

**Universidade Estadual de Campinas**  
**Faculdade de Engenharia Mecânica**

**Trabalho Final - Identificação de Falhas em Sistemas Rotativos**  
**ES879 – Sistemas de Aquisição de Dados**

Lara Falqueto Busato	219733
Matheus Santos Sano	222370

CAMPINAS, novembro de 2021

## 1. Introdução

Para assegurar o bom funcionamento de um sistema rotativo é interessante investigar a existência de falhas no maquinário com a utilização de sensores, que medem a vibração das máquinas rotativas e a partir dela geram conjuntos de dados. A partir da orientação destas vibrações é possível obter um sinal, e com base nas características deste sinal no espectro de frequência torna-se possível, de modo não invasivo, identificar qual o tipo de falha que está presente no sistema.

Para uma melhor análise do espectro de frequência, é possível identificar os ruídos do conjuntos de dados e removê-los por meio de filtros.

## 2. Objetivos

O intuito deste trabalho consiste em analisar e comparar sinais provenientes de um sistema rotativo que foram contaminados por duas falhas diferentes, a fim de identificar qual é o tipo destas falhas. Além disso, tem-se o objetivo de aplicar filtros nestes sinais a fim de eliminar os conteúdos indesejados.

## 3. Desenvolvimento

Para a realização deste trabalho foi obtido inicialmente o sinal de referência a partir dos dados que não foram corrompidos por nenhuma interferência. Para isso foram importados os valores de vibração do sistema rotativo na direção horizontal  $x$ , na direção vertical  $y$  e o *tempo*. Para obter o espectro de frequência do sinal sem falha foram removidos os seus ganhos em frequência nulos por meio da subtração de todos os pontos dos vetores  $x$  e  $y$  com a sua respectiva média. Em seguida, montou-se o sinal complexo  $p = x + jy$  que, posteriormente, passou pela transformada de Fourier por meio da função *fft* do software Matlab. Por causa das propriedades de simetria da *fft*, o espectro foi corrigido, alterando o intervalo de frequência da resposta gerada pela função *fft* por meio da função *fftshift*. Além disso, a fase do sinal  $p$  também foi corrigido, convertendo o sinal pelo seu complexo conjugado. Após todos esses procedimentos, foi adquirido finalmente o *fullspectrum* do sinal  $p$ .

O vetor *tempo*, por sua vez, foi necessário para a obtenção da frequência de amostragem, já que ela vai ser importante para a plotagem dos espectros de frequência do sinal sem falha e dos sinais com falha. Vale ressaltar que como todos os vetores possuem o mesmo tamanho, foi calculado o tamanho  $N$  com base apenas no vetor  $x$  do sinal sem falha, e esse valor foi utilizado para todos os cálculos que envolvem  $N$ .

Dessa forma, foi plotado o espectro de frequência do sinal sem falha, que pode ser observado na Figura 01. Como pode ser observado na imagem, o sinal apresenta um pico com amplitude de aproximadamente 1 m na frequência de 80Hz, e este sinal foi utilizado como referência para a identificação do tipo de falha dos demais sinais.

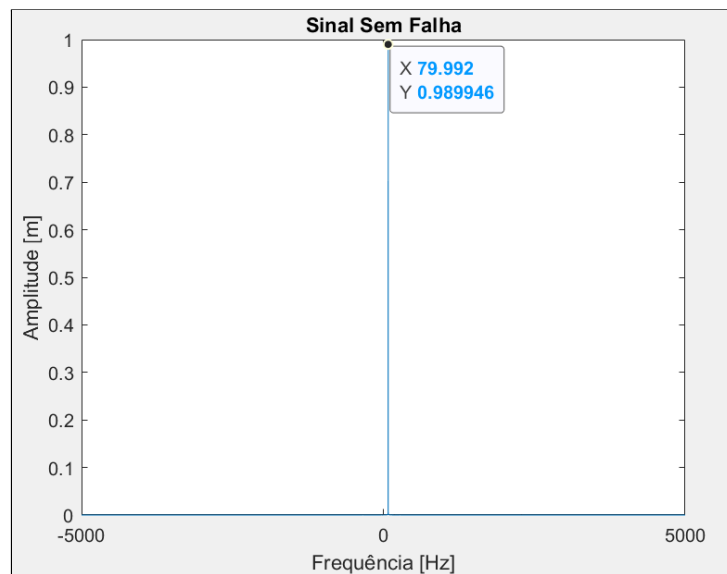


Figura 1: Espectro de frequência do sinal sem falha.

Em seguida, foram importados os vetores  $x$  e  $y$  dos sinais 1, 2, 4, 6, 8 e 10 de cada uma das falhas (Falha 1 e Falha 2). O processo para adquirir o espectro de frequência destes 12 sinais foi o mesmo utilizado para obter o espectro do sinal sem falha. É importante salientar que a frequência de amostragem obtida anteriormente é a mesma para todos os sinais.

Como pode ser observado na Figura 1, a amplitude do sinal sem falha é de aproximadamente 1 m. Além disso, sabe-se que a velocidade de rotação da máquina foi a mesma para todos os casos, logo, para todos os casos foi fornecida a mesma energia. Sendo assim, para descobrir o tipo de falha foi necessário identificar nos espectros dos sinais quais são as frequências cujas amplitudes somadas à amplitude em 80Hz totalizam 1 m. A Figura 2, por exemplo, apresenta o espectro de frequência do sinal 1 Falha 1 e também aponta as frequências cujas amplitudes somadas são as que mais se aproximam de 1 m.

