

DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE TEMPERATURA COM TRANSMISSÃO SEM FIO EM TECNOLOGIA CMOS DE 130 NANÔMETROS PARA IOT

1° Hugo Dias Giló

Departamento de Engenharia e Tecnologia
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil
hugo.gilo@alunos.ufersa.edu.br

2° Francisco de Assis Brito Filho

Departamento de Engenharias - Caraúbas
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Caraúbas, Rio Grande do Norte, Brasil
francisco.brito@ufersa.edu.br

Resumo— Sensores de temperatura estão presentes em diversas aplicações dentro do contexto da Internet das Coisas, tais como monitoramento de pessoas, equipamentos, residências, indústrias, entre outros. Esses dispositivos precisam ter baixo consumo de energia, ser compactos e possuir uma faixa de linearidade adequada para sua aplicação. Portanto, este trabalho propõe um sensor de temperatura sem fio desenvolvido em tecnologia CMOS de 130 nanômetros, projetado para operar na banda ISM de 2,4 GHz. O sensor sem fio foi desenvolvido utilizando exclusivamente ferramentas EDA de código aberto e o Skywater 130 nm openPDK. A linearidade do dispositivo foi avaliada entre -50°C a 200°C , demonstrando uma precisão máxima de $0,001^{\circ}\text{C}$ em uma faixa de $30,5^{\circ}\text{C}$ a $70,9^{\circ}\text{C}$, enquanto consome apenas 1,6 mW e ocupa uma área de $0,028\text{ mm}^2$, incluindo o bloco de RF. Além disso, este trabalho foi comparado com sensores relatados no estado da arte e, embora seu consumo de energia fosse superior à maioria dos outros, sua área e seu erro máximo mostraram-se menores.

Palavras-chave—Comunicação sem fio; Sensor de Temperatura; CMOS; Internet das Coisas.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, observa-se uma crescente inserção de dispositivos eletrônicos no contexto da Internet das Coisas (IoT). Estes dispositivos se comunicam entre si, formando uma rede interligada, e compartilham dados de forma autônoma. De acordo com STATISTA [1], o número de dispositivos conectados à IoT aumenta a cada ano, com estimativas apontando para 75,44 bilhões em 2025 e uma trajetória de crescimento contínuo.

Além da interconexão, os dispositivos no contexto da IoT tendem à miniaturização, visando menor custo e portabilidade. Para tal, a produção em escala de semicondutores é fundamental. Segundo HARRIS [2], em 2019, a taxa de utilização das linhas de produção de semicondutores atingiu cerca de 90%, impulsionada pelo crescimento da demanda por aplicações eletrônicas, desenvolvimento de circuitos mais autônomos, aplicações automatizadas (incluindo a IoT) e conectividade em veículos. Mesmo com o impacto da pandemia, a capacidade industrial média de chips se manteve acima de 90%.

Portanto, a otimização da produção de circuitos integrados é crucial para garantir cadeias produtivas eficientes e impulsionar avanços tecnológicos.

Para permitir a portabilidade e a reutilização dos chips em aplicações IoT, estes circuitos precisam ser compactos e ter baixo consumo de energia. Isso pode exigir topologias de circuito mais simples. Entre a variedade de componentes disponíveis, os sensores de temperatura se destacam, sendo de extrema importância para a composição de sistemas de multimonitoramento, conforme apontado por D. Blaauw [3].

Diante do exposto, este trabalho propõe um sensor de temperatura sem fio integrado que atenda aos requisitos de portabilidade, baixo consumo de energia e compactação para utilização em dispositivos e aplicações IoT. Os circuitos foram analisados e projetados para operar na faixa de frequência ISM (Industrial, Científica e Médica) de 2,4 GHz, frequentemente utilizada em aplicações IoT. A linearidade do sensor foi verificada em uma faixa de temperaturas de -50°C a 200°C .

Vale ressaltar que o projeto foi realizado utilizando-se, em todas as suas etapas, ferramentas de código aberto como ASITIC, XSCHEM, NGSPICE, MAGIC e NETGEN, incluindo as simulações pós-layout. Essa escolha visa contribuir para o movimento de democratização do design de circuitos integrados. Segundo R. T. Edwards [4], o uso de ferramentas de código aberto tem crescido consideravelmente nos últimos anos, possibilitando a criação de fluxos de ferramentas EDA (*Electronic Design Automation*) para o desenvolvimento de todas as etapas de um ASIC (Circuito Integrado de Aplicação Específica). O circuito proposto foi projetado usando openPDK [5] com a tecnologia CMOS Skywater 130 nm.

Os resultados pós-layout do sensor de temperatura foram comparados com o estado da arte em termos de precisão, faixa linear, área e consumo de energia. A precisão alcançada foi de $0,001^{\circ}\text{C}$ em uma faixa de temperatura de $30,5^{\circ}\text{C}$ a $70,9^{\circ}\text{C}$. Além disso, o dispositivo conseguiu gerar sinais na faixa ISM de 2,4 GHz com um consumo de energia de 1,6 mW e ocupando uma área de $0,028\text{ mm}^2$, incluindo o transmissor de RF.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentadas as ferramentas computacionais utilizadas para modelagem e simulação, o dispositivo proposto e o detalhamento de cada bloco seu isoladamente (todas as simulações apresentadas são de pós-layout).

A. Ferramentas e Análises

As ferramentas utilizadas (Fig. 1) abrangeram todas as etapas do fluxo de projeto de circuitos integrados, sendo todas de código aberto. O Xschem (versão 3.1.0) foi utilizado para captura de esquemáticos e geração de arquivos SPICE, que foram posteriormente simulados no Ngspice (versão 37+). O Magic VLSI (versão 8.3.329) foi utilizado para implementação do layout e extração de parasitas, além da verificação física de DRC (*Design Rules Check*).

O Netgen (versão 1.5.234) foi utilizado para verificação de LVS (*Layout Versus Schematic*). O ASITIC (versão X11R6) foi utilizado para modelar indutores quadrados de forma otimizada, visando um maior fator de qualidade. A ferramenta também gera arquivos que podem ser exportados para o layout e modelos equivalentes pi dos indutores para serem utilizados nas simulações.

