

Conversor Boost totalmente integrado em Tecnologia CMOS de 130nm

Sérgio Martins Maciel Moreira
Academia Militar
Lisboa, Portugal
moreira.smm@exercito.pt

Pedro Mendonça dos Santos
IUM/AM/CINAMIL
Instituto de Telecomunicações
Lisboa, Portugal
pms@lx.it.pt

Maria Beatriz Vieira Borges
Instituto Superior Técnico
Instituto de Telecomunicações
Lisboa, Portugal
bborges@lx.it.pt

Abstract—Este trabalho propõe a concretização de um conversor *Boost* em modo de condução descontínua (MCD), comutado a 1,2 GHz. A proposta é totalmente integrada num processo CMOS de 130nm, sem elementos reactivos externos. O presente trabalho mostra o desempenho do circuito alimentado com uma célula fotovoltaica orgânica (OPV), para atingir uma tensão de saída nominal de 1,2V, para um valor de entrada de 500mV.

Index Terms—Muito-baixa tensão, Gestão de Potência, Conversor Boost, CMOS, *Energy Harvesting*.

I. INTRODUÇÃO

Os circuitos eletrónicos auto-sustentáveis em termos de energia têm cada vez mais ênfase devido ao crescimento das aplicações para a Internet das coisas (*Internet of Things*, IoT). A substituição de baterias neste tipo de sistemas é dispendioso [1] e coloca problemas ambientais a médio prazo. A disponibilidade de células solares com eficiência razoável em ambientes *indoor*, os geradores termoelétricos, e outras fontes de recolha de energia (*energy harvesting*), são soluções já testadas em sensores de redes ou aplicações biomédicas portáteis [2].

As previsões indicam que o número de sistemas deste tipo irá duplicar até 2023, o que resultará numa necessidade de fontes de energia para sensores na ordem dos milhares de milhão. Os sistemas de recolha de energia - *energy harvesters* - são usados em inúmeras aplicações e em diferentes ambientes, com vantagens na redução e manutenção dos custos de alienação associados às baterias. Contudo o uso de fontes de *energy harvesting* introduz circuitos adicionais e sistemas de gestão de energia dedicados [3].

O avanço da tecnologia de fabrico de circuitos integrados, nomeadamente a tecnologia CMOS, tem contribuído para a constante redução da dimensão dos sistemas eletrónicos, bem como da potência consumida por estes para funcionalidades idênticas [4]. O recurso a circuitos elevadores de tensão contínua ou conversores DC-DC, do tipo indutivo ou capacitivo, surgem como uma solução para converter os baixos valores de tensão das fontes de *energy harvesting* (tipicamente na ordem das centenas de mV), para valores de alimentação padrão (1,2V, 2,4V, etc.) [5].

As novas soluções para aplicações em *wearables*, através de células solares flexíveis em conjugação com baterias ultra finas, está na base da motivação para o avanço tecnológico nesta área [6].

Este trabalho procura contribuir com uma solução para a elevação da reduzida tensão imposta pela OPV, através de uma proposta totalmente integrada em tecnologia CMOS, com área de implementação diminuta, de modo a que possa ser colocada em qualquer zona, nos limites exteriores da área ativa da OPV.

II. CONVERSOR *Boost* EM TECNOLOGIA CMOS

A implementação do conversor *Boost* de comutação abrupta permite elevar a tensão da OPV. Para se gerar o sinal de comutação dos dispositivos do conversor recorreu-se ao dimensionamento de um oscilador LC de par cruzado [7].

A. Célula Fotovoltaica Orgânica

A caracterização da célula solar a usar como *energy harvester* é necessária para a construção e quantificação do modelo a incluir em simulações. Esta caracterização foi concretizada através de um multímetro/fonte Keithley K2400, um simulador solar Oriel Sol A, 69920, Newport com AM1.5G, de modo a simular a irradiação solar sobre a OPV, uma célula fotovoltaica de calibração Newport 91150V, um osciloscópio Tektronix TDS3054B de quatro canais, um multímetro Voltcraft 7905C e uma fonte de alimentação Instek GPC-9030DQ.

A célula orgânica caracterizada está representada na fotografia da figura 1. É uma célula flexível, com uma tensão de circuito aberto (V_{oc}) de cerca de 550mV e uma corrente de curto circuito (I_{sc}) de 61mA.

