

# Quality Factor for Passive Inductors at the Resonant Frequency

David Alan de Oliveira Ferreira<sup>1</sup>, Gabriel Rebello Guerreiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM)

Email: [ferreirad08@gmail.com](mailto:ferreirad08@gmail.com), [gabrielrg@ifam.edu.br](mailto:gabrielrg@ifam.edu.br)

Received: November 11th, 2016

Accepted: January 18<sup>th</sup>, 2017

Published: March 30<sup>th</sup>, 2017

Copyright ©2016 by authors and Institute of Technology Galileo of Amazon (ITEGAM). This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## ABSTRACT

This article reports a study of a method of obtaining the quality factor (Q factor) of passive inductors calculated at the resonant frequency. A literature search about the main methods of obtaining the Q factor was carried out, analyzing its limitations and how the proposed method can be applied. In order to evaluate the method, it addressed the modeling of a passive inductor using ASITIC tool in obtaining the characteristics and inducing behavior for later analysis using the PSPICE tool.

**Keywords:** passive inductor, Quality Factor, ASITIC, PSPICE.

## Fator de Qualidade para Indutores Passivos na Frequência de Ressonância

### RESUMO

Este artigo relata o estudo de um método de obtenção do fator de qualidade (Fator Q) de indutores passivos calculada na frequência de ressonância. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre os principais métodos de obtenção do Fator Q, analisando suas limitações e como o método proposto pode ser aplicado. Para avaliação do método, foi abordada a modelagem de um indutor passivo utilizando a ferramenta ASITIC na obtenção das características e comportamento do indutor para posterior análise utilizando a ferramenta PSPICE.

**Palavras chaves:** Indutor Passivo, Fator de Qualidade Q, ASITIC, PSPICE

## I. INTRODUÇÃO

O indutor passivo está presente na indústria de microeletrônica, onde é utilizado em projetos de radiofrequência no

setor de telecomunicações, consumindo relativamente baixa potência e gerando pouco ruído ao circuito. Um simples exemplo de como é um indutor passivo é representado na Figura 1 [1].

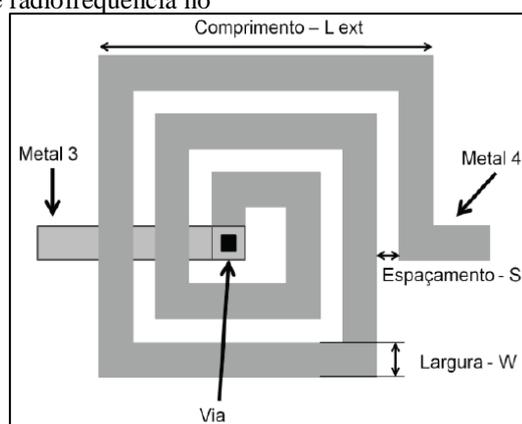


Figura 1: Estrutura básica do indutor passivo.

Um dos principais obstáculos impostos pelos indutores passivos integrados é a sua grande área ocupada e seu baixo fator de qualidade, tornando importante o estudo para reduzir suas dimensões e elevar seu fator Q. As duas problemáticas citadas possuem ligação entre si pelo fato de que o componente com grande dimensão possui uma maior resistência parasita devido ao material utilizado, causando assim uma concentração de correntes chamada de efeito pelicular que interfere no fator Q deste componente [2].

O parâmetro Q é uma figura de mérito importante em indutores, adimensional e, por definição, dado por [3]:  $Eq \quad (1)$   
 $Q \equiv 2\pi \times \frac{\text{máxima energia instatânea armazenada no circuito}}{\text{energia dissipada em um ciclo}}$

Existem formas de obter o valor de Q na frequência de ressonância ou apenas para frequências abaixo desse valor. Nos tópicos seguintes, é apresentada uma forma de se obter o fator de qualidade que seja válida na faixa de frequência onde o circuito possui comportamento indutivo.

Neste trabalho foi utilizada a ferramenta ASITIC [4] para projetar indutores passivos. O Q do indutor projetado será comparado com as formas estudadas neste trabalho para efeito de validação do método.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### II.1 ASITIC

O ASITIC (Análise e simulação de espirais indutores e transformadores para ICS) é um instrumento de CAD que auxilia no projeto de circuitos para RF, ajudando no aperfeiçoamento de componentes eletrônicos como: indutores, transformadores e capacitores. O substrato condutor desempenha um papel fundamental na determinação da frequência e fator de qualidade de dispositivos passivos. O ASITIC inclui as perdas induzidas eletricamente e acoplamento nos seus cálculos, assim como as perdas por correntes parasitas induzidas através de campos magnéticos e efeito pelicular [4].

