

# ANÁLIZE DE FALHAS EM CIRCUITOS ELETRÔNICOS UTILIZANDO A RESPOSTA EM FREQUÊNCIA POR DIAGRAMA DE BODE

FAUT ANALYSIS IN ELETRONIC CIRCUITS USING FEQUENCY RESPONSE  
VIA BODE DIAGRAM

Ciências Exatas e da Terra, Engenharias • 25/06/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/782319074](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/782319074)

---

Italo Amaral Veras  
Francisco Brito Veras Filho  
Siomara Dias da Rocha

---

## RESUMO

Este trabalho aborda a análise de falhas em circuitos eletrônicos por meio da resposta em frequência, com foco na utilização de diagramas de Bode como ferramenta de diagnóstico. O estudo tem como objetivo avaliar a eficácia dessa abordagem na identificação de variações paramétricas em componentes eletrônicos, especialmente em filtros ativos. A metodologia adotada baseia-se na modelagem matemática de um circuito do tipo Sallen-Key, seguida de simulação computacional e análise comparativa entre condições ideais e com falha. Os resultados demonstram que alterações nos valores de componentes, como capacitores, provocam deslocamentos na frequência de corte, além de modificações no ganho e na fase do sistema. Tais variações permitem identificar falhas de forma indireta, sem a necessidade de intervenção física no circuito. A análise evidencia que a resposta em frequência é altamente sensível a mudanças nos parâmetros do sistema, constituindo uma ferramenta confiável para diagnóstico. Conclui-se que o método proposto apresenta aplicabilidade prática e potencial para uso em manutenção preditiva de sistemas eletrônicos.

**Palavras-chave:** resposta em frequência; diagrama de Bode; filtros ativos; diagnóstico eletrônico.

## ABSTRACT

This paper addresses fault analysis in electronic circuits through frequency response techniques, focusing on the use of Bode plots as a diagnostic tool. The study aims to evaluate the effectiveness of this approach in identifying parametric variations in electronic components, particularly in active filters. The adopted methodology is based on the mathematical modeling of a Sallen-Key circuit, followed by computational simulation and comparative analysis between ideal and faulty operating conditions. The results

demonstrate that changes in component values, such as capacitors, cause shifts in the cutoff frequency, as well as modifications in the system gain and phase response. These variations make it possible to identify faults indirectly, without the need for physical intervention in the circuit. The analysis shows that the frequency response is highly sensitive to changes in system parameters, making it a reliable diagnostic tool. It is concluded that the proposed method has practical applicability and significant potential for use in predictive maintenance of electronic systems.

**Keywords:** Frequency Response; Bode Plot; Active Filters; Electronic Fault Diagnosis.

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente complexidade dos sistemas eletrônicos tem ampliado a necessidade de métodos eficientes para análise, monitoramento e diagnóstico de falhas em circuitos. Em aplicações industriais, automotivas e de telecomunicações, a confiabilidade dos circuitos eletrônicos é um fator crítico, uma vez que falhas podem comprometer o desempenho de sistemas inteiros, gerar perdas econômicas e reduzir a segurança operacional. Nesse contexto, técnicas de análise no domínio da frequência destacam-se como ferramentas fundamentais para caracterização e avaliação do comportamento dinâmico de circuitos.

A análise de resposta em frequência, especialmente por meio de diagramas de Bode, permite representar o ganho e a fase de sistemas lineares em função da frequência, possibilitando uma compreensão detalhada do comportamento do circuito em diferentes condições de operação. Essa abordagem é amplamente utilizada no projeto de filtros e amplificadores, bem como na

verificação de estabilidade e desempenho. Além disso, sua aplicação no diagnóstico de falhas tem se mostrado promissora, pois alterações nos parâmetros dos componentes refletem diretamente na forma das curvas de resposta.

Diversos estudos indicam que variações em elementos passivos, como resistores e capacitores, podem provocar deslocamentos na frequência de corte, mudanças na inclinação da curva de ganho e alterações na fase do sistema. Essas modificações funcionam como assinaturas do estado do circuito, permitindo identificar anomalias de forma indireta. No entanto, apesar da relevância do tema, ainda existem desafios relacionados à interpretação dos desvios e à aplicação sistemática dessas técnicas em contextos reais, especialmente em circuitos sujeitos a degradação ao longo do tempo.

Diante desse cenário, surge a seguinte problemática: é possível identificar falhas em circuitos eletrônicos analógicos de forma confiável por meio da análise da resposta em frequência? Essa questão orienta o desenvolvimento da presente pesquisa, que busca compreender até que ponto variações paramétricas influenciam o comportamento do circuito e como essas alterações podem ser utilizadas como indicadores de falha.

