



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Maria Vitória Dias Guedes

Análise da eficiência de moduladores ASK implementados em tecnologia CMOS de 130 nanômetros, a partir da variação das dimensões de transistores

CARAÚBAS

2025

MARIA VITÓRIA DIAS GUEDES

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE MODULADORES ASK IMPLEMENTADOS
EM TECNOLOGIA CMOS DE 130 NANÔMETROS, A PARTIR DA VARIAÇÃO
DAS DIMENSÕES DE TRANSISTORES**

Monografia apresentada a Universidade Federal
Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus
Caraúbas para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica

Orientador:
Prof. Dr. Francisco de Assis Brito Filho

CARAÚBAS
2025

MARIA VITÓRIA DIAS GUEDES

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE MODULADORES ASK IMPLEMENTADOS
EM TECNOLOGIA CMOS DE 130 NANÔMETROS, A PARTIR DA VARIAÇÃO
DAS DIMENSÕES DE TRANSISTORES**

Monografia apresentada a Universidade Federal
Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus
Caraúbas para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Dr. Francisco de Assis Brito Filho

APROVADO EM ____/____/____



Maria Vitória Dias Guedes

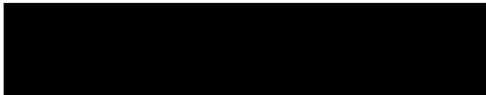
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Francisco de Assis Brito Filho
Orientador



Prof. Dr. Hugo Michel Câmara de Azevedo Maia
Examinador



Prof. Me. Lincoln Alexandre Paz Silva
Examinador

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

G924a Guedes, Maria Vitória Dias.
Análise da eficiência de moduladores ASK
implementados em tecnologia CMOS de 130
nanômetros, a partir da variação das dimensões de
transistores / Maria Vitória Dias Guedes. – 2025.
36 f. : il.

Orientador: Francisco de Assis Brito Filho.
Monografia (graduação) – Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2025.

1. Modulador ASK. 2. CMOS. 3. IoT. I. Brito
Filho, Francisco de Assis, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra
CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

*“Quanto mais me aprofundo na Ciência mais
me aproximo de Deus.”*

Albert Einstein.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois em todos os momentos bons e difíceis o Seu amor e a Sua graça foram derramados sobre a minha vida, me fazendo prosseguir. Obrigada, Senhor.

Em seguida, agradeço aos meus pais e minha irmã, que se fizeram presentes em cada instante da minha caminhada até aqui, com o seu apoio e o seu amor incondicional. Obrigada por me ensinar a nunca desistir e por sempre me estender a mão quando precisei. Eu dedico a vocês todo meu esforço e todas as minhas conquistas. Eu amo vocês.

Agradeço também ao meu orientador, Brito. Obrigada pelos ensinamentos, incentivos, conselhos e pelo exemplo de profissionalismo durante todo o desenvolvimento dessa pesquisa, pois sem o seu direcionamento a conclusão desse trabalho não seria possível.

Ainda agradeço a todos os meus amigos que tive a honra de conhecer, pelos momentos de alegria, de apoio e de puxões de orelha. Obrigada pela presença de vocês em minha vida. Nunca os esquecerei.

A todos os professores que tive a honra de conhecer durante esse curso, obrigada. Pelos ensinamentos repassados, palavras de apoio e por cada conselho que se tornaram cruciais em minha vida.

Obrigada.

RESUMO

Com a ascensão da tecnologia e o avanço da comunicação entre dispositivos, a internet das coisas (*Internet of Things - IoT*) tem tornado possível a conexão de maneira precisa em diversas áreas do cotidiano, como: equipamentos médicos, carros autônomos, automação industrial, casas inteligentes, dentre outras. Como consequência do avanço tecnológico, a crescente geração de dados a serem armazenados cresce de forma proporcional, necessitando de processamento e amostragem cada vez mais eficientes, a fim de acompanhar de forma eficaz esse crescimento. Para que a comunicação entre os dispositivos seja possível, além dos processos de codificação, multiplexação e filtragem, ocorrem operações de modulações de sinal para que sejam transmitidas as informações e, uma das técnicas utilizadas para realizar essas operações é a modulação ASK (*Amplitude Shift-Keying*), que consiste em um chaveamento por deslocamento de amplitude que irá converter um sinal digital em um sinal analógico. Para esse tipo de modulador, existem algumas topologias que constroem o circuito, utilizando diversos transistores, capacitores, resistores e até mesmo CI's, entretanto, com o advento da tecnologia, urge dispositivos que sejam portáteis, requerendo topologias simples. Portanto, o trabalho apresenta uma análise acerca da influência da largura do canal (W) e o comprimento do canal (l) de transistores, em tecnologia CMOS 130nm, no comportamento do sinal de um modulador ASK, atuando na banda de 2,4GHz, utilizando também de ferramentas *open source*, com o uso do XScem e Ngspice para realizar simulações variando os parâmetros do transistor. Os resultados apontaram no sentido de que o sinal é afetado a partir da alteração dos parâmetros do transistor, em que para $w = 6\mu m$ e $l = 0,15\mu m$, quando comparado com as demais simulações, em que quanto maior o valor da largura de canal do transistor, maior a eficiência e a otimização do sinal amplificado. Todos esses acontecimentos têm como consequência impor limites na margem de valores selecionados para análise do canal, que podem vir a dificultar a modulação e o envio dos sinais.

Palavras-chave: modulador ASK; CMOS; IoT.

ABSTRACT

With the rise of technology and the advancement of communication between devices, the Internet of Things (IoT) has enabled precise connectivity in various areas of daily life, such as medical equipment, autonomous vehicles, industrial automation, smart homes, among others. As a consequence of technological progress, the increasing generation of data to be stored grows proportionally, requiring more efficient processing and sampling to effectively keep up with this growth. For communication between devices to be possible, signal modulation operations are performed to transmit information. One of the techniques used for these operations is Amplitude Shift Keying (ASK) modulation, which consists of amplitude shift keying that converts a digital signal into an analog signal. For this type of modulator, there are several topologies used in its construction, incorporating different transistors, capacitors, resistors, and even integrated circuits (ICs). However, with the advancement of technology, there is an increasing demand for portable devices, requiring simpler topologies. Therefore, this study presents an investigation into the influence of channel width (W) and channel length (L) of transistors, in 130nm CMOS technology, on the signal behavior of an ASK modulator operating in the 2.4GHz band. Additionally, it contributes to the use of open-source tools by employing XScem and Ngspice to perform simulations while varying transistor parameters. The results pointed out that the signal is affected by the changes in the transistor parameters, where for $w = 6\mu m$ e $l = 0,15\mu m$, compared to other simulations, the larger the channel width of the transistor, the greater the efficiency and optimization of the amplified signal. All these events have the consequence of imposing limits on the range of values selected for channel analysis, which can complicate the modulation and transmission of signals.

Keywords: ASK modulator; CMOS; IoT.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-Modulações Digitais	17
Figura 2-Modulações Analógicas	18
Figura 3 - Gráfico da modulação ASK	19
Figura 4 - Modulador ASK.....	20
Figura 5 - Modulador ASK com CI 555.....	22
Figura 6-Esquema do Modulador ASK com RLC.	23
Figura 7 - Fluxograma do projeto.....	25
Figura 8 - Circuito do Xschem	26
Figura 9 – Simulação com $l_{min}=0,15\mu m$ e $w=1,5\mu m$	27
Figura 10 - Simulação com $l_{min}=0,15\mu m$ e $w=3\mu m$	28
Figura 11 - Simulação com $l_{min}=0,15\mu m$ e $w=6\mu m$	28
Figura 12 - Simulação com $l_{var}=0,15\mu m$ e $w=1,5\mu m$	29
Figura 13 - Simulação com $l_{var}=0,3\mu m$ e $w=3\mu m$	30
Figura 14 - Simulação com $l_{var}=0,6\mu m$ e $w=6\mu m$	30
Figura 15 - Simulação FFT.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Tipos entre tipos de modulação.....	17
Tabela 2-Valores dos componentes do transistor.....	26
Tabela 3-Resultados dos gráficos.	31

SIMBOLOGIA, ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

IoT	Internet of Things
ASK	Modulação em amplitude
FSK	Modulação em frequência
PSK	Modulação em fase
W	Largura de canal
l	Comprimento de canal
CMOS	Semicondutor de Óxido de Metal Complementar
V _{in}	Tensão de entrada
V _{out}	Tensão de saída
RLC	Circuito Resistor-Indutor-Capacitor.
GHz	Giga-hertz
nm	Nanômetros
bit	Binary Digit (Dígito binário)
OOK	On-Off Keying (Chaveamento on-off)
RFID	Radio Frequency Identification (Identificação por Rádio Frequência)
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (Transistor de Efeito de Campo de Semicondutor de Óxido Metálico)
kHz	Quilohertz
FGPA	Field Programmable Gate Arrays (Matrizes de Portas Programáveis em Campo)
CI	Circuitos Integrados
BJT	Bipolar Junction Transistor (Transistor Bipolar de Junção)
ISM	Industrial Scientific and medical
LC	Indutor-Capacitor
R	Resistor
C	Capacitor
L	Indutor
EDO	Equação Diferencial Ordinária
F	Faraday
μm	micrômetro
FFT	Transformada de Fourier

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>13</i>
1.2.	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>13</i>
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1.	<i>Modulação de Sinais</i>	<i>16</i>
2.1.1.	Propriedades da modulação de sinais	16
2.2.	<i>Modulação ASK (Amplitude Shift-Keying).....</i>	<i>18</i>
2.2.1.	Modulador ASK	20
2.2.2.	Projeto de Circuitos Integrados e o modulador ASK.....	21
2.2.3.	Topologias do Modulador ASK.....	21
3.	METODOLOGIA.....	24
3.1.	<i>Ferramentas Computacionais</i>	<i>24</i>
3.2.	<i>Componentes do Modulador ASK</i>	<i>26</i>
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
5.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	32
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

1. INTRODUÇÃO

Em vários países, a Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) tem se consolidado de forma crescente como uma parte integrante da rotina cotidiana. Um mundo interconectado exige dispositivos capazes de se comunicar de forma precisa, especialmente no contexto da internet das coisas. Para tal realidade, é gerado uma grande quantidade de dados, os quais precisam ser armazenados, processados e apresentados de maneira eficiente (BAPTISTA, 2022).