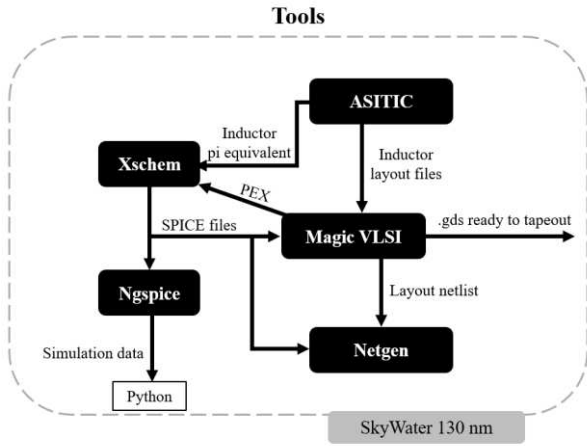


Fig. 1. Ferramentas.

Para analisar o desempenho do dispositivo, foram realizadas simulações de varredura de temperatura para verificar a linearidade do sensor na faixa de -50°C a 200°C . Além disso, foram feitas simulações transientes em temperaturas de 10°C , 35°C e 60°C para observar o comportamento dos sinais. Esses valores foram escolhidos por representarem temperaturas centrais relevantes para aplicações como: sistemas de monitoramento do ambiente [6], agricultura inteligente [7], conforto térmico humano [8], indústrias [9], dentre outras.

Além disso, os dados coletados foram processados por programas em Python para: gerar as FFTs (*Fast Fourier Transform*) utilizando a biblioteca numpy, a fim de verificar a frequência na saída do modulador ASK; e realizar regressões lineares com a biblioteca sklearn.linear_model, com o objetivo de calcular os intervalos de linearidades e os erros da medição de temperatura.

Por fim, o consumo de energia, ocupação de área, faixa linear e precisão foram extraídos para comparação com outros sensores de temperatura CMOS presentes no estado da arte.

B. Circuito proposto

O sensor de temperatura sem fio proposto possui a configuração apresentada na Fig. 2. O sensor PTAT (*Proportional to Absolute Temperature*), cuja topologia é modelada em J.M.C. Dantas [10] e modificada por T. Ohzone [11] para permitir a sua fabricação com um processo CMOS

padrão, sem a necessidade de camadas adicionais, gera um sinal de tensão que passa por um Buffer e chega em uma parte de sinal misto, composto por um modulador $\Sigma - \Delta$ de segunda ordem em tempo contínuo para converter o sinal analógico em pulsos digitais. Esses pulsos digitais são então convertidos em sinais modulados na banda ISM de 2,4 GHz por um modulador ASK (*Amplitude Shift-Keying*), cuja topologia é analisada em Gilo [12]. Todas as informações sobre especificação, simulação e layout do circuito, incluindo os arquivos fonte, podem ser encontradas no repositório GitHub [13].

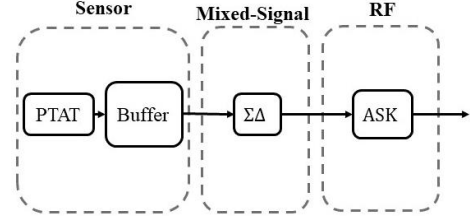


Fig. 2. Diagrama de blocos do sensor de temperatura sem fio proposto.

a) PTAT (*Proportional to Absolute Temperature*)

O PTAT utilizado neste trabalho foi descrito em T. Ohzone [11], o qual propõe uma mudança em relação ao PTAT de J.M.C. Dantas [10]. Essa mudança se refere à utilização de um transistor PMOS como elemento principal do sensor, pois ele já é naturalmente isolado pelo n-well quando feito a partir do processo de fabricação comum (Fig. 3(a)). Se este sensor principal fosse do tipo NMOS, seriam necessárias camadas adicionais, como no processo de Triple n-well (Fig. 3(b)).

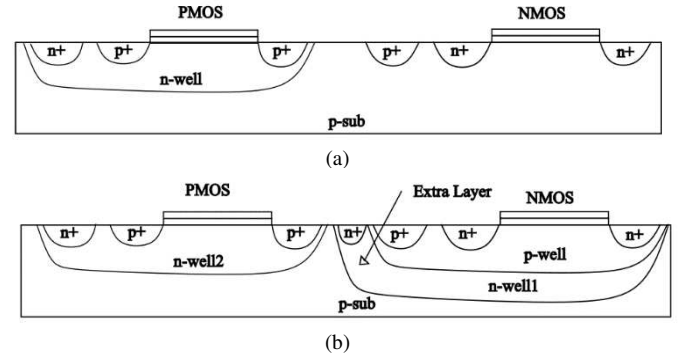


Fig. 3. Processos de fabricação com n-well. (a) Processo de fabricação comum. (b) Processo de fabricação Triple n-well.

O circuito do PTAT está representado pela Fig. 3, onde os transistores P1 e P2 estão operando na inversão fraca, o P3 na região linear, P4 na região de saturação e o transistor P6 está isolado com o substrato conectado em sua fonte. Já os transistores N1, N2 e N3 são NMOS associados em série e paralelo para formar uma rede de espelhos de corrente e aumentar a condutância de saída.

Foram utilizadas as Equações (1) e (2) descritas em J.M.C. Dantas [10] para calcular V_{TS} e TC (Coeficiente de Temperatura), respectivamente.

$$V_{TS} = V_{DD} - 2\eta \left(\frac{kT}{q} \right) \left(\frac{W3}{L3} \right) \left(\frac{L4}{W4} \right) \ln \left(\left(\frac{W2}{L2} \right) \left(\frac{L1}{W1} \right) \right) \quad (1)$$

$$TC = \frac{\partial V_{TS}}{\partial T} \rightarrow$$

$$\rightarrow -2\eta \left(\frac{k}{q} \right) \left(\frac{W3}{L3} \right) \left(\frac{L4}{W4} \right) \ln \left(\left(\frac{W2}{L2} \right) \left(\frac{L1}{W1} \right) \right) \quad (2)$$

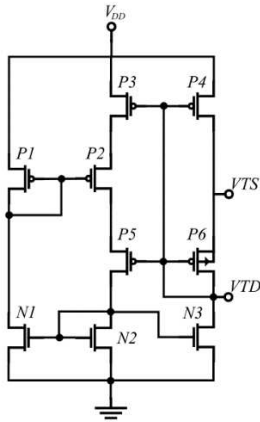


Fig. 4. Esquemático do PTAT.

