energia agregada por modo de hibernação ( segunda camada)
$R_m$	Raio de cobertura da macro-célula
$R_n$	Raio da femto-célula
$\mathfrak{P}_t$	Potência transmitida

$P_c$  Potência consumida

$\eta$  Eficiência do Amplificador RF

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> . . . . .	<b>16</b>
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i> . . . . .	<i>16</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i> . . . . .	<i>16</i>
<i>1.1.3</i>	<i>Metodologia de Pesquisa</i> . . . . .	<i>16</i>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> . . . . .	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b> . . . . .	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Evolução Das Gerações Das Redes De Telefonia Móvel</b> . . . . .	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>Redes de Quinta Geração</b> . . . . .	<b>21</b>
<i>2.2.1</i>	<i>Visão Geral</i> . . . . .	<i>21</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Arquitetura</i> . . . . .	<i>22</i>
<b>2.3</b>	<b>Internet Das Coisas</b> . . . . .	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>CONSUMO DE ENERGIA EM REDES 5G</b> . . . . .	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Desafios do consumo de energias em redes 5G</b> . . . . .	<b>31</b>
<i>3.1.1</i>	<i>Conversor Analógico-Digital</i> . . . . .	<i>32</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Processamento Digital</i> . . . . .	<i>33</i>
<b>4</b>	<b>EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES 5G</b> . . . . .	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>Métodos para o aumento da eficiência energética</b> . . . . .	<b>38</b>
<b>4.2</b>	<b>Antenas integradas para mais eficiência</b> . . . . .	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	<b>44</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde 1980 quando foi apresentada a primeira geração móvel, na qual permitia apenas a transmissão de voz e com baixa qualidade, porém, com o passar dos anos a conectividade sem fio percorreu um longo caminho de evolução até chegar a Quinta Geração (5G), na qual fornece uma complexa infraestrutura que a possibilita ter inúmeras vantagens em relação as gerações anteriores, no que tange a velocidades mais rápidas, menor latência, maior compatibilidade de suportar dispositivos, maior eficiência em termos de bit por joule, e um imenso pacote de tecnologias associadas de modo a garantir a melhor experiência aos usuários. Em função das atuais demandas dos usuários das redes de telefonia móvel, tornou-se necessário suprir com o uso de novas bandas de frequência, com desenvolvimento de novas tecnologias e técnicas.(MULDER, 2018)

Em relação a uma matéria publicada no site da *International Telecommunication Union* (ITU) ou seja União Internacional das Telecomunicações, diz que: "o aumento do tráfego, cujo volume se multiplicará previsivelmente entre 10 e 100 no período 2020-2030, o aumento do número de dispositivos e serviços, e a demanda por maior acessibilidade e uma melhor experiência do usuário".(ITU, 2018). A ITU prevê um número de dispositivos conectados a internet alcance 50.000 milhões a partir de 2025. O 5G foi projetado de modo a não fornecer apenas serviços de banda larga móvel melhores e mais rápidos, mas também de modo a expandir para um leque de novas áreas de serviço como comunicação de missão crítica, conexão da *Internet of Things* (IoT) ou seja internet das coisas, agronegócio, e indústria 4.0. (QUALCOMM, 2020).

Tendo em conta as altas velocidade dados e a grande confiabilidade de rede superior, o 5G terá um grande impacto no mundo dos negócios, pois devido aos seus benefícios, aumentará a eficiência de produção do setor industrial, como por exemplo fábricas inteligentes que podem usar o 5G para executar *Ethernet* industrial, e não só, como também a sua aplicação na área da medicina, onde já é possível executar procedimentos cirúrgicos a distância.

O consumo de energia é considerado um fator muito importante no uso em larga escala de redes móveis. As contas de alta energia tornam-no caro tanto para os usuários quanto para as operadoras. A geração de energia tem efeitos ambientais e está diretamente associada ao número de usuários e ao volume de dados utilizados nas redes de comunicação. Mais de 10% da energia total do mundo é consumida pelos setores de TIC. Uma parte significativa disso é utilizada em redes móveis. Portanto, a redução do consumo de energia em redes móveis 5G

é uma questão importante ao projetá-la e estruturá-la. Em função disso, o presente trabalho apresenta um estudo de forma sucinta sobre o consumo e eficiência energética em redes 5G, apresentando uma abordagem clara para melhoria da eficiência nestas redes.(MASOUDI, 2019)

## **1.1 Objetivos**

Nesta seção foram estabelecidos os objetivos gerais e específicos do trabalho.

### ***1.1.1 Objetivo Geral***

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo acerca do consumo e eficiência energética em redes 5G móvel.

### ***1.1.2 Objetivos Específicos***

- Apresentar os conceitos sobre redes 5G;
- Compreender a arquitetura das redes 5G;
- Apresentar uma breve comparação com gerações anteriores;
- Apresentar possíveis aplicações com ênfase a Internet das coisas IoT;
- Estudar sobre o consumo de energia em redes 5G;
- Estudar e apresentar os métodos para aumento da eficiência energética em redes 5G;

### ***1.1.3 Metodologia de Pesquisa***

A metodologia utilizada neste trabalho foi uma pesquisa, com uma abordagem bibliográfica, tendo como base nos trabalhos acadêmicos, artigos científicos, *white papers*, e revistas. A coleta dessas informações baseou-se nas fontes primárias que se caracterizam por materiais originais mas principalmente nas fontes secundárias que representam os trabalhos baseados na fonte primária através de citações, interpretações ou revisões dos trabalhos autorais.

*a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas de web sites. Qualquer trabalho científico inicia-se com uma pesquisa bibliográfica, que permite ao pesquisador conhecer o que já se estudou sobre o assunto. Existem porém pesquisas científicas que se baseiam unicamente na pesquisa bibliográfica, procurando referências teóricas publicadas com o objetivo de recolher informações ou conhecimentos prévios sobre o problema a respeito do qual se procura a resposta.(FONSECA, 2002)*

Foi feito um estudo acerca do consumo de energia das redes 5G, na qual apresentou-se alguns problemas relacionados, bem como foram apresentados alguns recursos tecnológicos na qual seriam as soluções que visam a reduzir o consumo de energia nas estações base. Apresentou-se a um breve historial sobre a evolução das redes móveis, destacando assim, as suas principais características e diferenças em relação as outras gerações. Presentou-se uma visão geral sobre as redes 5G e não só, mas também apresentou-se a sua arquitetura que é de certa forma bastante complexa, porém apresentando os principais elementos constituintes da mesma, a sua diferença em arquitetônica em relação a geração anterior no caso Quarta Geração (4G), e também fez como essa arquitetura impacta no consumo de energia e eficiência energética da rede 5G. Realizou-se um estudo sobre a eficiência energética nas redes 5G, apresentando a definição deste conceito na visão de diferentes autores, métodos ou técnicas para o aumento da eficiência energética.

## **1.2 Justificativa**

Diante do cenário mundial atual, as redes de telefonia sem fio são de certa forma recursos indispensáveis para o desenvolvimento de uma sociedade, tendo em conta que existe um grande crescimento de usuários conectados as redes de telefonia sem fio diariamente. Pois nos últimos anos com a introdução das redes sociais como por exemplo o Facebook, Youtube, Twitter, Instagram, o tráfego de dados tem aumento exponencialmente.

Na sociedade atual, o consumo de energia tornou-se uma problemática, na qual, é de bastante interesse apostar em estudos de modo a facilitar o entendimento do problema e assim de certa forma contribuir positivamente para resolução do mesmo (GOMES, 2020). A maior parte da energia consumida nos sistemas de banda larga móvel é feita através das estações base ou pontos de acesso. Com o aumento exponencial, projetado no tráfego da rede (dados) e no grande número de dispositivos inteligentes conectados, tornam a eficiência energética extremamente importante. Assim, aumentar a eficiência energética em redes móveis reduzirá os custos de capital e despesas operacionais (SHURDI LUAN RUCI, 2021).

## **1.3 Estrutura do Trabalho**

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos, na qual neste primeiro capítulo foi dada uma pequena introdução sobre o tema, e também foi apresentado os objetivos gerais, específicos, metodologia de pesquisa, justificativa, e a visão estrutural do trabalho.

O segundo Capítulo, trata-se da fundamentação teórica onde foi abordado sobre os principais conceitos do tema, uma breve história da evolução das gerações das redes de telefonia móvel, uma visão geral das redes de quinta geração (5G), sua arquitetura, e uma breve visão sobre a IoT.

O terceiro Capítulo, trata-se de abordar sobre o consumo de energia em redes 5G, sendo que é uma das partes fundamentais de estudo do tema proposto neste trabalho.

O quarto Capítulo, trata-se de abordar sobre a eficiência energética em redes 5G, sendo que é a outra parte fundamental de estudo do tema proposto neste trabalho.

O quinto Capítulo, levando em conta as informações obtidas nos capítulos anteriores, chegou-se em algumas considerações finais e trabalhos futuros, na qual este capítulo irá abordar.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será abordado os conceitos sobre redes de quinta geração (5G) apresentando o conceito histórico em relação a evolução das redes de telefonia móvel até os dias atuais, com sua arquitetura apresentando assim os aspectos técnicos que caracterizam esta rede, e de forma sucinta uma abordagem sobre a Internet das coisas (*Internet of Things - IoT*).

### 2.1 Evolução Das Gerações Das Redes De Telefonia Móvel

Em 1973 foi efetuada a primeira chamada de um telefone móvel (celular) para um telefone fixo, sendo que a partir deste feito, foi possível comprovar que estavam corretas as teorias apresentadas em 1943 e que a rede de telefonia foi projetada de forma correta. No início os sistemas utilizavam um único transmissor, onde cada usuário era colocado em uma frequência distinta. Sendo que estes sistemas utilizavam a técnica *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), ou seja, Múltiplo Acesso por Divisão de Frequência, com o objetivo de alcançar uma grande área de cobertura, apesar de que o número de usuários era limitado. (TELECO, 2017).

Abaixo na Figura 1, mostra a evolução das redes móveis, da primeira à Quinta Geração, na qual será abordado de forma sucinta sobre cada uma delas.

Figura 1 – Evolução das redes móveis



Fonte: Moraes (2019)

A Primeira Geração (1G), permitia a transmissão de voz, porém não era capaz de transmitir dados. Popularizou-se em 1980, e utilizava o sistema *Advanced Mobile Phone System* (AMPS). A maior parte dos telefones móveis na época, pesavam cerca de 1Kg e tinham cerca de 30 cm, o que fazia com que não fossem tão portáteis. (FERREIRA, 2018).

