



Dissertação de Mestrado Profissional em Física
com Ênfase em Instrumentação Científica

Desenvolvimento de bancada de alinhamento magnético
pela técnica do fio vibrante para o Projeto Sirius

Renan Ramalho Geraldes

Rio de Janeiro
2015

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Coordenação de Física Aplicada
CBPF/RJ

Renan Ramalho Gerales

Desenvolvimento de bancada de alinhamento magnético
pela técnica do fio vibrante para o Projeto Sirius

Dissertação submetida ao Mestrado
Profissional em Física com Ênfase em
Instrumentação Científica do Centro
Brasileiro de Pesquisas Físicas para
obtenção do grau Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Roberto Carvalho Cernicchiaro

Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Ricardo Droher Rodrigues

Rio de Janeiro

2015

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles que consagram suas vidas a um mundo mais tolerante, justo, acessível e sustentável.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a meus pais, Lino e Darci, por todo o amor e por seus melhores esforços para a minha formação pessoal e acadêmica.

À minha família, aos meus amigos e, principalmente, à minha companheira Mayra pelo suporte incondicional e por compreenderem minhas ausências e minha falta de paciência, decorrente principalmente do excesso de trabalho e do cansaço.

A meus colegas de moradia, Fernando Henrique de Sá e Douglas Salles Viroel, que me acompanharam diariamente durante todo o período de grande esforço e sacrifício que caracterizou este mestrado; e não só pela paciência e compreensão, como também pelas inestimáveis contribuições técnicas e psicológicas que tornaram o trabalho melhor (ou mesmo possível).

Ao meu orientador Prof. Dr. Geraldo Cernicchiaro pelo apoio e pelas contribuições, superando algumas das dificuldades impostas pela distância, e ao meu co-orientador Prof. Dr. Ricardo Doher, que pôde encontrar momentos para contribuir com meu trabalho mesmo diante das enormes dificuldades e responsabilidades de liderar a construção do Projeto Sirius.

Ao CBPF pelas disciplinas e pela oportunidade de prosseguir com minha formação acadêmica, e ao LNLS por disponibilizar todos os significativos recursos necessários para que este trabalho fosse possível. Mais especificamente, agradeço a Carlos Scorzato, James Citadini, Regis Neuenschwander, Rodrigo Leão, Eli Wenzel e aos membros dos grupos de ímãs e da oficina mecânica do LNLS, sem os quais este trabalho não teria sido possível. Agradeço ainda a Lucas Sanfelici e à direção da divisão científica do LNLS pela tolerância e compreensão nos momentos em que inevitavelmente o projeto de mestrado tenha interferido no desempenho das minhas funções como engenheiro das linhas de luz do LNLS.

Finalmente, agradeço a todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

As horas mais felizes de nossas vidas são precisamente aquelas em que perdemos a noção das horas.

Eduardo Giannetti, em O Valor do Amanhã

RESUMO

Em dezembro de 2014, iniciou-se oficialmente no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), sediado no campus do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), em Campinas, São Paulo, a construção do Sirius, o novo acelerador de partículas brasileiro, com a promessa de ser, dentro de sua classe, a máquina de mais alto brilho no mundo. Tendo como competidor direto apenas o acelerador MAX IV, em construção na Suécia, o Sirius é considerado o maior projeto científico brasileiro e colocará o Brasil em um nível de competitividade global em pesquisas relacionadas a ciências dos materiais, medicina, biologia e química. No entanto, para que o acelerador tenha o desempenho de acordo com o projeto, as demandas de soluções de engenharia são extremamente exigentes. Dentre elas, pode-se destacar a alta qualidade dos ímãs de sua rede magnética e a alta precisão de alinhamento entre eles. A técnica do fio vibrante é reconhecida na comunidade de aceleradores como uma das mais precisas para procedimentos de fiducialização de ímãs, isto é, localização do centro magnético, alinhamento e transferência de coordenadas para referências mecânicas. Neste trabalho, como ferramenta complementar aos recursos de metrologia a alinhamento dos grupos de magnetos (IMA) e projetos mecânicos (PRO) do LNLS, foi desenvolvida, sobre uma máquina de medição por coordenada (MMC), uma bancada que fará uso da técnica do fio vibrante para fiducialização de quadrupolos e sextupolos do Sirius. Os resultados parciais alcançados foram positivos e muito promissores, já atendendo a parte das tolerâncias de alinhamento requeridas, validando um novo sensor de vibrações com uma região de operação dez vezes maior do que o tradicionalmente utilizado, e propondo uma técnica inovadora para a etapa de medição mecânica do procedimento de fiducialização, baseada no sistema de visão da MMC.

Palavras-chave: fio vibrante, fiducialização, máquina de medição por coordenada (MMC), Sirius.

ABSTRACT

In December 2014, it has officially begun the construction of Sirius, the new particles accelerator at the Brazilian Synchrotron Light Laboratory (LNLS), on the campus of the Brazilian Center for Research in Energy and Materials (CNPEM), in Campinas, São Paulo. It promises to be the brightest light source of its kind, competing directly only against MAX IV, in Sweden. It is also considered the greatest scientific project in Brazil, raising competitiveness in fields of research as materials science, medicine, biology and chemistry. For the accelerator to perform as designed, however, the demands on engineering are extremely high. The high quality of the magnets in the magnetic lattice and the high precision in their alignment are particularly important. The vibrating wire is considered one the most precise techniques for magnets fiducialization, i.e., locating and aligning the magnetic axis, and transferring its coordinates to mechanical references. As a complementary tool to the metrology and alignment resources of the magnets group (IMA) and mechanical design group (PRO) of LNLS, this Master's project developed a vibrating wire bench to fiducialize quadrupoles and sextupoles for Sirius. This bench was built on a coordinate measure machine (CMM) for metrological purposes. Positive and promising partial results were obtained, which already meet part of the necessary alignment tolerances. Moreover, a new vibration sensor was developed, with a broader range of operation than those that are typically used in literature references, and an innovative metrology technique for this application, based on the vision system of the CMM, was also carried out.

Keywords: vibrating wire, fiducialization, coordinate measure machine (CMM), Sirius.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
1.1 Aceleradores de partículas e redes magnéticas	4
1.1.1 Força de Lorentz	4
1.1.2 Óptica de feixe	4
1.1.2.1 Características de projeto de magnetos	6
1.1.3 Orientação de feixe de partículas - Dipolos magnéticos	6
1.1.4 Focalização de feixe de partículas - Quadrupolos magnéticos	7
1.1.5 Perturbações e efeitos cromáticos - Sextupolos magnéticos	10
1.1.6 A equação de Laplace e os campos multipolares	12
1.1.7 Especificações de alinhamento para os magnetos do Sirius	14
1.2 Técnica do fio vibrante	17
1.2.1 Força magnética em um condutor transportando corrente elétrica	17
1.2.2 Ondas estacionárias em um fio esticado.....	19
1.2.2.1 Ondas mecânicas viajantes em uma corda	19
1.2.2.2 Superposição e ondas estacionárias	21
1.2.2.3 Série de Fourier	23
1.2.2.4 Ressonância	24
1.2.3 Amplificador lock-in e considerações de medidas.....	26
1.2.3.1 Detecção sensível a fase (PSD)	27
1.2.3.2 Largura de banda	28
1.2.3.3 Referências do lock-in	29
1.2.3.3.1 Phase Locked Loop (PLL).....	30
1.2.3.4 Magnitude e fase	31
1.2.3.5 Unidades de medida	32
1.2.3.6 PSDs analógicos e digitais	33
1.2.4 Fiducialização e alinhamento de magnetos.....	34
1.2.4.1 Bobina girante.....	35
1.2.4.2 Fio móvel	35
1.2.4.3 Fio pulsado	36
1.2.4.4 Fio vibrante por ondas mecânicas	36
1.2.4.5 Fio vibrante	36
1.2.4.5.1 Equações de movimento	37

1.2.4.5.2	Aplicação da técnica	40
1.2.4.5.3	Efeito de erros de posicionamento longitudinal	45
1.2.4.5.4	Visão esquemática da montagem experimental	45
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	46
3	DESENVOLVIMENTO	61
3.1	Histórico da técnica no LNLS	61
3.2	Mecânica e automação	63
3.2.1	Estágios lineares	63
3.2.2	Alinhamento mecânico	67
3.2.3	Conjuntos de montagem do fio	68
3.2.4	Sensores de vibração	71
3.2.5	Caixa de proteção	72
3.3	Sensores de vibração	73
3.3.1	Fototransistor H21A1	74
3.3.2	Fotodiodo S5870	76
3.3.2.1	Primeira versão	77
3.3.2.1.1	Montagem para caracterização do sensor V1	79
3.3.2.2	Simulações e fonte de iluminação	80
3.3.2.3	Segunda versão	81
3.3.2.3.1	Montagem para caracterização do detector V2	84
3.4	Amplificador lock-in: geração e detecção de sinais	85
3.5	Software de controle	88
3.6	Fiducialização e metrologia	89
3.6.1	Alinhamento magnético	91
3.6.2	Metrologia	92
3.6.2.1	Catenária	94
3.6.2.2	Referências metrológicas nos magnetos	95
3.6.2.3	Medida do fio	96
3.6.2.4	Calibração da câmera	97
3.6.2.5	Repetibilidade	99
3.6.2.6	Exatidão	99
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	101
4.1	Cálculos básicos	101
4.2	Mecânica e automação	102

4.2.1	Caracterização dos estágios lineares.....	102
4.2.2	Alinhamento mecânico	108
4.2.2.1	Simulação	108
4.2.2.2	Montagem experimental	112
4.3	Sensores de vibração	113
4.3.1	Fototransistor H21A1	113
4.3.1	Fotodiodo S5870	114
4.3.1.1	Primeira versão.....	114
4.3.1.2	Simulações e fonte de iluminação	115
4.3.1.2.1	Linearidade e sensibilidade.....	115
4.3.1.2.2	Fonte de iluminação.....	117
4.3.1.2.3	Medidas de alinhamento magnético	120
4.3.1.3	Segunda versão.....	122
4.4	Amplificador lock-in.....	125
4.5	Software de controle.....	127
4.6	Fiducialização e metrologia.....	129
4.6.1	Alinhamento magnético	129
4.6.1.1	Ressonância	129
4.6.1.2	Medidas de alinhamento de quadrupolo	131
4.6.1.2.1	Medidas preliminares.....	131
4.6.1.2.2	Medidas finais	132
4.6.1.2.3	Repetibilidade.....	135
4.6.2	Metrologia.....	136
4.6.2.1	Catenária	136
4.6.2.2	Calibração da câmera.....	139
4.6.2.3	Sistema de coordenadas do magneto	140
4.6.2.4	Repetibilidade	141
4.6.2.5	Exatidão.....	144
4.6.2.6	Incerteza metrológica total.....	145
4.6.3	Incerteza final	146
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	148
5.1	Conclusões	148
5.2	Trabalhos futuros.....	149
	REFERÊNCIAS	151

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ESQUEMÁTICO COM VISTA SUPERIOR DE UM SUPERPERÍODO DA REDE MAGNÉTICA DO SIRIUS: DIPOLOS EM AZUL, QUADRUPOLOS EM VERMELHO E SEXTUPOLOS EM VERDE. [FONTE: ADAPTADO DE (LNLS, 2014)].....	2
FIGURA 2: DESENHO ESQUEMÁTICO DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE UM DIPOLO MAGNÉTICO, EM QUE SÃO VISTOS: OS POLOS MAGNÉTICOS, COM O ESPAÇAMENTO (2G) ENTRE POLOS, AS BOBINAS DE EXCITAÇÃO, O NÚCLEO DE FERRO, E O CAMINHO DE INTEGRAÇÃO PARA O CÁLCULO DO CAMPO PELA LEI DE AMPERE. [FONTE: (WIEDEMANN, 2007)]	7
FIGURA 3: PRINCÍPIO DE FOCALIZAÇÃO, COM ÂNGULO DE DEFLEXÃO A EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA R AO EIXO E DISTÂNCIA FOCAL F. [FONTE: (WIEDEMANN, 2007)]	8
FIGURA 4: QUADRUPOLO MAGNÉTICO: (A) PADRÃO DE CAMPO MAGNÉTICO; (B) PERFIL DE POLOS. [FONTE: (WIEDEMANN, 2007)]	9
FIGURA 5: QUADRUPOLO EM BANCADA DE CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA PELA TÉCNICA DA BOBINA GIRANTE NO PSI (PAUL SCHERRER INSTITUTE, VILLIGEN, SUÍÇA). [FONTE: AUTOR].....	10
FIGURA 6: ERRO CROMÁTICO DE FOCALIZAÇÃO POR QUADRUPOLO EM (A), E SUA CORREÇÃO COM O USO DE SEXTUPOLOS EM (B). [FONTE: (WIEDEMANN, 2007)].....	11
FIGURA 7: SEXTUPOLO DO PSI (PAUL SCHERRER INSTITUTE, VILLIGEN, SUÍÇA). [FONTE: AUTOR].....	12
FIGURA 8: EXEMPLO DE ERRO DE ALINHAMENTO DO TIPO YAW, SE CONSIDERADA UMA VISTA SUPERIOR, OU PITCH, SE CONSIDERADA, LATERAL. A DIREÇÃO Z DO FEIXE TAMBÉM É INDICADA. [FONTE: AUTOR].....	16
FIGURA 9: (A) FIO SUSPENSO VERTICALMENTE ENTRE OS POLOS DE UM MAGNETO. (B), (C) E (D) MOSTRAM UMA VISTA EM CORTE DE (A), COM O CAMPO MAGNÉTICO ENTRANDO NA PÁGINA. EM (B) A CORRENTE É ZERO E NÃO HÁ QUALQUER FORÇA AGINDO SOBRE O FIO. JÁ (C) E (D) MOSTRAM DEFLEXÕES EM SENTIDOS OPOSTOS NO FIO, CAUSADAS PELA FORÇA MAGNÉTICA PARA SENTIDOS OPOSTOS DA CORRENTE. [FONTE: (SERWAY E JEWETT, 2004)]	17
FIGURA 10: ONDA SENOIDAL UNIDIMENSIONAL SE PROPAGANDO PARA A DIREITA COM VELOCIDADE V, NOS INSTANTES $T = 0$ E EM UM TEMPO T POSTERIOR. [FONTE: (SERWAY E JEWETT, 2004)]	20
FIGURA 11: FOTOGRAFIA MULTIFLASH DE UMA ONDA ESTACIONÁRIA EM UMA CORDA. O COMPORTAMENTO NO TEMPO DO DESLOCAMENTO VERTICAL DE UM PONTO DA CORDA É DADO POR $\cos\omega t$, OU SEJA, CADA PONTO VIBRA COM UM FREQUÊNCIA ANGULAR ω . A AMPLITUDE DA OSCILAÇÃO, POR SUA VEZ, DEPENDE DA POSIÇÃO DO PONTO AO LONGO DA CORDA, VIBRANDO DE ACORDO COM UM ENVELOPE $2A\sin(kx)$. [FONTE: (SERWAY E JEWETT, 2004)]	21
FIGURA 12: CORDA FIXA NAS DUAS EXTREMIDADES (A) E SEUS HARMÔNICOS: (B) PRIMEIRO HARMÔNICO, MODO FUNDAMENTAL; (C) SEGUNDO HARMÔNICO; E (D) TERCEIRO HARMÔNICO. [FONTE: (SERWAY E JEWETT, 2004)]	22
FIGURA 13: GRÁFICO DA AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DA FORÇA EXTERNA, COM A LIMITAÇÃO DO VALOR MÁXIMO E ASSIMETRIA DA CURVA EM FUNÇÃO DO AMORTECIMENTO DO SISTEMA. [FONTE: (SERWAY E JEWETT, 2004)]	25
FIGURA 14: DIAGRAMA COM SINAL DE REFERÊNCIA EXTERNA AO LOCK-IN, SINAL DE SAÍDA E SINAL DE REFERÊNCIA INTERNA DO LOCK-IN, GERADO A PARTIR DA REFERÊNCIA EXTERNA POR PLL. [FONTE: (STANFORD RESEARCH SYSTEMS, 2011)].....	27