Onde W é a largura, L é o comprimento do canal do transistor, η é um parâmetro dependente do processo, k é a constante de Boltzmann, q é a carga de um elétron, T é a temperatura em Kelvins e V_{DD} é a tensão de alimentação.

A varredura de temperatura do PTAT está na Fig. 5. Nela, pode-se observar que o V_{ts} e V_{td} permanecem aproximadamente lineares na faixa de 10 °C a 150 °C, com um coeficiente de temperatura (TC) de 1,64 mV/°C. Após cerca de 150 °C, o V_{ts} começa a decair abruptamente e perder suas características lineares.

Para mensurar o erro, criou-se uma reta V_{ts_linear} , a partir de regressão linear, com o objetivo de comparar com o V_{ts} e estimar valores de erros em °C. Os resultados estão na Tabela I.

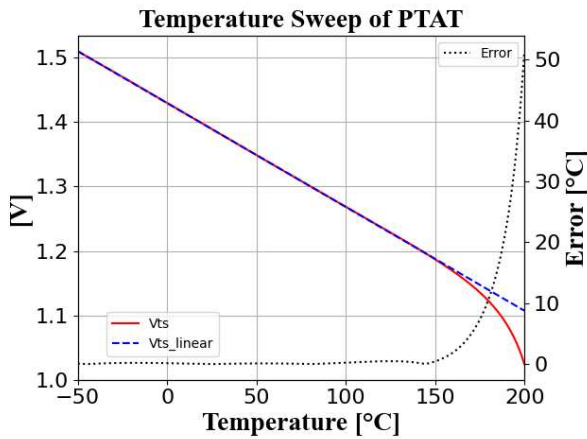


Fig. 5. Varredura de temperatura do PTAT.

TABELA I. ERROS MÁXIMOS ABSOLUTOS DO PTAT.

Erro máximo absoluto (°C)	Intervalo (°C)
0,001	-44,9 a 80,1
0,01	-45,4 a 144,6
0,1	-50,0 a 145,9
1	-50,0 a 154,7

Na Tabela II, se encontra um resumo das especificações do PTAT.

TABELA II. ESPECIFICAÇÕES DO PTAT.

Parâmetro	Valor
TC	-1,62 mV/°C
Saída	1,18 V a 1,51 V
Precisão (-50 °C a 150 °C)	≤ 0,48 °C

b) Buffer

Entre o PTAT e o modulador sigma-delta, foi inserido um buffer de ganho unitário com o ganho de malha aberta de aproximadamente um amplificador de estágio único, que pode ser observado em P. E. Allen [14]. Foi adicionado um capacitor de compensação C_c para garantir mais estabilidade na saída do buffer e evitar oscilações oriundas de sua conexão com o modulador sigma-delta. A sua topologia está na Fig. 6.

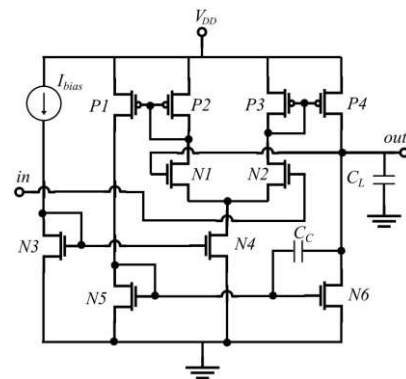


Fig. 6. Esquemático do buffer com a adição do capacitor de compensação C_c .

Abaixo se encontra a simulação DC do buffer (Fig. 7) com uma capacitância de carga C_L considerada como 4 pF. Observa-se que o buffer consegue copiar a entrada in para a saída out em um intervalo de 0,1 V a 1,48 V. Portanto, sem considerar variações na temperatura neste componente, já se pode ver uma limitação na operação do conjunto PTAT+buffer, devido ao fato de que o buffer perde linearidade ao se aproximar de 1,5 V, que equivale a -50 °C no PTAT, segundo a Fig. 5.

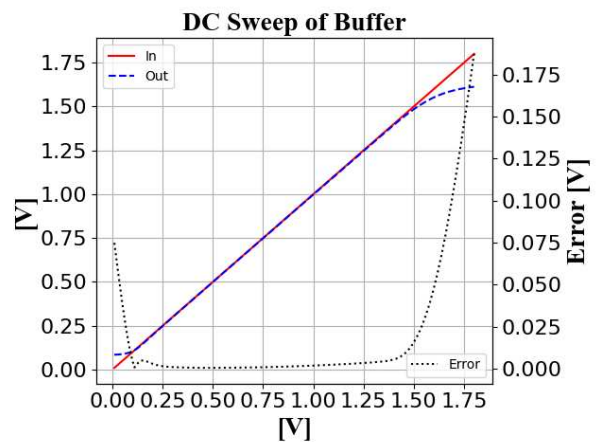


Fig. 7. Simulação DC do buffer.

Na Tabela III, se encontra um resumo das especificações do buffer.

TABELA III. ESPECIFICAÇÕES DO BUFFER.

Parâmetro	Valor
Slew Rate	0,092 V/ μ s
Frequência de corte	14,6 MHz
Faixa de operação linear	0,1 V a 1,45 V

c) Modulador Sigma-Delta

O ADC (Conversor Analógico-Digital) que converte o sinal analógico vindo do PTAT+Buffer para pulsos digitais é um modulador sigma-delta de segunda ordem e tempo contínuo. A sua topologia está mostrada na Fig. 8.