Na década de 1990, começou a ser implementado a Segunda Geração (2G) utilizando tecnologias *Global System for Mobile* (GSM), *Code Division Multiple Access* (CDMA) e *Time*

*Division Multiple Access* (TDMA), devido a crescente demanda e necessidade de padronização para o sistema celular Europeu foi necessário a utilização da transmissão digital.(TELECO, 2017)

Inicialmente com a Segunda Geração (2G) foi possível utilizar o serviço de texto (*Short Message Service* - SMS). Porém um tempo depois passou a ser possível a utilização de transmissão de dados (alguns chamam essa evolução de 2.5G), com esta evolução já era possível o acesso a internet, muito embora com baixas velocidades e as páginas eram limitadas pois na época não existiam muitas páginas com versão móvel como vemos nos dias atuais. Implementado o sinal digital, a segunda geração. A segunda geração (2G) apresentavam diversas vantagens em relação a primeira, nas quais pode-se destacar a maior eficiência espectral, melhor qualidade nas ligações, tráfego de dados, criptografia da informação transmitida. (TELECO, 2017).

No começo dos anos 2000, a Terceira Geração (3G) surge com tecnologias mais desenvolvidas sendo a CDMA e *High Speed Packet Access* (HSPA), dando assim aos usuários altas velocidades de conexão (superiores as gerações anteriores) similar as conexões fixas, e a possibilidade de video chamadas, mensagens multimídia, *streaming* de video, entre outros. Sendo que em 2001 foi lançado o primeiro celular 3G do mundo pela NTT DoCoMo. Um grande passo dado devido a 3G é que as operadoras poderiam comercializar modems 3G de modo a permitir o acesso de internet a notebooks e *desktops* (FERREIRA, 2018). Com o passar do tempo a tecnologia da terceira geração (3G) foi evoluindo e chegou no HSPA+ (3.5G) sendo que desta forma abriu um leque de velocidades maiores variando de 14,4 Mb/s à 168 Mb/s. (GARRETT, 2018).

A Quarta Geração (4G) que também é conhecida por *Long Term Evolution* (LTE), fornece conexões mais eficientes devido a alta velocidade na qual o tráfego de dados é efetuado, dependendo do aparelho e do sinal de conexão a velocidade pode chegar 300 Mbps e 75 Mbps de *download* e *upload* respectivamente (INTERJATO, 2017). Passado um tempo, o LTE evoluiu para LTE+ ou *LTE Advanced*, de modo que pudesse manter conexões simultâneas em diferentes frequências, otimizando a rede e permitindo o crescimento de diversas áreas relacionadas a estas conexões, como por exemplo os serviços de *streaming*, nuvem, a indústria de jogos, entre outros.(INTERJATO, 2017). Logo em seguida surge o *LTE Advanced Pro*, o que muitas empresas usam o nome comercial de 4.5G ou 4G+, onde destaca-se por possuir latência menor de 2ms, velocidades de pico de *downlink* até 3Gbps e *uplink* 1,5Gbps, entre outras. (TELECO, 2017).

Com o objetivo de querer abranger a conexão móvel para o máximo de dispositivos

conectados, surgiu a Quinta Geração (5G), deste modo é possível focar não apenas na rede móvel, mas também em outras áreas, como por exemplo é possível conectar carros, eletrodomésticos, telemedicina, entre outras áreas que compõem a IoT. Segundo a ITU a Quinta Geração (5G) possui baixíssima latência sendo no máximo 1 milissegundo (INTERJATO, 2017).

## 2.2 Redes de Quinta Geração

Nesta seção será apresentada uma visão geral sobre as redes 5G, e também será apresentada a arquitetura na qual ela é constituída, de modo a facilitar o entendimento, ou seja, criar uma base sólida para os próximos capítulos.

### 2.2.1 Visão Geral

Em função do tempo, as redes 5G irão se espalhar, e com isso os consumidores começarão a fazer um upgrade para os telefones 5G, na qual a promessa muito esperada começa a tornar-se realidade lentamente (WURMSER, 2021).

Mas, o que é na realidade é 5G? Segundo uma matéria publicada no site da Qualcomm sobre redes 5G, foi apresentado como sendo o novo padrão global sem fio, sendo o sucessor do 4G. O 5G foi projetado para conectar praticamente todos e tudo em conjunto, incluindo as máquinas, objetos e dispositivos.(QUALCOMM, 2020)

A tecnologia sem fio 5G destina-se a fornecer velocidades mais altas de pico de dados de vários Gbps, latência ultra baixa, mais confiabilidade, capacidade massiva de rede, maior disponibilidade e uma experiência mais uniforme para mais usuários. Maior desempenho e eficiência aprimorada possibilitam novas experiências de usuário e conectam novos setores. Binário (2020).

Segundo Denise Gibson, co-fundadora e presidente da Ice Mobility, em uma matéria publicada pelo site da CRN, disse que: "

O 5G será mais econômico ao longo do tempo para empresas e operadoras devido às suas necessidades de baixa potência. Para isso, há um impulso para mover mais pessoas e dispositivos móveis para o 5G por fabricantes periféricos e provedores de serviços que estão trabalhando juntos em casos de uso, como cidades inteligentes e casas. (GIBSON, 2021).

Frequências entre 30 e 300 GHz são chamadas frequentemente de banda milimétrica na qual as ondas variam de 1 à 10 mm, sendo que essas *Millimeter-wave* (MMW) (FISHER, 2021). A faixa de frequência de 300 MHz à 3 GHz também está sendo usada para 5G, na qual esta faixa é usada comumente para transmissão de TV, GPS, *Wi-Fi*, Bluetooth, etc.

No Brasil, a Anatel ( Agência Nacional de Telecomunicações) abrirá um leilão 5G para licitação das radiofrequências nas faixas de 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz e 26 GHz, na qual prevê-se realizar ainda em 2021. (ANATEL, 2021).

Como pode-se notar abaixo na Tabela 1, que a rede 5G claramente apresenta diversas vantagens em relação a 4G no que tange os parâmetros citados na tabela. Porém, quanto aos outros parâmetros como consumo de energia e energética? Saberemos a resposta em função das abordagens dos próximos capítulos, 3 e 4 respectivamente.

Tabela 1 – Comparação entre os parâmetros 4G e 5G

Parâmetros	4G	5G
Nome completo	Quarta Geração	Quinta Geração
Introdução/Lançamento	2006-10	2020-2021
Latência	10 ms	1 ms
Velocidade de Pico	1 Gbps	20 Gbps
Banda de frequência	Abaixo de 6 GHz	30 GHz à 300 GHz
Tamanho da Antena	Maiores do que as 5G	Menores do que as 4G
Dispositivos Suportados	Menos do que os 5G por metro	Mais de 1000 dispositivos suportados por metro
Modo de alternância de Energia	Menos flexibilidade do que o 5G na alternância entre os modos de energia	Entende com facilidade o tipo de solicitação de dados e é capaz de alternar para um modo de baixo consumo de energia

Fonte: (BHARDWAJ, 2020)

### 2.2.2 Arquitetura

Nesta seção do trabalho, será abordado sobre arquitetura do núcleo das redes 5G, apresentando alguns recursos que possibilitam que a mesma funcione, apresentando uma breve comparação entre a arquitetura 5G e a 4G LTE. Sabe-se que o nosso mundo está constantes mudanças, e o processo de implantação da rede 5G começou há alguns anos e envolveu a construção da nova infraestrutura, sendo que a maior parte está sendo financiada pelas principais operadoras.(REMMERT, 2021).

Segundo (REMMERT, 2021) arquitetura da rede 5G é “baseada em serviço alinhado à nuvem *Service-Based Architecture* (SBA) de modo a oferecer suporte à autenticação, segurança, gerenciamento de sessão e agregação de tráfego de dispositivos conectados, o que requer a complexa interconexão de funções de rede”.

A arquitetura das redes 5G, comparada com a 4G LTE atual, possui grande densidade de células a qual permite um alto desempenho, as quais já citados nos capítulos anteriores. O 5G utiliza uma arquitetura mais inteligente, possuindo uma estrutura dinâmica, flexível que

suportam uma vasta gama de aplicações com redes de acesso de rádio ou seja *Radio Access Network* (RAN), tendo novas interfaces que criam vários pontos de acesso de dados adicionais. (VIAVISOLUTIONS, 2021).

Abaixo serão citados e definidos algumas tecnologias que fazem parte da arquitetura das redes 5G de acordo com uma matéria publicada no site da Viavi Solutions em 2021:

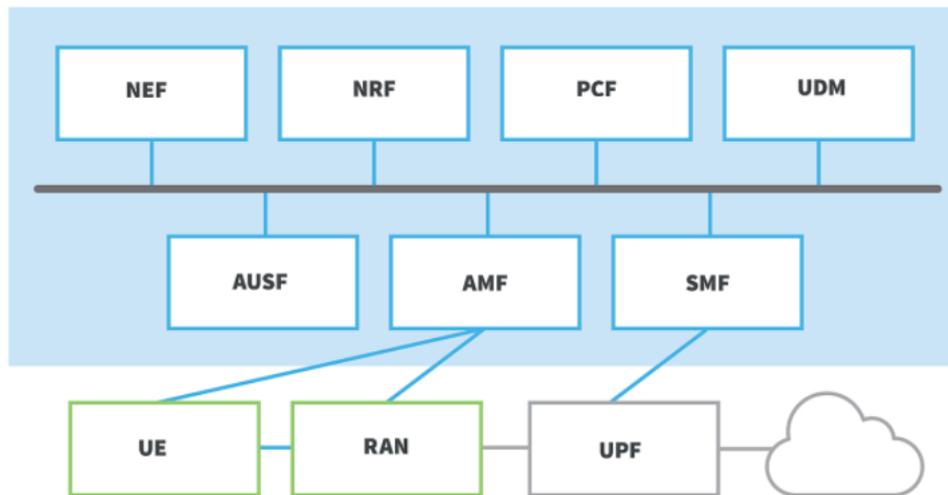
- *Multi-Access Edge Computing (MEC)* computação de borda de acesso múltiplo, baseada na computação em nuvem, onde basicamente cria um atalho na entrega do conteúdo entre o usuário e o *host*. (VIAVISOLUTIONS, 2021).
- *Network function virtualization (NFV)* visualização das funções da rede, utiliza técnicas de virtualização substituindo várias funções de rede, de modo que eles possam se conectar para criar serviços de comunicação que sejam executadas simultaneamente. (VIAVISOLUTIONS, 2021).
- *RAN* rede de acesso de rádio, permite flexibilidade e fornece interfaces abertas de modo a facilitar a implantação de novos recursos e tecnologia em escala.(VIAVISOLUTIONS, 2021).
- Fatiamento da rede ou *slicing*, essa tecnologia é basicamente uma extensão ao domínio NFV a qual permite que várias redes sejam executadas simultaneamente em uma infraestrutura de rede física compartilhada. (VIAVISOLUTIONS, 2021).
- *Beamforming*, antenas utilizando matrizes de múltiplas entradas e saídas (MIMO), na qual o sinal é direcionado para dispositivos específicos, por meio algoritmos de processamento de sinal. (VIAVISOLUTIONS, 2021).

