



# Indutâncias a partir de transformadores em tecnologia CMOS

Rodrigo G. Silva<sup>1</sup>, Bernardo Leite<sup>1</sup>, Andre A. Mariano<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

rodrigogodinhosilva@gmail.com

**Resumo**—Este trabalho propõe o projeto de indutâncias variáveis utilizando transformadores chaveados em tecnologia CMOS. Os terminais do transformador são conectados entre si de diferentes maneiras, resultando em quatro configurações de indutâncias distintas. Um transformador foi projetado e seus parâmetros de espalhamento foram extraídos a partir de simulações eletromagnéticas. A estrutura proposta apresenta uma larga faixa de indutâncias a serem obtidas para o transformador simulado (variando de 200 pH a 6,4 nH), com um fator de qualidade flutuando entre 11,7 e 5,1. Sendo assim, a utilização desta técnica pode ser de grande valia na concepção de circuitos integrados variáveis.

## I. INTRODUÇÃO

Indutores integrados são elementos de grande importância em circuitos integrados de radiofrequência. São utilizados em diversos tipos de circuitos (como amplificadores de potência [1], osciladores controlados por tensão [2], amplificadores de baixo ruído [3] e misturadores [4]). O projeto desses elementos muitas vezes necessita de uma grande área de silício o que acarreta em um aumento no custo de fabricação de determinado circuito. Sendo assim, além de desempenharem funções importantes em circuitos de radiofrequência, indutores integrados são os responsáveis pelo custo de fabricação desses circuitos.

Atualmente, indutores variáveis utilizando chaves para a seleção de modos já são aplicados em alguns blocos construtivos de circuitos de radiofrequência [5] - [8]. Os trabalhos apresentados em [5] e [6] contemplam a associação em série (ou paralelo) de indutores integrados, com um chaveamento que permite a seleção de indutâncias distintas, já em [7] e [8], o chaveamento é realizado em um enrolamento secundário que altera o funcionamento do indutor, permitindo a variabilidade do mesmo.

Este artigo analisa quatro diferentes configurações obtidas através do chaveamento entre conexões dos terminais de um transformador projetado em tecnologia CMOS. A seção II aborda as métricas utilizadas para a avaliação das configurações apresentadas, a seção III mostra as configurações propostas, a seção IV exhibe o transformador projetado para a obtenção dos resultados, a

seção V apresenta os resultados obtidos e, finalmente, a seção VI firma as conclusões do trabalho.

## II. MÉTRICAS IMPORTANTES

Três diferentes métricas são utilizadas para a análise das configurações apresentadas neste artigo: indutância equivalente, fator de qualidade e frequência de ressonância. Estas métricas são avaliadas a partir da extração dos parâmetros de espalhamento obtidas através de simulações eletromagnéticas.

### A. Indutância equivalente

A indutância equivalente corresponde à indutância apresentada pela estrutura e pode ser obtida através da matriz de admitâncias de um elemento de duas portas qualquer, de acordo com a equação (1):

$$L_{eq} = \frac{\text{imag}(1/Y_{11})}{\omega}. \quad (1)$$

A matriz de admitâncias de um determinado elemento pode ser obtida através de relações matemáticas dos parâmetros de espalhamento do mesmo. A indutância equivalente é a principal métrica de análise da estrutura proposta, uma vez que o principal objetivo do trabalho é entregar indutâncias distintas que justifiquem a variabilidade do elemento.

### B. Fator de qualidade

O fator de qualidade é uma métrica que avalia diretamente o desempenho de uma indutância e pode ser definido como a relação entre a energia elétrica e magnética armazenadas no elemento e pode ser obtida através da equação (2):

$$Q = -\frac{\text{imag}(Y_{11})}{\text{real}(Y_{11})}. \quad (2)$$

### C. Frequência de ressonância

Indutores e transformadores CMOS apresentam diversos parasitas inerentes à esta tecnologia integrada. Esses parasitas ressoam com a indutância apresentada por esses elementos e, a partir de determinada frequência, passam a apresentar um comportamento capacitivo. Esta frequência é chamada de frequência de ressonância e é

dada pela frequência em que a indutância equivalente do elemento é zero.

### III. CONFIGURAÇÕES PROPOSTAS

As diferentes configurações propostas baseiam-se na relação entre os dois enrolamentos do transformador e são apresentadas na Fig. 1. O transformador, que tipicamente é analisado como um elemento a quatro portas, é reduzido a uma indutância de duas portas, as quais são aplicadas de acordo com as configurações sob análise.