Segundo Harris (2022), como forma de melhorar a eficiência da produção dos circuitos integrados e garantir o apoio na cadeia produtiva e o progresso tecnológico, a taxa de utilização das indústrias fabricantes de chips microeletrônicos chegou à um valor próximo à 87%. Esse aumento é atribuído à maior demanda por aplicações domésticas, ao desenvolvimento de circuitos mais automatizados e à conectividade nos veículos que, mesmo com a chegada da pandemia, a capacidade de produção de chips não declinou.

Com o objetivo de aumentar a comunicação entre dispositivos, a otimização das formas de transferência de dados, a busca por alternativas para a diminuição do consumo e aumento da eficiência dos dispositivos têm contribuído com o desenvolvimento tecnológico. Segundo Rabaey (2002), nos equipamentos de rádio digital, o deslocamento do espectro do sinal digital em uma banda básica para um canal de radiofrequência se tornou uma necessidade e, para realizar essa modulação, há três modelos básicos que são usados para esse deslocamento, sendo a modulação em amplitude (ASK), modulação em frequência (FSK) e a modulação em fase (PSK).

Para que a comunicação entre dispositivos digitais seja possível, é necessário operações de modulações de sinal para que a informação seja transmitida. A técnica de modulação ASK (*Amplitude Shift-Keying*) ou modulação por deslocamento de amplitude é comumente utilizada em sistemas de comunicação sem fio, em que consiste no envio de sinais analógicos ao receber chaveamentos digitais. Na literatura, de acordo com Gubbi (2002), existem várias topologias do modulador que podem ser utilizadas, fazendo uso de componentes eletrônicos simples arranjados de forma organizada, portátil e com baixo consumo.

As mudanças em áreas da engenharia e da tecnologia foram essenciais, pois contribuíram com o refinamento da utilização de componentes eletrônicos, visto que as propriedades de componentes como indutores, capacitores ou transistores, elevaram as pesquisas acerca da modulação de sinal a outro patamar.

Uma das topologias comumente utilizada, faz uso de indutores em sua formação para a modelagem do circuito. Entretanto, a partir das propriedades intrínsecas do indutor, como a exemplo da indutância, há uma série de interferências no sinal, como o comprometimento da resposta de frequência e distorções no sinal modulado, além também do demodulador, que também pode sofrer alterações em sua operação, uma vez que depende do número de ciclos do sinal modulado transmitidos antes que ele se estabilize, o que impacta o tempo de resposta necessário para identificar o estado do bit transmitido (GIL, 2003).

Segundo Smith (2020), para tais afirmações, há também outros parâmetros de estudo no projeto dos indutores, como a sua estruturação e dimensões, que podem afetar o funcionamento do circuito. A busca por modelos que tragam uma eficiência energética capaz de suprir as demandas do consumo da modulação de sinal, faz com que haja uma alteração nos parâmetros de outros componentes, como os que compõem os transistores que, em sua maioria, são a otimização dos parâmetros já existentes.

Visando mitigar as consequências causadas pelas propriedades intrínsecas de algumas topologias, como a exemplo dos modelos utilizando indutores, surge a necessidade de testes a partir da alteração da razão entre os parâmetros de largura do canal (W) e comprimento do canal (l) do transistor, visto que esses parâmetros são fundamentais para determinar as características do transistor, como o comportamento do componente em diferentes frequências, o consumo do circuito do modulador ASK e a eficiência na modulação do sinal.

Desse modo, este trabalho visa analisar o comportamento de um modulador ASK constituído a partir de um tanque subamortecido com um transistor do tipo CMOS (M1) funcionando como chave, analisando a qualidade do sinal modulado para a banda 2,4GHz e, além disso, à utilização de ferramentas *open source*, como o XScem e Ngspice.

1.1. Objetivo Geral

Analisar como a alteração dos parâmetros do transistor, como a largura do canal (W) e o comprimento do canal (l), utilizando tecnologia de fabricação CMOS 130nm, podem influenciar a operação de modulação do sinal, ou seja, a eficiência, corrente e amplitude do sinal modulado.

1.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver um circuito de um modulador ASK utilizando em sua composição uma carga composta por um circuito RLC e um transistor com tecnologia de fabricação CMOS 130nm;
- Analisar comparativamente o comportamento e consumo do modulador ASK ao realizar alterações na razão entre W e L;
- Analisar o comportamento de forma gráfica do sinal modulado a partir da frequência utilizada de 2,4 GHz, frequentemente utilizada em aplicações de internet das coisas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Tavares (1997), com a descoberta da eletricidade em 1780, por Benjamin Franklin e, mais tarde, em 1863 com a formulação da existência de ondas eletromagnéticas, por James Maxwell, alguns estudos levaram ao desenvolvimento de um experimento em que faíscas saltavam entre duas esferas de cobre separadas pelo ar, estabelecendo o princípio da propagação radiofônica, executado pelo cientista alemão Heinrich Hertz. Esse experimento comprovou o transporte energia por meio de ondas eletromagnéticas através da atmosfera.

Quase 40 anos após a descoberta realizada por Hertz, o estudante italiano Guglielmo Marconi (Figura 1) realizou alguns experimentos no jardim de casa, conseguindo transmitir sinais de código Morse chegando a milhas de distância. Sempre em constante evolução, a sociedade tem buscado novas formas de se relacionar e se comportar, uma vez que, as barreiras que antes dificultavam a comunicação e a interação entre as pessoas, especialmente à distância, foram reduzidas de maneira expressiva. Isso se deve, em grande parte, aos avanços tecnológicos e ao desejo humano de ir além dos limites estabelecidos. Nesse contexto, os meios e métodos de comunicação passaram por constantes aprimoramentos, tornando-se mais rápidos, eficientes e eficazes, o que tem contribuído para a melhoria da qualidade de vida de várias gerações (TAVARES, 1997).

Com a evolução da tecnologia, a transmissão de informações de diferentes naturezas sem a necessidade de um vínculo físico direto entre o emissor e o receptor se tornou realidade. Atualmente, é possível enviar mensagens remotamente entre diversos dispositivos como controles remotos, sistemas de segurança e até satélites, que operam com a modulação e demodulação de sinais, tornando esses processos indispensáveis para a vida moderna (IGNACIO, 2021).

A comunicação tem sido fundamental para enfrentar desafios globais em diferentes contextos. Entretanto, a transmissão de sinais ainda enfrenta problemas em sua qualidade, devido a interferências geradas no meio de propagação, como distorção, atenuação, ruídos, baixa eficiência, alto consumo, dentre outros.

Segundo Pérez (2010), o fenômeno conhecido como Transmissão de Dados ocorre a partir da troca de informações entre dois ou mais pontos. Para que esse processo seja verdade, há a necessidade de alguns elementos que compõem o fluxo de troca de informações, como a fonte da mensagem, o transmissor, o meio de transmissão, o receptor e o destino. Esses dados são enviados em formato de “pacotes”, em que percorrem diferentes distâncias transportados por ondas eletromagnéticas, podendo ser de origem analógica ou digital.

Diante desses desafios, os sistemas de comunicações aprimoraram as formas de transmissão de sinais e implementaram novas técnicas, a fim de garantir a integridade dos dados enviados, protegendo-os contra possíveis distúrbios que possam comprometer o sistema de comunicação. Para tal, alguns sistemas utilizam-se do aproveitamento de canais de comunicação disponíveis para transmissão do sinal, garantindo um vínculo maior entre o compartilhamento de informações e o homem, como a exemplo dos moduladores de sinais (ALFREDO, 2021).

2.1. Modulação de Sinais

2.1.1. Propriedades da modulação de sinais

Desde os primórdios da humanidade, a comunicação tem sido a base para o progresso das sociedades. Os primeiros seres humanos utilizavam gestos, expressões faciais e sons para se comunicar, garantindo a sobrevivência por meio da cooperação na caça, na defesa e na organização dos grupos. Com o passar do tempo, novas formas de comunicação foram desenvolvidas e, no século XX, o rádio revolucionou a transmissão de informação, permitindo a comunicação instantânea a longa distância (BAPTISTA, 2008).

A evolução da tecnologia analógica para digital oferece amplas possibilidades de inovação e melhoramento das comunicações e, dito isto, para que a comunicação ocorra e a informação seja transmitida, são necessárias operações de modulação de sinal. Segundo Pérez (2010), a modulação de sinais é definida como a transferência de um sinal em banda base para um sinal e banda transmitida, sendo os sinais transmitidos por emissores, propagando-se por vários meios e, ao serem recebidos, passam pelo processo de demodulação para que possam ser interpretados corretamente.