Existem outros elementos que também fazem parte da arquitetura principal, porém não foram destacados acima, alguns desses elementos são: *User Plane Function (UPF)* (Função de plano do usuário), *DATA NETWORK (DN)* ( Rede de dados), *Access and Mobility Management Function (AMF)* (Função central de gerenciamento de mobilidade e acesso), *Authentication Server Function (AUSF)* ( Função de servidor de autenticação), *Session Management Function (SMF)* ( Função de gerenciamento de sessão), *Network Slice Selection service (NSSF)* (Função de seleção de fatia de rede), *Network Exposure Function (NEF)* ( Função de exposição de rede), *Network Function (NF)* ( Função de repositório), *Policy Control Function (PCF)* (Função de controle de política), *Unified data management (UDM)* ( Gerenciamento unificado de dados), *Application Function (AF)* ( Função de Aplicação).(REMMERT, 2021)

O diagrama apresentado na Figura 2 mostra os principais elementos da arquitetura

5G:

Figura 2 – Principais elementos da arquitetura SBA de uma rede 5G



Fonte: Techplayon (2021)

Como essa arquitetura funciona? Basicamente as *User Equipment* (UE) se conectam pela RAN e posteriormente a DN, como a internet. A AMF atua como ponto de entrada único para a conexão UE, na qual a AMF seleciona a respectiva função solicitada pelo UE no SMF para gerenciar a função do usuário. A UPF transporta o tráfego de dados entre o UE e as redes externas. Enquanto isso a AUSF permite que o AMF autentique o UE e acesse os serviços 5G.(REMMERT, 2021). A estrutura de controle de política ou seja a aplicação de decisões e acesso de informações de assinatura são gerenciados por outras funções: SM, PCF, AF, e UDM. (REMMERT, 2021). Como pode-se notar, a arquitetura é muito mais complexa, sendo que esse grau de complexidade é necessário a fim de fornecer o melhor serviço com uma vasta gama de acesso.

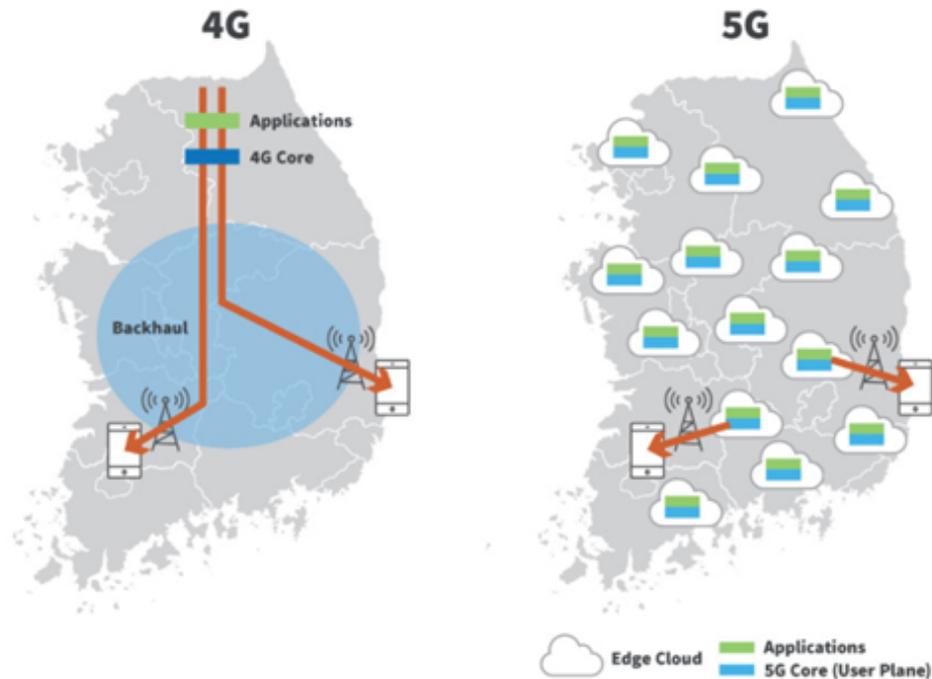
Mas qual seria a diferença entre a Arquitetura 5G e 4G?

Quando se fala de arquitetura de rede, como citado acima, as redes 5G possuem uma arquitetura muito complexa principalmente se for comparada com a versão anterior que é a 4G. Para além da absurda diferença de velocidade e latência a *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) e empresas como Nokia e Ericsson arquitetaram o 5G separando o núcleo de pacote evoluído (*Evolved Packet Core*) monolítico e implementaram de modo que cada função pudesse ser executado de forma independente uns dos outros, sem necessitar do *hardware* do servidor. Permitindo assim que o 5G tenha nós descentralizados e muito mais flexíveis. (REMMERT, 2021).

De acordo com a Figura 3 pode-se observar a diferença descentralização dos nós das

redes 5G em relação a 4G.

Figura 3 – Diferença entre os nós das redes 5G e 4G



Fonte: Techmania (2021)

De acordo Harald Remmert na sua matéria publicada no site da Digi, afirma que essa descentralização de núcleo permite que as operadoras possam dividir por fatias com funcionalidades otimizadas como por exemplo uma fatia para aplicativos, outra para baixa latência, outra os dispositivos IoT (REMMERT, 2021).

### 2.3 Internet Das Coisas

Quando se fala sobre Internet Das Coisas (IoT), a maior parte das pessoas, não fazem a mínima noção de que a ideia sobre conectar objetos já é discutida desde o ano de 1991. (ZAMBARDA, 2014). "A internet das Coisas basicamente pode ser definida como sendo o conceito de conectar qualquer dispositivo à internet e a outros dispositivos conectados"(CLARK, 2016). Hoje em dia existem mais de 7 bilhões de dispositivos IoT conectados, sendo que esses dispositivos podem variar, tanto industriais ou até mesmo domésticos. (CLARK, 2016) A nossa relação com a tecnologia vem mudando cada vez mais conforme interagimos com o mundo e como o mundo interage conosco. Nos últimos 5 anos, a IoT se tornou uma das principais tecnologias de século XXI, abrindo um grande leque de possibilidade de uma comunicação entre pessoas e máquinas ou processos. (PATEL, 2016)

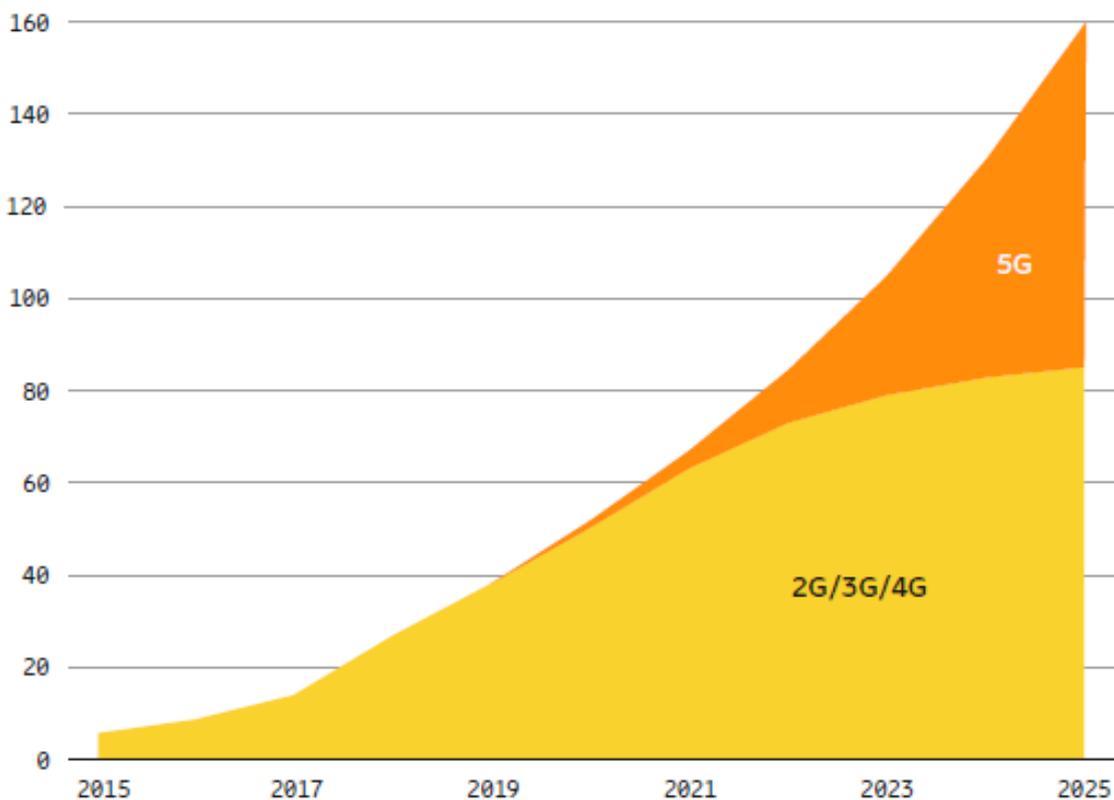
Apesar de já existir a bastante tempo, a IoT continua se desenvolvendo em um ritmo acelerado, principalmente depois da chegada das redes 5G, a utilização da IoT começou a tornar-se cada vez mais comum em nossa sociedade. Este avanço da IoT foi possível devido algumas tecnologias que tiveram grande impacto na sua infraestrutura, como por exemplo:

- Acesso a tecnologia de sensores. A confiabilidade e a acessibilidade dos sensores na qual aumentam a possibilidade da tecnologia IoT para mais fabricantes.(ORACLE, 2020)
- Conectividade. Com o surgimento da rede 5G possibilitou com uma série de protocolos de rede a conexão de sensores à nuvem,contribuindo assim para transferência mais eficiente de dados.(ORACLE, 2020)
- Plataformas de computação em nuvem. Essas plataformas possibilitam tanto os consumidores, tanto as empresas acessarem a infraestrutura que necessitam de modo aumentar a escalar sem precisa de gerenciar tudo.(ORACLE, 2020)
- *Machine Learning* e Análise Avançada, possibilitam o acesso a grandes quantidades de informações armazenadas na nuvem.(ORACLE, 2020)
- Inteligência Artificial (IA) conversacional, com o avanço desta tecnologia, os dispositivos IoT como por exemplo: Alexa, Siri, Cortana, se tornam mais atraentes e viáveis para o uso doméstico. (ORACLE, 2020)

### 3 CONSUMO DE ENERGIA EM REDES 5G

Em Setembro de 2019, a empresa Ericsson publicou um artigo sobre o consumo de energia em 5G, no qual foi abordado que as redes móveis foram expandidas em função do crescimento exponencial no tráfego de dados. Sendo que esta expansão afetou diretamente no uso da eletricidade e gastos operacionais das operadoras. A Figura 4 abaixo apresenta a perspectiva global do tráfego de dados móveis por mês entre 2015 até 2025. Pode-se apreciar que o advento das 5G conduz um crescimento exponencial no tráfego da rede.

