

2 m do sensor-atuador (viga simples de metal sem barreiras). Claramente, este não é o caso do rotor apresentado na Fig. 7.1 (seções delimitadas pelos discos). Assim, foram coladas no eixo um total de quatro pastilhas de PZT, além de uma pastilha extra em uma das faces do disco  $D_2$ . A Fig. 7.3 apresenta um esquema com a disposição de cada uma das cinco pastilhas distribuídas pelo eixo e disco, denominadas como PZT-1, PZT-2, PZT-3, PZT-4 e PZT-D (numerados a partir do mancal híbrido  $B_1$ ). O PZT-3 encontra-se ao longo da direção  $X$  positiva (direção horizontal). Note que as quatro pastilhas acopladas ao eixo encontram-se em posições angulares distintas. Isto foi assim realizado por não se conhecer, *a priori*, a forma com que as ondas geradas pelas cerâmicas piezelétricas iriam se propagar pelo eixo durante a operação da máquina (eixo girando). Assim, eles foram dispostos a  $90^\circ$  uns dos outros com o intuito de abranger a maior superfície possível para detecção. O PZT-D foi acoplado ao disco para investigar se sensores acoplados ortogonalmente aos danos são capazes de detectar falhas no eixo. Isto se torna interessante, pois, em caso de sucesso, não seria necessário realizar a usinagem no eixo. Logicamente, o referido processo de usinagem é uma desvantagem da metodologia (por exemplo, em máquinas industriais os PZT podem ser acoplados a polias).

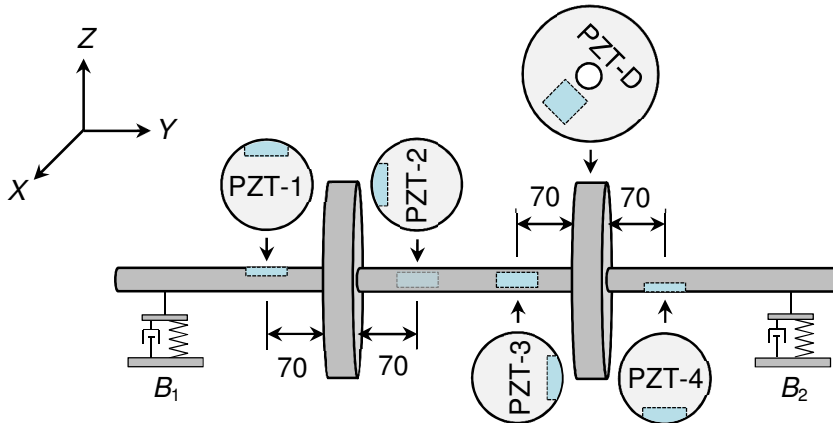


Figura 7.3 – Distribuição das pastilhas de PZT ao longo do eixo e sobre a face do disco  $D_2$  (dimensões em mm).

A colagem dos PZT foi realizada utilizando a cola *REPSOL*<sup>®</sup>, selecionada pela boa adesão das pastilhas piezelétricas em estruturas de aço (análise realizada por outros pesquisadores do LMEst). Para acelerar o processo de cura e obter um melhor acoplamento eletromecânico, instantaneamente após a fixação de cada sensor PZT no eixo, a região foi aquecida durante 15 min a uma temperatura máxima de  $65^\circ\text{C}$ . A cola utilizada neste tipo de aplicação deve prover a maior adesão possível e, ao mesmo tempo, não ser totalmente rígida. Tem-se um eixo flexível onde o movimento dinâmico resultante da rotação tende sempre

a descolar a pastilha de PZT (órbita do centro do eixo e precessões agindo conjuntamente). Esta é mais uma especificidade enfrentada na aplicação do método da Impedância Eletromecânica em eixos rotativos.

Outro desafio encontrado no desenvolvimento da técnica de SHM proposta refere-se à coleta das assinaturas de impedância com a bancada em operação (envio dos sinais de excitação das pastilhas de PZT e aquisição das respostas). Isto foi realizado através de um conector rotativo (MOOG® modelo EC3848-10), conhecido comumente como *Slip Ring*. Este dispositivo transmite sinais elétricos da coordenada fixa para a rotativa (e vice-versa) com baixa interferência de ruídos, mesmo com o rotor operando em altas velocidades (capaz de transferir com qualidade sinais elétricos provenientes de acelerômetros; 0 até 10000 rev/min). O conector que possibilitou a aplicação do método é mostrado na Fig. 7.4.



Figura 7.4 – *Slip Ring* utilizado na aplicação de método da Impedância Eletromecânica com o sistema rotativo em operação.

A Fig. 7.5 mostra o *Slip Ring* já conectado à extremidade do eixo (extremidade próxima ao mancal  $B_2$ ). Note que um dispositivo de náilon é usado no acoplamento das partes. Contudo, para conectar os fios provenientes as pastilhas de PZT ao *Slip Ring*, surgiu à necessidade de vencer a barreira imposta pelo mancal  $B_2$  (fios esmaltados de cobre). Assim sendo, a solução encontrada envolveu outro processo de usinagem no eixo como mostra o esquema de montagem da Fig. 7.6. Dois furos foram feitos, sendo o primeiro deles na direção longitudinal com uma profundidade suficiente para atravessar o mancal  $B_2$ . O segundo furo foi feito na direção transversal do eixo de forma a coincidir com o comprimento final do furo realizado na longitudinal. Desta forma, tornou-se possível a passagem dos fios sem a necessidade de usinar a superfície do eixo (na região da sede do rolamento). Foi esta a primeira solução adotada; sem sucesso.

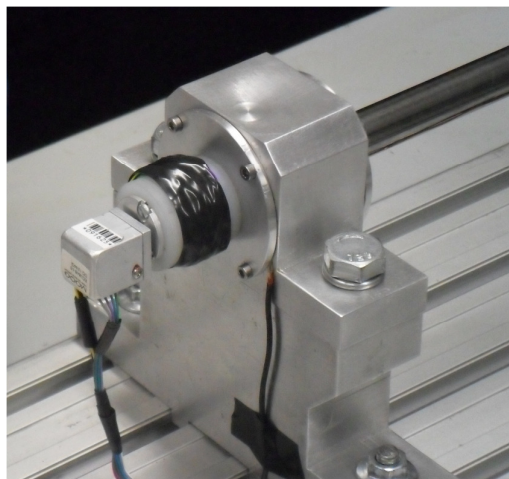


Figura 7.5 – *Slip ring* conectado a extremidade do eixo através do dispositivo de náilon fabricado.

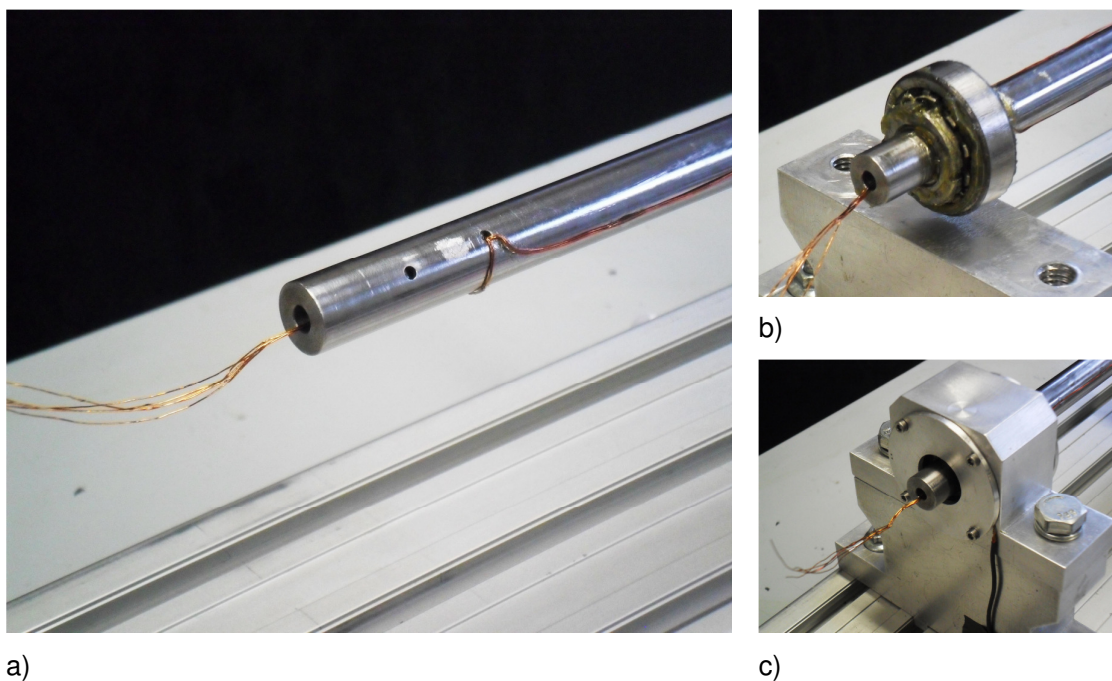


Figura 7.6 – Detalhe da passagem dos fios de cobre pelo mancal  $B_2$ : a) furos realizados na extremidade do eixo (furo intermediário realizado por engado e não utilizado); b) posição do rolamento em relação aos furos; c) conjunto ainda sem o conector rotativo.

A impedância elétrica pode ser medida a partir de métodos distintos, cada um apresentando vantagens e desvantagens (PALOMINO, 2012). A escolha do método mais adequado para uma determinada aplicação deve considerar alguns fatores, tais como a faixa de frequência a ser utilizada, a precisão necessária para as medidas e a facilidade de imple-

mentação computacional associada. Dentre os métodos mais comuns estão (AGILENT TECHNOLOGIES, 2006): o método da ponte (*Bridge method*), o método ressonante (*Resonant method*), o método  $I - V$  e o método da ponte autobalanceada. Estes são os circuitos comumente encontrados nos Impedancímetros comerciais.

A comunidade dos pesquisadores da área de SHM prefere utilizar Impedancímetros certificados nos testes. O LMEst conta com o analisador de impedância da *Hewlett-Packard*<sup>®</sup> (modelo 4194A), como mostra a Fig. 7.7, o qual foi inicialmente utilizado para medir as assinaturas de impedância do rotor. Utilizando o método da ponte autobalanceada, o analisador 4194A é capaz de medir a impedância em uma faixa de 100 Hz até 40 MHz divididos em 401 pontos, independente da faixa de frequência escolhida. Neste analisador, a alimentação das cerâmicas de PZT pode ser ajustada entre 10 mV e 1V. As medições de impedância tem precisão de 0,17%, segundo o manual do aparelho. Ele permite alguns outros ajustes a fim de reduzir a quantidade de ruído no sinal medido, sendo o tempo de integração um deles. Este pode ser ajustado em três níveis *SHORT*, *MED* e *LONG*, onde no *SHORT* tem-se a maior incidência de ruído nas medidas e no *LONG*, a menor; quanto maior o tempo de integração maior o tempo gasto para se obter a assinatura de impedância. Outro parâmetro que pode ser configurado é a quantidade de medições para cálculo da média (*AVERAGING*). Além de medidas simples (sem o cálculo da média), pode ser escolhido um número total de 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 ou 256 medidas. Novamente, quanto maior o número de medições realizadas para o cálculo da média maior é o tempo gasto no teste.



Figura 7.7 – Analisador de impedância da *Hewlett-Packard*<sup>®</sup> modelo 4194A.

Durante a realização dos primeiros testes com o rotor em operação, o analisador 4194A apresentou uma grave limitação (novo problema específico para a aplicação desta técnica de SHM). As assinaturas de impedância apresentaram uma alta incidência de “ruído”

(tempo de integração *SHORT* com 32 medições realizadas no cálculo da média). Com o sistema em repouso, os sinais mostraram níveis de “ruído” mais amenos. Após uma série de discussões com pesquisadores do LMEst (especialistas no método da Impedância Eletromecânica), chegou-se à conclusão de que o “ruído” observado provavelmente estava sendo gerado por duas fontes distintas: o próprio sistema elétrico (principalmente o motor de corrente contínua e seu sistema de acionamento) e a natureza dinâmica do eixo em rotação. É importante deixar claro que os níveis de “ruído” encontrados não são provenientes do *Slip Ring*, já que este, como comentado, é capaz de transmitir sinais provenientes de acelerômetros com baixa interferência segundo o fabricante (inclusive foi esta uma das exigências feitas na aquisição do dispositivo).

Para minimizar o efeito do “ruído” nas assinaturas de impedância, deixando-a com uma qualidade razoável para a avaliação da condição estrutural do eixo (o objetivo é detectar danos incipientes), o tempo de integração do analisador 4194A foi ajustado para *MED* e a quantidade de medições para cálculo da média foi elevado para 128. Isto fez o tempo de aquisição da assinatura de impedância de cada PZT ser de aproximadamente 20 min. Com um total de cinco pastilhas de PZT acopladas ao sistema, além das várias condições de trabalho que devem ser testadas para validar a metodologia proposta (diferentes níveis de desbalanceamento e velocidades de rotação), o tempo de aquisição gasto por este analisador foi considerado demasiadamente grande, inviabilizando sua utilização<sup>3</sup>.

O problema descrito foi contornado utilizando outro sistema de medição. Trata-se de um Impedancímetro capaz de realizar um número muito maior de medidas para o cálculo das médias em um tempo total menor (aproximadamente 10000 medições realizadas em 5 min). Trata-se de um aparelho desenvolvido pelo Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto, também integrante do LMEst (sistema de medição ainda não certificado, porém validado com o analisador 4194A), como resultado do projeto de pesquisa “Monitoramento da Integridade Estrutural de Aeronaves”, financiado pela FINEP e pela EMBRAER (CT – AERO), sob a coordenação do Prof. Dr. Valder Steffen Jr. O sistema é composto por um *hardware*, mostrado na Fig. 7.8, que trabalha em conjunto com uma placa de aquisição de sinais da *National Instruments*<sup>®</sup>, capaz de gerar sinais a uma taxa de até 2,86 MS/s e adquirir a uma taxa de até 1,25 MS/s. O *hardware* é responsável por calcular o valor da impedância elétrica (parte real, imaginária e fase). Ele relaciona o sinal de excitação recebido da placa de aquisição com o sinal de resposta medido pelo sensor PZT (o *hardware* transmite às cerâmicas de PZT um sinal senoidal com as frequências requeridas). É importante deixar claro que a mag-

---

<sup>3</sup> Com um tempo de aquisição muito longo as condições ambientais podem variar excessivamente, levando à falsas acusações de danos.

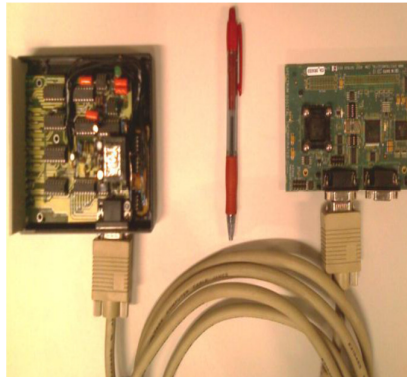


Figura 7.8 – Impedancímetro desenvolvido no LMEst (conexão de 16 PZT simultaneamente com a medição realizada de forma sequencial).

nitidade dos sinais de excitação e resposta (e a defasagem entre eles) são medidas e calculadas diretamente no *hardware* desenvolvido, através de simples manipulações matemáticas (as características dos sinais são extraídas pelo *hardware* sem que seja necessário adquiri-los no domínio do tempo). Desta forma, ferramentas como a transformada rápida de Fourier (FFT) não são empregadas.

A manipulação dos dados (ajustes de média, tempo de aquisição, filtros, desvio padrão máximo, as frequências inicial, final, o número de pontos, entre outros), bem como a comunicação com a placa de aquisição, é realizada através do *software LabVIEW®*. Além da parte real da assinatura de impedância, várias outras características do sinal medido podem ser visualizadas, como consta na interface gráfica mostrada pela Fig. 7.9. Detalhes acerca da arquitetura elétrica (método utilizado, capacidades, etc) do *hardware* desenvolvido podem ser consultados em Finzi Neto et al. (2011) e Palomino (2012).

Utilizando o sistema de medição de impedância do LMEst, com o rotor em repouso, foi feita uma varredura na faixa de frequência entre 0 e 200 kHz para determinar as regiões com o maior número de picos e vales nas assinaturas de impedância de cada um dos cinco PZT. Segundo Park e Inman (2005), este é um procedimento experimental comum na técnica de SHM baseada na Impedância Eletromecânica. Desta forma, coincidentemente, foram localizados apenas 2 picos evidentes<sup>4</sup> nas assinaturas de impedância para cada um dos sensores-atuadores acoplados ao eixo (assinaturas com 401 pontos de frequência). Apenas o PZT acoplado ao disco apresentou mais picos, resultado normalmente encontrado em placas espessas (todas estas assinaturas de impedância serão mostradas oportunamente ao longo do texto). Assim sendo, a Tab. 7.1 apresenta a faixa de frequência determinada pa-

<sup>4</sup> Considera-se os picos evidentes aqueles que apresentam uma alta relação sinal-“ruído”.

