

SeMicro-PR 2018

VCO Reconfigurável de 2,4 GHz com Baixa Tensão e Baixo Consumo de Potência Dedicado a Aplicações de Redes de Sensores

I. T. First, A. A. Mariano, P. C. Lacerda, O. C. Gouveia
Filho, B. Leite

Group of Integrated Circuits and Systems (GICS) – Departamento de
Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
ilana.thaise@hotmail.com

Resumo—Esse artigo descreve o projeto de um VCO com topologia tanque LC, reconfigurável com baixo consumo de potência e compatível com redes de sensores e aplicações de internet das coisas (IoT). O circuito foi projetado fazendo uso de uma tecnologia CMOS de 130 nm no software Cadence Virtuoso para uma frequência de operação de 2,4 GHz. A topologia escolhida foi a de tanque LC, projetada para funcionar com três tensões de alimentação diferentes: 410 mV, 500 mV e 600 mV, possibilitando a reconfigurabilidade do circuito. O layout final possui uma área de $528,75 \times 224 \mu\text{m}^2$ e todos os resultados apresentados foram obtidos com simulações pós-layout. O oscilador reconfigurável apresenta um consumo de energia de $100,4 \mu\text{W}$ a $411,36 \mu\text{W}$ e um ruído de fase de -109 dB e -114 dB a 1 MHz , fazendo uso de tensões de alimentação de 410 mV e 600 mV, respectivamente.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, as redes sem fio constituem uma grande área no desenvolvimento da microeletrônica. Junto com a crescente demanda por aplicações de Internet das Coisas (IoT), o aumento da segurança, autonomia e confiabilidade, baixo consumo de potência e baixo custo também são necessários nos circuitos que constituem essas redes. De forma a manter o circuito operando por um maior tempo, sem trocar sua bateria, é interessante que ele funcione com baixas tensões de alimentação, mesmo que isso signifique a redução do desempenho. É justamente nesse cenário que os circuitos reconfiguráveis estão inseridos. Eles também podem ser usados em aplicações de *Energy Harvesting*, onde fontes externas, como o movimento e ondas geram a energia necessária para seu funcionamento. Operando em baixas tensões de alimentação, esses circuitos reconfiguráveis permitem o aprimoramento da eficiência energética e o aumento do tempo de vida das baterias.

Em sistemas de radiofrequência, o oscilador representa um bloco funcional de extrema importância, sendo responsável por gerar o sinal local que é utilizado para a

translação em frequência à banda requerida. No desenvolvimento de um VCO (Voltage Controlled Oscillator - Oscilador Controlado por Tensão), de forma a se obter uma boa operação, é significativamente importante otimizar alguns parâmetros como: ruído de fase, baixo consumo de potência e faixa de operação [1].

Em busca de VCOs com consumo reduzido de potência, foi realizada uma pesquisa em trabalhos publicados anteriormente. Em [2], o VCO proposto apresenta uma tensão de alimentação de 900 mV e uma frequência de 2,4 GHz dentro de sua faixa de operação, a qual varia de 2,17 GHz até 2,73 GHz. A obtenção de uma largura de banda tão alta possui como consequência um consumo de potência mais alto, chegando em 2,7 mW com um ruído de fase de $-122,3 \text{ dBc/Hz}$. Em [3], uma baixa tensão de alimentação é aplicada no VCO, resultando em um consumo reduzido de 0,09 mW. Nesse caso, a oscilação só é obtida em frequências mais baixas, indo de 120 MHz até 1,6 GHz.

Do estado da arte para VCOs com baixo consumo de potência, é possível verificar que existe um compromisso entre a faixa de operação, o ruído de fase e o consumo de potência. Neste trabalho, o VCO proposto pretende lidar com essas restrições de desempenho. Uma topologia reconfigurável é implementada de modo a permitir o circuito a operar com diversas tensões de alimentação. A reconfigurabilidade do circuito possibilita configurar o VCO para diversos cenários de desempenho, de acordo com as demandas do enlace de comunicação. Além de economizar energia, o circuito proposto é capaz de aprimorar a vida útil de baterias em aplicações com redes de sensores.

Esse artigo é organizado da seguinte maneira: a seção II apresenta o projeto do circuito, com base nos parâmetros desejados. A seção III apresenta os resultados obtidos nas simulações de pós-layout. Uma comparação em relação a outros projetos e a discussão são apresentadas na seção IV. Por fim, a seção V apresenta a conclusão do artigo.