FIGURA 15: DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAL DO LOCK-IN SR830 DA STANFORD RESEARCH SYSTEMS. [FONTE: (STANFORD RESEARCH SYSTEMS, 2011)]	29
FIGURA 16: DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM PLL COM DETECTOR DE FASE. O OSCILADOR MESTRE CORRESPONDE AO SINAL DE ENTRADA, O FILTRO, AO CONTROLADOR PI, E OSCILADOR ESCRAVO, AO OSCILADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL [FONTE: (LEONOV, KUZNETSOV E YULDASHEV M. V., 2011)].	31
FIGURA 17: SEGMENTO DE FIO MOSTRANDO A TENSÃO T SOBRE O FIO, E A FORÇA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO E A GRAVIDADE ATUANDO SOBRE ELE. [FONTE: (WOLF, 2005)].....	37
FIGURA 18: RECONSTRUÇÃO DO PERFIL DE CAMPO MAGNÉTICO A PARTIR DOS DIVERSOS HARMÔNICOS RESSONANTES. AS LINHAS PONTILHADAS CORRESPONDEM ÀS COMPONENTES DO CAMPO MAGNÉTICO DE 13 HARMÔNICOS ANALISADOS, ENQUANTO A LINHA CONTÍNUA É O PRÓPRIO CAMPO RECONSTRUÍDO. [FONTE: (TEMNYKH, 1997)]	41
FIGURA 19: PERFIL DE CAMPO MAGNÉTICO HORIZONTAL DE UM QUADRUPOLO EM DUAS CONDIÇÕES DE DESALINHAMENTO: A LINHA CONTÍNUA É DECORRENTE DE UM DESALINHAMENTO VERTICAL DE 50 μm , ENQUANTO A LINHA PONTILHADA É CAUSADA POR UM DESALINHAMENTO YAW DE 0.5 MRAD. [FONTE: TEMNYKH, 1997]	41
FIGURA 20: AMPLITUDE (ESQUERDA) E FASE (DIREITA) DA VIBRAÇÃO DO FIO PARA UMA VARREDURA VERTICAL NA POSIÇÃO DE UM QUADRUPOLO PARA UM DADO HARMÔNICO. [FONTE: (WOLF, 2005)].....	43
FIGURA 21: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA MONTAGEM DO FIO VIBRANTE NO LNLS. 1) ESTÁGIOS DE MOVIMENTAÇÃO VERTICAL (y) PARA AS EXTREMIDADES DO FIO; 2) ESTÁGIOS DE MOVIMENTAÇÃO HORIZONTAL (x) PARA AS EXTREMIDADES DO FIO; 3) MAGNETO; 4) BASE PARA MAGNETO; 5) FIO; 6) EXTREMIDADE FIXA DO FIO; 7) MASSA CONHECIDA NA EXTREMIDADE MÓVEL DO FIO PARA APLICAÇÃO DE UMA TENSÃO CONSTANTE; 8) MESA DE MEDIÇÃO POR COORDENADA, RESPONSÁVEL PELA FIDUCIALIZAÇÃO DO FIO; 9) PONTA DE PROVA DA MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADA; E 10) SENSORES DE MOVIMENTAÇÃO VERTICAL E HORIZONTAL. [FONTE: AUTOR].....	45
FIGURA 22: MEDIDAS DE CENTRO MAGNÉTICO E ALINHAMENTO DE QUADRUPOLO NO PSI: (A) MEDIDA DE CENTRO SEM PLL; (B) MEDIDA DE CENTRO COM PLL; (C) MEDIDA DE YAW COM E SEM PLL. [FONTE: (WOUTERS, CALVI, ET AL., 2012)].....	57
FIGURA 23: SEQUÊNCIA DE MEDIDAS MOSTRANDO OS PONTOS DA VARREDURA DO FIO ONDE AS MEDIDAS DE AMPLITUDE SÃO TOMADAS, ASSIM COMO O CENTRO MAGNÉTICO CALCULADO EM COMPARAÇÃO COM O CENTRO GEOMÉTRICO DO MAGNETO. [FONTE: (VRANKOVIC, WOUTERS, ET AL., 2014)]	59
FIGURA 24: MONTAGEM PRELIMINAR PARA AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DO FIO VIBRANTE NO LNLS, ONDE DESTACAM-SE: A BASE INERCIAL DE CONCRETO; O QUADRUPOLO; O SUPORTE CASEIRO PARA MOVIMENTAÇÃO DO QUADRUPOLO; ESTÁGIOS DE MOVIMENTAÇÃO BIDIMENSIONAIS PARA OS SUPORTES DAS EXTREMIDADES FIXA E MÓVEL DO FIO DE TUNGSTÊNIO, E PARA OS SENSORES ÓPTICOS H21A1; E MASSA. [FONTE: GRUPO IMA - LNLS]	61
FIGURA 25: CONTROLADOR E DRIVERS DMC4183 DA GALIL MOTION E FONTE DE ALIMENTAÇÃO 24 VDC DA SIEMENS. [FONTE: GRUPO IMA - LNLS]	62
FIGURA 26: GRÁFICO DE AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO (mV) EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO (mm) DO ESTÁGIO DE TRANSLAÇÃO PARA VARREDURA HORIZONTAL (A) E VERTICAL (B), COM CENTRO MAGNÉTICO DETERMINADO A PARTIR DA INTERSEÇÃO DAS LINHAS DE AJUSTE LINEAR ANTES E APÓS O PONTO DE MÍNIMO, EM QUE OCORRE A INVERSÃO DO SENTIDO DO CAMPO MAGNÉTICO. [FONTE: GIOVANA ZANONI, IMA - LNLS.]	63

FIGURA 27: ESTÁGIOS LINEARES DE PRECISÃO, COM ACURÁCIA ESPECIFICADA EM $\pm 0.1 \mu\text{m}$, PARA POSICIONAMENTO DO FIO: 5103.A20-40-XE PARA MOVIMENTAÇÃO VERTICAL E 5101.20-XE PARA HORIZONTAL. [FONTE: AUTOR]	64
FIGURA 28: POWERPACK PARA CONTROLE DOS ESTÁGIOS LINEARES. EM (A) A CAIXA ESTÁ FECHADA, EM MODO DE OPERAÇÃO, ENQUANTO QUE EM (B) A CAIXA ENCONTRA-SE ABERTA, PERMITINDO A VISUALIZAÇÃO DO CONTROLADOR GALIL, E DOS DRIVERS PHYTRON ZMX+. [FONTE: AUTOR]	65
FIGURA 29: CONFIGURAÇÕES EXPERIMENTAIS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS ESTÁGIOS LINEARES: (A) CARACTERIZAÇÃO DOS ESTÁGIOS HORIZONTAIS, O ESTÁGIO MANUAL É UTILIZADO PARA AJUSTE DA POSIÇÃO DO SENSOR; (B) CARACTERIZAÇÃO DE ESQUADRO ENTRE OS MOVIMENTOS HORIZONTAIS E VERTICAIS, COM USO DO PENTAPRISMA; (C) CARACTERIZAÇÃO DOS ESTÁGIOS VERTICAIS, COM O LASER NA POSIÇÃO VERTICAL PARA GARANTIR A MEDIÇÃO SEM ELEMENTOS INTERMEDIÁRIOS. [FONTE: AUTOR]	66
FIGURA 30: PROCEDIMENTO DE AJUSTE DE PARALELISMO ENTRE OS ESTÁGIOS HORIZONTAIS NA MMC. OS ESTÁGIOS ESTÃO FIXADOS À CHAPA DE ADAPTAÇÃO À MESA DE GRANITO DA MMC. [FONTE: AUTOR]	67
FIGURA 31: MONTAGEM DE UMA DAS EXTREMIDADES DO SISTEMA DO FIO VIBRANTE APÓS A REFORMULAÇÃO. SÃO VISÍVEIS: O FIO, COM SEU SISTEMA DE FIXAÇÃO E O GANCHO ACOPLADO À EXTREMIDADE FIXA; A PRIMEIRA VERSÃO DO PONTO DE APOIO DO FIO QUE DEFINE UMA DAS REFERÊNCIAS MECÂNICAS (NÓ) DO FIO; E AO FUNDO JÁ O CONJUNTO DESENVOLVIDO PARA DETECÇÃO DE VIBRAÇÃO DO FIO COM O FOTODIODO S5870. [FONTE: AUTOR]	68
FIGURA 32: (A) NOVA VERSÃO DE APOIO PARA DEFINIÇÃO DOS NÓS DO FIO, CONSTRUÍDO COM CERÂMICA E QUARTZO, PARA GARANTIR O ISOLAMENTO ELÉTRICO. (B) MONTAGEM DA EXTREMIDADE DO SISTEMA DO FIO VIBRANTE EM QUE FICA A MASSA DE TRAÇÃO DO FIO. SÃO VISTOS: O NOVO APOIO PARA O FIO, O QUADRUPOLO EM ANÁLISE (MODELO UTILIZADO NO ACELERADOR ATUAL DO LNLS, O UVX), OS ESTÁGIOS LINEARES VERTICAL E HORIZONTAL, O AMPLIFICADOR LOCK-IN, A MASSA E O SISTEMA DE ROLDANA, QUE VISA A REDUZIR AO MÁXIMO UM POSSÍVEL DESGASTE POR ATRITO EM FUNÇÃO DA MOVIMENTAÇÃO LONGITUDINAL DO FIO DURANTE A MOVIMENTAÇÃO DOS ESTÁGIOS LINEARES. [FONTE: AUTOR]	69
FIGURA 33: EXTREMIDADE DO SISTEMA DO FIO VIBRANTE, COM DESTAQUE PARA O PONTO DE ATERRAMENTO (À DIREITA NA IMAGEM), PARA O NÓ EM AÇO INOX E PARA A LIGAÇÃO ELÉTRICA DO FIO FEITA VIA O PRÓPRIO SUPORTE (NA PARTE SUPERIOR DA IMAGEM). [FONTE: AUTOR]	70
FIGURA 34: SUPORTE DO DETECTOR DE VIBRAÇÃO V2, COM AJUSTE DOS SEIS GRAUS DE LIBERDADE, DESENVOLVIDO A PARTIR DE OBLONGOS, NIVELADORES COM ACOPLAMENTO CINEMÁTICO, E ESTÁGIO DE TRANSLAÇÃO NEWPORT M-UMR8.25. [FONTE: AUTOR]	71
FIGURA 35: SISTEMA DE FIO VIBRANTE EM SUA CONFIGURAÇÃO FINAL SOBRE A MMC, ISOLADO PELA CAIXA DE PROTEÇÃO EM ACRÍLICO. [FONTE: AUTOR]	72
FIGURA 36: MONTAGEM DE DOIS SENSORES H21A1 ORTOGONALMENTE POSICIONADOS. [FONTE: AUTOR]	73
FIGURA 37: CURVAS DE RESPOSTA DE SENSORES DE VIBRAÇÃO: (A) A PARTIR DE FOTOTRANSISTORES H21A1 [FONTE: (TEMNYKH, 1997)]; (B) SENSOR DESENVOLVIDO NO LCLS [FONTE: (LEVASHOV E WOLF, 2006)]. AMBAS AS FIGURAS INDICAM O PONTO DE OPERAÇÃO IDEAL, NO CENTRO DA REGIÃO ONDE A RESPOSTA É APROXIMADAMENTE LINEAR.	73

FIGURA 38: SISTEMA DE DETECÇÃO COM FOTOTRANSISTORES H21A1: (A) ALOJAMENTO DESENVOLVIDO PARA ABRIGAR OS EMISSORES E RECEPTORES; (B) SENSOR COLOCADO SOBRE MESAS TRANSLACIONAIS VERTICAL E HORIZONTAL NO SISTEMA DO FIO VIBRANTE. [FONTE: AUTOR].....	75
FIGURA 39: CIRCUITO UTILIZADO PARA O SENSOR COM FOTOTRANSISTORES H21A1, SENDO NECESSÁRIOS UM POR CANAL. [FONTE: AUTOR].....	75
FIGURA 40: (A) DETECTOR DE VIBRAÇÃO UTILIZADO NO PSI, O FIO PODE SER VISTO PASSANDO PELO ORIFÍCIO CENTRAL; (B) PROTÓTIPO DO DETECTOR PARA UM DOS PLANOS. [FONTE: AUTOR, COM CORTESIA DO GRUPO DE MAGNETOS DO PSI].....	76
FIGURA 41: (A) FOTODIODO HAMAMATSU DE QUATRO QUADRANTES UTILIZADO EM TESTES CONCEITUAIS; (B) FOTODIODO DE DOIS QUADRANTES HAMAMATSU S5870 UTILIZADO NA VERSÃO OFICIAL DOS SENSORES DE VIBRAÇÃO DA BANCADA DO FIO VIBRANTE DO LNLS. [FONTE: AUTOR]	77
FIGURA 42: PRIMEIRA VERSÃO (V1) DO DETECTOR DE VIBRAÇÃO COM FOTODIODO S5870: (A) CAIXA ABERTA, MOSTRANDO O LED DE 5 MM COMO FONTE, O DIFUSOR (LÂMINA DE VIDRO DESPOLIDO), O FOTODIODO E O CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO; (B) PAR CONJUGADO DE SENSORES MONTADOS SOBRE ESTÁGIOS HUBER. O TUBO SALIENTE NO FURO DE PASSAGEM DO FIO FOI ADICIONADO PARA DIMINUIR RUÍDOS PROVENIENTES DA ILUMINAÇÃO EXTERNA. [FONTE: AUTOR].....	78
FIGURA 43: CIRCUITOS UTILIZADOS PARA O DETECTOR COM FOTODIODOS S5870: (A) ESTABILIZAÇÃO DE ALIMENTAÇÃO SIMÉTRICA +/- 12V; (B) AJUSTE DE INTENSIDADE DOS LED; E (C) POLARIZAÇÃO DOS FOTODIODOS. [FONTE: AUTOR].....	78
FIGURA 44: MONTAGEM ADAPTADA PARA CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR V1. [FONTE: AUTOR]	79
FIGURA 45: (A) FONTES DE LUZ PARA OTIMIZAÇÃO DO DETECTOR COM O FOTODIODO S5870. DA ESQUERDA PARA A DIREITA: LED BRANCO DE 5 MM, LED BRANCO DE 10 MM E MATRIZ DE LEDS; (B) MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA DESENVOLVIMENTO DE FONTE DE LUZ PARA O SENSOR COM FOTODIODO S5870. [FONTE: AUTOR]	80
FIGURA 46: SEGUNDA VERSÃO (V2) DO DETECTOR DE VIBRAÇÃO COM FOTODIODO S5870. [FONTE: AUTOR].....	81
FIGURA 47: CIRCUITO COM MODULAÇÃO DA FONTE DE LUZ. [FONTE: AUTOR].....	83
FIGURA 48: DETECTORES DE VIBRAÇÃO DO FIO NA VERSÃO V2, COM FONTES DE LUZ DISTANTES. [FONTE: AUTOR].	84
FIGURA 49: MONTAGEM PARA CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR V2, COM DESTAQUE PARA: O APALPADOR HEIDENHAIN MT2571; O DISPLAY HEIDENHAIN ND780; O DETECTOR ANODIZADO; A BASE MAGNÉTICA DE SUSTENTAÇÃO DO APALPADOR; A MASSA E A ROLDANA, QUE MANTÊM O FIO ESTICADO; E OS ESTÁGIOS LINEARES. [FONTE: AUTOR]	85
FIGURA 50: AMPLIFICADOR <i>LOCK-IN</i> HF2LI DA ZURICH INSTRUMENTS, UTILIZADO NO PROJETO DO FIO VIBRANTE. [FONTE: ZURICH INSTRUMENTS].....	86
FIGURA 51: TELA DO SOFTWARE <i>ZiCONTROL</i> FORNECIDO PELA ZURICH INSTRUMENTS, UTILIZADO PARA O HF2LI DURANTE O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO. [FONTE: AUTOR].....	87
FIGURA 52: SENSOR ÓPTICO DE POSIÇÃO DO FIO COM DESTAQUE PARA AS ESFERAS DE REFERÊNCIA MECÂNICA, O FIO, O PRÓPRIO SENSOR E UMA ESCALA GRADUADA. (FONTE: ADAPTADO DE (WOLF, 2005))	90
FIGURA 53: (A) MÓDULO DE VISÃO DA MMC MULTISENSOR <i>GLOBAL PERFORMANCE SILVER EDITION 12.30.10</i> DA <i>BROWN & SHARPE HEXAGON METROLOGY</i> ; (B) IMAGEM DO FIO NO SOFTWARE PC-DMIS. [FONTE: AUTOR] ..	93