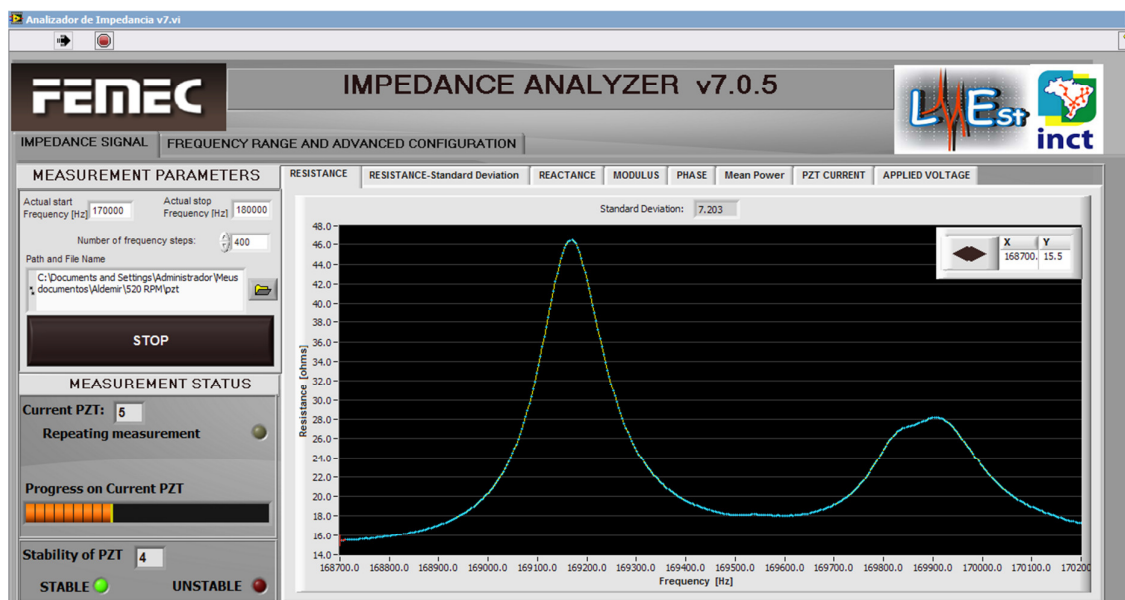


Figura 7.9 – Interface gráfica do sistema de medição de sinais de impedância desenvolvido no LMEst.

ra cada pastilha de PZT. Note que as faixas são delimitadas em altas frequências que, como mencionado, propicia a detecção de danos incipientes. No entanto, ao mesmo tempo, diminui a superfície de monitoramento dos sensores-atuadores de PZT (fato já mencionado, devido à dissipação da onda gerada).

Tabela 7.1 – Faixas de frequência utilizadas para cada um dos 5 PZTs.

PZT	Faixas de frequência (kHz)	
	De	Até
1	169.1	170.2
2	168.6	169.8
3	168.6	169.8
4	168.7	170.2
D	170	180

Na próxima seção serão apresentados os testes de detecção dos três casos distintos de falhas com o rotor inicialmente em repouso e, em um segundo momento, com o rotor em operação. Por concisão, vários dos testes que foram realizados não serão apresentados neste Capítulo. Os resultados aqui omitidos são mostrados no Anexo 3 desta Tese de Doutorado (apenas as métricas de dano).

### 7.3 Testes de Detecção

Nos testes de detecção foram analisados três diferentes danos estruturais (considerados incipientes) de forma a avaliar a capacidade do método da Impedância Eletromecânica, quando aplicado em sistemas rotativos. A primeira falha (DANO-1) trata-se da colagem de uma porca de aço M3 na superfície do eixo (1,06 g). A colagem foi realizada por meio de um adesivo de alta resistência a aproximadamente 30 mm da face do disco  $D_2$  (40 mm a partir do PZT-3; região delimitada pelos discos). Apesar de não ser o objetivo desta Tese de Doutorado, este dano (aumento de massa) foi inserido apenas para testar a metodologia com uma “falha” (modificação estrutural) que pudesse ser posteriormente removida facilmente (dano não destrutivo). Na Fig. 7.10 é possível observar as posições do PZT-3 e do PZT-D em relação ao DANO-1, além da utilização dos furos adicionais usinados nas proximidades do centro dos discos para a passagem dos fios ligados às pastilhas de PZT (veja a Fig. 7.3 para compreender a posição do DANO-1).

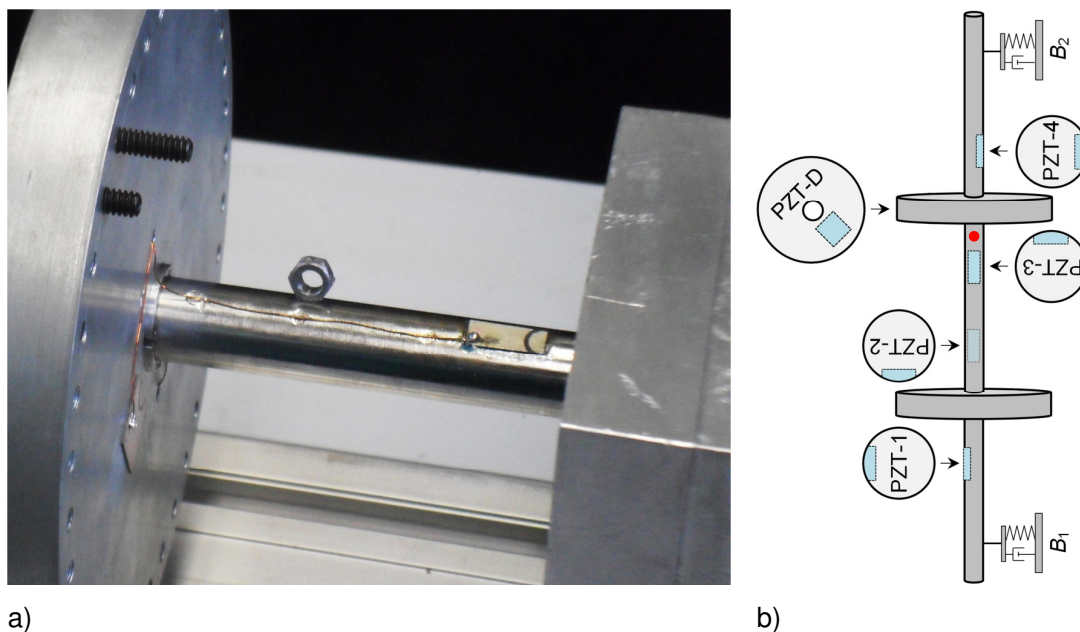


Figura 7.10 – Detalhes da posição do DANO-1 no eixo (note que esta imagem está invertida em relação à Fig. 7.3): a) detalhes da alteração estrutural inserida no eixo; b) posição do DANO-1.

Já o DANO-2 consiste numa falha destrutiva. Mais uma vez, foi realizado um corte transversal no eixo a fim de simular uma trinca (segundo os mesmos procedimentos adotados no Capítulo VI). Isto foi feito a aproximadamente 15 mm da face do disco  $D_2$  (55 mm do PZT-3; região delimitada pelos discos e próxima ao DANO-1). A Fig. 7.11 apresenta o corte



realizado em suas fases inicial e final, além da posição aproximada. O trabalho de usinagem resultou em uma “trinca” com aproximadamente 0,5 mm de espessura e 2,5 mm de profundidade (15% em relação ao diâmetro do eixo), como mostra a Fig. 7.12. Assim, foram observadas reduções de aproximadamente 0,25 Hz e 0,50 Hz nas duas primeiras frequências naturais do rotor, respectivamente ( $F_{n1} = 26$  Hz e  $F_{n2} = 97$  Hz).

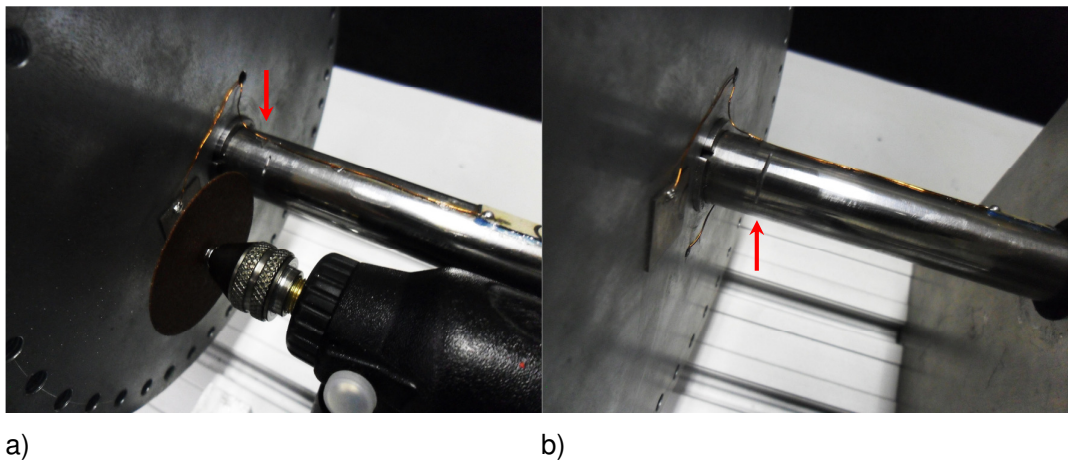


Figura 7.11 – Corte realizado no DANO-2 a fim de simular uma trinca: a) detalhes do procedimento de corte; b) disposição final do corte realizado.

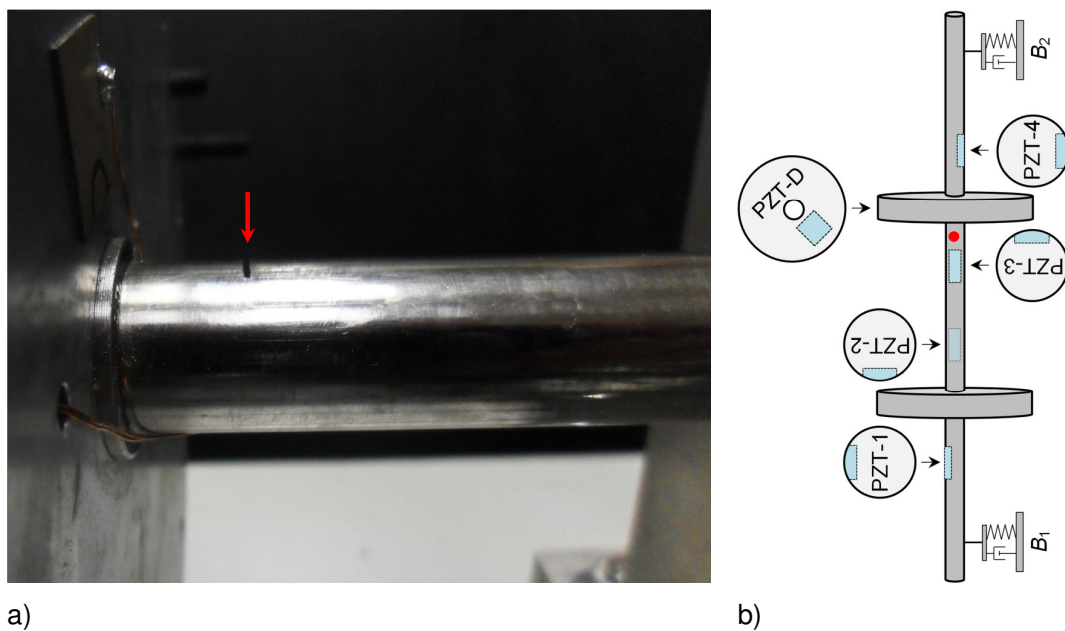


Fig. 7.12 – Profundidade de espessura do DANO-2 realizado. a) detalhes do corte realizado no eixo; b) posição do DANO-2.

A necessidade do *Baseline* impossibilitou a utilização de uma máquina de eletroerosão para realizar um corte menos espesso (comportamento mais próximo ao de uma trinca real). Para viabilizar este procedimento o eixo deveria ser desmontado. Obviamente, é impossível colocar todo o conjunto na máquina de eletroerosão. Desta forma, assinaturas de impedância foram medidas antes e após a retirada (e remontagem) do eixo da bancada, sem inserir qualquer alteração estrutural no sistema. Infelizmente, as assinaturas de impedância foram alteradas significativamente.

Por fim, um corte extra foi introduzido no eixo da mesma forma que o anterior, porém com apenas 1 mm de profundidade e 0,5 mm de espessura (dimensões aproximadas; profundidade de 6% em relação ao diâmetro do eixo). Denominado DANO-3, este pequeno corte foi inserido a aproximadamente 10 mm do PZT-4 (60 mm da face do disco  $D_2$ ; região delimitada por este mesmo disco e pelo mancal  $B_2$ ), como mostra a Fig. 7.13. É importante ressaltar que, logicamente, o DANO-2 continuou presente no eixo com a inserção deste no-

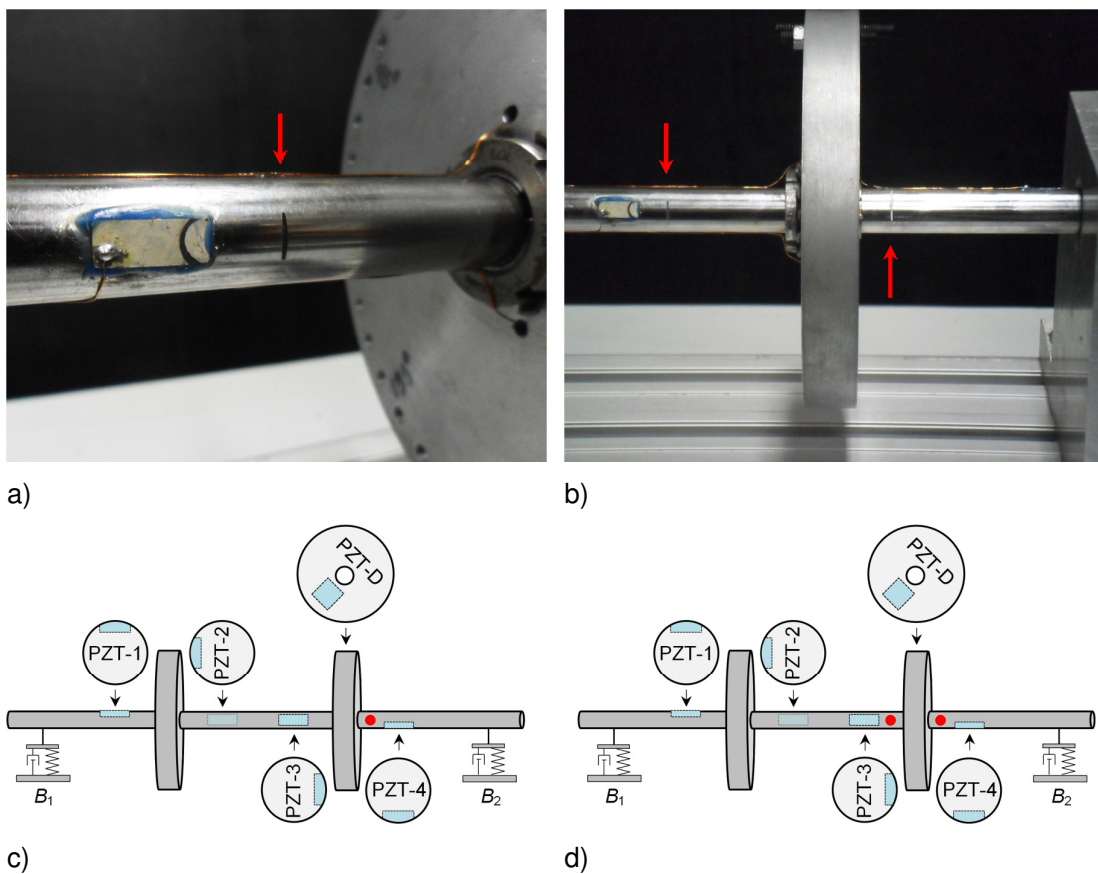


Figura 7.13 – Cortes realizados no DANO-3 a fim de simular as trincas: a) detalhes do corte com a menor profundidade; b) disposição final dos cortes realizados; c) posição do corte menos profundo (6%); d) cortes que compreendem o DANO-3.

vo corte. Assim sendo, na realidade, o DANO-3 compreende um conjunto de dois cortes com profundidades e posições diferentes (múltiplos danos). Também na Fig. 7.13 é possível observar a disposição de cada um dos cortes realizados.

Em todos os testes que serão apresentados, a temperatura do ambiente foi controlada na faixa entre 18°C e 21°C. As medições foram tomadas constantemente por meio de um termopar (e multímetro) posicionado na porção final do perfil de alumínio, como na Fig. 7.14. Como dito, a variação de temperatura é um problema grave para a aplicação do método da impedância Eletromecânica (*shift*). Existem disponíveis na literatura algumas técnicas de compensação que minimizam este efeito nas assinaturas de impedância (GRISSE; INMAN, 2010; LIM et al., 2011). No entanto, os resultados que serão mostrados não contaram com o auxílio destas técnicas.

Como informado, os testes foram divididos entre rotor em repouso (para 8 posições angulares do eixo) e rotor em operação (4 velocidades de operação e 3 níveis de desbalanceamento). Os resultados, bem como os procedimentos adotados de análise, são apresentados nas próximas duas subseções.

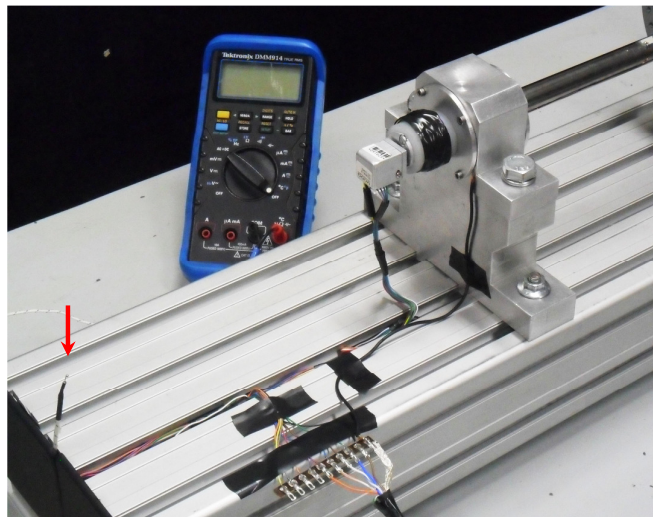


Figura 7.14 – Detalhes do sistema de medição usado no monitoramento da temperatura.

### 7.3.1 Rotor em Repouso

Com o rotor em repouso, as assinaturas de impedância foram coletadas em oito posições angulares diferentes: 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°, todas em relação à direção X positiva. Detalhes da marcação destes ângulos nos discos podem ser vistos na Fig. 7.15. A posição 0° encontra-se na direção X positiva. Além disso, a marcação de 270° corresponde às direções do PZT-4 e do DANO-3 (mesma direção do DANO-2). Analisando a Fig. 7.3 é possível compreender as direções dos outros sensores-atuadores de PZT.