II. PROJETO DO CIRCUITO

A topologia escolhida para o VCO proposto foi a de tanque LC devido ao seu baixo ruído de fase em comparação a outras topologias [4].

Em um tanque LC, o oscilador é constituído de um indutor (L) e um capacitor (C) em paralelo. Cada um desses elementos possui perdas próprias, sendo estas representadas por R_L e R_C (resistência do indutor e do capacitor, respectivamente). Para compensar essas perdas, uma resistência negativa ($-R$) é obtida fazendo uso de componentes ativos. Um circuito clássico que implementa esse comportamento é um par cruzado diferencial CMOS (figura 1). A faixa de frequência de oscilação varia de acordo com as mudanças de capacitância dos varactors que ocorrem devido à tensão de controle que é aplicada [1].

No design escolhido a frequência de oscilação central é dada por:

$$\omega_c = 1/\sqrt{LC}. \quad (1)$$

E a resistência negativa fornecida pelo transistor diferencial é:

$$R = -2/gm. \quad (2)$$

Na equação (2), gm representa a transcondutância dos transistores.

Para esse projeto, o VCO foi constituído de dois indutores (L_1 e L_2) e um capacitor paralelo (C_1), os quais formaram o tanque LC, dois varactors NMOS (C_2 e C_3) e os transistores do par cruzado diferencial (T_1 e T_2), como mostrado na figura 1.

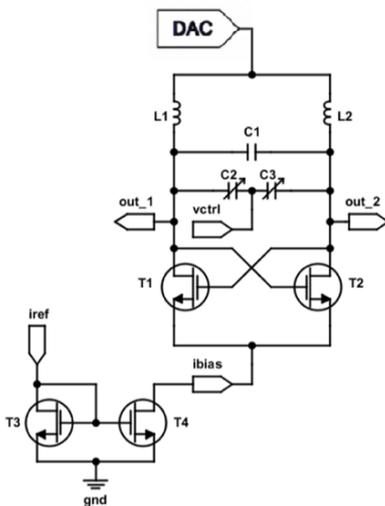


Fig. 1. Circuito VCO e Espelho de Corrente

O circuito é polarizado por um espelho de corrente, consistindo de dois transistores (T_3 e T_4) e uma fonte de corrente. Como o valor da tensão de alimentação do VCO é reconfigurável, VDD é controlado digitalmente por um DAC externo ao chip.

Os valores escolhidos para os indutores e capacitor tiveram como base uma frequência central de 2,4 GHz. No caso dos transistores, o dimensionamento foi realizado de forma a compensar a resistência negativa do tanque LC, a qual nesse caso foi calculada em 1,57 Ω .

O dimensionamento dos transistores e elementos passivos do VCO reconfigurável, bem como a corrente de polarização para os diferentes VDDs são mostrados nas tabelas 1 e 2, respectivamente. Esses valores foram cuidadosamente escolhidos de forma a permitir a oscilação com baixas tensões de alimentação, mantendo valores razoáveis de faixa de operação e ruído de fase. Além disso, as tensões de polarização mantêm os transistores em uma região de fraca inversão, resultando em uma tensão de saída considerável e simultaneamente reduzindo o consumo de energia. Mais detalhes a respeito do desempenho geral do VCO são apresentados na seção III.

TABELA 1. PARÂMETROS DO VCO

Parâmetro	Valor
I_{ref}	150 μ A
L_1 e L_2	$L=5$ nH
C_1	424,91 fF
C_2 e C_3	$W=10$ μ m $L=2$ μ m
T_1 e T_2	$W=6$ μ m $L=0,32$ μ m $M=2$
T_3	$W=0,6$ μ m $L=0,12$ μ m $M=1$
T_4	$W=1,5$ μ m $L=0,12$ μ m $M=4$

TABELA 2. TENSÕES DE ALIMENTAÇÃO

Tensão de Alimentação(mV)	I_{BIAS} (μ A)
410	245,0
500	449,7
600	685,6

Da tabela 2 é possível observar que para uma maior tensão de alimentação, a corrente necessária para a polarização também é maior, conseqüentemente representando um maior consumo de energia.