FIGURA 54: MEDIDA DA CATENÁRIA COM O SISTEMA DE VISÃO DA MMC NO SISTEMA DO FIO VIBRANTE: (A) VISTA EM PERSPECTIVA, COM ANTEPARO EM ISOPOR; (B) VISTA LONGITUDINAL DO SISTEMA, COM ANTEPARO DE NYLON COBERTO COM FOLHA DE PAPEL. [FONTE: AUTOR].....	94
FIGURA 55: ESTUDO DE ANTEPAROS PARA MEDIDAS DE SAPATAS DOS MAGNETOS COM O SISTEMA DE VISÃO DA MMC: (A) ISOPOR, MANTIDO POR PRESSÃO; (B) PVC, TRAVADO POR PARAFUSOS LATERAIS; E (C) PAPEL SOBRE ACRÍLICO ENCAIXADO EM CANAL USINADO NA SAPATA. [FONTE: AUTOR].....	95
FIGURA 56: IMAGEM DA DETECÇÃO DE BORDAS DAS SAPATAS METÁLICAS DOS MAGNETOS NO SOFTWARE PC-DMIS. EM (A), A DETECÇÃO É FEITA DA DIREITA PARA A ESQUERDA, ENQUANTO QUE EM (B), O OPOSTO. [FONTE: AUTOR].....	96
FIGURA 57: IMAGEM DO FIO NO SOFTWARE PC-DMIS, FORA DE FOCO (A) E EM FOCO (B). [FONTE: AUTOR].....	96
FIGURA 58: MEDIDA DA POSIÇÃO VERTICAL DO FIO EM PROCESSO DE FIDUCIALIZAÇÃO, COM ANTEPARO EM "L" PARA AS MEDIDAS HORIZONTAIS E VERTICAIS. [FONTE: AUTOR].....	97
FIGURA 59: TENTATIVAS DE CALIBRAÇÃO DA CÂMERA COM A ESFERA DE CALIBRAÇÃO DA MMC, ONDE SÃO VISTOS ANTEPAROS ESCUROS FRONTAIS E TRASEIROS NA BUSCA DE SE OBTER UMA MELHOR CONDIÇÃO DE ILUMINAÇÃO E CONTRASTE PARA A DETECÇÃO DAS BORDAS. [FONTE: AUTOR]	98
FIGURA 60: ABORDAGENS PARA MEDIDA DE EXATIDÃO DA MMC COM O SISTEMA DE VISÃO: (A) AFERIÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS PADRÕES ALINHADOS; E (B) MEDIDA INTERFEROMÉTRICA COM INTERFERÔMETRO API XD6. [FONTE: AUTOR].....	99
FIGURA 61: ALTERNATIVA DE PARA MEDIDA DE EXATIDÃO DA MMC COM A CÂMERA. EM (A) É VISTA A CÂMERA SOBRE O ALVO COLADO AO CORPO DO SENSOR E EM (B) A IMAGEM DO ALVO NO SOFTWARE PCDMIS. [FONTE: AUTOR]	100
FIGURA 62: ESTUDOS DE DECAIMENTO DO SISTEMA DO FIO VIBRANTE EM MONTAGEM PRELIMINAR: (A) SINAL EXTRAÍDO DO OSCILOSCÓPIO; (B) FFT COM A PRESENÇA DOS DIVERSOS HARMÔNICOS. [FONTE: AUTOR].....	102
FIGURA 63: ERRO LINEAR DOS QUATRO ESTÁGIOS MECÂNICOS, SEGUINDO O PADRÃO DE TRÊS VARREDURAS COMPLETAS COM IDA E VOLTA. [FONTE: AUTOR]	104
FIGURA 64: MODELAGEM GEOMÉTRICA DO PROBLEMA DE DESALINHAMENTO BÁSICO ENTRE OS ESTÁGIOS DE TRANSLAÇÃO. [FONTE: AUTOR].....	109
FIGURA 65: (A) VARIAÇÃO ANGULAR DO FIO EM RELAÇÃO AO EIXO Z EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE DESALINHAMENTO A; (B) VARIAÇÃO NO COMPRIMENTO DO FIO EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE DESALINHAMENTO A. [FONTE: AUTOR]..	109
FIGURA 66: MODELAGEM GEOMÉTRICA DO PROBLEMA DE DESALINHAMENTO DE SEGUNDA ORDEM ENTRE OS ESTÁGIOS DE TRANSLAÇÃO. [FONTE: AUTOR]	110
FIGURA 67: VARIAÇÃO ANGULAR DO FIO EM RELAÇÃO AO EIXO Z EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE DESALINHAMENTO B. [FONTE: AUTOR].....	110
FIGURA 68: VARIAÇÃO NO COMPRIMENTO DO FIO EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE DESALINHAMENTO B. [FONTE: AUTOR]	111
FIGURA 69: ERRO DA TRANSLACIONAL DO FIO NA POSIÇÃO DO MAGNETO (300M DE UM DOS NÓS) PARA θ_{YZ} DA FIGURA 67. [FONTE: AUTOR]	112
FIGURA 70: CURVAS DE CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES DE VIBRAÇÃO COM FOTOTRANSISTORES H21A1. EM (A) UMA VARREDURA DO ESTÁGIO DE TRANSLAÇÃO HORIZONTAL, COM PEQUENAS VARIAÇÕES DE SINAL NO SENSOR VERTICAL E EM (B), O COMPLEMENTO. [FONTE: AUTOR]	113

FIGURA 71: SINAIS DE SAÍDA DOS FOTOTRANSISTORES H21A1 EM UM OSCILOSCÓPIO AGILENT DSQ-X-3014: (A) COM A UNIDADE DE CONTROLE DE MOTORES DESLIGADA; (B) COM A UNIDADE DE CONTROLE DE MOTORES LIGADA, ONDE SÃO VISTOS PICOS COM AMPLITUDE SUPERIOR A $2 V_{PP}$ NA FAIXA DE 8 MHz. [FONTE: AUTOR] .	114
FIGURA 72: CURVAS DE CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR A PARTIR DE VARREDURAS AUTOMATIZADAS COM O ESTÁGIO LINEAR DA HUBER PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS ENTRE FIO E O FOTODIODO. [FONTE: AUTOR]	115
FIGURA 73: CONJUNTO DE IMAGENS QUE MOSTRAM AS SIMULAÇÕES PARA O DETECTOR S5870. [FONTE: AUTOR]	116
FIGURA 74: VARREDURAS TRANSLACIONAIS DE UM FIO COM BORDAS BEM DEFINIDAS E FONTE GAUSSIANA. [FONTE: AUTOR]	117
FIGURA 75: IMAGENS NA CCD PARA OS DIFERENTES DIFUSORES TESTADOS COM A FONTE LED DE 10 MM. [FONTE: AUTOR]	118
FIGURA 76: IMAGENS NA CCD PARA OS DIFERENTES DIFUSORES TESTADOS COM A FONTE LED DE 10 MM, AGORA PASSANDO PELO FIO. [FONTE: AUTOR]	118
FIGURA 77: PADRÃO DE ILUMINAÇÃO NA CCD COM LED DE 10 MM E NENHUM DIFUSOR, VARIANDO-SE O DIÂMETRO DA FONTE: (A) 10 MM; (B) 3 MM; E (C) 0.01 MM. [FONTE: AUTOR]	118
FIGURA 78: PADRÃO DE ILUMINAÇÃO NA CCD, COM LED DE 10 MM E DIFUSOR DE PAPEL MANTEIGA, E COM A VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DA FONTE. DA ESQUERDA PARA A DIREITA: 10 MM, 3 MM E 0.01MM. [FONTE: AUTOR]	119
FIGURA 79: IMAGENS EM ESCALA DE CINZA COM SEUS CENTROS DE MASSA, SEUS PERFIS DE LINHA E COLUNA NO PONTO DO CENTRO DE MASSA, SUAS ENTROPIAS E SEUS HISTOGRAMAS. (A) SEM DIFUSOR E ABERTURA DE 10 MM; (B) SEM DIFUSOR E 0.01 MM; (C) DIFUSOR DE PAPEL MANTEIGA E 10 MM; E (D) DIFUSOR DE PAPEL MANTEIGA E 0.01 MM. [FONTE: AUTOR]	119
FIGURA 80: SIMULAÇÃO DE ALINHAMENTO COM O SENSOR S5870 SIMULADO: (A) CURVA DE CARACTERIZAÇÃO SIMULADA; (B) SIMULAÇÃO DE MEDIDA DE ALINHAMENTO MAGNÉTICO. [FONTE: AUTOR]	121
FIGURA 81: SIMULAÇÃO DE ALINHAMENTO COM SENSOR H21A1: (A) CURVA DE CARACTERIZAÇÃO REAL; (B) SIMULAÇÃO DE MEDIDA DE ALINHAMENTO MAGNÉTICO. [FONTE: AUTOR]	121
FIGURA 82: SIMULAÇÃO DE ALINHAMENTO COM A PRIMEIRA VERSÃO DO DETECTOR COM S5870: (A) CURVA DE CARACTERIZAÇÃO REAL; (B) SIMULAÇÃO DE MEDIDA DE ALINHAMENTO MAGNÉTICO. [FONTE: AUTOR]	122
FIGURA 83: CURVAS DE CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES DO DETECTOR V2 SEM MODULAÇÃO NA ILUMINAÇÃO, COM (I) E SEM (II) LUZ AMBIENTE: (A) VARREDURA PARA UM DOS SENSORES, BATIZADO DE SENSOR 1; (B) VARREDURA PARA O SENSOR COMPLEMENTAR, SENSOR 2. [FONTE: AUTOR]	123
FIGURA 84: CURVAS DE CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES DO DETECTOR V2 COM MODULAÇÃO DA ILUMINAÇÃO. AS CURVAS (A) SÃO REFERENTES À VARREDURA PARA O SENSOR 1 E AS CURVAS (B), PARA O SENSOR 2. [FONTE: AUTOR]	123
FIGURA 85: CIRCUITO DE DETECÇÃO DE BALANCEAMENTO DE LUZ. [FONTE: HAMAMATSU]	124
FIGURA 86: ESQUEMA DE LIGAÇÃO FINAL DO LOCK-IN PARA ALIMENTAÇÃO E DETECÇÃO DO SISTEMA DO FIO VIBRANTE. [FONTE: AUTOR]	125
FIGURA 87: NÍVEIS DAS ENTRADAS AUXILIARES NO PONTO INICIAL E FINAL DE UMA VARREDURA DE PITCH. [FONTE: AUTOR]	126
FIGURA 88: INTERFACE DO LABVIEW: (A) A CAIXA DE PROPRIEDADES DO FIO; (B) CAIXA DE INTERFACE COM O CONTROLADOR DE MOTOR; E (C) CAIXA DE INTERFACE COM O LOCK-IN. [FONTE: AUTOR]	128

FIGURA 89: MÓDULO DEDICADO À LEITURA E AO CONTROLE DO LOCK-IN NO DIAGRAMA DE BLOCOS DO SOFTWARE DE CONTROLE. [FONTE: AUTOR]	128
FIGURA 90: TELA DO SOFTWARE <i>ZiCONTROL</i> DA ZURICH INSTRUMENTS, COM VARREDURA EM FREQUÊNCIA PARA DETERMINAÇÃO DA RESSONÂNCIA DO SEGUNDO HARMÔNICO, EM TORNO DE 275 Hz. [FONTE: AUTOR]	130
FIGURA 91: VARREDURAS EM FREQUÊNCIA PARA DETERMINAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA DO QUARTO HARMÔNICO, COM ALTO ÂNGULO PITCH EM (A), E ALTO ÂNGULO YAW EM (B). [FONTE: AUTOR].....	130
FIGURA 92: INTERFACE DO LABVIEW MOSTRANDO OS DOIS CANAIS DE UMA MEDIDA MAGNÉTICA COM O DETECTOR V1 E O PLL INATIVO. [FONTE: AUTOR]	131
FIGURA 93: IMAGENS DO SISTEMA DE VISÃO DA MMC DE UM DOS NÓS COM O FIO ESTICADO. (A) E (B) MOSTRAM A VISTA LATERAL DO SISTEMA DO NÓ, COM O FIO NA HORIZONTAL NA IMAGEM, ANTES E DEPOIS, RESPECTIVAMENTE, DO RETRABALHO DA PEÇA. (A IMAGEM APARECE INVERTIDA EM FUNÇÃO DA INDEXAÇÃO DA CÂMERA.) (C) E (D), POR SUA VEZ, MOSTRAM A VISTA SUPERIOR, COM O FIO NA VERTICAL NA IMAGEM. [FONTE: AUTOR].....	133
FIGURA 94: INTERFACE DO LABVIEW MOSTRANDO UMA VARREDURA MECÂNICA VERTICAL, COM SINAL (A) E FASE (B), E TAMBÉM O RESULTADO DE UM MEDIDA DE ALINHAMENTO COMPLETA (C). [FONTE: AUTOR].....	134
FIGURA 95: INTERFACE DO LABVIEW MOSTRANDO VARREDURA MECÂNICA DE PITCH. [FONTE: AUTOR].....	135
FIGURA 96: MEDIDAS DA CATENÁRIA FORMADA PELO FIO, COM AJUSTE POLINOMIAL DE SEGUNDA ORDEM. [FONTE: AUTOR].....	136
FIGURA 97: AVALIAÇÃO DO ERRO NA MEDIÇÃO DO EIXO MAGNÉTICO DO ÍMÃ EM FUNÇÃO PERFIL PARABÓLICO DO FIO. [FONTE: AUTOR].....	138
FIGURA 98: CONJUNTO DE CALIBRAÇÃO DA MMC: (A) PONTA-ESTRELA E ESFERA DE CALIBRAÇÃO; (B) ANEL DE REFERÊNCIA E PADRÃO ÓPTICO; (C) BLOCO CERÂMICO PADRÃO SOBRE ESTRUTURA METÁLICA, E ANTEPARO ESCURO PARA PERMITIR A MEDIÇÃO DA BORDA SUPERIOR. [FONTE: AUTOR].....	140
FIGURA 99: IMAGENS DO PADRÃO ÓPTICO PARA CALIBRAÇÃO DE CAMPO DE VISÃO, ROTAÇÃO E TAMANHO DE PIXEL NO SISTEMA DE VISÃO DA MMC NO SOFTWARE PC-DMIS. [FONTE: RODRIGO LEÃO, PRO - LNLS].....	140
FIGURA 100: DISTRIBUIÇÕES DOS VALORES ENCONTRADOS PARA A ORIGEM E PARA A ORIENTAÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS CRIADO A PARTIR DAS REFERÊNCIAS DO MAGNETO, RESPECTIVAMENTE: X, Y, Z, PITCH, YAW E ROLL. [FONTE: RODRIGO LEÃO, PRO - LNLS].....	141
FIGURA 101: DISTRIBUIÇÕES DAS COORDENADAS X, Y E Z DO FIO NA ENTRADA (DE (A) A (C)) E NA SAÍDA (DE (D) A (F)) DO MAGNETO. [FONTE: RODRIGO LEÃO, PRO - LNLS].....	142