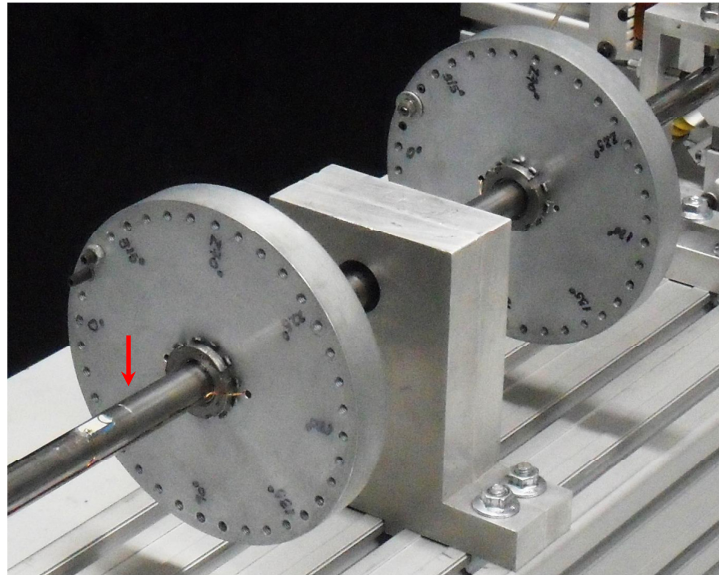


Figura 7.15 – Marcações das posições angulares realizadas diretamente nos discos.

Neste caso, bem como para o rotor em operação, foram adquiridas duas assinaturas de impedância para cada condição estrutural do eixo (SEM DANO, DANO-1, DANO-2 e DANO-3), além do sinal de referência (*Baseline*) utilizado para a determinação das métricas correspondentes. Isto foi feito para verificar a repetitividade das medições e, conseqüentemente, dar confiabilidade aos resultados (além da estabilização da temperatura, crítica para o rotor em operação como será visto). Cada assinatura medida foi resultado de uma média calculada a partir de outras 1600 medições realizadas com desvio padrão máximo fixado em 15 Ohms (efetuando a repetição da medida caso este valor fosse ultrapassado).

A Fig. 7.16 apresenta as métricas de dano obtidas para as condições estruturais do rotor SEM DANO e com o DANO-1 (porca acrescentada; Fig. 7.10), isto para o eixo na posição  $0^\circ$  (como na Fig. 7.15). Todas as métricas apresentadas na seção 7.1 foram utilizadas pelas razões já discutidas. Observe que, independentemente da métrica de dano analisada (*RMS*, *RMSD*, *RMSD1*, *RMSD2*, *RMSD3* ou *CCD*), os sensores inteligentes PZT-1, PZT-2 e PZT-3 foram os que detectaram de maneira mais contundente o DANO-1. Além disso, observe que o PZT-D não foi capaz de detectar de forma evidente o dano imposto, o que, inicialmente, desacredita a ideia de acoplar pastilha de PZT em polias para o monitoramento. Segundo pesquisadores do LMEst, esta dificuldade é comumente encontrada em sensores que estão ortogonalmente dispostos em relação à falha. Um fato interessante é que o PZT-1, mesmo estando além do limite físico imposto pelo disco  $D_1$ , foi capaz de detectar este primeiro dano. O PZT-1 apresentou índices maiores que o PZT-4, que se encontra em uma situação semelhante, porém mais próximo à falha. Já o PZT-3 gerou o maior índice de dano observado, levando à possibilidade de identificação da falha. É necessário salientar que a

possibilidade da localização de falhas utilizando o método da Impedância Eletromecânica deve ser analisada com cautela. O sucesso maior ou menor de um PZT depende mais do seu acoplamento eletromecânico (colagem efetiva da pastilha na estrutura) do que de sua posição. Por exemplo, Palomino (2008) apresenta um resultado em um sistema complexo (placa lateral do corpo de uma aeronave) em que a pastilha de PZT mais próxima à falha imposta apresenta um índice de dano menor que outra colada mais distante. Além disso, um resultado similar será apresentado neste Capítulo. Isso pode explicar, inclusive, os resultados observados para o PZT-1 e o PZT-4.

A Fig. 7.17 mostra as métricas de dano encontradas quando foram avaliados, além da condição SEM DANO (mesma da Fig. 7.16), os danos denominados DANO-2 e DANO-3 (cortes realizados no eixo; Fig. 7.13), para o eixo na posição  $0^0$  (“trincas” voltadas para cima, direção Z positiva; veja a Fig. 7.15). Estes danos são apresentados em conjunto, pois, como descrito, o DANO-2 não pôde ser retirado do eixo quando o DANO-3 foi inserido.

Observe que a detecção foi um pouco mais difícil, o DANO-1 se mostrou muito mais invasivo que as falhas relacionadas aos cortes (compare os valores de cada métrica de dano mostrados nas Figs 7.17 e Fig. 7.16). Isto, provavelmente, se deve a área de contato da porca com a superfície do eixo ser grande quando comparada com as dimensões dos cortes introduzidos. Assim sendo, o DANO-1 é capaz de alterar de forma mais significativa à onda gerada pelas pastilhas de PZT (e, conseqüentemente, as assinaturas de impedância). Como discutido, a qualidade do acoplamento eletromecânico é a provável causa que levou o PZT-2 e PZT-3 a serem igualmente sensíveis ao DANO-2, mesmo o PZT-3 estando mais próximo à falha. Além disso, observe que a métrica *RMSD2* não se mostrou suficientemente sensível aos dois danos analisados. Ressalta-se que as pequenas variações das métricas de dano observadas na Fig. 7.17 são normais quando analisados danos incipientes. Outro ponto importante a ser comentado refere-se ao aumento dos índices com a introdução do corte menos profundo do DANO-3 (aumento em relação ao DANO-2). Trata-se de uma falha muito pequena, o que evidencia a capacidade de detecção da metodologia proposta.

De uma maneira geral, a detecção dos cortes ocorreu com grande sucesso. No entanto, dois comportamentos distintos e não esperados foram observados com o PZT-1 e o PZT-2. Note na Fig. 7.17 que os índices das métricas *RMS*, *RMSD*, *RMSD1* e *RMSD3*, referentes ao PZT-2, aumentam de uma forma desproporcional quando analisado o DANO-3 em relação ao DANO-2. Neste caso, esperava-se um resultado similar ao apresentado nas mesmas condições pela métrica *CCD*. Porém, este não pode ser considerado como um resultado totalmente incorreto, já que nenhum problema aparente foi detectado no sensor (descolamento, surgimento de fissuras, etc) e a temperatura do ambiente manteve-se monitorada to-

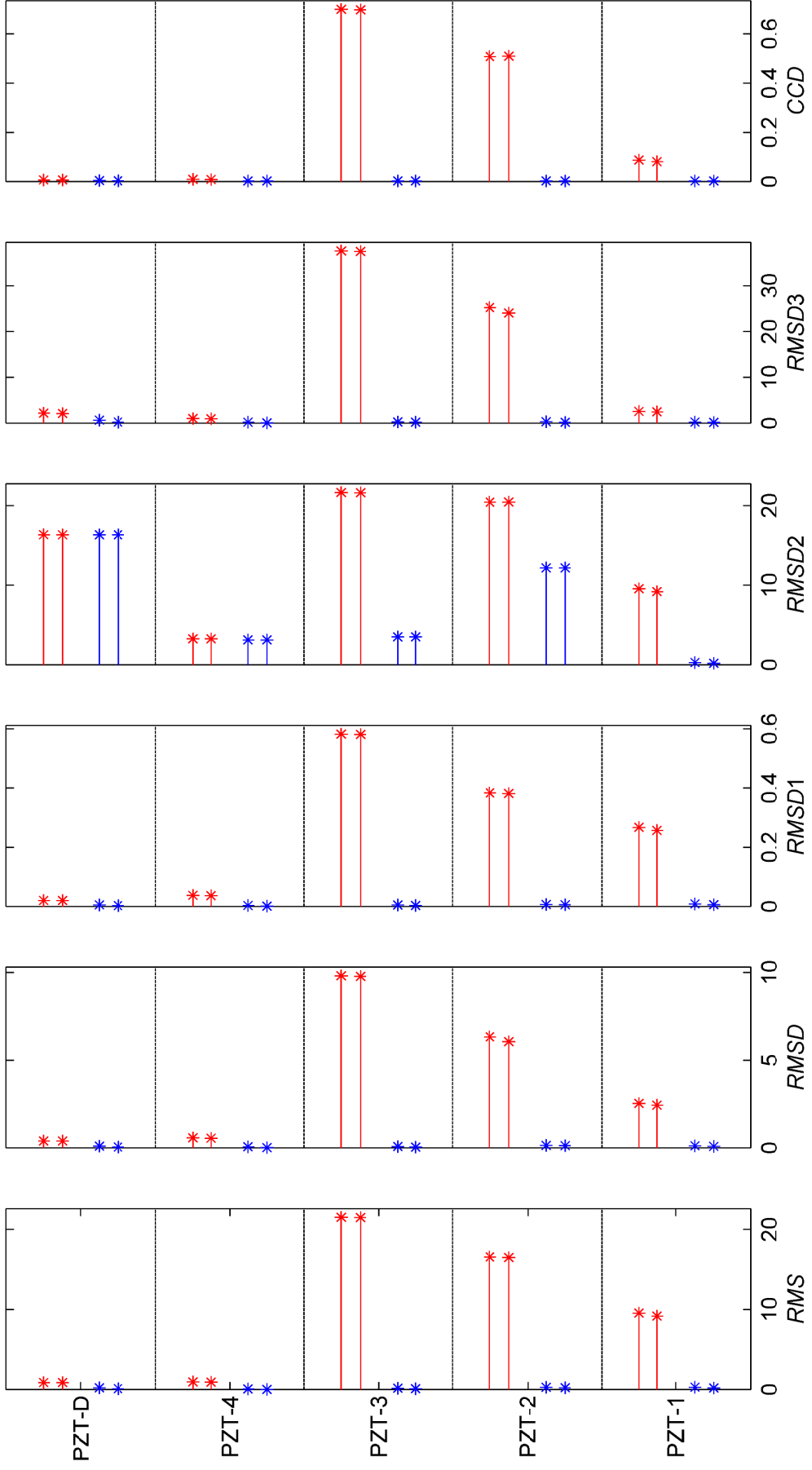


Figura 7.16 – Valores das métricas de dano obtidos com o rotor em repouso e o eixo na posição  $0^\circ$  para duas condições estruturais distintas: SEM DANO (—) e DANO-1 (—).

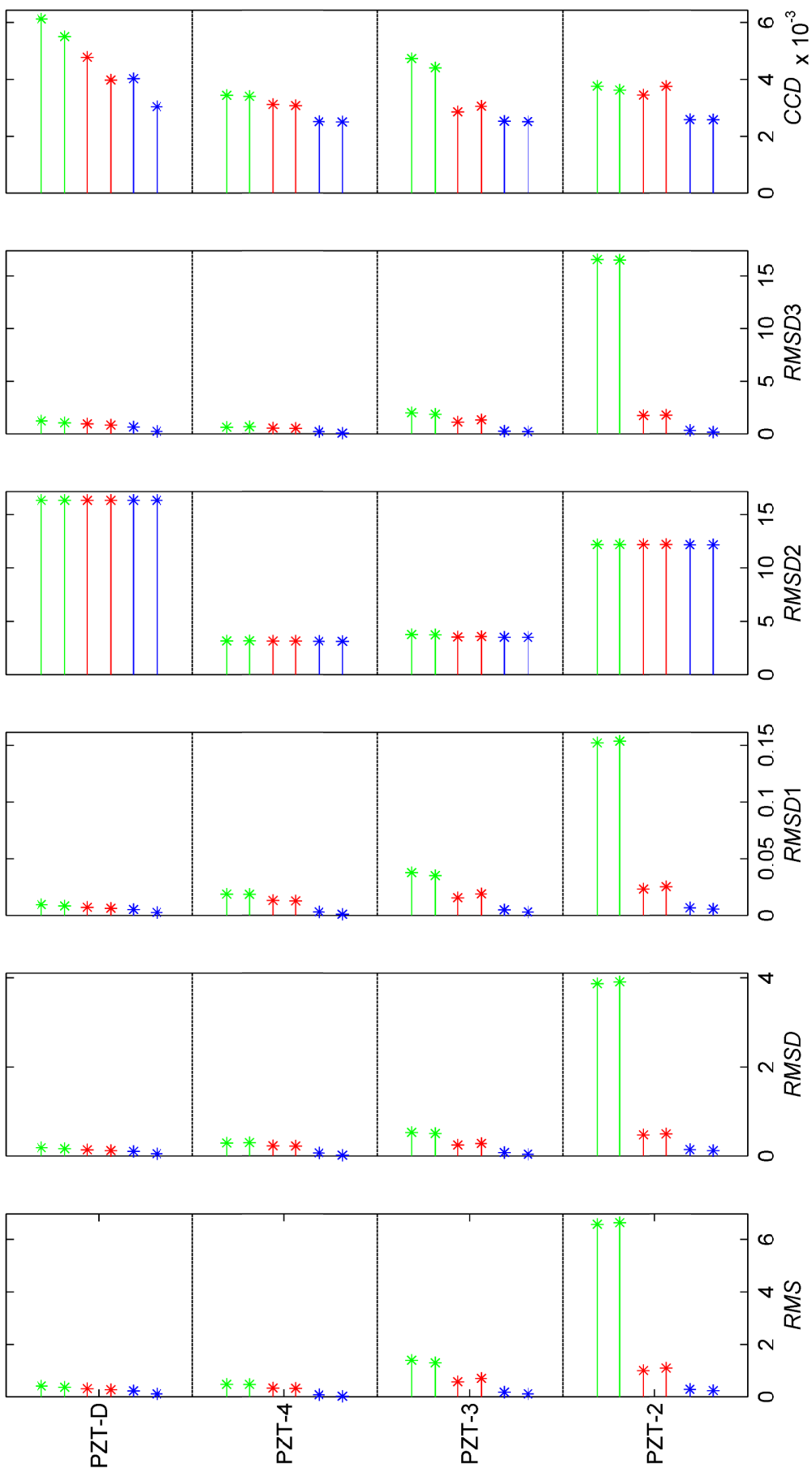


Figura 7.17 – Valores das métricas de dano obtidos com o rotor em repouso e o eixo na posição 0° para três condições estruturais distintas: SEM DANO ( — ), DANO-2 ( — ) e DANO-3 ( — ).

do o tempo. Assim, a detecção satisfatória do DANO-3 foi feita com base em uma análise dos resultados de todos os sensores-atuadores de PZT.

Quanto ao PZT-1, observe que seus índices não estão dispostos na Fig. 7.17. Isto se deve a um resultado notadamente anormal, considerado muito mais grave que o apresentado pelo PZT-2. Por motivos ainda não compreendidos (talvez algum problema elétrico; novamente nenhum problema aparente foi detectado no sensor), os índices de dano diminuíram após a introdução do DANO-3, como mostra a Fig. 7.18. Este comportamento, aliado à posição do PZT-1 em relação aos cortes, levou ao descarte de seus resultados nas análises. Devido ao procedimento adotado para realizar os experimentos, não é possível afirmar qual dos resultados está incorreto, se o obtido a partir dos ensaios referentes ao DANO-2 ou

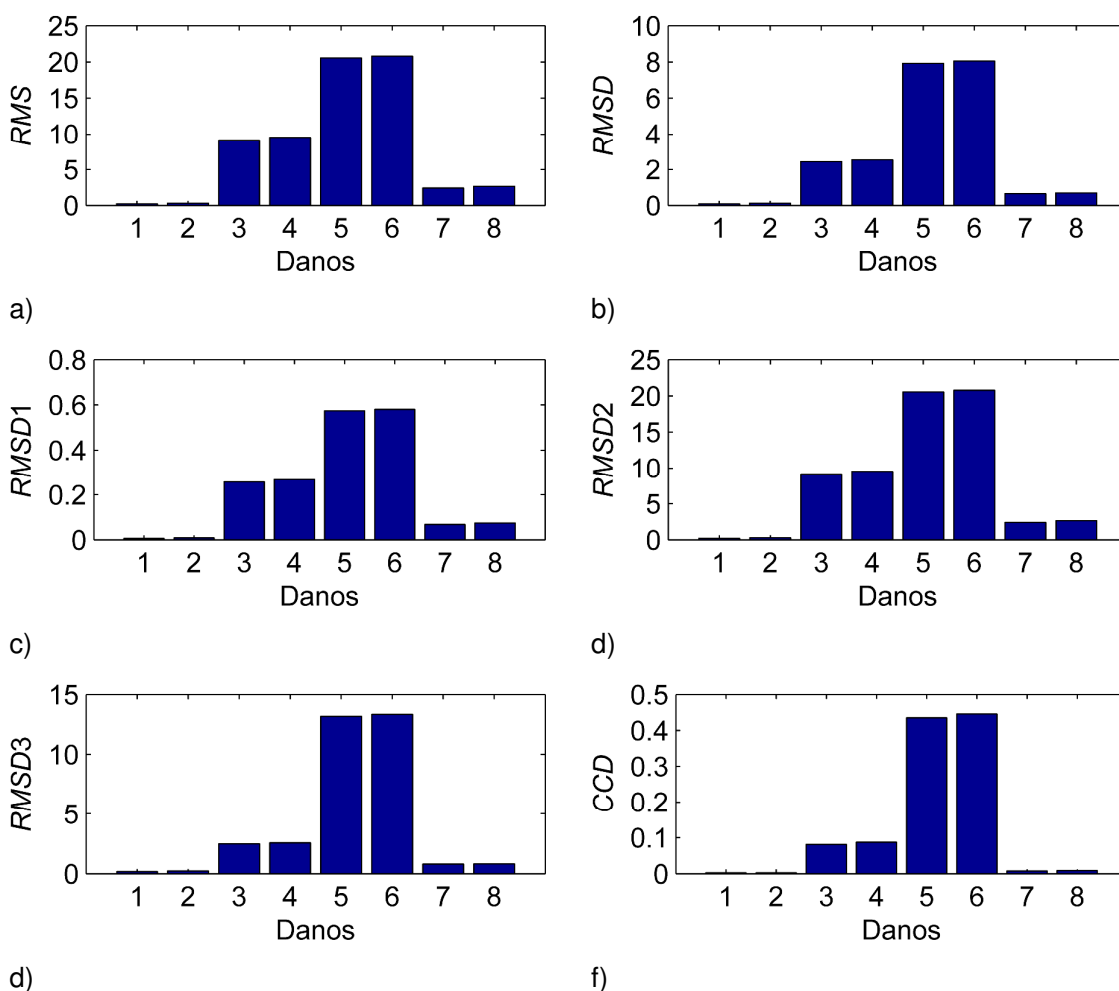


Figura 7.18 – Métricas de dano obtidas a partir do PZT-1 com o rotor em repouso na posição  $0^\circ$  para as condições SEM DANO (Danos 1 e 2), DANO-1 (Danos 3 e 4), DANO-2 (Danos 5 e 6) e DANO-3 (Danos 7 e 8): a) *RMS*; b) *RMSD*; c) *RMSD1*; d) *RMSD2*; e) *RMSD3*; f) *CCD*.



do DANO-3. Os experimentos foram iniciados, claramente, com a medição das assinaturas de impedância referentes ao *Baseline* para todas as condições de operação do rotor. De forma aleatória, em um primeiro momento, os sinais foram adquiridos com o sistema em repouso, posteriormente operando a 1200 rev/min, depois a 390 rev/min e assim por diante. Em um segundo momento, as falhas foram inseridas (DANO-1, DANO-2 e DANO-3, nesta sequência) e novamente as condições de ensaio se deram de forma aleatória (diferentes da sequência adotada nos testes de *Baseline*).