O circuito equivalente para o indutor possui parâmetros de um modelo utilizado com capacitâncias e resistências parasitas (esquemático na Figura 2). Os parâmetros C1 e C2 são referentes às capacitâncias de óxido e R1 e R2, referentes às resistências do substrato.

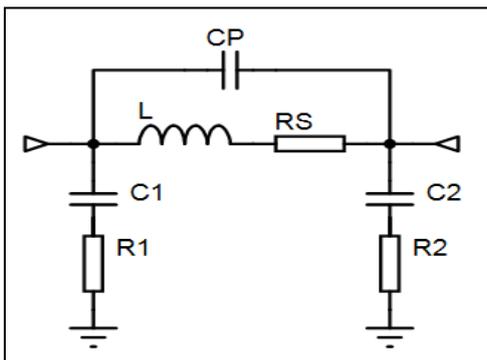


Figura 2: Circuito equivalente ASITIC.

Para projetar um indutor no software ASITIC é preciso informar o arquivo da tecnologia de projeto. Neste trabalho foi utilizada a

tecnologia CMOS 0,35µm [5]. A geometria do indutor que criado foi com formato quadrado (square), o nome para o indutor e as dimensões desejadas, como: Largura externa (Lext), largura da via (W), espaçamento entre vias (S), número de voltas (N) e duas camadas de metais, uma para o enrolamento e outra para a via de saída. Na Tabela 1, é visto um exemplo de dimensões utilizadas.

Tabela 1 – Geometria e dimensões para Exemplo.

Indutor		Exemplo
Parâm. (µm)	Lext	170
	W	10
	S	3
	N	4,75
Me-tais	Enrolamento	M3
	Via de saída	M2

Após informar os valores, um indutor com as dimensões propostas é criado, como visto na Figura 3.

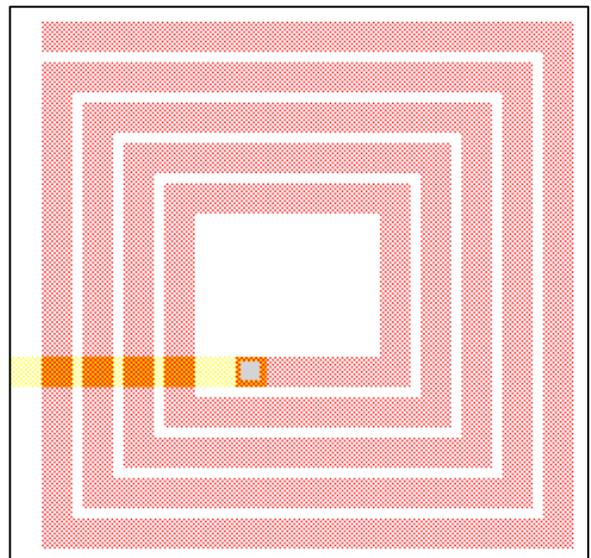


Figura 3: Exemplo no site do ASITIC.

### II.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO INDUTOR PARA O PROJETO

Como exemplo, foi realizada a simulação de um indutor passivo no ASITIC com as dimensões demonstradas na Tabela 2.

Tabela 2: Geometria e dimensões para o projeto.		
Indutor		Projeto
Parâm. (µm)	Lext	100
	W	10
	S	1
	N	4
Metais	Enrolamento	M4
	Via de saída	M3

A ilustração do indutor projetado é vista na Figura 4.

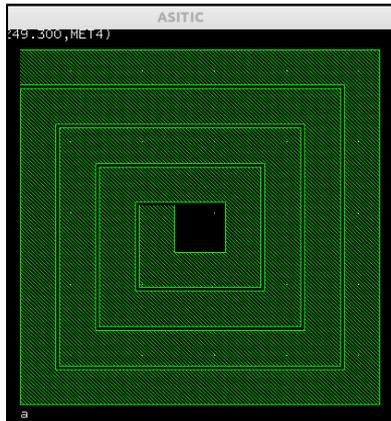


Figura 4: Indutor passivo integrado simulado no programa ASITIC.

A partir da simulação na ferramenta ASITIC, os parâmetros do modelo são determinados em qualquer frequência desejada. Foram obtidos os seguintes valores (descritos na Tabela 3) dos parâmetros do modelo nas frequências de 1, 10, 15 e 20 GHz.

Tabela 3: Parâmetros do modelo.