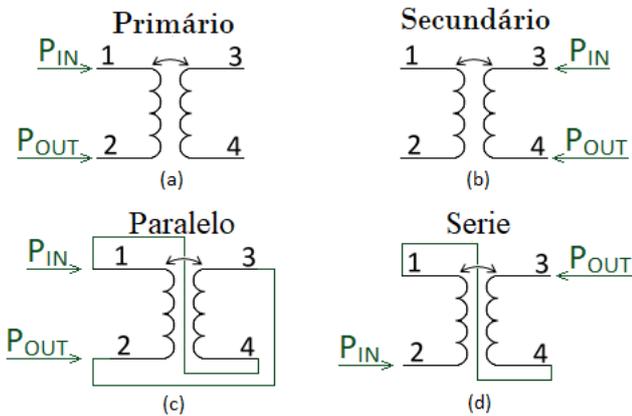


Fig. 1. Configurações propostas

A configuração 1(a) apresenta apenas a indutância do enrolamento primário; neste caso, não há um caminho para fluxo de corrente no secundário do transformador e, portanto, indutância mútua desta configuração é nula. O mesmo pode ser dito para a configuração 1(b), que entrega apenas a indutância no enrolamento secundário.

A configuração 1(c) é obtida através da conexão em paralelo dos enrolamentos do transformador; esta configuração contempla um acoplamento magnético negativo (buscando obter a menor indutância possível). Já a configuração 1(d) corresponde à conexão em série dos enrolamentos e, ao contrário da configuração 1(c), apresenta um acoplamento magnético positivo (buscando a maior indutância possível).

### IV. TRANSFORMADOR PROJETADO

Um transformador integrado em tecnologia CMOS foi projetado. Os parâmetros do transformador são apresentados na tabela 1.

TABELA 1. PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR

	Primário	Secundário
Largura das trilhas	7 $\mu\text{m}$	19 $\mu\text{m}$
Diâmetro	200 $\mu\text{m}$	200 $\mu\text{m}$
Separação entre as trilhas	5 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$
Separação entre os terminais	5 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$
Número de voltas	4	2

A tecnologia utilizada emprega 7 camadas de metal (conectadas entre si por vias metálicas) para a realização dos elementos passivos. O corpo do enrolamento primário é posicionado na camada superior da tecnologia e para a realização do cruzamento entre as voltas, utilizou-se a camada diretamente abaixo. Sendo assim, o enrolamento primário ocupa as duas camadas mais altas. O enrolamento secundário é colocado na terceira camada mais alta da tecnologia, com a camada logo abaixo desta sendo utilizada para o cruzamento entre as voltas. Uma topologia octogonal simétrica foi utilizada; o elemento é exibido na Fig. 2, bem como a numeração dos terminais utilizada ao longo do trabalho.

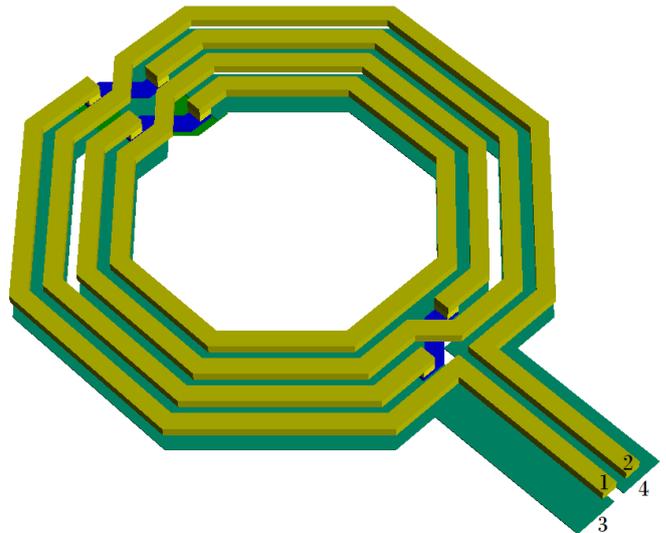


Fig. 2. Transformador projetado

O transformador apresenta um acoplamento magnético vertical, visando um melhor aproveitamento de espaço e uma maior indutância mútua. Os parâmetros do transformador foram escolhidos de modo que as indutâncias dos enrolamentos sejam diferentes uma da outra e que a frequência de ressonância esteja dentro da faixa de frequências utilizada na simulação eletromagnética do dispositivo.

O transformador projetado foi simulado como um elemento de quatro portas em relação a um plano de referência inserido em torno do transformador, o esquema de portas utilizado é apresentado na Fig. 3.

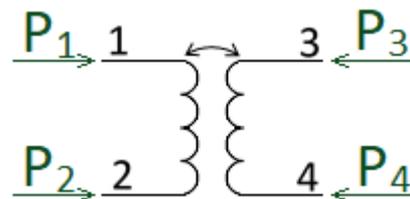


Fig. 3. Esquema de portas da simulação eletromagnética do transformador

Os parâmetros de espalhamento do transformador foram obtidos através de simulações eletromagnéticas, simulando o elemento até uma frequência de 25 GHz.