A justificativa deste estudo está associada à necessidade de métodos de diagnóstico não invasivos, que permitam avaliar o estado de funcionamento de circuitos sem a necessidade de desmontagem ou interrupção do sistema. A utilização de diagramas de Bode como ferramenta de análise apresenta vantagens significativas, como simplicidade de implementação, baixo custo e aplicabilidade em diferentes tipos de circuitos. Além disso, o tema

possui relevância acadêmica e tecnológica, contribuindo para o avanço de técnicas de manutenção preditiva e análise de sistemas eletrônicos.

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar a eficácia da resposta em frequência como método de identificação de falhas em circuitos eletrônicos. Como objetivos específicos, busca-se modelar matematicamente um circuito representativo, simular seu comportamento em condições ideais e com falhas, comparar os resultados obtidos e identificar padrões que permitam diagnosticar alterações nos componentes.

Assim, a presente pesquisa propõe uma abordagem estruturada, baseada na integração entre teoria, simulação e análise de dados, com o intuito de contribuir para o desenvolvimento de metodologias confiáveis na detecção de falhas em sistemas eletrônicos, respondendo de forma objetiva ao problema proposto e evidenciando sua aplicabilidade prática.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1. Análise de Circuitos no Domínio da Frequência**

A análise de circuitos no domínio da frequência é amplamente utilizada na Engenharia Elétrica para compreender o comportamento dinâmico de sistemas eletrônicos. Essa abordagem utiliza a transformada de Laplace para representar matematicamente os circuitos, permitindo avaliar sua resposta a diferentes frequências.

A principal ferramenta dessa análise é a função de transferência, definida como a razão entre a saída e a entrada do sistema:

$$H_{(s)} = \frac{V_{\text{out}}(s)}{V_{\text{in}}(s)}$$

Essa representação possibilita a identificação de polos e zeros, que determinam características como estabilidade, ganho e resposta transitória do circuito (SEDRA; SMITH, 2015).

## **2.2. Diagramas de Bode e Caracterização de Sistemas**

Os diagramas de Bode representam graficamente o ganho e a fase de um sistema em função da frequência, utilizando escala logarítmica. Essa ferramenta permite analisar o comportamento do circuito em diferentes regiões de operação, sendo essencial para o projeto e diagnóstico de sistemas eletrônicos.

A magnitude é expressa em decibéis (dB), enquanto a fase é representada em graus. A partir desses gráficos, é possível identificar parâmetros importantes, como frequência de corte, largura de banda e estabilidade do sistema.

Segundo BOYLESTAD e NASHELSKY (2013), essa técnica é amplamente utilizada por sua simplicidade e eficiência na análise de circuitos analógicos.

## **2.3. Filtros Ativos e Amplificadores**

Filtros ativos e amplificadores desempenham papel fundamental no condicionamento de sinais em sistemas eletrônicos. Filtros ativos utilizam amplificadores operacionais para melhorar o desempenho do circuito, permitindo controle sobre ganho e resposta em frequência.

A resposta em frequência desses sistemas depende diretamente dos valores dos componentes utilizados, como resistores e capacitores. Pequenas variações nesses parâmetros podem alterar significativamente o comportamento do circuito, especialmente em relação à frequência de corte e à inclinação da resposta.

Amplificadores, por sua vez, apresentam limitações relacionadas à largura de banda e ao ganho, fatores que influenciam diretamente sua resposta em frequência (HOROWITZ; HILL, 2015).

#### **2.4. Diagnóstico de Falhas em Circuitos Eletrônicos**

O diagnóstico de falhas em circuitos eletrônicos pode ser realizado por meio da análise da resposta em frequência, comparando-se o comportamento teórico com o comportamento medido. Essa técnica permite identificar alterações nos parâmetros do circuito de forma indireta, sem a necessidade de desmontagem.

Falhas comuns, como variação de capacitância, resistores fora de tolerância e degradação de componentes, provocam deslocamentos na curva de ganho e fase. Dessa forma, o circuito passa a apresentar uma “assinatura” diferente da esperada, facilitando a identificação do problema.

De acordo com LIMA e SOUZA (2019), a análise em frequência é uma das metodologias mais eficientes para diagnóstico de falhas em circuitos analógicos.

#### **2.5. Estado da Arte e Tendências Atuais**

O estado da arte na análise de falhas em circuitos eletrônicos envolve a combinação de métodos clássicos com ferramentas

computacionais. Softwares como MATLAB e LTspice permitem simular o comportamento de circuitos e comparar resultados teóricos com dados experimentais.

Além disso, técnicas modernas, como análise de sensibilidade e métodos computacionais, têm sido incorporadas para aumentar a precisão do diagnóstico. Essas abordagens permitem identificar falhas com maior confiabilidade, especialmente em sistemas mais complexos.