Com relação ao processo de modulação, Tomasi (2003) afirma que o objetivo principal é modificar a característica da onda portadora, em que ocorre a conversão de dados primitivos em formatos mais flexíveis e adequados para a transmissão. A onda portadora possui alguns parâmetros, como: Amplitude, Frequência ou Fase.

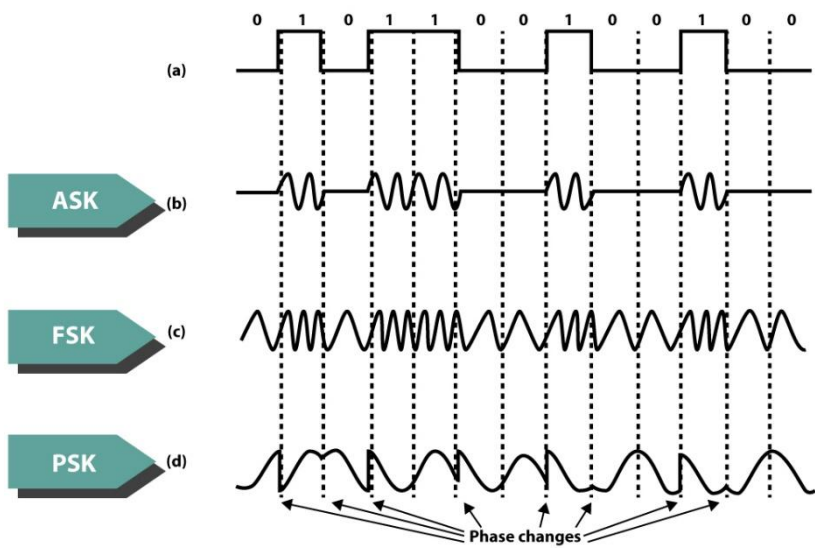
O processo de modulação possui técnicas específicas, diferenciadas em analógicas e digitais, sendo elas representadas na Tabela 1:

Tabela 1-Tipos entre tipos de modulação.		
TIPO DE MODULAÇÃO	MODULAÇÃO ANALÓGICA	MODULAÇÃO DIGITAL
TÉCNICAS	• Modulação em Amplitude (AM); • Modulação em Frequência (FM); • Modulação em Fase (PM).	• Modulação por Chaveamento de Amplitude (ASK); • Modulação por Chaveamento de Frequência (FSK); • Modulação por Chaveamento de Fase (PSK).

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2025).

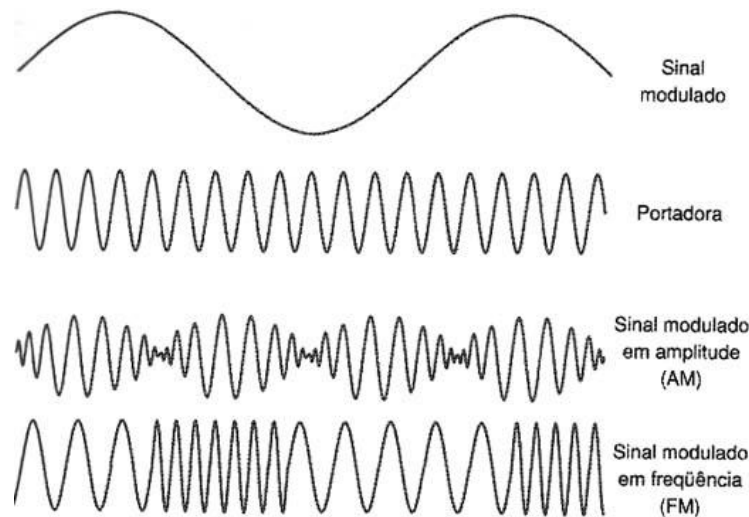
As Figuras 1 e 2 demonstram os sinais modulados para cada tipo de modulação analógica e digital.

Figura 1-Modulações Digitais



Fonte: (Adaptada de Walmir André, 2025).

Figura 2-Modulações Analógicas



Fonte: (Adaptada de Newton Braga, 2025).

A modulação de sinais é um dos pilares fundamentais da comunicação moderna, permitindo a transmissão eficiente de informações por diversos meios. Com o avanço da tecnologia sem fio e a crescente necessidade de conectividade entre dispositivos, a Internet das Coisas (*Internet of Things – IoT*) surge como um paradigma possibilitando a interconexão entre dispositivos e, para que o processo se torne eficiente, são necessários métodos de modulação que garantam baixo consumo de energia, custo reduzido e compatibilidade com redes de curto e longo alcance e, dentre as diversas técnicas de modulação utilizadas na *IoT*, a modulação ASK (*Amplitude Shift-Keying*) se destaca devido à sua simplicidade e eficiência energética (PAREDES, 2019).

2.2. Modulação ASK (*Amplitude Shift-Keying*)

Para que a comunicação ocorra, são necessárias operações de modulação de sinais para que a informação possa ser transmitida. Uma das técnicas utilizadas para esse processo é a modulação ASK (*Amplitude Shift-Keying*) ou modulação por alteração de amplitude, que realiza o chaveamento dos dados digitais a partir das variações da amplitude da portadora, sendo amplamente utilizado para simplificar o sistema. A variação de amplitude da portadora

se comporta a partir da característica dos dados que serão transmitidos, podendo ser representados como bits de dados (GILÓ, 2022).

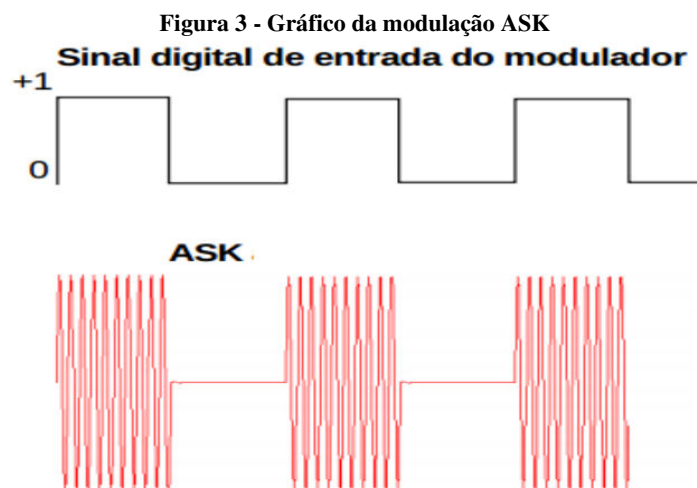
De acordo com Clavijo (1995), o sinal modulado é representado como uma sequência periódica baseada em pulsos, no domínio do tempo, que pode ser representado matematicamente como:

$$s(t) = m(t) \cdot A \cos(2\pi f_c t)$$

Onde:

- $s(t)$ é o sinal modulado.
- $m(t)$ representa o sinal de mensagem binário (0 ou 1).
- A é a amplitude da portadora.
- f_c é a frequência da portadora.

Quando $m(t) = 1$, o sinal da portadora é transmitido com uma amplitude definida e, quando $m(t) = 0$, a portadora é transmitida com uma amplitude quase nula, sendo caracterizada como uma modulação OOK (*On-Off Keying*), em que representa uma forma simplificada de ASK (HAYKIN, 2008). A Figura 3 representa o sinal de entrada e o sinal modulado pelo ASK.



Fonte: Mathias, 2008.

Uma das grandes vantagens da modulação ASK é a facilidade de implementação, podendo ser gerada a partir de circuitos eletrônicos simples, como transistores operando como chaves. Entretanto, embora possua baixo consumo de energia e seja uma técnica simples de implementar, a ASK é sensível a ruídos e variações de ganho, o que pode impactar na

confiabilidade da transmissão em alguns ambientes, sendo amplamente empregada em aplicações como comunicações ópticas, redes RFID (*Radio Frequency Identification*), controles remotos infravermelhos e sistemas de transmissão digital de curto alcance (LUQUE, 1995).

2.2.1. Modulador ASK

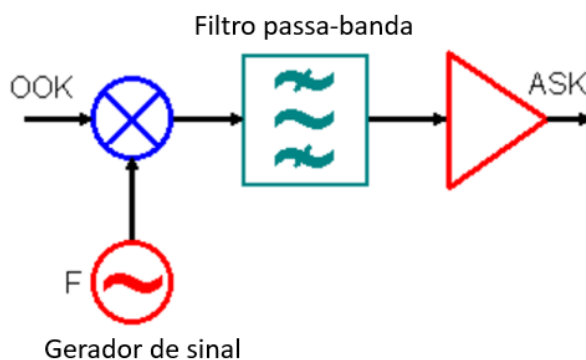
Para a aplicação da modulação ASK em prática, se faz necessário um circuito responsável pela alteração da amplitude da portadora de acordo com o sinal recebido na entrada. Esse circuito é conhecido como Modulador ASK.

Segundo Salehi (2014), o circuito modulador ASK se caracteriza pelo seu processo de conversão do sinal binário em um sinal modulado em amplitude, em que a portadora possui sua intensidade ajustada de acordo com a sequência de bits de entrada.

Uma abordagem comumente utilizada em moduladores ASK, faz uso de chaveamentos eletrônicos, em que um transistor MOSFET atua como uma chave que liga ou desliga a portadora, baseando-se no sinal binário de entrada, sendo esse método amplamente empregado devido à sua simplicidade e baixo consumo de energia (LATHI, 2009).