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: PARÂMETROS DO ANEL DE ARMAZENAMENTO DO PROJETO SIRIUS. [FONTE: ADAPTADO DE (LNLS, 2014)]	2
TABELA 2 – CAMPOS MULTIPOLARES DOS TRÊS PRINCIPAIS TIPOS DE MAGNETOS VERTICAIS. [FONTE: (WIEDEMANN, 2007)]	14
TABELA 3: ESPECIFICAÇÕES RMS DE TOLERÂNCIAS DE DESALINHAMENTO TRANSVERSAL (CENTRALIZAÇÃO) E DE ROTAÇÃO PARA OS MAGNETOS DO ANEL ARMAZENADOR DO SIRIUS, ASSUMINDO DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA TRUNCADA EM $+1\sigma$. [FONTE: (LNLS, 2014)]	15
TABELA 4: FAMÍLIAS DE QUADRUPOLOS DO ANEL ARMAZENADOR DO SIRIUS, COM INDICAÇÕES DAS FORÇAS E COMPRIMENTOS. [FONTE: FAC - LNLS]	16
TABELA 5: INCERTEZAS DO PROCEDIMENTO DE FIDUCIALIZAÇÃO DOS QUADRUPOLOS DO LCLS, COM O TOTAL OBTIDO A PARTIR DE SOMA EM QUADRATURA DAS 4 COMPONENTES, A SABER: CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE POSIÇÃO DO FIO; MEDIÇÃO DAS ESFERAS DE REFERÊNCIA MECÂNICA NO SENSOR DE POSIÇÃO; POSICIONAMENTO DO QUADRUPOLO POR MEIO DA TÉCNICA DO FIO VIBRANTE; E MEDIÇÃO DAS REFERÊNCIAS MECÂNICAS DO QUADRUPOLO. [FONTE: (ANDERSON, CABAN, <i>ET AL.</i> , 2010)].....	53
TABELA 6: REPETIBILIDADES (1σ) E EXATIDÃO DO ERRO LINEAR. [FONTE: AUTOR].....	105
TABELA 7: REPETIBILIDADES (1σ) E ERRO MÁXIMO DA RETITUDE TIPO 1. [FONTE: AUTOR].....	105
TABELA 8: REPETIBILIDADES (1σ) E ERRO MÁXIMO DA RETITUDE TIPO 2. [FONTE: AUTOR].....	105
TABELA 9: REPETIBILIDADES (1σ) E ERRO MÁXIMO DE <i>pitch</i> . [FONTE: AUTOR].....	106
TABELA 10: REPETIBILIDADES (1σ) E ERRO MÁXIMO DE <i>roll</i> . [FONTE: AUTOR]	106
TABELA 11: REPETIBILIDADES (1σ) E ERRO MÁXIMO DE <i>yaw</i> . [FONTE: AUTOR].....	107
TABELA 12: INCERTEZA NO REPOSICIONAMENTO DO FIO SOBRE O EIXO MAGNÉTICO DO ÍMÃ APÓS O PROCEDIMENTO DE ALINHAMENTO MAGNÉTICO. [FONTE: AUTOR]	107
TABELA 13: ESQUADRO ENTRE ESTÁGIO HORIZONTAL E VERTICAL DOS CONJUNTOS MECÂNICOS, EXIBIDO EM MICRORRADIANS E GRAUS. [FONTE: AUTOR].....	108
TABELA 14: DESALINHAMENTO DO TIPO <i>roll</i> E <i>yaw</i> ENTRE OS ESTÁGIOS LINEARES. [FONTE: AUTOR]	113
TABELA 15: DESVIO PADRÃO DE MEDIDAS MAGNÉTICAS. [FONTE: AUTOR]	135
TABELA 16: INCERTEZA MÁXIMA ASSOCIADA AO PERFIL PARABÓLICO DO FIO NA DETERMINAÇÃO DO EIXO MAGNÉTICO DO QUADRUPOLO AVALIADO. [FONTE: AUTOR]	139
TABELA 17: DESVIO PADRÃO DA REPETIBILIDADE DA CRIAÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS REFERENCIADO NO MAGNETO. [FONTE: RODRIGO LEÃO, PRO - LNLS]	142
TABELA 18: DESVIO PADRÃO DA REPETIBILIDADE DE MEDIÇÃO DAS COORDENADAS x , y E z DO FIO, NA ENTRADA E NA SAÍDA DO QUADRUPOLO.	143
TABELA 19: DESVIO PADRÃO DA MEDIÇÃO DOS DIÂMETROS DO FIO PELA VISTA SUPERIOR E LATERAL, PARA A ENTRADA E PARA A SAÍDA DO FIO. [FONTE: RODRIGO LEÃO, PRO - LNLS]	144
TABELA 20: INCERTEZAS ASSOCIADAS À INEXATIDÃO DA MMC NA MEDIÇÃO DAS COORDENADAS DO FIO. [FONTE: RODRIGO LEÃO, PRO - LNLS]	145
TABELA 21: INCERTEZA COMBINADA DA REPETIBILIDADE DO PROCEDIMENTO E DA INEXATIDÃO DA MMC NA MEDIDA DAS COORDENADAS x , y E z DO FIO, NA ENTRADA E NA SAÍDA DO QUADRUPOLO. [FONTE: AUTOR].....	145

TABELA 22: INCERTEZA METROLÓGICA TOTAL NA DETERMINAÇÃO DO CENTRO E DO ALINHAMENTO DO EIXO MAGNÉTICO DO QUADRUPOLO. [FONTE: AUTOR]	146
TABELA 23: INCERTEZA TOTAL NA DETERMINAÇÃO DO CENTRO E DO ALINHAMENTO DO EIXO MAGNÉTICO DO QUADRUPOLO. [FONTE: AUTOR].....	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μ	micro
A	ampere
A/D	Analógico-digital
AC	Sinal alternado (do inglês <i>Alternate Current</i>)
AFM	Microscópio de Força Atômica (do inglês <i>Atomic Force Microscope</i>)
AM	Amplitude modulada
API	<i>Automated Precision Inc.</i>
BBA	Alinhamento Baseado em Feixe (do inglês <i>Beam Based Alignment</i>)
BNL	<i>Brookhaven National Laboratory</i>
CESR	<i>Cornell Electron-positron Storage Ring</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CNPEM	Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais
dB	decibel
DC	Sinal contínuo (do inglês <i>Direct Current</i>)
DSP	Processamento Digital de Sinal (do inglês <i>Digital Signal Processor</i>)
eV	eletron-volt
FAC	Grupo de Física de Aceleradores do LNLS
FEL	Laser de Elétrons Livres (do inglês <i>Free Electron Laser</i>)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (do inglês <i>Fast Fourier Transform</i>)
G	gauss
HERA	<i>Hadron Elektron Ring Anlage</i>
Hz	hertz
I/O	Elemento de Entrada e Saída de Dados (do inglês <i>Input/Output</i>)
IMA	Grupo de Ímãs do LNLS
k	quilo
LCLS	<i>Linac Coherent Light Source</i>
LED	Diodo emissor de luz (do inglês <i>Light Emitting Diode</i>)
LNLS	Laboratório Nacional de Luz Síncrotron
m	metro
m	mili
M	mega
MMC	Máquina de Medição por Coordenada
MPE	Máximo Erro Permitido
n	nano
N	newton
NI	<i>National Instruments</i>
NSLS	<i>National Synchrotron Light Source</i>

p	pico
PD	Detector de fase (do inglês <i>Phase Detector</i>)
PI	Controlador Proporcional-Integral
PLL	Elo Travado em Fase (do inglês <i>Phase-Locked-Loop</i>)
PSD	Detecção Sensível a Fase (do inglês <i>Phase-Sensitive Detection</i>)
PSD	Sensores Sensíveis a Posição (do inglês <i>Position Sensitive Detector</i>)
PSI	<i>Paul Scherrer Institute</i>
rad	radiano
RC	Resistor-Capacitor
RMS	Raiz do Valor Quadrático Médio (do inglês <i>Root Mean Square</i>)
s	segundo
S/s	Amostras por segundo (do inglês <i>Samples per second</i>)
SIL	Grupo de Suporte à Instrumentação das Linhas de Luz do LNLS
SLAC	<i>Stanford Linear Accelerator Center</i>
SLS	<i>Swiss Light Source</i>
T	tesla
TCP	Protocolo de Controle de Transmissão (do inglês <i>Transmission Control Protocol</i>)
TPS	<i>Taiwan Photon Source</i>
TTL	Lógica Transistor-Transistor (do inglês <i>Transistor-Transistor Logic</i>)
UDP	Protocolo de Datagrama de Usuário (do inglês <i>User Datagram Protocol</i>)
V	volt
W	watt
ZI	<i>Zurich Instruments AG.</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

q	Carga elétrica	$[\]!$	Operador fatorial
F_L	Força de Lorentz	e	Número de Euler
E	Vetor campo elétrico	$\nabla[\]$	Operador divergente
v	Vetor velocidade	A_n	Coeficientes da expansão de Taylor
B	Vetor campo magnético	κ_x	Curvatura horizontal do dipolo
\times	Operador de produto vetorial	k	Força quadrupolar
\perp	Símbolo de perpendicularidade	m	Força sextupolar
\approx	Valor aproximado	ε	Erro de alinhamento translacional
v	Velocidade da partícula	δ	Erro de alinhamento angular
c	Velocidade da luz	$\sin^{-1}[\]$	Função inversa do seno
e	Unidade básica de carga	L	Comprimento do fio
m	Massa de repouso da partícula	A	Área da seção transversal de um fio
κ	Vetor de curvatura local	v_d	Vetor velocidade de deriva de uma partícula em um fio
γ	Fator de Lorentz	n	Número de partículas por unidade de volume
ρ	Raio de deflexão da partícula	ds	Vetor diferencial de comprimento
E	Energia da partícula	$\int_a^b [\]$	Integral definida entre os pontos a e b
β	Razão v/c	$\oint [\]$	Integral fechada
θ, α	Ângulo de deflexão	v	Velocidade de propagação de uma onda em uma corda
l_m	Comprimento de arco	t	Tempo
I	Corrente elétrica	T	Tensão em uma corda
r	Distância entre a partícula e o eixo do elemento focalizador	μ	Densidade linear em uma corda
l, L	Comprimento do magneto	$\sin[\]$	Função seno
B_φ	Campo magnético azimutal	A	Amplitude de uma onda
G	Gradiente de campo magnético	λ	Comprimento de onda
$d[\]$	Operador diferencial	τ	Período
V	Potencial escalar	f	Frequência
x, y, z	Coordenadas cartesianas	k	Número de onda
$\partial[\]$	Operador diferencial parcial	ω	Frequência angular
p	Momento da partícula	ϕ	Constante de fase
p_0	Momento nominal da partícula	$\cos[\]$	Função cosseno
Δp	Diferença de momento	A_n, B_n	Coeficientes da expansão de Fourier
$\Delta[\]$	Operador de Laplace	ω_0	Frequência natural de oscilação
r, φ, z	Coordenadas cilíndricas	b	Fator de amortecimento
R_b	Rigidez do feixe	F_{ext}	Força externa
$\sum_n [\]$	Somatória em n	m	Massa
Q	Fator de qualidade	B_x	Componente horizontal de campo

V_{sig}, V_L, V_{PSD}	Amplitudes		
$\theta_{sig}, \theta_{ref}$	Constantes de fase		
$ \cdot $	Função módulo		
φ	Diferença de fase		
T_i	Ganho integral		
K_p	Ganho proporcional		
$\tan^{-1} [\cdot]$	Função inversa da tangente		
F_l	Força por unidade de comprimento		
g	Aceleração da gravidade		
α_l	Coefficiente de atrito por unidade de comprimento		
ds	Elemento infinitesimal de comprimento		
			magnético
		B_{xn}	Componente de campo magnético horizontal da expansão de Fourier
		L_Q	Comprimento de um quadropolo
		A_{det}	Amplitude de vibração na posição do sensor de vibração
		ϕ_{det}	Diferença de fase do sinal de vibração
		θ	Ângulo <i>pitch</i>
		ψ	Ângulo <i>yaw</i>
		φ	Ângulo <i>roll</i>
		x_m	Coordenada horizontal do centro magnético
		y_m	Coordenada vertical do centro magnético
		$pitch_m$	Orientação <i>pitch</i> do eixo magnético
		yaw_m	Orientação <i>yaw</i> do eixo magnético

INTRODUÇÃO

No campo de aceleradores de partículas, o problema de alinhamento dos elementos magnéticos que os compõem é uma questão central (TEMNYKH, 1997). As demandas por precisão têm se tornado cada vez mais exigentes e, por isso, ao longo dos anos uma série de técnicas foi desenvolvida com essa finalidade, dentre as quais está a técnica do fio vibrante por corrente alternada (WOLF, 2005).

Motivação - Projeto Sirius

Encontra-se em desenvolvimento no LNLS (Laboratório Nacional de Luz Síncrotron), o qual faz parte do CNPEM (Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais), o Projeto Sirius: uma fonte de luz síncrotron de terceira geração, composta por um acelerador, um anel armazenador de elétrons e linhas de luz, com papel estratégico para o futuro da ciência e da tecnologia do país. Destinado ao estudo de fronteira de áreas como ciências dos materiais, medicina, biologia e química, ele depende não só do estado da arte da tecnologia em vários segmentos, como também do desenvolvimento de novas tecnologias para que seus parâmetros de projeto sejam alcançados (LIU, RESENDE, *et al.*, 2013). A Tabela 1 apresenta apenas alguns de seus números mais significativos, sendo que a especificação completa pode ser consultada em (LNLS, 2014).

Um dos parâmetros de maior interesse é a emitância, um número que pode ser entendido como o produto da divergência do feixe pela sua área. Quanto menor a emitância, melhor a resolução espacial e temporal dos experimentos, pois a luz produzida pelos elétrons é mais intensa e concentrada em regiões menores, podendo atingir a escala subnanométrica no novo acelerador.

Para que esses limites sejam alcançados, é preciso obedecer a tolerâncias bastante restritas, particularmente na qualidade e no alinhamento dos diversos elementos que compõem a rede magnética do anel. A Figura 1 mostra um superperíodo dessa rede, com seus dipolos, quadrupolos e sextupolos. Enquanto os dipolos são responsáveis por curvar o feixe de elétrons e definir sua órbita, os quadrupolos atuam na sua focalização, e os sextupolos, na correção de efeitos não lineares (WIEDEMANN, 2007). Quadrupolos e sextupolos que fazem parte de um mesmo trecho reto entre dipolos possuem especificações de alinhamento de apenas 40 μm RMS entre eles (LNLS, 2014).

Tabela 1: Parâmetros do anel de armazenamento do Projeto Sirius. [Fonte: adaptado de (LNLS, 2014)]

Parâmetros	Valores
<i>Energia (top up)</i>	3.0 GeV
<i>Corrente</i>	500 mA
<i>Circunferência</i>	518.25 m
<i>Número de trechos retos</i>	20
<i>Comprimento dos trechos retos</i>	10 x 7 m; 10 x 6 m
<i>Frequência de revolução</i>	0.578 MHz
<i>Período de revolução</i>	1.729 μ s
<i>Emitância sem elementos de inserção, horizontal</i>	0.28 nm.rad
<i>Emitância sem elementos de inserção, vertical (@1% de acoplamento)</i>	2.8 pm.rad
<i>Campo magnético em dipolo de campo baixo (LowFD)</i>	0.584 T
<i>Campo magnético em dipolo de campo alto (HighFD)</i>	1.95 T
<i>Número de dipolos de campo alto</i>	20
<i>Energia crítica de dipolos de campo alto</i>	11.7 keV
<i>Energia crítica de dipolos de campo baixo</i>	3.5 keV
<i>Perda de energia por volta nos dipolos</i>	494 keV
<i>Potência de radiação dos dipolos</i>	247 kW
<i>Frequência de RF</i>	499.8 MHz

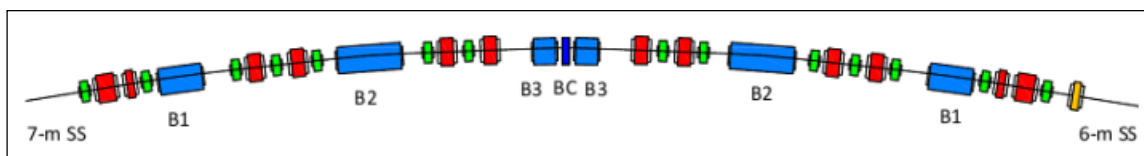


Figura 1: Esquemático com vista superior de um superperíodo da rede magnética do Sirius: dipolos em azul, quadropolos em vermelho e sextupolos em verde. [Fonte: adaptado de (LNLS, 2014)]

Objetivos

O objetivo deste trabalho de mestrado profissional foi desenvolver no LNLS uma bancada automatizada de alinhamento magnético baseada na técnica do fio vibrante por corrente alternada para o Projeto Sirius.