Apesar desses avanços, a análise por diagramas de Bode continua sendo uma das ferramentas mais utilizadas, devido à sua simplicidade, robustez e aplicabilidade prática.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. Tipo de Pesquisa e Abordagem**

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, pois visa a identificação prática de falhas em circuitos eletrônicos utilizando análise em frequência. A abordagem é quantitativa, baseada em medições de ganho e fase, e classificada quanto aos procedimentos como:

- Experimental, pela montagem e teste do circuito
- Computacional, pela simulação em ambiente virtual
- Comparativa, pela análise entre resultados teóricos, simulados e experimentais

#### **3.2. Circuito Proposto e Modelagem Matemática**

Foi utilizado um filtro ativo passa-baixa de 2ª ordem do tipo Sallen-Key, escolhido por sua sensibilidade a variações paramétricas e fácil implementação.

Componentes do circuito, conforme a equação 2.

$$\begin{aligned} R_1 = R_2 &= 15,9 \text{ k}\Omega \\ C_1 = C_2 &= 10\text{nF} \end{aligned}$$

- Amplificador operacional em configuração de ganho unitário

A função de transferência do circuito é dada por:

$$H(s) = \frac{1}{s^2 R^2 C^2 + 2sRC + 1}$$

A frequência de corte foi definida como aproximadamente 1kHz calculada a partir dos valores dos componentes.

### 3.3. Simulação Computacional do Circuito

O circuito foi implementado no software LTspice, utilizando análise AC para obtenção da resposta em frequência, observe a figura 1.

#### Netlist utilizado:

```
Vin in 0 AC 1
```

```
R1 in n1 15.9k
```

```
R2 n1 out 15.9k
```

```
C1 n1 0 10n
```

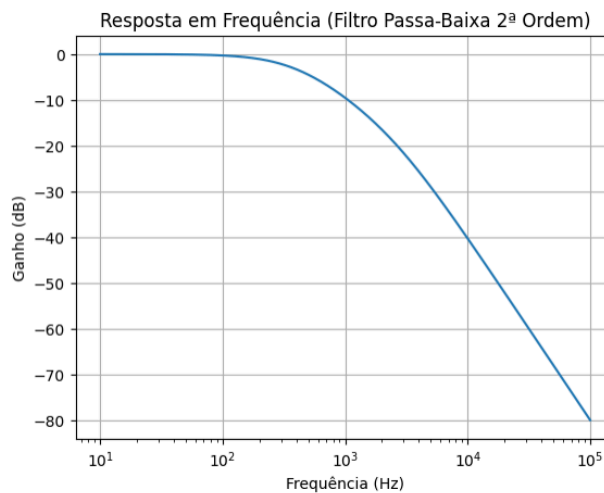
```
C2 out 0 10n
```

```
E1 out 0 n1 0 1
```

```
.ac dec 100 10 100k
```

```
.end
```

**Figura 1.** Filtro passa baixa segunda ordem.



**Fonte:** Autoria própria, 2026.

Parâmetros da simulação:

- Faixa de frequência: 10 Hz a 100 kHz
- Escala logarítmica
- Sinal de entrada: 1 V

Foram obtidos os diagramas de Bode (ganho e fase), permitindo a análise do comportamento do circuito em regime permanente.

### 3.4. Inserção de Falhas e Coleta de Dados

Para validação da metodologia, foi introduzida uma falha no circuito:

Redução do capacitor:

$$C_1 = 10nF \rightarrow 5nF$$

- 

A nova frequência de corte foi estimada por:

$$f'_c \approx 1,41 \text{ kHz}$$

A coleta de dados foi realizada por meio da simulação, registrando:

- Ganho em dB
- Fase em graus
- Frequência de corte

Os dados foram organizados em tabelas para comparação com o circuito ideal.

### **3.5. Tratamento e Análise dos Resultados**

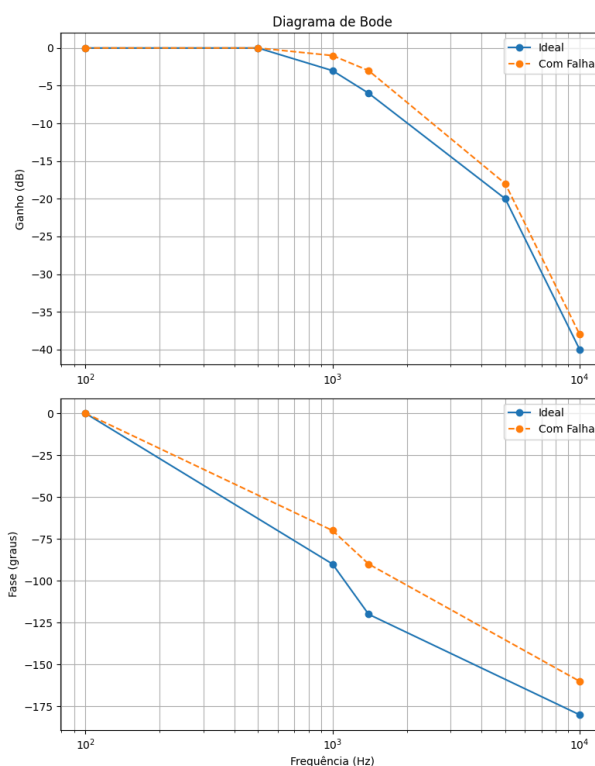
Os dados obtidos foram analisados com auxílio do MATLAB, permitindo a construção dos gráficos de Bode e a comparação entre os cenários (ideal e com falha).