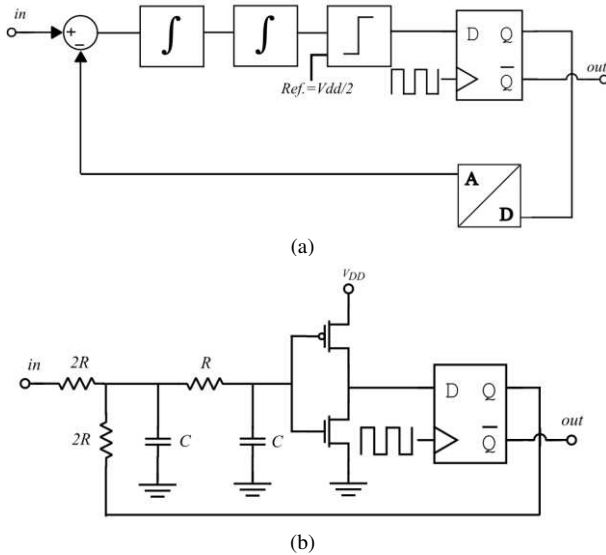


Fig. 8. Esquemático do modulador sigma-delta. (a) Diagrama de blocos. (b) Componentes discretos.

A adição de mais um integrador ao modulador sigma-delta foi necessária para aumentar a resolução da conversão, tendo em vista que o sensor possui uma variação da ordem de mV para variar 1 °C, em contraste com o intervalo total da alimentação que vai de 0 a 1,8 V (SKY130 [5]).

Para verificar o funcionamento do modulador sigma-delta, tem-se uma simulação transiente da saída do modulador quando submetido a uma senoide na entrada (Fig. 9). Observa-se que os pulsos digitais possuem um maior *duty cycle* na medida que a tensão aumenta.

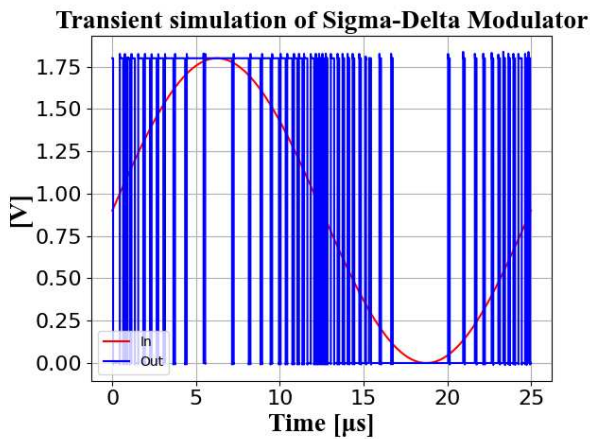


Fig. 9. Simulação transiente do modulador sigma-delta.

Na Tabela IV, se encontra na um resumo das especificações do modulador sigma-delta.

TABELA IV. ESPECIFICAÇÕES DO MODULADOR SIGMA-DELTA.

Parâmetro	Valor
Faixa de entrada	0,0 V a 1,8 V
Faixa da saída	0,0 V a 1,8 V
Frequência de <i>oversampling</i>	10 MHz

d) Modulador ASK (Amplitude Shift-Keying)

Para modular os pulsos digitais oriundos do modulador sigma-delta, foi inserido um modulador ASK (Fig. 10), contendo um NMOS para realizar o chaveamento e um circuito RLC para gerar a portadora de 2,4 GHz.

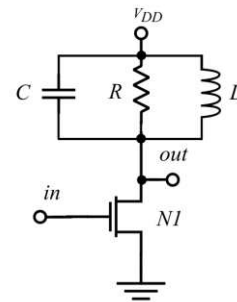


Fig. 10. Esquemático do modulador ASK.

Quando há um chaveamento de tensão na entrada *in*, são gerados pulsos de oscilação subamortecida (Fig. 11) com frequência de ressonância do circuito tanque, como pode ser observado na sua FFT na Fig. 12.

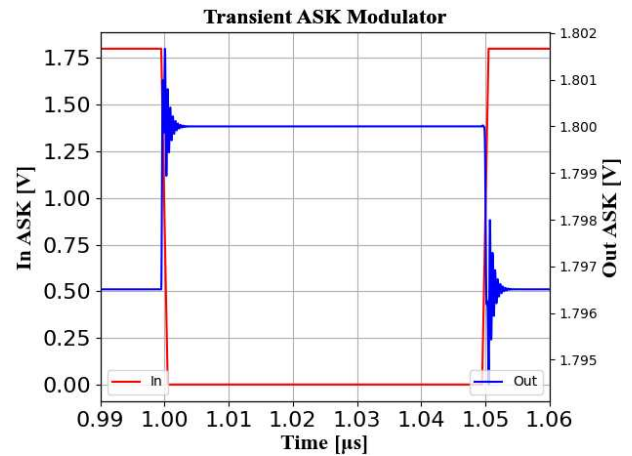


Fig. 11. Simulação transiente do modulador ASK.

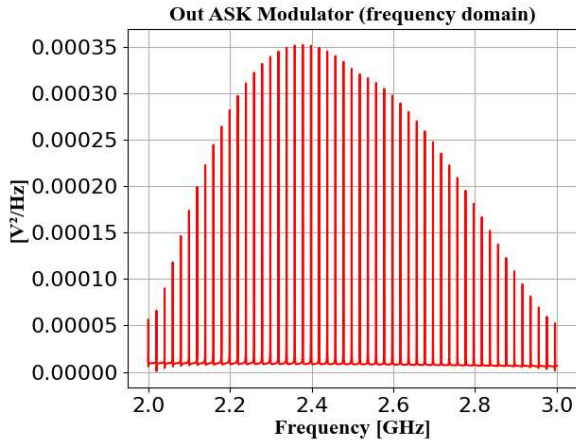


Fig. 12. FFT do modulador ASK.

Na Tabela V, encontra-se na um resumo das especificações do modulador ASK.

TABELA V. ESPECIFICAÇÕES DO MODULADOR ASK.