As Figs. 7.19 a 7.23 mostram as assinaturas de impedância medidas por todas as cinco pastilhas de PZT, que levaram à determinação das métricas de dano apresentadas nas Figs 7.16 a 7.18 (rotor em repouso na posição  $0^0$ ). Observe que a maior variação ocorre com as curvas obtidas para o DANO-1 em relação às curvas de referência (*Baseline*) e SEM DANO. A variação provocada pelos cortes é pequena, efeito confirmado pela comparação dos índices apresentados nas Figs. 7.16 e 7.17. Note que os resultados obtidos pelo PZT-1 são realmente anormais. A assinatura referente ao DANO-1 (porca) apresenta uma variação muito menor em relação às curvas de referência, do que a observada para o DANO-2, mesmo as falhas sendo próximas. Na realidade, presume-se que o PZT-1 não poderia acu-

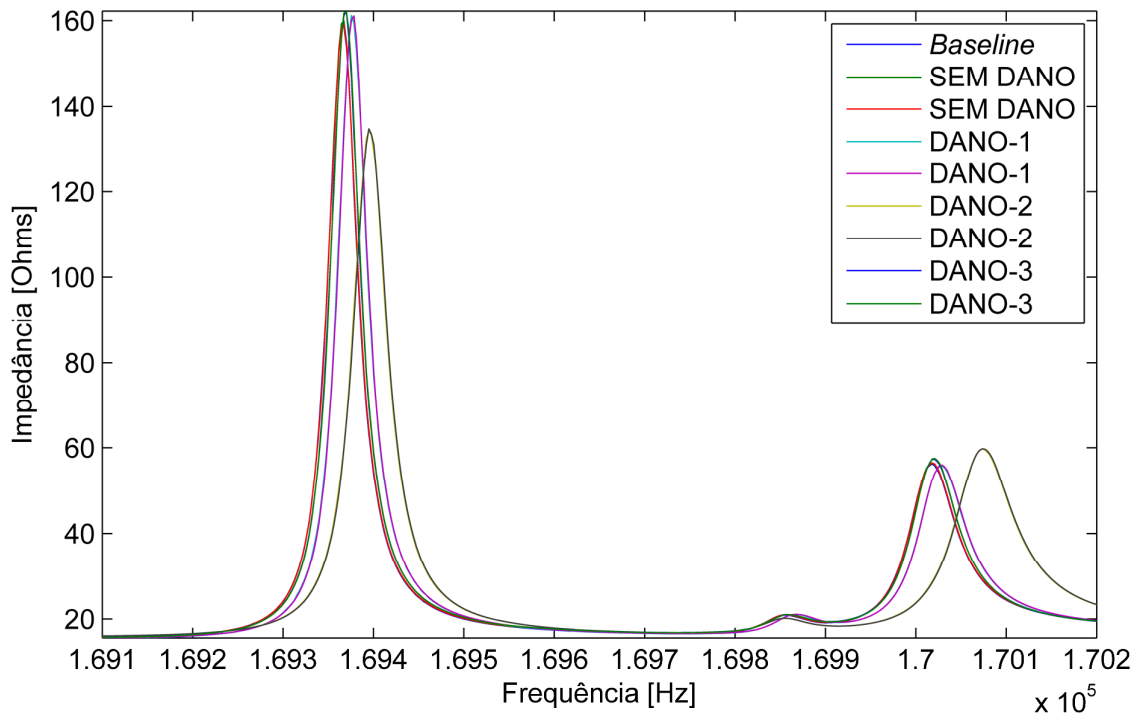


Figura 7.19 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-1 com o rotor em repouso e o eixo na posição  $0^0$  para todas as condições estruturais analisadas.

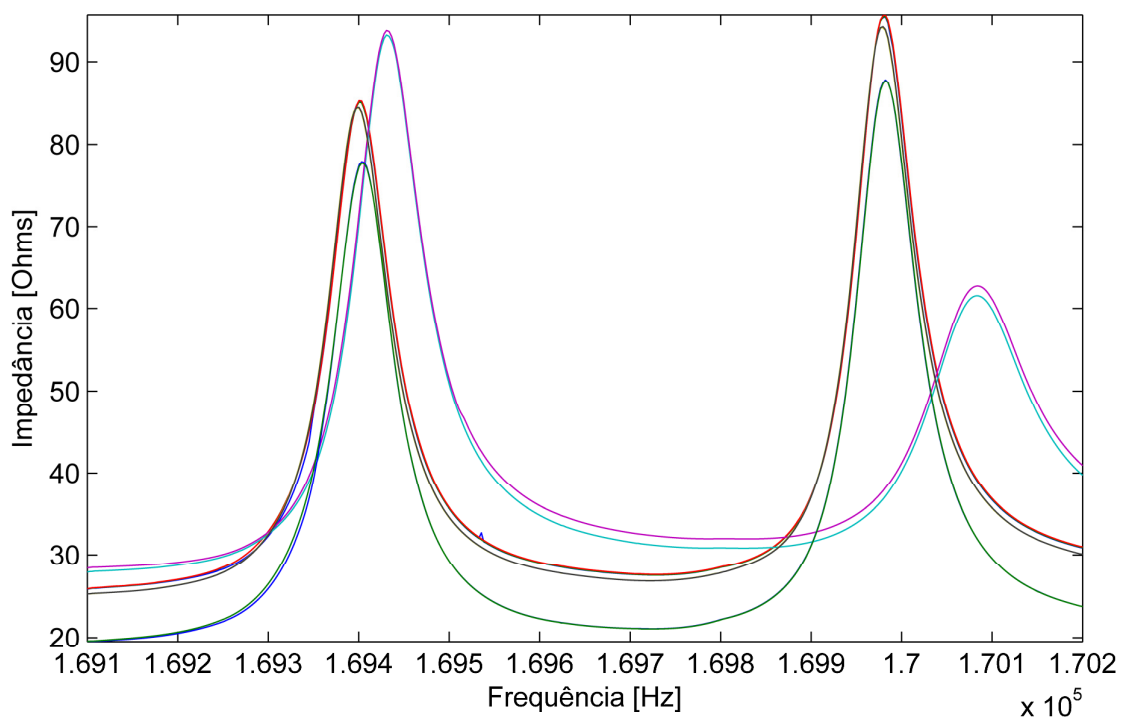


Figura 7.20 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-2 com o rotor em repouso e o eixo na posição 0° para todas as condições estruturais analisadas (legenda na Fig. 7.19).

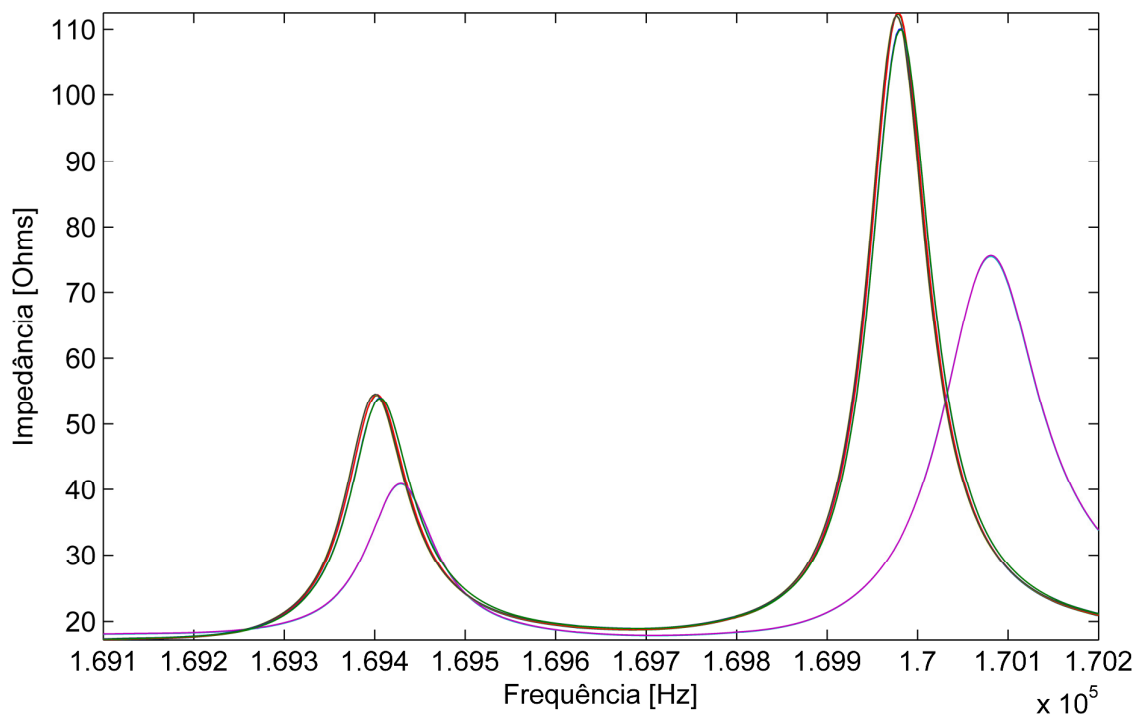


Figura 7.21 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-3 com o rotor em repouso e o eixo na posição 0° para todas as condições estruturais analisadas (legenda na Fig. 7.19).

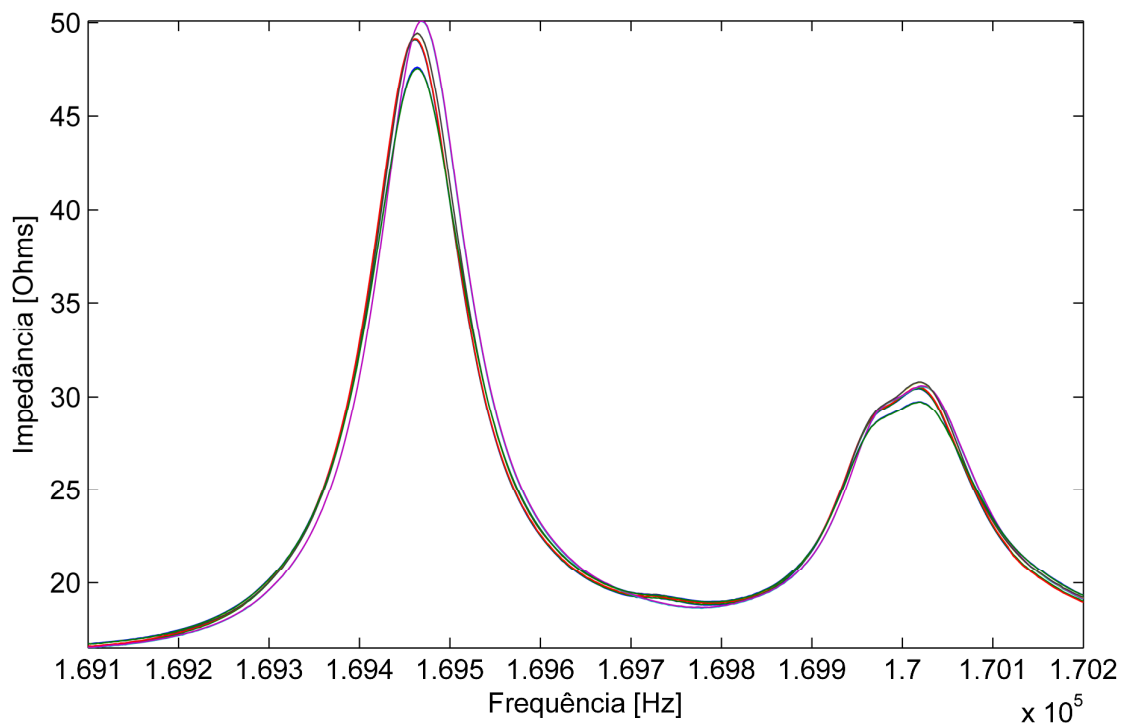


Figura 7.22 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-4 com o rotor em repouso e o eixo na posição  $0^\circ$  para todas as condições estruturais analisadas (legenda na Fig. 7.19).

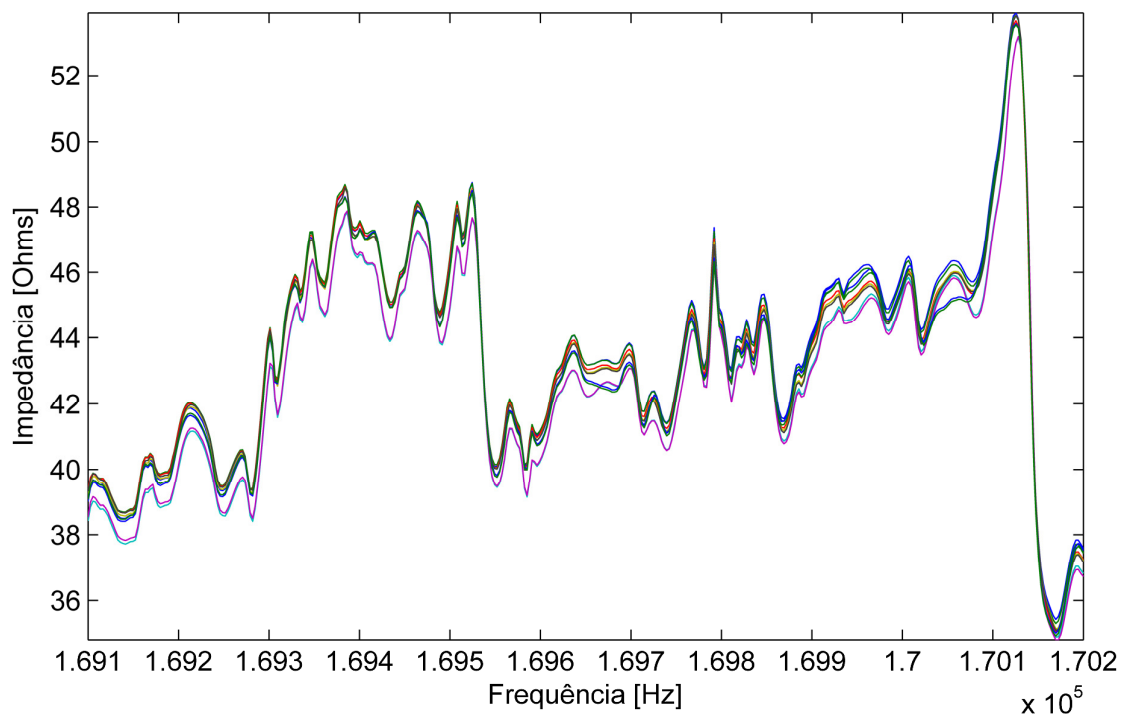


Figura 7.23 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-D com o rotor em repouso e o eixo na posição  $0^\circ$  para todas as condições estruturais analisadas (legenda na Fig. 7.19).

sar o DANO-2 com intensidade maior do que para o DANO-1. Quanto às assinaturas de impedância obtidas pelo PZT-2, uma espécie de *shift*, como anteriormente discutido, pode ser observada. Mesmo assim, nada se pode afirmar. Todas as medidas foram realizadas após a sala de experimentos se manter a uma temperatura constante (dentro da faixa mencionada) por 5 horas, para se ter uma estabilização da temperatura ambiente, e com o motor desligado (permanece u ao menos 24 horas). Também, o PZT-4 e PZT-D (Figs. 7.22 e 7.23, respectivamente), apresentam pouca variação das curvas relacionadas ao DANO-1 com respeito à referência (diferentemente do PZT-2 e PZT-3). Por fim, nota-se uma boa variação entre os vales e picos para as pastilhas de PZT coladas no eixo, o que facilita a detecção das trincas.