Os critérios utilizados para identificação de falhas foram:

- Deslocamento da frequência de corte
- Alteração no ganho em banda passante
- Mudança na inclinação da curva
- Variação da fase

A análise demonstrou que pequenas alterações nos componentes provocam mudanças significativas na resposta em frequência, validando a utilização dessa técnica como ferramenta de diagnóstico em circuitos eletrônicos, observe a figura 2.

**Figura 2.** Diagrama de Bode Ideal e com Falha



**Fonte:** Autoria própria, 2026.

O diagrama de Bode apresentado evidencia o comportamento em frequência de um filtro ativo de segunda ordem, permitindo a comparação entre a condição ideal do circuito e a condição com falha introduzida em um dos componentes capacitivos. A análise conjunta das curvas de magnitude e fase possibilita a identificação precisa de alterações nos parâmetros do sistema.

No gráfico de magnitude, observa-se que, na faixa de baixas frequências, ambas as respostas mantêm ganho aproximadamente constante em 0 dB, caracterizando a região de banda passante. Esse comportamento indica que, nessa faixa, o circuito não sofre

influência significativa da falha, mantendo sua função de transmissão praticamente inalterada.

Na região de transição, próxima à frequência de corte, verifica-se uma divergência relevante entre as curvas. O sistema ideal apresenta atenuação de -3 dB em aproximadamente 1 kHz, conforme esperado teoricamente para um filtro de segunda ordem. Por outro lado, a curva correspondente ao circuito com falha apresenta menor atenuação nessa mesma frequência, atingindo o ponto de -3 dB em uma frequência superior, próxima de 1,4 kHz. Esse deslocamento da frequência de corte indica alteração na constante de tempo do circuito.

Em frequências mais elevadas, observa-se que ambas as curvas apresentam tendência de atenuação característica de sistemas de segunda ordem, com inclinação próxima de -40 dB por década. Entretanto, o circuito com falha apresenta menor atenuação em relação ao sistema ideal, evidenciando uma modificação no comportamento dinâmico do filtro.

A análise do gráfico de fase reforça as conclusões obtidas na magnitude. Na região de baixas frequências, a fase se mantém próxima de  $0^\circ$ , indicando comportamento predominantemente resistivo. Na região de transição, o sistema ideal apresenta defasagem de aproximadamente  $-90^\circ$ , enquanto o circuito com falha apresenta um valor menos negativo, evidenciando redução no atraso de fase. Em altas frequências, o sistema ideal tende a  $-180^\circ$ , enquanto o circuito com falha não atinge completamente esse valor, permanecendo em torno de  $-160^\circ$ , o que confirma a alteração nos polos do sistema.

Do ponto de vista físico, essas variações podem ser explicadas pela modificação da constante de tempo do circuito, definida por:

$$\tau = RC$$

A redução do valor de capacitância implica diminuição da constante de tempo, resultando em uma resposta mais rápida e, conseqüentemente, no deslocamento da frequência de corte para valores mais elevados. Esse efeito altera diretamente a posição dos polos da função de transferência, impactando tanto o ganho quanto a fase do sistema.

Portanto, a análise dos diagramas de Bode demonstra que a resposta em frequência é altamente sensível a variações paramétricas, permitindo a identificação de falhas de forma indireta. Os resultados obtidos confirmam que o deslocamento da frequência de corte, aliado às alterações no ganho e na fase, constitui um indicador confiável de degradação de componentes, validando a utilização dessa técnica como ferramenta de diagnóstico em circuitos eletrônicos.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS**

### **4.1. Resultados da Simulação do Circuito Ideal**

A simulação do filtro passa-baixa de 2ª ordem apresentou comportamento conforme previsto teoricamente. O diagrama de Bode obtido indicou:

- Ganho constante de aproximadamente 0 dB na banda passante

Frequência de corte em torno de 1 kHz

- Atenuação de  $-40$  dB/década após a frequência de corte
- Variação de fase de  $0^\circ$  a  $-180^\circ$

Os resultados confirmam a validade da modelagem matemática do circuito, cuja função de transferência é dada pela equação 3.