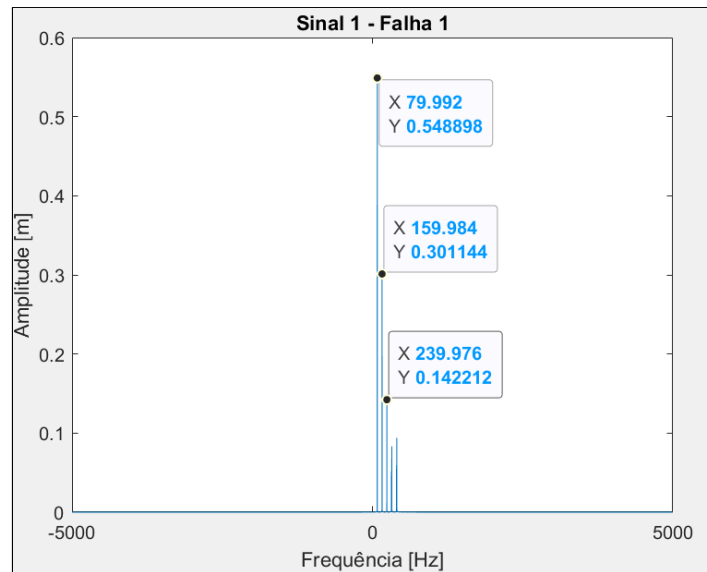


Figura 02: Espectro de frequência do sinal 1 Falha 1.

Como pode ser visto na Figura 02, a soma das amplitudes das frequências 79.992, 159.984 e 239.976 é aproximadamente 1 m, e este é um indicativo de que estas são as componentes originadas pela falha. Considerando este caso, percebe-se que a falha acarretou no surgimento de componentes  $2x$  e  $3x$ :

$$2x = 2 * 79.992 = 159.984$$

$$3x = 3 * 79.992 = 239.976$$

Comparando o espectro do sinal 1 com os espectros dos outros sinais da Falha 1, percebeu-se que em todos os casos a soma da amplitude das componentes  $x$ ,  $2x$  e  $3x$  é aproximadamente 1. Com isso, constatou-se que a Falha 1, de fato, estava relacionada com o surgimento de componentes em  $2x$  e  $3x$  e é causada pelo desalinhamento.

Além disso, ao analisar o espectro da Figura 02 percebe-se a presença de outros componentes além do sinal e das componentes originadas pela falha. O sinal, por ter sido corrompido, apresenta ruídos e interferências que devem ser retirados para que o sinal apresente apenas informações úteis.

Para a remoção destes ruídos foram implementados filtros FIR passa-baixa e passa-alta. Algumas vantagens do uso do filtro FIR são a ausência de distorção na fase do sinal e a sua propriedade de simetria. A ordem e a frequência de corte nos filtros foram determinadas após uma sucessão de testes em cada sinal visando suprimir adequadamente os ruídos com um filtro menos custoso, ou seja, obter o melhor custo benefício do filtro.

No caso do sinal 1 Falha 1, foi aplicado um filtro FIR passa-baixa com uma frequência de corte de 280 Hz. O sinal filtrado é apresentado na Figura 03:

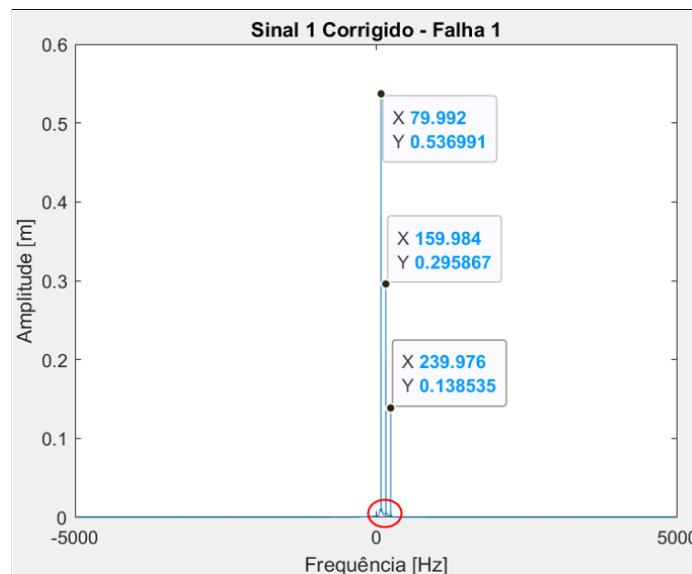


Figura 03: Espectro de frequência do sinal 1 Falha 1 corrigido. O espalhamento de energia gerado pela filtragem do sinal é indicado pelo círculo vermelho.

Na Figura 03, pode-se observar o sinal 1 filtrado apresentando apenas as componentes,  $x$ ,  $2x$  e  $3x$ , como desejado. É perceptível uma pequena diminuição nas amplitudes em comparação ao sinal 1 da Figura 02. Essa queda é aceitável após a filtragem por conta do espalhamento de energia do sinal que pode ser observado na região circulada em vermelho na Figura 02.

Além da utilização dos filtros FIR passa-alta e passa-baixa, em alguns sinais da Falha 1 foi necessário retirar ruídos de frequências negativas e para isso o espectro localizado na parte negativa das frequências foi zerado. Entretanto, como isso não é suficiente para limpar o sinal, já que ele ainda estará contaminado com os ruídos, o sinal alterado foi transformado para o domínio do tempo por meio da Transformada Inversa de Fourier, formando um sinal no tempo sem as frequências negativas. Por meio da Transformada de Fourier o sinal modificado foi transformado novamente para o domínio das frequências, agora sem estar contaminado com os ruídos de frequências negativas.

Em cada um dos 12 sinais com falha escolhidos foram identificados os ruídos presentes no sinal e suprimidos. Por fim, foram apontados os conteúdos no espectro em frequência para a identificação do tipo da falha com o auxílio da Tabela 01 [1]. O procedimento detalhado para cada sinal é apresentado na parte de Resultados e Discussão.

Tipo de Falha	Sintomas no Conteúdo em Frequência
Desalinhamento	Surgimento de Componentes em $2x$ e $3x$
Empenamento	Surgimento de Componentes em $0,5x$ e $1,5x$
Desgaste do Mancal	Surgimento de Componentes em $-1x$ e $-2x$
Trinca do Eixo	Surgimento de Componentes em $2x$ e $-1x$

Tabela 01: Sintomas no conteúdo em frequência para diferentes tipos de falha.