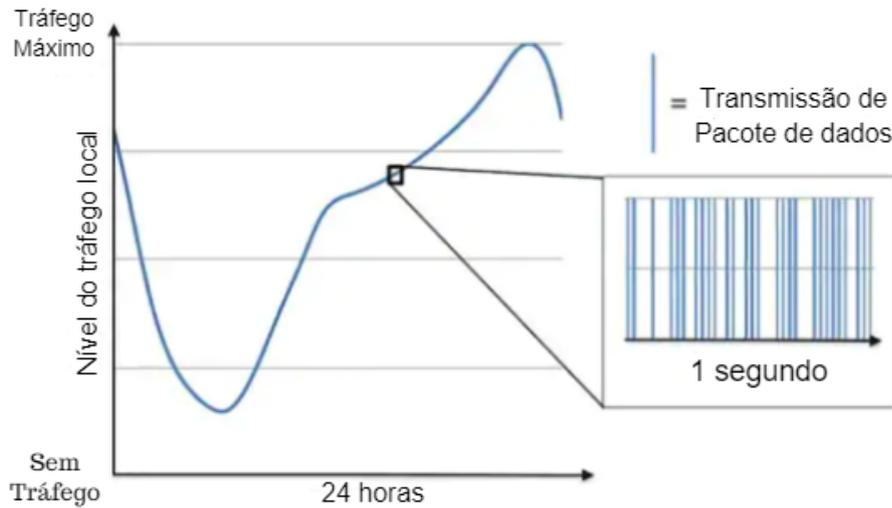
Figura 4 – Perspectiva global de tráfego de dados móveis por ano



Fonte: (ERICSSON, 2019)

Sabe-se que a maior parte do consumo de energia nas redes móveis provém das estações rádio base, na qual a carga de tráfego de rede é muito maior durante o dia do que a noite. O relatório apresentado pela empresa Ericsson em 2019, escrito por Pal Frenger e Richard Tano, diz que ao examinar mais detalhadamente os padrões de tráfego 4G percebe-se que existem lacunas curtas nas transmissões de dados mesmo durante tempos de alta carga, o que leva a dizer que as estações base gastam energia mesmo sem estar a transmitir dados do usuário. A Figura 5 abaixo mostra o tráfego de rede variável durante o dia. (ERICSSON, 2019)

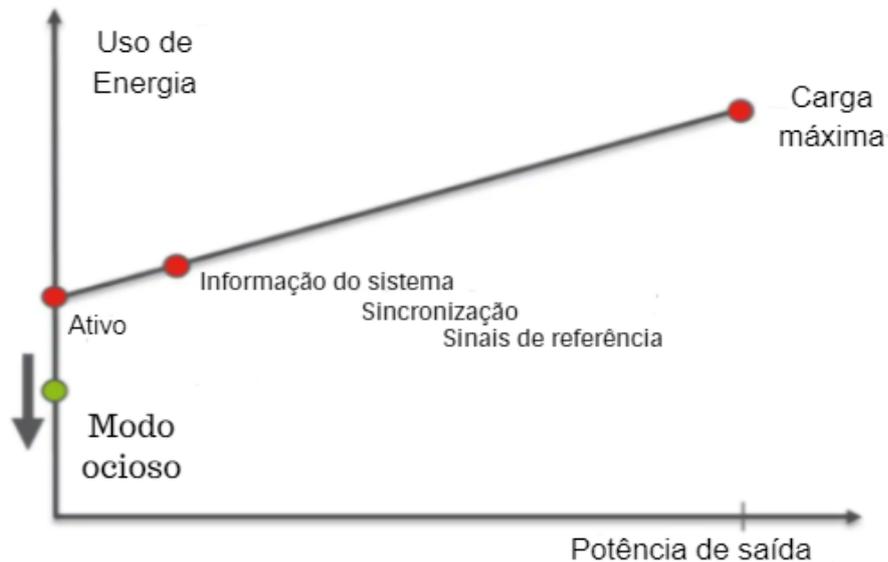
Figura 5 – Carga de tráfego de rede variável



Fonte: (FRENGER, 2019)

A Figura 5 apresenta a carga de tráfego de rede variável durante o dia, tendo uma parte destacada que mostra as lacunas nas transmissões de pacotes de dados. No entanto, a Figura 6 mostra o modelo de consumo de energia das estações base.

Figura 6 – Modelo de consumo de energia da estação base

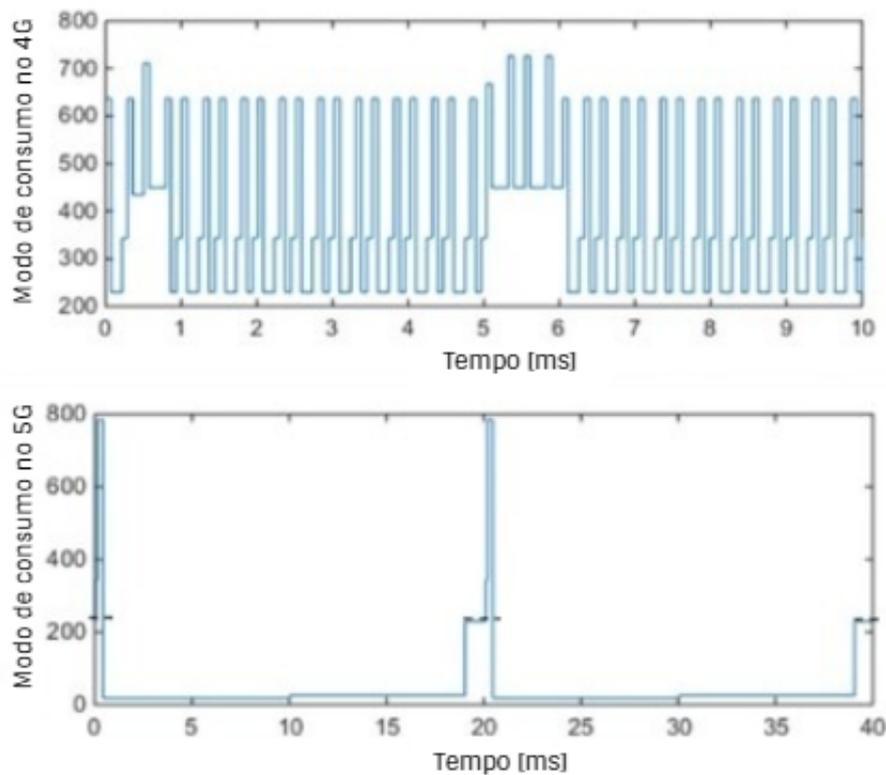


Fonte: (FRENGER, 2019)

A Figura 6, mostra que há um consumo significativo de energia na estação base mesmo quando não há potência de saída, pois, devido fato de que a maior parte dos componentes *hardware* ainda permanecem ativos para que possam transmitir sinais obrigatórios definidos no padrão 4G, como sinais de informações do sistema, sincronização, e sinais de referência. O modelo mostra que há um consumo significativo de energia na estação base mesmo nos momentos

em que não há potência de saída, Por este motivo a 5G foi projetado de modo que suporte estados de repouso, e assim colocando a estação base em um estado de hibernação desligando os componentes de *hardware*, na qual sabe-se que quanto mais componentes desligados, mais energia será economizada. Para além disso, a 5G requer menos transmissões de sinalização sempre ativas, permitindo assim períodos mais longos de hibernação, sendo que está configurando para enviar sinal a cada 20 ms, dando assim um impacto significativo no consumo geral de energia. Tudo isso poderá ser visualizado facilmente através da Figura 7.(ERICSSON, 2019)

Figura 7 – Consumo de energia da estação base 4G LTE ( parte superior) e 5G (parte inferior)

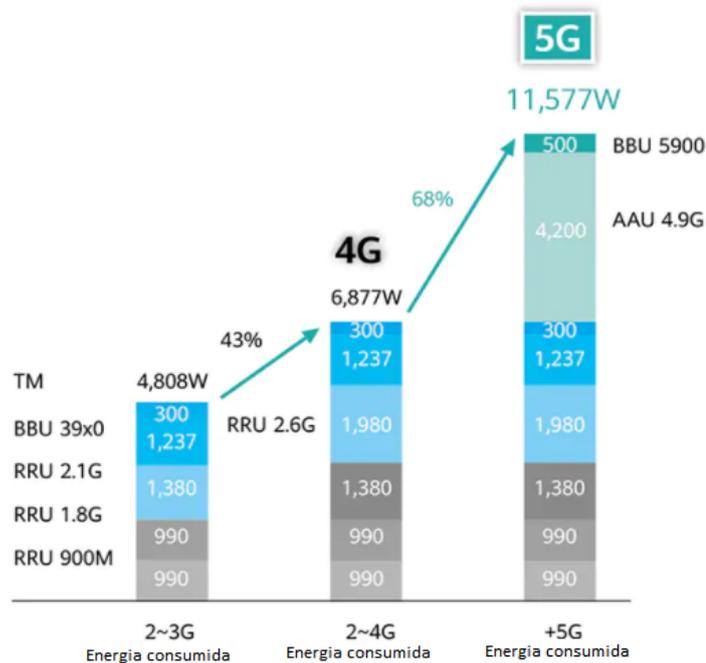


Fonte: (ERICSSON, 2019)

Segundo Chen Dongxu, em um artigo publicado pela Huawei sobre modelo de energia para locais 5G, afirma que o “consumo de energia por unidade de dados (watt/bit) é muito menor para o 5G do que para o 4G, mas o consumo de energia é muito maior”.(DONGXU, 2020) “O consumo máximo de energia de uma *Active Antenna Unit* (AAU) varia de 1 à 2 KW para uma unidade de banda base Unidade Banda Base (BBU)” . Na Figura 8, pode-se observar o gráfico de consumo máximo de energia típico de uma única estação base 5G. (DONGXU, 2020).