Parâmetros do modelo						
F[GHz]	L[H]	Rs[Ω]	R1[Ω]	C1[F]	R2[Ω]	C2[F]
1	849,6p	3,71	1,98k	33,41f	2,392k	29,7f
10	778,2p	7,379	632,9	11,81f	1,043k	9,18f
15	766,1p	8,909	347,1	10,29f	600,5	7,59f
20	764p	10,23	213	9,713f	377,6	6,996f

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

### III.1 ANÁLISE DO FATOR DE QUALIDADE

A análise de comportamento do fator de qualidade no domínio da frequência foi estudada através do PSPICE, desenvolvido pela Microsim Corporation, software para simulação que permite a análise de sinais elétricos, sem a necessidade de projeto físico dos mesmos. O software utiliza linhas de comando para o desenvolvimento do circuito.

A curva do fator de qualidade também pode ser analisada no PSPICE de forma gráfica em função da frequência, com a criação de um arquivo de texto com descrição de todos os parâmetros do indutor do ASITIC utilizado no projeto e suas interligações no circuito. Para análise foram utilizados os parâmetros do indutor gerados na frequência de 1 GHz.

```
* Indutor
Vin 1 0 AC 1V
L 1 2 849.6P
Rs 2 0 3.71
C1 1 3 33.41F
R1 3 0 1.98K
Cp 1 0 100F
Rp 1 0 1K
** Analysis Requests **
.OP
.AC DEC 10000 30MHz 100GHz
** Output Requests **
.probe
.end
```

Para a observação do circuito no domínio da frequência, deve ser realizada uma análise para pequenos sinais AC, descrita na linha: .AC DEC 10000 30MHz 100GHz. Onde:

- AC é o tipo de análise utilizada para calcular a resposta em função da frequência de um circuito;
- DEC. realiza a varredura da frequência percorrida logaritmicamente em décadas;
- 10000 é o número de pontos por décadas para gerar a curva;
- 30 MHz e 100 GHz determinam o início e o fim da varredura [6].

### III.1.1 CÁLCULO DO Q USANDO A LARGURA DE BANDA BW

Para obtenção da frequência de ressonância e da largura de banda, pode-se plotar o gráfico da impedância (dB) em função da frequência no PSPICE. A partir do gráfico da Figura 5, é possível verificar a frequência de ressonância,  $f_r = 17,258$  GHz, onde o valor da impedância é máximo.

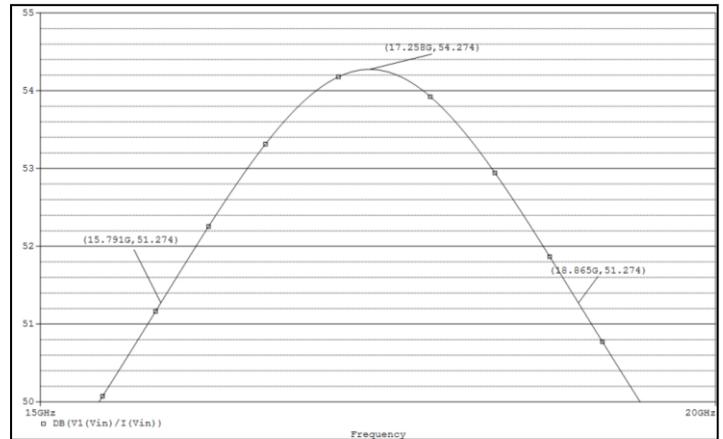


Figura 5: Impedância do indutor em função da frequência.

O cálculo do fator de qualidade na ressonância é realizado de forma direta, utilizando a Equação 2, onde a frequência de ressonância  $f_r$  é dividida pela largura de banda BW medida em -3dB abaixo do pico de máxima impedância.

$$Q = \frac{f_r}{BW} = \frac{17,258G}{18,865G - 15,791G} = 5,6142 \quad Eq(2)$$

Onde  $BW = f_2 - f_1$

Através desta equação, na frequência de ressonância o fator de qualidade resulta em 5,6142.

