

Sensor Baseado em Cavidade Ressonante com Aplicação em Medição do Percentual de Gordura do Leite

Celso Martines Leite

Orientador: Fernando Rangel de Sousa

3 de julho de 2017

Sumário

- 1 Introdução
- 2 Revisão teórica
- 3 Projeto de um sensor
- 4 Prova de conceito
- 5 Conclusões

Sumário

- 1 Introdução
- 2 Revisão teórica
- 3 Projeto de um sensor
- 4 Prova de conceito
- 5 Conclusões

Introdução

Objetivo do trabalho:

Introdução

Objetivo do trabalho:

Projetar um sensor com base na tecnologia de cavidades ressonantes capaz de medir o percentual de gordura no leite.

Introdução

Objetivo do trabalho:

Projetar um sensor com base na tecnologia de cavidades ressonantes capaz de medir o percentual de gordura no leite.

Motivação:

Introdução

Objetivo do trabalho:

Projetar um sensor com base na tecnologia de cavidades ressonantes capaz de medir o percentual de gordura no leite.

Motivação:

Crescente demanda por produtos lácteos de melhor qualidade e melhoria no rendimento de produção na indústria de laticínios.

Introdução

Objetivo do trabalho:

Projetar um sensor com base na tecnologia de cavidades ressonantes capaz de medir o percentual de gordura no leite.

Motivação:

Crescente demanda por produtos lácteos de melhor qualidade e melhoria no rendimento de produção na indústria de laticínios.

Aplicações:

Introdução

Objetivo do trabalho:

Projetar um sensor com base na tecnologia de cavidades ressonantes capaz de medir o percentual de gordura no leite.

Motivação:

Crescente demanda por produtos lácteos de melhor qualidade e melhoria no rendimento de produção na indústria de laticínios.

Aplicações:

- Análise dos níveis de gordura no leite durante a coleta e o transporte.

Introdução

Objetivo do trabalho:

Projetar um sensor com base na tecnologia de cavidades ressonantes capaz de medir o percentual de gordura no leite.

Motivação:

Crescente demanda por produtos lácteos de melhor qualidade e melhoria no rendimento de produção na indústria de laticínios.

Aplicações:

- Análise dos níveis de gordura no leite durante a coleta e o transporte.
- Sistema automático de controle do percentual de gordura do leite no processo de padronização.

Sumário

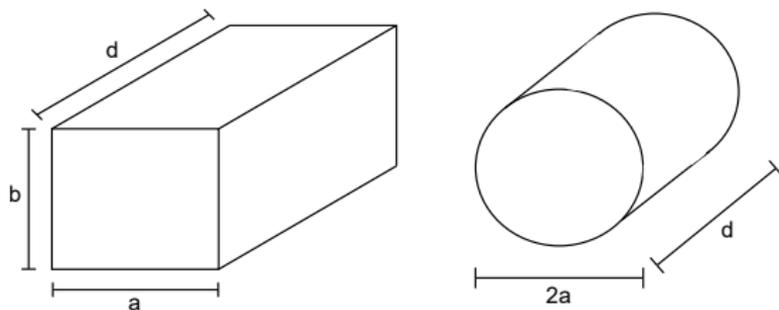
- 1 Introdução
- 2 Revisão teórica**
- 3 Projeto de um sensor
- 4 Prova de conceito
- 5 Conclusões

Cavidade ressonante

As cavidades ressonantes são estruturas metálicas que armazenam energia na forma de campos eletromagnéticos.

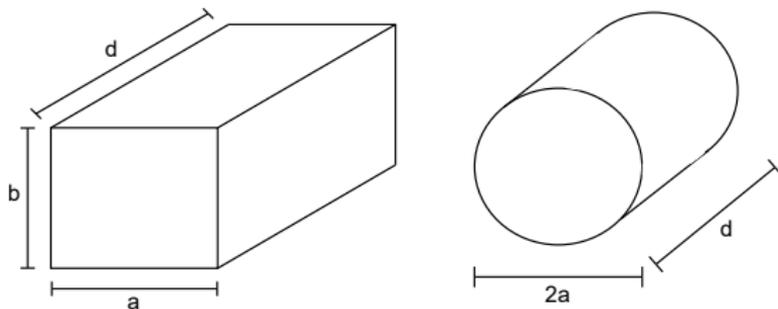
Cavidade ressonante

As cavidades ressonantes são estruturas metálicas que armazenam energia na forma de campos eletromagnéticos.



Cavidade ressonante

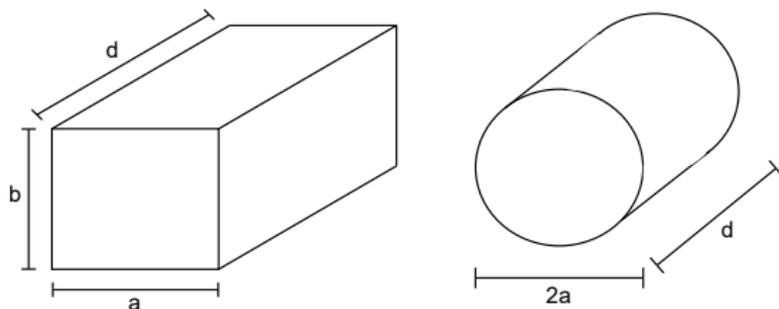
As cavidades ressonantes são estruturas metálicas que armazenam energia na forma de campos eletromagnéticos.



Modos de propagação:

Cavidade ressonante

As cavidades ressonantes são estruturas metálicas que armazenam energia na forma de campos eletromagnéticos.

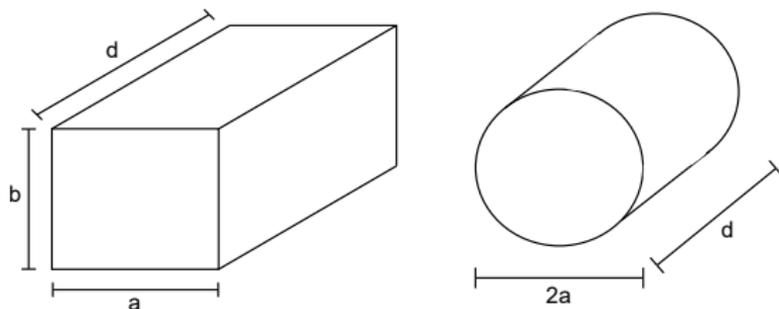


Modos de propagação:

- TE_{mnl} → Campo elétrico é perpendicular à direção de propagação;

Cavidade ressonante

As cavidades ressonantes são estruturas metálicas que armazenam energia na forma de campos eletromagnéticos.



Modos de propagação:

- TE_{mnl} → Campo **elétrico** é perpendicular à direção de propagação;
- TM_{mnl} → Campo **magnético** é perpendicular à direção de propagação.

Cavidade ressonante

Cavidade cilíndrica:

Cavidade ressonante

Cavidade cilíndrica:

- $TE_{mnl} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p'_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2};$

Cavidade ressonante

Cavidade cilíndrica:

- $TE_{mnl} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p'_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2};$
- $TM_{mnl} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}.$

Cavidade ressonante

Cavidade cilíndrica:

- $TE_{mnl} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p'_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2};$
- $TM_{mnl} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}.$

Permissividade do material dielétrico e a frequência de ressonância da cavidade:

Cavidade ressonante

Cavidade cilíndrica:

- $TE_{mnl} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p'_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2};$
- $TM_{mnl} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}.$

Permissividade do material dielétrico e a frequência de ressonância da cavidade:

- $Re\{\sqrt{\epsilon_r}\} = \frac{f_{r0}}{f_r}.$

Cavidade ressonante

Cavidade **cilíndrica**:

- $TE_{mnl} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p'_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$;
- $TM_{mnl} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$.

Permissividade do material dielétrico e a **frequência de ressonância** da cavidade:

- $Re\{\sqrt{\epsilon_r}\} = \frac{f_{r0}}{f_r}$.

O **fator de qualidade** Q indica o quão rápido a energia armazenada é dissipada.

Permissividade

A **característica elétrica** de cada material depende de suas propriedades dielétricas.

Permissividade

A **característica elétrica** de cada material depende de suas propriedades dielétricas.

A **permissividade** de um material:

Permissividade

A **característica elétrica** de cada material depende de suas propriedades dielétricas.

A **permissividade** de um material:

- Descreve a **interação** deste material com um campo elétrico e pode variar com a frequência, temperatura, orientação, composição da mistura, pressão e a estrutura molecular do material.

Permissividade

A **característica elétrica** de cada material depende de suas propriedades dielétricas.

A **permissividade** de um material:

- Descreve a **interação** deste material com um campo elétrico e pode variar com a frequência, temperatura, orientação, composição da mistura, pressão e a estrutura molecular do material.
- Sua parte real é uma medida de **quanta energia** de um campo elétrico externo é armazenada em um certo material.

Permissividade

A **característica elétrica** de cada material depende de suas propriedades dielétricas.

A **permissividade** de um material:

- Descreve a **interação** deste material com um campo elétrico e pode variar com a frequência, temperatura, orientação, composição da mistura, pressão e a estrutura molecular do material.
- Sua parte real é uma medida de **quanta energia** de um campo elétrico externo é armazenada em um certo material.
- Sua parte imaginária representa o **quão dissipativo** este material é na presença de um campo elétrico externo.

Sumário

- 1 Introdução
- 2 Revisão teórica
- 3 Projeto de um sensor**
- 4 Prova de conceito
- 5 Conclusões

Problema

→ Material a ser analisado:

Problema

→ Material a ser analisado: Leite

Problema

→ Material a ser analisado: Leite

$$\epsilon' = a_1 F + b_1, \quad (1)$$

Problema

→ Material a ser analisado: Leite

$$\epsilon' = a_1 F + b_1, \quad (1)$$

$$\epsilon'' = a_2 F + b_2, \quad (2)$$

Problema

→ Material a ser analisado: **Leite**

$$\epsilon' = a_1 F + b_1, \quad (1)$$

$$\epsilon'' = a_2 F + b_2, \quad (2)$$

- F **não altera** a forma com que ϵ' e ϵ'' variam com a frequência

Problema

→ Material a ser analisado: **Leite**

$$\epsilon' = a_1 F + b_1, \quad (1)$$

$$\epsilon'' = a_2 F + b_2, \quad (2)$$

- F **não altera** a forma com que ϵ' e ϵ'' variam com a frequência
- ϵ'' é mínimo para frequências entre **1 GHz e 2 GHz**

Problema

→ Material a ser analisado: **Leite**

$$\epsilon' = a_1 F + b_1, \quad (1)$$

$$\epsilon'' = a_2 F + b_2, \quad (2)$$

- F **não altera** a forma com que ϵ' e ϵ'' variam com a frequência
- ϵ'' é mínimo para frequências entre **1 GHz e 2 GHz**
- Tangente de perdas **aumenta** com a temperatura

Modelo de permissividade efetiva

→ Estimar a permissividade efetiva

Modelo de permissividade efetiva

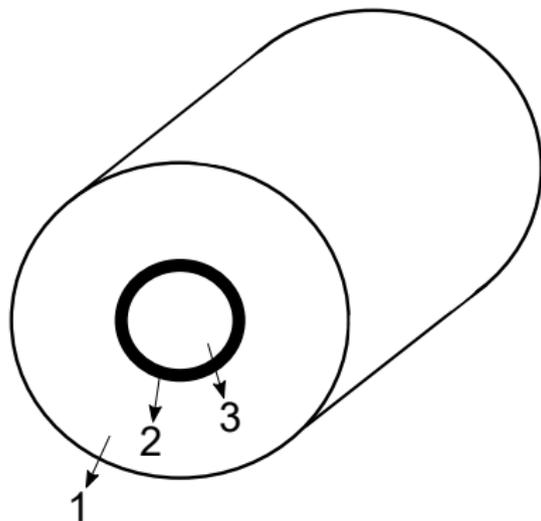
→ Estimar a permissividade efetiva

$$\frac{\epsilon_i - \epsilon_{eff}}{\epsilon_i - \epsilon_e} = (1 - V) \left(\frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_e} \right)^{1/3} \quad (3)$$

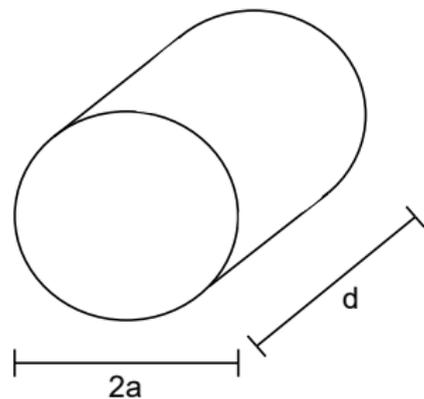
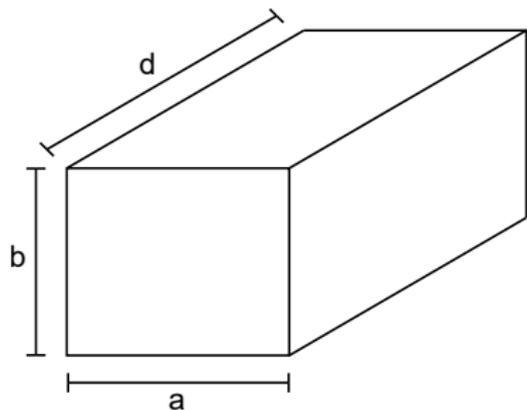
Modelo de permissividade efetiva

→ Estimar a permissividade efetiva

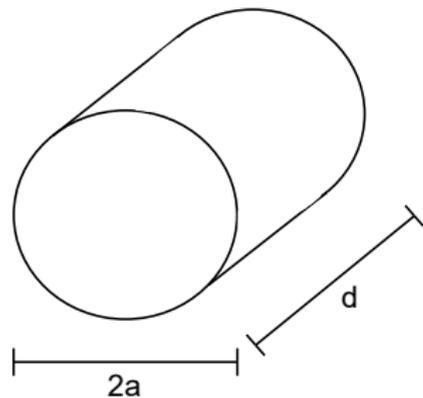
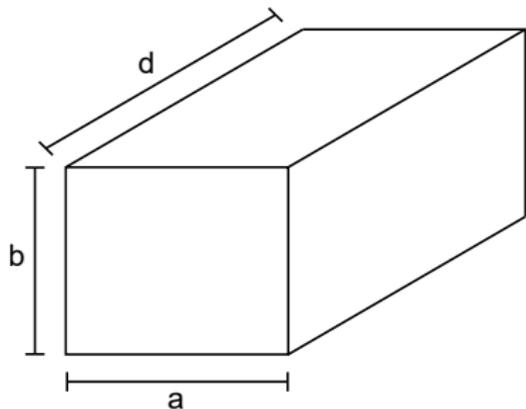
$$\frac{\epsilon_i - \epsilon_{eff}}{\epsilon_i - \epsilon_e} = (1 - V) \left(\frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_e} \right)^{1/3} \quad (3)$$



Geometria da cavidade

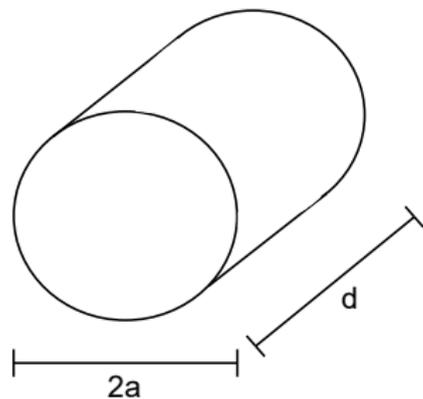
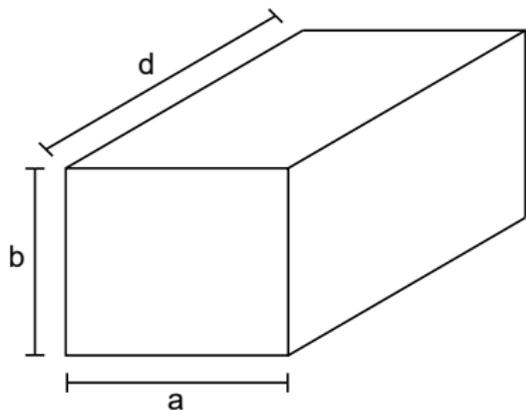


Geometria da cavidade



- Fator de qualidade Q é 8% maior na cavidade cilíndrica.

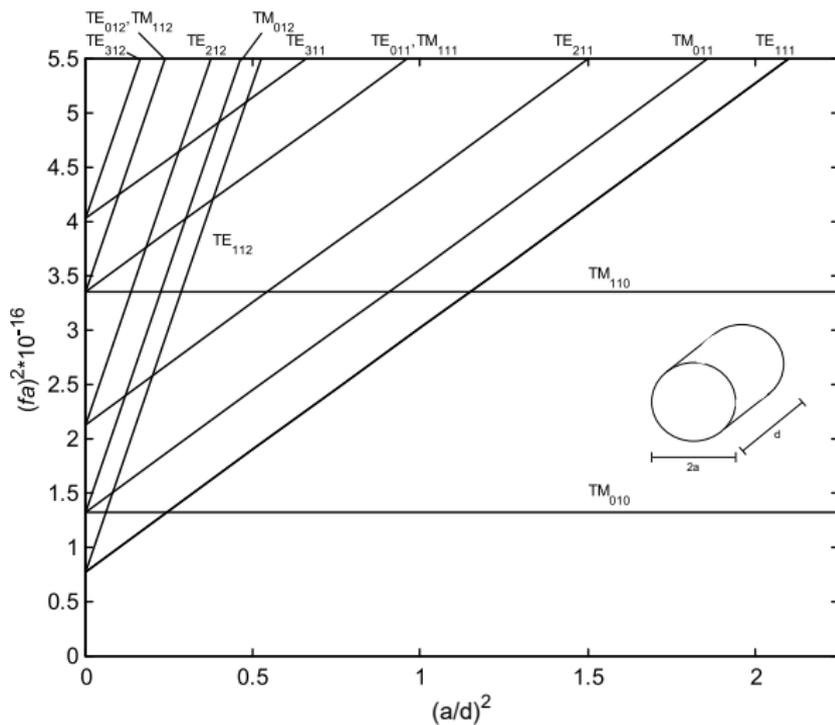
Geometria da cavidade



- Fator de qualidade Q é 8% maior na cavidade cilíndrica.
- Aplicação pode influenciar na escolha.

Modo de operação

Modo de operação

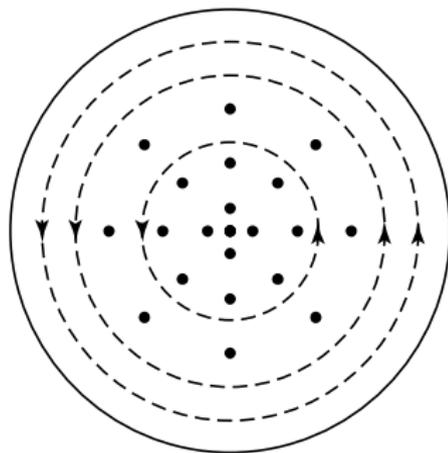


Modo de operação

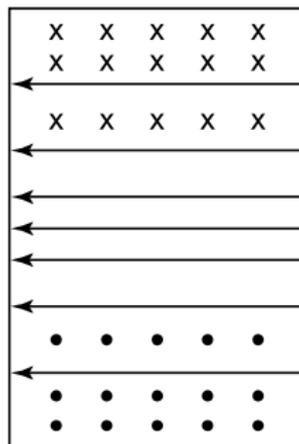
→ Modo TM_{010}

Modo de operação

→ Modo TM_{010}



H \dashrightarrow
E \longrightarrow



Estimativa do tamanho da cavidade

Modo TM_{010}

Estimativa do tamanho da cavidade

$$\text{Modo } TM_{010} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$$

Estimativa do tamanho da cavidade

$$\text{Modo } TM_{010} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$$

- **Independente** do comprimento da cavidade.

Estimativa do tamanho da cavidade

$$\text{Modo } TM_{010} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$$

- **Independente** do comprimento da cavidade.

Cavidade cilíndrica preenchida com ar:

Estimativa do tamanho da cavidade

$$\text{Modo } TM_{010} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$$

- **Independente** do comprimento da cavidade.

Cavidade cilíndrica preenchida com ar:

- Frequência de ressonância em **2 GHz**

Estimativa do tamanho da cavidade

$$\text{Modo } TM_{010} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$$

- **Independente** do comprimento da cavidade.