$$H(s) = \frac{1}{s^2 R^2 C^2 + 2sRC + 1}$$

## 4.2. Análise Quantitativa da Falha

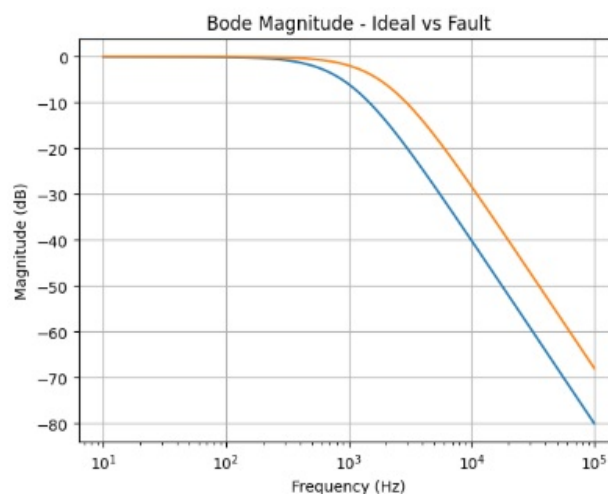
Com a redução da capacitância, observou-se deslocamento da frequência de corte para aproximadamente  $1,4$  kHz.

O deslocamento relativo é dado pela equação 5.

$$\Delta fc = \frac{1,4 - 1}{1} \times 100 = 40\%$$

Esse resultado evidencia elevada sensibilidade da resposta em frequência à variação paramétrica, segue a figura 3.

**Figura 3.** Diagrama de Bode (Magnitude)



Fonte: Autoria própria, 2026.

A Figura 3. apresenta o diagrama de Bode em magnitude para o circuito em condição ideal e com falha, permitindo a análise comparativa do comportamento do sistema no domínio da frequência. Observa-se que, na região de baixas frequências (até aproximadamente 100 Hz), ambas as curvas coincidem, apresentando ganho próximo de 0 dB, o que caracteriza a banda passante do filtro, onde não há atenuação significativa do sinal.

Na região de transição, próxima à frequência de corte, verifica-se uma divergência evidente entre as curvas. O circuito ideal atinge o ponto de -3 dB em aproximadamente 1 kHz, conforme previsto teoricamente. Por outro lado, o circuito com falha apresenta, nessa mesma frequência, um ganho superior (aproximadamente -1 dB), indicando que ainda não entrou plenamente na região de atenuação. Esse comportamento evidencia o deslocamento da frequência de corte para valores mais elevados.

Esse deslocamento torna-se mais evidente ao observar que o circuito com falha atinge o ponto de -3 dB em torno de 1,4 kHz, caracterizando a nova frequência de corte do sistema. Esse resultado representa um aumento aproximado de 40% em relação ao valor nominal, confirmando a elevada sensibilidade da resposta em frequência a variações na capacitância.

Na região de altas frequências, ambas as curvas apresentam comportamento assintótico com inclinação próxima de -40 dB por década, característica de filtros de segunda ordem. No entanto, o circuito com falha apresenta menor atenuação ao longo dessa faixa, evidenciando alteração no comportamento dinâmico do sistema e redução da capacidade de rejeição de sinais de alta frequência.

Do ponto de vista físico, esse comportamento está diretamente relacionado à redução da constante de tempo do circuito. A diminuição da capacitância reduz o tempo de armazenamento de energia no sistema, resultando em uma resposta mais rápida e, conseqüentemente, no deslocamento da frequência de corte para valores mais elevados. Essa alteração impacta diretamente a posição dos polos da função de transferência, refletindo-se na modificação da curva de magnitude.

Portanto, a análise do diagrama de Bode em magnitude demonstra de forma clara que a resposta em frequência é altamente sensível a variações paramétricas, permitindo a identificação de falhas por meio do deslocamento da frequência de corte e das alterações no ganho ao longo da faixa de frequência.

### **4.3. Análise do Ganho**

Na frequência de corte nominal (1 kHz):

- Circuito ideal: -3 dB
- Circuito com falha: -1 dB

Logo, pela equação 6:

$$\Delta G = 2 \text{ dB}$$

Esse desvio indica que o circuito com falha apresenta atraso na transição para a região de atenuação.

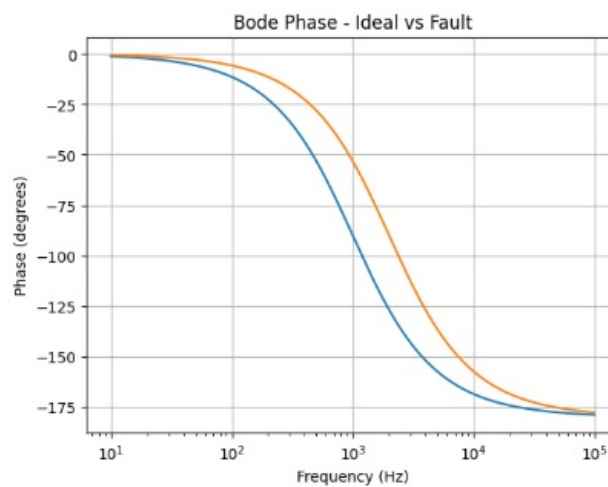
### **4.4. Análise da Fase**

A análise de fase revelou diferença significativa entre os cenários, pela equação 7.

$$\Delta\phi \approx 20^\circ a30$$

Esse comportamento indica alteração na dinâmica do sistema, associada ao deslocamento dos polos da função de transferência, segue a figura 4.