### III.1.2 Q AVALIADO PELA RAZÃO DA PARTE IMAGINÁRIA E PARTE REAL

A Equação 3 é comumente utilizada para encontrar o valor de Q, sendo o resultado da divisão da parte imaginária pela parte real da impedância. A Figura 6 ilustra o comportamento do fator de qualidade resultante.

$$Q = \frac{Zin[Im]}{Zin[Re]} \quad Eq(3)$$

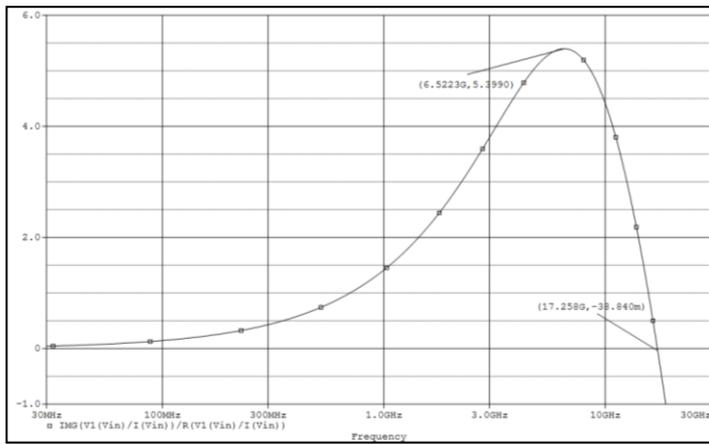


Figura 6: Q avaliado pela razão da parte imaginária e parte real.

A reatância indutiva e a reatância capacitiva (partes imaginárias da impedância) se anulam na frequência de ressonância, deixando o resultado da impedância puramente real. Logo, a Equação 3 com numerador da fração sendo zero, resulta num fator Q igual a zero. Essa situação limita calcular o Q na frequência de ressonância ( $f_r = 17,258 \text{ GHz}$ ), pois é visto através do gráfico que nesta frequência o fator de qualidade do indutor tende à zero ( $-38,840 \times 10^{-3}$  próximo de zero), diferente do ocorrido sendo utilizada a equação que envolve BW, cujo resultado obtido foi de um fator Q igual a 5,6142.

### III.2 MÉTODO PROPOSTO PARA OBTENÇÃO DO Q NA RESSONÂNCIA

Para o método estudado, o ramo composto por C2 e R2 foi aterrado, no entanto esses parâmetros não serão considerados e o circuito poderá ser modificado, como é mostrado na Figura 7.

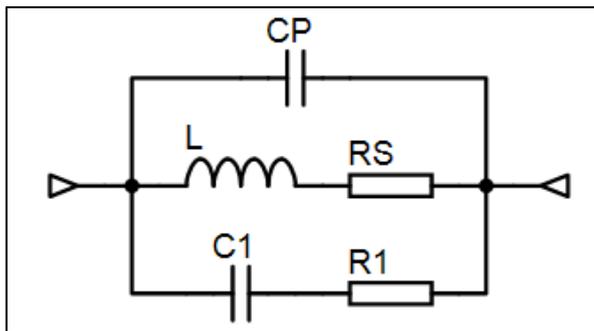


Figura 7: Circuito sem o ramo de C2 e R2.

Para facilitar a análise do circuito, os circuitos compostos por parâmetros em série foram substituídos por paralelos equivalentes através dos cálculos descritos a seguir e demonstrados no livro Introdução à Análise de Circuitos [2], o modelo ASITIC foi alterado mais uma vez para o esquema da Figura 8.

$$R_2 = \frac{R_1^2 + X_{C1}^2}{R_1} \quad R_{EQUI} = \frac{R_S^2 + X_L^2}{R_S} \quad X_{LP}$$

$$= \frac{R_S^2 + X_L^2}{X_L} \quad Eq(4)$$

$$Temos Q_p = \frac{R_T}{X_{LP}} \quad Eq(5)$$

Onde  $R_T = R_2 // R_{EQUI}$

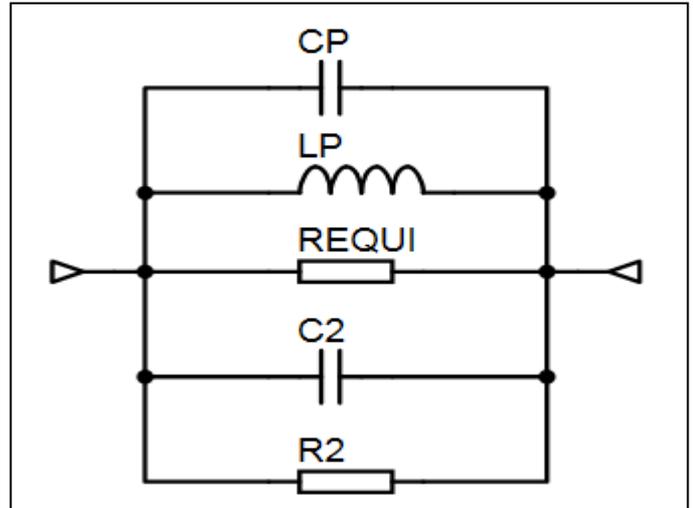


Figura 8: Circuito com equivalências vistas no Boylestd.