## 4. Resultados e discussão

### FALHA 1

- Sinal 1

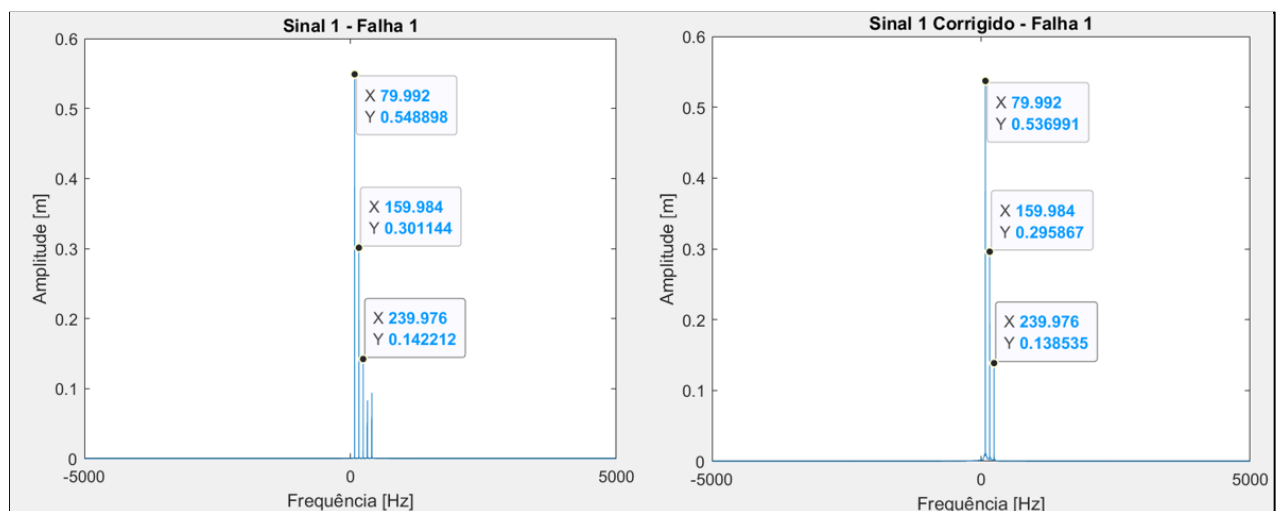


Figura 04: Espectro de frequência do sinal 1 Falha 1 (à esquerda). Espectro de frequência do sinal 1 Falha 1 corrigido (à direita).

A correção feita neste sinal foi o uso de um filtro FIR passa-baixa para que as frequências maiores (ruídos) sejam suprimidas. Para a implementação do filtro, a frequência de corte utilizada foi 280 Hz e a ordem do filtro foi 400. Essa filtragem no sinal 1 pode ser analisada comparando a Figura 04. Após a retirada dos ruídos, pode-se perceber que os  $x$ ,  $2x$  e  $3x$  são causados pelo desalinhamento.

- Sinal 2

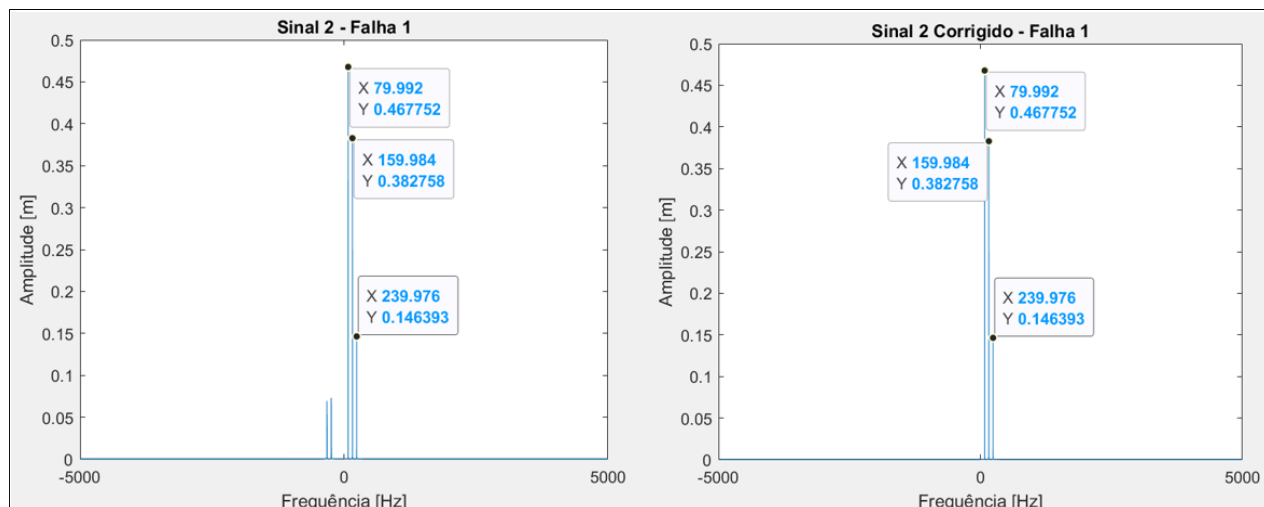


Figura 05: Espectro de frequência do sinal 2 Falha 1 (à esquerda). Espectro de frequência do sinal 2 Falha 1 corrigido (à direita).

A correção feita neste sinal 2 foi apenas a supressão das frequências negativas presentes no sinal original apresentado no espectro da esquerda na Figura 05. Após a retirada dos ruídos, pode-se identificar na imagem os componentes são x, 2x e 3x, sendo que os conteúdos de 2x e 3x são causados pelo desalinhamento.