As métricas de dano obtidas com o eixo nas outras posições angulares não serão mostradas neste Capítulo, uma vez que os resultados são similares (foram disponibilizadas no Anexo 3). Apesar da similaridade mencionada na detecção dos danos, as assinaturas de impedância mudam com a posição angular do eixo quando analisado o PZT-2 (região de maior deflexão do eixo). Este fenômeno, devido à força peso atuante, é mostrado na Fig. 7.24, onde as curvas de referência (*Baseline*) obtidas a partir das oito posições angulares diferentes são apresentadas. Note que apenas a amplitude dos picos varia com a rotação do

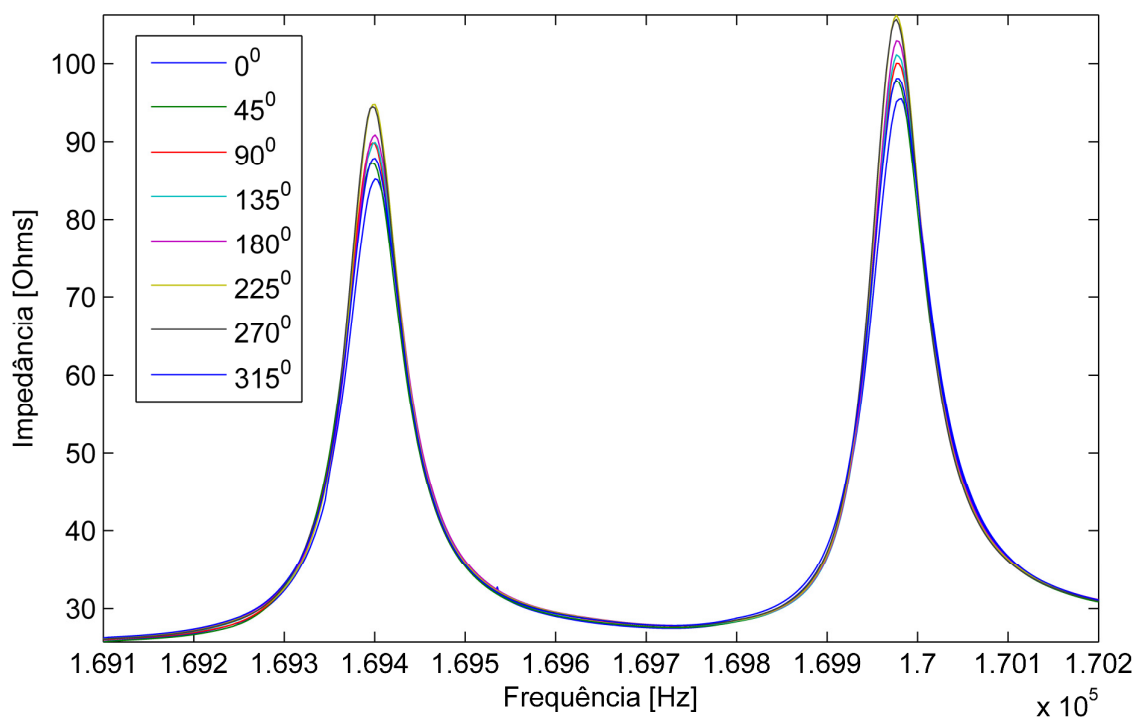


Figura 7.24 – Assinaturas de impedância de referência adquiridas pelo PZT-2 com o rotor em repouso para as oito posições angulares analisadas.

eixo. Além disso, a variação das curvas com a posição angular é equivalente à variação observada quando o DANO-2, ou o DANO-3, é introduzido no eixo (compare a Fig. 7.24 com a 7.20). Quando considerado o PZT-4, como mostra a Fig. 7.25, região de baixa deflexão do eixo, a variação das curvas de impedância com a posição angular do eixo não fica assim evidente. Esta é mais uma característica específica da aplicação do método da Impedância Eletromecânica em máquinas rotativas, ou seja, existe variação da assinatura de impedância apenas com a mudança da posição angular do eixo. Felizmente, a detecção é satisfatória independentemente destas variações, mostrando que a metodologia é robusta ao problema (um dos pontos fundamentais para o sucesso da aplicação em sistemas rotativos).

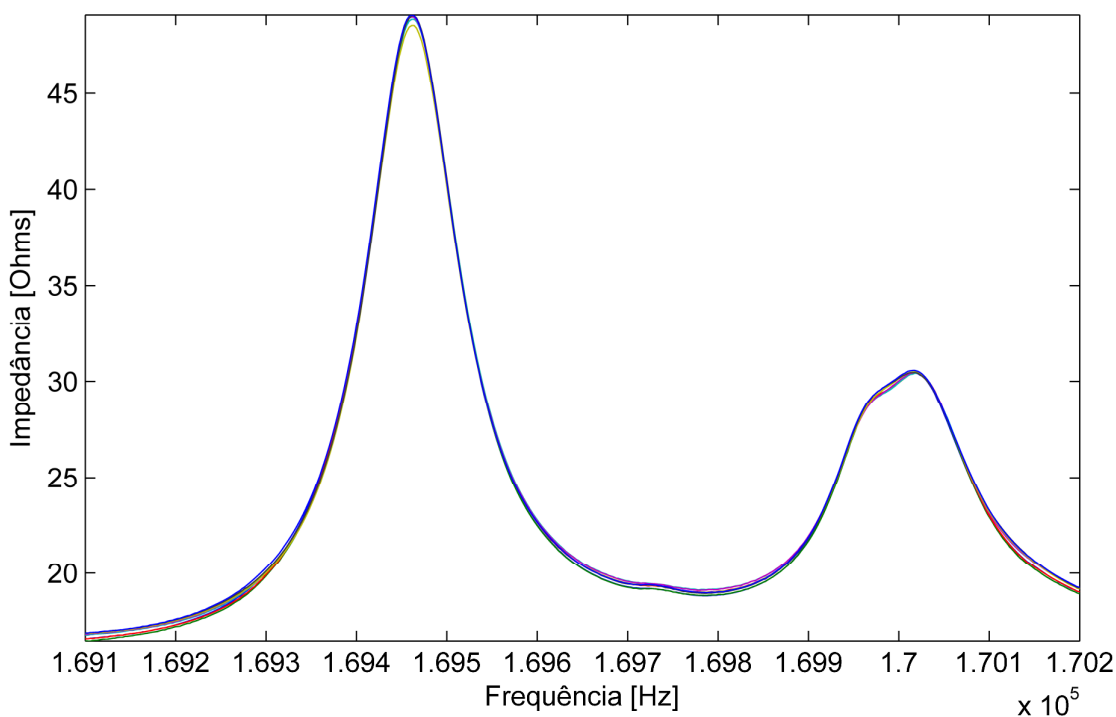


Figura 7.25 – Assinaturas de impedância de referência adquiridas pelo PZT-4 com o rotor em repouso para as oito posições angulares analisadas (legenda na Fig. 7.24).

### 7.3.2 Rotor em Operação

Para o rotor em operação, o método da Impedância Eletromecânica foi testado em diferentes velocidades de rotação e condições de desbalanceamento. As velocidades de rotação que foram utilizadas são mostradas na Tab. 7.2<sup>5</sup>, definidas com base na primeira veloci-

<sup>5</sup> Novamente escolhidas algumas velocidades que podem evidenciar trincas nos sinais de vibração; em certas circunstâncias, dependendo da posição e profundidade da trinca.

Tabela 7.2 – Velocidades de rotação adotadas nos testes.

Velocidade (rev/min)	Explicação
390	1/4 da $VC_1$
520	1/3 da $VC_1$
780	1/2 da $VC_1$
1200	Velocidade de operação

dade crítica da máquina na configuração da Fig. 7.1 ( $VC_1 = 1560$  rev/min). Para a realização dos testes, o rotor foi balanceado utilizando o método dos Coeficientes de Influência, mais uma vez na velocidade de 1200 rev/min. Velocidades acima da  $VC_1$  não foram avaliadas por questões de segurança, no entanto acredita-se que resultados similares podem ser obtidos sobre tais condições de operação.

Para a velocidade de 1200 rev/min, foram avaliadas três condições de desbalanceamento: rotor balanceado, desbalanceamento de 306 g.mm /  $-50^\circ$  inserido no disco  $D_1$  e, por fim, acrescentado ao desbalanceamento imposto ao disco  $D_1$ , 306 g.mm /  $-50^\circ$  foi adicionado ao disco  $D_2$  (desbalanceamentos iguais nos dois discos). A Fig. 7.26 mostra os espectros obtidos nas três condições de desbalanceamento pelos dois sensores de proximidade utilizados (plano de medição  $S_8$ ).

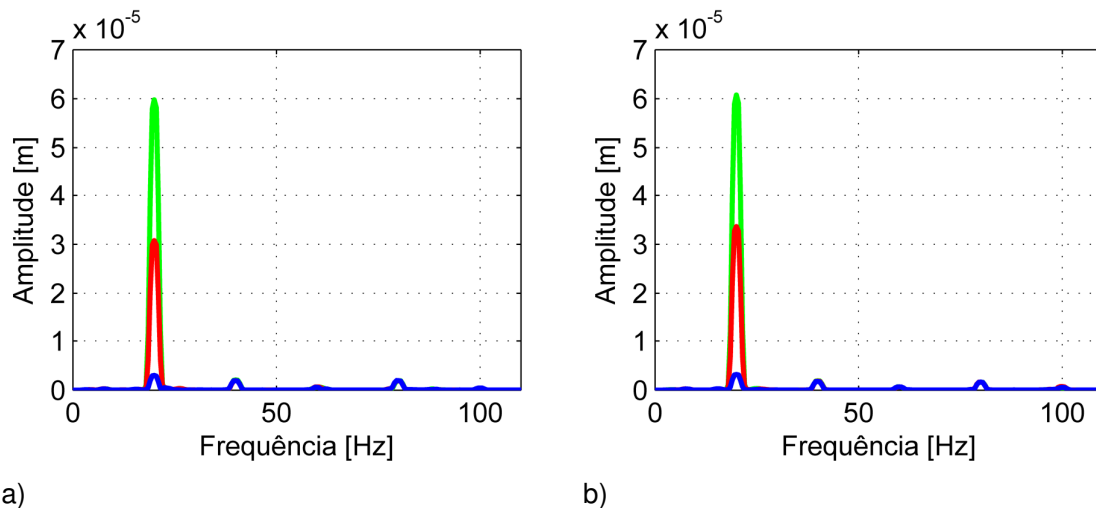


Figura 7.26 – Espectros obtidos nas três condições de desbalanceamento (— rotor balanceado; — 306 g.mm /  $-50^\circ$  em  $D_1$ ; — 306 g.mm /  $-50^\circ$  em  $D_1$  e  $D_2$ ) pelos sensores de proximidade utilizados: a)  $S_{8x}$ ; b)  $S_{8z}$ .

Como descrito, o sinal de impedância varia com a posição angular do eixo devido à força peso. Para o sistema em repouso, isto não é um problema visto que as medições po-

dem ser adquiridas sempre com o eixo na mesma posição angular. No entanto, em um primeiro momento conclui-se que as medições no sistema em operação podem ser prejudicadas. Uma das soluções propostas para este problema visa obter as assinaturas de impedância com o apoio do *encoder*, disparando a medição sempre na mesma posição angular (posição de referência). Contudo, o *hardware* apresentado na Fig. 7.8 não tem esta opção disponível (equipamento desenvolvido para outro projeto). Assim sendo, uma segunda solução foi adotada. O cálculo da média foi realizado a partir de um número grande de medidas para minimizar o efeito da posição angular. Desta forma, o *hardware* foi ajustado na sua capacidade máxima, o que garantiu 10000 medições para o cálculo da média. Além disso, através de outro ajuste (tempo total de 0,46154 s para realizar as 10000 medições em cada um dos 401 pontos de frequência) garantiu-se o mínimo de três revoluções do eixo quando operando na menor das velocidades de rotação mostradas na Tab. 7.2. Este alto número de medições realmente minimiza o efeito da posição angular e, ao mesmo tempo, reduz a incidência de “ruído” que surge devido ao comportamento dinâmico do rotor (aliado a alguns efeitos elétricos, como informado previamente). Isto fica evidente na Fig. 7.27, onde são apresentadas as curvas de impedância medidas em quatro condições de ajuste do *hardware* (PZT-3 com o rotor sem falha operando a 390 rev/min): tempo total de 0,07 s para reali-

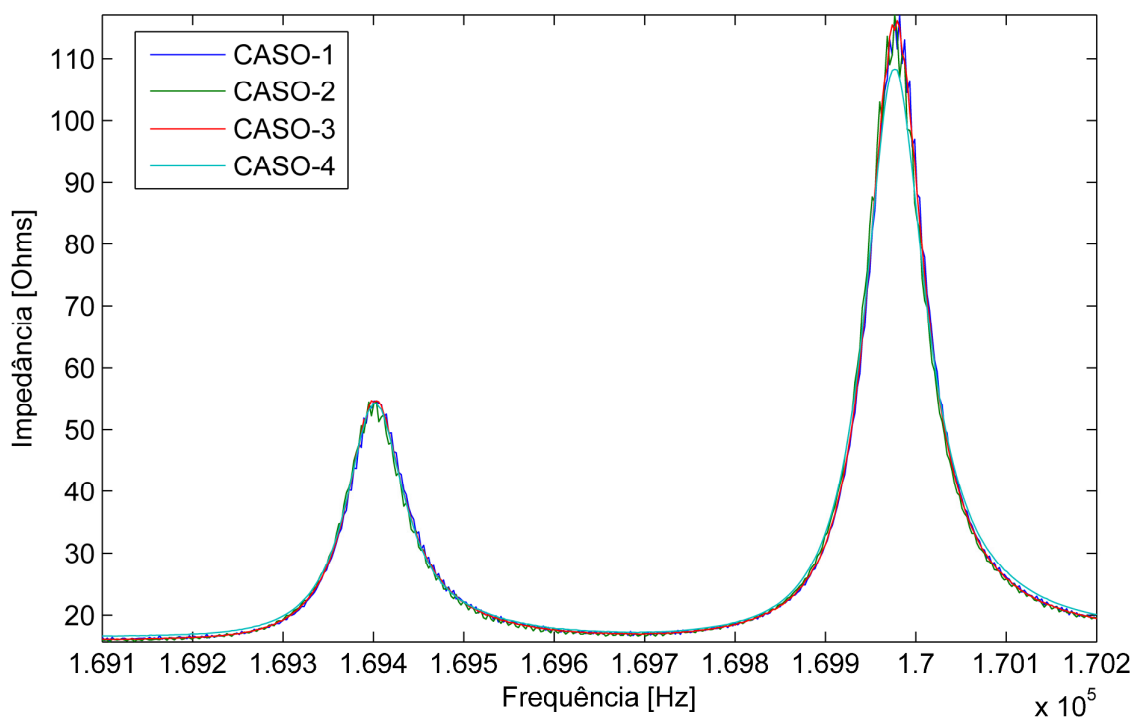


Figura 7.27 – Curvas de impedância obtidas a partir de diferentes condições de ajuste do *hardware*.

zar 6000 medições (CASO-1; o mesmo ajuste utilizado para o rotor em repouso), 0,46154 s para realizar as mesmas 1600 medições (CASO-2), 0,46154 s para realizar 5000 medições (CASO-3) e 0,46154 s para realizar 10000 medições (CASO-4; ajuste utilizado para obter as assinaturas de impedância com o rotor em operação). Observe que a incidência de “ruído” diminui consideravelmente com o aumento do número de medidas e do tempo de aquisição utilizados no cálculo da média. As outras pastilhas de PZT apresentam resultados similares.

Sabe-se que a variação da temperatura do ambiente pode prejudicar os resultados obtidos pelo método da Impedância Eletromecânica. Especificamente nesta aplicação, além do ambiente, ocorre a variação de temperatura do equipamento quando em operação, principalmente nas regiões próximas aos mancais (rolamentos atuando como fontes de atrito). Neste caso, os sensores PZT-1 e PZT-4 foram os mais afetados (PZT-1 com mais problemas devido ao rolamento Y do mancal híbrido). Logicamente, a temperatura varia até atingir a estabilização (temperatura aumenta com a velocidade de rotação do rotor). A Fig. 7.28 apresenta as temperaturas medidas nas proximidades do PZT-1 e do mancal híbrido, utilizando a câmera térmica *FLIR*<sup>®</sup> (modelo I3; emissividade da câmera: 0,95) após o rotor operar a 1200 rev/min por 3 horas ininterruptas (rotor balanceado). Observe que a diferença de temperatura entre as posições de medida é de aproximadamente 4°C. Para minimizar este problema, a cada rodada de testes, o rotor foi mantido nas mesmas condições de operação durante 60 min antes do procedimento de medição das assinaturas de impedância ser iniciado.

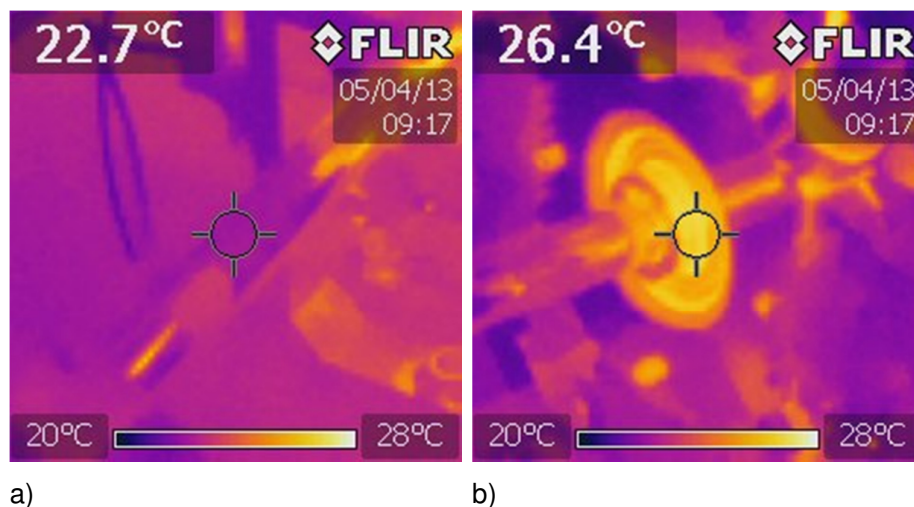


Figura 7.28 – Temperaturas medidas nas proximidades do mancal híbrido e do PZT-1 após 3 horas de operação do rotor a 1200 rev/min.