B. Conversor *Boost* em MCD

Para dimensionar o conversor *Boost* de comutação abrupta (figura 2) em MCD será necessário dimensionar os elementos do circuito, nomeadamente, o elemento armazenador de energia, uma bobina integrada, L, as dimensões e parâmetros de funcionamento do transistor NMOS Q_1 , e o condensador de filtragem C.

Para a escolha dos componentes do PDK (*Process Design Kit*) do processo CMOS foram tidos em conta vários parâmetros. Para a escolha do transistor, dado que o circuito a ser estudado é para muito baixa tensão, é necessário recorrer a um transistor com uma tensão de limiar (V_{th}) muito baixa, idealmente nula. Deste modo, foi escolhido o transistor NMOS "nativo", com tensão de limiar típica de aproximadamente 90mV.

Relativamente ao condensador de filtragem C, o seu dimensionamento será determinado por forma a obter um valor típico de

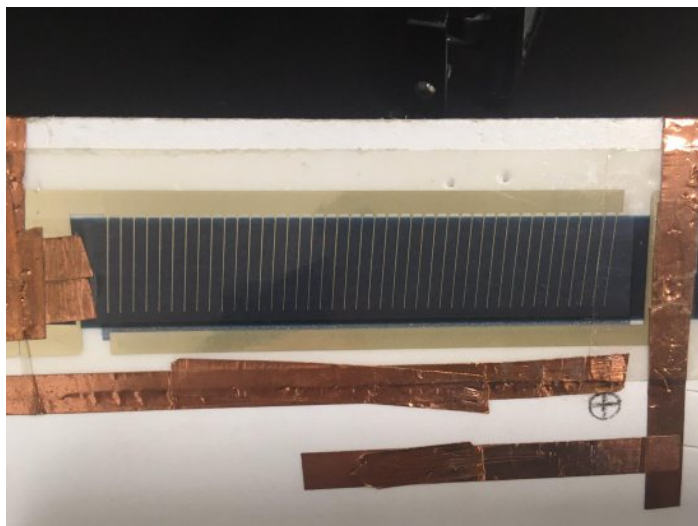


Figura 1. Célula orgânica (OPV) caracterizada.

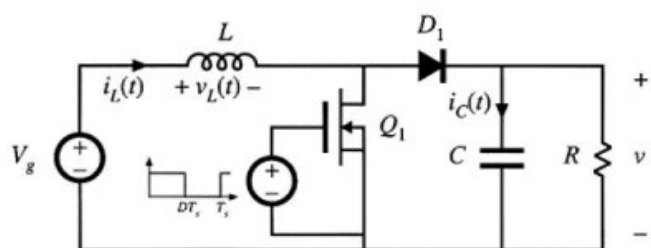


Figura 2. Conversor *Boost* de comutação abrupta [8]

ripple de 1% da tensão de saída. Quanto à sua implementação, será utilizado um condensador MIM disponível no processo CMOS. Uma vez que o valor da capacidade esperada para este condensador será elevada, a adopção da tecnologia MIM em detrimento da MOM é mais conveniente, uma vez que a primeira possui mais capacidade por unidade de área, conduzindo assim a uma redução da área de implantação em Silício.

Os valores finais dos elementos do conversor *Boost* estão resumidos na Tabela I, cumprindo os requisitos de área de implantação mínima e maximização da relação de conversão.

C. Oscilador LC

Os osciladores são um dos principais blocos em sistemas e circuitos de RF. Os osciladores mais usados para comutação abrupta de conversores totalmente integrados são os osciladores em anel e os osciladores LC com par cruzado. Os osciladores em anel são preferidos em muitas aplicações devido à sua pequena ocupação de área. No entanto, apresentam dispersão de frequência elevada para o tipo de aplicação em estudo e a frequência de oscilação é sensível à variação da alimentação. Por

Tabela I
VALORES DOS ELEMENTOS DO CONVERSOR *Boost*

Elemento	Valor
L	10nH
Q1 (W/L)	75μm / 120nm
D1 (W/L)	600nm / 2μm
Q2 (W/L)	300nm / 2μm
C	2.45pF

outro lado, os osciladores LC com par cruzado exibem melhor desempenho de ruído de fase em comparação com os osciladores em anel, apesar de ocuparem considerável área de Silício. O par cruzado pode ser construído usando apenas dispositivos NMOS, para além do circuito ressonante LC.