Cavidade cilíndrica preenchida com ar:

- Frequência de ressonância em **2 GHz** → raio de **57,3 mm**

Estimativa do tamanho da cavidade

$$\text{Modo } TM_{010} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$$

- **Independente** do comprimento da cavidade.

Cavidade cilíndrica preenchida com ar:

- Frequência de ressonância em **2 GHz** → raio de **57,3 mm**

Distância entre o modo TM_{010} e o modo TE_{111} :

Estimativa do tamanho da cavidade

$$\text{Modo } TM_{010} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$$

- **Independente** do comprimento da cavidade.

Cavidade cilíndrica preenchida com ar:

- Frequência de ressonância em **2 GHz** → raio de **57,3 mm**

Distância entre o modo TM_{010} e o modo TE_{111} :

- **10%** da frequência do modo dominante

Estimativa do tamanho da cavidade

$$\text{Modo } TM_{010} \rightarrow f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$$

- **Independente** do comprimento da cavidade.

Cavidade cilíndrica preenchida com ar:

- Frequência de ressonância em **2 GHz** → raio de **57,3 mm**

Distância entre o modo TM_{010} e o modo TE_{111} :

- **10%** da frequência do modo dominante → comprimento de **95 mm**

Preenchimento do vão da cavidade

Permissividade do material preenchendo a cavidade:

Preenchimento do vão da cavidade

Permissividade do material preenchendo a cavidade:

- **Frequência** de ressonância

Preenchimento do vão da cavidade

Permissividade do material preenchendo a cavidade:

- **Frequência** de ressonância → **Tamanho** da cavidade ressonante.

Preenchimento do vão da cavidade

Permissividade do material preenchendo a cavidade:

- **Frequência** de ressonância → **Tamanho** da cavidade ressonante.

Algumas opções:

Preenchimento do vão da cavidade

Permissividade do material preenchendo a cavidade:

- **Frequência** de ressonância → **Tamanho** da cavidade ressonante.

Algumas opções:

- Ar

Preenchimento do vão da cavidade

Permissividade do material preenchendo a cavidade:

- **Frequência** de ressonância → **Tamanho** da cavidade ressonante.

Algumas opções:

- Ar
- Água

Preenchimento do vão da cavidade

Permissividade do material preenchendo a cavidade:

- **Frequência** de ressonância → **Tamanho** da cavidade ressonante.

Algumas opções:

- Ar
- Água
- Espuma dielétrica

Preenchimento do vão da cavidade

Permissividade do material preenchendo a cavidade:

- **Frequência** de ressonância → **Tamanho** da cavidade ressonante.

Algumas opções:

- Ar
- Água
- Espuma dielétrica

→ **Custo e dificuldade** de implementação do sensor.

Preenchimento do vão da cavidade

Permissividade do material preenchendo a cavidade:

- **Frequência** de ressonância → **Tamanho** da cavidade ressonante.

Algumas opções:

- **Ar**
- **Água**
- **Espuma dielétrica**

→ **Custo e dificuldade** de implementação do sensor.

Posição da amostra

→ Sensibilidade do sensor

Posição da amostra

→ Sensibilidade do sensor

Sensibilidade **máxima** (permissividade):

Posição da amostra

→ Sensibilidade do sensor

Sensibilidade **máxima** (permissividade):

- Colocar o material sendo analisado no ponto onde o campo **E** é **máximo**.

Posição da amostra

→ Sensibilidade do sensor

Sensibilidade **máxima** (permissividade):

- Colocar o material sendo analisado no ponto onde o campo **E** é **máximo**.

Relação $\frac{V_s}{V_c}$

Posição da amostra

→ Sensibilidade do sensor

Sensibilidade **máxima** (permissividade):

- Colocar o material sendo analisado no ponto onde o campo **E** é **máximo**.

Relação $\frac{V_s}{V_c}$ → importante ao se trabalhar com materiais de **altas perdas**.

Posição da amostra

→ Sensibilidade do sensor

Sensibilidade **máxima** (permissividade):

- Colocar o material sendo analisado no ponto onde o campo **E** é **máximo**.

Relação $\frac{V_s}{V_c}$ → importante ao se trabalhar com materiais de **altas perdas**.

Raio inicial do duto PVC:

Posição da amostra

→ Sensibilidade do sensor

Sensibilidade **máxima** (permissividade):

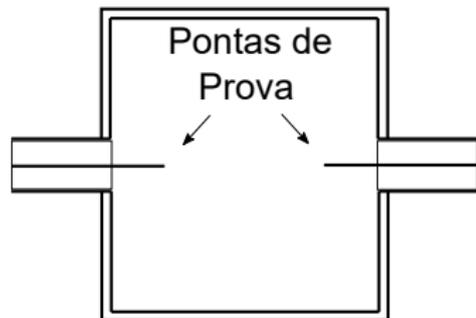
- Colocar o material sendo analisado no ponto onde o campo **E** é **máximo**.

Relação $\frac{V_s}{V_c}$ → importante ao se trabalhar com materiais de **altas perdas**.

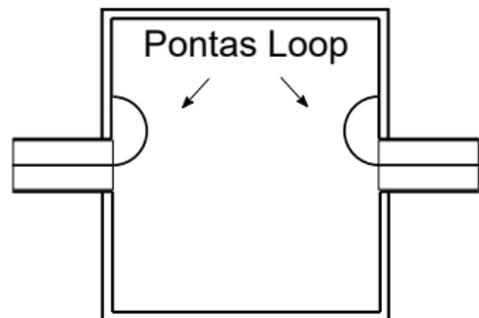
Raio inicial do duto PVC: **15 mm**.

Tipo de acoplamento

Tipo de acoplamento

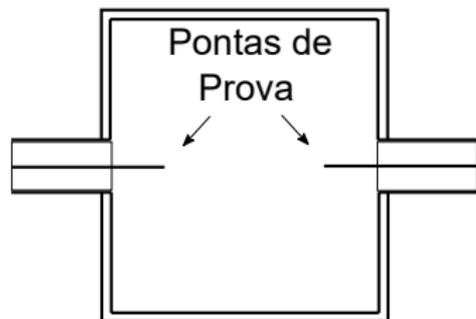


(a)

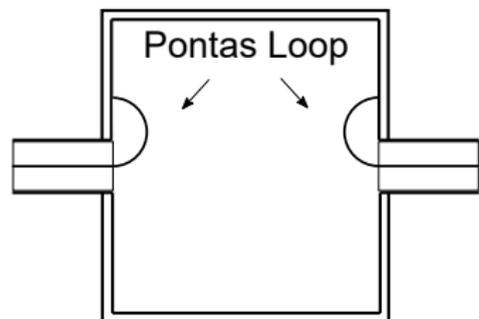


(b)

Tipo de acoplamento



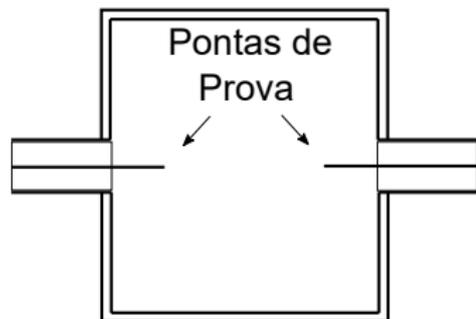
(a)



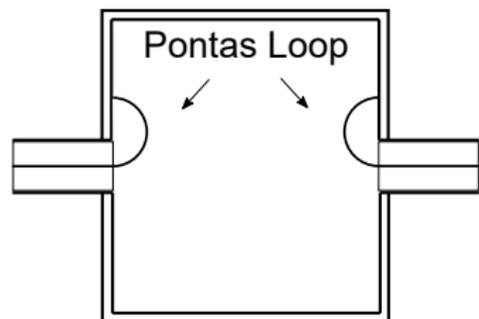
(b)

- Regiões disponíveis na parede da cavidade.

Tipo de acoplamento



(a)



(b)

- Regiões disponíveis na parede da cavidade.
- Dificuldade no ajuste do acoplamento.

Simulação da cavidade

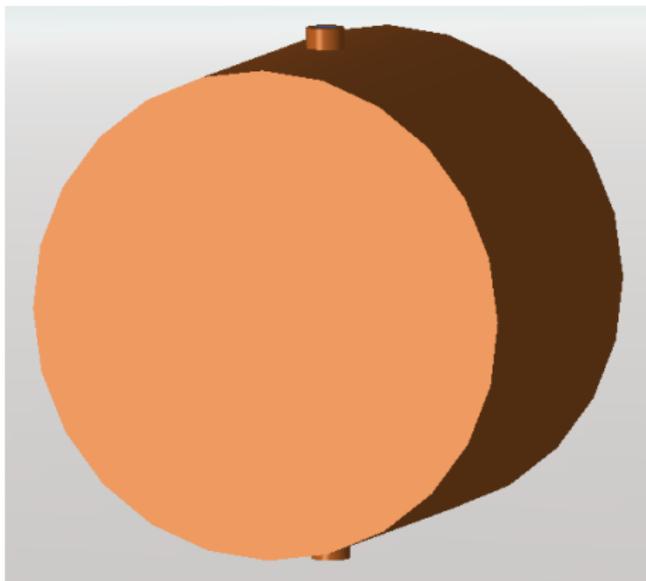
→ Simulador:

Simulação da cavidade

→ Simulador: **EMPro** (Keysight)

Simulação da cavidade

→ Simulador: **EMPro** (Keysight)

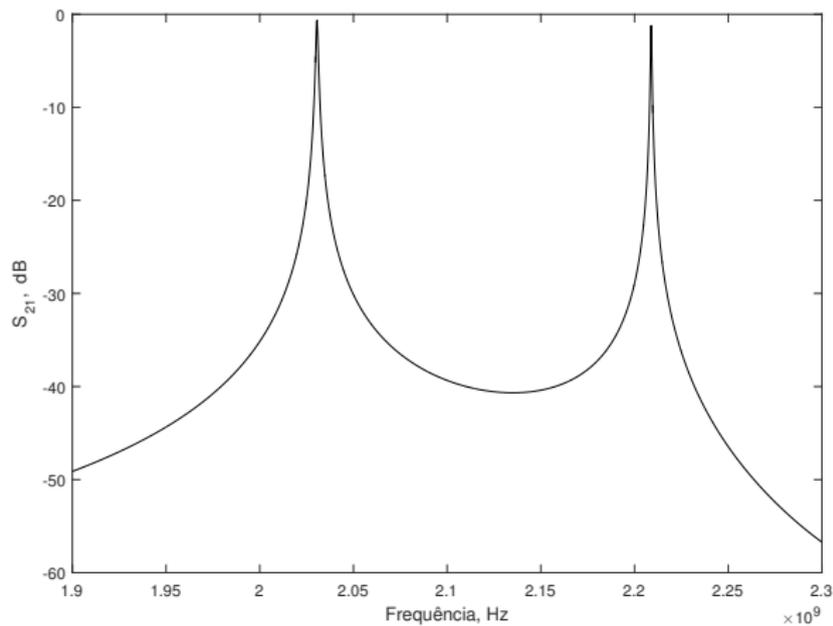


Simulação da cavidade

→ Cavidade preenchida com ar:

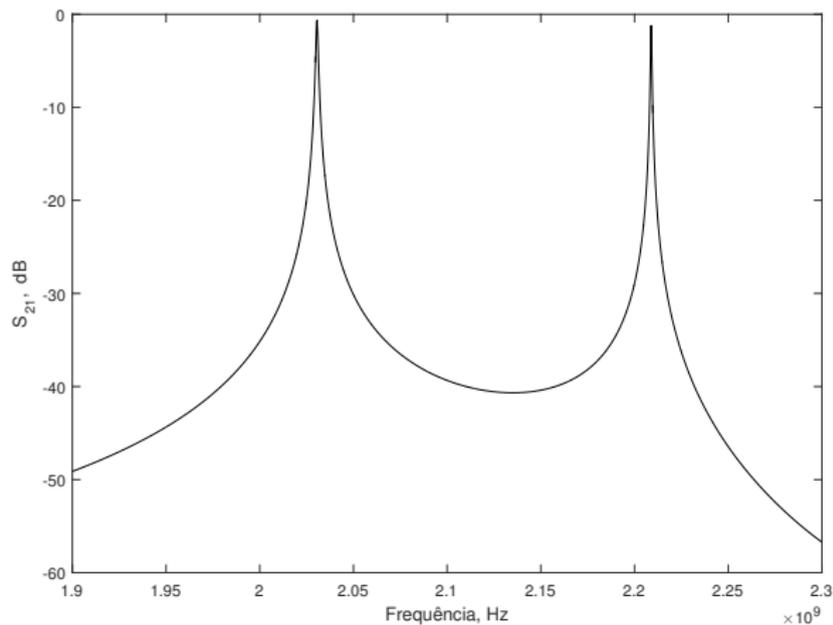
Simulação da cavidade

→ Cavidade preenchida com ar:



Simulação da cavidade

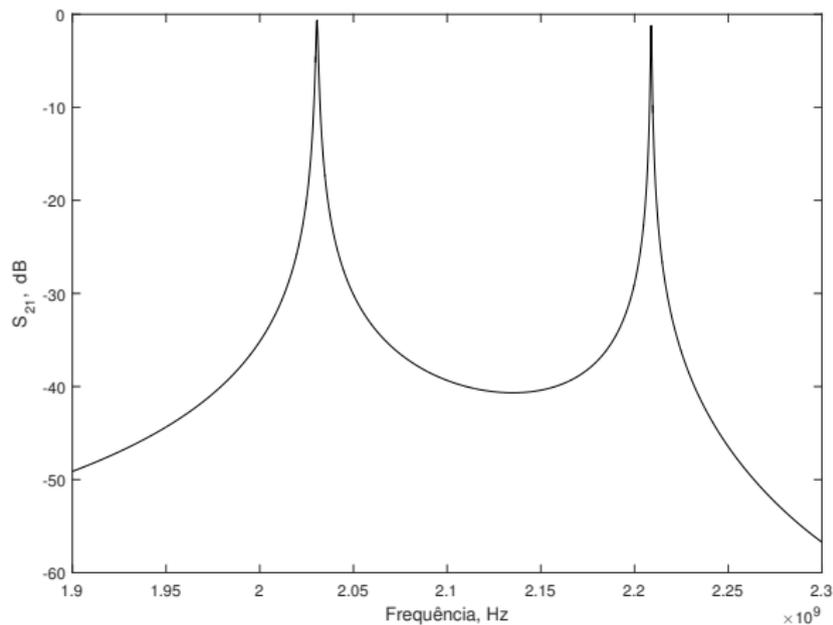
→ Cavidade preenchida com ar:



f_r (calculado): 2002,52 MHz;

Simulação da cavidade

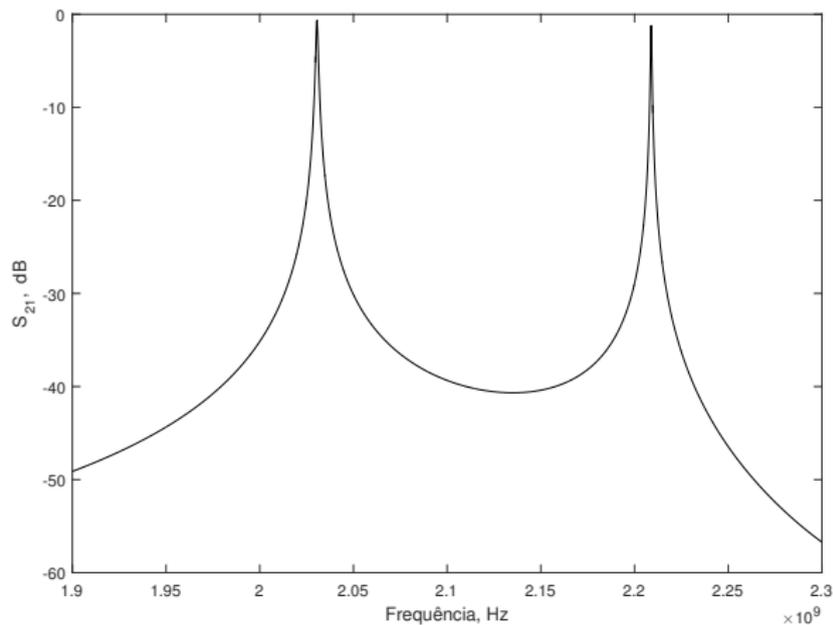
→ Cavidade preenchida com ar:



f_r (calculado): 2002,52 MHz; f_r (simulado): 2030,53 MHz;

Simulação da cavidade

→ Cavidade preenchida com ar:



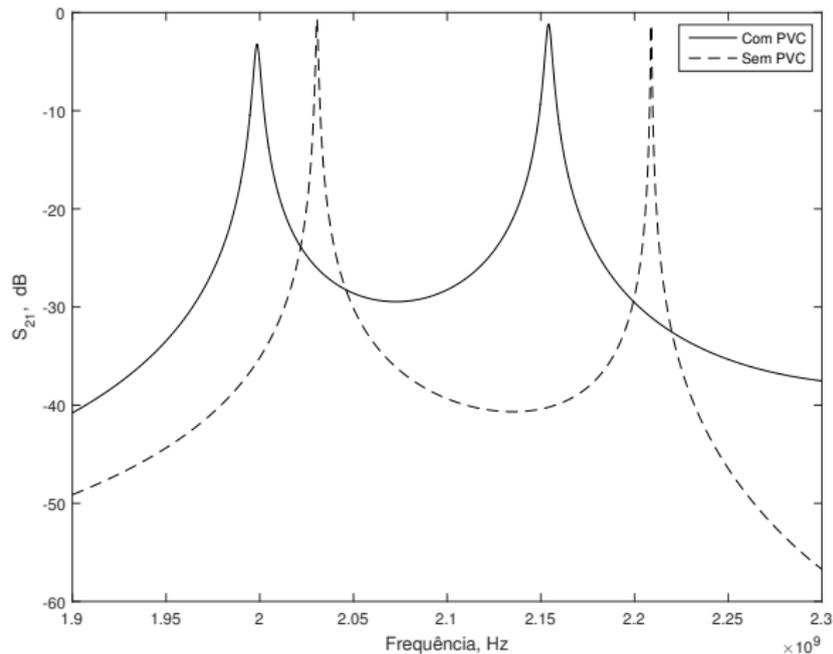
f_r (calculado): 2002,52 MHz; f_r (simulado): 2030,53 MHz; Erro: 1,40%.

Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com ar:

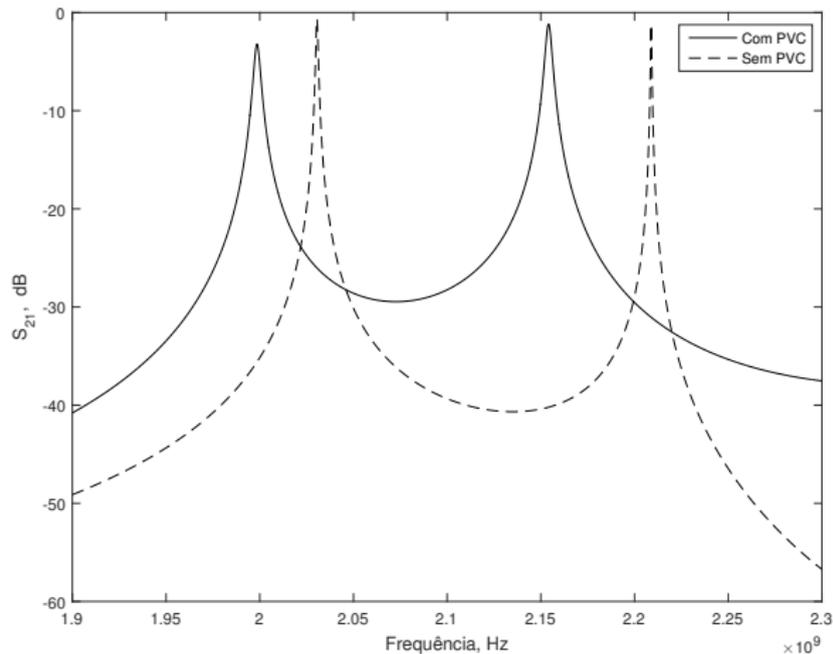
Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com ar:



Simulação da cavidade

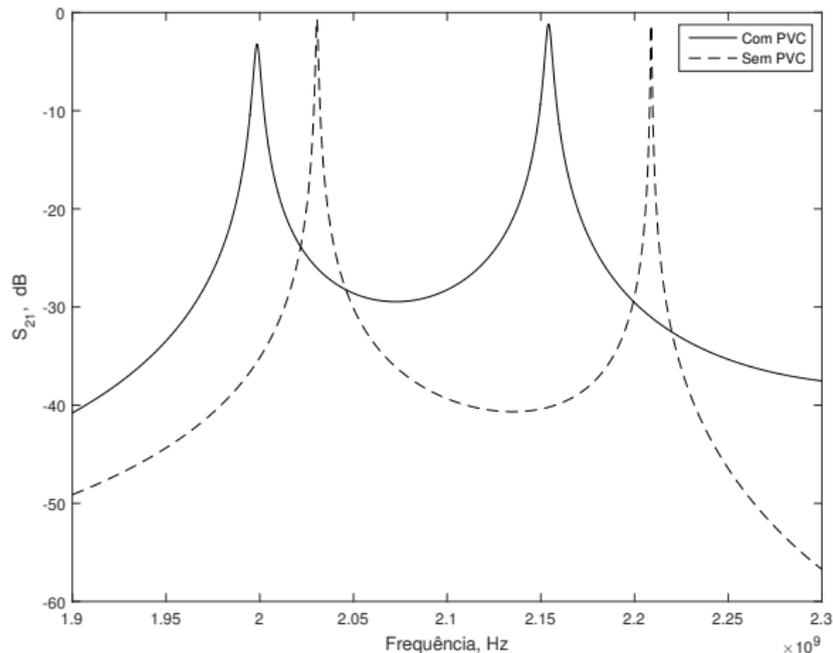
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com ar:



f_r (calculado): 1992,33 MHz;

Simulação da cavidade

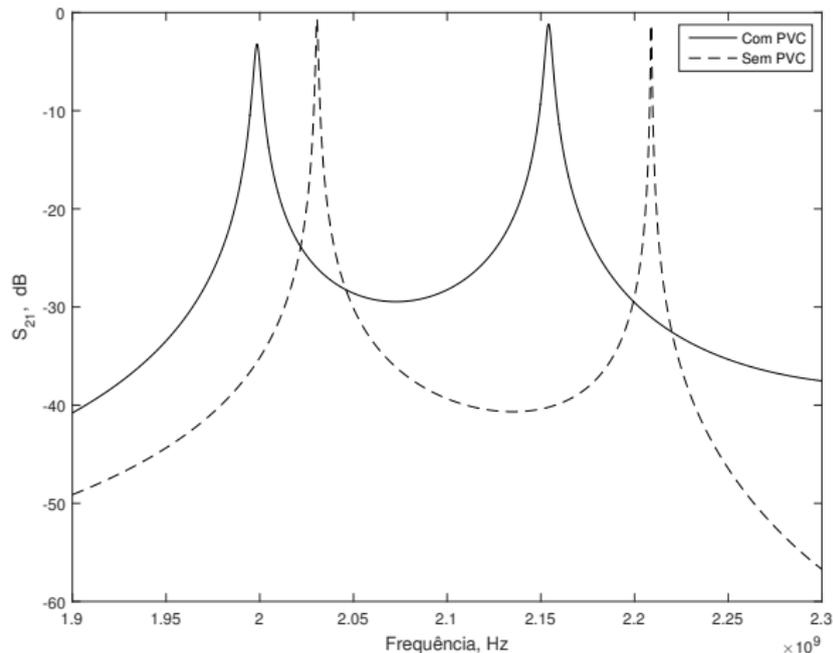
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **ar**:



f_r (calculado): 1992,33 MHz; f_r (simulado): 1998,56 MHz;

Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com ar:



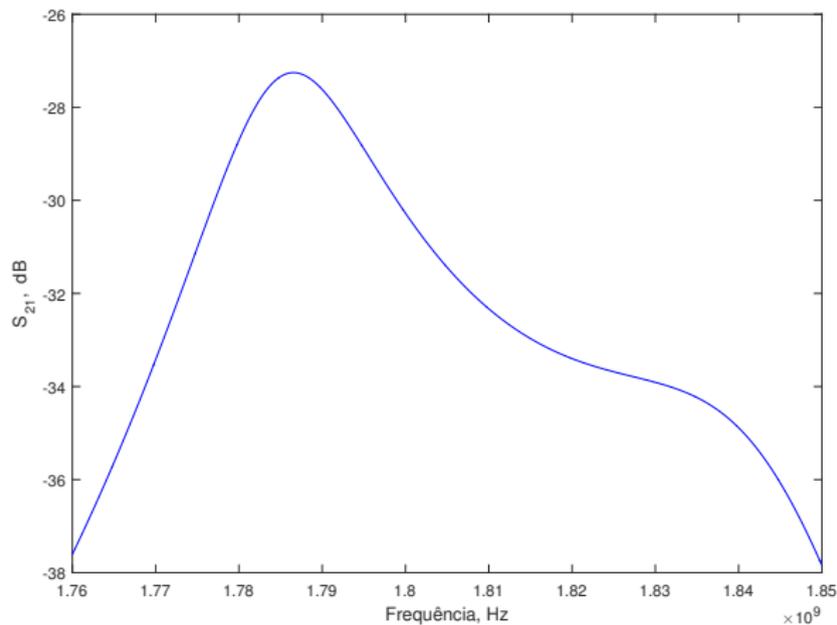
f_r (calculado): 1992,33 MHz; f_r (simulado): 1998,56 MHz; Erro: 0,31%.

Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com água:

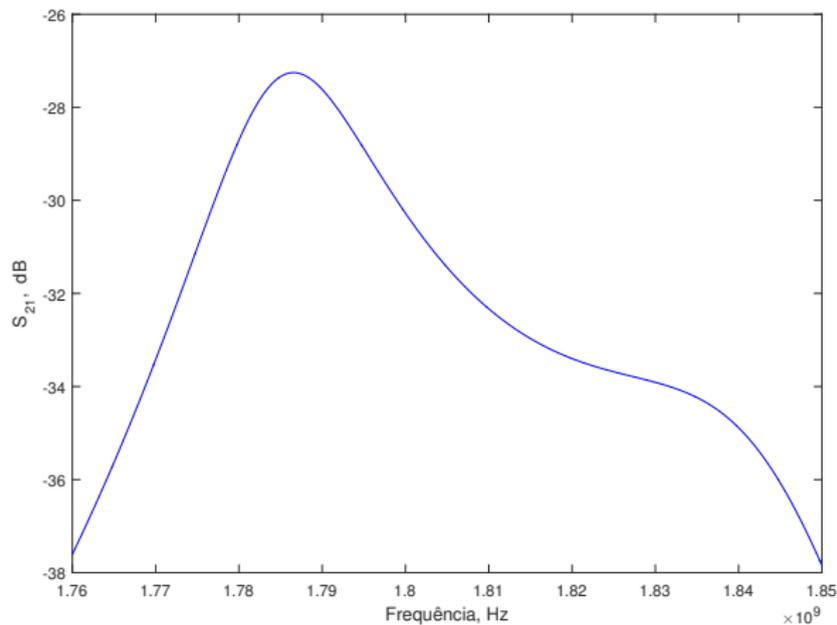
Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com água:



Simulação da cavidade

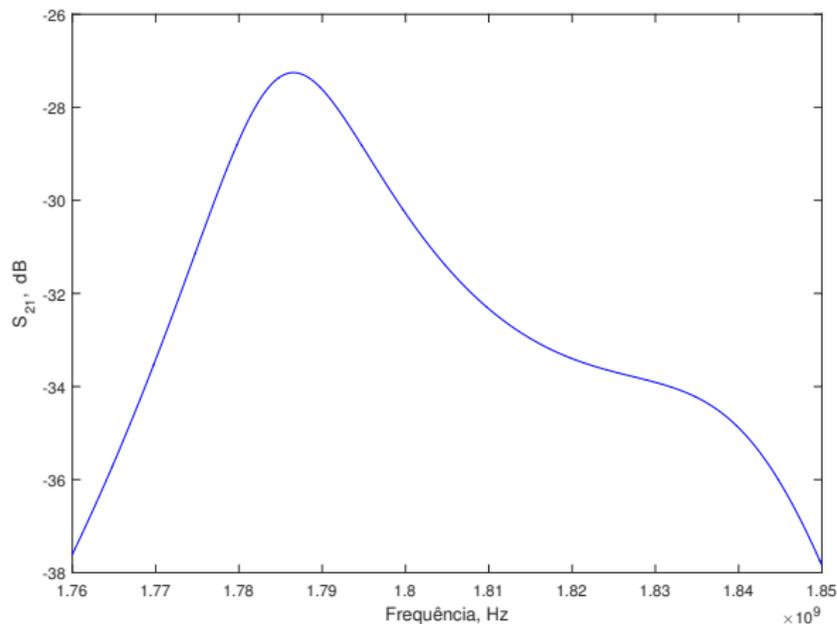
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com água:



f_r (calculado): 1800,26 MHz;

Simulação da cavidade

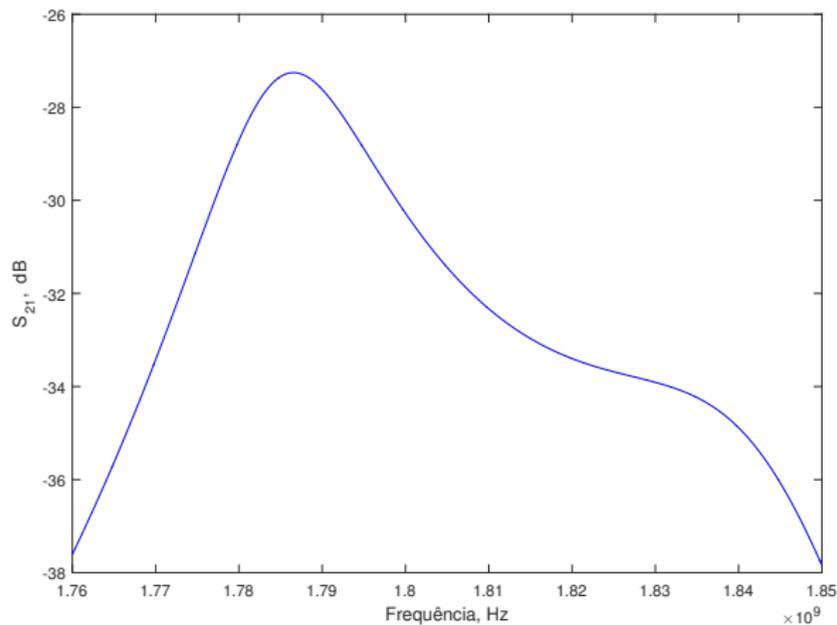
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com água:



f_r (calculado): 1800,26 MHz; f_r (simulado): 1786,32 MHz;

Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com água:



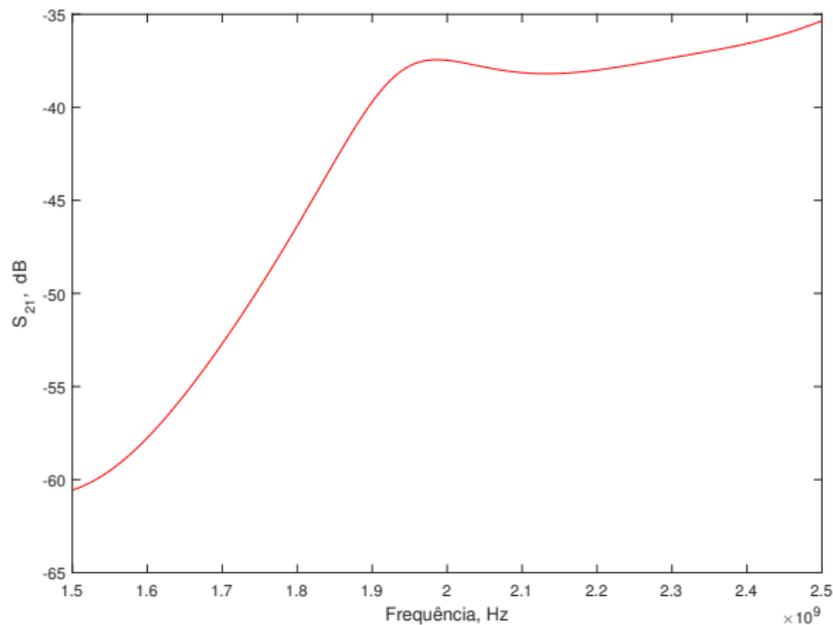
f_r (calculado): 1800,26 MHz; f_r (simulado): 1786,32 MHz; Erro: 0,77%.

Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite**:

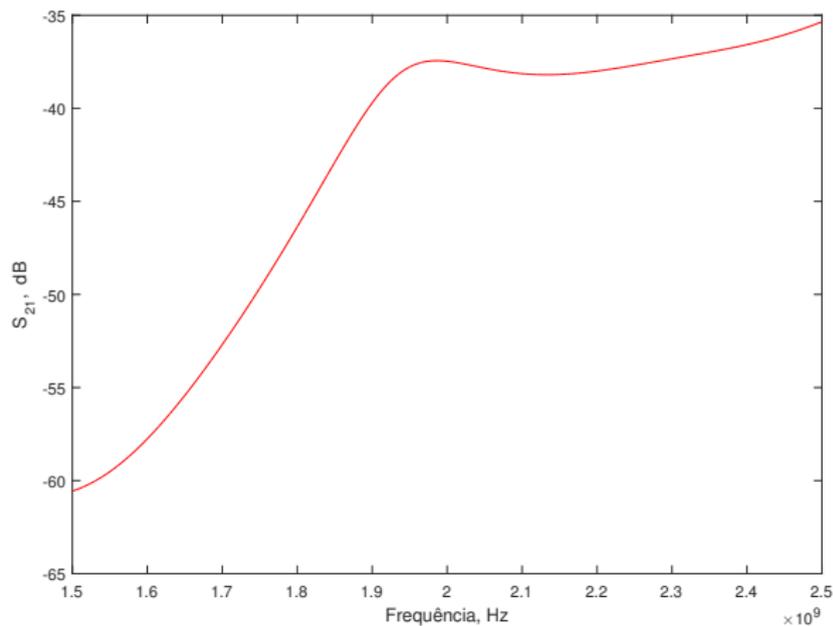
Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite**:



Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com leite:



f_r (calculado): 1801,62 MHz.

Ajustes

Algumas opções são:

Ajustes

Algumas opções são:

- Alterar relação $\frac{V_s}{V_c}$;

Ajustes

Algumas opções são:

- Alterar relação $\frac{V_s}{V_c}$;
- Alterar **modo** de operação;

Ajustes

Algumas opções são:

- Alterar relação $\frac{V_s}{V_c}$;
- Alterar **modo** de operação;
- Alterar **posição** da amostra.

Ajustes

Algumas opções são:

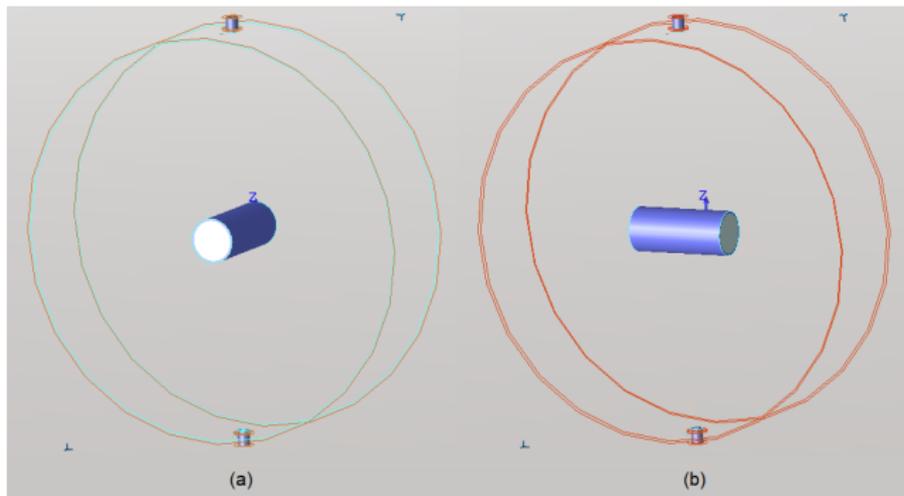
- Alterar relação $\frac{V_s}{V_c}$;
- Alterar modo de operação;
- Alterar posição da amostra.

Ajustes

→ Alterando posição do duto PVC:

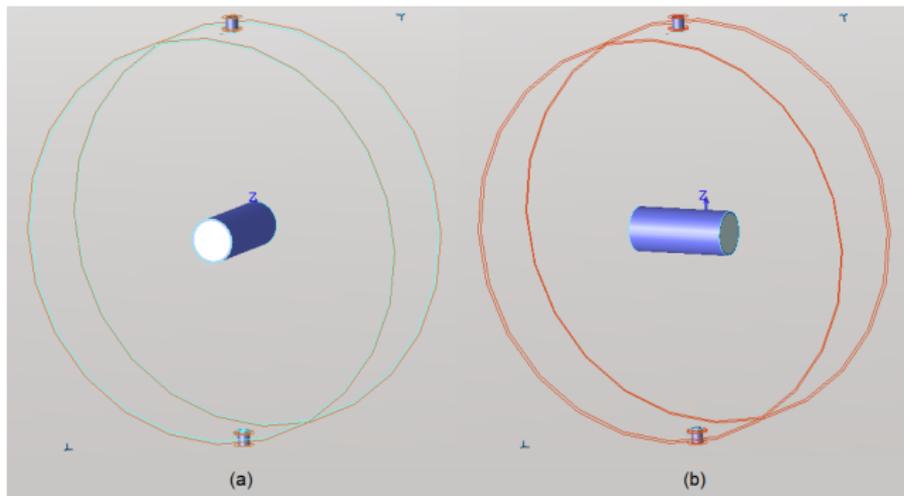
Ajustes

→ Alterando posição do duto PVC:



Ajustes

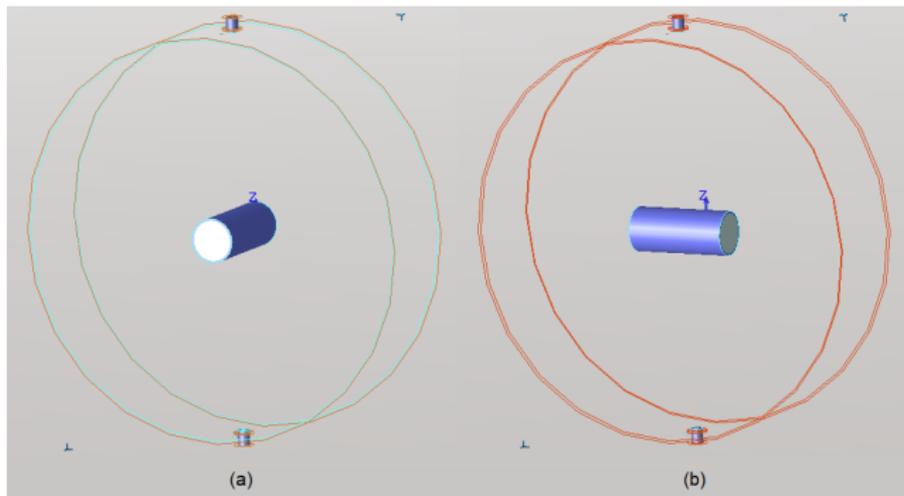
→ Alterando posição do duto PVC:



Cavidade: $a = 100 \text{ mm}$ e $d = 50 \text{ mm}$;

Ajustes

→ Alterando posição do duto PVC:



Cavidade: $a = 100 \text{ mm}$ e $d = 50 \text{ mm}$;

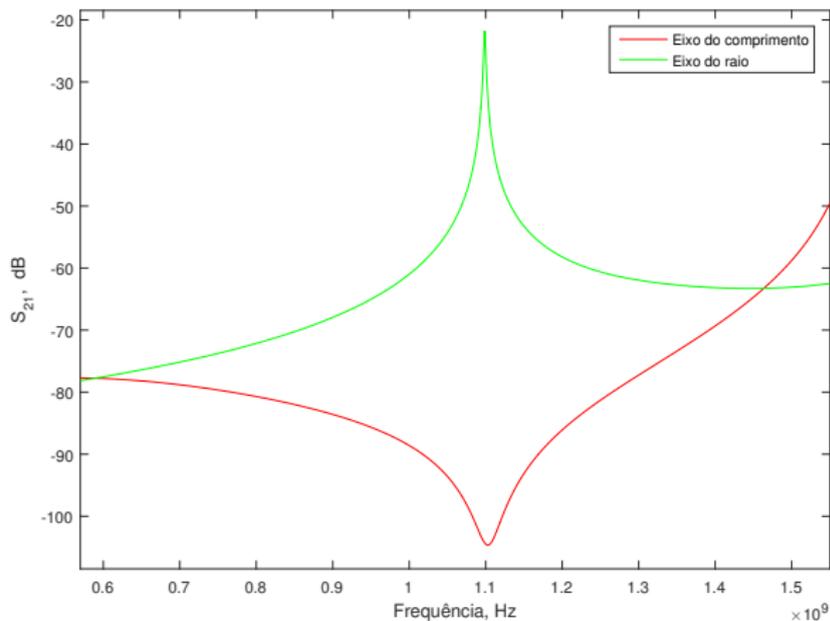
Duto PVC: $a = 10 \text{ mm}$ e $d = 50 \text{ mm}$.