O emprego dos moduladores ASK tem principal atividade em sistemas que necessitem de baixo custo e eficiência energética, utilizado frequentemente em projetos na área de telecomunicações, como por exemplo em sistemas de transmissão de dados em curtas distâncias, pois torna possível o envio de sinais com uma frequência desejada, a partir do chaveamento, além de utilizar menos banda em comparação com as outras técnicas, tornando-a uma opção viável para transmissões de rádio e sistemas de controle remoto (COCHRAN, 2015).

Figura 4 - Modulador ASK



Fonte: (Adaptada de Mathias, 2008).

2.2.2. Projeto de Circuitos Integrados e o modulador ASK

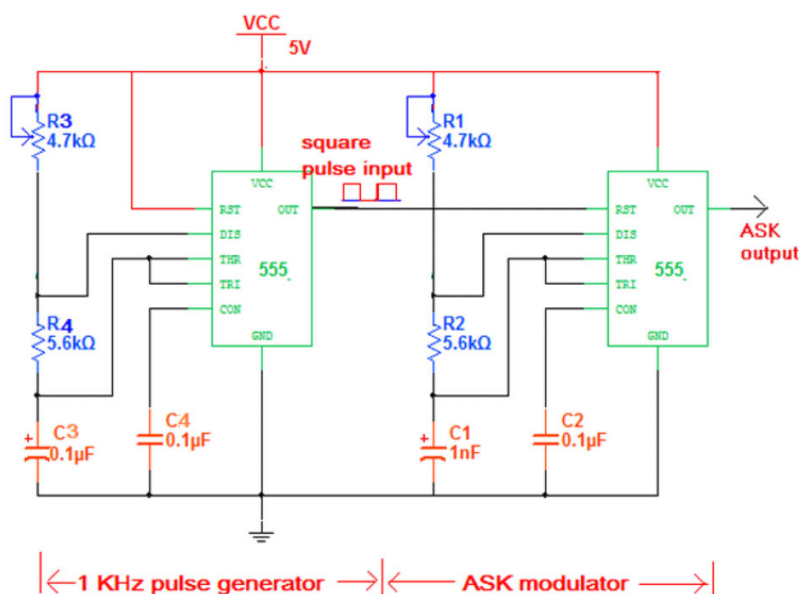
Os circuitos integrados desempenham um papel fundamental na implementação de projetos de moduladores ASK, em que fornecem algumas estratégias voltadas para o baixo consumo e topologias compactas (SEDRA, 2020).

Segundo Schilling (2013), os circuitos integrados utilizados em moduladores ASK podem ser classificados em duas principais categorias: circuitos dedicados e circuitos programáveis. Os moduladores ASK baseados em tecnologias CMOS fazem parte da categoria dos circuitos dedicados, em que são projetados especificamente para operações de modulação de sinal, oferecendo alta eficiência e operando em faixas de frequência que variam de kHz a GHz. Já os circuitos programáveis, como a exemplos dos microcontroladores e FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*), permitem uma implementação mais flexível de moduladores ASK, com uma a otimização de parâmetros como taxa de transmissão e padrões de chaveamento, tornando-os ideais para aplicações onde a adaptabilidade do sistema é um fator essencial.

2.2.3. Topologias do Modulador ASK

Com o advento da *IoT*, surge a demanda de dispositivos inteligentes que sejam, acima de tudo, portáteis e de baixo consumo e, para os moduladores ASK, existem algumas topologias que podem ser implementadas de acordo com a aplicação e exigência do sistema. Algumas dessas topologias utilizam transistores, indutores, capacitores, resistores, diodos e até mesmo circuitos integrados (CIs), como o 555, como mostra a Figura 5 (SINGH, 2015).

Figura 5 - Modulador ASK com CI 555



Fonte: (Ashutosh Bhatt, 2014).

Segundo Salehi (2014), uma das formas mais comum de modulação ASK utiliza transistores bipolares (BJT) ou MOSFETs como chaves, com o objetivo de controlar a condução do transistor de acordo com o sinal de entrada. Esse tipo de circuito é simples e eficiente, porém pode apresentar variações de ganho, que podem impactar a qualidade do sinal.

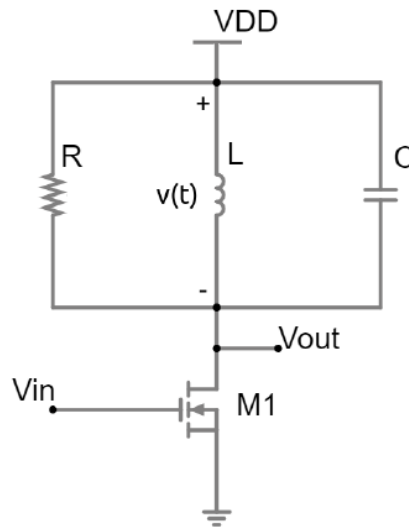
Outra abordagem eficiente como forma de topologia do modulador ASK envolve o uso de indutores em circuitos do tipo RLC, destacando-se pelo melhor desempenho do modulador e controle na forma do sinal modulado.

De acordo com Giló (2022), a utilização de circuitos RLC na modulação ASK visa aproveitar as propriedades dos indutores e capacitores para manipular a amplitude da portadora, em que o indutor desempenha um papel essencial na filtragem e na amplificação do sinal. Além disso, o circuito RLC pode ser ajustado para operar em uma frequência específica, como a exemplo das bandas ISM (*Industrial Scientific and medical*) de 915 MHz e 2,4 GHz, as quais são faixas frequentemente utilizadas em aplicações de internet das coisas. No modulador utilizando um circuito tanque LC, o sinal modulado é condicionado a transmitir apenas a frequência desejada.

Na *IoT*, a necessidade de baixo consumo energético e estabilidade na comunicação tem incentivado o uso de circuitos LC em dispositivos como sensores sem fio. Algumas tecnologias de curto alcance também empregam circuitos RLC sintonizados, a fim de garantir

que a transmissão do sinal modulado pelo ASK seja de forma eficiente e sem interferências (PROAKIS, 2014).

Figura 6-Esquema do Modulador ASK com RLC.



Fonte: (Giló, 2022).

O circuito RLC, também conhecido tanque LC, é formado por três componentes principais: um resistor (R), um capacitor (C) e um indutor (L), conforme ilustrado na Figura 6. Esse tipo de circuito apresenta um comportamento oscilatório característico, operando em uma determinada frequência de ressonância. Segundo Dias (2022), utilizando as Leis das Malhas de Kirchhoff, é possível derivar uma Equação Diferencial Ordinária (EDO) de Segunda Ordem que descreve matematicamente seu funcionamento, conforme demonstrado na Equação (1).

$$\frac{d^2v}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dv}{dt} + \frac{1}{LC} v = 0 \quad (1)$$

Entretanto, moduladores ASK utilizando RLC também possui alguns desafios, como maior tamanho físico dos componentes, sensibilidade a variações térmicas e custos de fabricação mais elevados quando comparado a circuitos exclusivamente resistivos.

3. METODOLOGIA

Nesta seção, serão detalhadas as ferramentas computacionais empregadas na modelagem e simulação do modulador ASK. Além disso, serão apresentados os valores dos componentes dos circuitos, incluindo capacitores, resistores e transistores, assim como a metodologia utilizada para comparar os diferentes resultados obtidos.

3.1. Ferramentas Computacionais

Com o intuito de analisar a influência da resistência interna do indutor no modulador ASK com dada frequência de oscilação, foi modelado um circuito com os componentes elétricos do modulador (resistor, indutor, capacitor e transistor), para a frequência de 2,4GHz utilizando a ferramenta Xschem (versão 3.4.6), a fim de analisar a influência da alteração dos parâmetros do transistor no modulador ASK e para realizar as simulações, foi utilizado o Ngspice, possibilitando as análises a partir do *netlist* SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*), extraído do *software* de captura de esquemático.

Foram realizadas simulações transientes para cada variação de w e l , para analisar o comportamento da saída do modulador ASK, bem como simulações no domínio da frequência para avaliar a amplitude e a faixa de frequência dos sinais modulados. O sinal de entrada utilizado possui uma tensão de 1,8 V (padrão da tecnologia Sky130nm), enquanto o modulador foi alimentado com uma tensão de 3,3 V;

Para a análise inicial dos valores dos circuitos e definição dos parâmetros de variação do w e l do transistor, foram calculados os componentes do circuito baseado no valor da frequência de operação escolhida (2,4GHz) e no valor do indutor principal, como demonstrado na Equação (2).

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{50}{2\pi \cdot (2,4 \times 10^9)} = 3,32nH \quad (2)$$

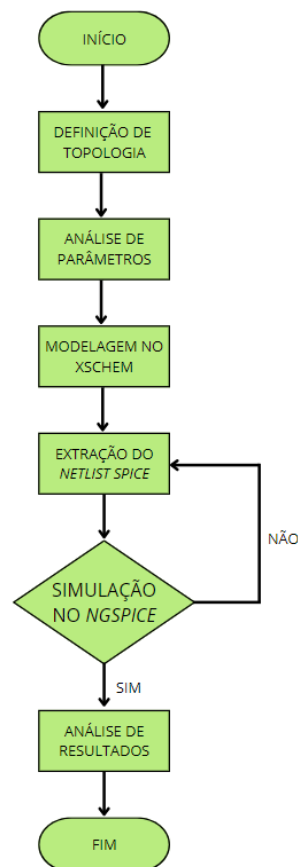
Após essa definição, foram encontrados os valores do resistor e capacitor, $R=1143\Omega$ e $C = 1,458 \times 10^{(-12)} F$, respectivamente, para o circuito RLC, demonstrados nas Equações (3) e (4).

$$C = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 \cdot L} \rightarrow C = \frac{1}{(2\pi \cdot 2.4 \times 10^9)^2 \cdot 3.32 \times 10^{-9}} = 1,458 \times 10^{(-12)} F \quad (3)$$

$$R = \frac{1}{50} \cdot \sqrt{\frac{3.32 \times 10^{-9}}{1.458 \times 10^{-12}}} = 1143 \Omega \quad (4)$$

Segundo Gray (2009), para transistores CMOS em circuitos de rádio frequência e ASK, as definições de w e l precisam obedecer a razão $\frac{w}{l} > 5$, para garantir um ganho suficiente e evitar efeitos de diminuição no canal. Abaixo, a Figura 7 está representando o fluxograma do processo.