Tendo em conta as especificações de comutação do conversor de muito-alta frequência (1.2GHz) foi escolhido e adaptado a este trabalho o oscilador estudado em [7]. Este circuito tem como saída uma onda sinusoidal com alguma distorção harmónica, e valor de frequência na gama das unidades de GHz.

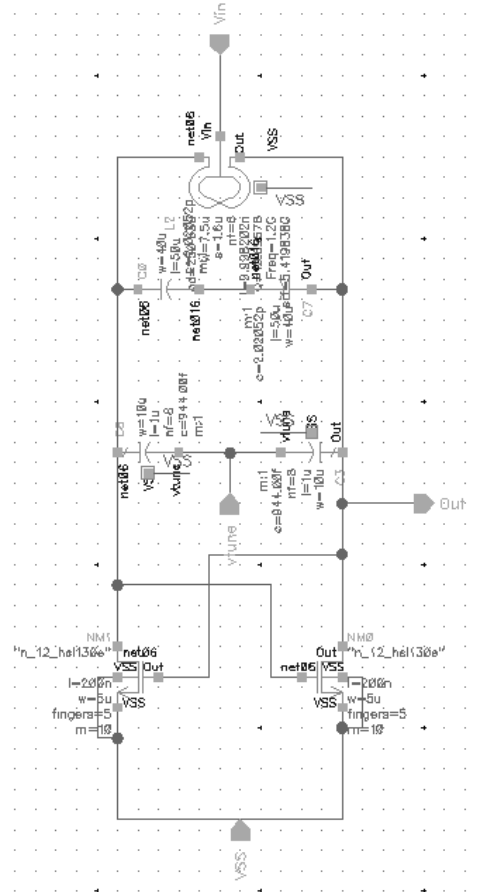


Figura 3. Oscilador LC com par cruzado, usado para comutar a *gate* do NMOS.

Este oscilador foi dimensionado para operar a uma frequência nominal de 1,2GHz. Através da tensão V_{tune} o oscilador pode variar a frequência de oscilação entre 1,25GHz e 1,31GHz (para um V_{tune} máximo de 0.6V).

III. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta secção são abordados os resultados obtidos após o dimensionamento do conversor elevador e do oscilador.

O funcionamento deste conversor a uma frequência de comutação na ordem dos GHz introduz várias dificuldades. Com efeito, a limitação imposta naturalmente ao valor máximo de indutância possibilitada em circuito integrado (20nH), implica a comutação do NMOS a uma frequência da ordem das unidades de GHz. A esta frequência, as correntes de fuga dos semicondutores e os acoplamentos capacitivos têm uma influência significativa no funcionamento do circuito. Através da figura

4 é possível perceber que o conversor *Boost* está a funcionar em modo lacunar, ou Modo de Condução Descontínua, MCD (sinal laranja). De realçar que devido às capacidades parasitas a corrente na bobina nunca se anula, ao contrário do estipulado pelo funcionamento típico deste conversor. Este facto tem consequências ao nível das perdas na saída do circuito, ou seja, reduzindo a eficiência de conversão.

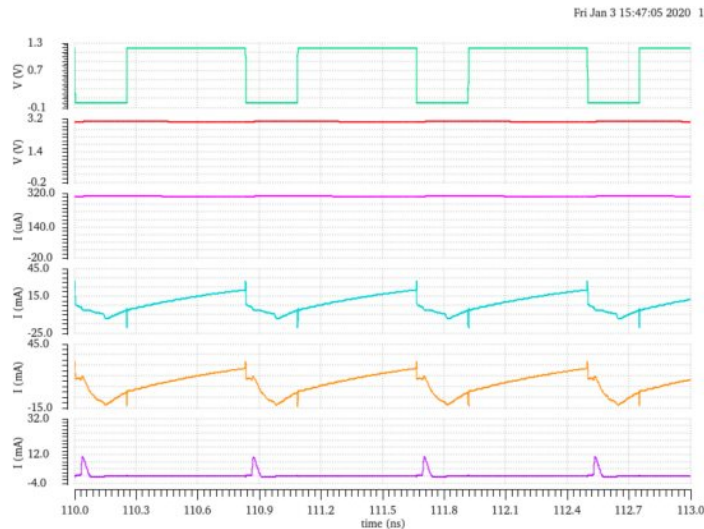


Figura 4. Resultados de simulação obtidos do conversor. (Verde - Tensão de Oscilação) (Vermelho - Saída do Conversor) (Rosa - Corrente de saída) (Azul - Corrente no Dreno) (Laranja - Corrente na Bobina) (Roxo - Corrente no Díodo)

O oscilador permite aplicar um sinal de controlo através da entrada V_{tune} , de modo a modificar a frequência do sinal de comutação do NMOS. Desta forma, poderá ser possível controlar a frequência aplicada à porta do NMOS, de modo a variar a tensão de saída do conversor *boost*. A gama de valores de frequência obtidas pode ser visto na figura 5.