Para simplificar o desenvolvimento matemático e a análise das equações desconsiderou-se  $R_S$ , tendo que  $X_L \gg R_S$ , o que leva às seguintes equações:

$$R_2 = \frac{R_1^2 + X_{C1}^2}{R_1} \quad R_{EQUI} = X_L^2 X_{LP} = X_L \quad Eq(6)$$

$$Assim Q_p = \frac{R_T}{X_L} \quad Eq(7)$$

No gráfico a seguir (Figura 9) é demonstrado o comportamento do fator de qualidade Q para o indutor relacionado ao método proposto. Tem-se que o valor de Q não é nulo e está próximo do valor calculado pela Equação 1 sendo igual a 5,6103.

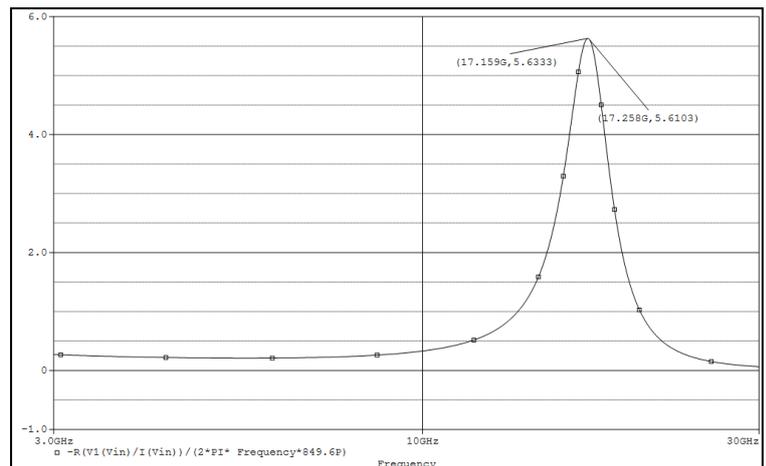


Figura 9: Q para indutância desconsiderando Rs.

### IV.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na tabela 4, estão apresentadas as equações que foram utilizadas no decorrer deste trabalho. O método proposto satisfaz o que se esperava, resultando em um fator de qualidade próximo ao que, de fato, é o seu valor na frequência de ressonância.

Tabela 4: Equações para obtenção do Q.

	<b>Equação</b>	<b>Valor de Q</b>	<b>Parecer</b>
(a)	$Q = \frac{f_r}{BW}$	5,6142	Q na frequência de ressonância
(b)	$Q = \frac{Zin[Im]}{Zin[Re]}$	$-38,84 \times 10^{-3}$	Q próximo de zero
(c)	$Q = \frac{R_T}{X_L}$	5,6103	Q próximo ao da equação (a)

Como resultados, o valor do fator de qualidade nas equações a e c foram de aproximadamente 5,61, e na equação proposta retornou o valor mais coerente próximo de 0.

#### V. CONCLUSÃO

O método proposto mostrou-se adequado para uma análise mais completa do fator de qualidade em função da frequência para os modelos de indutores citados. Trabalhos futuros devem contemplar equações mais precisas ao se considerar a resistência série, Rs.

#### VI. AGRADECIMENTOS

A FAPEAM pelo apoio financeiro e ao IFAM-Campus Manaus Distrito Industrial pelo apoio à pesquisa.

#### VII. REFERÊNCIAS

- [1] Guerreiro, G.R. (2011). **Indutores Ativos para RF**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- [2] Boylestad, Robert L. **Introdução à Análise de Circuitos**. Pearson, 12ª. Ed, 2011.
- [3] Krauss, H.L.; Bostian, C.W.; Raab, F.H. (1980). **Solid state radio engineering**. New York: John Wiley.
- [4] ASITICFAC: **Analysis and simulation of spiral inductors and transformers for ICs**. Disponível em<<http://rfic.eecs.berkeley.edu/~niknejad/doc-05-26-02/faq.html#pi>>. Acesso em: 11 Jul. 2015.
- [5] Casanãs, C.W.V. (2013). **Amplificadores de Baixo Ruído Usando Algoritmos Metaheurísticos**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013
- [6] Introdução ao **SPICE e ao PSPICE**. PUC\_PSPICE.pdf. 2016.