Aplicou-se o método dos momentos para a simulação eletromagnética (devido, principalmente, à sua maior agilidade em relação ao método dos elementos finitos) utilizando-se o software Advanced Design Systems.

## V. RESULTADOS

Os resultados obtidos através da simulação eletromagnética do transformador foram inseridos em um bloco de parâmetros S de quatro portas e, as quatro configurações foram montadas individualmente em um esquemático. Essas configurações foram simuladas como elementos de duas portas e, suas indutâncias e fator de qualidade foram extraídos a partir das equações mencionadas anteriormente. A indutância equivalente das configurações são mostradas na Fig 4. Em vermelho e azul, estão dispostas as curvas referentes à indutância do primário e secundário do transformador, respectivamente. E verde e preto, são apresentadas as indutâncias obtidas para as configurações série e paralelo.

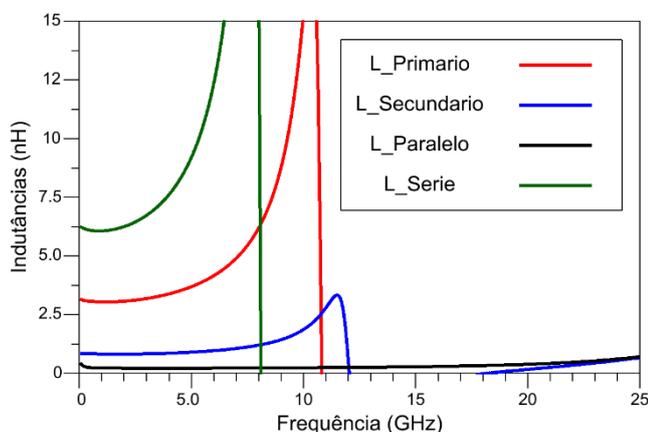


Fig. 4. Indutâncias obtidas para as configurações

A configuração Série apresentou a maior indutância, uma vez que trata-se da conexão em série dos enrolamentos; além disso, o acoplamento magnético positivo obtido nesta configuração auxilia no incremento da indutância resultante. Em seguida, tem-se a indutância da configuração Primário. Esta configuração apresentou uma maior indutância que a do Secundário devido ao maior número de voltas e menor largura de trilhas. A configuração Paralelo entregou a menor indutância entre as configurações propostas, isto deve-se à conexão em paralelo dos enrolamentos, bem como o acoplamento magnético negativo apresentado por esta configuração.

Podemos notar também que houve uma redução da frequência de ressonância apresentada pela configuração Série (em relação às frequências de ressonância dos enrolamentos do transformador) bem como um aumento na frequência de ressonância da configuração Paralelo. Os valores das frequências de ressonância obtidos são: 8,1 GHz para a configuração Série, 10,8 GHz para a configuração Primário, 12 GHz para a configuração Secundário e a configuração Paralelo apresentou uma frequência de ressonância maior que 25 GHz. Por último, o

fator de acoplamento das configurações também foi traçado e é apresentado na Fig 5.

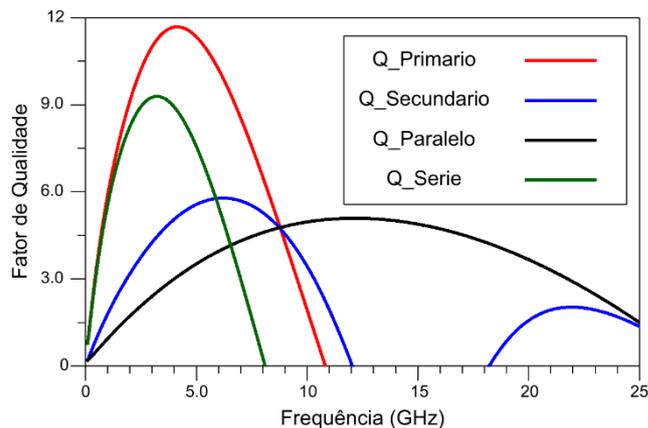


Fig. 5. Fator de acoplamento apresentado para as configurações

O fator de qualidade apresentado pela configuração Primário, foi o maior obtido entre os resultados. Isso se dá pela maior espessura da camada superior da tecnologia (onde o enrolamento se encontra). Em seguida, tivemos o fator de acoplamento da configuração Série. Esta configuração é uma combinação das configurações Primário e Secundário, sendo assim, o seu fator de qualidade depende principalmente do fator de qualidade de ambos os enrolamentos do transformador, bem como do da indutância mútua entre os enrolamento. Como o acoplamento magnético neste caso é positivo, o fator de qualidade ainda sofreu um leve incremento.