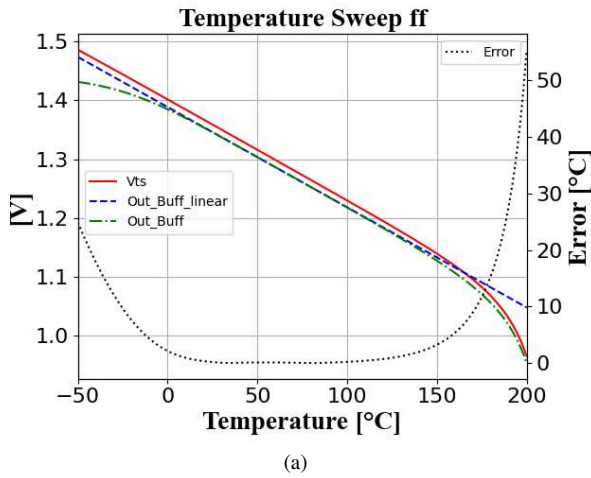
Parâmetro	Valor
Frequência da portadora	2,4 GHz
Impedância de saída	200+j13,54

III. RESULTADOS

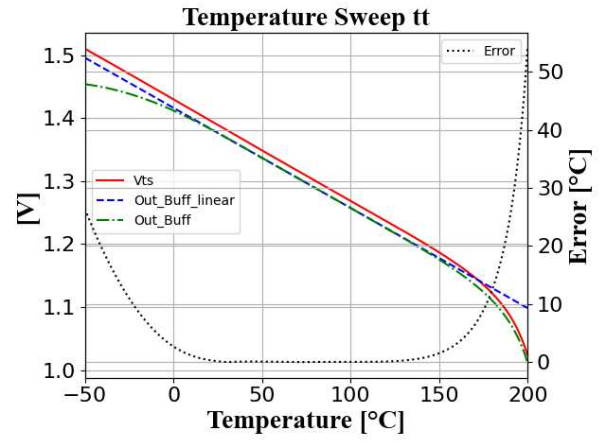
Nesta seção, serão apresentadas primeiro as simulações do dispositivo, observando o funcionamento de todos os seus blocos. Em seguida, serão mostrados o layout e a sua inserção em um *Harness*. Por fim, será realizada a comparação com outros sensores de temperatura da literatura.

A. Simulações

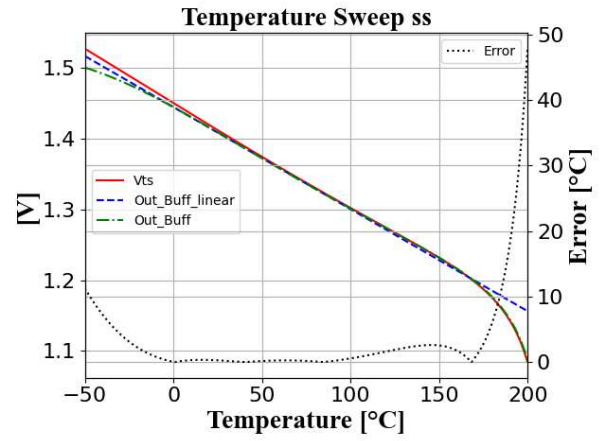
Com o dispositivo completo, foi realizada uma varredura de temperatura para observar o conjunto PTAT+Buffer, com o objetivo de verificar se as variações de temperatura poderiam afetar a cópia da tensão do PTAT para o modulador sigma-delta pelo buffer. Para tal, foram considerados os *corners* ss, tt e ff para analisar se ainda haveria um comportamento linear mesmo que haja variações no processo de fabricação (Fig. 13).



(a)



(b)



(c)

Fig. 13. Varredura de temperatura do dispositivo. (a) Corner ff. (b) Corner tt. (c) Corner ss.

Nota-se que o V_{ts} (tensão de saída do PTAT) possui um offset DC em relação à saída do buffer Out_{buff} para os corners ff (Fig. 13(a)) e tt (Fig. 13(b)). Ainda assim, em todos os três corners, a saída do buffer apresentou um comportamento linear em uma dada região. Isso pode ser verificado com o Erro máximo absoluto, que compara a saída do buffer Out_{Buff} com uma reta linear Out_{Buff_linear} . Esses intervalos estão mostrados na Tabela VI.

TABELA VI. INTERVALOS E ERROS MÁXIMOS DO DISPOSITIVO PARA OS CORNERS SS, TT E FF.

Erro máximo Absoluto (°C)	Intervalo ss (°C)	Intervalo tt (°C)	Intervalo ff (°C)
0,001	0,8 a 84,2	30,5 a 70,9	33,8 a 81,9
0,01	0,7 a 168,2	30,0 a 73,3	33,2 a 83,0
0,1	-1,0 a 168,9	26,3 a 119,7	28,3 a 91,8
1	-11,8 a 171,1	11,5 a 144,6	9,5 a 126,0

É possível observar que as variações dos *corners* geraram regiões de linearidades para os valores de Erros máximos absolutos diferentes no dispositivo. No entanto, para a maior precisão (de 0,001 °C), ainda engloba a região próxima à temperatura do corpo humano (35 °C) por exemplo, o que é um indicativo que aumenta a confiabilidade do componente, mesmo havendo variações na fabricação.

Após a análise da variação de temperatura, foram realizadas simulações transientes nas temperaturas de 10 °C,

35 °C e 60 °C para analisar: a tensão V_{ts} que sai do PTAT, a sua cópia pelo buffer, a modulação do sigma-delta (Fig. 14) e a modulação ASK (Fig. 15). Para o último, também foi adicionada a FFT (Fig. 16) para analisar a banda de frequência em que os sinais eram gerados.