A Fig. 7.29 apresenta as métricas de dano obtidas para as condições estruturais do rotor SEM DANO e com o DANO-1 (porca; Fig. 7.10), considerando o rotor balanceado operando a 1200 rev/min. Como nos testes com o rotor em repouso, todas as métricas apresentadas na seção 7.1 foram aqui utilizadas. Note que, independentemente da métrica de dano analisada (*RMS*, *RMSD*, *RMSD1*, *RMSD2*, *RMSD3* ou *CCD*), os sensores PZT-2 e PZT-3 foram os que detectaram de maneira mais contundente o DANO-1. Também, como observado para o sistema em repouso, o sensor PZT-D não foi capaz de detectar o dano imposto de forma evidente. Quando analisado o PZT-4, os resultados indicam que o efeito dinâmico favoreceu a detecção (compare as Figs. 7.29 com a 7.16). Novamente a métrica *RMSD2* apresentou dificuldades de detecção. A Fig. 7.30 mostra as métricas de dano encontradas quando foram avaliados, além da condição SEM DANO (mesma da Fig. 7.29), os danos denominados DANO-2 e DANO-3 (cortes realizados no eixo; Fig. 7.13), também para o rotor balanceado operando a 1200 rev/min. Note que em quase todos os casos (contabilizando todos os PZT e métricas), ambos os danos foram detectados satisfatoriamente. No entanto, comparando estes resultados com o da Fig. 7.17, agora surgem problemas na estabilização das medidas (variação maior das métricas para uma mesma condição de dano). Claramente, este fato se deve ao efeito dinâmico e à estabilização da temperatura gerada pelo movimento das partes, agora presentes no sistema. Ainda analisando a Fig. 7.30, pode-se observar que o PZT-3 apresentou uma variação menor que o PZT-2 mesmo estando mais próximo a um dos cortes (DANO-2). Isto reforça a conclusão de que existe uma diferença entre o acoplamento eletromecânico destes PZTs. Por fim, note que o problema mostrado pelo PZT-2 na Fig. 7.17 não ocorreu nestes testes (aumento desproporcional das métricas referentes ao DANO-2 em relação às obtidas com o DANO-3). Além disso, o PZT-4 passou a detectar mais eficientemente o DANO-3.

As Figs. 7.31 a 7.34 mostram as assinaturas de impedância medidas por todos os quatro PZT considerados, que levaram a determinação das métricas de dano apresentadas nas Figs 7.29 e 7.30 (rotor balanceado operando a 1200 rev/min). Observe que, novamente, a maior variação ocorre com as curvas obtidas para o DANO-1 (variação em relação às curvas de referência; *Baseline* e SEM DANO). A variação provocada pelos cortes novamente é pequena, efeito confirmado pelos índices apresentados nas Figs. 7.29 e 7.30.

Resultados similares foram obtidos para o rotor operando nas outras velocidades de rotação (apresentadas na Tab. 7.2), inclusive para a velocidade de 1200 rev/min considerando o desbalanceamento de 306 g.mm /  $-50^{\circ}$  inserido no disco  $D_1$  (Anexo 3). No entanto, um fato interessante ocorreu para o rotor com o desbalanceamento imposto aos dois discos (desbalanceamento máximo; 306 g.mm /  $-50^{\circ}$  de desbalanceamento adicionado em  $D_1$  e  $D_2$ ). O PZT-D passou a detectar de forma mais eficiente os cortes: DANO-2 e DANO-3.

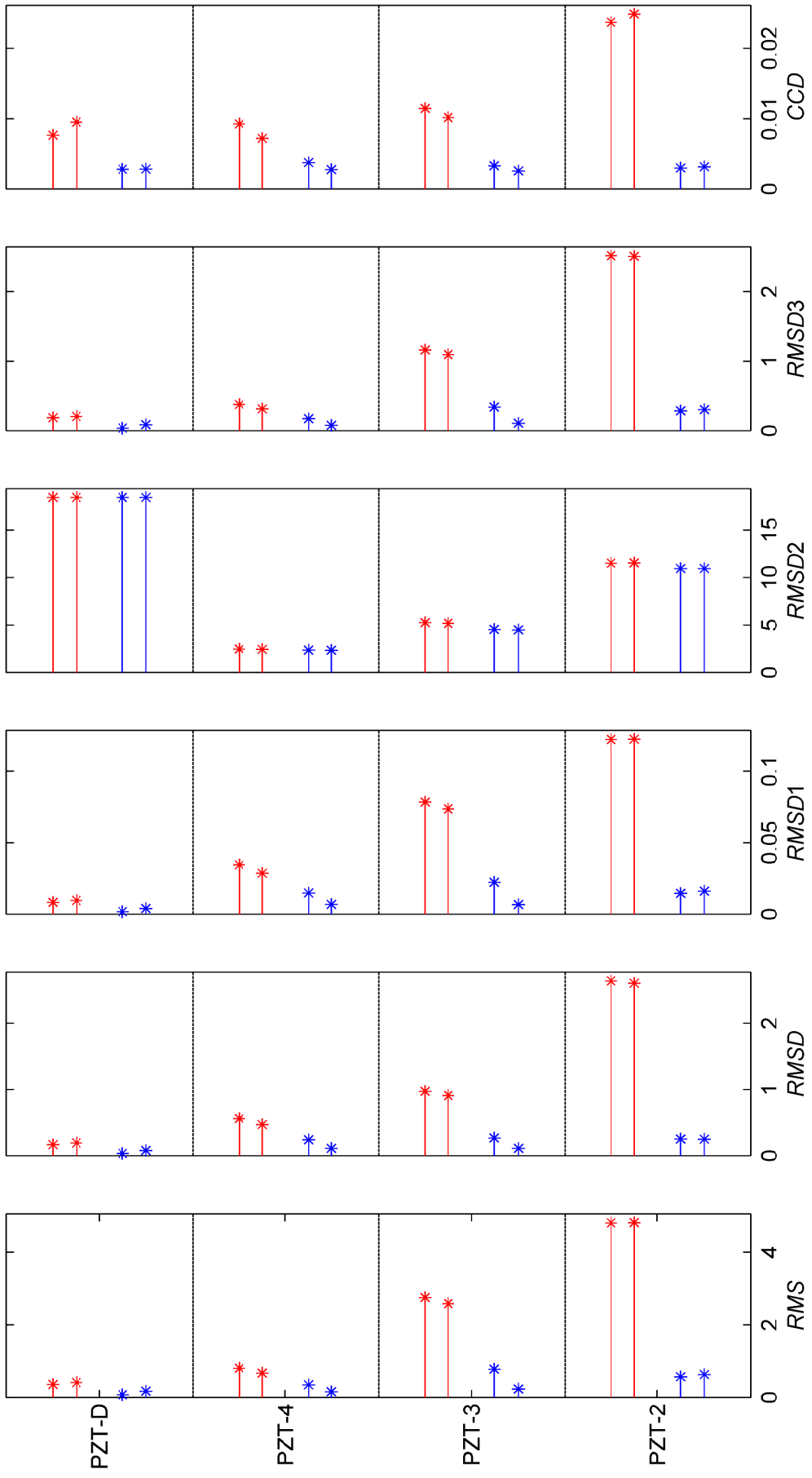


Figura 7.29 – Valores das métricas de dano obtidos com o rotor balanceado operando a 1200 rev/min para duas condições estruturais distintas:

SEM DANO ( — ) e DANO-1 ( — ).

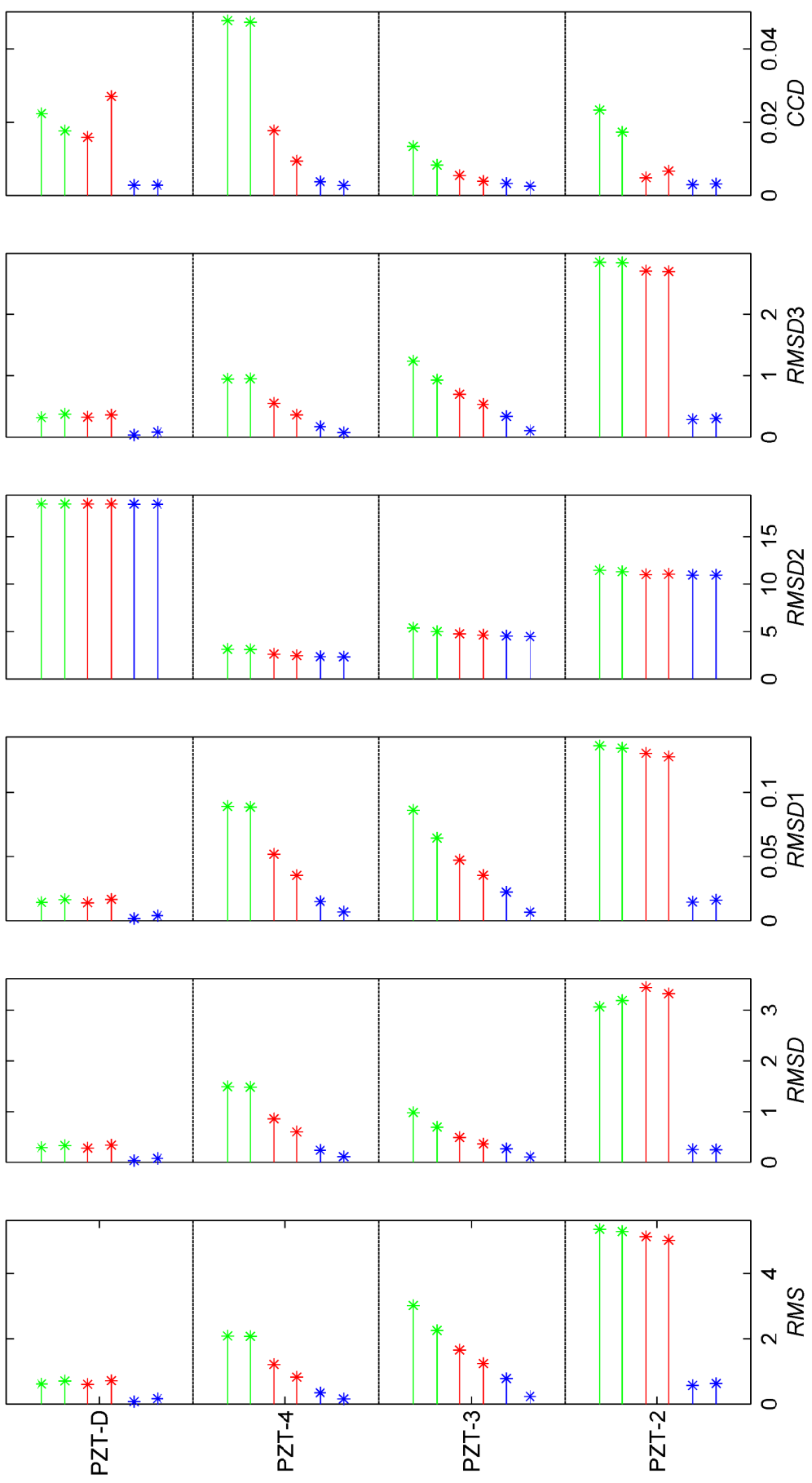


Figura 7.30 – Valores das métricas de dano obtidos com o rotor balanceado operando a 1200 rev/min para três condições estruturais distintas: SEM DANO ( — ), DANO-2 ( — ) e DANO-3 ( — ).

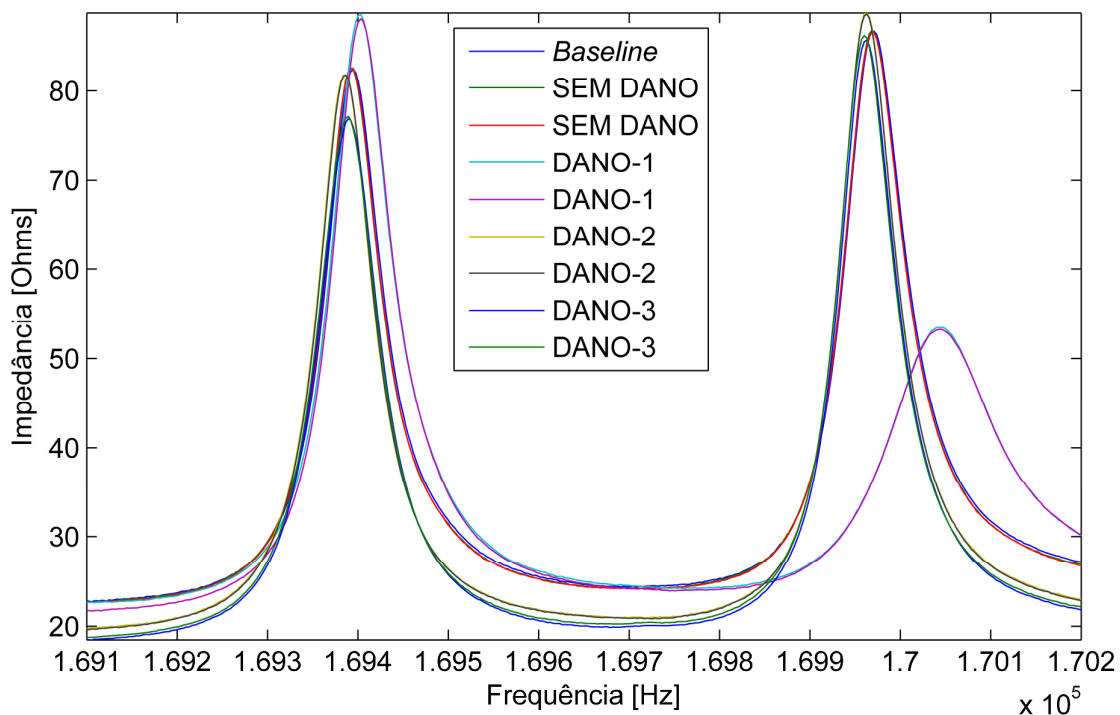


Figura 7.31 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-2 com o rotor balanceado operando a 1200 rev/min para todas as condições estruturais.

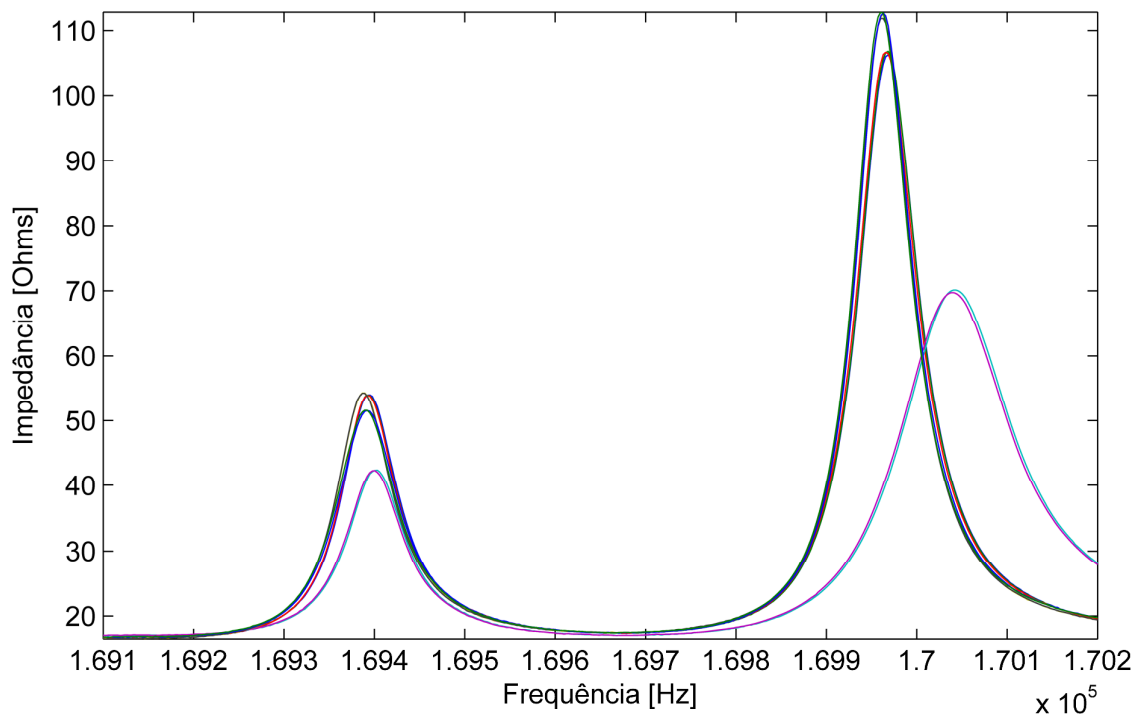


Figura 7.32 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-3 com o rotor balanceado operando a 1200 rev/min para todas as condições estruturais (legenda na Fig. 7.31).

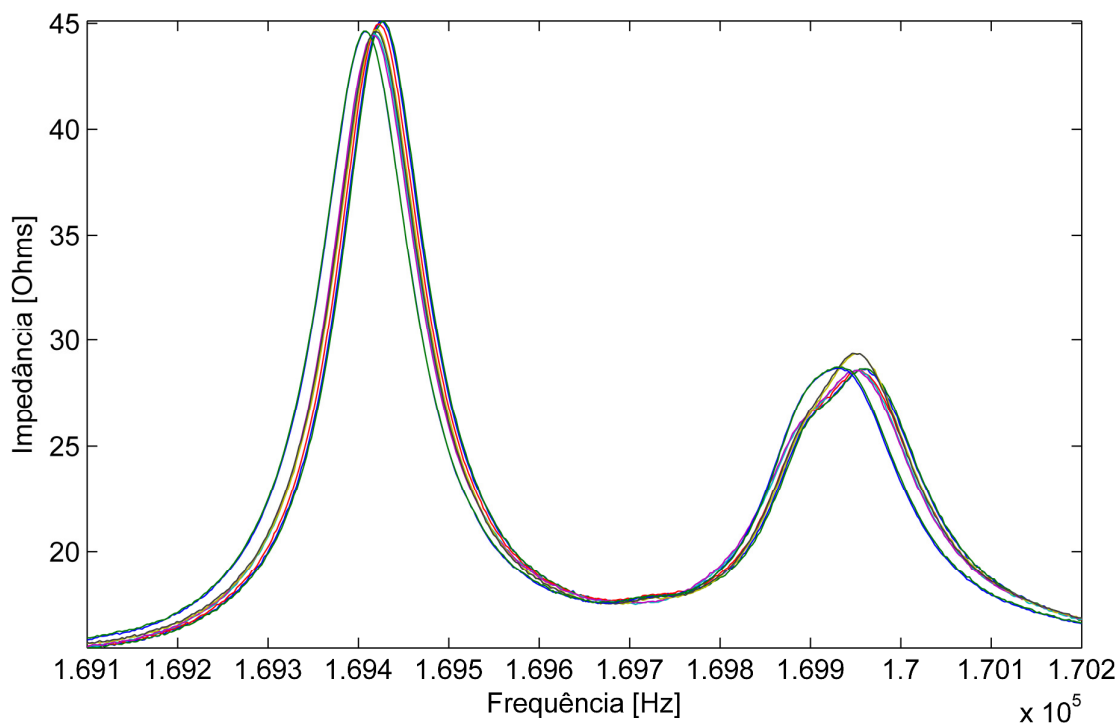


Figura 7.33 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-4 com o rotor balanceado operando a 1200 rev/min para todas as condições estruturais (legenda na Fig. 7.31).