Estrutura da dissertação

O trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro, é feito o embasamento teórico, introduzindo-se os elementos de interesse que compõem aceleradores de partículas, explicando-se os fenômenos físicos explorados pela técnica de medição e apresentando-se as equações que caracterizam a técnica do fio vibrante.

No capítulo 2, é feita a revisão bibliográfica sobre o assunto, resumindo-se os trabalhos que foram realizados ao longo das últimas duas décadas e que serviram de base fundamental para este projeto. No terceiro capítulo, é feita uma descrição minuciosa do desenvolvimento dos trabalhos nos diversos subsistemas que integram a solução final. Os resultados são apresentados no capítulo 4.

Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas e sugeridas propostas para a continuidade e a otimização do trabalho até que realizado.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Aceleradores de partículas e redes magnéticas

Esta sessão é baseada nos capítulos 1, 2 e 3 do livro *Particle Accelerator Physics*, 3ª edição, de Helmut Wiedemann (WIEDEMANN, 2007), onde é encontrado um tratamento bastante completo e didático sobre o tema.

A física de aceleradores trata essencialmente da interação de partículas carregadas com campos eletromagnéticos, de modo que o controle previsível de partículas carregadas é realizado exclusivamente por meio de campos elétricos e magnéticos, os quais determinam completamente a dinâmica do feixe em questão.

Portanto, é o conhecimento detalhado do funcionamento dessas interações que permite o projeto de aceleradores que atinjam metas específicas tanto do ponto de vista de engenharia e operação, como científico.

Visto que para qualquer aplicação um feixe de partículas carregadas deverá percorrer uma trajetória conhecida, definida em projeto, os componentes mais óbvios de um acelerador são justamente aqueles que proporcionam a orientação do feixe e o sistema de focalização.

1.1.1 Força de Lorentz

A força que atua sobre uma partícula com carga elétrica q , definindo sua dinâmica, é a força de Lorentz (F_L):

$$F_L = qE + q(v \times B) \quad (1)$$

onde, E e B são, respectivamente, os vetores de campo elétrico e magnético, v é o vetor velocidade.

1.1.2 Óptica de feixe

Em aceleradores, então, as forças de Lorentz são responsáveis não só por guiar as partículas ao longo de trajetórias pré-determinadas, mas também por focalizar o feixe de

partículas em torno da trajetória ideal. A evolução das trajetórias de partículas sob a influência das forças de Lorentz é denominada dinâmica de feixe ou óptica de feixe, cuja formulação básica é baseada apenas em campos lineares que são independentes, ou no máximo linearmente dependentes, da distância da partícula em relação à trajetória ideal. Essa descrição matemática é denominada dinâmica linear.

Uma análise simples permite ver que as duas componentes da força de Lorentz sobre uma partícula terão a mesma magnitude quando o campo elétrico E for igual ao produto do campo magnético B pela velocidade v (para $v \perp B$). Logo, para partículas relativísticas, como é o caso de elétrons em fontes de luz síncrotron, onde $v \approx c$, a força produzida por um campo magnético de 1 T é equivalente à produzida por um campo elétrico de $E \approx 3\text{MV/cm}$, um valor completamente irrealista. Com isso, fica evidente que campos magnéticos são mais adequados para defletir e focalizar partículas nessas condições.

De fato, campos elétricos e magnéticos podem ser produzidos de muitas maneiras, aparecendo em direções arbitrárias, com intensidades variadas e em posições diferentes, o que torna impossível a derivação de uma fórmula matemática geral para a trajetória completa de partículas carregadas em uma distribuição de campo arbitrária. Então, em projetos de aceleradores são adotadas algumas condições organizadoras e simplificadoras sobre as características dos campos eletromagnéticos utilizados.

Assume-se em geral que o vetor campo magnético B é orientado perpendicularmente em relação ao vetor velocidade v da partícula, pois isso limita o tratamento da dinâmica linear do feixe a campos magnéticos puramente transversais. Essa restrição existe unicamente para simplificar a formulação da dinâmica do feixe, e mostra-se adequada, uma vez que para partículas com velocidades relativísticas as componentes transversais do vetor velocidade são muito menores do que a componente longitudinal.

Finalmente, o conjunto de magnetos de deflexão e focalização instalado ao longo da trajetória ideal é chamado de rede magnética, e o sistema óptico completo, incluindo os parâmetros de deflexão e focalização, de sistema de transporte de feixe. Existem basicamente dois tipos de sistema, a saber: sistemas que não apresentam nem simetria nem periodicidade, e sistemas que apresentam simetria ou periodicidade, os quais podem ser repetidos inúmeras vezes para produzir redes mais longas. Uma rede magnética periódica específica é obtida se o arranjo dos magnetos defletores formarem um circuito fechado, isto é, um acelerador circular.

1.1.2.1 Características de projeto de magnetos

As expressões para potenciais magnéticos são aquelas que orientam o projeto de dispositivos que geram os campos magnéticos desejados. Campos de multipolos são tipicamente produzidos a partir de uma das duas possibilidades, a saber: eletromagnetos com núcleos de ferro, ou condutores de corrente adequadamente posicionados. Este último caso é mais utilizado para magnetos supercondutores de alto campo, onde os campos de cerca de 2 T excedem a saturação do ferro.

Já nos magnetos dominados por ferro, os campos são determinados pelo formato das superfícies de ferro. Assim como superfícies metálicas são equipotenciais para campos elétricos, as superfícies de materiais ferromagnéticos, no limite de aproximação de permeabilidade magnética infinita, são superfícies equipotenciais para campos magnéticos. É justamente esta propriedade do ferro que é explorada para o projetos de magnetos.

A viabilidade de qualquer acelerador depende fundamentalmente dos parâmetros e da fabricação diligente de seus componentes técnicos. E não somente os magnetos precisam ser projetados de modo a minimizar erros de campos multipolares indesejados, como também para que os parâmetros desejados estejam dentro de limites técnicos reais.

1.1.3 Orientação de feixe de partículas - Dipolos magnéticos

Para guiar partículas carregadas, com a unidade básica de carga e , por uma trajetória pré-definida, campos magnéticos são utilizados para defletir as partículas de acordo com o equilíbrio entre a força centrípeta e a força de Lorentz:

$$\gamma m v^2 \boldsymbol{\kappa} + e(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0 \quad (2)$$

onde m é a massa de repouso da partícula, γ é o fator de Lorentz, e $\boldsymbol{\kappa}$ é o vetor de curvatura local da trajetória, com $\kappa = 1/\rho$.

Logo, a partir da equação (2), o raio de deflexão da partícula, ρ , é dado por:

$$\rho = \frac{\gamma m v}{e B} = \frac{1}{B} \frac{\beta E}{e c} \quad (3)$$

onde E é a energia da partícula, c é a velocidade da luz e $\beta = v/c$.

A condição mais simples é a de um campo magnético dipolar uniforme, em que o ângulo de deflexão θ de uma partícula no plano perpendicular ao do vetor \mathbf{B} é dado por:

$$\theta = \frac{l_m}{\rho} \quad (4)$$

onde l_m é o comprimento do arco dentro da região de campo. Com a alternância entre dipolos e trechos retos, pode-se formar o polígono característico de um acelerador circular, com órbita fechada.

Uma campo magnético dipolar pode ser gerado por um eletromagneto como o da Figura 2, em que o feixe viaja pelo centro do magneto, perpendicularmente à secção transversal.

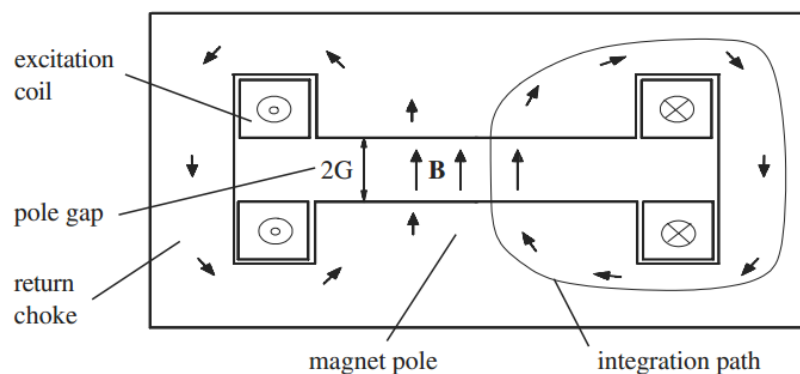


Figura 2: Desenho esquemático da secção transversal de um dipolo magnético, em que são vistos: os polos magnéticos, com o espaçamento ($2G$) entre polos, as bobinas de excitação, o núcleo de ferro, e o caminho de integração para o cálculo do campo pela lei de Ampere. [Fonte: (WIEDEMANN, 2007)]

O campo magnético \mathbf{B} , determinado pela lei de Ampere, é gerado por uma corrente elétrica I , que passa por bobinas condutoras ao redor dos polos magnéticos. Um núcleo ferromagnético de retorno cerca as bobinas, fornecendo um caminho de retorno eficiente para o fluxo magnético.

1.1.4 Focalização de feixe de partículas - Quadrupolos magnéticos

De modo similar ao que ocorre com os raios de luz, feixes de partículas também têm uma tendência a se espalhar em função de uma divergência inerente. Portanto, são

necessários elementos focalizadores para manter as partículas juntas e produzir um feixe com as propriedades desejadas em determinados pontos da linha de transporte.

Em óptica de fótons, os elementos focalizadores são lentes e a propriedade característica destes elementos é que os raios de luz são defletidos por ângulos proporcionais a suas distâncias do centro da lente. Dessa maneira, um feixe de raios paralelos pode ser focalizado em um ponto a uma distância da lente igual à sua distância focal (Figura 3).

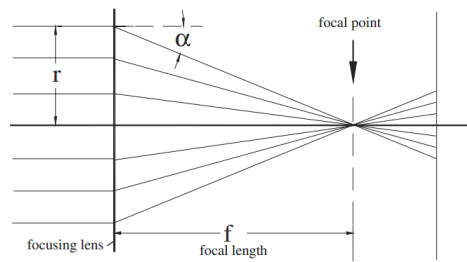


Figura 3: Princípio de focalização, com ângulo de deflexão α em função da distância r ao eixo e distância focal f . [Fonte: (WIEDEMANN, 2007)]

Um campo magnético que realize, na aproximação paraxial (ângulos pequenos), a deflexão de partículas por um ângulo α proporcional à distância r ao eixo do elemento focalizador será equivalente a uma lente de luz visível seguindo a óptica geométrica.

Considerando-se o comprimento do magneto l pequeno em relação à distância focal, de modo que r não varie significativamente dentro da região de campo magnético, podem-se utilizar as equações (3) e (4) para encontrar α :

$$\alpha = \frac{l}{\rho} = \frac{ec}{\beta E} B_{\phi} \cdot l = \frac{ec}{\beta E} G \cdot l \cdot r \quad (5)$$

onde, B_{ϕ} (aproximado para $B_{\phi} = G \cdot r$) é um campo magnético azimutal, de modo a garantir a simetria cilíndrica, e G é o gradiente de campo, dado por $G = dB_{\phi}/dr$. O perfil de campo escolhido, portanto, proporciona a propriedade focalizadora desejada, com a necessária dependência linear em r .

Dentre as diversas opções de lentes magnéticas, o elemento mais adequado para este fim, capaz de proporcionar o campo focalizador desejado enquanto mantém uma abertura fisicamente livre de materiais para passagem do feixe de partículas, é o chamado quadrupolo magnético.

De um potencial escalar V , dado, em coordenadas cartesianas, por:

$$V = -G \cdot x \cdot y \quad (6)$$

derivam-se as componentes de campo magnético B_x e B_y :

$$\frac{-\partial V}{\partial x} = B_x = G \cdot y \quad \text{e} \quad \frac{-\partial V}{\partial y} = B_y = G \cdot x \quad (7)$$

que são claramente lineares em r , desviando a trajetória da partícula proporcionalmente à distância à qual ela se encontra do eixo óptico/magnético do magneto.

Consequentemente, superfícies magnéticas equipotenciais com o dado perfil hiperbólico da equação (6) serão adequadas para produzir os campos desejados. A Figura 4 mostra o padrão de campo desejado (a) e o perfil de polos (b) de um quadrupolo magnético.

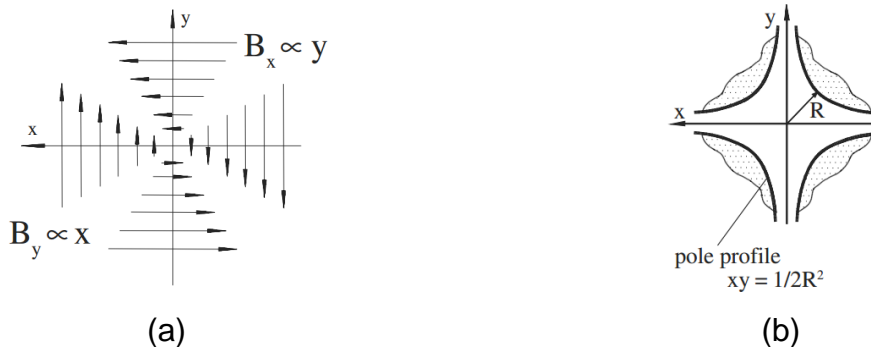


Figura 4: Quadrupolo magnético: (a) padrão de campo magnético; (b) perfil de polos. [Fonte: (WIEDEMANN, 2007)]

Infelizmente, por sua própria concepção, apesar das dependências lineares das componentes de campo magnético em um quadrupolo, não existe a simetria azimutal idealizada inicialmente (B_ϕ). Assim sendo, os quadrupolos magnéticos são focalizadores em um plano e defocalizadores no outro, o que é um resultado direto das próprias leis de Maxwell. Entretanto, isso não diminui a utilidade dos quadrupolos como elementos focalizadores, pois uma combinação de quadrupolos pode criar um sistema que focalize em ambos os planos de um sistema de coordenadas cartesiano.

A fabricação dos quadrupolos pode seguir a mesma técnica mostrada na Figura 2, isto é, por meio de bobinas condutoras ao redor dos polos de um núcleo ferromagnético. Um quadrupolo real é mostrado na Figura 5.



Figura 5: Quadrupolo em bancada de caracterização magnética pela técnica da bobina girante no PSI (Paul Scherrer Institute, Villigen, Suíça). [Fonte: autor]

1.1.5 Perturbações e efeitos cromáticos - Sextupolos magnéticos

A dinâmica de partículas é em grande parte baseada no entendimento de osciladores harmônicos sob a influência de perturbações, uma vez que, em função de efeitos não ideais, como problemas de construção, alinhamento e estabilidade, essas partículas essencialmente irão oscilar em torno de uma trajetória ideal.

Uma das perturbações mais importantes decorre do fato de que as partículas não possuem todas a mesma energia nominal, mas, sim, uma distribuição finita em torno dessa energia. Evidentemente, a deflexão de uma partícula com energia diferente da nominal por qualquer campo magnético será também diferente da deflexão nominal. Esse efeito é análogo ao que ocorre em óptica de luz visível, com a dispersão das cores de um feixe de luz branca ao passar por um elemento óptico como um prisma, por exemplo. Por essa razão, em óptica de feixe os efeitos relacionados à energia das partículas são chamados de efeitos cromáticos.

Em aceleradores circulares, erros de focalização em função de desvios de energia fazem com que as partículas sejam direcionadas a diferentes pontos focais, resultando em frequências de oscilação diferentes da frequência de oscilação nominal do acelerador. A cromaticidade deve, portanto, ser corrigida e controlada por dois motivos: primeiro para

evitar que partículas individuais passem por condições de ressonâncias e sejam perdidas; e para impedir que o próprio feixe seja perdido em função de instabilidades causadas por efeitos a ela relacionados.

De fato, uma das perturbações cromática de ordem mais baixa é aquela causada pela variação da distância focal dos quadrupolos com a energia. Como pode ser visto na Figura 6a, partículas com energia (ou momento) p maior do que a nominal p_0 , isto é, $\Delta p > 0$, possuem distância de focalização maior do que a nominal, e o contrário é válido para $\Delta p < 0$. Em óptica de luz, esse efeito pode ser ao menos parcialmente corrigido com o uso de diferentes tipos de vidro para as lentes de sistemas focalizadores. Entretanto, em óptica de feixe de partículas isso não é possível, necessitando-se de um magneto que seja focalizador para partículas com energia maior e defocalizador para partículas com energia menor do que a nominal.