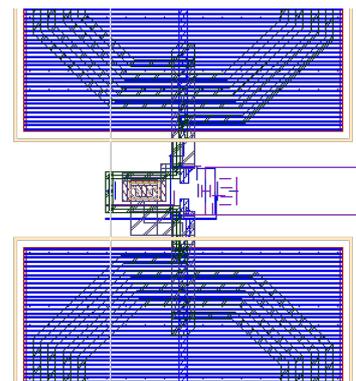


Fig. 2. Núcleo do layout do VCO

III. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A figura 2 apresenta o layout para o VCO proposto, o qual foi elaborado fazendo uso do Cadence Virtuoso em uma tecnologia CMOS de 130 nm. O layout do VCO apresenta uma área total de $528,75 \times 224 \mu\text{m}^2$, da qual apenas uma área de $88,03 \times 50,65 \mu\text{m}^2$ é ocupada pelos componentes ativos. Para permitir uma melhor visualização da parte ativa do VCO, a figura 2 apresenta apenas o núcleo do layout correspondente.

As simulações de pós layout foram realizadas fazendo uso do CadenceSpectre RF. Os resultados obtidos para os três valores diferentes de tensão de alimentação são apresentados nesta seção. De acordo com a tensão de alimentação escolhida, o VCO apresenta diferentes comportamentos de desempenho. O modo de operação será definido de acordo com as condições do enlace de comunicação.

A figura 3 retrata a frequência de oscilação em função da tensão de controle (V_{ctrl}). A tensão de controle varia de 0 até 400 mV, resultando em diferentes faixas de operação: para um VDD de 410 mV é possível notar que a frequência possui um comportamento linear apenas até uma tensão de controle de 120 mV, limitando a faixa de operação com a diminuição do consumo de potência. Para um VDD de 500 mV, o VCO ainda apresenta um bom desempenho até 400 mV de V_{ctrl} , e sua faixa de operação fica entre 2,32 GHz e 2,38 GHz, resultando em uma largura de banda de 60 MHz. Usando a tensão de alimentação mais alta proposta (600 mV), a faixa de operação varia entre 2,34 e 2,38 GHz, sendo a mais próxima da frequência de oscilação desejada de 2,4 GHz.

É importante ressaltar que independente da faixa de frequência de operação, o VCO opera em todas as tensões de alimentação propostas, comprovando sua reconfigurabilidade e habilidade para ser utilizado em redes de sensores e mesmo em sistemas de *Energy Harvesting*, nos quais algumas vezes o desempenho é diminuído com o propósito de uma operação em tensões mais baixas.

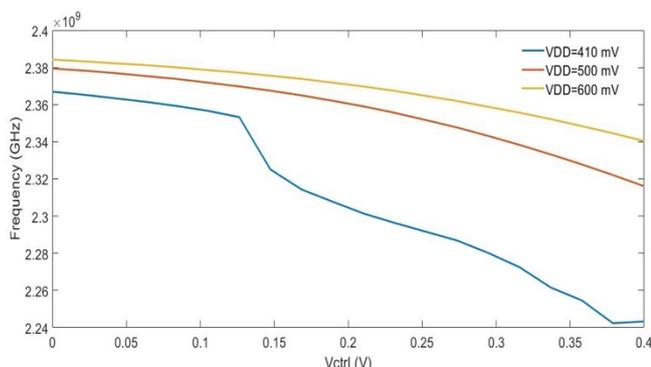


Fig. 3. Frequência de oscilação x Tensão de controle

O ruído de fase para cada tensão de alimentação é mostrado na figura 4. Esses resultados foram obtidos fazendo uso de uma tensão de controle de 0 V, com a qual a maior frequência é obtida para todos os valores de

VDD. É possível notar que para um VDD de 600 mV, foi obtido um ruído de fase de $-114,8$ dBc/Hz para 1 MHz de espaçamento da portadora. Quando a tensão de alimentação aplicada é 500 mV, o valor obtido para a mesma frequência de offset é de $-114,6$ dBc/Hz e para a o VDD mais baixo, 410 mV, o ruído de fase é o mais alto, ficando em $-107,2$ dBc/Hz, também para 1 MHz. Considerando a operação com baixa tensão, o ruído de fase obtido para cada VDD reconfigurável é bem competitivo. Como o ruído de fase resultante é uma função do consumo de potência, esse circuito reconfigurável permite a economia de energia.