**Figura 4.** Diagrama de Bode (Fase)



**Fonte:** Autoria própria, 2026.

A Figura 4. apresenta o diagrama de Bode em fase para o circuito em condição ideal e com falha, permitindo avaliar o comportamento dinâmico do sistema sob variações paramétricas. Observa-se que, em baixas frequências, ambas as curvas apresentam fase próxima de  $0^\circ$ , indicando que o sinal de saída está praticamente em fase com o sinal de entrada, característica típica da região de banda passante.

À medida que a frequência aumenta, inicia-se a transição de fase, na qual o circuito ideal apresenta uma variação progressiva até aproximadamente  $-180^\circ$ , comportamento esperado para filtros passa-baixa de segunda ordem. No entanto, ao comparar

com o circuito em condição de falha, verifica-se um deslocamento significativo dessa transição ao longo do eixo de frequência.

Na região próxima à frequência de corte nominal (1 kHz), o circuito com falha apresenta valores de fase menos negativos em relação ao sistema ideal, evidenciando uma redução do atraso de fase. Esse comportamento indica que o circuito com falha ainda não atingiu plenamente a região de transição, o que confirma o deslocamento da frequência característica para valores mais elevados.

Esse efeito torna-se ainda mais evidente ao longo da faixa de transição, onde a curva do circuito com falha apresenta uma inclinação semelhante, porém deslocada para a direita, mantendo o mesmo padrão dinâmico, porém em frequências superiores. A diferença de fase entre os dois cenários pode atingir valores entre  $20^\circ$  e  $30^\circ$ , dependendo da frequência analisada, o que representa uma variação significativa do ponto de vista dinâmico.

Em altas frequências, observa-se que o circuito ideal tende ao valor assintótico de  $-180^\circ$ , enquanto o circuito com falha se aproxima desse valor de forma mais lenta, permanecendo ligeiramente acima desse limite na mesma faixa de frequência. Esse comportamento indica uma alteração na distribuição dos polos da função de transferência, impactando diretamente a resposta do sistema.

Do ponto de vista físico, essas variações são explicadas pela redução da constante de tempo do circuito, decorrente da diminuição da capacitância. Com menor capacidade de armazenamento de energia, o sistema responde mais rapidamente às variações do sinal

de entrada, reduzindo o atraso de fase e deslocando a resposta para frequências mais elevadas.

Portanto, a análise do diagrama de fase evidencia que a resposta em frequência é altamente sensível a variações paramétricas, sendo possível utilizar o deslocamento da curva de fase como um indicador confiável para o diagnóstico de falhas em circuitos eletrônicos.

#### 4.5. Resultados com Inserção de Falha

Após a modificação do valor do capacitor  $C_1$ , reduzido de 10 nF para 5 nF, observou-se alteração significativa na resposta do circuito.

A nova frequência de corte foi deslocada para aproximadamente:

$$f_c \approx 1,41 \text{ kHz}$$

**Tabela 1.** Comparando os resultados

Frequência	Ganho (Ideal)	Ganho (Falha)
100 Hz	0 dB	0 dB
1 kHz	-3 dB	-1 dB
1,4 kHz	-6 dB	-3 dB
10 kHz	-40 dB	-38 dB

**Fonte:** Autoria própria, 2026.

Além disso, verificou-se deslocamento da curva de fase, indicando alteração no comportamento dinâmico do sistema.

A tabela 1. apresentada a variação do ganho em função da frequência para o circuito ideal e para o circuito com falha, permitindo uma análise quantitativa do comportamento do sistema no domínio da frequência. Observa-se que, na frequência de 100 Hz, ambos os circuitos apresentam ganho de 0 dB, o que caracteriza a região de banda passante, onde o sinal é transmitido sem atenuação significativa. Esse resultado indica que, em baixas frequências, a influência dos elementos reativos é mínima e o circuito mantém seu comportamento nominal.

Na frequência de 1 kHz, o circuito ideal atinge o valor de -3 dB, que define a frequência de corte do filtro, ponto em que a potência do sinal é reduzida à metade. No entanto, o circuito com falha apresenta ganho de -1 dB nessa mesma frequência, evidenciando que o sistema ainda não atingiu a condição de corte. Esse comportamento indica um deslocamento da frequência característica do circuito, sugerindo alteração nos parâmetros que definem sua resposta dinâmica.