Figura 7 - Fluxograma do projeto



Fonte: (Autoria Própria, 2025).

3.2. Componentes do Modulador ASK

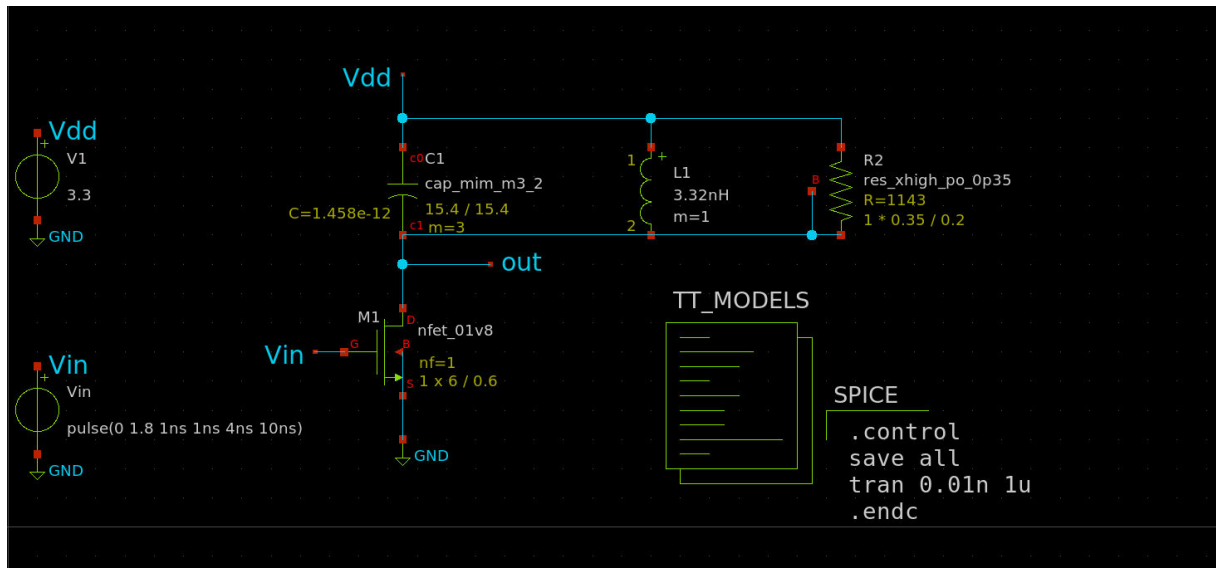
Para a frequência de 2,4GHz, foram definidos dois estágios de testes para o circuito. O primeiro teste foi baseado na premissa de que será fixado um valor para o comprimento de canal l_{min} , com um w variável. Para o segundo teste, l_{min} foi variado de acordo com cada estágio de w , obedecendo a razão $\frac{w}{l} > 5$. A Tabela 2 especifica os valores dos testes 1 e 2.

Tabela 2-Valores dos componentes do transistor.		
TESTE	l_{min}	w
1	• $l_{min} = 0,15\mu m$	• $w = 1,5\mu m$
		• $w = 3\mu m$
		• $w = 6\mu m$
2	• $l_{min} = 0,15\mu m$	• $w = 1,5\mu m$
	• $l_{min} = 0,3\mu m$	• $w = 3\mu m$
	• $l_{min} = 0,6\mu m$	• $w = 6\mu m$

Fonte: (Autoria Própria, 2025).

A Figura 8 representa o circuito modelado no Xschem, utilizando os valores encontrados anteriormente.

Figura 8 - Circuito do Xschem

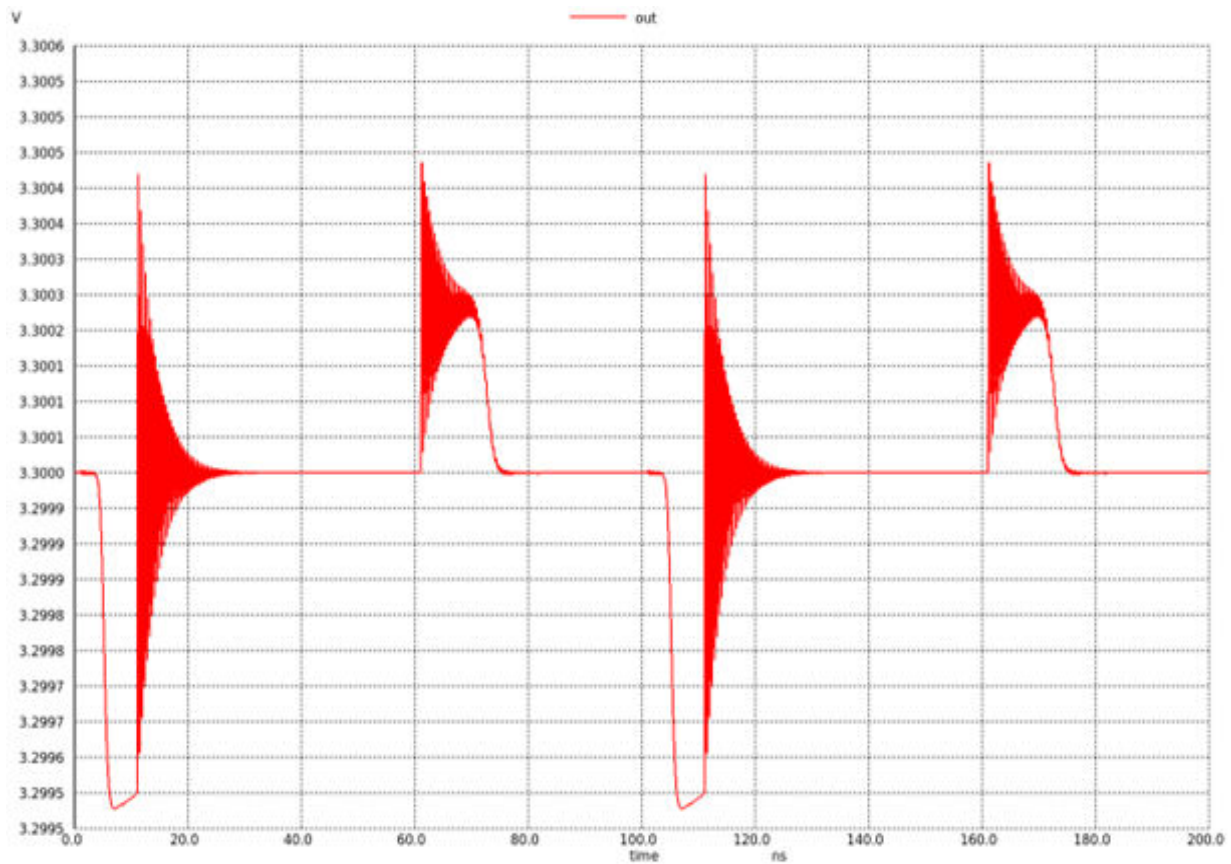


Fonte: (Autoria Própria, 2025).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