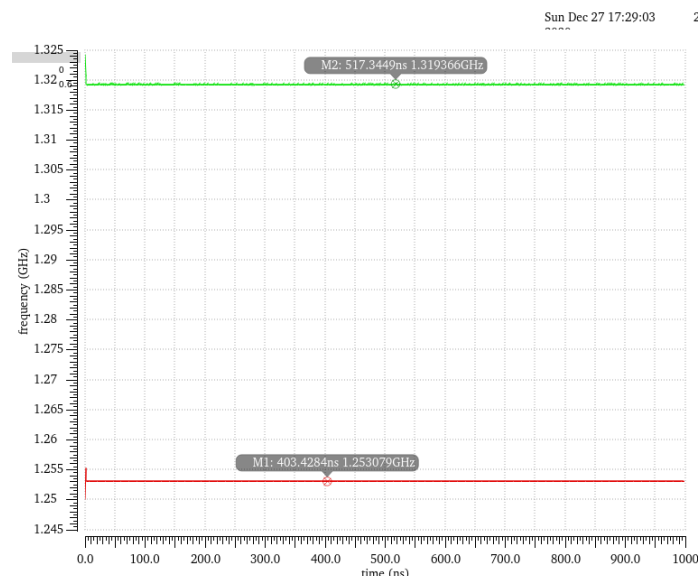


Figura 5. Frequência máxima (verde) e mínima (vermelha) obtida na saída do oscilador.

Por fim, após análise de *corners* do processo CMOS no conversor (figura 6) pode-se concluir que os valores da tensão

de saída variam entre 1,1V e 1,4V, onde foram consideradas dispersões em temperatura e dispersão no funcionamento dos semicondutores.

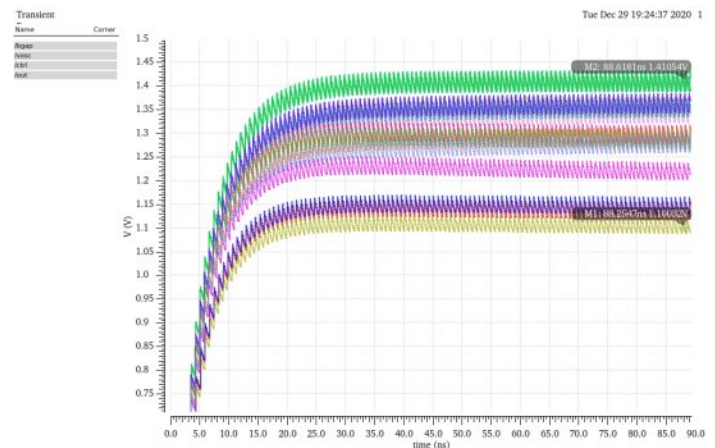


Figura 6. Análise de *corners* da tensão de saída do conversor proposto.

IV. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta secção, é feita a comparação da proposta com vários trabalhos já publicados sobre recolha de energia que usam o conversor *Boost* em tecnologia CMOS.

No circuito estudado em [9] é demonstrado o desenvolvimento e implementação de uma PMU (Unidade de Gestão de Potência) obtida a partir de um conversor *boost* indutivo comutado a 100kHz e com elementos reativos externos.

O circuito presente em [10] é baseado numa topologia de bombeamento de carga para inicializar a condução do circuito, vulgarmente conhecida como *charge pump*, sendo a frequência de comutação variável. Este circuito necessita de 300mV para iniciar a funcionalidade do sistema, podendo ser alimentado após arranque por 30 mV.

Outra solução de conversão de energia a partir de energy harvesting é apresentada em [11]. Neste documento é apresentado um conversor *Boost* implementado em dois estados, ligados em cascata, e projectados num processo CMOS de 0,18 μ m.

O circuito presente em [12] usa também um conversor *Boost* indutivo. Porém recorre a um pequeno transformador 1:1 para minimizar as capacidades parasitas, evitando o efeito de multiplicação da impedância de transformação causada por transformadores de elevada razão de transformação.