Um relatório da Huawei afirma que uma estação base 5G tem necessidade de energia de mais de 11,5 KW, sendo um aumento de quase 70% em relação a uma estação base im-

Figura 8 – Consumo máximo de energia de uma única estação base



Fonte: (ERICSSON, 2019)

plantando uma combinação de rádios 2G,3G, e 4G. As estações base macro 5G exigem vários componentes novos que consomem muita energia, incluindo transceptores de onda milimétrica, matrizes de portas programáveis em campo *Field-Programmable Gate Array* (FPGA), conversores de dados, amplificadores de alta potência, antenas *Multiple-input and multiple-output* (MIMO) integradas, etc. (DONGXU, 2020)

Com o crescimento do consumo de energia através das redes 5G, está desencadeando o crescimento do consumo de energia geral. Pois por exemplo na China, o consumo total de energia utilizada nas redes de telecomunicações ultrapassa 50 bilhões de kWh, sendo que estimasse que excederá cerca de 100 bilhões de kWh assim que as 5G forem totalmente implementadas, gerando assim emissões anuais de carbono de 27,2 bilhões de kg. (DONGXU, 2020)

Em função disso a China Tower e a Huawei vem trabalhando e oferecendo recursos de modo a ajudar reduzir esses impactos energéticos das 5G. Assim, já foram lançados 4 recursos nomeadamente: *One Cabinet for One Site* (Um armário para um local), *Intelligent peak shaving* (Corte de pico inteligente), *Intelligent voltage boosting* (Aumento de tensão inteligente), *Intelligent energy storage* (Armazenamento inteligente de energia).(DONGXU, 2020)

De modo geral o recurso “*One Cabinet for One Site*” refere-se o uso de um único armário que poderá agregar às demandas da fonte alimentação e backup para hardware 2G/3G/4G e 5G co-implantado, possuindo assim ainda a possibilidade de implantar um retificador modular

de distribuição de energia e componentes de controle de temperatura. Com este recurso será possível reduzir até 50% dos custos de implantação 5G. (DONGXU, 2020)

“*Intelligent peak shaving*” o corte de pico inteligente é uma tecnologia que aproveita algoritmos de programação de energia inteligente para dar suporte à redução de pico do local e reduzir a necessidade da rede alocar capacidade nos níveis de energia típicos. Desse modo não será necessário mudanças na energia da rede ( na estação base) , cortando assim os custos de atualização e reduzindo os custos de investimento inicial do 5G. (DONGXU, 2020)

“*Intelligent voltage boosting*” aumento de tensão inteligente reduz a necessidade de adaptar cabos de alimentação e assim poder evitar muitas desnecessárias para sites 5G que ficam *off-line* ou aumenta da perda de cabos quando o cabeamento não é substituído, neste caso pode reduzir o consumo de energia até 1%. (DONGXU, 2020).

“*Intelligent energy storage*” armazenamento inteligente de energia basicamente este recurso faz com que o sistema suporte a combinação inteligente de baterias de lítio sendo velhas e/ou novas e de diferentes capacidades ou produtos de fabricantes diferentes. Desta forma pode ajudar a reduzir os custos de implantação de bateria. (DONGXU, 2020)

### **3.1 Desafios do consumo de energias em redes 5G**

Nesta seção iremos abordar sobre desafios do consumo de energias em redes 5G tendo em análise o efeito dos parâmetros do sistema, nomeadamente o *Analog-to-Digital Converter (ADC)*, e o Processamento Digital. (LAURIDSEN, 2015) Tanto no Conversor Analógico-Digital (ADC) e no *Digital-to-Analog Converter (DAC)* a maior largura de banda leva diretamente a uma maior frequência de amostragem, devido ao uso de frequência portadoras mais altas obter o espectro suficiente de RF analógica, sendo que no domínio digital a maior largura de banda afeta a complexidade do processador Banda Base (BB) onde será necessário calcular a estimativa do canal e realizar a equalização em toda a largura de banda.(LAURIDSEN, 2015)

As menores estações base apresentarão uma matriz de antenas do tamanho de um cartão de crédito, criando grandes desafios na integração, baixo consumo de energia e conectividade (BAHAI BAHAR HAROUN, 2016). Cada pedaço de informação requer energia em cada estágio, seja: no transmissor, no receptor, e nos conversores processadores de sinais. Em função disso que sabe-se que quanto mais bits por segundo são transmitidos e recebidos de cada estação base, mais a energia gasta para cada bit dever ser reduzida (BAHAI BAHAR HAROUN, 2016).

Nas sub-subsecções a seguir, serão abordados os desafios de consumo de energia de alguns elementos presentes nas redes celulares de 5G.

### 3.1.1 Conversor Analógico-Digital

Quando o sinal é recebido, convertido e amplificado para BB, o ADC executa a conversão para um domínio digital, sendo que na 5G a largura de banda e a faixa dinâmica são altas, deste modo proporciona o aumento do número de cadeias e de ADCs proporcionalmente. Nesta sub-subsecção é analisada o nível de desempenho do consumo de energia no ADC. (LAURIDSEN, 2015) A necessidade de suportar largura de banda de canal RF de até 100 MHz ou até 400MHz, é o principal motivador para adoção de conversores de dados de altíssima velocidade para as comunicações 5G. (MOTA, 2020)

A Figura 9, ilustra o diagrama da arquitetura comumente usada do receptor de conversão direta, na qual o sinal recebido é convertido para a BB em uma etapa. O consumo de energia em função da largura de banda é dado segundo (LAURIDSEN, 2015) é dado por:

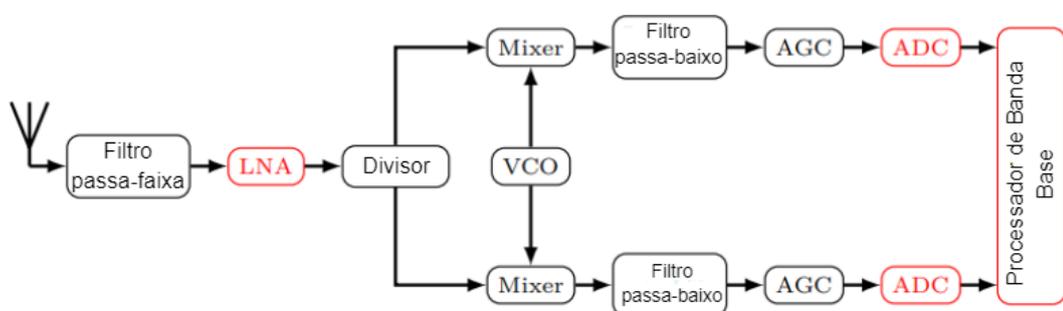
$$\text{Consumo} = P_{2020}(100\text{MHz}) \times \left( \frac{BW}{100\text{MHz}} \right)^2 \text{ [W]}. \quad (3.1)$$

Onde:

$P_{2020}$ : representa a previsão de consumo em 2020.

$BW$ : representa a largura de banda.

Figura 9 – Diagrama em blocos geral de um receptor de arquitetura de conversão direta.



Fonte: (LAURIDSEN, 2015)

Os filtros são componentes passivos, enquanto o LNA (Amplificador de baixo ruído) e o *Mixer* são dispositivos ativos que consomem energia, cujo desempenho pode ser modificado

ajustando a fonte de alimentação. Além dos componentes acima mencionados, sintonizadores de antena e interruptores também são necessários para suportar as muitas bandas de frequência. (LAURIDSEN, 2015)

A Equação (3.1) demonstra como um ADC de banda estreita consome menos energia do que um ADC de banda larga com a mesma faixa dinâmica, mas se vários ADCs forem necessários para obter a largura de banda total necessária, a situação pode mudar. A razão é que além de consumir mais espaço físico e possivelmente aumentando o custo do componente, o uso de vários canais de banda estreita exigirá um número igual de *front-ends* de RF, aumentando ainda mais o consumo de energia, espaço físico, e o custo. No entanto, pode ser possível obter alguma economia de energia combinando vários ADCs de acordo com a Tabela (2), em um Circuito Integrado (CI) e compartilhar a fonte de referência de tensão, controle digital, conexões de barramento, etc. (LAURIDSEN, 2015)

Tabela 2 – Consumo de energia ADC em função da largura de banda (BW)

Largura de banda (MHz)	100	200	400
Potência por 1 ADC [mW]	8.51	34.0	135.5
Número de CCs	4	2	1
Número de Cadeias	16	8	4
Número de ADCs	32	16	8
Consumo total ADCs [mW]	272	543	1084

Fonte: (LAURIDSEN, 2015)

De acordo com a Tabela 2 e a Equação (3.1), as previsões, mostram que suportar 400 MHz largura de banda em um único *Component Carrier (CC)* (transportadores de componentes) levará a um aumento significativo no consumo de energia, mas também pode ser difícil obter um espectro contínuo tão grande de qualquer maneira. O uso de muitos CCs de banda estreita são benéficos do ponto de vista do consumo de energia do ADC (LAURIDSEN, 2015).