- Sinal 4

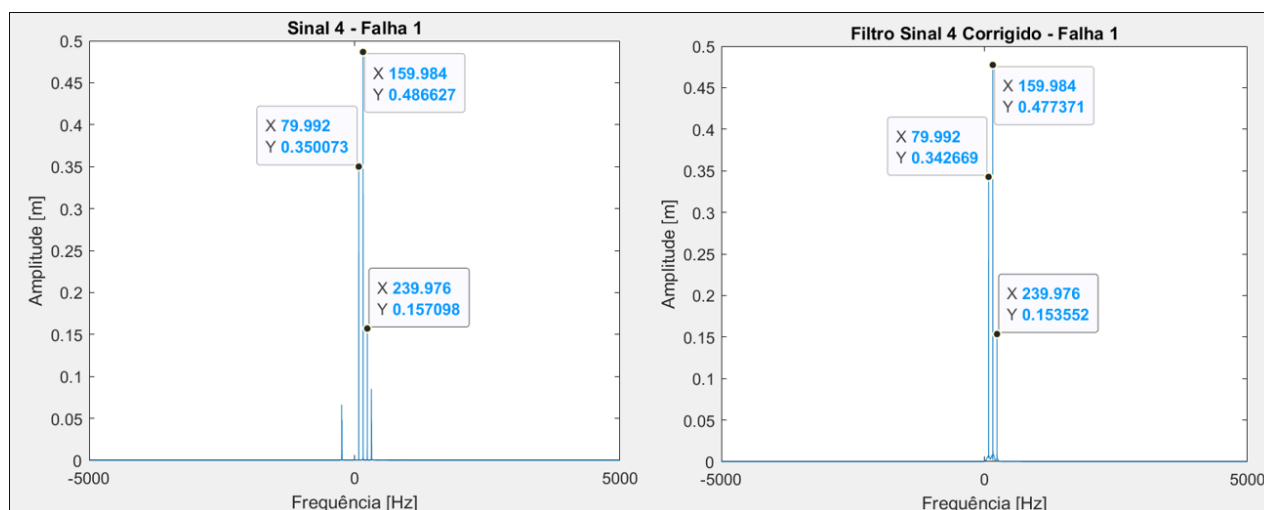


Figura 06: Espectro de frequência do sinal 4 Falha 1 (à esquerda). Espectro de frequência do sinal 4 Falha 1 corrigido (à direita).

A correção feita neste sinal foi o uso de um filtro FIR passa-baixa para que as frequências maiores (ruídos) sejam removidas. Para a implementação do filtro, a frequência de corte utilizada foi 280 Hz e a ordem do filtro foi 400. Em seguida, houve a retirada das frequências negativas, resultando no espectro da direita apresentado na Figura 06. Assim, como nos sinais 1 e 2, os componentes são x, 2x e 3x, representando o desalinhamento.

#### - Sinal 6

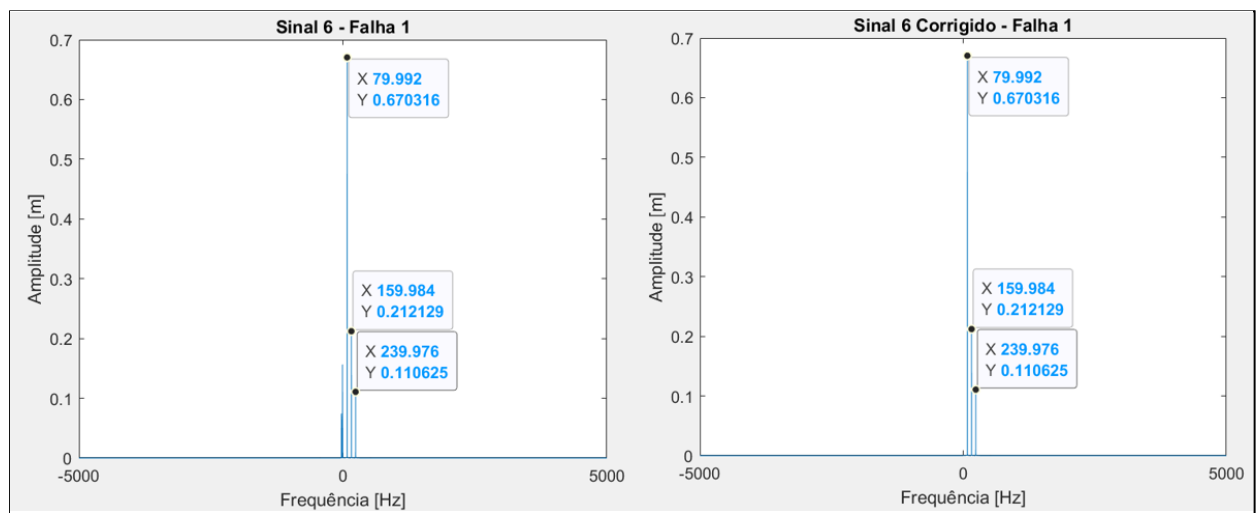


Figura 07: Espectro de frequência do sinal 6 Falha 1 (à esquerda). Espectro de frequência do sinal 6 Falha 1 corrigido (à direita).

Para a correção neste sinal foi feita a retirada das frequências negativas, resultando no espectro da direita apresentado na Figura 06. Assim, os componentes x, 2x e 3x representam o desalinhamento.