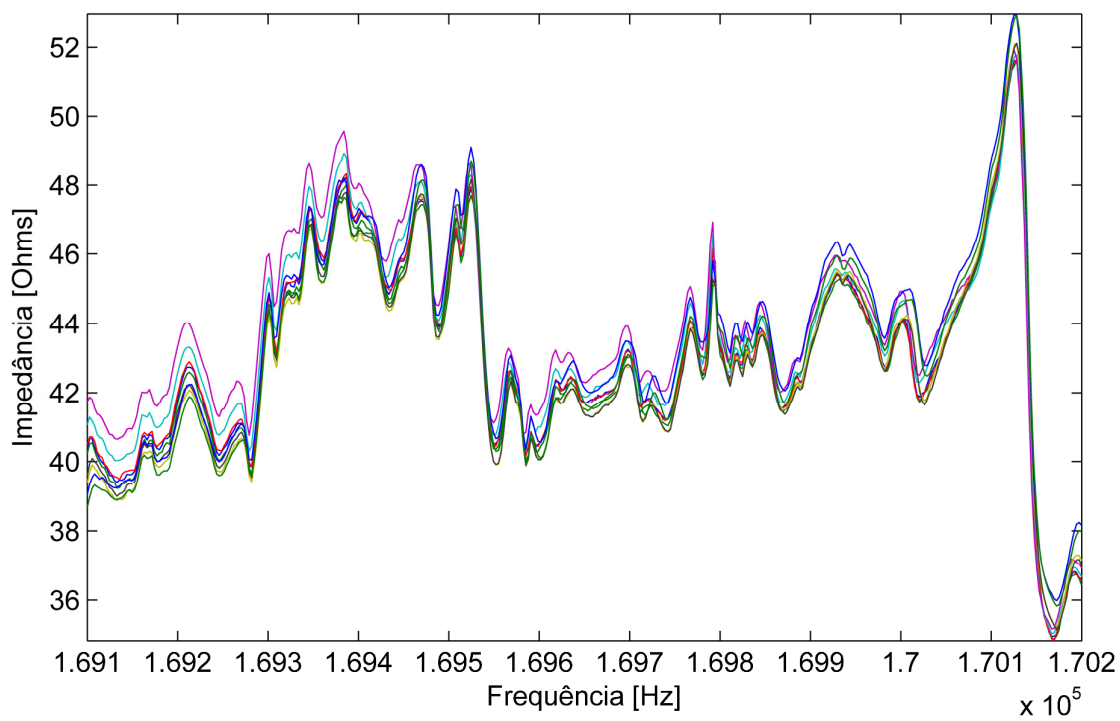


Figura 7.34 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-D com o rotor balanceado operando a 1200 rev/min para todas as condições estruturais (legenda na Fig. 7.31).

A Fig. 7.35 apresenta as métricas de dano encontradas quando foram avaliadas, além da condição SEM DANO, os danos DANO-2 e DANO-3 (cortes realizados no eixo; Fig. 7.13). Note a diferença significativa dos índices obtidos a partir do PZT-D (principalmente o *CCD*) nesta condição de operação em relação aos resultados apresentados para o rotor balanceado também a 1200 rev/min. Observe ainda que o comportamento das métricas de dano quando considerados as outras quatro pastilhas de PZT é similar à condição de rotor balanceado. Além disso, como mostra a Fig. 7.36, o DANO-1 foi detectado normalmente por todos os sensores-atuadores.

A Fig. 7.37 mostra as assinaturas de impedância medidas pelo PZT-D para o rotor nas condições de operação utilizadas para obter as métricas de dano mostradas nas Figs. 7.35 e 7.36 (desbalanceamento máximo a 1200 rev/min). Comparando com as curvas mostradas na Fig. 7.34 (PZT-D; rotor balanceado a 1200 rev/min), é possível observar que a modificação das assinaturas de impedância com os danos é muito mais significativa, o que tornou possível a detecção.

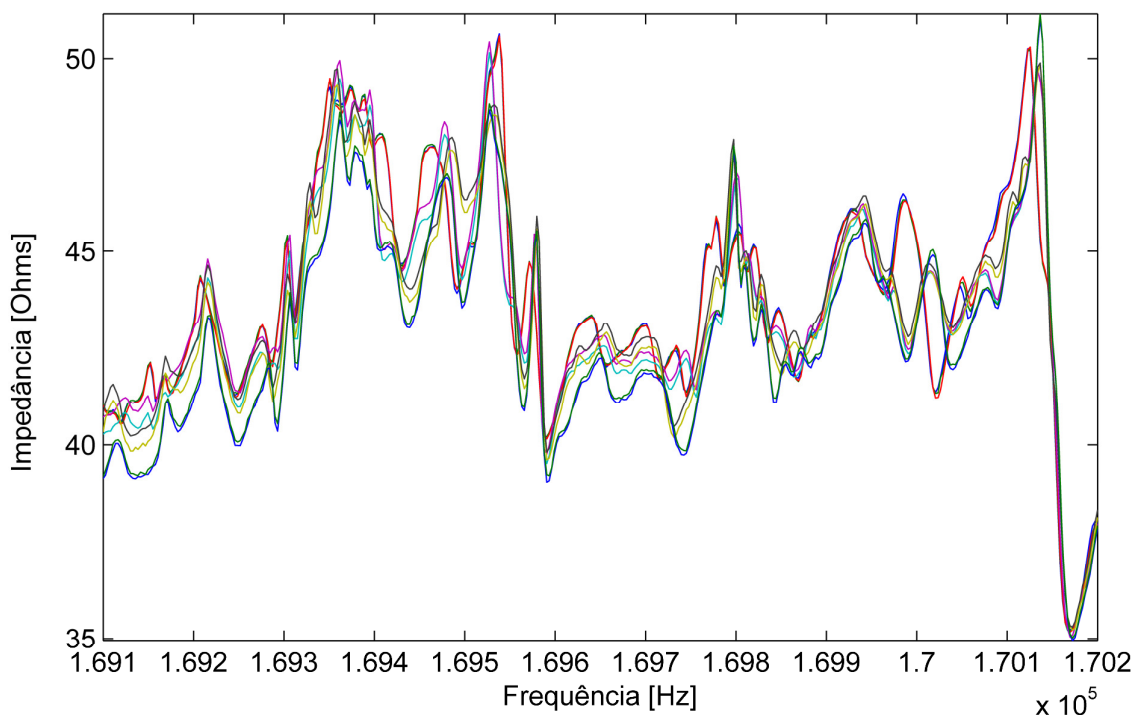


Figura 7.37 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-D para o rotor com desbalanceamento máximo operando a 1200 rev/min em todas as condições estruturais (legenda na Fig. 7.31).



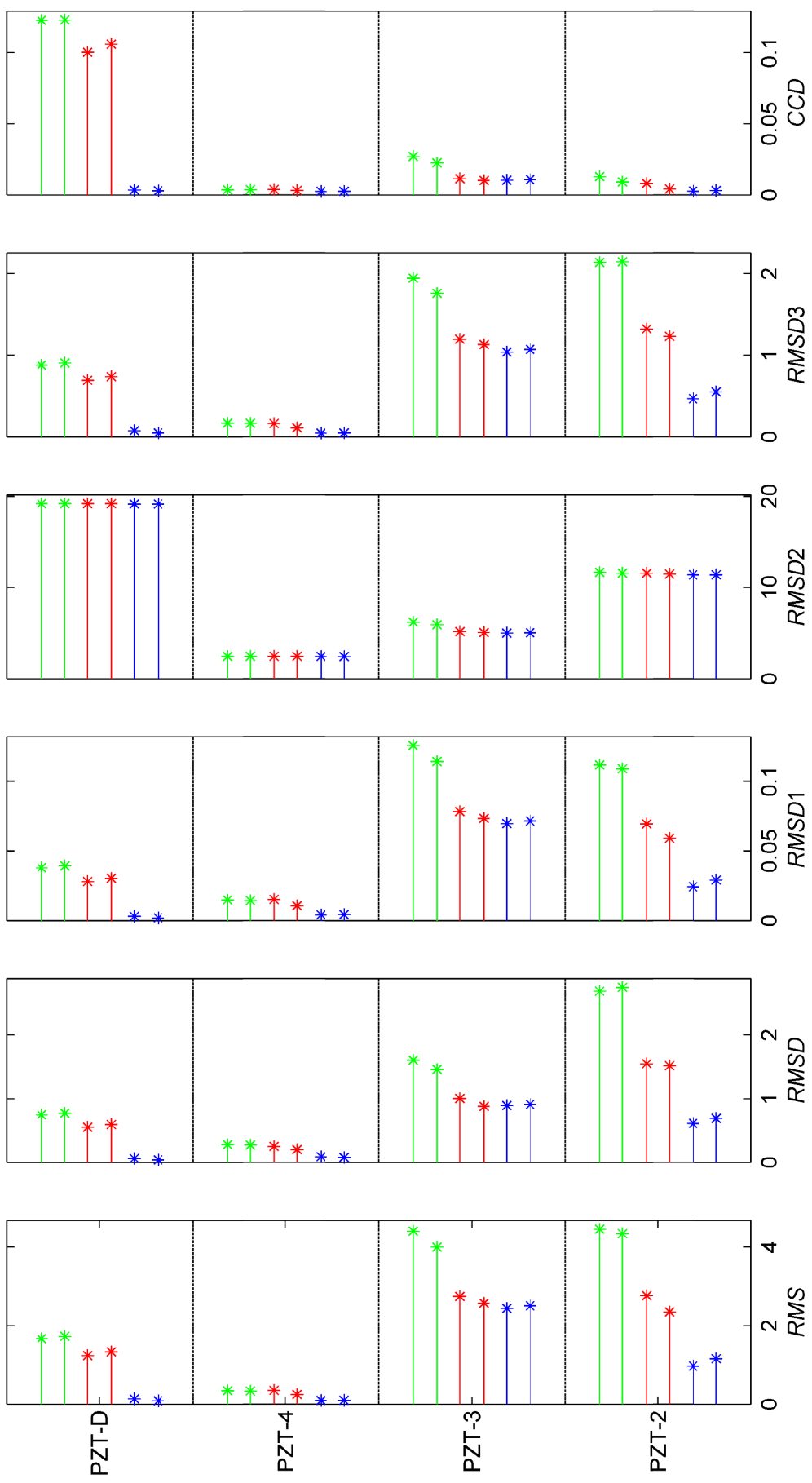


Figura 7.35 – Valores das métricas de dano obtidos para o rotor com desbalanceamento máximo operando a 1200 rev/min em três condições estruturais distintas: SEM DANO (—), DANO-2 (—) e DANO-3 (—).



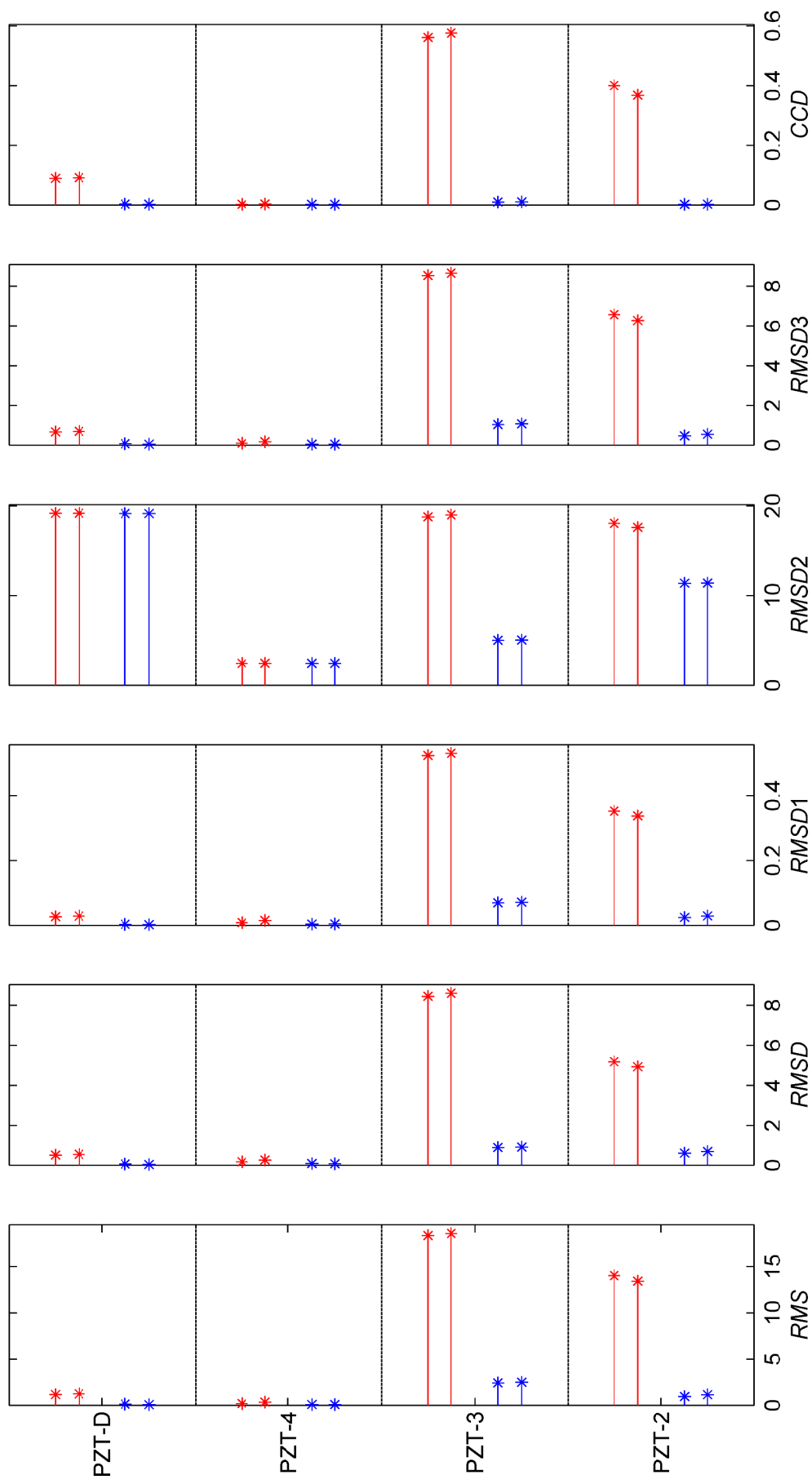


Figura 7.36 – Valores das métricas de dano obtidos para o rotor com desbalanceamento máximo operando a 1200 rev/min em duas condições estruturais distintas: SEM DANO ( — ) e DANO-1 ( — )



As Figs. 7.38 a 7.41 apresentam a comparação das assinaturas de impedância obtidas com todos os sensores inteligentes para o rotor com o DANO-2 operando a 1200 rev/min nos três níveis de desbalanceamento considerados. Observe que o efeito dinâmico introduzido pelas forças de desbalanceamento não alteram de forma significativa as curvas do PZT-3 e PZT-4. Neste caso, grandes mudanças podem ser observadas com o PZT-2 (espécie de *shift*) e, logicamente, no PZT-D. Contudo, as variações observadas são equivalentes às obtidas quando foram inseridos os cortes.

Outro efeito dinâmico interessante a ser comparado consiste nas curvas de impedância obtidas a partir de diferentes velocidades de rotação. Isto foi feito para as velocidades mostradas na Tab. 7.2 considerando cada um dos sensores, como mostra as Figs. 7.42 a 7.45. Observe que as frequências associadas aos picos obtidos nas curvas de impedância dos sensores PZT-2, PZT-3 e PZT-4 tendem a diminuir com o aumento da velocidade de rotação.

São duas as causas deste fenômeno, a saber, a variação de temperatura do eixo (atrio interno) devido à rotação e, provavelmente, de uma forma mais discreta, a mudança nas condições de carregamento dinâmico no sistema em consequência da mudança da velocidade. Infelizmente, não é possível ponderar a participação em separado de cada efeito.