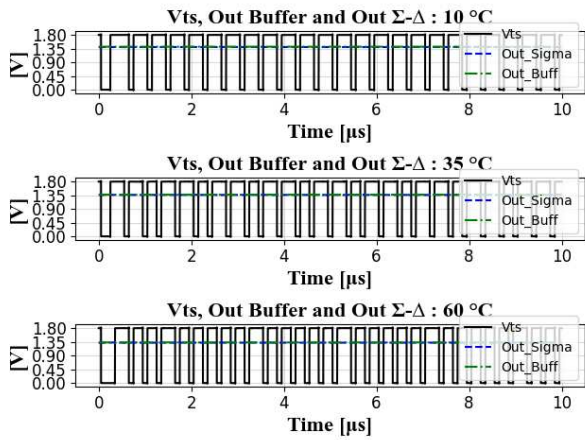


Fig. 14. Simulação transiente do dispositivo para observar V_{ts} , Out Buffer e Out sigma-delta nas temperaturas de 10 °C, 35 °C e 60 °C.

Para diferentes temperaturas, a saída do PTAT (V_{ts}) e, consequentemente, a saída do buffer (Out_Buff) mudaram, decrescendo os seus valores com o aumento da temperatura. Isso condiz com o projetado, pois o PTAT possui um coeficiente de temperatura negativo. Essa mudança ocasiona uma sequência diferente dos pulsos apresentados na saída do modulador sigma-delta (Out_Sigma). Para 10 °C, os pulsos são aproximadamente iguais. Já para 35 °C, há dois pulsos mais largos, seguidos de um mais curto. E, para 60 °C, há um pulso mais largo, seguido de cinco pulsos mais curtos.

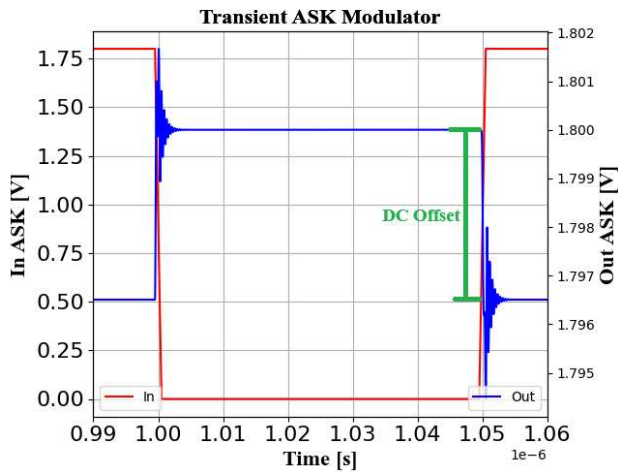


Fig. 15. Simulação transiente do dispositivo com o foco no modulador ASK.

Na Fig. 15, observa-se que, durante o chaveamento no sinal digital em In ASK, ocorre a manifestação de um sinal oscilatório subamortecido e um DC *offset* em relação aos 1,8 V da alimentação de cerca de 3 μ V na saída do dispositivo Out ASK. Este comportamento, juntamente com outros efeitos decorrentes da resistência interna dos indutores, a qual é incorporada em seu modelo pi, foi analisado por Gilo [15]. Por outro lado, a Fig. 16 demonstra a presença de harmônicas desejadas na banda ISM de 2,4 GHz (2,4 GHz - 2,4835 GHz),

com uma amplitude de aproximadamente 350 μ V. Assim sendo, o dispositivo apresentou o desempenho esperado.

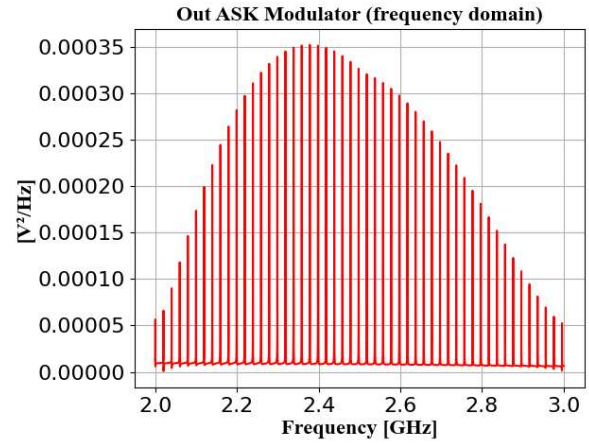


Fig. 16. FFT da saída do dispositivo (saída do modulador ASK).

B. Layout

O layout do dispositivo é apresentado na Fig. 17, onde foram empregadas diversas técnicas de *layout*, como interdigitação e separação de transistores em "fingers", com o propósito de evitar *mismatchings* e garantir o correto funcionamento do dispositivo.

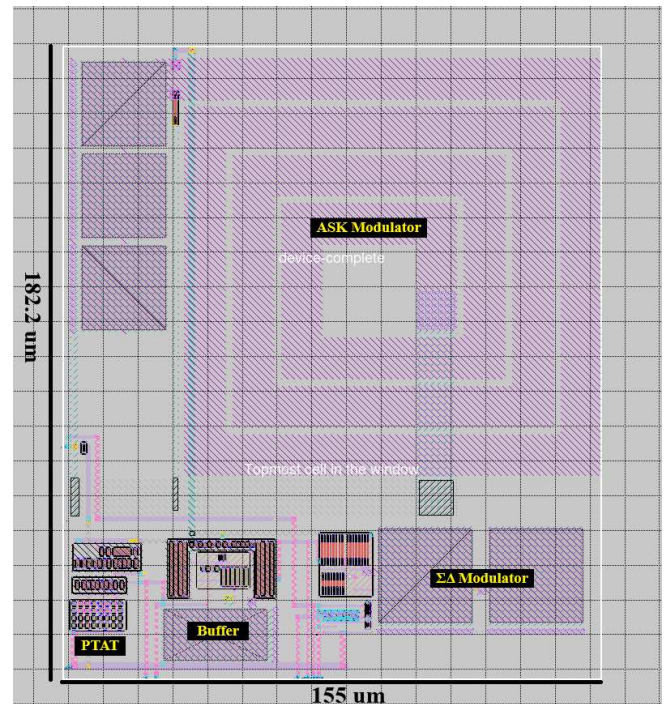


Fig. 17. Layout do dispositivo completo.