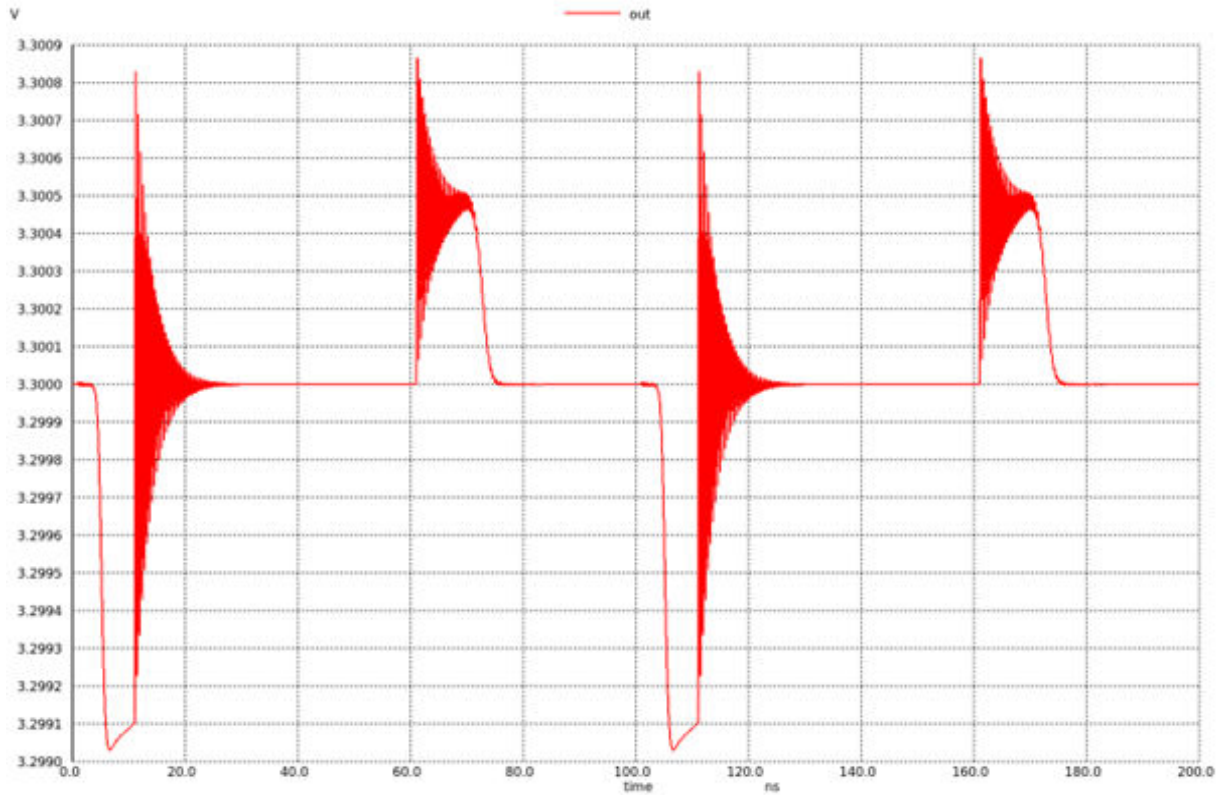
As simulações transientes do modulador ASK para os parâmetros do transistor considerados neste trabalho, bem como as tabelas com os resultados para cada faixa de frequência estão mostradas a seguir.

Figura 9 – Simulação com $l_{min}=0,15\mu m$ e $w=1,5\mu m$



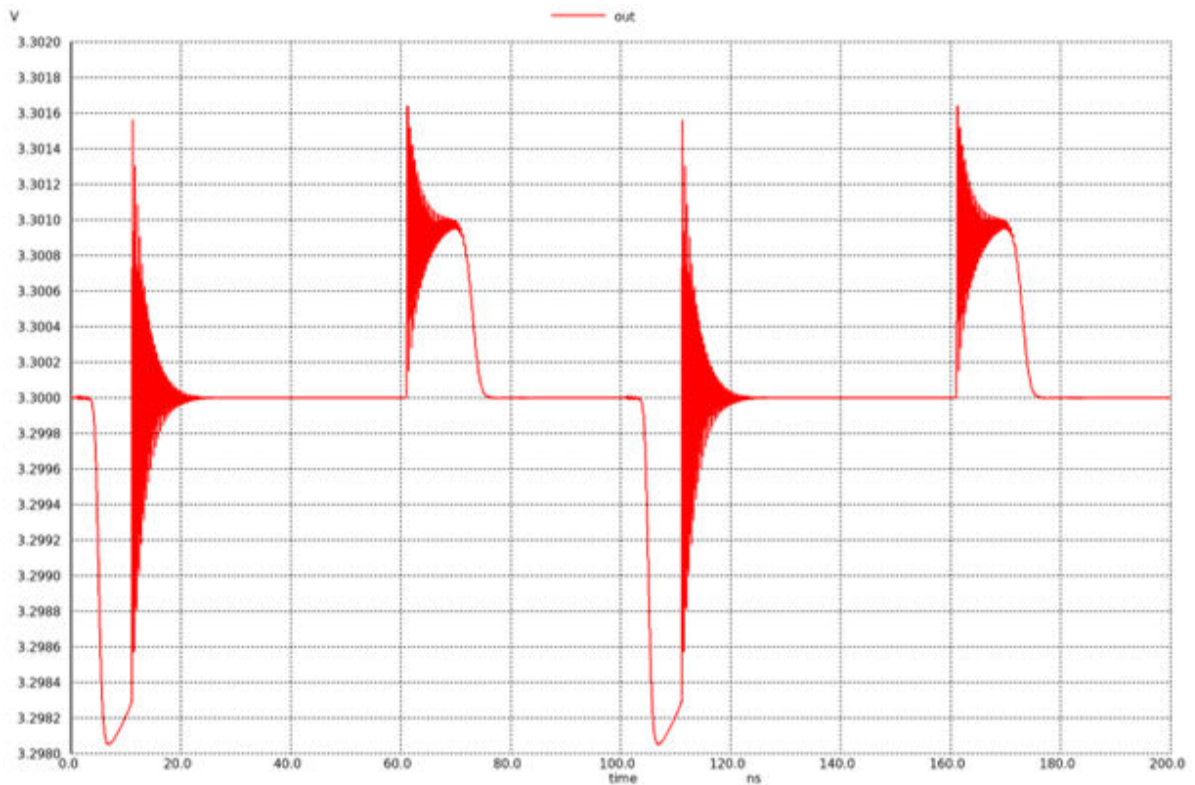
Fonte: (Autoria Própria, 2025).

Figura 10 - Simulação com $l_{min}=0,15\mu m$ e $w=3\mu m$



Fonte: (Autoria Própria, 2025).

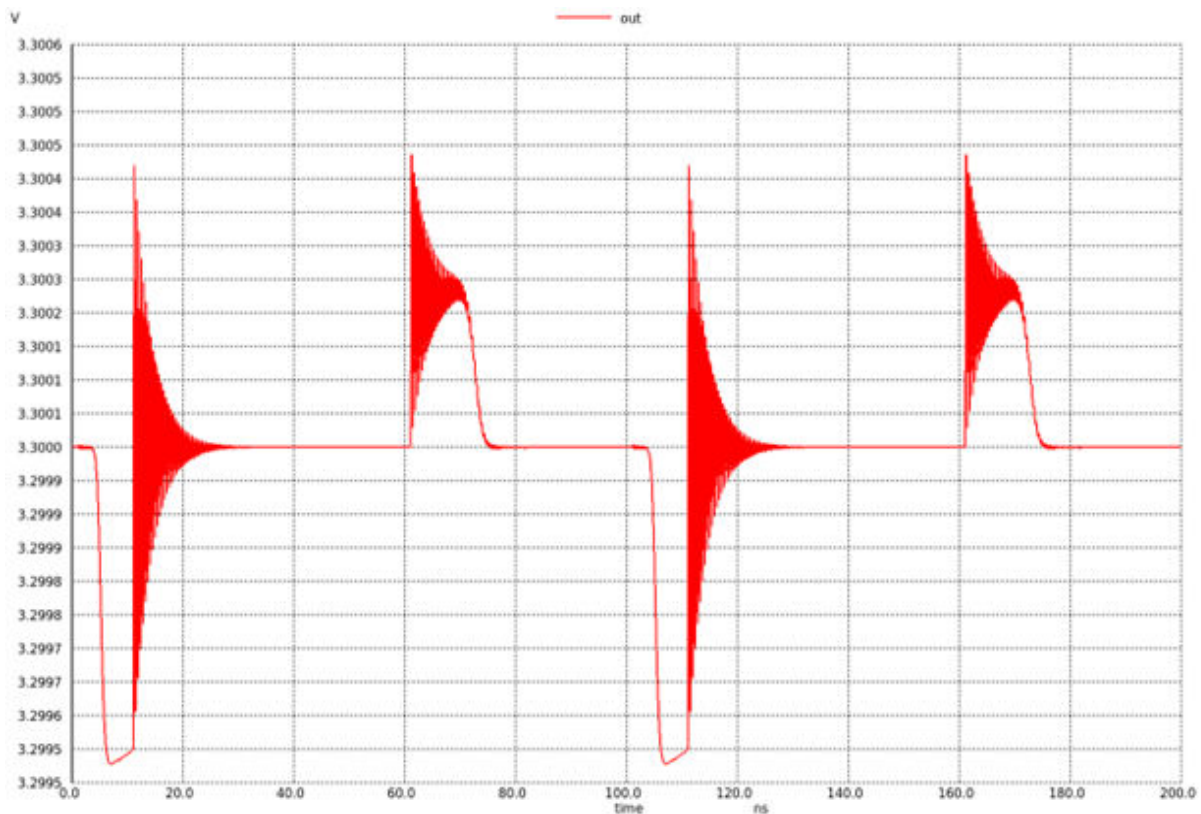
Figura 11 - Simulação com $l_{min}=0,15\mu m$ e $w=6\mu m$



Fonte: (Autoria Própria, 2025).