Ajustes

→ Resultado dos testes:

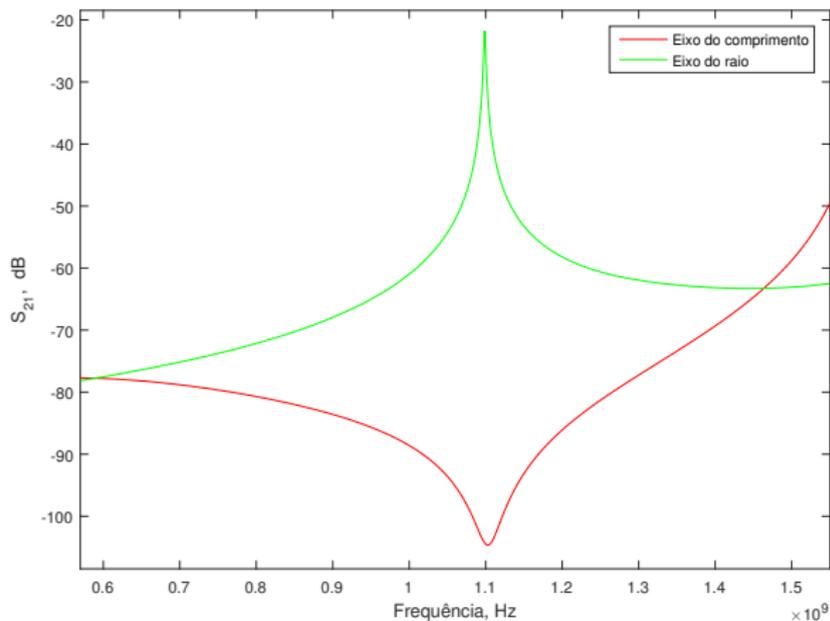
Ajustes

→ Resultado dos testes:



Ajustes

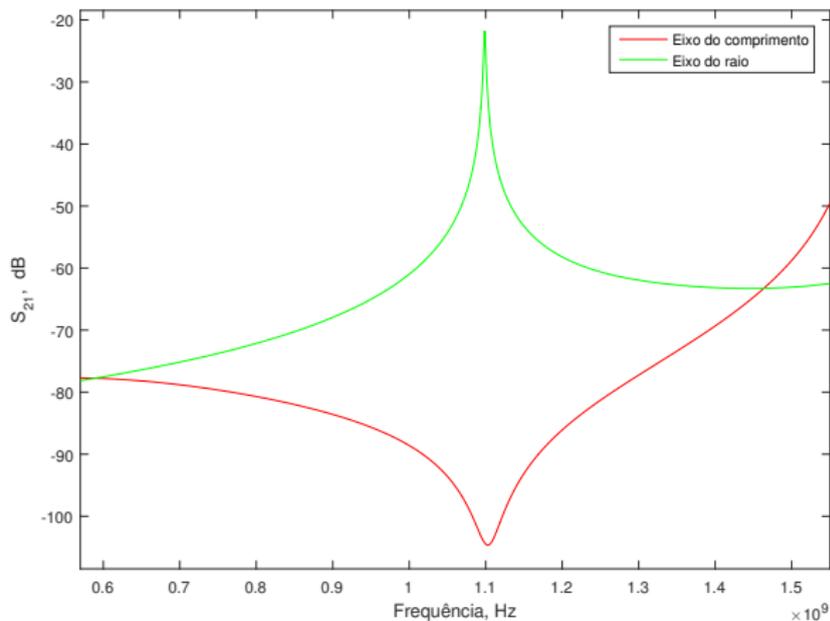
→ Resultado dos testes:



f_r (calculado): 1129,70 MHz;

Ajustes

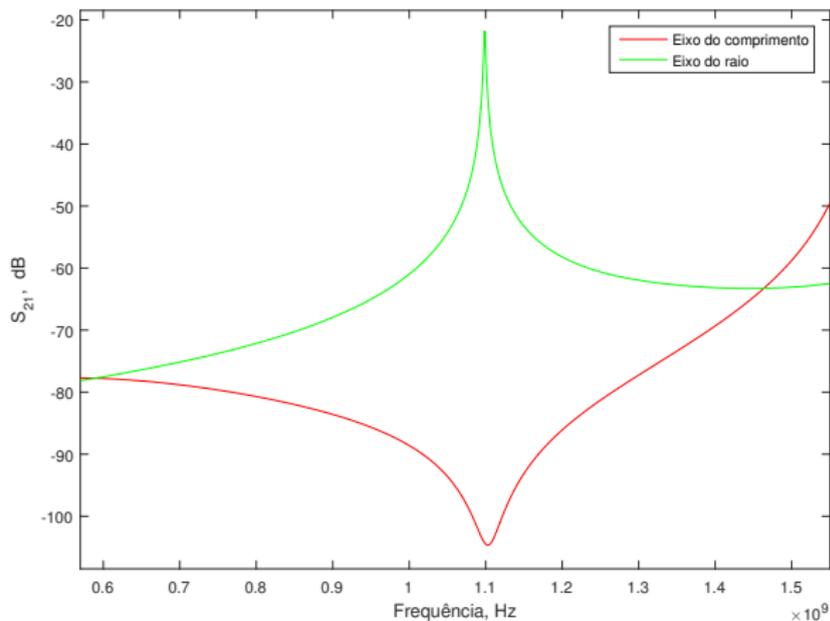
→ Resultado dos testes:



f_r (calculado): 1129,70 MHz; f_r (simulado): 1105,01 MHz;

Ajustes

→ Resultado dos testes:



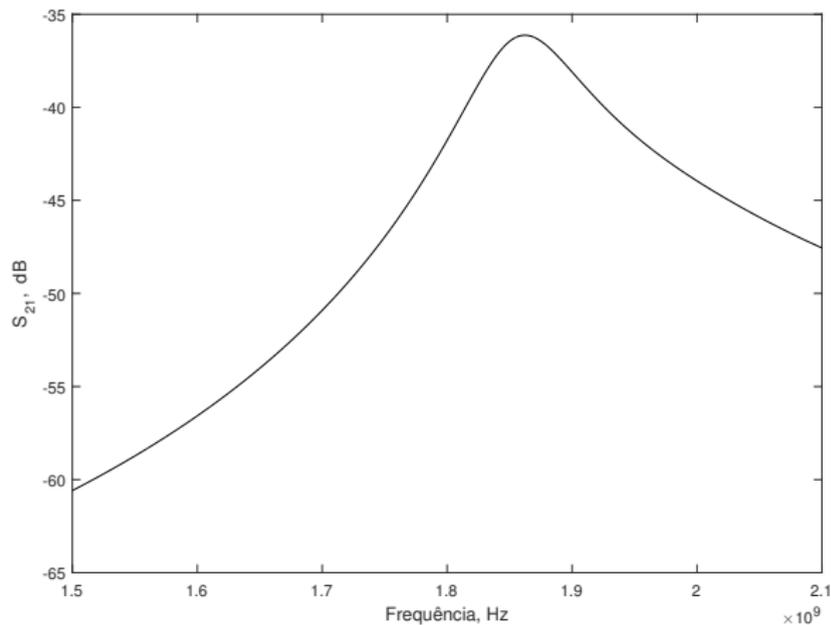
f_r (calculado): 1129,70 MHz; f_r (simulado): 1105,01 MHz; Erro: 2,19%.

Ajustes

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite**:

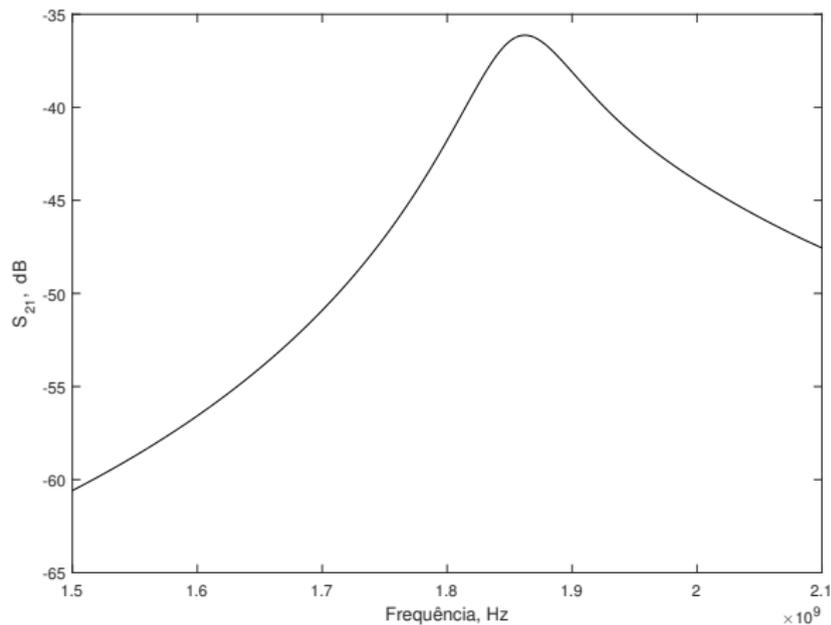
Ajustes

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com leite:



Ajustes

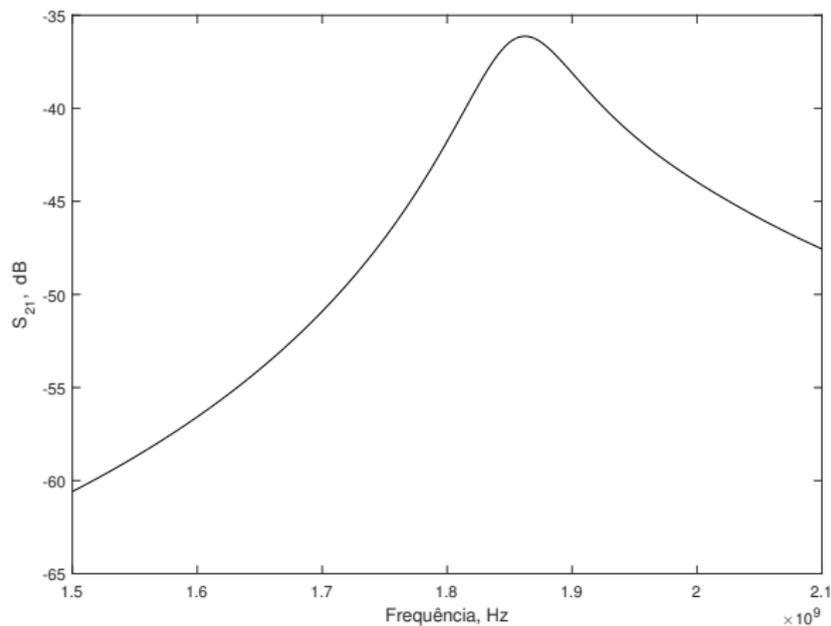
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com leite:



f_r (calculado): 1801,62 MHz;

Ajustes

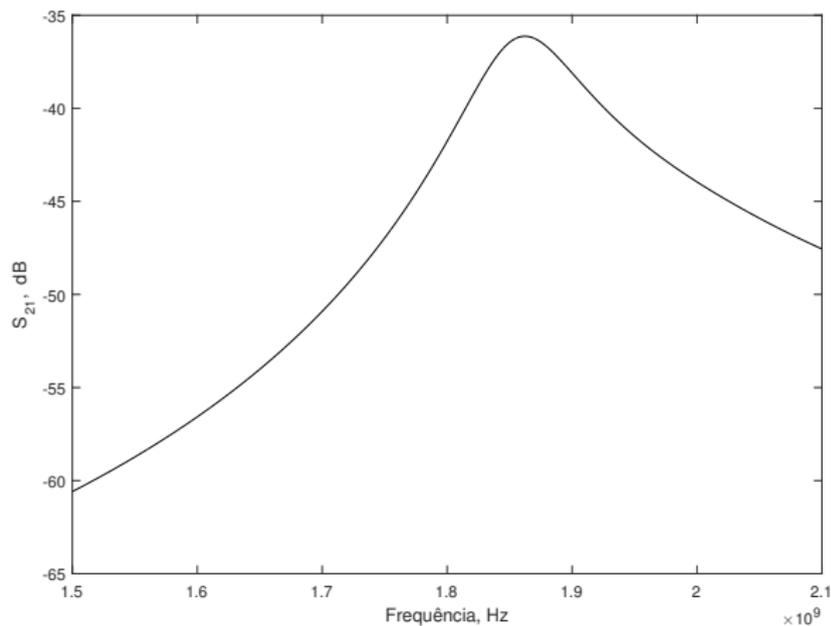
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite**:



f_r (calculado): 1801,62 MHz; f_r (simulado): 1862,22 MHz;

Ajustes

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite**:



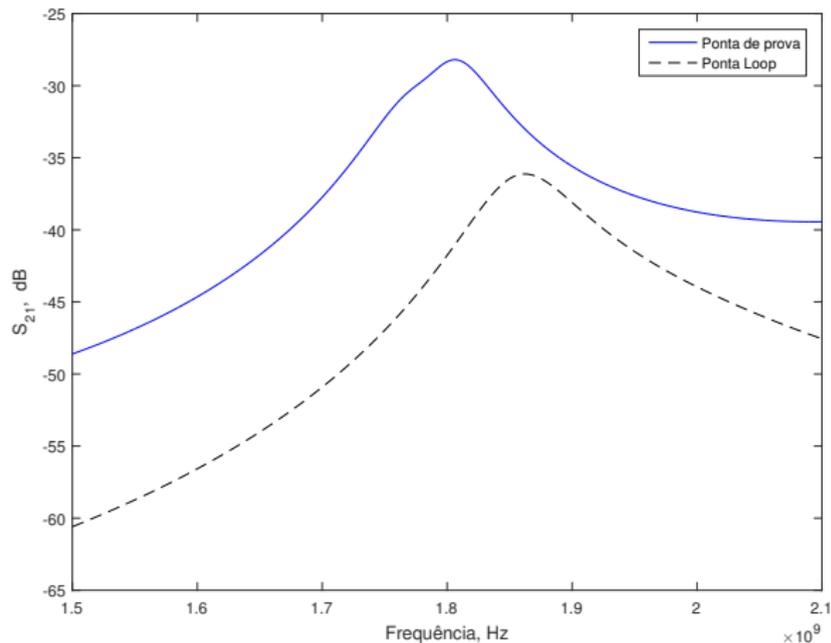
f_r (calculado): 1801,62 MHz; f_r (simulado): 1862,22 MHz; Erro: 3,36%.

Ajustes

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite (ponta de prova)**:

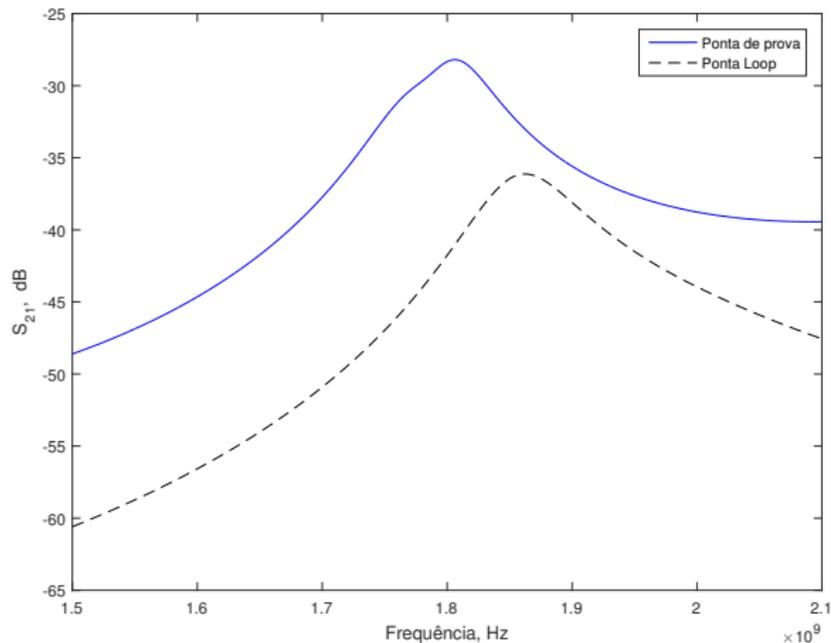
Ajustes

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com leite (ponta de prova):



Ajustes

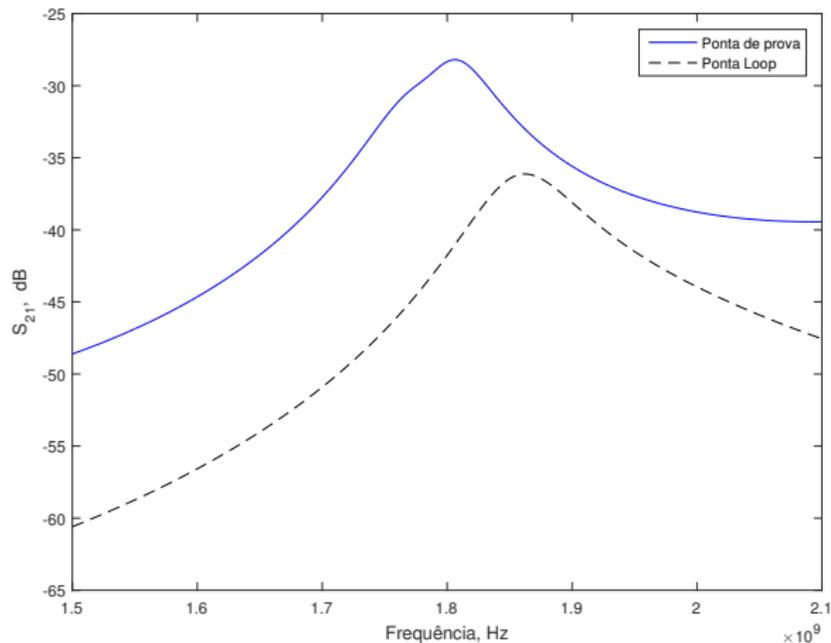
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite (ponta de prova)**:



f_r (calculado): **1801,62 MHz**;

Ajustes

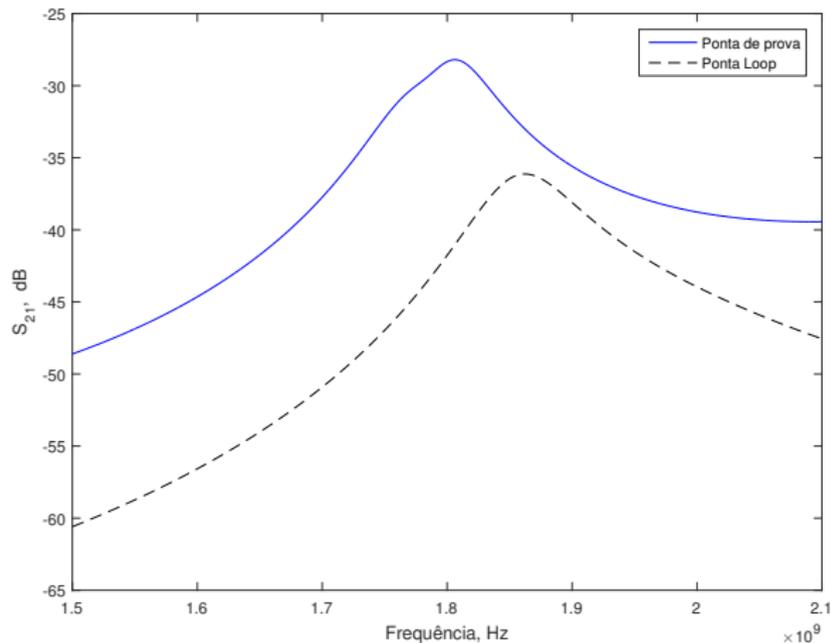
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite (ponta de prova)**:



f_r (calculado): 1801,62 MHz; f_r (simulado): 1806,02 MHz;

Ajustes

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite (ponta de prova)**:



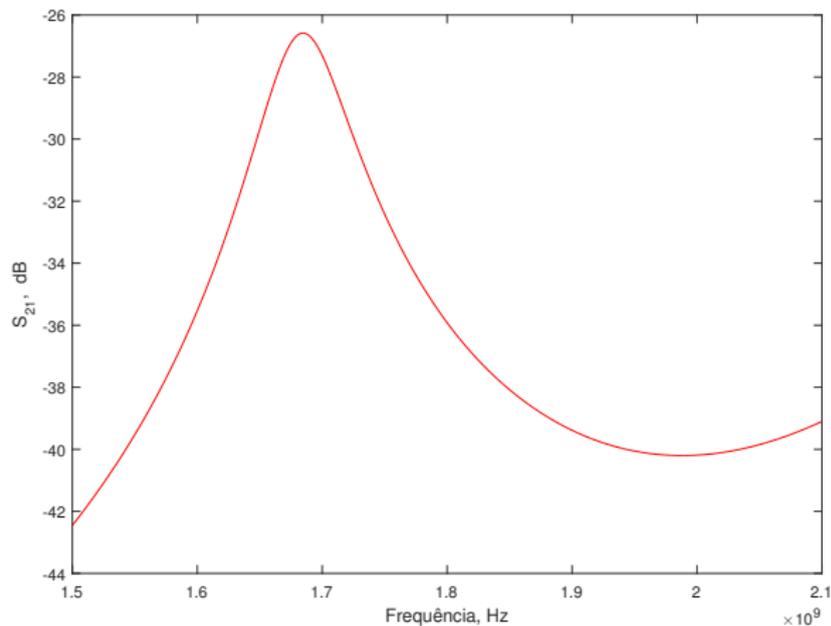
f_r (calculado): 1801,62 MHz; f_r (simulado): 1806,02 MHz; Erro: 0,24%.