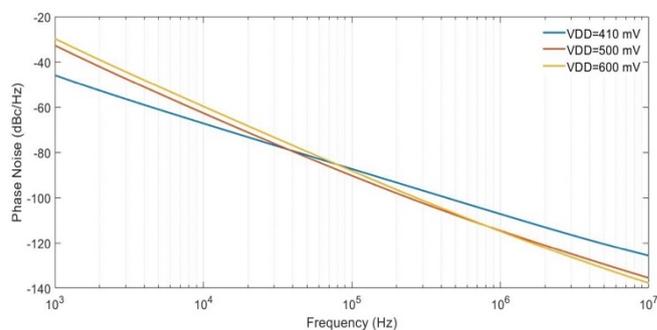


Fig. 4. Ruído de fase para a frequência mais alta

Em resultados anteriores, o comportamento do VCO foi apresentado para valores de 410 mV, 500 mV e 600 mV. Porém, o VCO proposto é capaz de oscilar com qualquer tensão entre 410 mV e 600 mV. A figura 5 mostra a potência de saída do VCO em função da tensão de alimentação, para uma tensão de controle de 100 mV. É possível notar que a potência de saída varia entre $-6,60$ dBm e $5,80$ dBm.

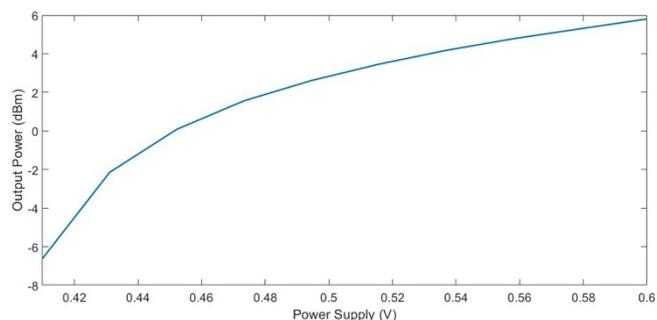


Fig. 5. Potência de saída x Tensão de alimentação

Usando as tensões de alimentação previamente definidas, o VCO proposto pode fornecer diferentes características ao custo de consumir uma potência mais elevada. Com uma tensão de alimentação de 410 mV, o consumo de potência é de somente $100,45 \mu\text{W}$, obtendo uma faixa de operação de aproximadamente 20 MHz e um ruído de fase de $-107,2$ dBc/Hz. Utilizando uma tensão de alimentação de 600 mV, o consumo se eleva para $411,36 \mu\text{W}$. No entanto, a faixa de operação também aumenta, indo de 2,34 GHz até 2,38 GHz, com um melhor ruído de fase: $-114,8$ dBc/Hz. De acordo com as condições do enlace de comunicação, o VCO pode ser configurado de forma a otimizar a eficiência energética.

IV. DISCUSSÕES

De forma a avaliar o desempenho do VCO reconfigurável proposto, o circuito projetado foi comparado a outros trabalhos previamente publicados. A tabela 3 mostra a comparação de desempenho do VCO.

TABELA 3. COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO

Ref.	Faixa Op. (GHz)	VDD (V)	Consumo Potência (μ W)	Ruído Fase (dBc/Hz)
[2]	2,17-2,73	0,9	2700	-122,3 @ 1 MHz
[3]	0,12-1,3	0,5	85	-
[5]	0,39-1,41	1,8	1250	-80 @ 600 KHz
[6]	1,57-3,57	1,8	1680	-90,01 @ 600 kHz
[7]	3,29-4,23	1,8	335,41-486,18	-80,95 @ 1 MHz
[7]	1,94-2,58	1,8	559,01-810,30	-84,56 @ 1 MHz
[7]	1,39-1,81	1,8	782,62-1134,40	-86,65 @ 1 MHz
[8]	0,65-1,6	1,8	39000	-108 @ 0.2 MHz
[9]	5,12-5,36	1,8	1900	-119 @ 1MHz
Esse trabalho	2,35-2,37	0,41	100,45	-107,2 @ 1MHz
	2,32-2,38	0,5	224,85	-114,6 @ 1MHz
	2,34-2,38	0,6	411,36	-114,8 @ 1MHz

Todos os trabalhos que constam na tabela tinham como objetivo um VCO de baixo consumo de potência, com diferentes tensões de alimentação, faixas de operação e tecnologias. Esse trabalho possui o diferencial de ser um VCO reconfigurável com baixo consumo de potência, tornando possível a sua operação com diferentes tensões de alimentação, de acordo com a situação desejada. Além disso, o consumo de potência e ruído de fase são menores que a média encontrada em outros trabalhos. Apesar da faixa de operação ser menor, o VCO opera em um espectro aceitável para a aplicação desejada.