Em [13] é desenvolvido um conversor *Boost* com uma bobina totalmente integrada em tecnologia CMOS de 0,18 μ m, obtendo-se uma tensão de saída de 1,1 V.

Em [14] encontra-se explicado o desenvolvimento de uma solução para energy harvesting utilizando como dispositivos de obtenção de energia células de a-Si:H. O sistema apresentado tem por base um conversor *Boost*, sendo o armazenamento da energia auxiliado por um super-condensador.

Relativamente ao circuito presente em [15] é usado um *Boost* indutivo com um oscilador, um *charge pump* como circuito secundário de inicialização com uma tensão de 210 mV e uma tensão de inicialização de 7 mV. À saída do circuito é proposto um LDO (*Low Dropout*) e um *bandgap* em cascata.

Por fim no circuito em [16] é usado um conversor *Boost* indutivo com uma tensão de arranque de 1.2V externos. Este circuito tem uma bobina SMD externa de $47\mu\text{H}$.

Na Tabela II estão resumidas as principais características dos conversores analisados anteriormente, em comparação com esta proposta. O *layout* do circuito proposto está representado na figura 7, resultando numa área de ocupação inferior a $0.34\mu\text{m}^2$, incluindo PADS para teste CoB (*Circuit-on-Board*). Na figura são perfeitamente identificáveis as bobinas integradas do conversor (à direita) e do oscilador. Para esta área total tão reduzida contribuiu decisivamente a solução de comutação a uma frequência muito elevada, quando comparada com os trabalhos em análise.

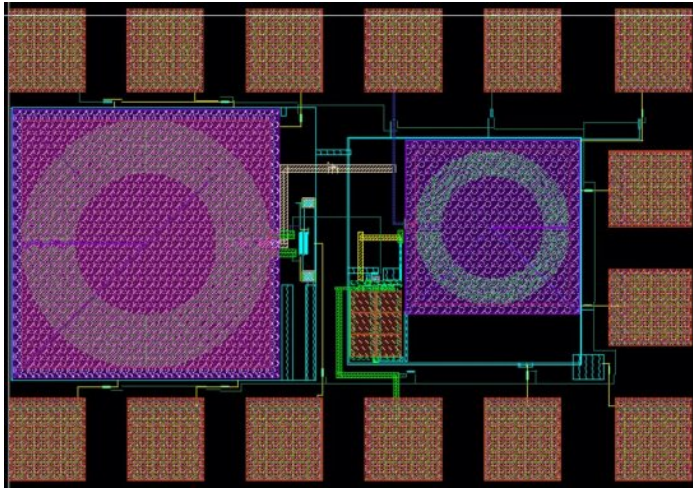


Figura 7. *Layout* final do circuito proposto.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho propõe um conversor *Boost* totalmente integrado num processo CMOS de 130nm, apenas alimentado por uma OPV. O sistema inclui um conversor *Boost* a funcionar em modo lacunar (MCD), comutado a 1,2GHz, com recurso a um oscilador LC de par cruzado. O circuito é usado para aumentar a tensão de saída de uma OPV (na ordem das centenas de mV) para uma tensão padronizada de 1.2V. A proposta mostra que o objectivo é cumprido com uma implementação em Silício inferior a $0,34(\mu\text{m})^2$, o que torna este sistema numa solução comparável ao estado-da-arte, com vantagens significativas em termos de miniaturização.