Ajustes

→ Cavidade **ótima** com o duto PVC preenchido com **leite** (ponta de prova):

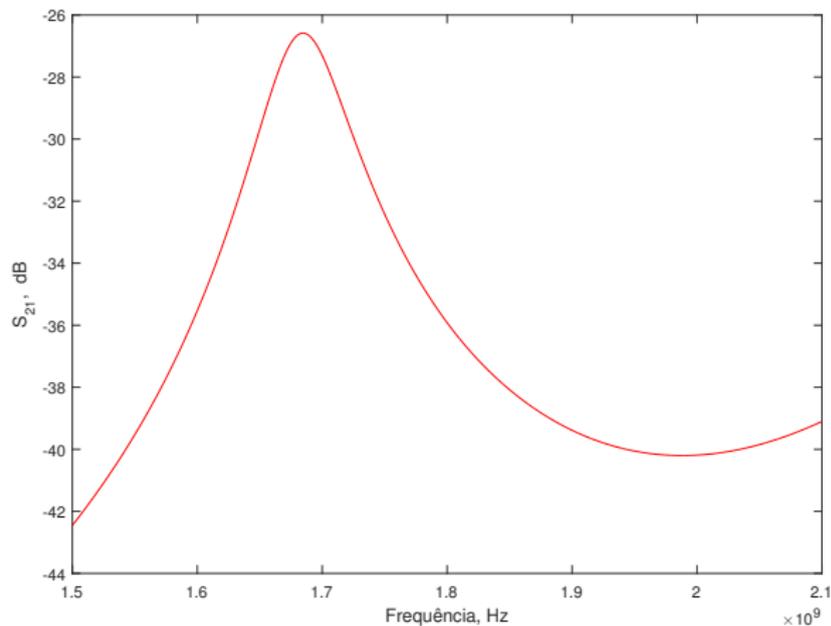
Ajustes

→ Cavidade **ótima** com o duto PVC preenchido com **leite** (ponta de prova):



Ajustes

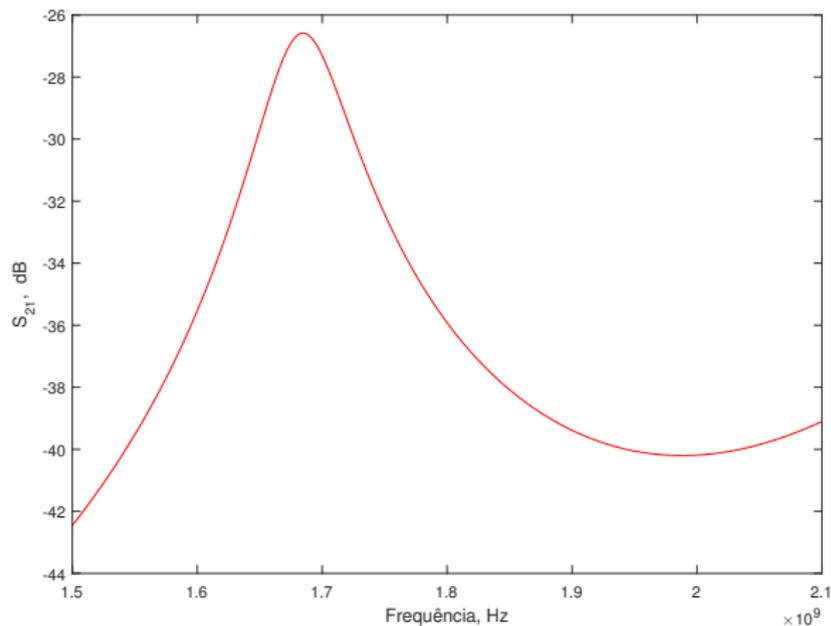
→ Cavidade **ótima** com o duto PVC preenchido com **leite** (ponta de prova):



f_r (calculado): **1680,45 MHz;**

Ajustes

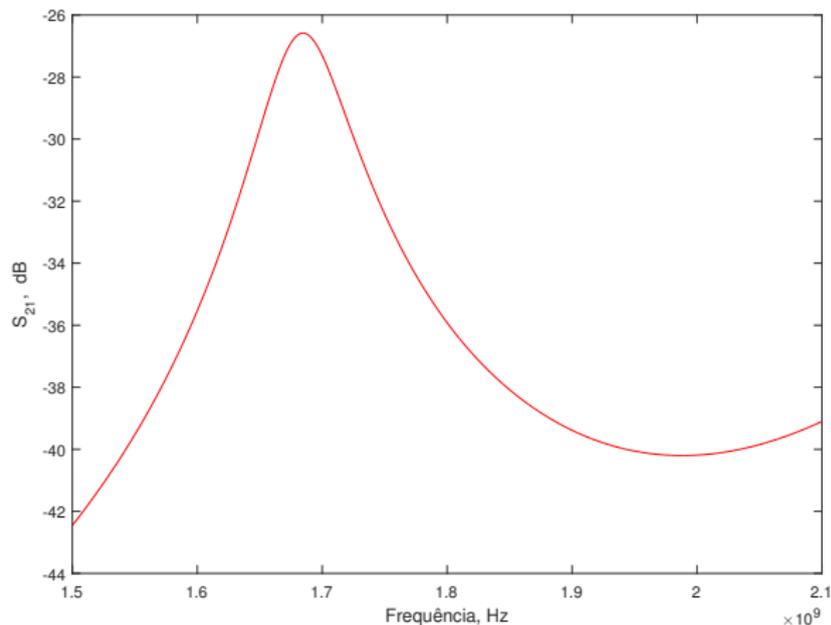
→ Cavidade **ótima** com o duto PVC preenchido com **leite** (ponta de prova):



f_r (calculado): **1680,45 MHz**; f_r (simulado): **1684,61 MHz**;

Ajustes

→ Cavidade **ótima** com o duto PVC preenchido com **leite** (ponta de prova):



f_r (calculado): 1680,45 MHz; f_r (simulado): 1684,61 MHz; Erro: 0,25%.

Ajustes

Comparação dos resultados obtidos simulando a cavidade com o duto PVC e leite no eixo do raio:

Ajustes

Comparação dos resultados obtidos simulando a cavidade com o duto PVC e leite no eixo do raio:

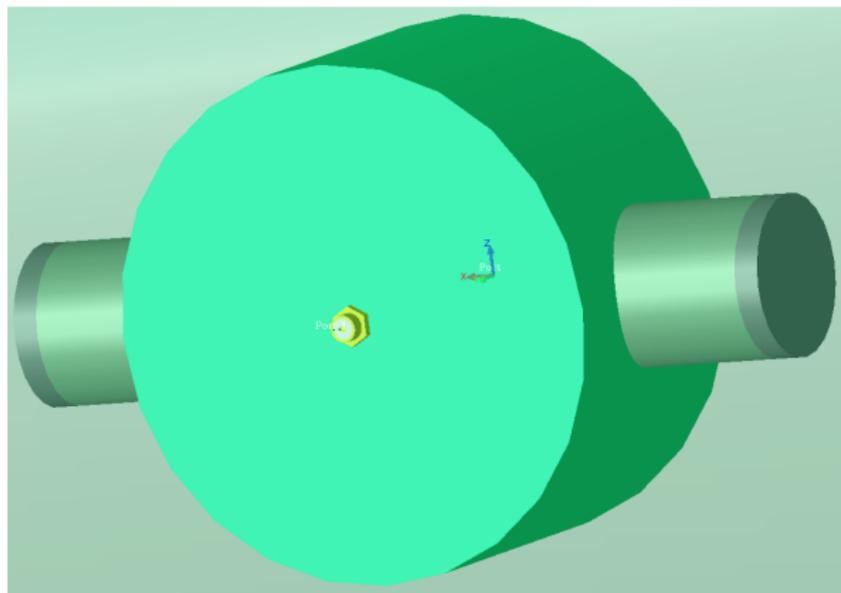
	f_r (calculado)	f_r (simulado)	Erro	Q
Ponta loop	1801,62 MHz	1862,22 MHz	3,36%	20,09
Ponta de prova	1801,62 MHz	1806,02 MHz	0,24%	21,5
Ponta de prova (otimizado)	1680,45 MHz	1684,61 MHz	0,25%	23,9

Ajustes

→ Cavidade **ótima** com o duto PVC preenchido com **leite** (ponta de prova):

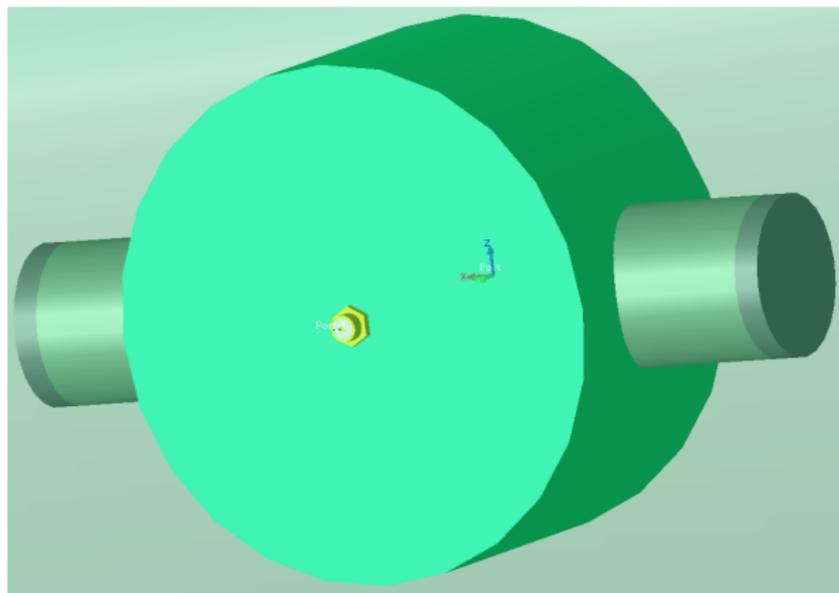
Ajustes

→ Cavidade **ótima** com o duto PVC preenchido com **leite** (ponta de prova):



Ajustes

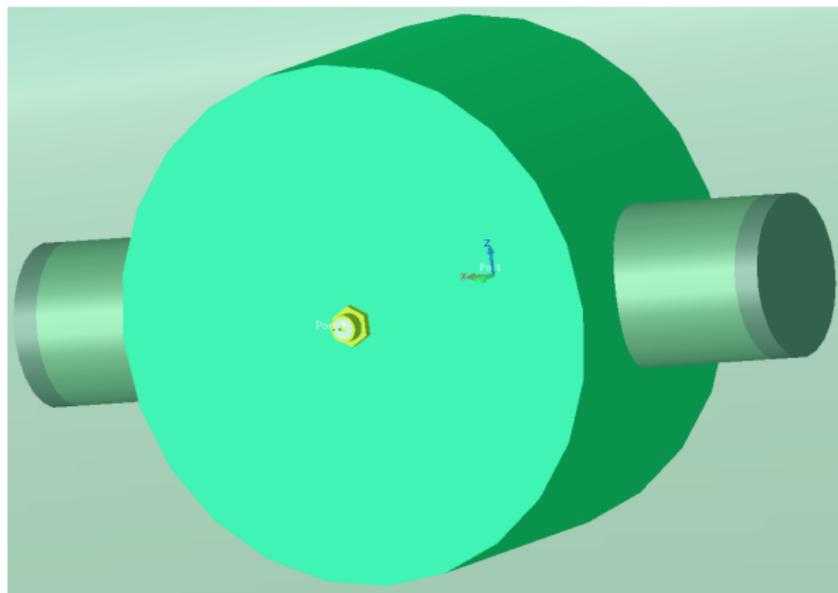
→ Cavidade **ótima** com o duto PVC preenchido com **leite** (ponta de prova):



Raio: **62,5 mm**;

Ajustes

→ Cavidade **ótima** com o duto PVC preenchido com **leite** (ponta de prova):



Raio: **62,5 mm**; Comprimento: **97 mm**.