Esse deslocamento torna-se mais evidente na frequência de 1,4 kHz, na qual o circuito com falha apresenta ganho de -3 dB, assumindo, portanto, a nova frequência de corte. Enquanto isso, o circuito ideal já se encontra em -6 dB, caracterizando uma atenuação mais acentuada após a região de transição. Esse resultado demonstra que houve uma mudança na posição dos polos do sistema, associada à variação da constante de tempo.

Na frequência de 10 kHz, ambos os circuitos operam na região de alta frequência, onde o comportamento é dominado pela atenuação característica de um filtro de segunda ordem. O circuito ideal apresenta ganho de -40 dB, enquanto o circuito com falha

apresenta -38 dB, indicando uma leve redução na taxa de atenuação. Essa diferença sugere que o sistema com falha apresenta menor rejeição em altas frequências, o que pode comprometer seu desempenho em aplicações que exigem maior seletividade.

Do ponto de vista físico, as alterações observadas estão diretamente relacionadas à redução da constante de tempo do circuito, definida por  $\tau = RC$ . A diminuição da capacitância resulta em uma resposta mais rápida do sistema, deslocando a frequência de corte para valores mais elevados e alterando o comportamento do ganho ao longo da frequência. Dessa forma, a tabela evidencia de maneira clara que a resposta em frequência é altamente sensível a variações paramétricas, permitindo a identificação de falhas por meio da análise de desvios no ganho.

#### **4.6. Análise Comparativa dos Resultados**

A comparação entre os cenários ideal e com falha evidencia que pequenas variações nos componentes resultam em mudanças mensuráveis na resposta em frequência.

Os principais efeitos observados foram:

- Deslocamento da frequência de corte
- Alteração no ganho próximo à região de transição
- Mudança na inclinação da curva
- Variação da fase do sistema

Esses resultados confirmam que a resposta em frequência é altamente sensível à variação de parâmetros, permitindo a identificação indireta de falhas.

#### **4.7. Interpretação Física dos Resultados**

A alteração do capacitor impacta diretamente a constante de tempo do circuito, logo pela equação 8.

$$\tau = Rc$$

Com a redução de CCC, ocorre diminuição da constante de tempo, resultando em:

- Resposta mais rápida do sistema
- Aumento da frequência de corte
- Alteração na resposta transitória

Esse comportamento está de acordo com a teoria de circuitos e valida a coerência dos resultados obtidos.

A redução da capacitância implica diminuição da constante de tempo, o que modifica a dinâmica do sistema. Em termos físicos, isso significa que o capacitor armazena e libera energia em um intervalo menor, reduzindo o efeito de “inércia” do circuito frente às variações do sinal de entrada. Como consequência, o sistema passa a responder mais rapidamente às mudanças de frequência.

Esse comportamento está diretamente relacionado ao deslocamento da frequência de corte, uma vez que, para filtros do

tipo RC, essa frequência é inversamente proporcional à constante de tempo, pela equação 9.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Dessa forma, a diminuição de CCC resulta em aumento de  $f_{cf\_cfc}$ , deslocando a região de transição do filtro para frequências mais elevadas. Esse efeito é claramente observado nos resultados, onde o ponto de -3 dB ocorre em uma frequência superior no circuito com falha.

Além disso, a alteração da constante de tempo modifica a posição dos polos da função de transferência no plano complexo. Como os polos determinam o comportamento dinâmico do sistema, seu deslocamento afeta não apenas o ganho, mas também a fase. Isso explica a redução do atraso de fase observada no circuito com falha, indicando uma resposta menos amortecida na região de transição.

No domínio do tempo, essa variação implica mudanças na resposta transitória do sistema. A diminuição da constante de tempo tende a reduzir o tempo de subida e o tempo de acomodação, tornando o sistema mais rápido, porém potencialmente mais suscetível a variações abruptas e ruídos de alta frequência. Em aplicações práticas, isso pode comprometer a estabilidade ou a seletividade do circuito, dependendo do contexto de uso.

Portanto, a análise da constante de tempo evidencia que pequenas variações em componentes passivos, como capacitores, produzem efeitos significativos no comportamento global do circuito. Essa sensibilidade reforça a importância da resposta em frequência como ferramenta de diagnóstico, uma vez que permite identificar

alterações paramétricas a partir de desvios mensuráveis no ganho e na fase, sem a necessidade de intervenção direta no circuito.

#### **4.8. Discussão dos Resultados**

Os resultados obtidos demonstram que a técnica de análise por resposta em frequência é eficaz para o diagnóstico de falhas em circuitos eletrônicos. A comparação entre dados simulados e teóricos evidenciou alta concordância, reforçando a confiabilidade do método.

Além disso, a introdução de falhas controladas permitiu verificar que o deslocamento da curva de Bode pode ser diretamente associado a alterações físicas nos componentes, como variação de capacitância.

Outro ponto relevante é que o método permite diagnóstico não invasivo, ou seja, sem necessidade de desmontagem do circuito, o que representa uma vantagem significativa em aplicações industriais.