Como será mostrado na próxima sessão, os sextupolos possuem campos quadráticos, os quais oferecem exatamente essa propriedade (Figura 6b) quando posicionados convenientemente na rede magnética.

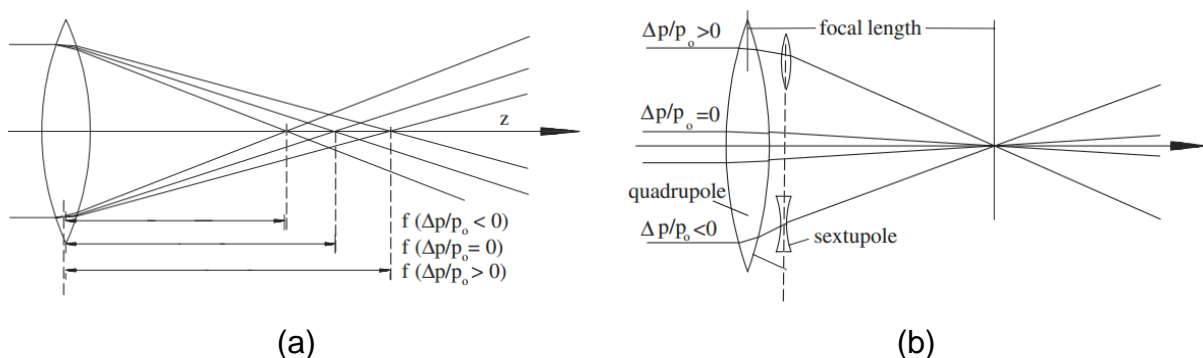


Figura 6: Erro cromático de focalização por quadrupolo em (a), e sua correção com o uso de sextupolos em (b). [Fonte: (WIEDEMANN, 2007)]

Assim como para os dipolos e quadrupolos, os sextupolos também podem ser construídos por meio de bobinas condutoras ao redor dos polos de um núcleo ferromagnético, como na Figura 7.

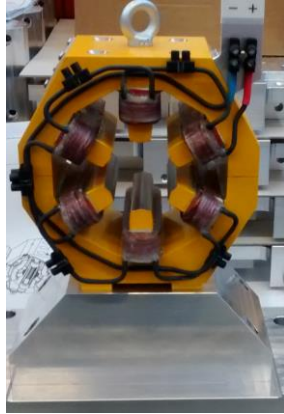


Figura 7: Sextupolo do PSI (Paul Scherrer Institute, Villigen, Suíça). [Fonte: autor]

1.1.6 A equação de Laplace e os campos multipolares

As seções anteriores apresentaram argumentos que justificam o uso de uma variedade de campos eletromagnéticos em linhas de transporte. O aspecto comum dos elementos que geram esses campos é de uma região livre de material nas vizinhanças do eixo magnético para permitir a passagem livre das partículas. Conseqüentemente, esses campos podem ser derivados a partir de um potencial escalar V que deve ser solução da equação de Laplace:

$$\Delta V \equiv 0 \quad (8)$$

Por simplicidade, assume-se que a dependência dos campos magnéticos ao longo do comprimento dos magnetos, isto é, da coordenada z , seja desprezível. Desse modo, um sistema de coordenadas cilíndricas (r, φ, z) é o mais indicado para representar o problema, tal que:

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \equiv 0 \quad (9)$$

Tomando-se uma solução genérica para o potencial na forma de uma expansão de Taylor:

$$V(r, \varphi, z) = -R_b \sum_n \frac{1}{n!} A_n(z) r^n e^{in\varphi} = 0 \quad (10)$$

onde R_b é a rigidez do feixe (igual a $p/e = \beta E/ec$ para campos magnéticos) e A_n são os coeficientes da expansão; e substituindo-a na equação (9), chega-se a:

$$\sum_n \frac{1}{n!} \frac{n(n-1) + n - n^2}{r^2} A_n(z) r^n e^{in\varphi} = 0 \quad (11)$$

a qual é uma identidade, uma vez que $n(n-1) + n - n^2 = 0$ para todo n . Com isso, constata-se a validade da equação (10), a partir da qual se deriva o campo magnético:

$$\mathbf{B} = -\nabla V(x, y) \quad (12)$$

Na prática, raramente são projetados elementos que incluam mais de um termo da expansão de campo, tornando apropriada a decomposição da equação (10) em seus termos multipolares, isto é, V_n e B_n . Ainda, cada componente é composta de uma parte real e uma parte imaginária, que constituem duas soluções independentes da mesma equação de Laplace, descrevendo duas orientações distintas dos campos multipolares. Ou seja, para um dado multipolo a diferença entre a solução real e a imaginária corresponde apenas a uma rotação do elemento em torno do seu eixo.

Pode-se demonstrar que a parte imaginária é aquela que apresenta o chamado plano médio de simetria, com simetria do campo vertical em relação ao eixo horizontal $B_{ny}(x, y) = B_{ny}(x, -y)$ e nenhum campo horizontal no plano médio horizontal, $B_{nx}(x, 0) \equiv 0$, tal que uma partícula viajando no plano horizontal permanecerá nele, pois não sofrerá forças verticais. Os magnetos que apresentam apenas a parte imaginária são chamados de magnetos verticais, enquanto que os magnetos definidos pela parte real são chamados de magnetos rotacionados. Em geral, os magnetos são alinhados de modo que apenas uma das componentes apareça, de sorte que a presença da componente complementar ocorre apenas em função de erros de alinhamento, sendo, por isso, tratada como perturbação.

Em aceleradores reais são utilizados quase que exclusivamente os magnetos verticais, pois a maioria deles encontra-se no plano horizontal, para o qual as soluções imaginárias fornecem os campos desejados. Nesse caso, os multipolos de ordem ímpar, como dipolos e sextupolos, são caracterizados por polos ao longo do eixo vertical,

enquanto os de ordem par, como os quadrupolos, não apresentam polos nos eixos vertical ou horizontal.

A Tabela 2 apresenta os campos multipolares dos três principais magnetos utilizados em física de aceleradores, resumindo os campos apresentados nas seções anteriores. De fato, multipolos acima de sextupolos são raramente utilizados, mas podem ser igualmente derivados a partir da equação (10). Os coeficientes A_n do potencial nessa mesma equação estão associados aos parâmetros de força dos multipolos, definidos na especificação dos aceleradores. Alguns deles são: a curvatura horizontal do dipolo κ_x , associada à equação (3); a força quadrupolar k , associada ao gradiente de força do quadrupolo visto anteriormente, e a força sextupolar m .

Tabela 2 – Campos multipolares dos três principais tipos de magnetos verticais. [Fonte: (WIEDEMANN, 2007)]

Multipolo	Campo horizontal	Campo vertical
Dipolo	$\frac{e}{p}B_x = 0$	$\frac{e}{p}B_y = \kappa_x$
Quadrupolo	$\frac{e}{p}B_x = ky$	$\frac{e}{p}B_y = kx$
Sextupolo	$\frac{e}{p}B_x = mxy$	$\frac{e}{p}B_y = \frac{1}{2}m(x^2 - y^2)$

A análise completa pode ser encontrada na referência adota, entretanto, ela está muito além das necessidades deste trabalho.

1.1.7 Especificações de alinhamento para os magnetos do Sirius

Na busca do ganho de potencial e desempenho para o Sirius em relação ao UVX, como mencionado na seção de introdução, um grande número de redes magnéticas foram estudadas nos últimos anos pelo grupo de Física de Aceleradores (FAC) do LNLS. O documento técnico mais recente a esse respeito é o relatório detalhado Projeto Sirius - *Sirius Detailed Design Report* - atualizado pela última vez em fevereiro de 2014 (LNLS, 2014).

Após a definição da rede básica, que conta apenas com sextupolos como elementos não lineares, erros foram introduzidos no modelo para estudar sua influência nos parâmetros de interesse da máquina. Foram simulados erros multipolares

sistemáticos e aleatórios em todos os dipolos, quadrupolos e sextupolos. Os primeiros são oriundos do formato finito dos polos e os últimos, de erros de fabricação. Os erros sistemáticos de dipolos e quadrupolos foram retirados dos projetos magnéticos desses componentes, desenvolvidos pelo grupo de Ímãs (IMA) do LNLS; enquanto que para os sextupolos, de projetos similares descritos na literatura, uma vez que o projeto deste elemento ainda não havia sido realizado para o Sirius. Os erros multipolares aleatórios, por sua vez, foram estimados como porcentagens dos campos ideais.

Além disso, foram simulados erros de desalinhamento dos magnetos, e os resultados mostraram que estes são os erros mais nocivos para alguns dos parâmetros da máquina. Foram realizados estudos estatísticos utilizando máquinas simuladas com erros de alinhamento gaussiano de todos os magnetos, com corte de aceitação de 1σ igual a 30, 40 e 50 μm . A partir dessas simulações foram determinadas as especificações de tolerância nominal em 40 μm , como visto na Tabela 3.

Tabela 3: Especificações RMS de tolerâncias de desalinhamento transversal (centralização) e de rotação para os magnetos do anel armazenador do Sirius, assumindo distribuição gaussiana truncada em $\pm 1\sigma$.

[Fonte: (LNLS, 2014)]

	Dipolo	Quadrupolo	Sextupolo
<i>Erro transversal x e y (μm)</i>	40	40	40
<i>Erro rotacional em torno do eixo (roll) (mrad)</i>	0.2	0.2	0.2

As especificações acima tratam, entretanto, apenas de uma parte dos graus de liberdade dos magnetos, isto é, dois translacionais e um rotacional. Para um maior controle e rigor no posicionamento desses elementos, é necessário especificar as tolerâncias longitudinais (z), de *pitch* e *yaw*. Esses termos *pitch*, *yaw* e *roll* são emprestados do seguimento aeronáutico, correspondendo às rotações em torno dos eixos x (transversal horizontal), y (transversal vertical) e z (longitudinal).

Para os quadrupolos a tolerância longitudinal não é severa, definida pela mesma ordem de grandeza do erro na distância de focalização causado pelo erro da corrente de alimentação das bobinas. No pior caso, este erro é da ordem de 0.5 mm, o que é facilmente conseguido com instrumentos de alinhamento convencionais, como *laser trackers*. Para os sextupolos, a especificação é ainda mais relaxada. Já para a estimativa dos erros de *pitch* e *yaw*, a indicação do grupo FAC é de que esses erros de perpendicularidade em relação ao eixo ideal do magneto sejam guiados pelas tolerâncias

transversais x e y . A Figura 8 pode ser entendida como uma vista superior de um magneto com erro do tipo *yaw*, ou como uma vista lateral de um magneto com erro do tipo *pitch*.

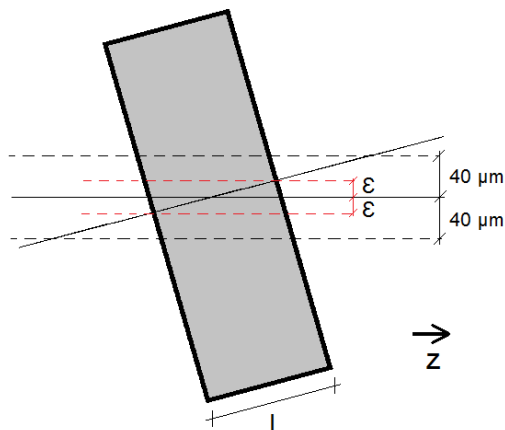


Figura 8: Exemplo de erro de alinhamento do tipo *yaw*, se considerada uma vista superior, ou *pitch*, se considerada, lateral. A direção z do feixe também é indicada. [Fonte: autor]

Com esse critério, fica evidente que a especificação da tolerância dos ângulos depende do comprimento L do magneto: quanto maior o comprimento, menor a ângulo possível antes que o erro (ϵ) atinja os $40 \mu\text{m}$. Pensando em definir o critério mais conservador, para a definição da tolerância de alinhamento será adotado o magneto mais longo entre quadrupolos e sextupolos. Os sextupolos são magnetos tipicamente muito menores do que os quadrupolos, então, basta olhar para a Tabela 4, fornecida pelo grupo FAC e que apresenta as famílias de quadrupolos da rede magnética do Sirius.

Tabela 4: Famílias de quadrupolos do anel armazenador do Sirius, com indicações das forças e comprimentos. [Fonte: FAC - LNLS]

Família	Força [T/m]	Comprimento [m]
<i>qaf</i>	25.36876	0.34
<i>qad</i>	-27.30416	0.14
<i>qbd2</i>	-39.61194	0.14
<i>qbf</i>	39.02838	0.34
<i>qbd1</i>	-29.66239	0.14
<i>qf1</i>	23.67821	0.25
<i>qf2</i>	33.54286	0.25
<i>qf3</i>	30.80632	0.25
<i>qf4</i>	27.07639	0.25

O quadrupolo mais longo possui 0.34 m de comprimento, logo, a tolerância de erro angular para *pitch* e *yaw* é:

$$\delta = \sin^{-1}\left(\frac{\varepsilon_{max}}{L/2}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{40 \mu m}{0.17 m}\right) = 0.24 \text{ mrad} \quad (13)$$

A bancada de alinhamento desenvolvida neste trabalho deveria, portanto, ser capaz de garantir que essas tolerâncias fossem correspondidas. A próxima seção apresenta a técnica a partir dos princípios físicos que a embasam.

1.2 Técnica do fio vibrante

1.2.1 Força magnética em um condutor transportando corrente elétrica

Esta sessão é baseada no capítulo 29 do livro *Physics for Scientists and Engineers*, 6ª edição, de Serway e Jewett (SERWAY e JEWETT, 2004).

Como foi mostrado na seção 1.1.1, a força que atua sobre uma partícula com carga elétrica q é a força de Lorentz, dada pela equação (1). Conseqüentemente, se uma partícula estiver sendo conduzida por um fio condutor imerso em um campo magnético, então ela sofrerá a ação de uma força magnética, que, por sua vez, será transmitida ao fio quando a partícula colidir com os átomos que constituem o fio.

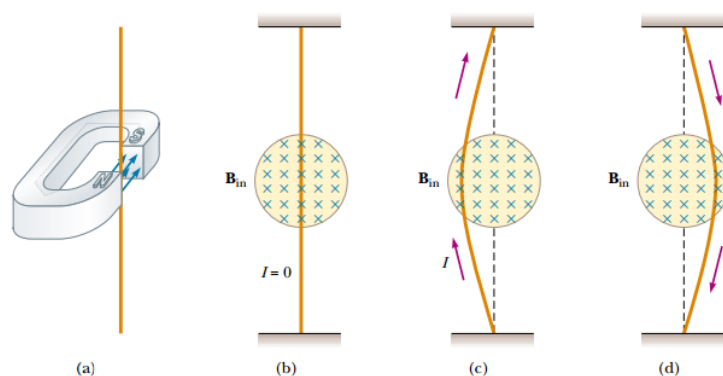


Figura 9: (a) Fio suspenso verticalmente entre os polos de um magneto. (b), (c) e (d) mostram uma vista em corte de (a), com o campo magnético entrando na página. Em (b) a corrente é zero e não há qualquer força agindo sobre o fio. Já (c) e (d) mostram deflexões em sentidos opostos no fio, causadas pela força magnética para sentidos opostos da corrente. [Fonte: (SERWAY e JEWETT, 2004)]

No caso de uma corrente elétrica, que nada mais é do que um conjunto de partículas em movimento, este condutor sofrerá uma força resultante que consiste na somatória vetorial das forças individuais sobre as partículas. O fenômeno fica claro na Figura 9, que mostra que nenhuma força age sobre o fio quando a corrente é zero e que as deflexões devido à força magnética são opostas para correntes sendo conduzidas em sentidos opostos.

Para um segmento de fio reto de comprimento L e seção A conduzindo uma corrente I em um campo magnético uniforme B , a força exercida sobre uma partícula com carga q com velocidade de deriva v_d é $qv_d \times B$. Sendo n o número de partículas por unidade de volume, o número total de partículas no volume AL é, então, nAL . Portanto, a força magnética total no fio é:

$$\mathbf{F}_B = (qv_d \times \mathbf{B})nAL \quad (14)$$

Visto que a corrente pode ser escrita como $I = nqv_dA$, ou seja, o número de partículas carregadas que cruzam uma certa área por unidade de tempo, a equação anterior pode ser reescrita de maneira mais conveniente:

$$\mathbf{F}_B = I\mathbf{L} \times \mathbf{B} \quad (15)$$

onde \mathbf{L} é o vetor que aponta na direção da corrente I e tem a magnitude igual ao comprimento L do segmento.