- Sinal 8

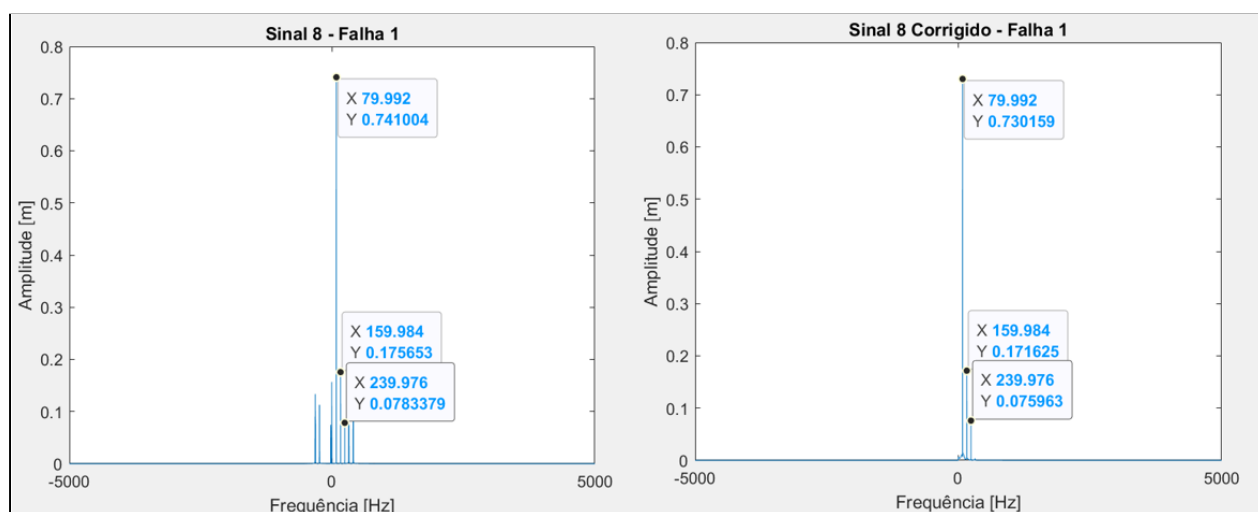


Figura 08: Espectro de frequência do sinal 8 Falha 1 (à esquerda). Espectro de frequência do sinal 8 Falha 1 corrigido (à direita).

Assim como no sinal 6 da Falha 1, a correção feita neste sinal foi o uso de um filtro FIR passa-baixa para a remoção das frequências maiores que 240Hz, seguido da supressão das frequências negativas. Para a implementação do filtro, a frequência de corte utilizada foi 280 Hz e a ordem do filtro foi 350. Os componentes obtidos após essa correção foram x, 2x e 3x, caracterizando também o desalinhamento.

- Sinal 10

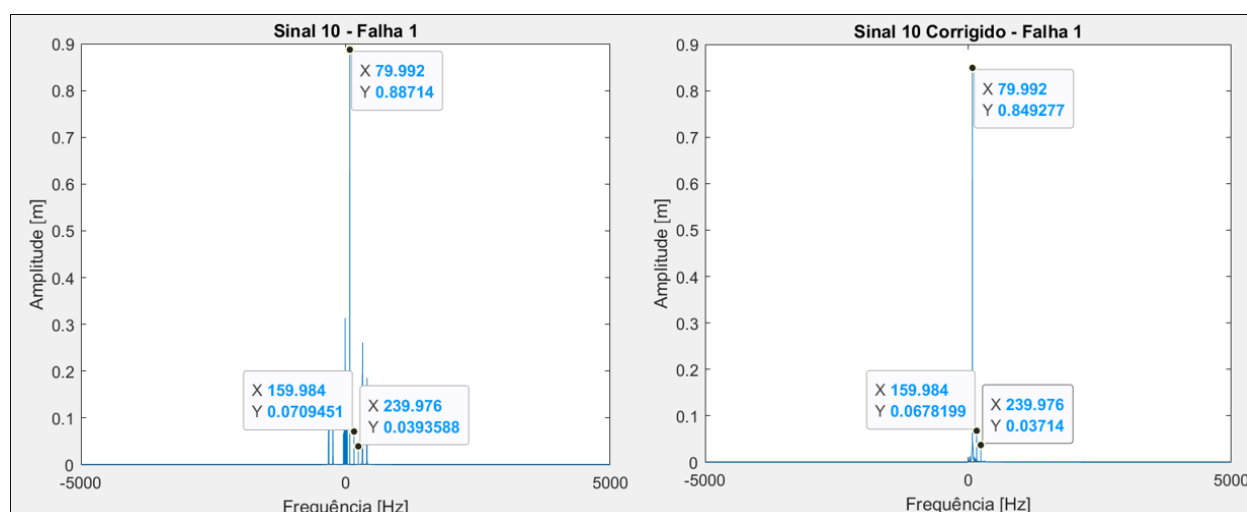


Figura 09: Espectro de frequência do sinal 10 Falha 1 (à esquerda). Espectro de frequência do sinal 10 Falha 1 corrigido (à direita).

Por fim, a correção do sinal 10 da Falha 1 foi feita pela implementação de um filtro FIR passa-baixa para retirar as frequências maiores de 240 Hz. Para a implementação do filtro FIR passa-baixa, a frequência de corte utilizada foi 281 Hz e a ordem do filtro foi 370. Em seguida, foi aplicado um filtro FIR passa-alta para remover as frequências menores do que 79.992Hz. Já para a implementação deste filtro, a frequência de corte utilizada foi 45 Hz e a ordem do filtro foi 500. Neste sinal foram retiradas também as frequências negativas, resultando no espectro da direita da Figura 09. Como esperado, os componentes importantes para a identificação da falha são  $x$ ,  $2x$  e  $3x$ . Assim como nos outros sinais da Falha 1, a falha é o desalinhamento.

## FALHA 2

### - Sinal 1

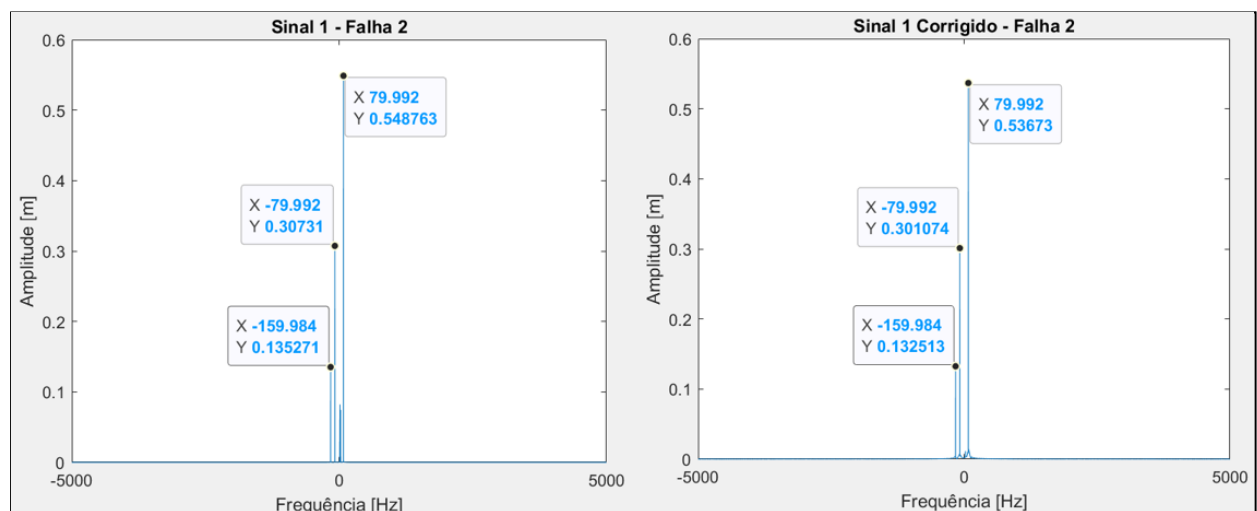


Figura 10: Espectro de frequência do sinal 1 Falha 2 (à esquerda). Espectro de frequência do sinal 1 Falha 2 corrigido (à direita).