Transceptores de radiofrequência são, em sua maioria, projetados para operar em cenários de piores casos, onde os circuitos são configurados para realizar comunicação a longa distância. No entanto, em aplicações como redes de sensores, a comunicação dificilmente precisará atingir tais distâncias. A possibilidade de operar em distâncias curtas, preza por circuitos reconfiguráveis com foco em eficiência energética. O VCO proposto é compatível com essa evolução da comunicação, permitindo a economia de energia de acordo com as condições do enlace de comunicação, ao custo de diminuir o desempenho do circuito. Além disso, a aplicação de circuitos reconfiguráveis contribui para o aumento do tempo de vida das baterias, o que atualmente é uma questão crítica em redes de sensores e aplicações IoT.

V. CONCLUSÃO

Esse trabalho apresentou duas características importantes para VCOs em redes de sensores e aplicações IoT: baixo consumo de potência e reconfigurabilidade da tensão de alimentação. O VCO aqui apresentado atinge ruídos de fase indo de -114,8 até -107,2 dBc/Hz para 1 MHz, com um consumo de potência de 411,36 até 100,45 μ W para tensões de alimentação de 600 mV até 410 mV, respectivamente. A área total do VCO é de aproximadamente 528,75x224 μ m², da qual apenas 88,03x50,65 μ m² é ocupada por componentes ativos.

É importante ressaltar que a reconfigurabilidade das tensões de alimentação e o baixo consumo de potência tornam o circuito funcional para aplicações de *Energy Harvesting* e para utilizações com baterias mais duradouras em redes IoT.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Tiebout, *Low Power VCO design in CMOS*, Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 3-12, 19-26.
- [2] S. Y. Lee and J. Y. Hsieh, "Analysis and implementation of a 0.9- V voltage-controlled oscillator with low phase noise and low power dissipation," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*, vol. 55, no. 7, pp. 624-627, 2008.
- [3] T. Li, B. Ye, and J. Jiang, "0.5V 1.3 GHz voltage controlled ring oscillator," in *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on ASIC (ASICON '09)*, pp. 1181-1184, Outubro 2009.
- [4] P. C. Lacerda, J. P. Perbiche, O. C. Gouveia, A. A. Mariano, "Design of an 1.2V, 2.4GHz, LC-Tank Voltage-Controlled Oscillator," in *XIV Microelectronics Student Forum (SForum 2014)*, 2014, Aracaju. *Proceedings of XIV Microelectronics Student Forum (SForum 2014)*, 2014.
- [5] L. S. De Paula, S. Bampi, E. Fabris, and A. A. Susin, "A wide band CMOS differential voltage-controlled ring oscillator," in *Proceedings of the Joint IEEE North-East Workshop on Circuits and Systems and TAISA Conference (NEWCAS-TAISA '08)*, pp. 9-12, Junho 2008.
- [6] J. K. Panigrahi and D. P. Acharya, "Performance analysis and design of wideband CMOS voltage controlled ring oscillator," in *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial and Information Systems*, pp. 234-238, Agosto 2010.
- [7] M. Kumar, "A Low Power Voltage Controlled Oscillator Design," *ISRN Electronics*, vol. 2013, Article ID 987179, 2013.
- [8] S. -Y. L. Amakawa, S. Ishihara, and N. Masu K, "Low phase noise wide frequency range ring VCO based scalable PLL with sub harmonic injection locking in 0.18 μ m CMOS," in *Proceedings of IEEE International Microwave Symposium Digest*, pp. 1178-1181, Maio 2010.
- [9] C. Liang, T. Huang and P. Rao, "Low-power VCO with phase-noise improvement in 0.18 μ m CMOS technology" *Electronics Letters*, volume. 46, issue 20, pp. 1385 - 1387, Setembro 2010.