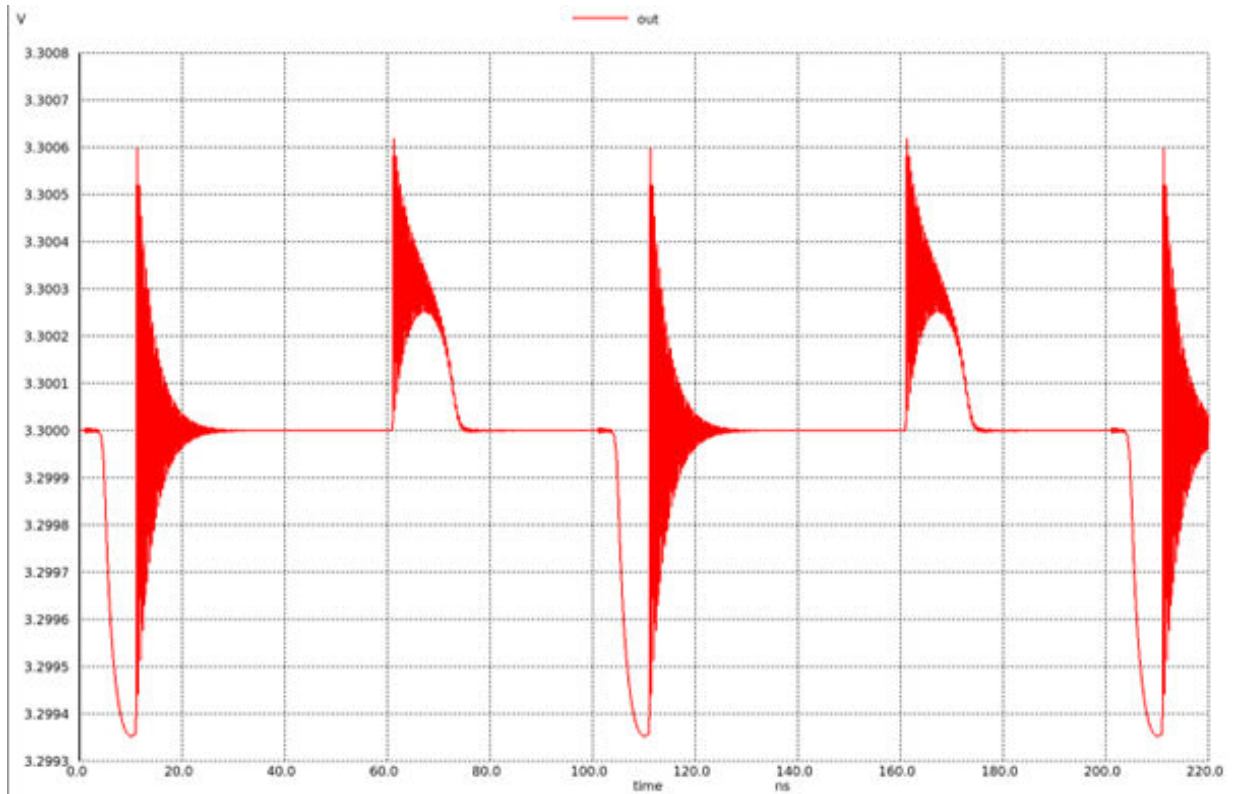
De acordo com os gráficos, o tempo de estabilização do pico da simulação transiente, ou seja, o tempo que o sistema levou para se ajustar completamente após a mudança de parâmetro, com $w = 3\mu m$ (Figura 10) foi ligeiramente maior do que com $w = 1,5\mu m$ (Figura 9) quando mantido $l_{min} = 0,15\mu m$. Isso pode ser observado a partir do valor de estabilização do pico do sinal modulado. No entanto, esse aumento no tempo de estabilização permite que o circuito mantenha energia por mais tempo, resultando em maior eficiência e estabilidade nas oscilações. Já o tempo de estabilização do circuito com $w=6\mu m$ (Figura 11) foi superior ao dos testes anteriores ($w = 1,5\mu m$ e $w = 3\mu m$), apresentando um tempo de estabilização maior. Apesar disso, o circuito apresenta maior estabilidade nas oscilações, comparado ao circuito com $w = 3\mu m$.

Figura 12 - Simulação com $lvar=0,15\mu m$ e $w=1,5\mu m$



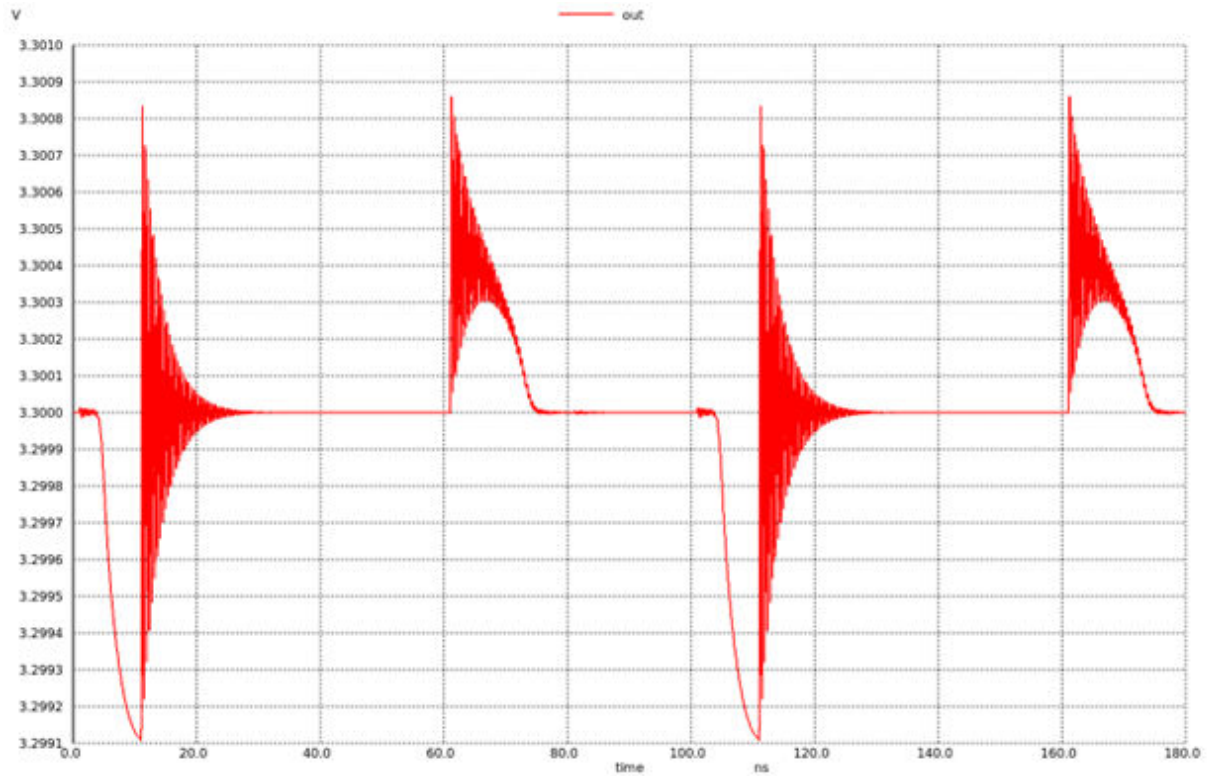
Fonte: (Autoria Própria, 2025).

Figura 13 - Simulação com $lvar=0,3\mu m$ e $w=3\mu m$



Fonte: (Autoria Própria, 2025).

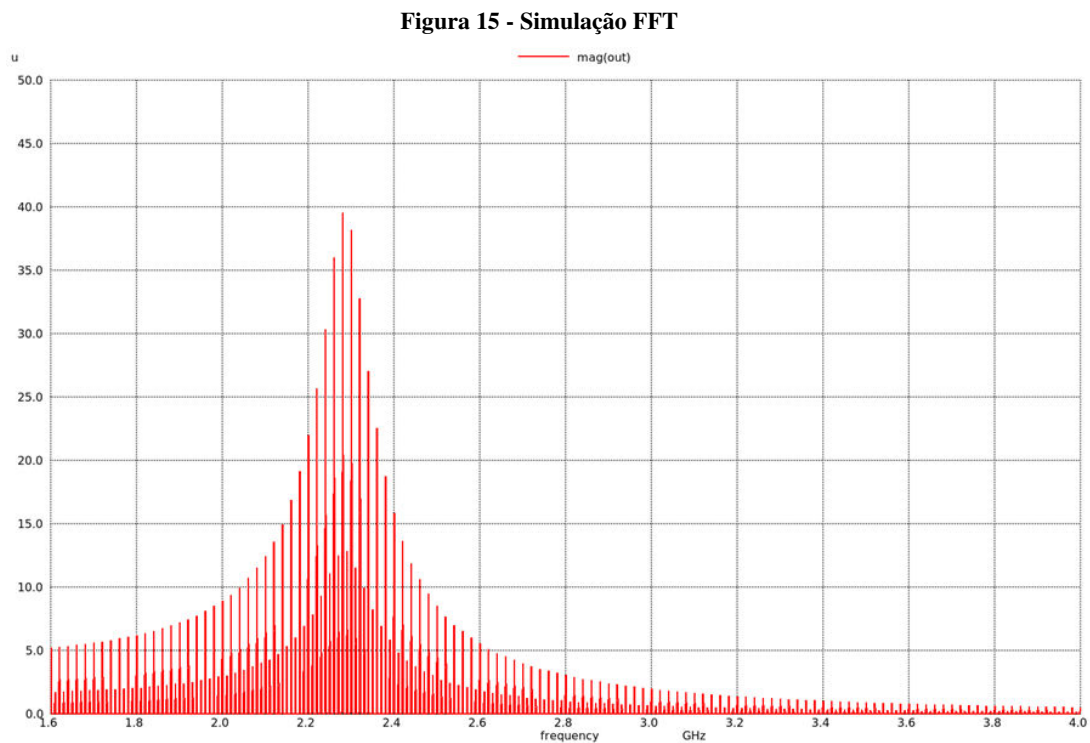
Figura 14 - Simulação com $lvar=0,6\mu m$ e $w=6\mu m$



Fonte: (Autoria Própria, 2025).

Com w e l_{var} variando de forma proporcional ($w = 3\ \mu m$ e $l_{var} = 0,3\ \mu m$, e $w = 6\ \mu m$ e $l_{var} = 0,6\ \mu m$), o tempo de estabilização foi aproximadamente igual ao obtido no circuito com $w = 1,5\ \mu m$ e $l_{min} = 0,15\ \mu m$, mostrando consistência na eficiência para essa relação proporcional, demonstrado nas Figuras 13 e 14.