A equação (15), no entanto, vale apenas para o caso de um condutor reto em um campo magnético uniforme. Ainda assim, pode-se escrever a partir dela a força sobre um pequeno segmento com vetor de comprimento $d\mathbf{s}$

$$d\mathbf{F}_B = I d\mathbf{s} \times \mathbf{B} \quad (16)$$

Finalmente, a força total atuando sobre um fio arbitrário é dado pela integração de (16):

$$\mathbf{F}_B = I \int_a^b d\mathbf{s} \times \mathbf{B} \quad (17)$$

onde a e b representam as extremidades do fio. Um caso óbvio, que pode ser mencionado é o de uma espira fechada em um campo magnético uniforme, em que $\oint ds = 0$ e, conseqüentemente, a força magnética resultante é nula.

1.2.2 Ondas estacionárias em um fio esticado

Esta sessão é baseada nos capítulos 16 e 18 do livro *Physics for Scientists and Engineers*, 6ª edição, de Serway e Jewett (SERWAY e JEWETT, 2004), e resume alguns dos conceitos da teoria de ondas que são relevantes para o entendimento da técnica do fio vibrante. Para outros esclarecimentos, a referência deve ser consultada.

1.2.2.1 Ondas mecânicas viajantes em uma corda

Ondas mecânicas são aquelas que necessitam de um meio físico como ar, água ou uma corda, por exemplo, para se propagarem, carregando energia e informação de um ponto a outro do espaço. Particularmente para uma onda transmitida ao longo de uma corda esticada, os pontos da corda se movimentam perpendicularmente à direção de propagação da onda, tratando-se, portanto, de uma onda transversal.

É sabido que uma onda transversal unidimensional viajante é descrita por:

$$y(x, t) = f(x \mp vt) \quad (18)$$

onde y é o eixo de deslocamento, x é o eixo de propagação, v é a velocidade de propagação da onda e t é o tempo; sendo o sinal de menos utilizado para propagação no sentido positivo (direita) e o sinal de mais para propagação no sentido negativo (esquerda).

A velocidade de propagação de uma onda mecânica depende do meio em que ela viaja. Se uma corda esticada for perturbada transversalmente, a tensão é responsável por acelerar os segmentos da corda de volta em direção à posição de equilíbrio. De acordo com a 2ª Lei de Newton, a aceleração de cada segmento é proporcional à tensão na corda, T . Desse modo, se um segmento retorna à posição de equilíbrio mais rapidamente devido uma maior aceleração, intuitivamente a velocidade na corda será maior. De maneira inversa, é mais difícil acelerar um segmento tanto maior sua massa. Logo, a velocidade da onda deve ser inversamente proporcional à densidade linear μ da corda.

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (19)$$

A equação (19) é obtida diretamente da chamada equação de onda linear, que é derivada a partir da aplicação simples das leis de Newton, assumindo-se pulsos com altura pequena em relação ao comprimento da corda, como será visto na seção 1.2.4.5.1.

Um tipo particular de onda muito importante é a chamada onda senoidal, pois sua forma é a mesma da função $\sin \theta$ plotada em função de θ , como visto na Figura 10.

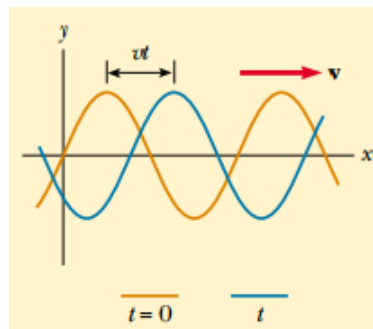


Figura 10: Onda senoidal unidimensional se propagando para a direita com velocidade v , nos instantes $t = 0$ e em um tempo t posterior. [Fonte: (SERWAY e JEWETT, 2004)]

A equação geral de uma onda senoidal viajante para a direita é:

$$y = A \sin(kx - \omega t + \phi) \quad (20)$$

onde, A é a amplitude, k é o número de onda, ω é a frequência angular e ϕ é uma fase arbitrária definida pelas condições iniciais. O número de onda é relacionado ao comprimento de onda, λ , por $k = 2\pi/\lambda$, e a frequência angular ao período da onda, τ , por $\omega = 2\pi/\tau$. A definição do período é justamente o tempo que a fase da onda leva para percorrer um comprimento de onda, de modo que:

$$v = \frac{\lambda}{\tau} = \lambda f \quad (21)$$

onde, $f = 1/\tau$ é a frequência da onda, dada em Hz.

1.2.2.2 Superposição e ondas estacionárias

Na natureza, muitos fenômenos podem ser descritos com base no princípio da superposição. Para ondas nos limites de linearidade, observados em geral para baixas amplitudes, o resultado da combinação de duas ou mais ondas viajantes em um meio é dado pela soma algébrica das ondas individuais.

A superposição de duas ondas senoidais unidimensionais idênticas viajando em sentidos opostos resulta em:

$$y = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t) = (2A \sin(kx)) \cos \omega t \quad (22)$$

que é a função de onda de uma onda estacionária (Figura 11), uma vez que não se trata mais de uma função de $kx \pm \omega t$, mas de um tipo particular de movimento harmônico. Cada partícula do meio oscila em um movimento harmônico simples com a mesma frequência angular ω , porém, com a amplitude do movimento harmônico simples dependente da posição x da partícula e dentro de uma função envelope $2A \sin(kx)$.

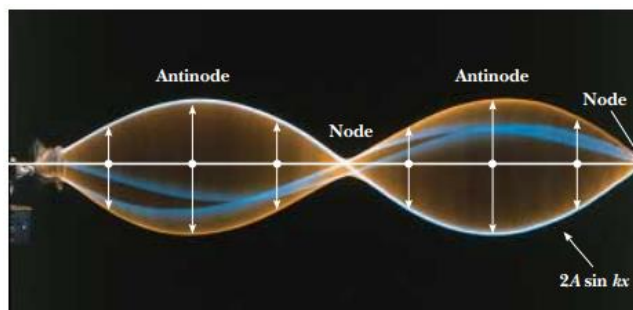


Figura 11: Fotografia multilash de uma onda estacionária em uma corda. O comportamento no tempo do deslocamento vertical de um ponto da corda é dado por $\cos \omega t$, ou seja, cada ponto vibra com um frequência angular ω . A amplitude da oscilação, por sua vez, depende da posição do ponto ao longo da corda, vibrando de acordo com um envelope $2A \sin(kx)$. [Fonte: (SERWAY e JEWETT, 2004)]

Este comportamento contrasta com a situação de uma onda senoidal viajante, em que todos os pontos oscilam com a mesma amplitude e a mesma frequência, e em que a amplitude da onda é a mesma amplitude do movimento harmônico simples dos pontos.

O deslocamento máximo de um ponto é igual a zero nos pontos em que x satisfaz kx igual a múltiplos inteiros de π , tal que:

$$x = \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, \dots = \frac{n\lambda}{4}, \quad n = 0, 2, 4, 6, \dots \quad (23)$$

Estes pontos são chamados de nós. Já para as posições x com os valores ímpares de n , $\sin(kx) = \pm 1$ e a amplitude é a máxima possível. Estes pontos são chamados de antinós. Com isso, nota-se que a distância entre dois nós ou dois antinós adjacentes é $\lambda/2$, enquanto que a distância entre um nó e um antinó adjacente é $\lambda/4$.

Considerando especificamente uma corda de comprimento L fixa em seus dois extremos, ondas estacionárias são formadas por uma superposição contínua de ondas incidentes e refletidas pelas suas extremidades. De modo geral, o movimento de oscilação nesse caso é descrito pela superposição de vários modos normais (Figura 12), isto é, de padrões naturais de oscilação, cada qual com um comprimento de onda (λ_n) e uma frequência característica (f_n) que podem ser facilmente calculados.

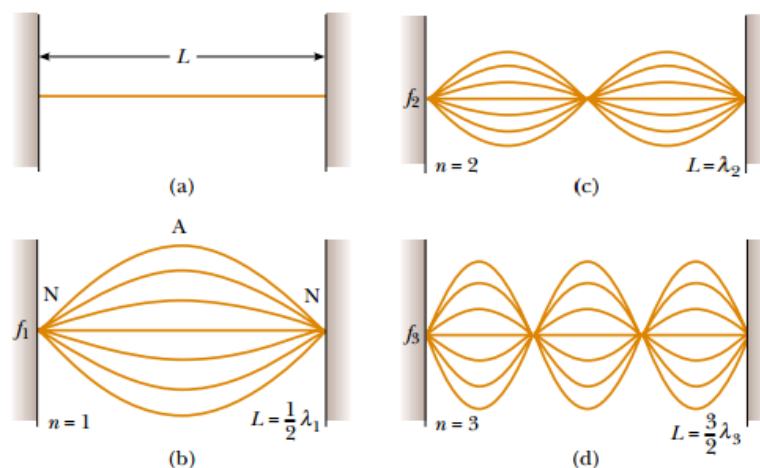


Figura 12: Corda fixa nas duas extremidades (a) e seus harmônicos: (b) primeiro harmônico, modo fundamental; (c) segundo harmônico; e (d) terceiro harmônico. [Fonte: (SERWAY e JEWETT, 2004)]

Partindo da equação (22), em que a amplitude da onda é função da posição e do tempo, $y = y(x, t)$, as condições de contorno impõem $y(0, t) = y(L, t) = 0$ para qualquer t . Isto requer que $\sin(kL) = 0$, o que é satisfeito com kL sendo múltiplo inteiro de π :

$$k_n L = n\pi \quad \text{ou} \quad \lambda_n = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (24)$$

onde n se refere ao enésimo modo normal de oscilação. Consequentemente, as únicas soluções possíveis são aquelas em que o comprimento da corda é igual a múltiplos inteiros de meio comprimento de onda.

Trabalhando-se com as equações (19), (21) e (24), encontramos as frequências naturais em uma corda esticada:

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (25)$$

A frequência mais baixa, $f_1 = (1/2L)\sqrt{T/\mu}$, está associada ao maior comprimento de onda possível, ou seja, aquele com os únicos nós justamente nas extremidades e um antinó no centro, tal que $\lambda_1 = 2L$. Por isso, este modo de vibração é conhecido como modo fundamental.

Como visto em (25), as demais frequências dos modos normais são múltiplos inteiros da frequência fundamental, e sua soma forma uma série harmônica em λ_n , a qual serve de base para expressar qualquer perfil da corda. Por essa razão, os demais modos são chamados de harmônicos.

Finalmente, todos estes modos são os modos de oscilação possíveis para uma corda, porém, os modos realmente presentes em determinada situação serão aqueles excitados por forças externas. Para excitar um único modo de oscilação, seria necessário gerar uma condição inicial em que a corda fosse deformada exatamente neste perfil. Assim, uma vez solta, a corda vibraria na frequência desejada. Entretanto, esta manobra é muito difícil e na prática o que ocorre é a excitação de vários harmônicos simultaneamente.

1.2.2.3 Série de Fourier

O Teorema de Fourier diz que qualquer função contínua periódica, tal que $y(t + \tau) = y(t)$, onde τ é o período da função, pode ser representada por uma somatória de funções seno e cosseno chamada série de Fourier:

$$y(t) = \sum_n (A_n \sin 2\pi f_n t + B_n \cos 2\pi f_n t) \quad (26)$$

onde, A_n e B_n são as amplitudes, isto é, os coeficientes, de cada frequência $f_n = nf_1 = n/\tau$, com $n = 0,1,2, \dots$. É possível demonstrar, de fato, que as funções seno e cosseno são linearmente independentes e formam uma base ortogonal no espaço das soluções periódicas, porém, isso foge ao escopo deste trabalho.

No caso das ondas estacionárias em uma corda, fixa em seus dois extremos, $y(x, t)$ é uma função separável em x e em t (equação (22)), e a série de Fourier se aplica à parte espacial $y(x)$. Particularmente, as condições de contorno nas extremidades forçam os coeficientes B_n dos termos de cosseno a zero em (26), tal que qualquer perfil da corda pode ser representado pela soma de senos, os harmônicos já discutidos.

A solução geral para o movimento oscilatório de uma corda fixa nas extremidades é, portanto, a soma algébrica de todos os modos possíveis, e a generalização da equação (22) é dada por:

$$y(x, t) = \sum_n (2A_n \sin(k_n x)) \cos \omega t \quad (27)$$

1.2.2.4 Ressonância

Se uma força externa periódica é aplicada a um sistema oscilatório, então trata-se de uma oscilação forçada. Osciladores harmônicos simples possuem apenas uma frequência natural de oscilação ω_0 e pode-se demonstrar que para o caso simples de um oscilador desse tipo, com massa m , fator de amortecimento b , excitado por uma força senoidal de amplitude F_{ext} e frequência ω , a amplitude de vibração do sistema no estado estacionário é dada por:

$$A = \frac{F_{ext}/m}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \left(\frac{b\omega}{m}\right)^2}} \quad (28)$$

A Figura 13 mostra a resposta de um sistema oscilatório em função da frequência da força externa, onde se nota que a amplitude é máxima quando as frequências de excitação e natural são coincidentes. A razão disso é que nessas condições a energia é transferida para o sistema da maneira mais favorável possível, isto é, o trabalho da força e, conseqüentemente, a potência transferida para o oscilador é a máxima. Este

fenômeno é conhecido como ressonância e, por isso, ω_0 é chamada de frequência de ressonância.

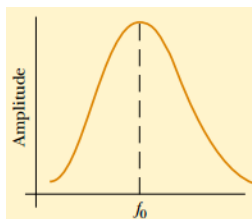


Figura 13: Gráfico da amplitude de oscilação em função da frequência da força externa, com a limitação do valor máximo e assimetria da curva em função do amortecimento do sistema. [Fonte: (SERWAY e JEWETT, 2004)]

O valor da amplitude é limitado pelo atrito no sistema, e seria divergente em um sistema ideal, sem atrito, onde $b = 0$. Para uma força que começa a agir no sistema em repouso, inicialmente a energia é usada tanto para aumentar a amplitude de vibração quanto para vencer forças de atrito. Uma vez que a amplitude máxima tenha sido atingida, a energia do trabalho feito pela força é totalmente consumida pelo atrito.

Um sistema é dito fracamente amortecido quando o atrito a ser vencido é pequeno, isto é, $b/2m < \omega$. Neste caso, as amplitudes são grandes quando uma das ressonâncias do sistema é estimulada e, uma vez cessado o estímulo, a oscilação ainda se mantém por um longo tempo. Quando o atrito do sistema é grande, ele é dito fortemente amortecido. Neste caso, para uma mesma força motriz as amplitudes são consideravelmente menores se comparadas aos sistemas com amortecimento fraco e, uma vez cessada a força, a amplitude de oscilação decai em um curto período de tempo.

De volta ao tema de ondas em cordas com extremidades fixas, foi mostrado que, diferentemente de um oscilador harmônico simples, o qual possui uma única frequência natural, uma corda possuiria, ao menos teoricamente, infinitos modos naturais. Ainda assim, de maneira análoga ao oscilador simples, se uma força periódica é aplicada ao sistema, haverá ressonância quando a frequência dessa força for igual ou aproximadamente igual a uma de suas frequências naturais.

Se uma corda é estimulada por uma força com frequência diferente de uma das frequências naturais, então as oscilações terão amplitude pequena e não haverá um padrão estável.

1.2.3 Amplificador lock-in e considerações de medidas

Esta seção é baseada na nota técnica *About Lock-In Amplifiers* (STANFORD RESEARCH SYSTEMS), e no manual do lock-in modelo SR830 da *Stanford Research Systems* (STANFORD RESEARCH SYSTEMS, 2011).

Amplificadores lock-in são especialmente utilizados para detectar e medir sinais alternados muito pequenos, podendo chegar a nanovolts, mesmo quando níveis de ruído com intensidade milhares de vezes superior estão presentes.