O fator de qualidade apresentado pela configuração Secundário foi menor que a apresentado pelas configurações Série e Primário; este fator de acoplamento reduzido dá-se pela menor espessura da camada onde o enrolamento está inserido. Por fim, a configuração Paralelo apresentou um menor fator de qualidade das configurações propostas, entretanto, devido ao fator de qualidade mais alto da configuração Primário e à indutância mútua não muito alta do transformador, a degradação do fator de qualidade em relação à frequência não foi muito grave. Os valores de indutância (em 2,4 GHz) e fator de qualidade máximos obtidos estão apresentados na tabela 2.

TABELA 2. MÉTRICAS DAS CONFIGURAÇÕES

	Indutância (2,4 Ghz)	Fator de Qualidade
Primário	3,1 nH	11,7 (em 4,1 GHz)
Secundário	820 pH	5,8 (em 6,2 GHz)
Paralelo	220 pH	5,1 (em 12,1 GHz)
Série	6,4 nH	9,3 (em 3,2 GHz)

As configurações aqui apresentadas mostraram uma boa variabilidade na indutância (onde a razão entre o maior e o menor valor obtido foi de aproximadamente 14). Podemos notar também que há uma variação no fator de

qualidade apresentado, o que seguramente causará diferença no desempenho das configurações.

## VI. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou quatro diferentes configurações para a aplicação de um transformador utilizado como elemento de indutância variável. O transformador apresenta a sua variabilidade a partir das conexões realizadas nos seus terminais. As configurações apresentadas tratavam-se da indutância do enrolamento primário, do enrolamento secundário, bem como a conexão em série e em paralelo dos enrolamentos.

Um transformador com acoplamento vertical foi projetado para ilustrar a variabilidade do dispositivo. Buscando uma maior variabilidade entre as configurações, optou-se por utilizar um acoplamento magnético positivo na configuração Serie (que entrega a maior indutância equivalente) e um acoplamento magnético negativo na configuração Paralelo (responsável pela menor indutância apresentada). As quatro indutâncias variaram entre 220 pH (configuração Paralelo) e 6,4 nH (configuração Serie) e apresentaram fator de qualidade acima de 5.

Este elemento pode ser utilizado principalmente em circuitos multi-frequência, uma vez que o pico do fator de qualidade das diferentes configurações encontra-se em frequências distintas; sendo assim, há a possibilidade de otimizar o dispositivo para a utilização das configurações em uma frequência de maior com um maior fator de qualidade.

O próximo passo deste trabalho é propor um esquema de chaveamento que possa englobar as configurações apresentadas, bem como realizar um estudo mais a fundo dos efeitos causados pelo aumento do fator de acoplamento entre os terminais. Outra alternativa é o estudo da utilização de um transformador com acoplamento magnético horizontal, que pode trazer resultados interessantes no

desenvolvimento deste elemento. Além disso, é possível incluir outros enrolamentos neste transformador, possibilitando a utilização de mais indutâncias para o dispositivo.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- [1] Y. Dong, L. Mao, and S. Xie, "Fully Integrated Class-J Power Amplifier in Standard CMOS Technology," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 27, no. 1, pp. 64–66, 2017.
- [2] W. Zou, X. Zou, D. Ren, K. Zhang, D. Liu, and Z. Ren, "2.49–4.91 GHz wideband VCO with optimised 8-shaped inductor," *Electron. Lett.*, vol. 55, no. 1, pp. 55–57, 2018.
- [3] M. K. Hedayati, A. Abdipour, R. S. Shirazi, C. Cetintepe, and R. B. Staszewski, "A 33-GHz LNA for 5G Wireless Systems in 28-nm Bulk CMOS," *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 65, no. 10, pp. 1460–1464, 2018.
- [4] M. H. Kashani, A. Tarkeshdouz, E. Afshari, and S. Mirabbasi, "A 53–67 GHz Low-Noise Mixer-First Receiver Front-End in 65-nm CMOS," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 66, no. 6, pp. 2051–2063, 2019.
- [5] P. Park, C. S. Kim, M. Y. Park, S. Do Kim, and H. K. Yu, "Variable Inductance Multilayer Inductor With MOSFET Switch Control," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 25, no. 3, pp. 144–146, 2004.
- [6] H. J. Yoo, K. H. Lee, H. J. Oh, and Y. S. Eo, "A Fully Integrated 2.4 / 3.4 GHz Dual-Band CMOS Power Amplifier with Variable Inductor," no. September, pp. 371–374, 2009.
- [7] L. Qing, S. Jiangtao, S. Kurachi, N. Itoh, and T. Yoshimasu, "A switched-inductor based VCO with an ultra-wideband tuning range of 87.6%," *ASICON 2009 - Proc. 2009 8th IEEE Int. Conf. ASIC*, vol. 1, no. 1, pp. 355–358, 2009.
- [8] P. L. You and T. H. Huang, "A switched inductor topology using a switchable artificial grounded metal guard ring for wide-FTR MMW VCO applications," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 60, no. 2, pp. 759–766, 2013.