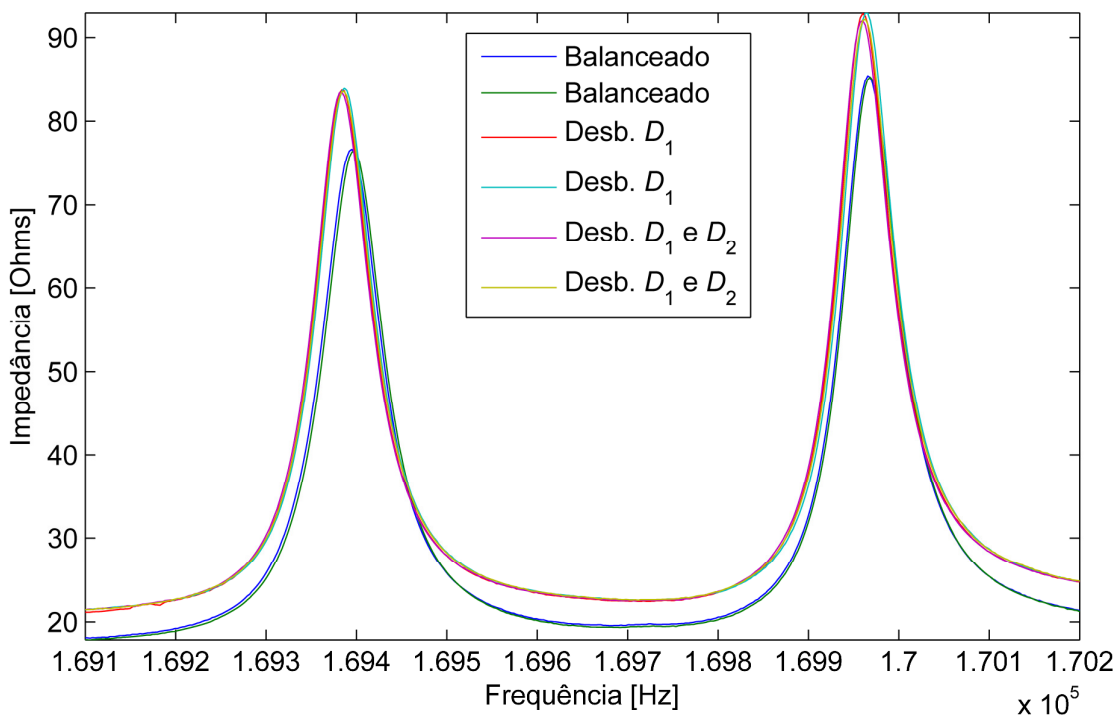


Figura 7.38 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-2 para o rotor com o DANO-2 em diferentes condições de desbalanceamento a 1200 rev/min.

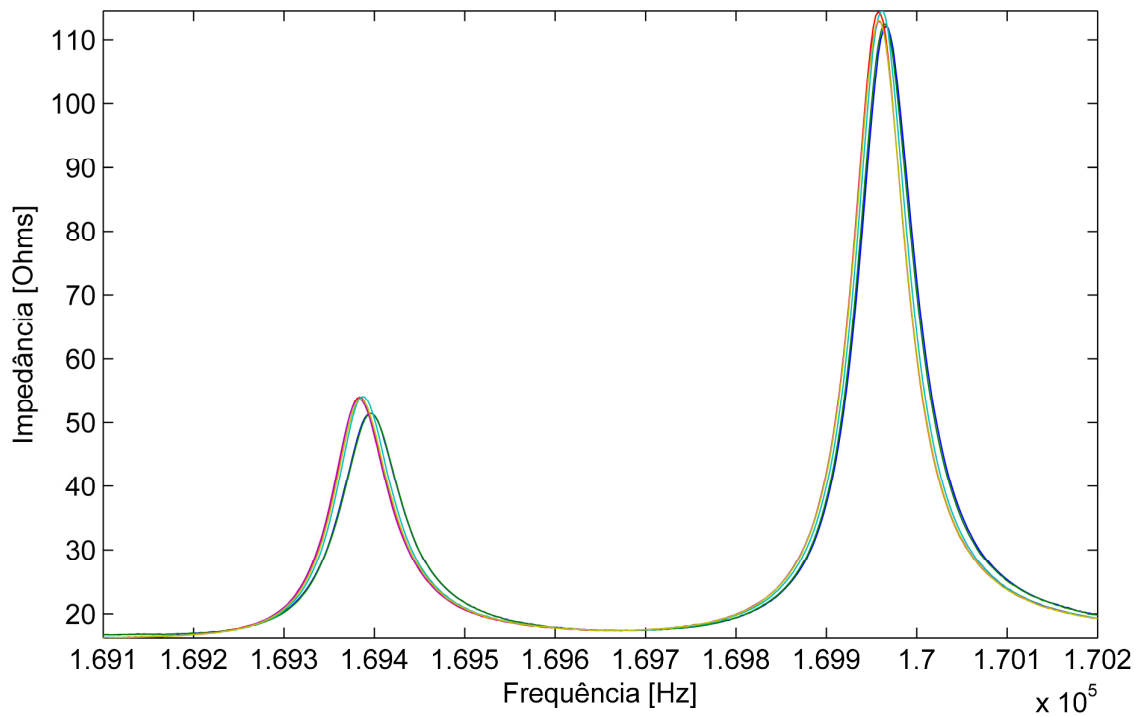


Figura 7.39 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-3 para o rotor com o DANO-2 em diferentes condições de desbalanceamento a 1200 rev/min (legenda na Fig. 7.38).

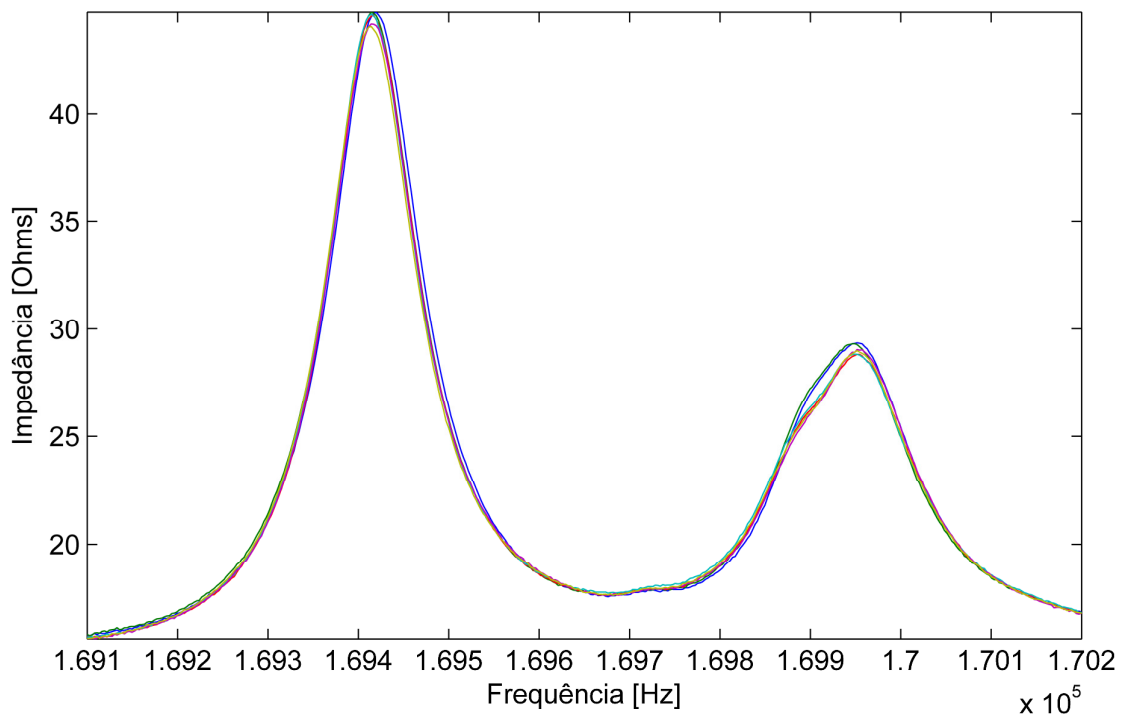


Figura 7.40 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-4 para o rotor com o DANO-2 em diferentes condições de desbalanceamento a 1200 rev/min (legenda na Fig. 7.38).

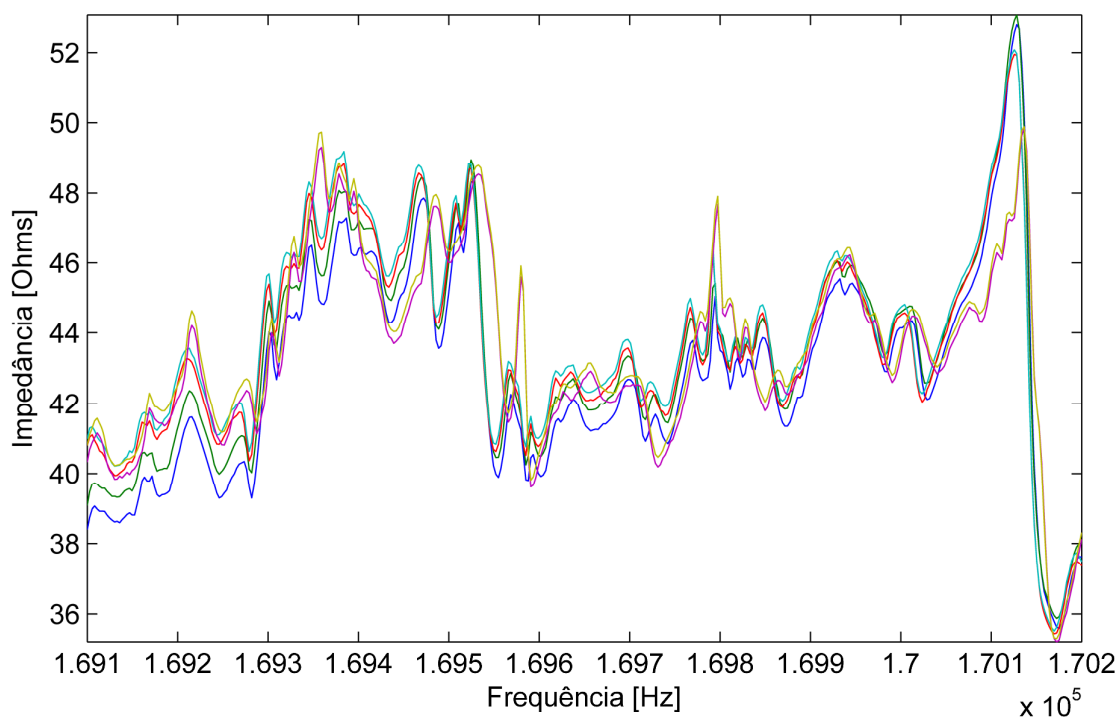


Figura 7.41 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-D para o rotor com o DANO-2 em diferentes condições de desbalanceamento a 1200 rev/min (legenda na Fig. 7.38).

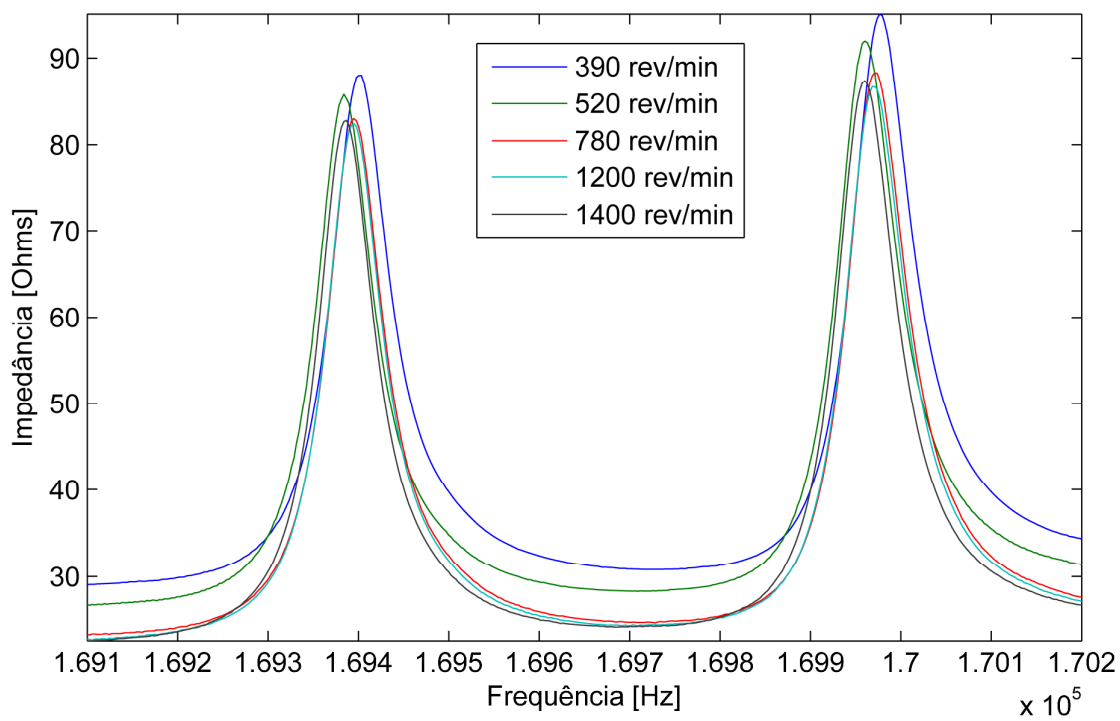


Figura 7.42 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-2 para o rotor sem dano em diferentes velocidades de rotação.

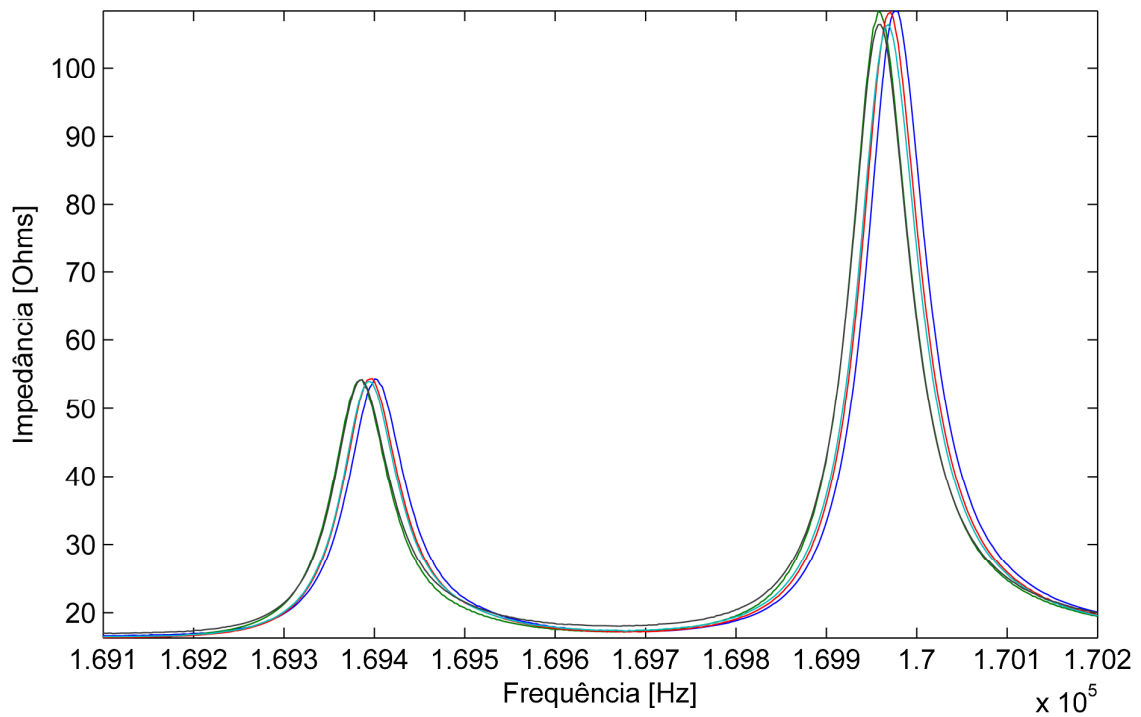


Figura 7.43 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-3 para o rotor sem dano em diferentes velocidades de rotação (legenda na Fig. 7.42).

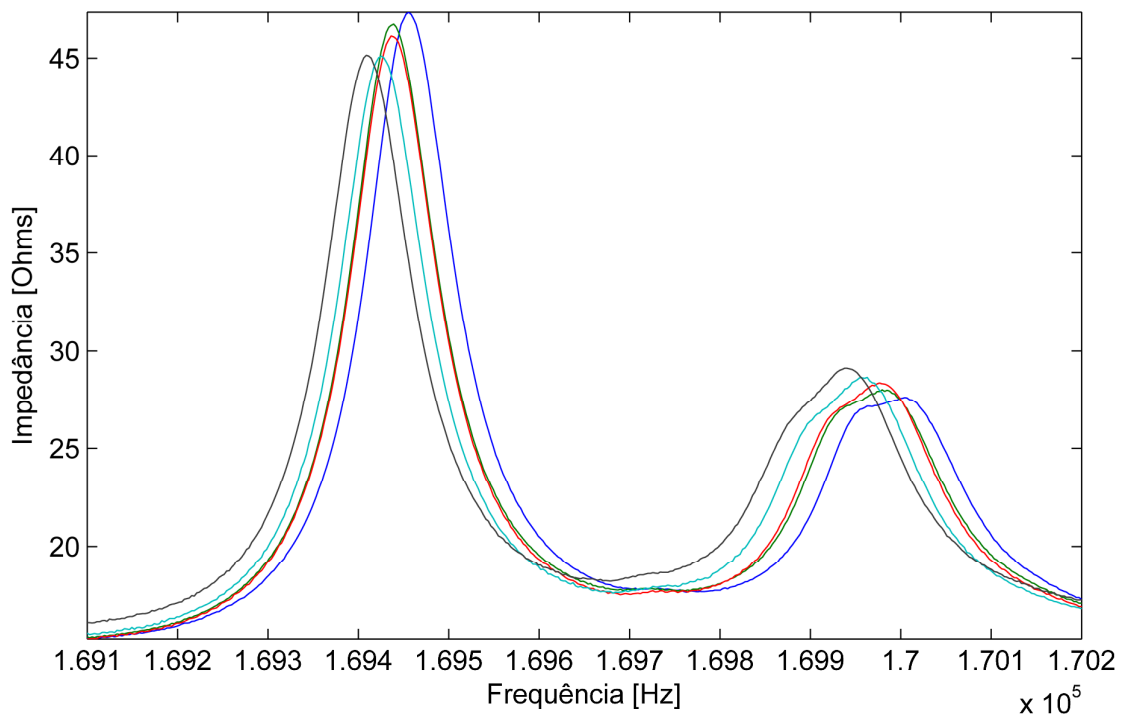


Figura 7.44 – Assinaturas de impedância adquiridas pelo PZT-4 para o rotor sem dano em diferentes velocidades de rotação (legenda na Fig. 7.42).