Como pode ser visto na Figura 10, a soma das amplitudes das frequências 79.992, -79.992 e -159.984 é aproximadamente 1 m, e este é um indicativo de que estas são as componentes originadas pela falha. Considerando este caso, percebe-se que a falha acarretou no surgimento de componentes  $-x$  e  $-2x$ :

$$-x = -79.992$$

$$-2x = -2 * 79.992 = -159.984$$

Comparando o espectro do sinal 1 com os espectros dos outros sinais da Falha 2, percebeu-se que em todos os casos a soma da amplitude das componentes  $x$ ,  $-x$  e  $-2x$  é aproximadamente 1. Com isso, constatou-se que a Falha 2, de fato, está relacionada com o surgimento de componentes em  $-x$  e  $-2x$ .

A correção feita neste sinal foi o uso de um filtro FIR passa-alta para que as frequências menores que 80 Hz (ruídos) sejam suprimidas. Para a implementação do filtro, a frequência de corte utilizada foi 40 Hz e a ordem do filtro foi 450. Após o sinal ser filtrado, o espectro gerado é apresentado na Figura 10 à direita. Nele é possível verificar os componentes  $x$ ,  $-x$  e  $-2x$ . Assim, a falha identificada é o desgaste de mancal.

#### - Sinal 2

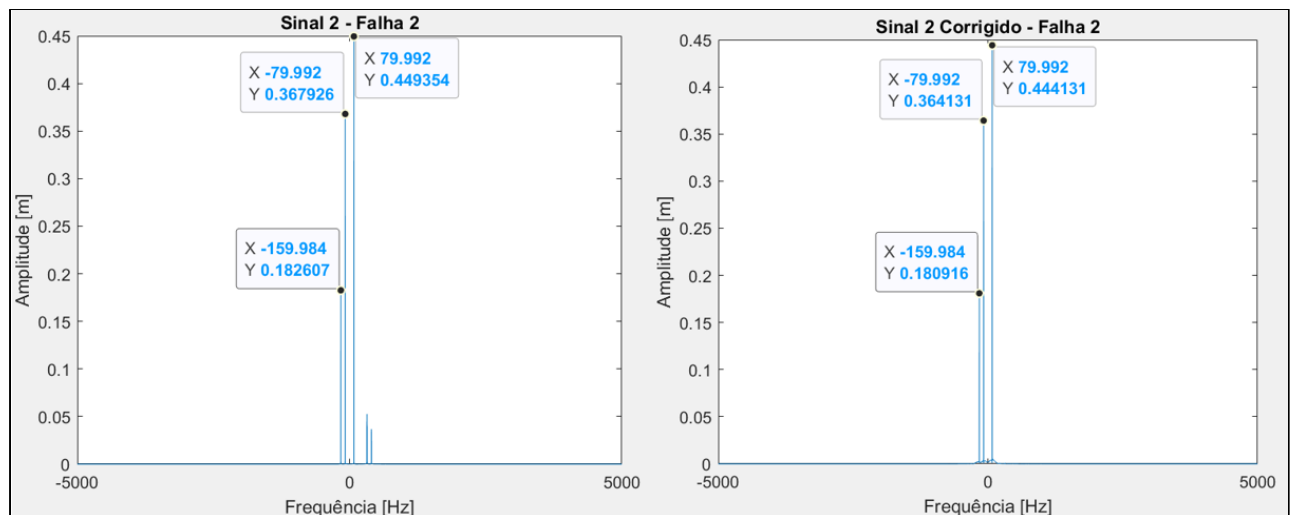


Figura 11: Espectro de frequência do sinal 2 Falha 2 (à esquerda). Espectro de frequência do sinal 2 Falha 2 corrigido (à direita).

Para filtrar este sinal foi utilizado um filtro FIR Passa-Baixa, anulando as frequências maiores que 160Hz. Para a implementação do filtro, a frequência de corte utilizada foi 250 Hz e a ordem do filtro foi 200. Sendo assim, foi obtido o espectro filtrado cujos componentes são  $x$ ,  $-x$  e  $-2x$ , que são relativos ao tipo de falha de desgaste de mancal.