Fluxo de projeto

Fluxo de projeto

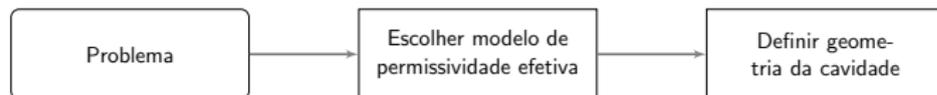
```
graph TD; A[Problema];
```

Problema

Fluxo de projeto



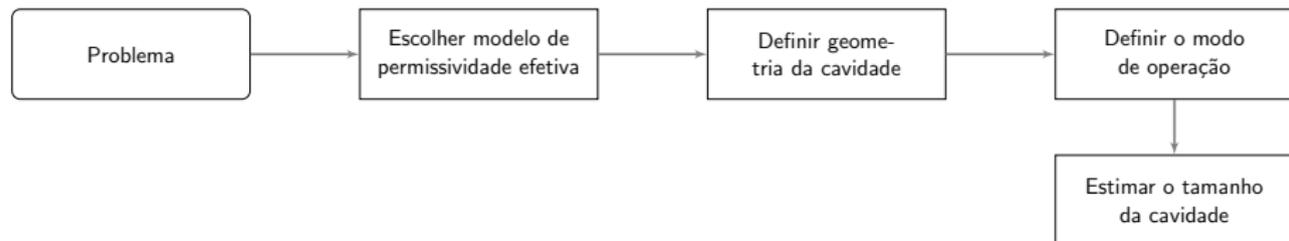
Fluxo de projeto



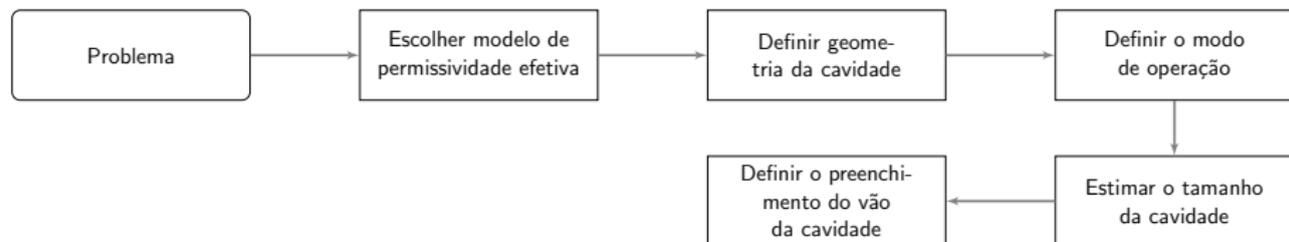
Fluxo de projeto



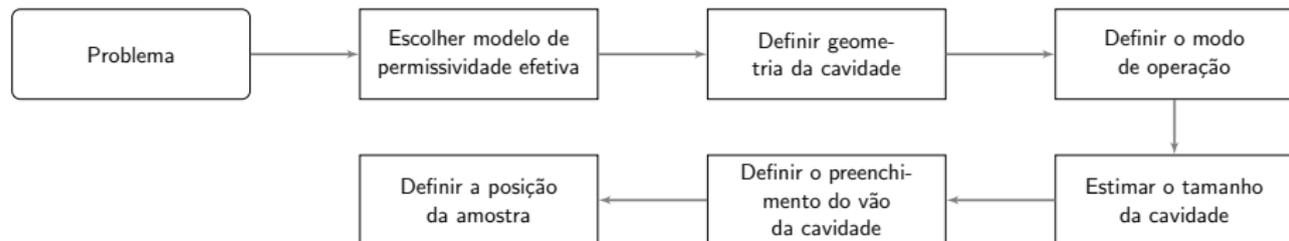
Fluxo de projeto



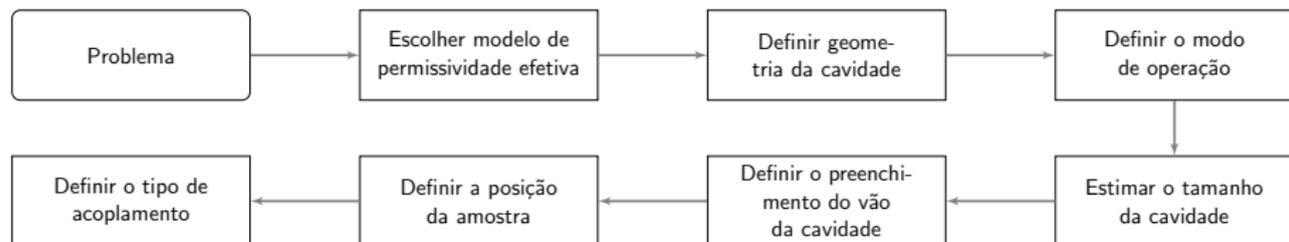
Fluxo de projeto



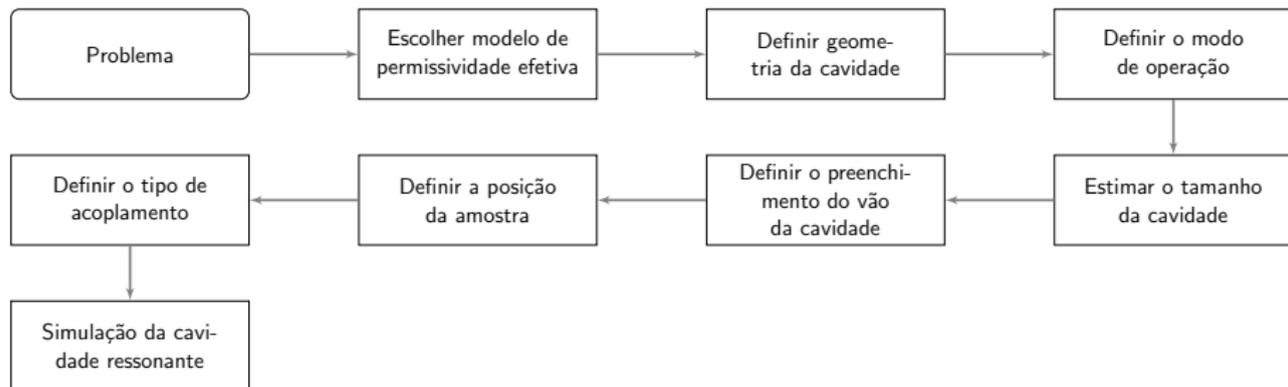
Fluxo de projeto



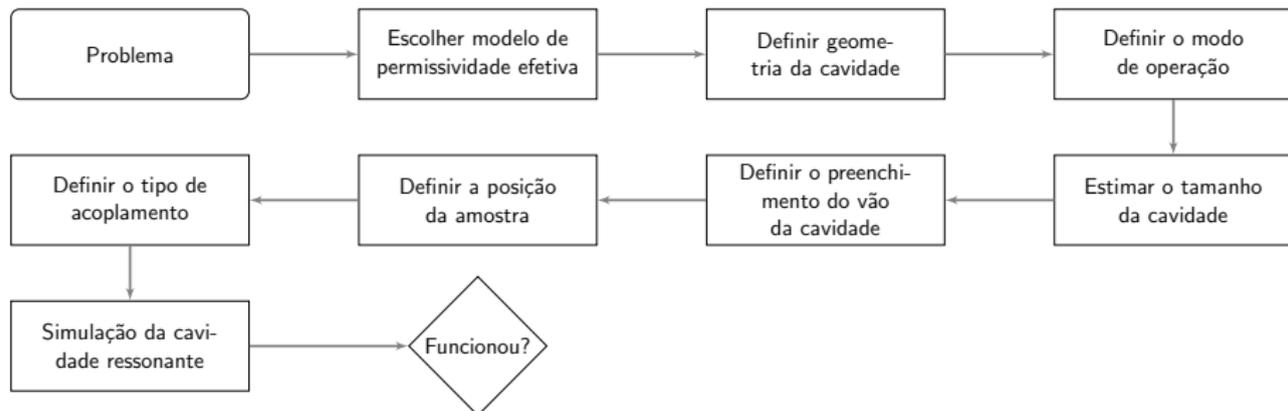
Fluxo de projeto



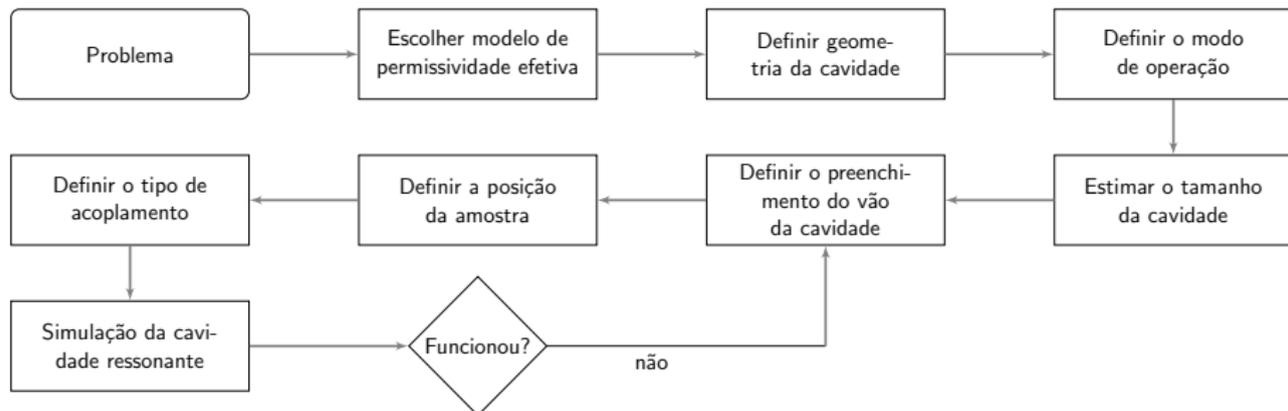
Fluxo de projeto



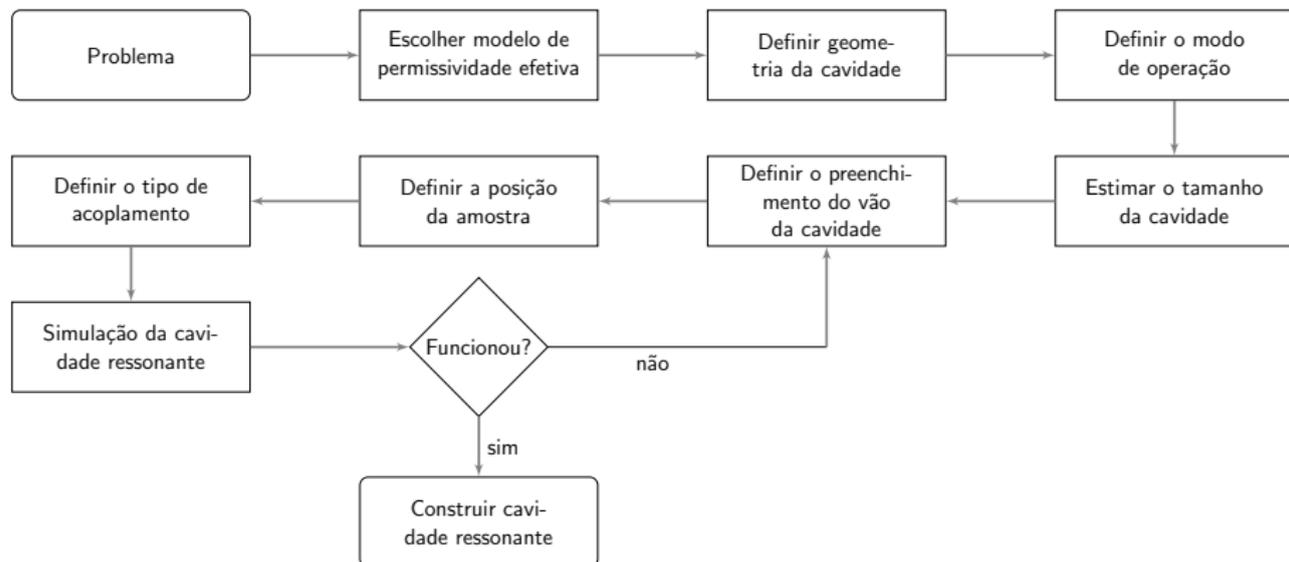
Fluxo de projeto



Fluxo de projeto



Fluxo de projeto

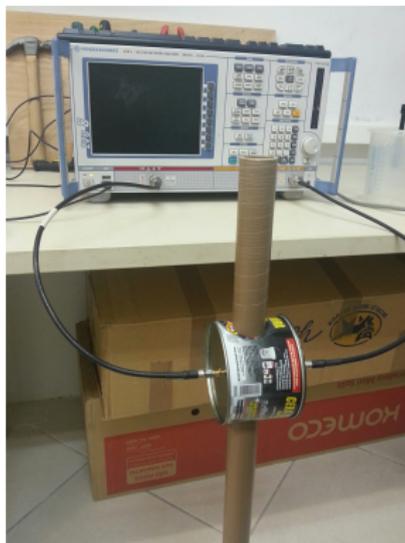


Sumário

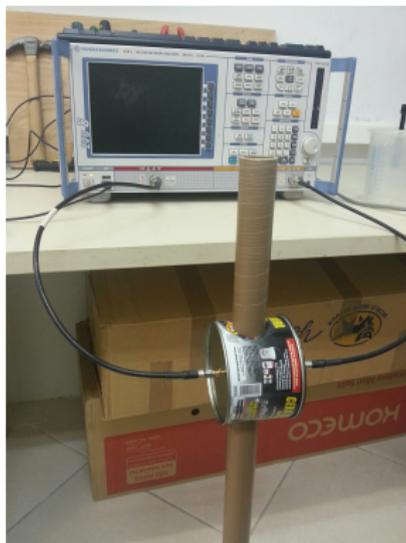
- 1 Introdução
- 2 Revisão teórica
- 3 Projeto de um sensor
- 4 Prova de conceito**
- 5 Conclusões

Cavidade e acoplamento

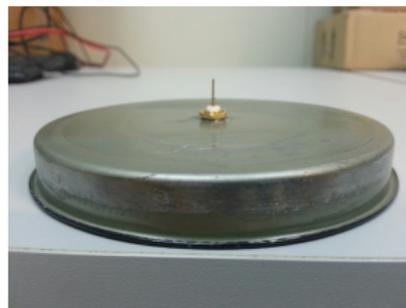
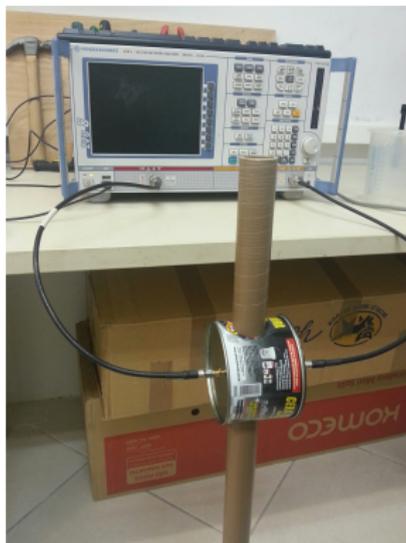
Cavidade e acoplamento



Cavidade e acoplamento

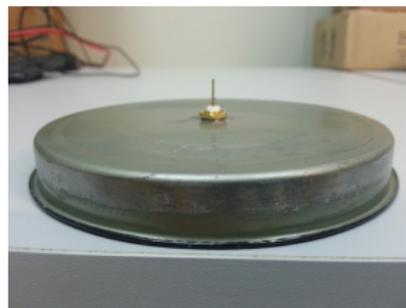
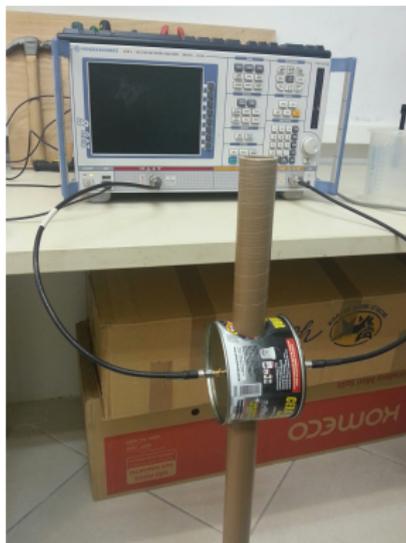


Cavidade e acoplamento



- Raio: 50 *mm*;

Cavidade e acoplamento



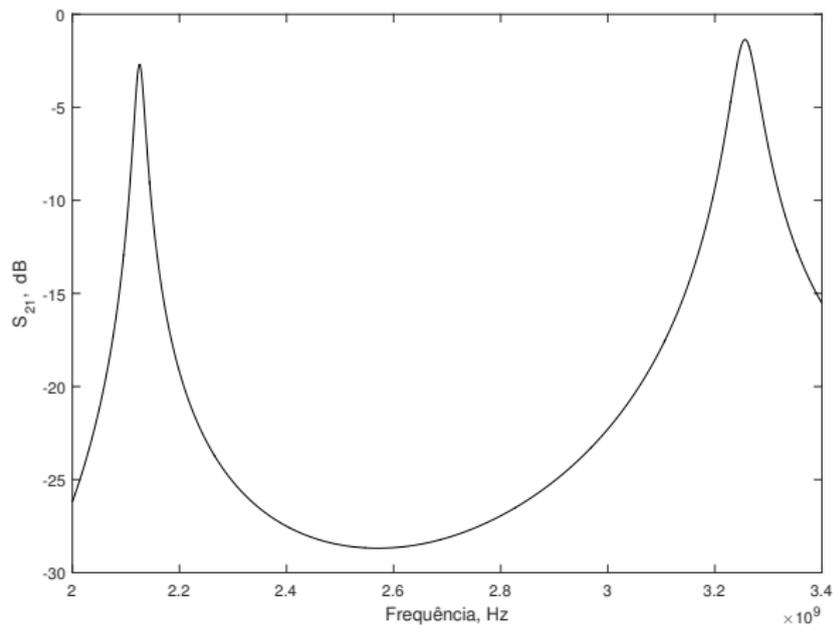
- Raio: **50 mm**;
- Comprimento: **58 mm**.

Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com ar:

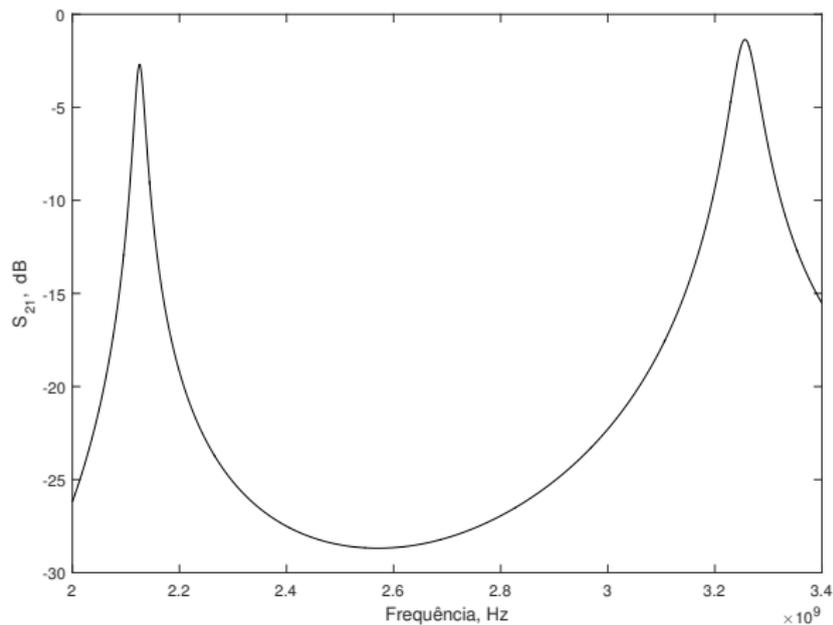
Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com ar:



Simulação da cavidade

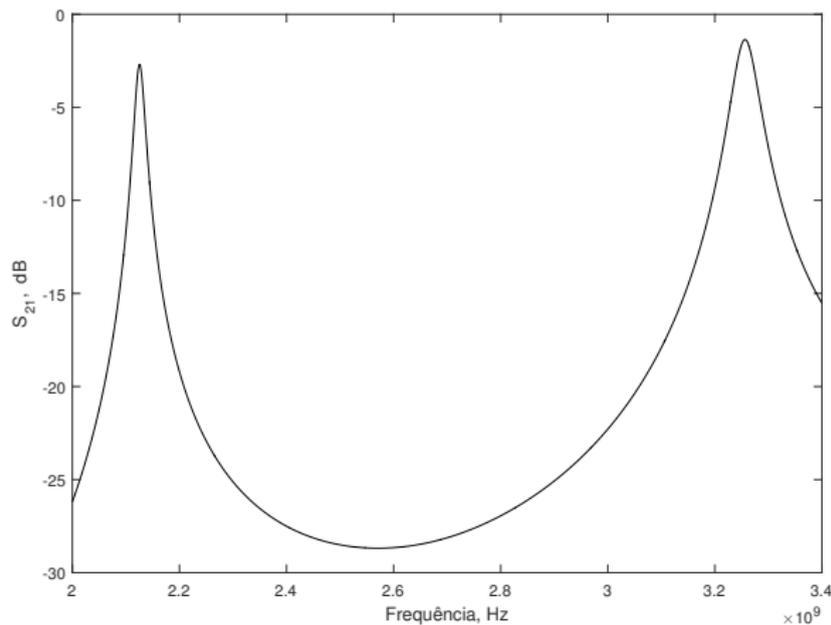
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com ar:



f_r (calculado): 2241,64 MHz;

Simulação da cavidade

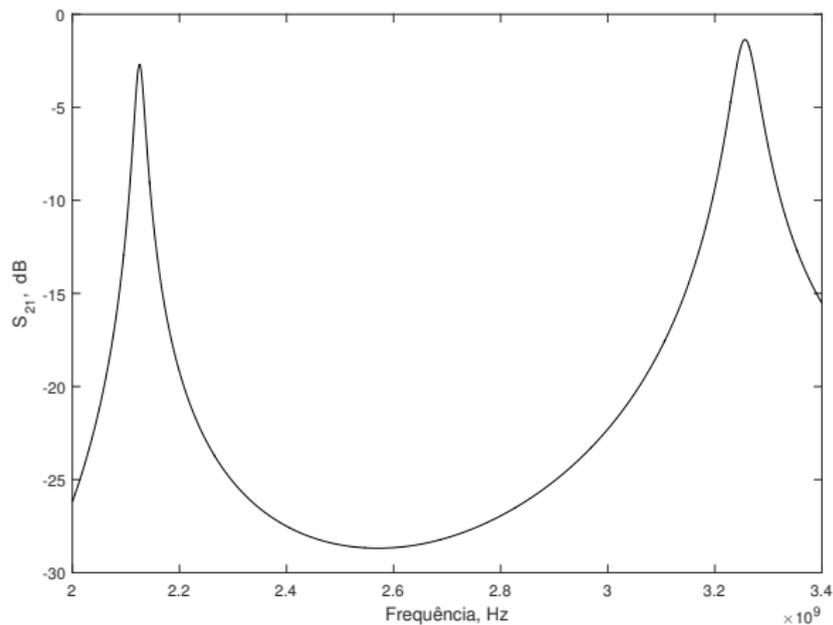
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com ar:



f_r (calculado): 2241,64 MHz; f_r (simulado): 2125,53 MHz;

Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com ar:



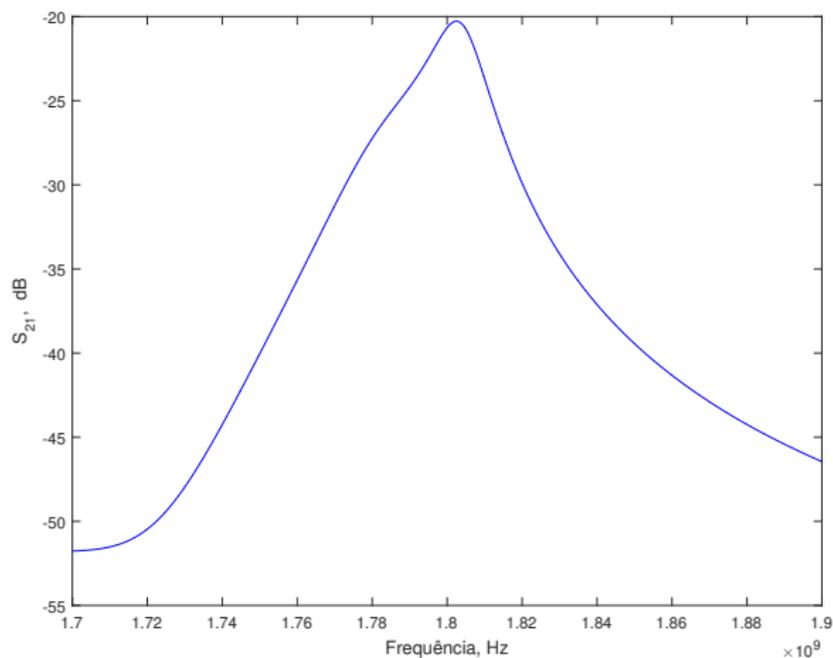
f_r (calculado): 2241,64 MHz; f_r (simulado): 2125,53 MHz; Erro: 5,18%.

Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com água:

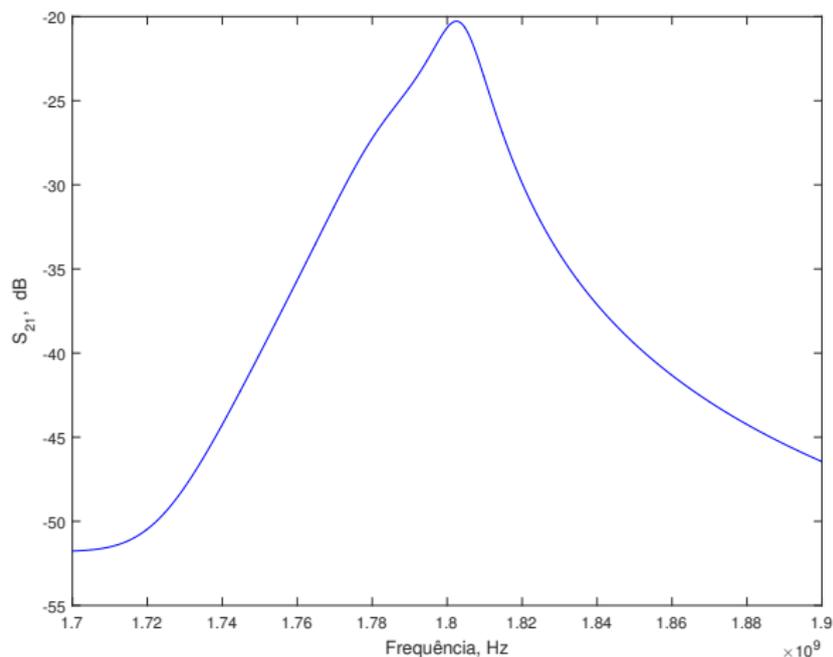
Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com água:



Simulação da cavidade

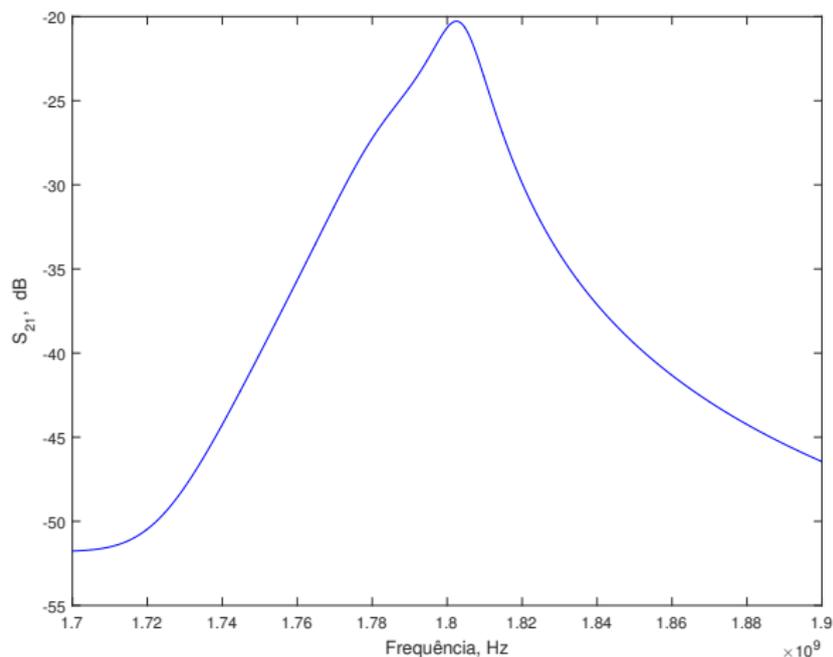
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com água:



f_r (calculado): 1835,31 MHz;

Simulação da cavidade

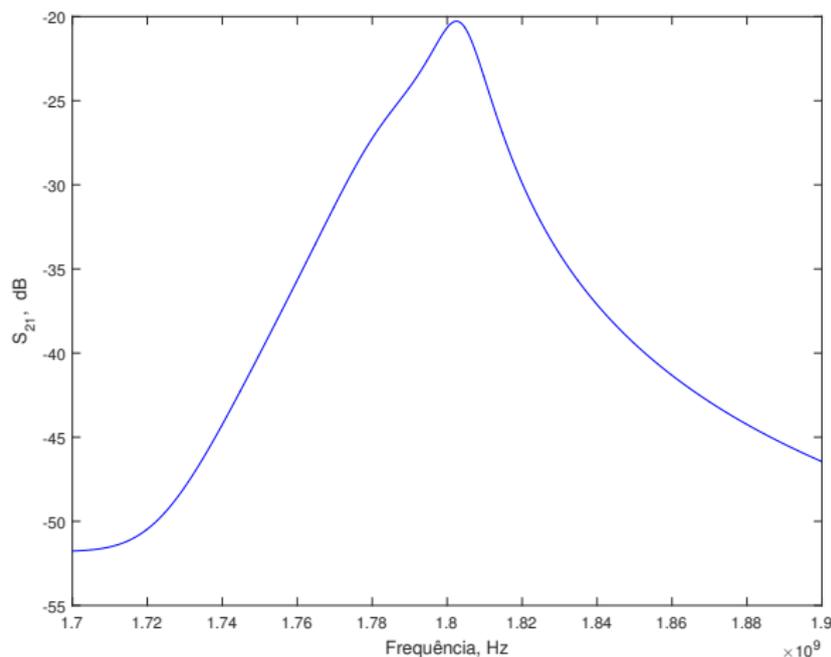
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com água:



f_r (calculado): 1835,31 MHz; f_r (simulado): 1802,55 MHz;

Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com água:



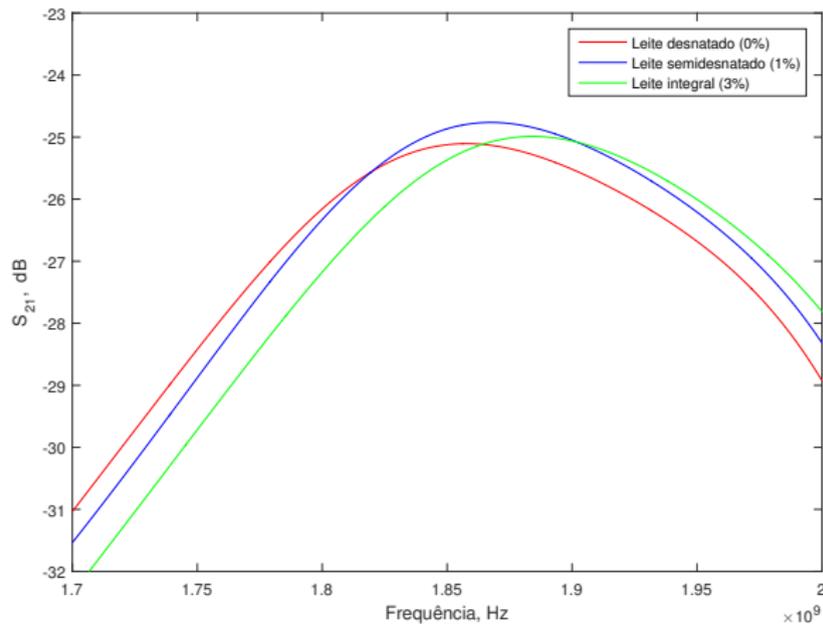
f_r (calculado): 1835,31 MHz; f_r (simulado): 1802,55 MHz; Erro: 1,79%.

Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite**:

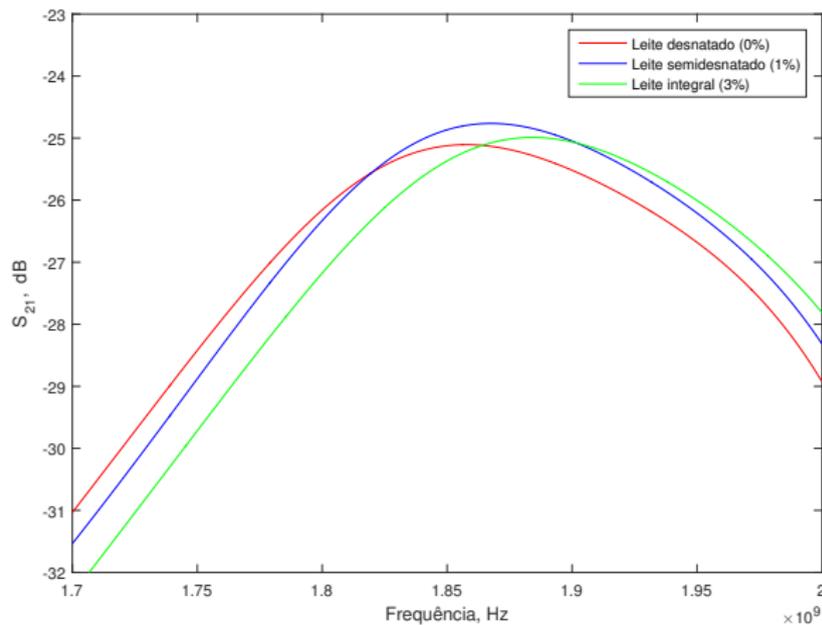
Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite**:



Simulação da cavidade

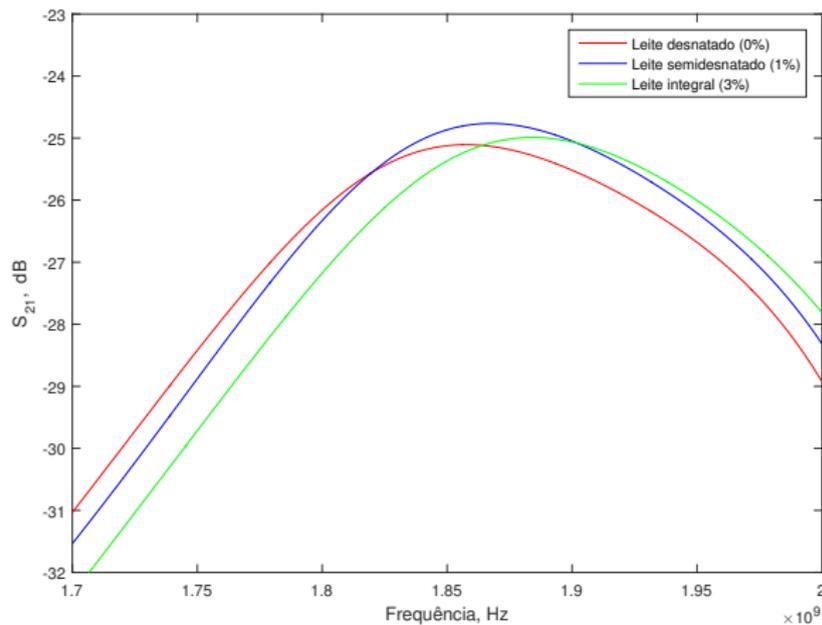
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite**:



f_r (0%): 1858,57 MHz;

Simulação da cavidade

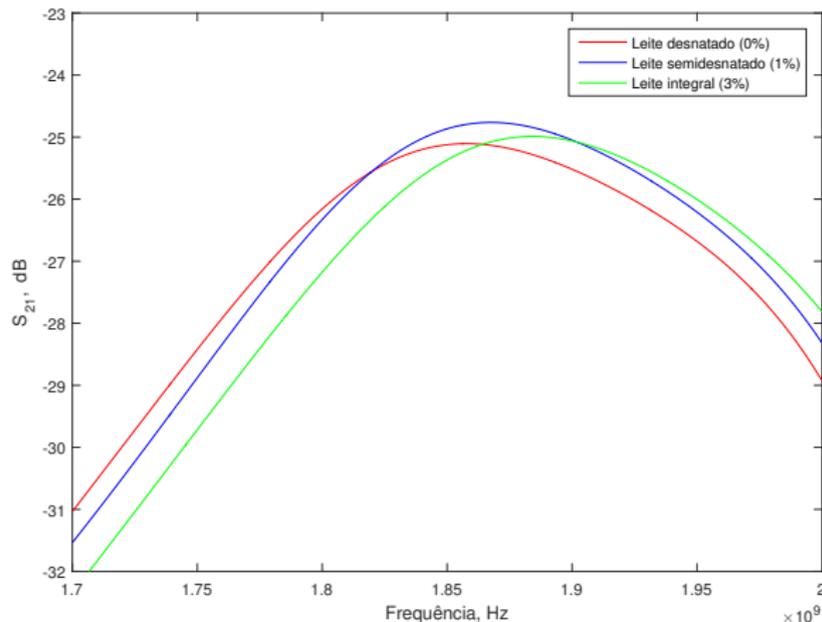
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite**:



f_r (0%): 1858,57 MHz; f_r (1%): 1867,02 MHz;

Simulação da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite**:



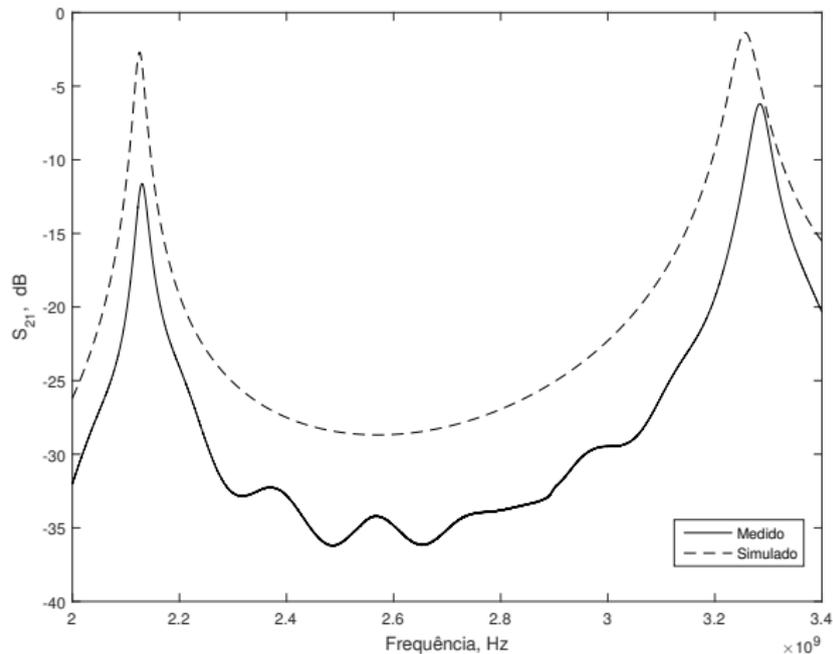
f_r (0%): 1858,57 MHz; f_r (1%): 1867,02 MHz; f_r (3%): 1884,06 MHz.

Medição da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com ar:

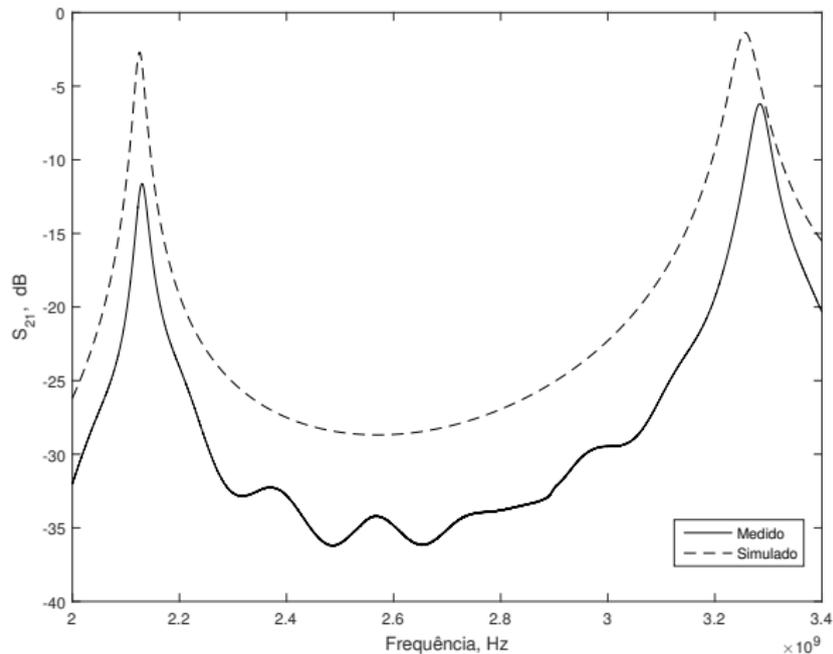
Medição da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com ar:



Medição da cavidade

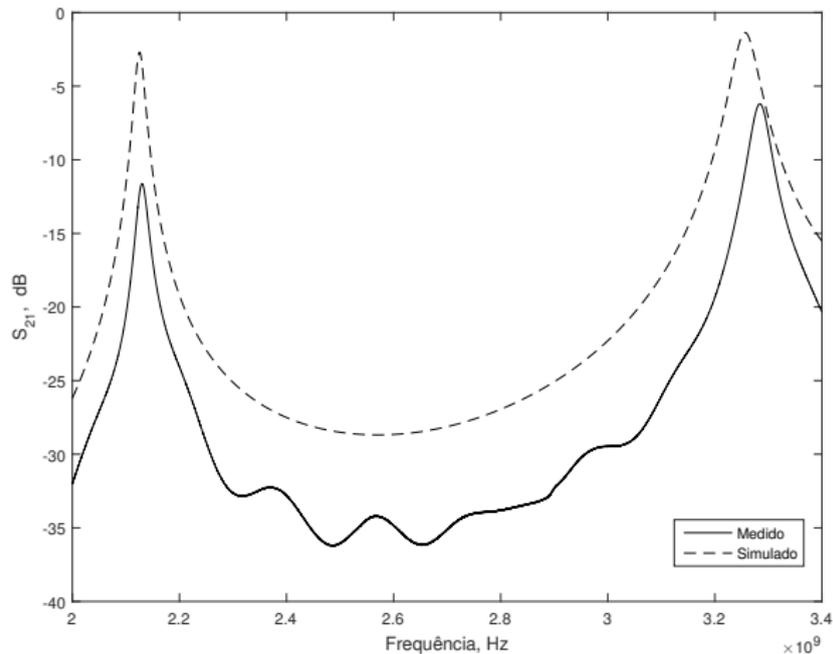
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com ar:



f_r (calculado): 2241,64 MHz;

Medição da cavidade

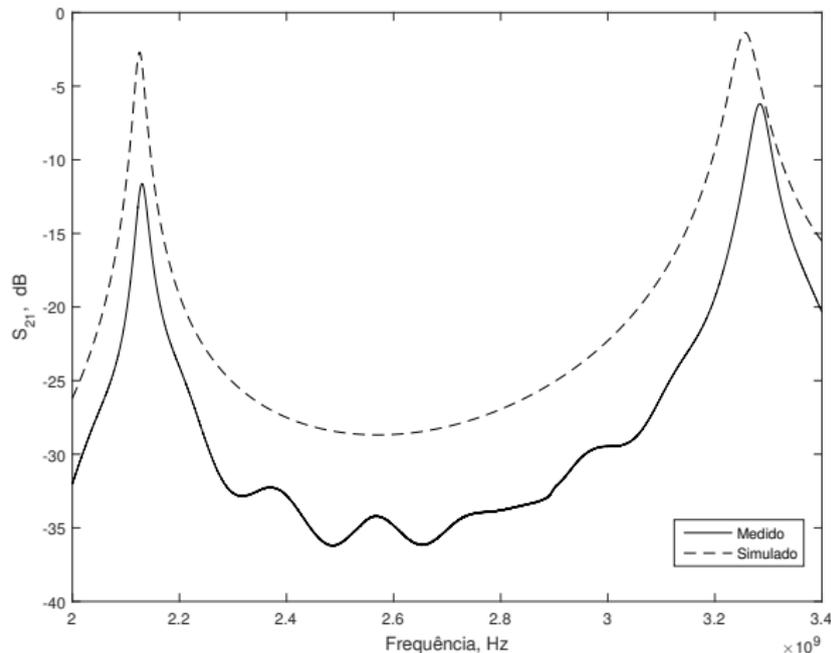
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com ar:



f_r (calculado): 2241,64 MHz; f_r (medido): 2130,25 MHz;

Medição da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com ar:



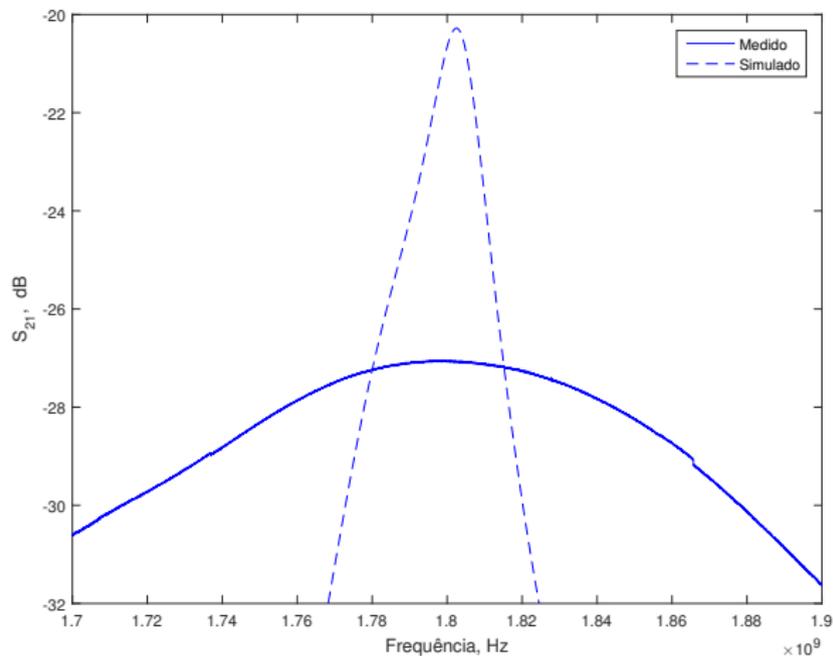
f_r (calculado): 2241,64 MHz; f_r (medido): 2130,25 MHz; Erro: 4,97%.