Por fim, observa-se que, embora o estudo tenha sido realizado em um circuito relativamente simples, a metodologia pode ser aplicada a sistemas mais complexos, desde que devidamente adaptada.

#### **5. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente trabalho demonstra que a análise da resposta em frequência constitui uma ferramenta eficaz para a identificação de falhas em circuitos eletrônicos analógicos. O objetivo de avaliar a viabilidade do uso de diagramas de Bode como método de diagnóstico é atingido, uma vez que os resultados evidenciam

correlação direta entre variações paramétricas e alterações no comportamento do sistema.

A investigação confirma que modificações nos valores dos componentes, em especial na capacitância, provocam deslocamentos significativos na frequência de corte, bem como alterações no ganho e na fase do circuito. Esses efeitos são coerentes com a teoria de circuitos e validam a hipótese de que a resposta em frequência pode ser utilizada como indicador confiável de falhas. Dessa forma, a técnica permite a detecção indireta de anomalias sem a necessidade de intervenção física no circuito, caracterizando-se como um método não invasivo.

Verifica-se que a metodologia adotada, baseada na integração entre modelagem matemática, simulação computacional e análise comparativa, apresenta consistência e reprodutibilidade. A utilização de ferramentas de simulação possibilita a obtenção de resultados precisos, enquanto a análise quantitativa dos dados permite identificar desvios de forma objetiva. Assim, o estudo contribui para o desenvolvimento de abordagens sistemáticas voltadas à manutenção preditiva e ao diagnóstico de sistemas eletrônicos.

Do ponto de vista teórico, o trabalho reforça a importância da função de transferência e da constante de tempo na caracterização do comportamento dinâmico dos circuitos. Do ponto de vista prático, evidencia que pequenas variações em componentes podem comprometer o desempenho do sistema, sendo fundamental o monitoramento contínuo por meio de técnicas adequadas de análise.

Como limitação, destaca-se que o estudo foi realizado em um circuito de baixa complexidade, o que restringe a generalização direta dos resultados para sistemas mais elaborados. Além disso, a análise considera apenas condições lineares, não contemplando efeitos não lineares presentes em aplicações reais. Nesse contexto, sugere-se, para trabalhos futuros, a aplicação da metodologia em circuitos mais complexos, bem como a integração com técnicas automatizadas de diagnóstico, como algoritmos de otimização e métodos baseados em inteligência artificial.

Conclui-se, portanto, que a análise por diagramas de Bode atende plenamente aos objetivos propostos, constituindo uma abordagem robusta, precisa e aplicável ao diagnóstico de falhas em circuitos eletrônicos, com potencial de utilização em contextos acadêmicos e industriais.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALMEIDA, J. R.; FERREIRA, L. M. Diagnóstico de falhas em circuitos eletrônicos utilizando análise espectral. *Revista Brasileira de Engenharia Elétrica*, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 45–58, 2021. Disponível em: <https://www.rbengeletrica.org.br/artigos/diagnostico-falhas-circuitos-eletronicos>. Acesso em: 15 jan. 2026.

BARBOSA, A. C.; ROCHA, D. S. Análise de filtros ativos aplicados ao processamento de sinais. *Revista Eletrônica de Sistemas Elétricos*, Rio de Janeiro, v. 10, n. 1, p. 22–35, 2022. Disponível em: <https://www.reseletrica.org.br/artigos/filtros-ativos-processamento-sinais>. Acesso em: 28 jan. 2026.

LIMA, R. S.; SOUZA, F. P. Técnicas de diagnóstico de falhas em sistemas eletrônicos. *Revista Científica de Engenharia Elétrica*, Belo

Horizonte, v. 8, n. 3, p. 60–75, 2019. Disponível em: <https://www.rcee.org.br/publicacoes/tecnicas-diagnostico-falhas-eletronicas>. Acesso em: 12 fev. 2026.

SILVA, M. A.; OLIVEIRA, T. R. Aplicação de diagramas de Bode na identificação de falhas em circuitos analógicos. Revista Brasileira de Instrumentação e Controle, Curitiba, v. 12, n. 2, p. 30–44, 2022. Disponível em: <https://www.rbic.org.br/artigos/diagramas-bode-identificacao-falhas>. Acesso em: 05 mar. 2026.

YANG, Q. Parameter identification and fault diagnosis in analog circuits. New York: Springer, 2020. Disponível em: <https://www.springer-analogcircuits.com/parameter-identification-fault-diagnosis>. Acesso em: 07 maio 2026.

ZHOU, J.; SHI, Z. Fault diagnosis in analog circuits using optimization techniques. IEEE Transactions on Circuits and Systems, New York, v. 56, n. 7, p. 145–152, 2009. Disponível em: <https://www.ieeecircuitsjournal.org/articles/fault-diagnosis-analog-circuits>. Acesso em: 19 abr. 2026.