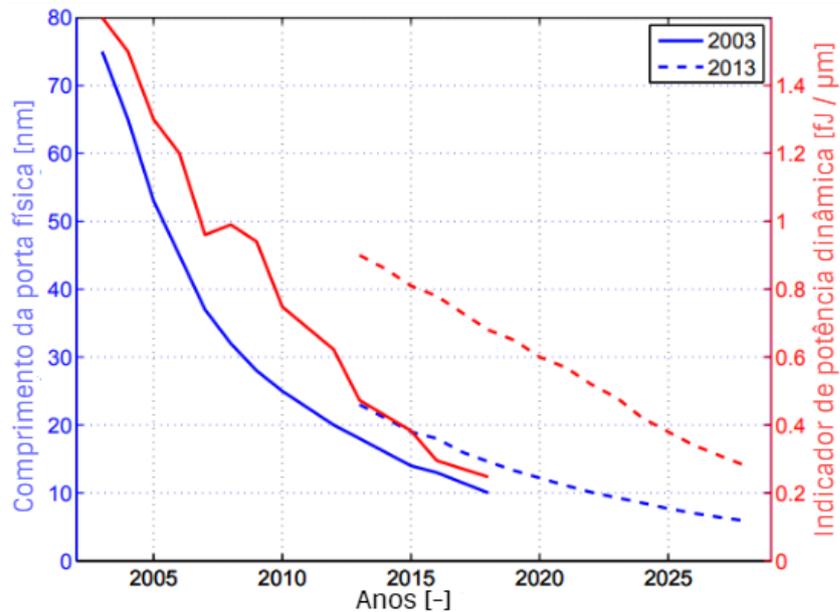
### 3.1.2 *Processamento Digital*

O processamento digital de sinais pode ser definido como uma tecnologia que se traduz na aplicação de algoritmos computacionais para realização de operações específicas sobre dados digitais, como por exemplo: reconhecimento e síntese de voz, rádio, filtragem digital de sinais, etc (PUHLMANN, 2014). Tendo em conta que os requisitos de processamento para um receptor 5G são consideravelmente maiores do que os requisitos do 4G LTE, sendo que uma das

principais razões é justamente o aumento da taxa de dados dos receptores avançados e complexos do 5G (LAURIDSEN, 2015).

As técnicas de processamento de sinal têm desempenhado o papel mais importante nas comunicações sem fio desde a segunda geração de sistemas celulares. Prevê-se que as novas técnicas empregadas em redes sem fio 5G não só melhorarão as taxas de serviço de pico significativamente, mas também aumentarão a capacidade, cobertura, confiabilidade, baixa latência, eficiência, flexibilidade, compatibilidade e convergência para atender às crescentes demandas impostas por aplicativos como big data, serviço em nuvem, comunicação máquina a máquina (M2M) e comunicações de missão crítica. (LUO, 2016)

Figura 10 – Comprimento da porta física e Indicador de potência dinâmica em função do tempo.



Fonte: (LAURIDSEN, 2015)

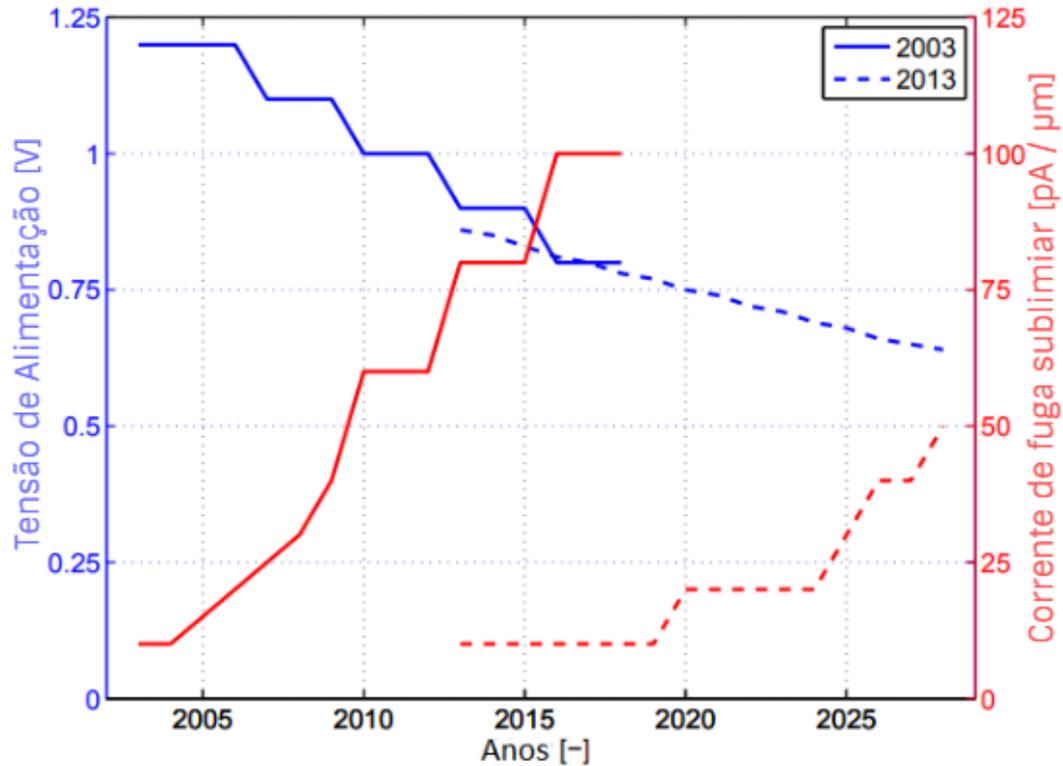
Conforme ilustrado na Figura 10, um comprimento da porta física menor leva a capacitância menor e menor tensão de alimentação, sendo que a potência dinâmica é proporcional à capacitância total da porta, por dispositivo multiplicada pela tensão de alimentação ao quadrado. Segundo (FRENTZ, 2000), estimou que o consumo de energia de um processador dado em Milhões de instruções por segundo (MIPS), sendo MIPS uma medida aproximada do poder de processamento bruto, seja reduzido a metade a cada 18 meses, que resultou no seguinte equacionamento:

$$0,5 = X^{18meses} \rightarrow X = 10^{\frac{\log 5}{1,5anos}} = 0,63/anos \quad (3.2)$$

Onde:

X: Representa o consumo de energia de um processador.

Figura 11 – Gráfico da Tensão de alimentação em função da Corrente de fuga sublimiar.



Fonte: (LAURIDSEN, 2015)

Ou seja, o receptor pode executar o mesmo número de MIPSs com 0,63 vezes menos potência.

A Figura 11 mostra como a tensão de alimentação está diminuindo, tendo um efeito positivo na potência dinâmica, enquanto a corrente de fuga sublimiar aumenta com o tempo conforme o comprimento da porta diminui conforme ilustrado na Figura 10. Espera-se que a razão seja que a corrente de fuga sublimiar baixa é o objetivo principal ao dimensionar os transistores. (LAURIDSEN, 2015). Em suma, espera-se que o consumo de energia de processamento será um desafio significativo em um terminal móvel 5G.

#### 4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES 5G

A eficiência energética apresenta um grande valor ecológico, e não só, mas também pode se associar à redução de gastos operacionais por parte das operadoras, assim como a alegria dos clientes devido o aumento da autonomia da bateria. (DEMESTICHAS, 2017).

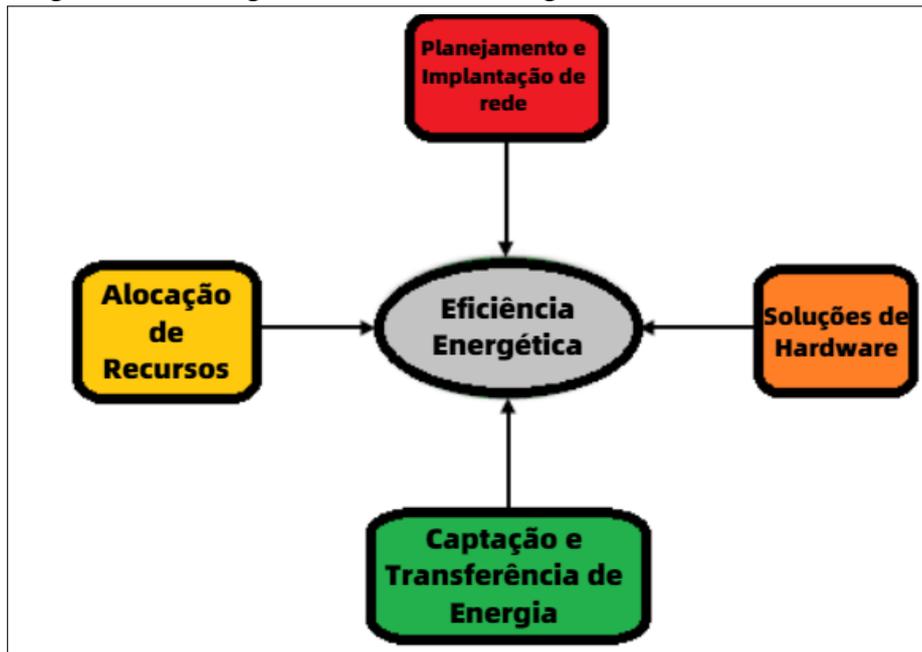
A eficiência energética nas redes 5G pode ser definida de diversas maneiras como por exemplo: "A eficiência energética é definida como o oposto da energia consumida por bit transmitido, ou como o número de bits transmitidos para cada unidade de energia consumida."(SHURDI LUAN RUCI, 2021). No espaço de comunicações, o consumo de energia e a poluição resultante relacionada à energia estão se tornando as principais preocupações operacionais e econômicas. O aumento exponencial, projetado no tráfego da rede (dados) e no número de dispositivos inteligentes conectados, tornam a eficiência energética extremamente importante. Assim, aumentar a eficiência energética em redes móveis reduzirá os custos de capital e despesas operacionais. (SHURDI LUAN RUCI, 2021).

“Eficiência de energia bit por Joule, que é definida como a quantidade de informação que pode ser transmitida de forma confiável por Joule de energia consumida, e que é um indicador chave de desempenho para redes 5G.” (BUZZI, 2018). Geralmente, os fabricantes de dispositivos e operadoras, consideram o desempenho e a eficiência energética como recursos fundamentais do 5G essenciais para otimização. O modo de sono profundo é um dos desenvolvimentos mais significativos do 5G, na qual o princípio básico de funcionamento é desligar de forma seletiva um ou mais dispositivo enquanto não haver tráfego. Sendo que, uma ERB 5G em média consome 3 vezes mais energia que uma ERB 4G, estima-se que essa relação para 25% em 2022. (SHURDI LUAN RUCI, 2021).

Beamforming é uma tecnologia que pode direcionar os sinais de transmissão de rádio em uma direção específica. Isso aumenta a eficiência do canal, as taxas de dados, reduz a interferência e concentra a energia de rádio diretamente nos dispositivos do cliente. Como as enormes antenas MIMO e os sistemas de estação base se comunicam com clientes remotos usando um feixe focalizado, os protocolos sem fio podem calcular a potência mínima necessária para a comunicação. Isso reduz o consumo de energia para transmissões de energia sem fio para a estação base e os dispositivos clientes. Como resultado, redes 5G usando beamforming consomem cerca de quatro vezes menos energia do que redes 4G comparáveis.(SHURDI LUAN RUCI, 2021).