- Sinal 4

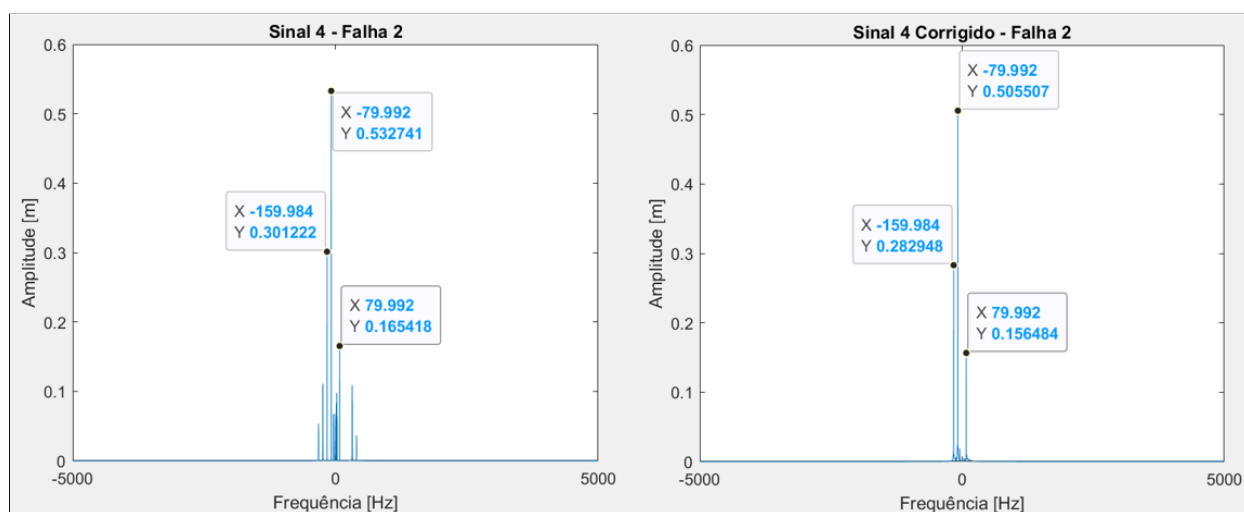


Figura 12: Espectro de frequência do sinal 4 Falha 2 (à esquerda). Espectro de frequência do sinal 4 Falha 2 corrigido (à direita).

Os ruídos deste sinal foram suprimidos por um filtro FIR Passa-Baixa e um filtro FIR Passa-Alta. Para a implementação do filtro passa-baixa a frequência de corte utilizada foi 200 Hz e a ordem do filtro foi 350 e para o filtro passa-alta a frequência de corte utilizada foi 50 Hz e a ordem do filtro foi 550. O primeiro retira as frequências maiores que as desejadas e a segunda remove as frequências menores, obtendo o espectro da direita da Figura 12. Os componentes evidenciados são  $x$ ,  $-x$ , e  $-2x$ , identificando um desgaste de mancal.

- Sinal 6

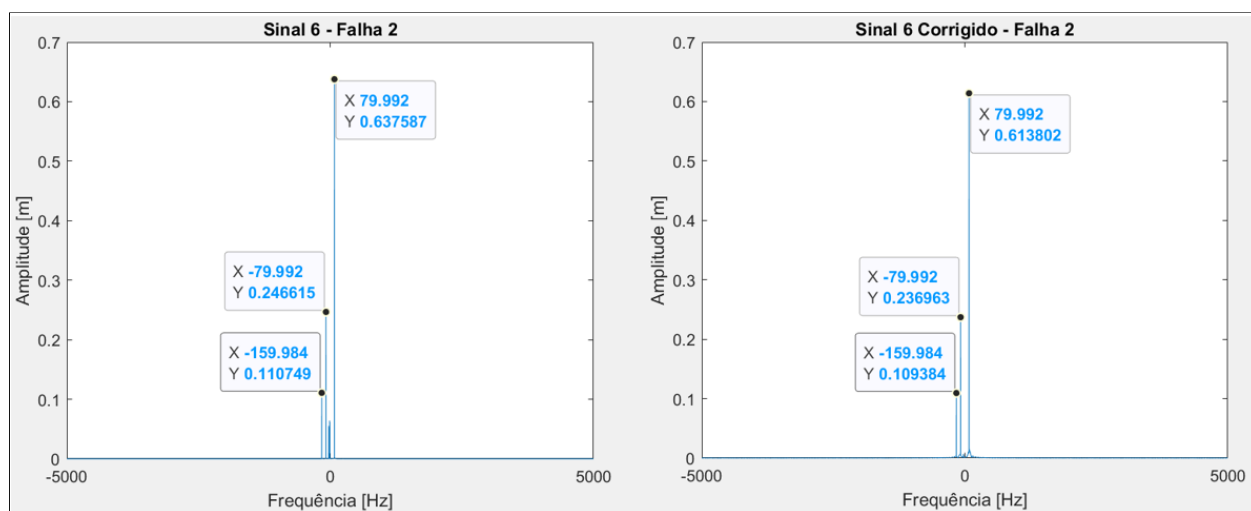


Figura 13: Espectro de frequência do sinal 6 Falha 2 (à esquerda). Espectro de frequência do sinal 6 Falha 2 corrigido (à direita).

Assim como o sinal 1, este passou por um filtro FIR Passa-Alta para retirar os ruídos que estão em frequências baixas, obtendo um sinal filtrado que possui os componentes  $x$ ,  $-x$  e  $-2x$ , que são causados pelo desgaste de mancal. Para a implementação do filtro, a frequência de corte utilizada foi 45 Hz e a ordem do filtro foi 400.

#### - Sinal 8

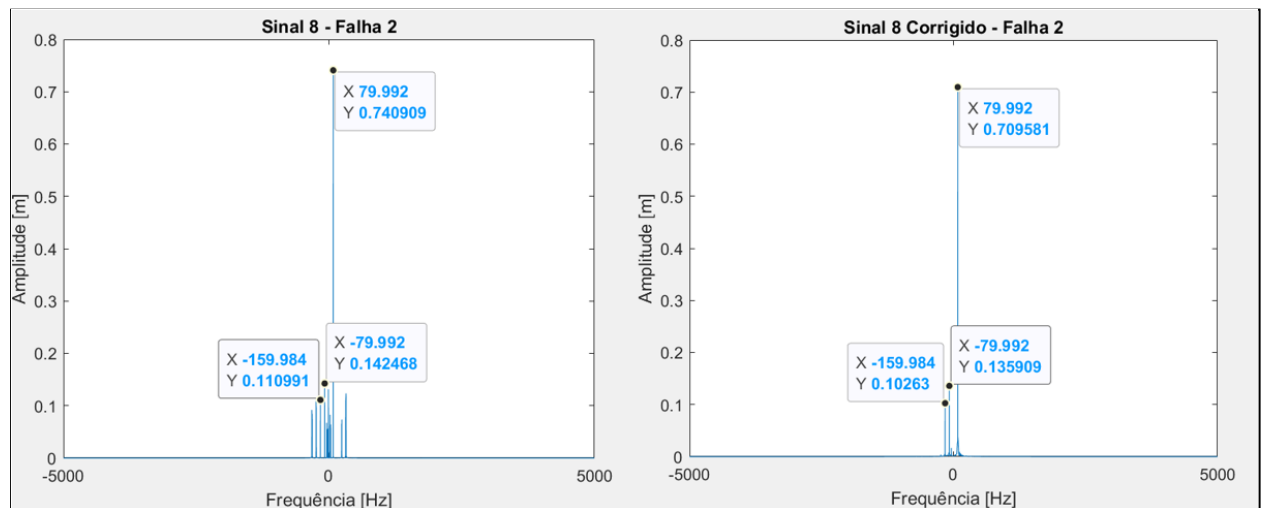


Figura 14: Espectro de frequência do sinal 8 Falha 2 (à esquerda). Espectro de frequência do sinal 8 Falha 2 corrigido (à direita).