O dispositivo foi integrado ao conjunto Caravel fornecido pela Efabless [16] para ser fabricado e testado. Esse conjunto inclui um *System-on-Chip* (SoC) e uma área disponível para o usuário de 10,33 mm². Nesta área, é possível incorporar o layout do dispositivo (Fig. 18), além de contar com suporte para diversos I/Os analógicos e digitais, bem como sistemas de

proteção contra Descarga Eletrostática (ESD), entre outras funcionalidades.

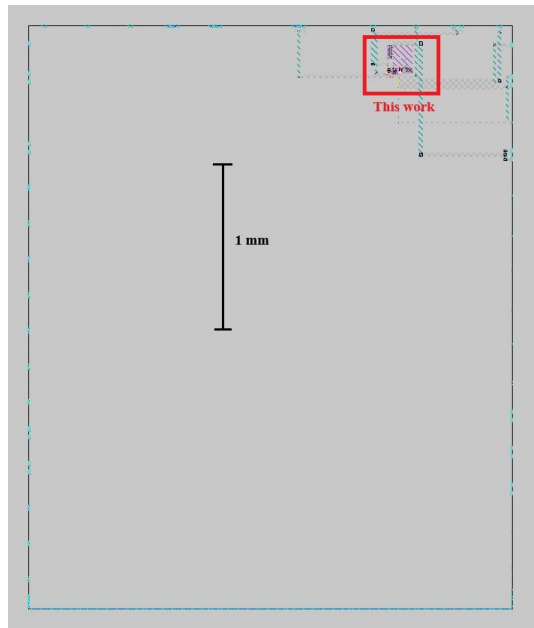


Fig. 18. Caravel Harness com o dispositivo dentro.

Cada pino do dispositivo foi conectado a outro pino do *Harness* que melhor se adequasse ao seu propósito (Tabela VII).

TABELA VII. RELAÇÃO DOS PINOS DO DISPOSITIVO E DO CARAVEL HARNESS.

Função	Tipo	Harness
vd	Alimentação analog.	vdda1
vpwr	Alimentação digital	vccd1
gnd	Terra	vssa1
clk	Clock	io_in[13]
out_sigma	Saída analógica	user_analog[0]
vts	Saída analógica	user_analog[4]
ib	Fonte de corrente	user_analog[2]
out_buff	Saída analógica	user_analog[1]
out	Saída analógica	user_analog[3]

C. Comparação com os outros sensores de temperatura

A Tabela VIII mostra alguns sensores de temperatura presentes no estado da arte.

É importante destacar que este trabalho inclui um bloco adicional ausente nos demais trabalhos encontrados: o bloco de RF (modulador ASK), que representa 75% da área total e consome 86% da energia (Fig. 19). Sem ele, ou seja, contendo apenas as partes analógicas e de modulação analógico-digital, o dispositivo apresentou uma área menor do que todos os outros sensores e um consumo de energia menor do que R. G. B. Sangalang [17] e H. Liu et al. [20].

Mesmo incluindo a parte de RF, este trabalho apresentou uma área menor que R. G. B. Sangalang [17], Z. Tang [19], H. Liu et al. [20] e E. Moisello [22], além de ter um consumo menor que B. Sangalang [17].

TABELA VIII. COMPARAÇÃO COM OS SENSORES ENCONTRADOS NO ESTADO DA ARTE.

Sensor	Intervalo (°C)	Erro máx. (°C)	Área (mm²)	Potência (μW)	Nó tecnológico (nm)
Este	12,0 a 144,0 ⁽²⁾	+0,93 ⁽²⁾	0,007 (0,028) ₍₁₎	209,9 (1600) ⁽¹⁾	130
[17]	-40 a 100	0,5	0,682	15400	180
[18]	0 a 95	-0,35/+0,58	0,0093 ₂	4,043	65
[19]	-55 a 125	±0,15	0,25	0,81	180
[20]	-40 a 175	±1,0	0,42	300	180
[21]	-20 a 100	-0,072/+0,082	0,0107/0,0282	0,036	180
[22]	-40 a 90	+0,75/-0,92	0,63	25,4	130

⁽¹⁾ Considerando o bloco RF (modulador ASK).

⁽²⁾ Ver a Tabela VI em tt para encontrar os outros intervalos de erros máximos.

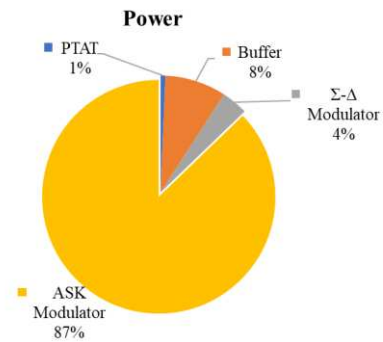


Fig. 19. Uso de potência no dispositivo (27 °C).

IV. CONCLUSÕES

O sensor de temperatura com comunicação sem fio proposto foi validado por meio de simulações pós-layout utilizando a tecnologia CMOS de 130 nanômetros. Os resultados demonstraram o adequado funcionamento do dispositivo, gerando um sinal de tensão que varia linearmente com a temperatura e é modulado para sinais de alta frequência na faixa ISM 2,4 GHz, permitindo assim a medição de temperatura e transmissão sem fio.

O circuito completo consome apenas 1,6 mW e possui uma área de 0,028 mm², sendo menor que a maioria dos outros sensores comparados. Seu erro máximo foi de 0,001 °C para um intervalo de temperatura entre 30,5 °C e 70,9 °C, o que é inferior a todos os circuitos analisados. Esses resultados destacam sua viabilidade e relevância no contexto da Internet das Coisas. Além disso, todas as etapas foram realizadas utilizando ferramentas de código aberto, contribuindo para o movimento emergente de democratização do projeto de circuitos integrados.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se considerar a adição de uma rede de casamento de impedância e um amplificador de RF à saída do modulador ASK, visando melhorar o casamento do dispositivo com uma antena. Além disso, poderia ser incluído uma referência *bandgap* para gerar sinais internos e servir como fonte de corrente para alimentar o buffer.