De acordo Stefano Buzzi, o aumento da eficiência energética das 5G pode ser agrupada em 4 categorias, como podemos verificar na Figura 12:

Figura 12 – Energia eficiente da tecnologia 5G



Fonte: (BUZZI, 2018)

Alocação de Recursos, é uma técnica que pode ser utilizada para aumentar a eficiência energética de um sistema de comunicação sem fio, alocando recursos de rádio do sistema de modo a maximizar a eficiência energética ao invés do rendimento. Pois segundo um estudo sobre eficiência energética em redes 5G, disse que:

“sistemas de comunicações anteriores eram otimizados somente para aumentar a quantidade de informação que é transmitida de forma confiável, agora são otimizados para aumentarem a quantidade de informação que é transmitida de forma confiável por Joule de energia consumida”. (GOMES, 2018)

Planejamento e implantação de rede, esta tecnologia visa a “implantar nós de infraestrutura a fim de maximizar a área coberta por energia consumida, ao invés de apenas a área coberta”. Além disso com a aplicação de algoritmos de ativação/desativação de estação base e algumas técnicas de *muting* usadas em antenas, podem reduzir significativamente o consumo de energia.(BUZZI, 2018)

Captação e Transferência de Energia, está técnica como o próprio nome já diz, “captação” visa a captar energia do meio ambiente, aplicando assim fontes renováveis de energia limpa, como solar ou eólica, de modo a fornecer energia a estação base, e reduzir os custos de energia. (BUZZI, 2018)

Soluções de Hardware, esta técnica visa a projetar o hardware responsáveis pelo consumo de energia, adotando mudanças arquitetônicas como por exemplo a implementação baseada em nuvem na rede de acesso rádio. (BUZZI, 2018)

#### 4.1 Métodos para o aumento da eficiência energética

Existem alguns métodos que também podem ser utilizados para o aumento de eficiência energética em redes 5G, dentre os deles destacam-se 7, nomeadamente: método de eficiência energética em técnicas de modo de suspensão da estação base, método do Índice de Consumo de Energia (ECI), método de eficiência energética no componente, método do Consumo de Energia Área (APC), método do Ganho de Consumo de Energia (ECG), método de eficiência energética absoluta, método da Eficiência de Área Verde (AGE). (WU YUJING ZHANG, 2015).

Método de eficiência energética em modo de suspensão da estação base, é definido pela fração de tempo que o componente ou estação base passa em modo ocioso ou hibernação  $T_{ocioso}$  durante um certo período total  $T_{total}$ , na qual é geralmente adotado como um valor aproximado. Segundo (WU YUJING ZHANG, 2015) a economia por estimativa no nível do componente é dado por:

$$E_H = \frac{T_{ocioso}}{T_{total}} \quad (4.1)$$

Onde:

$E_H$ : Representa a economia de energia durante de hibernação.

$T_{ocioso}$ : Representa o tempo de hibernação.

$T_{total}$ : Representa o tempo total ativo.

Uma modificação um pouco mais realista, considera que o modo ativo e o modo de hibernação, consomem cada um uma determinada quantidade fixa de energia, em função disso (WU YUJING ZHANG, 2015) diz que o consumo médio de energia durante um determinado período é dado por:

$$P_{total} = f_H P_H + f_A P_A \quad (4.2)$$

Onde:

$f_H$ : Representa a fração de tempo em que a estação base está em estado de hibernação.

$f_A$ : Representa a fração de tempo em que a estação base está em estado ativo.

$P_H$ : Representa o consumo de energia em estado de hibernação

$P_A$ : Representa o consumo de energia em estado ativo.

Os valores exatos de  $P_H$  e  $P_A$  depende da implementação específica. Por exemplo, se toda a estação base é tratada como a unidade a ser trocada,  $P_H$  será mínimo uma vez que apenas contabilizou o consumo de energia do sinal por unidade de processamento para transmitir sinais de pivô, enquanto  $P_A$  pode ser descrito como a soma do consumo de energia fixa, sendo que o consumo de energia dependente do tráfego. (WU YUJING ZHANG, 2015).

Método do Índice de Consumo de Energia (ECI): este índice mede a eficiência de energia utilizada em uma estação base. Onde valores mais baixos de ECI indicam melhor eficiência energética.(WU YUJING ZHANG, 2015).

$$ECI = \frac{P_E}{KPI} \quad (4.3)$$

Onde:

ECI: Representa o índice de consumo de energia.

$P_E$ : Representa a potência total de entrada.

KPI: Representa o indicador chave de desempenho.

Sendo que o KPI pode ser também visto como a cobertura da área ou rendimento.A economia de energia alcançada pelo modo de espera é levado em consideração em  $P_E$ , conforme a potência de entrada diminui se o modo de espera for adotado. No nível do sistema, a eficiência energética é geralmente medida em consumo médio de energia por usuário ou por unidade de área. (WU YUJING ZHANG, 2015).

Um exemplo são os indicadores de desempenho (PI), propostos pelo Instituto Europeu de Normas de Telecomunicações (ETSI) na qual (WU YUJING ZHANG, 2015) defini por:

$$PI_{rural} = \frac{A_T}{E_c} \quad (4.4)$$

e

$$PI_{urbano} = \frac{N_p}{E_c} \quad (4.5)$$

Onde:

$A_T$ : Representa a área total.

$E_c$ : Representa a energia consumida

$N_p$ : Representa o número de usuários de pico

$PI_{rural}$ : Representa o indicador de desempenho nas áreas rurais

$PI_{urbano}$ : Representa o indicador de desempenho nas áreas urbanas.

Onde o desempenho nas áreas rurais é medido em função da área total  $A_T$ , pela energia consumida  $E_c$ , porque nas áreas rurais o número de assinantes é muito baixo. Enquanto o desempenho das urbanas, onde o número de assinantes é muito maior em relação as áreas rurais, deve-se levar em consideração o número de usuários no horário de pico  $N_p$ , pelo consumo de energia  $E_c$ . (WU YUJING ZHANG, 2015)

O Consumo de Energia Área (APC), semelhante ao PI, mede o consumo de energia em uma determinada área considerada. Na qual pode ser a cobertura de uma determinada estação base, no entanto (WU YUJING ZHANG, 2015) define pela seguinte relação:

$$APC = \frac{E_c}{A} \quad (4.6)$$

Onde:

APC: Representa o consumo de energia de uma determina área.

A: Representa a área de cobertura.

$E_c$ : Representa o consumo de energia total. (WU YUJING ZHANG, 2015)

O Ganho de Consumo de Energia (ECG) quantifica o ganho em economia de energia no acesso a rede, através da implantação de células menores. Na qual segundo (WU YUJING ZHANG, 2015) define pela seguinte equação:

$$ECG = \frac{E_{cg}}{E_{cp}} \quad (4.7)$$

Onde:

ECG: Representa o ganho de consumo de energia

$E_{cg}$ : Representa o consumo de energia na implantação de células grandes

$E_{cp}$ : Representa o consumo de energia na implantação de células pequenas. (WU YUJING ZHANG, 2015)

Um outro método interessante, é chamado de método de eficiência energética absoluta, foi proposto para incorporar o custo na emissão de carbono junto com o consumo de energia. Sendo que além do consumo de energia, a temperatura absoluta é levada, também

deve ser levada em consideração. Sendo que (WU YUJING ZHANG, 2015) exemplifica com a seguinte equação:

$$dB = P * T_B / \ln 2 (kT) \quad (4.8)$$

Onde:

dB: Representa a eficiência energética absoluta

K: Representa a constante de Boltzmann.

T: Representa a temperatura absoluta medida em Kelvin.

P: Representa o consumo de energia.

$T_B$ : Representa a taxa de bits.

No entanto, esse método ainda não está maduro, pois a relação logarítmica ainda requer mais justificativa, e no momento não há nenhuma pesquisa específica sobre. (WU YUJING ZHANG, 2015)

O método da eficiência de área verde (AGE), trata-se de uma rede de duas camadas, é formada por uma macro-célula no centro e uma série de femto células (pequena estação base de celular de baixa potência) distribuídas ao redor da borda da macro-célula de referência, (WU YUJING ZHANG, 2015) define AGE como:

$$AGE = \frac{(P_m + Pn_n)}{\pi(R_m + R_n)^2} \quad (4.9)$$

Onde:

$P_m$ : Representa a economia de energia na primeira camada.

$Pn_n$ : Representa a economia de energia na segunda camada

$PR_m$ : Representa a área de cobertura total da macro-célula.

$R_n$ : Representa o Raio da femto-célula.

A Equação 4.9 é a soma da economia de energia agregada por modo de hibernação ou outras tecnologias verdes na macro-célula.

Método da eficiência energética do componente, esse método trata-se de uma estimativa da eficiência energética individual de cada componente pertencente no sistema. Na qual o

mais comum a ser calculado é o Amplificador de potência de rádio frequência ou simplesmente Amplificador RF. (WU YUJING ZHANG, 2015)

"Pode-se definir o consumo total de potência de um sistema como a soma da potência transmitida, com a potência referente ao consumo de energia nos circuitos RF". (GOMES, 2018).

Ou seja:

$$P = \frac{P_t}{\eta} + P_c \quad (4.10)$$

Onde:

$P_t$ : Representa a potência transmitida.

$\eta$ : Representa a eficiência do Amplificador RF.

$P_c$ : Representa a potência referente ao consumo de energia.

Em uma estação base convencional, o consumo de energia dos amplificadores é diretamente proporcional a carga de tráfego e ao tipo de estação base. Porém para uma estação base macro, os amplificadores podem corresponder a 60% do consumo de energia total, enquanto para os de baixa potência o consumo de energia chega a ser inferior a 30%. (GOMES, 2018)

## 4.2 Antenas integradas para mais eficiência

MIMO nada mais é que um sistema conectado a uma estação base que visa alcançar taxas maiores de transmissão e recepção de sinais de rádio, este sistema utiliza múltiplas antenas bidimensionais para transmissão e recepção de sinais.(ALENCAR, 2016)

Estes sistemas possuem várias antenas podendo ser 8, 16, 64, ou até mesmo 256, podendo assim deste modo lidar com grandes volumes de taxa de transferência, abrindo um leque capaz de suportar um grande número de conexões de clientes. (OLIVEIRA, 2010)

De modo a melhorar a eficiência energética as antenas podem transmitir o sinal apenas na direção do celular, em vez de uma área ampla como as que geralmente são usadas nas gerações anteriores. Mesmo assim apesar disso as antenas 5G continuam gastando mais energia, porém este número vem caindo, prevê-se que 50% em 2021 e 25% em 2022. (ALENCAR, 2016)

De modo a acelerar esse processo de eficiência energética, está sendo utilizada a tecnologia Beamforming, na qual já foi falado no Capítulo 2, na subseção sobre Arquitetura. Onde esta tecnologia aumenta a eficiência do canal, reduz as interferências e concentra a energia

de rádio diretamente nos dispositivos do cliente. E como resultado as redes 5G que usam Beamforming consomem cerca de 4 vezes menos energia em relação a 4G.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo apresentou uma breve abordagem geral sobre o consumo e eficiência energética em redes 5G, nos apresentando os conceitos gerais sobre a rede 5G, assim como a compreensão da arquitetura na qual ela é composta muito embora foi apresentada numa visão geral e não específica devido a sua grande complexidade, destacando as principais diferenças existem com as gerações anteriores de modo a compreender o processo evolutivo até chegarmos na geração atual. Tendo em vista também foram estudados alguns parâmetros para redução do consumo de energia, assim como para o aumento ou seja melhoria da eficiência energética.