Abaixo, na Figura 15, está demonstrada a Simulação FFT (Transformada de Fourier) utilizando $l_{min} = 0,15\ \mu m$ e $w = 6\ \mu m$ para análise da frequência.



Fonte: (Autoria Própria, 2025).

Os resultados explanados acima estão distribuídos na Tabela 3.

Tabela 3-Resultados dos gráficos.		
CONFIGURAÇÃO DO CIRCUITO	TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO	EFICIÊNCIA E ESTABILIDADE
$l_{min} = 0,15\ \mu m$ $w = 1,5\ \mu m$	Menor tempo de estabilização.	Menor eficiência e estabilidade de oscilação.
$l_{min} = 0,15\ \mu m$ $w = 3\ \mu m$	Tempo de estabilização ligeiramente maior que $w = 1,5\ \mu m$.	Maior eficiência e estabilidade de oscilação.

$l_{min} = 0,15\mu m$ $w = 6\mu m$	Maior tempo de estabilização.	Maior eficiência e estabilidade de oscilações quando comparado com $w = 3\mu m$.
$l_{min} = 0,3\mu m$ $w = 3\mu m$	Tempo de estabilização semelhante a $l_{min} = 0,15\mu m$ e a $w = 1,5\mu m$.	Relação consistente de eficiência.
$l_{min} = 0,6\mu m$ $w = 6\mu m$	Tempo de estabilização semelhante a $l_{min} = 0,15\mu m$ e a $w = 1,5\mu m$.	Relação consistente de eficiência.

Fonte: (Autoria Própria, 2025).

De acordo com os gráficos, o tempo de estabilização indica o tempo que o circuito leva para atingir um estado estável após uma perturbação. Um tempo de estabilização menor pode significar uma resposta mais rápida, mas isso não garante maior eficiência, devido ao fato de que, a estabilidade de oscilação está diretamente ligada a precisão do sinal. Então, se o tempo de estabilização for reduzido de maneira muito agressiva, isso pode causar oscilações ou instabilidade. Além disso, a eficiência de um sistema está relacionada ao quanto os recursos são utilizados para alcançar o sinal de forma estável, desse modo, se o circuito acelera demais a resposta, ele pode consumir mais energia ou até aumentar o desgaste em componentes.

Para os demais resultados, verificou-se que um tempo de estabilização maior resultou em maior estabilidade nos picos de oscilações e maior eficiência do circuito, ou seja, circuitos com w maior (como $w = 6\mu m$) demoraram mais para estabilizar, mas apresentaram oscilações mais estáveis e maior eficiência energética.

Por outro lado, circuitos com w menor estabilizaram mais rapidamente, mas podem ter menor eficiência e estabilidade nas oscilações. Dito isto, há uma análise a ser realizada considerando o equilíbrio entre tempo de estabilização, estabilidade das oscilações e eficiência do circuito.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Após as análises, foi observado que os valores de w e l impactaram diretamente no desempenho e eficiência do modulador ASK. Para um valor de l_{min} fixado em $0,15\mu m$ com

w variando em $1,5\mu m$, $3\mu m$ e $6\mu m$, à medida que o valor de w foi aumentado, a corrente de condução do transistor foi aumentada, de acordo com a Equação (5), fazendo com que a eficiência do circuito fosse otimizada e a amplitude do sinal ASK amplificada.

$$I_D \propto \frac{w}{L} (V_{GS} - V_{th})^2 \quad (5)$$

Para o valor de l_{var} em $0,15\mu m$, $0,3\mu m$ e $0,6\mu m$ com w crescente em $1,5\mu m$, $3\mu m$ e $6\mu m$, conforme o valor de l_{var} é aumentado, a corrente de condução do transistor diminui, impactando diretamente na eficiência e diminuindo a amplitude do sinal ASK. Por outro lado, l_{var} maior melhora a estabilidade do transistor, reduzindo os efeitos de canal curto e proporcionando melhor controle sobre a operação.

Desse modo, como forma de otimizar o consumo do modulador ASK e aumentar a amplitude do sinal, a razão $\frac{w}{l}$ escolhida para o circuito apresentado foi de $\frac{w}{l} = \frac{6}{0,15}$, proporcionando um equilíbrio entre eficiência, corrente e amplitude. Para o valor de l , o resultado mais satisfatório foi obtido com o menor possível que, para esse caso, é o valor estabelecido pela tecnologia $l_{min} = 0,15\mu m$. Para o valor de w , o ajuste deve ser feito de forma a atender a amplitude e o consumo do modulador, visto que para $w = 6\mu m$ e $l_{min} = 0,15\mu m$, conseguimos obter resultados de alta amplitude do sinal do modulador ASK.

Com as alterações realizadas, foi observado que o processo de modificação dos parâmetros permitiu o controle mais preciso da frequência de operação, assim também como a redução de perdas e o aumento da eficiência energética. Além disso, outra melhoria alcançada através das mudanças de w e l , foi a redução das interferências externas.

Mesmo com a mudança nos parâmetros do transistor, existem ainda algumas desvantagens que comprometem o desempenho do modulador, fazendo com que haja a necessidade de outros ajustes a fim de garantir a implementação e uso comercial. Uma dessas desvantagens é a complexidade de construção, em que exige técnicas avançadas de fabricação, principalmente para circuitos integrados onde o espaço é reduzido. Além disso, para aplicações em RF, a variação de l e w pode introduzir efeitos parasitas, tornando o ajuste mais desafiador.

Embora os procedimentos utilizados para o ajuste do ganho de eficiência do modulador tenham demonstrado bons resultados, ainda há a necessidade de uma maior exploração, tendo em vista as várias possibilidades de análises a partir das mudanças dos

valores dos parâmetros. Para possíveis estudos futuros, é possível analisar a influência do indutor p_i e as alterações de parâmetros de transistores em outras topologias de moduladores, outras tecnologias de fabricação e/ou outras bandas de frequências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFREDO, W.; IGNACIO, L. **La modulación y demodulación de ASK**. Peru: Escuela Profesional de Electrónica y Telecomunicaciones, 2021.

ASITIC (Simulation of Spiral Inductors and Transformers). Disponível em: <<http://rfic.eecs.berkeley.edu/niknejad/ASITIC.html>>. Acesso em: 28 jan 2025.

BAPTISTA, M. C. P. **Identificação e caracterização da modulação dos sinais em RF**. Aveiro: Universidade de Aveiro, Departamento de Eletrônica, Telecomunicações e Informática, 2008.

COCHRAN, W. **Digital and Analog Communication Systems**. 8. ed. New Jersey: Pearson, 2015.

DILELLO, A. et. al. **An Ultra-Low Power ASK Modulator for Back Telemetry Applications**. University West Virginia, Morgantown. 2017.

GILÓ, Hugo Dias; BRITO FILHO, Francisco de Assis. **Influência da resistência interna de indutores quadrados em moduladores ASK em CMOS de 130 nanômetros**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Caraúbas, RN. 2022.

GRAY, P. R.; HURST, P. J.; LEWIS, S. H.; MEYER, R. G. **Analysis and Design of Analog Integrated Circuits**. 5. ed. New York: Wiley, 2009.

GUBBI, J. et. al. **Internet of Things (IoT): A vision, Architectural Elements, and Future Directions**. The University of Melbourne, Austrália. 2013.

HARRIS, Mark. **These 5 Charts Help Demystify the Global Chip Shortage**. IEEE Spectrum, 2022. Disponível em: <https://spectrum.ieee.org/global-chip-shortage>. Acesso em: 22 nov. 2024.

HAYKIN, S. **Communication Systems**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2008.

LATHI, B. P. **Modern Digital and Analog Communication Systems**. 4. ed. New York: Oxford University Press, 2009.

LUQUE, J.; CLAVIJO, S. **Modulación de señales digitales**. Sevilla, Espanha: Servicio de Publicaciones Sevilla, 1995. Disponível em: <https://www.dte.us.es/personal/sivianes/tcomu/Libros%20y%20Apuntes/1995%20Modulacion%20digital.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2025.

PAREDES, L. A. C.; OLIVEIRA, F. C. **Internet das Coisas: Conceitos, Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Novatec, 2019.

PÉREZ, C. **Modulación de amplitud**. Capítulo 5. Espanha: Universidad de Cantabria, 2010. Disponível em: http://personales.unican.es/perezvr/pdf/CH5ST_Web.pdf. Acesso em: 14 fev. 2025.

PROAKIS, J. G.; SALEHI, M. **Digital Communications**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

RABAEY, J. M. **Digital Integrated Circuits: A Design Perspective**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microelectronic Circuits**. Oxford University Press, 2020.

SINGH, R.; SAPRA, B. **Communication Systems: Analog & Digital**. 3. ed. New Delhi: McGraw-Hill, 2015.

TAUB, H.; SCHILLING, D. L. **Principles of Communication Systems**. McGraw-Hill, 2013.

TAVARES, Reynaldo C. **Histórias que o Rádio não Contou**. São Paulo: Negócio Editora, 1997.

TOMASI, W. **Sistemas de comunicaciones electrónicas**. Cidade do México, México: Pearson Educación, 2003. Disponível em: <http://fernandoarciniega.com/books/sistemas-de-comunicaciones-electronicas-tomasi-4ta-edicion.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2025.