VI. AGRADECIMENTOS

Este trabalho é financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais e quando aplicável cofinanciado por fundos comunitários no âmbito do projeto UIDB/50008/2020.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. K. Teh e P. K. Mok, "Design consideration of recent advanced low-voltage CMOS boost converter for energy harvesting", *2015 European Conference on Circuit Theory and Design, ECCTD 2015*, n.º 21 mV, pp. 1–4, 2015.
- [2] M. B. Machado, F. Nornberg, M. Sawan, C. Galup-Montoro e M. C. Schneider, "Analysis and design of the Dickson charge pump for sub-50 mV energy harvesting", *Microelectronics Journal*, vol. 90, pp. 253–259, 2019.
- [3] D. Newell e M. Duffy, *Review of Power Conversion and Energy Management for Low-Power, Low-Voltage Energy Harvesting Powered Wireless Sensors*, out. de 2019.
- [4] M. Gul, Y. Kotak e T. Muneer, *Review on recent trend of solar photovoltaic technology*, 4. 2016, vol. 34, pp. 485–526.
- [5] P. Poure, S. Weber, B. Vidales, M. Madrigal e D. Torres, "High step-up DC-DC converter for renewable energy harvesting applications", *EEEIC 2016 - International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2016.
- [6] M. Shim, J. Jeong, J. Maeng, I. Park e C. Kim, "Fully Integrated Low-Power Energy Harvesting System with Simplified Ripple Correlation Control for System-on-a-Chip Applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, n.º 5, pp. 4353–4361, mai. de 2019.
- [7] G. Szczepkowski e R. Farrell, "VCO Design Using Open Loop Analysis", pp. 0–5, 2012.
- [8] J. Anderson, *Fundamentals of Power Electronics*. 2013, vol. 5, pp. 447–469. URL: <https://www.crcpress.com/Fundamentals-of-Picoscience/Sattler/p/book/9781466505094#googlePreviewContainer>.
- [9] Y. Qiu, C. Van Liempd, B. O. Het Veld, P. G. Blanken e C. Van Hoof, "5μW-to-10mW input power range inductive boost converter for indoor photovoltaic energy harvesting with integrated maximum power point tracking algorithm", *Digest of Technical Papers - IEEE International Solid-State Circuits Conference*, n.º June 2007, pp. 118–119, 2011.
- [10] Q. Liu, X. Wu, M. Zhao, L. Wang e X. Shen, "30-300mV input, ultra-low power, self-startup DC-DC boost converter for energy harvesting system", *IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems, Proceedings, APCCAS*, n.º 60906012, pp. 432–435, 2012.
- [11] A. Richelli, S. Comensoli e Z. M. Kovács-Vajna, "A DC/DC boosting technique and power management for ultralow-voltage energy harvesting applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, n.º 6, pp. 2701–2708, 2012.
- [12] Y. K. Teh e P. K. Mok, "Design of transformer-based boost converter for high internal resistance energy harvesting sources with 21 mV self-startup voltage and 74% power efficiency", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 49, n.º 11, pp. 2694–2704, 2014.
- [13] H. Hernández e W. Van Noije, "Fully integrated boost converter for thermoelectric energy harvesting in 180 nm CMOS", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 82, n.º 1, pp. 17–23, 2014.
- [14] C. Carvalho, G. Lavareda, A. Amaral, C. N. De Carvalho e N. Paulino, "A CMOS micro power switched-capacitor DC-DC step-up converter for indoor light energy harvesting applications", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 78, n.º 2, pp. 333–351, 2014.
- [15] Z. Luo, L. Zeng, B. Lau, Y. Lian e C.-H. Heng, "A Sub-10 mV Power Converter With Fully Integrated Self-Start, MPPT, and ZCS Control for Thermoelectric Energy Harvesting", *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2017.
- [16] D. Batista, L. Oliveira e P. M. Dos Santos, "Characterization and optimization of an inductive DC-DC converter for ultra-low power energy harvesting", *Proceedings - 2019 International Young Engineers Forum, YEF-ECE 2019*, pp. 77–82, 2019.

Tabela II
COMPARAÇÃO DO ESTADO DA ARTE

Referência	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	<i>Este Trabalho</i>
Technology	0.25 μm CMOS	0.35 μm CMOS	0.18 μm CMOS	0.13 μm CMOS	0.18 μm CMOS	0.13 μm CMOS	0.065 μm CMOS	0.13 μm CMOS	0.13 μm CMOS
Topology	<i>Boost</i> Indutivo	<i>Boost</i> Indutivo	<i>Boost</i> Indutivo	<i>Boost</i> Indutivo	<i>Boost</i> Indutivo	<i>Boost</i> Indutivo	<i>Boost</i> Indutivo	<i>Boost</i> Indutivo	<i>Boost</i> Indutivo
Year	2011	2012	2012	2014	2014	2014	2017	2019	2021
V_{in} (V)	0.5 2	0.03 (Start@0.3)	0.12	0.021	0.3	0.6	0.007 (Start@0.21)	0.6	0.5
V_{out} (V)	0 5	1.8	1.2	1	1.1	1.2	-	1.2	1.2
Area (mm^2)	-	1.7	0.273	1.5	0.63	0.31	2.14	0.6	0.3325
Freq. (MHz)	0.1	-	1-5	0.1	10	0.1-0.3	40	4.5	1200