A 5G tem um enorme potencial que podem melhorar bastante com avanço da tecnologia, melhorando assim mais qualidade de vida em todo mundo devido ao seu grande leque de aplicações, como na área da saúde, cidades inteligentes, indústrias, IoT, sem esquecer dos seus principais atributos como baixa latência, alta velocidade, compatibilidade com novas tecnologias.

Um detalhe importante de se notar é que ainda não existem muitos trabalhos sobre consumo e eficiência energética, o que é notável a partir das referências bibliográficas que são quase sempre os mesmos autores que falam sobre o assunto, caso que é compreensível pois ainda é um tema novo a ser explorado. Por isso, sugiro um estudo aprofundando da arquitetura da rede 5G e modo a criar melhores métodos para o aumento da eficiência energética da mesma, muito embora já começaram as pesquisas e previsões sobre a rede 6G.

Em suma, com o avanço da 5G, estamos presenciando uma nova era das telecomunicações, destacando a tecnologia sem fio como base principal.

## REFERÊNCIAS

- ALENCAR, F. **Tecnologia MIMO oferece mais velocidade às redes sem fio**. 2016. Tecnologia MIMO entrega mais velocidade às redes sem fio. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2016/07/tecnologia-mimo-oferece-mais-velocidade-redes-sem-fio-conheca.html>>. Acesso em: 14 Agosto 2021.
- ANATEL. **Leilão de Espectro 5G**. 2021. Andamento do maior leilão de radiofrequências da história do Brasil. Disponível em: <<https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/5G/leilao-de-espectro-5g>>. Acesso em: 13 jun. 2021.
- BAHAI BAHAR HAROUN, . N. K. A. Analog advancements make waves in 5g wireless communications. **Texas Instruments**, v. 1, p. 11, 2016.
- BHARDWAJ, R. **5G vs 4G: Detailed Comparison**. 2020. Introduction to 5G and 4G technologies. Disponível em: <<https://ipwithease.com/5g-vs-4g/>>. Acesso em: 15 jun. 2021.
- BINÁRIO, G. **Como o 5G vai impactar a Internet das Coisas no Brasil**. 2020. O que é o 5G e como ele impactará a Internet das Coisas? Disponível em: <<https://www.binarionet.com.br/como-o-5g-vai-impactar-a-internet-das-coisas-no-brasil/>>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- BUZZI, S. A survey of energy-efficient techniques for 5g networks and challenges ahead. **SCIENCE CHINA**, v. 34, n. 4, p. 2–3, 2018.
- CLARK, J. **What is the Internet of Things (IoT)?** 2016. What is the Internet of Things? Disponível em: <<https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/what-is-the-iot/>>. Acesso em: 30 jul. 2021.
- DEMESTICHAS, K. 5g communications: Energy efficiency. **Hindawi**, v. 17, n. 5121302, p. 3, 2017.
- DONGXU, C. **5G Power: Creating a green grid that slashes costs, emissions energy use**. 2020. 5G construction: Energy and emissions. Disponível em: <<https://www.huawei.com/br/technology-insights/publications/huawei-tech/89/5g-power-green-grid-slashes-costs-emissions-energy-use>>. Acesso em: 9 jul 2021.
- ERICSSON. **Mobile data traffic outlook November 2019**: Mobile data traffic outlook. [S. l.]: Cambridge University Press, 2019.
- FERREIRA, M. B. **Do 1G ao 5G: A evolução da comunicação móvel**. 2018. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/do-1g-ao-5g-evolu%C3%A7%C3%A3o-da-comunica%C3%A7%C3%A3o-m%C3%B3vel-maur%C3%ADcio-ferreira/?originalSubdomain=pt>>.
- FISHER, T. **5G Spectrum and Frequencies: Everything You Need to Know**. 2021. Frequency Determines 5G Speed Power. Disponível em: <<https://www.lifewire.com/5g-spectrum-frequencies-4579825>>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- FONSECA. Metodologia da pesquisa científica. UEC, 2002.
- FRENGER, R. T. P. **A technical look at 5G energy consumption and performance**. 2019. Base station power consumption. Disponível em: <<https://www.ericsson.com/en/blog/2019/9/energy-consumption-5g-nr>>. Acesso em: 22 jul. 2021.

FRENTZ, G. Digital signal processor trends. **IEEE**, v. 1, p. 52–59, 2000.

GARRETT, F. **3G, 4G e 5G: entenda as siglas da Internet móvel**. 2018. 3G. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/noticias/2018/10/3g-4g-e-5g-entenda-as-siglas-da-internet-movel.ghtml>>. Acesso em: 15 jun. 2021.

GIBSON, D. **5 Predictions On The Future Of 5G From CES 2021**. 2021. Better With 5G. Disponível em: <<https://www.crn.com/news/networking/5-predictions-on-the-future-of-5g-from-ces-2021>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

GOMES, A. C. S. **ESTUDO SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES 5G: Eficiência energética em redes 5g**. Campina Grande: UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, 2018.

GOMES, M. S. Análise do consumo de energia numa rede wi-fi. UNILAB, 2020.

INTERJATO. **Evolução da internet móvel**. 2017. Entenda a evolução da internet móvel. Disponível em: <<https://interjato.com.br/tecnologia/evolucao-internet-movel/>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

ITU. **Fifth generation of mobile technologies**. 2018. 5G - Fifth generation of mobile technologies. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

LAURIDSEN, M. **Studies on Mobile Terminal Energy Consumption for LTE and Future 5G**. [S.l.]: Aalborg Universitet, 2015.

LUO, C. J. Z. F.-L. Signal processing for 5g: Algorithms and implementations. **IEEE**, v. 1, p. 616, 2016.

MASOUDI, M. G. K. M. Green mobile networks for 5g and beyond. **IEEE**, v. 10, n. 1011, p. 28, 2019.

MORAES, T. **Inovador, 5G está longe de Bauru**. 2019. Tecnologia G Celulares. Disponível em: <<https://www.jcnet.com.br/noticias/geral/2019/10/701205-inovador--5g-esta-longe-de-bauru.html>>. Acesso em: 10 jun. 2021.

MOTA, M. **Very High-Speed Data Converters for 5G Analog Front-End**. 2020. Why are GSPS Data Converters Required? Disponível em: <<https://www.synopsys.com/designware-ip/technical-bulletin/5g-data-converters.html>>. Acesso em: 10 Agosto 2021.

MULDER, N. J. **REQUISITOS NA IMPLEMENTAÇÃO DE REDES DE TRANSPORTE PARA SUPORTAR O 5G: As redes de quinta geração - 5g**. Curitiba: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2018.

OLIVEIRA, P. R. M. Sistemas de antenas mimo. UAig, 2010.

ORACLE. **O Que é Internet of Things (IoT)?** 2020. Quais Tecnologias Tornaram a IoT Possível? Disponível em: <<https://www.oracle.com/br/internet-of-things/what-is-iot/>>. Acesso em: 20 jul. 2021.

PATEL, S. P. K. Internet of things-iot: Definition, characteristics, architecture, enabling technologies, application future challenges. **IJESC**, v. 6, n. 5, p. 11, 2016.

- PUHLMANN, H. F. W. **Processamento Digital de Sinais**. 2014. Afinal, o que é Processamento Digital de Sinais? Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/introducao-ao-processamento-digital-de-sinais-dsp-parte-1/>>. Acesso em: 12 Agosto 2021.
- QUALCOMM. **Everything you need to know about 5G**. 2020. How fast is 5G? Disponível em: <<https://www.qualcomm.com/5g/what-is-5g>>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- REMMERT, H. **What Is 5G Network Architecture?** 2021. 5G Network Architecture. Disponível em: <<https://www.digi.com/blog/post/5g-network-architecture>>. Acesso em: 28 jul. 2021.
- SHURDI LUAN RUCI, A. B. . G. M. O. 5g energy efficiency overview. **European Scientific Journal**,, v. 17, n. 3, p. 315, 2021.
- TECHMANIA. **What is 5G Network Architecture?** 2021. Difference between 4G and 5G Network Architecture. Disponível em: <<https://www.eletimes.com/what-is-5g-network-architecture>>. Acesso em: 20 jul. 2021.
- TECHPLAYON. **What is 5G Network Architecture?** 2021. 5G Architecture Diagram. Disponível em: <<https://www.eletimes.com/what-is-5g-network-architecture>>. Acesso em: 20 jul. 2021.
- TELECO. **Evolução das Redes Móveis**. 2017. Telefonia Celular. Disponível em: <[https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialintlte/pagina\\_2.asp](https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialintlte/pagina_2.asp)>. Acesso em: 10 jun. 2021.
- VIAVISOLUTIONS. **Arquitetura do 5G**. 2021. 3GPP na arquitetura 5G. Disponível em: <<https://www.viavisolutions.com/pt-br/arquitetura-do-5g>>. Acesso em: 14 jul 2021.
- WU YUJING ZHANG, M. Z. J. Energy-efficient base-stations sleep-mode techniques in green cellular networks: A survey. **IEEE**,, v. 17, n. 2, p. 5–7, 2015.
- WURMSER, Y. **An Overview of 5G Technology Worldwide 2021**. 2021. 5G Technology Worldwide. Disponível em: <<https://www.emarketer.com/content/overview-of-5g-technology-worldwide-2021>>. Acesso em: 20 jun. 2021.
- ZAMBARDA, P. **Internet das Coisas’: entenda o conceito e o que muda com a tecnologia**. 2014. Como surgiu o termo? Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2014/08/internet-das-coisas-entenda-o-conceito-e-o-que-muda-com-tecnologia.html>>. Acesso em: 30 jul. 2021.