Ademais, os circuitos podem ser otimizados em termos de consumo de energia e área, uma vez que seus blocos são modulares e estão disponíveis no repositório de acesso livre para download e edição. Essas melhorias podem contribuir significativamente para aprimorar o desempenho e a eficiência do dispositivo em aplicações futuras.

V. AGRADECIMENTOS

Agradeço: ao meu orientador por ter me feito despertar interesse pela área da microeletrônica e pelos ensinamentos repassados; aos demais professores, que sempre se mostraram solícitos; à UFERSA pela oportunidade de me desenvolver profissionalmente e humanamente; e aos meus amigos e familiares pelo apoio ao longo desses anos.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] STATISTA. IoT: number of connected devices worldwide 2012-2025 | Statista. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>>.
- [2] HARRIS, MARK. These 5 Charts Help Demystify the Global Chip Shortage. IEEE Spectrum. Available at: <https://spectrum.ieee.org/global-chip-shortage-charts>. Accessed on: 1st May 2022.
- [3] D. Blaauw et al., "IoT design space challenges: Circuits and systems," 2014 Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology): Digest of Technical Papers, Honolulu, HI, USA, 2014, pp. 1-2, doi: 10.1109/VLSIT.2014.6894411.
- [4] R. T. Edwards, M. Shalan and M. Kassem, "Real Silicon Using Open-Source EDA," in IEEE Design Test, vol. 38, no. 2, pp. 38-44, April 2021, doi: 10.1109/MDAT.2021.3050000.
- [5] SKY130. SkyWater PDK. Available at: <https://skywater-pdk.readthedocs.io/en/main/>.
- [6] S. Zafar, G. Miraj, R. Baloch, D. Murtaza, and K. Arshad. "An IoT Based Real-Time Environmental Monitoring System Using Arduino and Cloud Service", Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 8, No. 4, 2018, pp. 3238-3242.
- [7] N. Nayyar and V. Puri, "Smart farming: IoT based smart sensors agriculture stick for live temperature and moisture monitoring using Arduino, cloud computing & solar technology", In: Proc. of The International Conference on Communication and Computing Systems (ICCCS-2016), 2016. Available Online: DOI:10.1201/9781315364094-121
- [8] Izhar et al., "Single-Chip Integration of CMOS Compatible Mems Temperature/Humidity and Highly Sensitive Flow Sensors for Human Thermal Comfort Sensing Application," 2021 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), Orlando, FL, USA, 2021, pp. 1219-1222, doi: 10.1109/Transducers50396.2021.9495565.
- [9] S. I. Nahid and M. M. Khan, "Toxic Gas Sensor and Temperature Monitoring in Industries using Internet of Things (IoT)," 2021 24th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT), Dhaka, Bangladesh, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCIT54785.2021.9689802.
- [10] J. M. C. Dantas, H. J. B. Costa, J. P. M. Dantas, F. A. B. Filho, F. R. Sousa and R. C. S. Freire, "Low-Power High-Responsivity CMOS Temperature Sensor," 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Victoria, BC, Canada, 2008, pp. 1234-1238, doi: 10.1109/IMTC.2008.4547230.
- [11] T. Ohzone, T. Sadamoto, T. Morishita, K. Komoku and H. Iwata, "A CMOS Temperature Sensor Circuit," in IEICETrans. Electron, vol. E90C, no. 4, pp. 895-902, Apr. 2007.
- [12] Gilo, H. D. and F. A. Brito-Filho, "Influência da resistência interna de indutores quadrados em moduladores ASK em CMOS de 130 nanômetros," in Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO), 2022.
- [13] Gilo, H. D. temp-sensor. Available at: <https://github.com/hugodias/temp-sensor>. Accessed on: 26th January 2023.
- [14] P. E. Allen, D. R. Holberg. CMOS Analog Circuit Design. 2nd Ed., Oxford, New York, 2002.
- [15] Gilo, HD e FA Brito-Filho, "Influência da resistência interna de indutores quadrados em moduladores ASK em CMOS de 130 nanômetros", em Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO), 2022.
- [16] Efabless Caravel "harness" SoC — Documentação do Caravel Harness. Disponível em: <https://caravel-harness.readthedocs.io/en/latest/>.
- [17] R. G. B. Sangalang, S. -H. Luo and C. -C. Wang, "A High Resolution And Wide Range Temperature Detector Using 180-nm CMOS Process," 2023 International Conference on IC Design and Technology (ICICDT), Tokyo, Japan, 2023, pp. 64-67, doi: 10.1109/ICICDT59917.2023.10332257.
- [18] Y. Shui and A. Wang, "A 14.17pJ/K² FoM CMOS Temperature Sensor With 173 μm² Sensing Core for Remote Sensing in 65-nm CMOS," in IEEE Sensors Journal, vol. 23, no. 22, pp. 27059-27067, 15 Nov. 15, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3321741.
- [19] Z. Tang, S. Pan, M. Grubor and K. A. A. Makinwa, "A Sub-1 V Capacitively Biased BJT-Based Temperature Sensor With an Inaccuracy of ±0.15 °C (3σ) From—55 °C to 125 °C," in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 58, no. 12, pp. 3433-3441, Dec. 2023, doi: 10.1109/JSSC.2023.3308554.
- [20] H. Liu et al., "An Ultra-High Linear Digitization Temperature Sensor Based on SAR ADC With Common-Mode Temperature Drift Suppression," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, doi: 10.1109/TCSII.2023.3316013.
- [21] W. Wang et al., "A 36nW CMOS Temperature Sensor with <0.1K Inaccuracy and Uniform Resolution," 2023 IEEE Symposium on VLSI Technology and Circuits (VLSI Technology and Circuits), Kyoto, Japan, 2023, pp. 1-2, doi: 10.23919/VLSITechnologyandCirc57934.2023.10185286.
- [22] E. Moisello, C. M. Ippolito, G. Bruno, P. Malcovati and E. Bonizzoni, "A MOS-Based Temperature Sensor With Inherent Inaccuracy Reduction Enabled by Time-Domain Operation," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 72, pp. 1-10, 2023, Art no. 2004110, doi: 10.1109/TIM.2023.3276016.