Assim como o sinal 4, este sinal foi filtrado por um FIR Passa-Baixa, retirando as frequências elevadas que foram consideradas ruídos. Para a implementação do filtro, a frequência de corte utilizada foi 200 Hz e a ordem do filtro foi 300. Em seguida, ele passou por um FIR Passa-Alta para suprimir as frequências menores, que possui a frequência de corte 50 e a ordem 600. O espectro gerado após estas duas filtrações possui os componentes  $x$ ,  $-x$  e  $-2x$  e pode ser visualizado no espectro da direita na Figura 14. A falha identificada é o desgaste de mancal e o espectro não apresenta ruídos ou interferências.

## - Sinal 10

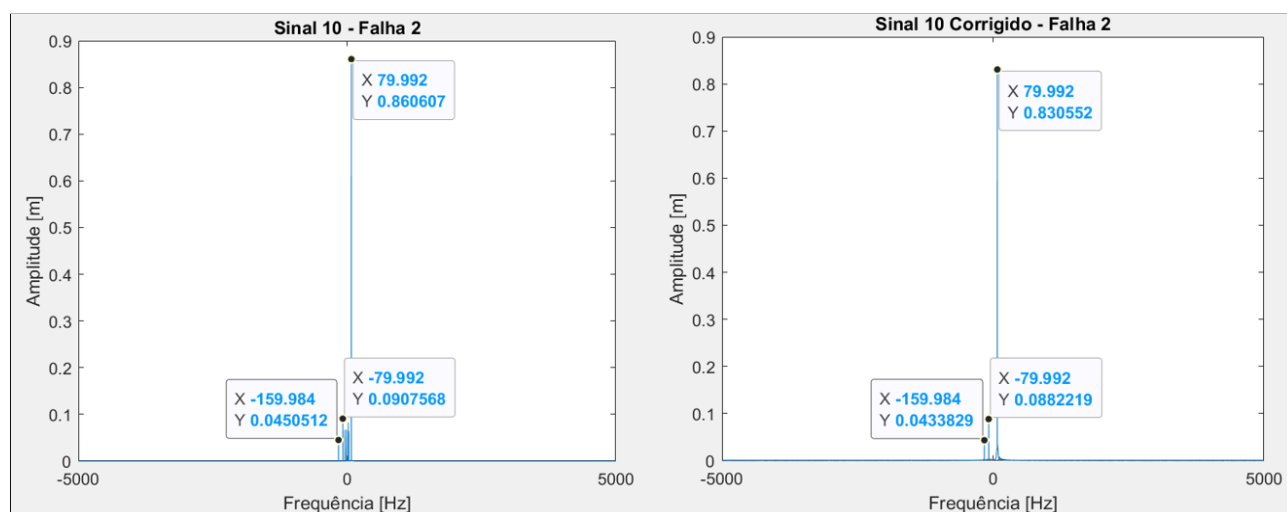


Figura 15: Espectro de frequência do sinal 10 Falha 2 (à esquerda). Espectro de frequência do sinal 10 Falha 2 corrigido (à direita).

Para eliminar os ruídos presentes neste sinal foi aplicado um filtro FIR Passa-Alta que retira as frequências entre -55Hz e 55 Hz a fim de obter um espectro com apenas as 3 amplitudes relevantes para a identificação da falha. Para a implementação do filtro, a frequência de corte utilizada foi 55 Hz e a ordem do filtro foi 700. Neste caso, elas são 79.992, -79.992 e -159.984 ( $x$ ,  $-x$ ,  $-2x$ ), identificando a falha o desgaste de mancal, e os ruídos foram eliminados.

## 5. Conclusão

Pode-se concluir que a Falha 1 se trata de um desalinhamento, pois em todos os sinais desta falha o espectro de frequência apresentou conteúdo em  $x$  (79.992m),  $2x$  (159.984) e  $3x$  (239.976m), e a soma destes componentes é aproximadamente 1 m. Além disso, os ruídos com frequência positiva foram eliminados com a utilização de filtros FIR passa-baixa e passa-alta. Os ruídos com frequência negativa, por sua vez, foram anulados, como explicado na parte de Desenvolvimento. Após a remoção dos ruídos em todos os sinais, obteve-se, por fim, os espectros dos sinais 1, 2, 4, 6, 8, 10 alterados apenas pelo desalinhamento.

Os sinais da Falha 2, por sua vez, apresentaram conteúdo em  $x$  (79.992m),  $-x$  (-79.992m) e  $-2x$  (-159.984m) com a soma destes componentes equivalente a aproximadamente 1 m. Portanto, a Falha 2 se trata de um desgaste de mancal. Nesta falha, os ruídos de frequência positiva e negativa foram corrigidos por meio de filtros FIR passa-baixa e passa-alta, deixando apenas o conteúdo relativo ao padrão da falha 2. Após a remoção dos ruídos em todos os sinais, obteve-se, por fim, os espectros dos sinais 1, 2, 4, 6, 8, 10 alterados apenas pelo desgaste de mancal.

## 6. Referências bibliográficas

[1] HENRIQUE MACHADO, Tiago. **Sistema de Aquisição de Dados**. Campinas. 28 out. 2021. Apresentação em PDF. 20 slides. color, AULA 20 - Apresentação e Discussão do Projeto Final da Universidade Estadual de Campinas. Acesso em: 11 nov. 2021.