Medição da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com água:

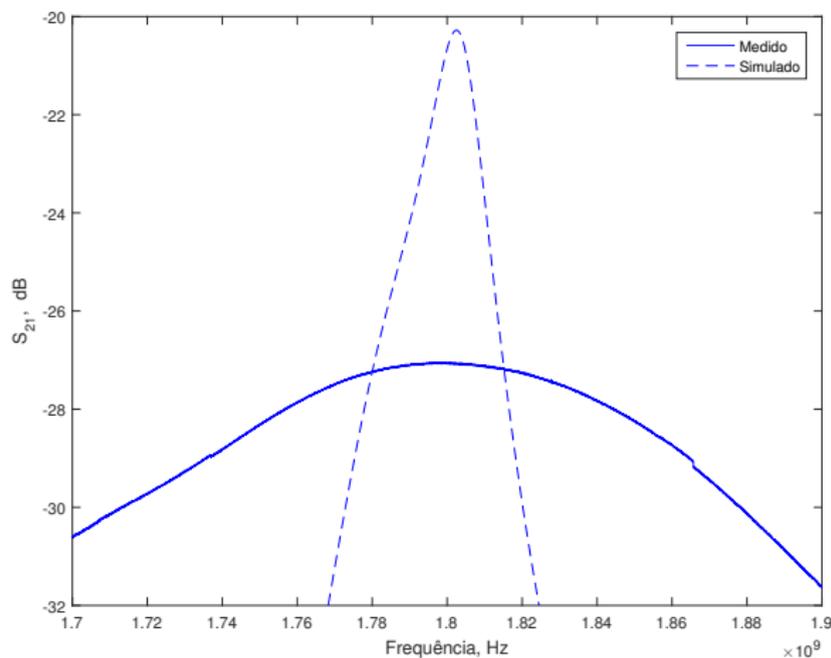
Medição da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com água:



Medição da cavidade

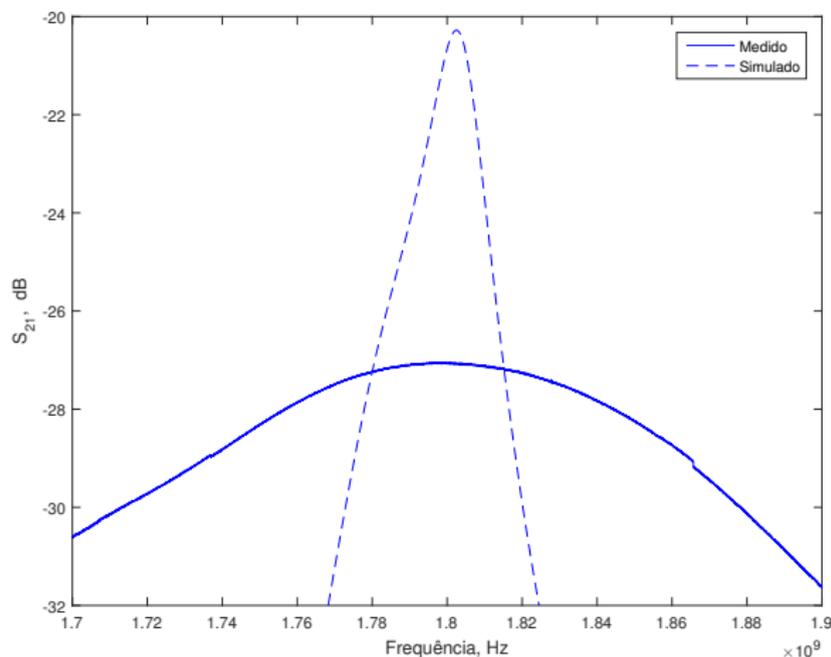
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com água:



f_r (calculado): 1835,31 MHz;

Medição da cavidade

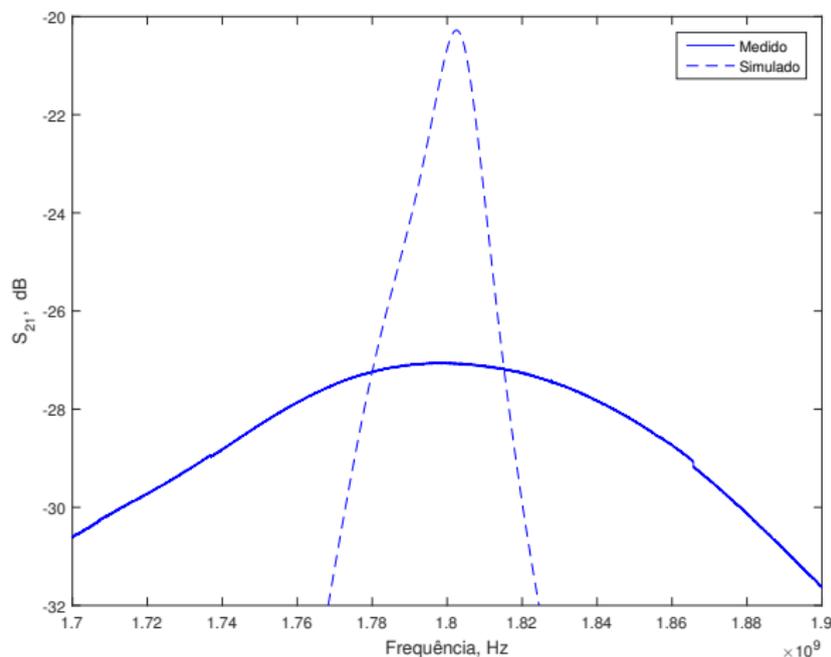
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com água:



f_r (calculado): 1835,31 MHz; f_r (medido): 1802,50 MHz;

Medição da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com água:



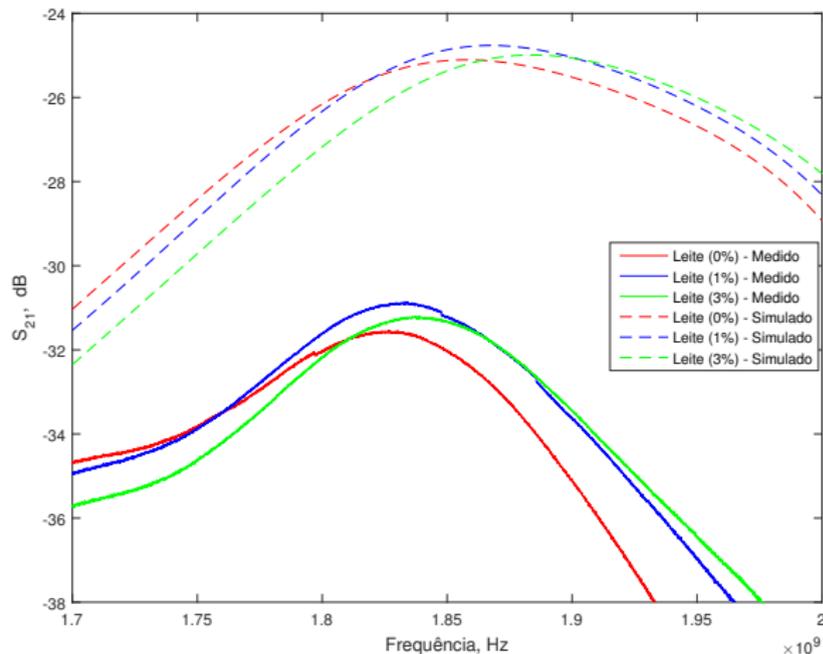
f_r (calculado): 1835,31 MHz; f_r (medido): 1802,50 MHz; Erro: 1,79%.

Medição da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite**:

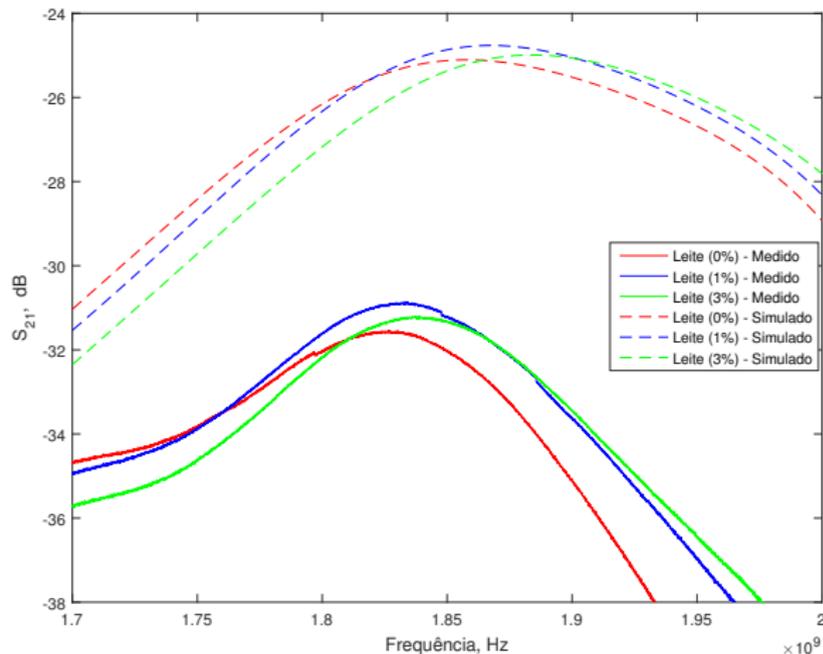
Medição da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite**:



Medição da cavidade

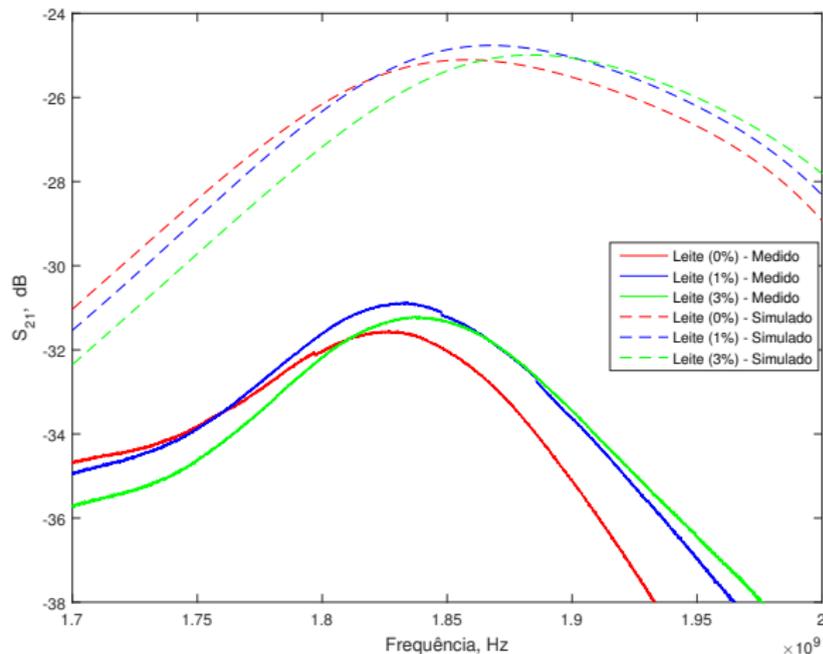
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite**:



f_r (0%): 1826,70 MHz;

Medição da cavidade

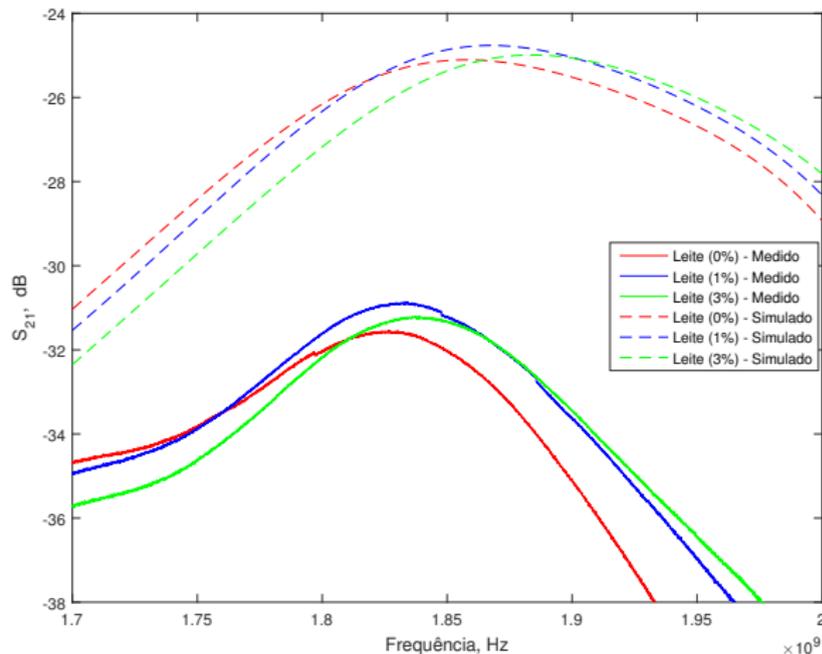
→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite**:



f_r (0%): 1826,70 MHz; f_r (1%): 1829,80 MHz;

Medição da cavidade

→ Cavidade com o duto PVC preenchido com **leite**:



f_r (0%): 1826,70 MHz; f_r (1%): 1829,80 MHz; f_r (3%): 1835,95 MHz.

Medição da cavidade

Comparação entre as simulações e as medições:

Medição da cavidade

Comparação entre as simulações e as medições:

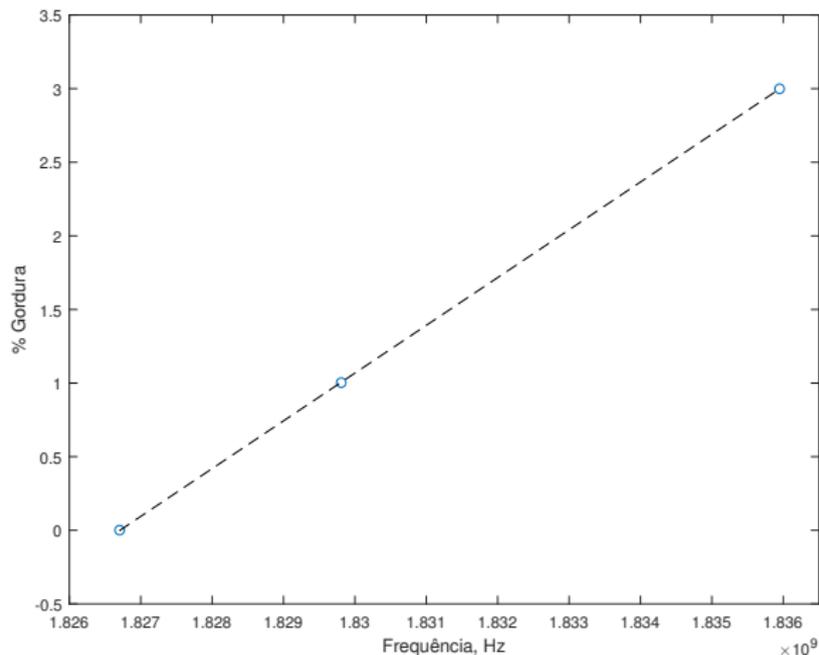
	f_r (calculado)	f_r (simulado)	f_r (medido)	Q (simulado)	Q (medido)	S_{21} (simulado)	S_{21} (medido)	Z_{in} (medido)
Ar	2241,64 MHz	2125,53 MHz	2130,25 MHz	111,87	94,93	-2,69 dB	-11,65 dB	$12,39 - j3,52 \Omega$
Água	1835,31 MHz	1802,55 MHz	1802,50 MHz	105,78	12,43	-20,28 dB	-27,07 dB	$4,60 - j16,35 \Omega$
Leite desnatado (0%)	1837,83 MHz	1858,57 MHz	1826,70 MHz	9,44	13,99	-25,11 dB	-31,59 dB	$3,54 - j15,65 \Omega$
Leite semidesnatado (1%)	1838,15 MHz	1867,02 MHz	1829,80 MHz	10,37	12,33	-24,76 dB	-30,92 dB	$3,55 - j13,07 \Omega$
Leite integral (3%)	1838,87 MHz	1884,06 MHz	1835,95 MHz	9,32	11,76	-24,99dB	-31,22 dB	$3,48 - j15,14 \Omega$

Medição da cavidade

→ Correlação entre a frequência de ressonância e o percentual de gordura no leite:

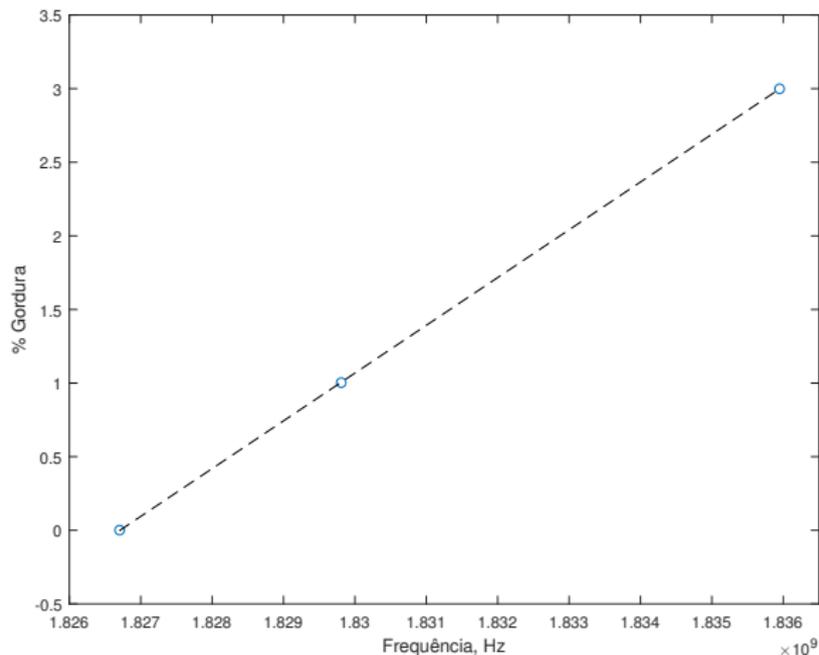
Medição da cavidade

→ Correlação entre a frequência de ressonância e o percentual de gordura no leite:



Medição da cavidade

→ Correlação entre a frequência de ressonância e o percentual de gordura no leite:



$$y = 3,25 * 10^{-7} x - 5,93 * 10^2.$$

Sumário

- 1 Introdução
- 2 Revisão teórica
- 3 Projeto de um sensor
- 4 Prova de conceito
- 5 Conclusões**

Conclusões

Projeto da cavidade ressonante:

Conclusões

Projeto da cavidade ressonante:

Foram definidos parâmetros para uma cavidade otimizada.

Conclusões

Projeto da cavidade ressonante:

Foram definidos parâmetros para uma cavidade otimizada.

Ajuste necessário:

Conclusões

Projeto da cavidade ressonante:

Foram definidos parâmetros para uma cavidade otimizada.

Ajuste necessário:

Alteração da posição da amostra para que seu pico de ressonância pudesse ser localizado.

Conclusões

Projeto da cavidade ressonante:

Foram definidos parâmetros para uma cavidade otimizada.

Ajuste necessário:

Alteração da posição da amostra para que seu pico de ressonância pudesse ser localizado.

Prova de conceito:

Conclusões

Projeto da cavidade ressonante:

Foram definidos parâmetros para uma cavidade otimizada.

Ajuste necessário:

Alteração da posição da amostra para que seu pico de ressonância pudesse ser localizado.

Prova de conceito:

Uso de uma lata de cera como cavidade ressonante e testes com leites desnatado, semidesnatado e integral.

Conclusões

Distinção entre as amostras analisadas:

Conclusões

Distinção entre as amostras analisadas:

Resultados de medição indicam a capacidade do sensor em identificar o percentual de gordura do leite.

Conclusões

Distinção entre as amostras analisadas:

Resultados de medição indicam a capacidade do sensor em identificar o percentual de gordura do leite.

Trabalhos futuros:

Conclusões

Distinção entre as amostras analisadas:

Resultados de medição indicam a capacidade do sensor em identificar o percentual de gordura do leite.

Trabalhos futuros:

- Medições com amostras em maior quantidade e variedade;

Conclusões

Distinção entre as amostras analisadas:

Resultados de medição indicam a capacidade do sensor em identificar o percentual de gordura do leite.

Trabalhos futuros:

- Medições com amostras em maior quantidade e variedade;
- Medições em temperaturas mais altas.

- Obrigado.