A técnica utilizada por este instrumento de medida é conhecida como detecção sensível a fase, ou PSD (do inglês *Phase-Sensitive Detection*), capaz de extrair do sinal a componente associada à frequência e à fase de uma referência específica. Dessa maneira, sinais de ruído em frequências diferentes daquela de referência são rejeitados e não afetam a medida.

Por exemplo, seja um sinal senoidal de 10 nV e frequência de 10 kHz. Evidentemente é necessária alguma amplificação para elevar este sinal acima dos níveis de ruído. Utilizando-se um bom amplificador de baixo ruído, com ruído de entrada de aproximadamente $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ para uma largura de banda de 100 kHz e ganho de 1000, a saída seria de 10 μV de sinal ($10 \text{ nV} \times 1000$) e 1.6 mV de ruído de banda larga ($5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{100 \text{ kHz}} \times 1000$). Portanto, não há grandes chances de medida do sinal de saída a menos que a frequência de interesse seja selecionada.

Se esse amplificador for seguido de um filtro passa faixa centrado em 10 kHz e com fator de qualidade $Q = 100$, o que corresponderia a um filtro muito bom, então, qualquer sinal dentro de uma largura de banda de 100 Hz ($10 \text{ kHz}/Q$) seria detectado. Neste caso, o ruído seria 50 μV ($5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{100 \text{ Hz}} \times 1000$), para o mesmo sinal de 10 μV , de modo que o ruído de saída ainda seria muito superior ao nível de sinal. Outros amplificadores não melhorariam a relação sinal-ruído.

Agora, se o amplificador for seguido por um PSD, que é capaz de detectar o sinal em 10 kHz com uma largura de banda de até 0.01 Hz, então o nível de ruído seria de 0.5 μV ($5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{0.01 \text{ Hz}} \times 1000$), para o mesmo sinal de 10 μV . Enfim, com a razão sinal-ruído igual a 20, medidas tornam-se possíveis.

1.2.3.1 Detecção sensível a fase (PSD)

Medidas com lock-in exigem uma frequência de referência. Tipicamente, um experimento é excitado em uma frequência específica, a partir de um oscilador ou gerador de função, e o lock-in detecta a resposta do experimento na frequência de referência.

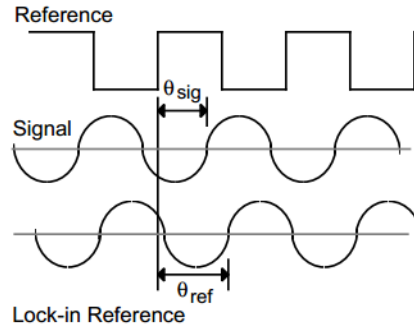


Figura 14: Diagrama com sinal de referência externa ao lock-in, sinal de saída e sinal de referência interna do lock-in, gerado a partir da referência externa por PLL. [Fonte: (STANFORD RESEARCH SYSTEMS, 2011)]

A Figura 14 mostra um sinal de referência, um sinal de saída e um sinal interno de referência gerado pelo amplificador lock-in. A referência é dada por uma onda quadrada de frequência ω_r , que pode ser, por exemplo, a saída de sincronismo de um gerador de função. O sinal senoidal de saída desse gerador de função, utilizado para excitar o experimento, pode ser escrito como $V_{sig}\sin(\omega_r t + \theta_{sig})$, onde V_{sig} é a amplitude do sinal, ω_r , a frequência, e θ_{sig} , a fase. Por fim, o amplificador lock-in gera internamente seu próprio sinal senoidal, uma referência interna em relação à referência externa, geralmente por um sistema de travamento de fase PLL (do inglês *Phase-Locked-Loop*), dado por $V_L\sin(\omega_L t + \theta_{ref})$.

Na detecção de sinais, o lock-in amplifica a entrada e a multiplica pela sua referência interna, utilizando um detector sensível a fase ou um multiplicador. Logo, a saída do PSD é o produto de duas ondas senoidais. Supondo que o sinal de entrada do lock-in seja diretamente o sinal de saída do gerador de sinais, então:

$$\begin{aligned}
 V_{PSD} &= V_{sig}V_L \sin(\omega_r t + \theta_{sig}) \sin(\omega_L t + \theta_{ref}) = \\
 &= \frac{1}{2} V_{sig}V_L \cos[(\omega_r - \omega_L)t + \theta_{sig} - \theta_{ref}] + \frac{1}{2} V_{sig}V_L \cos[(\omega_r + \omega_L)t + \theta_{sig} + \theta_{ref}]
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Ou seja, a saída do PSD é uma combinação de dois sinais alternados (AC), um com a diferença entre as frequências ($\omega_r - \omega_L$) e outro com a soma ($\omega_r + \omega_L$).

Se esta saída é submetida a um filtro passa baixa, os sinais AC são removidos, porém, se $\omega_r = \omega_L$, a diferença será um sinal DC e, então:

$$V_{PSD} = 1/2 V_{sig} V_L \cos[\theta_{sig} - \theta_{ref}] \quad (30)$$

o qual é um resultado muito interessante por apresentar um nível DC proporcional à amplitude do sinal de interesse.

1.2.3.2 Largura de banda

Supondo agora que o sinal de entrada seja mais real, composto não apenas uma por função senoidal pura, mas também por ruído. O PSD e filtro passa baixa irão detectar apenas sinais cujas frequências são muito próximas daquela da referência interna do lock-in, pois as demais serão atenuadas uma vez que nem $\omega_r - \omega_L$ nem $\omega_r + \omega_L$ serão próximas de um nível DC.

Ruído em frequências muito próximas da referência resultarão em saídas AC de frequências muito baixas, dadas por $|\omega_{noise} - \omega_L|$, cujas atenuações dependerão da largura de banda do filtro passa baixa e da sua taxa de atenuação em si, isto é, a inclinação da função de transmissão desse filtro, conhecida como *roll-off*. Bandas mais estreitas removerão fontes de ruído muito próximas à frequência de ressonância, enquanto bandas mais largas permitirão a passagem desses sinais. Apenas o sinal na frequência de referência exata resultará em uma saída DC, absolutamente não afetado pelo filtro passa baixa e correspondendo ao sinal que se deseja medir.

Colocando de outra maneira, como foi visto na seção 1.2.2.3, o Teorema de Fourier afirma que qualquer sinal periódico pode ser representado por uma soma de sinais senoidais com diferentes amplitudes, frequências e fases. Foi dito também que isso é possível porque os sinais senoidais de frequências diferentes são funções ortogonais entre si, o que quer dizer que a média do produto de dois desses sinais é zero a menos que a frequência seja exatamente a mesma. No lock-in é o filtro passa baixa que segue o multiplicador que realiza essa média temporal, removendo os produtos da referência

interna com sinais de frequências diferentes. Portanto, ao multiplicar o sinal de entrada por um sinal senoidal puro, o lock-in mede a componente de Fourier na frequência exata dada pela referência.

1.2.3.3 Referências do lock-in

Para se trabalhar com o lock-in, é preciso fazer com que a frequência da referência interna seja a mesma do sinal que se deseja medir, isto é, $\omega_r = \omega_L$. Além disso, a fase entre os sinais não pode variar no tempo, ou $\cos[\theta_{sig} - \theta_{ref}]$ irá variar e V_{PSD} não será um sinal DC. Por essa razão, a referência do lock-in necessita de um travamento de fase em relação ao sinal de referência.

Sendo assim, os amplificadores lock-in utilizam um sistema de travamento de fase PLL para gerar seu sinal de referência. No exemplo, a onda quadrada da referência externa é utilizada pelo PLL no lock-in para travar a referência interna em relação a esta referência externa, resultando em uma onda senoidal com frequência ω_r e uma constante de fase fixa θ_{ref} . Como o PLL ativamente rastreia a referência externa, mudanças que nela ocorram não afetam a medida.

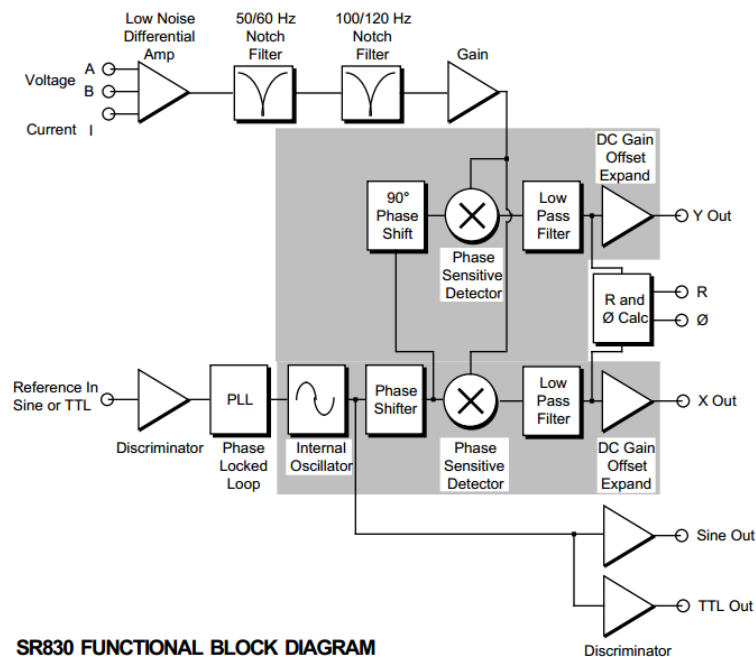


Figura 15: Diagrama de blocos funcional do lock-in SR830 da Stanford Research Systems. [Fonte: (STANFORD RESEARCH SYSTEMS, 2011)]

Existem muitas aplicações em que a referência não é dada por uma fonte de referência externa. Neste caso, o oscilador interno do lock-in é utilizado diretamente, atuando como um gerador de funções, com um sinal de saída senoidal variável e um sinal TTL de sincronismo, como pode ser visto no exemplo da Figura 15.

1.2.3.3.1 Phase Locked Loop (PLL)

Como o nome sugere, o sistema de travamento de fase PLL é um sistema de controle que produz um sinal de referência cuja fase está relacionada àquela do sinal de entrada. Um uso muito comum de PLL é para excitar sistemas ressonantes, em que há um atraso de fase, tipicamente de 90° entre o sinal de excitação, produzido pelo PLL, e a resposta do sistema ressonante. Uma mudança na frequência de ressonância, resultado, por exemplo, da interação entre a amostra e a ponta de um microscópio de força atômica (AFM, do inglês *Atomic Force Microscope*), induz uma mudança na diferença de fase entre o sinal de excitação e de resposta. O PLL é, então, projetado para ajustar o sinal de excitação de modo que a diferença de fase desejada seja restabelecida. A máxima taxa a que o PLL pode restabelecer esse atraso é chamada de largura de banda do PLL, consistindo em uma de suas figuras de mérito.

O PLL consiste em três blocos em configuração de realimentação (Figura 16): um detector de fase (PD, do inglês *phase detector*), um controlador proporcional-integral (PI) e um oscilador de frequência variável. O primeiro compara a fase do sinal de entrada com a do sinal de referência, derivada do oscilador, sendo que a diferença deve ser igual à fase definida. Qualquer desvio em relação à definição corresponde a um sinal de erro que deve ser minimizado e esta é a função do controlador proporcional-integral. Se o erro é positivo, então a referência está se atrasando em relação à taxa em que o sinal de entrada está avançando, de maneira que a frequência do oscilador precisa ser aumentada. Ao contrário, se o erro é negativo, o sinal de referência está se adiantando e a frequência do oscilador precisa ser diminuída. Estando relacionados por suas fases, a consequência é que as frequências do sinal de referência e de entrada possuem mesmo valor, pois a frequência é a derivada da fase (ZURICH INSTRUMENTS, 2011).

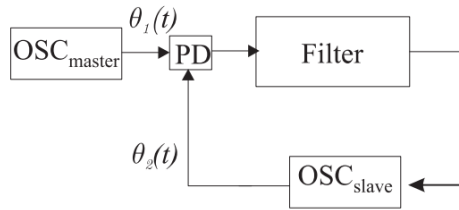


Figura 16: Diagrama de blocos de um PLL com detector de fase. O oscilador mestre corresponde ao sinal de entrada, o filtro, ao controlador PI, e oscilador escravo, ao oscilador de frequência variável [Fonte: (LEONOV, KUZNETSOV e YULDASHEV M. V., 2011)].

Definindo: φ , a diferença de fase entre o sinal e o oscilador de referência; f_c , a frequência central, a qual é tipicamente definida com valor próximo ao da frequência de operação do PLL; T_i , o ganho integral; e K_p , o ganho proporcional do controlador PI. Então, a frequência de referência gerada pelo oscilador variável satisfaz:

$$f_r = f_c + K_p \left[\varphi + \frac{1}{T_i} \int_t \varphi dt' \right] \quad (31)$$

A largura de banda do PLL é um parâmetro relevante para seu desempenho, devendo ser grande o suficiente para cobrir a variação de frequência do sinal medido. Porém, se desnecessariamente ampla, haverá menor rejeição de ruído. Por fim, sendo um sistema de realimentação com ganho, o PLL é susceptível a instabilidades se os parâmetros do controlador PI não forem corretamente ajustados. Na literatura existem inúmeros métodos de sintonia de parâmetros, dos mais simples aos mais complexos (ZURICH INSTRUMENTS, 2011).

1.2.3.4 Magnitude e fase

Como visto na equação (30), o sinal de saída do PSD é proporcional a $V_{sig} \cos \theta$, onde $\theta = (\theta_{sig} - \theta_{ref})$ é a diferença de fase entre o sinal e o oscilador de referência do lock-in. Desse modo, ajustando θ_{ref} é possível fazer $\theta = 0$, de onde se extrai diretamente V_{sig} . Por outro lado, se $\theta = 90^\circ$, a saída será necessariamente zero. Um lock-in com um único PSD é chamado de lock-in de fase simples (*single-phase lock-in*), com saída $V_{sig} \cos \theta$.

Esta dependência com a fase pode ser eliminada por meio da adição de um segundo PSD, que multiplica o sinal pelo sinal do oscilador de referência defasado de 90° , isto é, $V_L \sin(\omega_L t + \theta_{ref} + 90^\circ)$. Desse modo, a saída após o filtro passa baixa será:

$$V_{PSD2} = 1/2 V_{sig} V_L \sin[\theta_{sig} - \theta_{ref}] \quad (32)$$

Agora, há duas saídas, uma proporcional a $\cos \theta$ e outra a $\sin \theta$. Essas duas quantidades: $X = V_{sig} \cos \theta$ e $Y = V_{sig} \sin \theta$, representam o sinal como um vetor em relação ao oscilador de referência do lock-in, sendo X chamado de componente em fase e Y , de componente em quadratura.

Finalmente, a magnitude do vetor, isto é, a amplitude do sinal, independente da fase, é dada por:

$$R = (X^2 + Y^2)^{1/2} = V_{sig} \quad (33)$$

enquanto que a fase entre o sinal e o lock-in é definida por:

$$\theta = \tan^{-1}(Y/X) \quad (34)$$

Portanto, um lock-in de fase dual (*dual-phase lock-in*) possui dois PSDs com osciladores de referência defasados em 90° , sendo capazes de medir diretamente X , Y , R e θ .

1.2.3.5 Unidades de medida

Os amplificadores lock-in, como regra geral, apresentam os sinais em tensão RMS, isto é, para uma leitura de magnitude $1 V_{RMS}$, por exemplo, a componente do sinal de entrada na dada frequência é um sinal senoidal com amplitude $1 V_{RMS}$, ou $2.8 V_{pp}$.

A respeito da medida de frequências (f) e fase (θ), elas são dispostas em Hz e graus, respectivamente. As equações do tipo $\sin(\omega t + \theta)$ são escritas em termos de ω e θ , como se fosse em radianos, apenas por simplicidade de notação.

1.2.3.6 PSDs analógicos e digitais

É importante considerar a natureza física do processo de multiplicação e filtragem em diferentes tipos de lock-ins. Em lock-ins analógicos o sinal e a referência são sinais analógicos de tensão, os quais são multiplicados em um multiplicador analógico, com o sinal resultante filtrado por um ou mais filtros RC (resistor-capacitor). Já em lock-ins digitais, tanto o sinal como a referência são representados por sequências de números, multiplicados e filtrados matematicamente, ou digitalmente, por um chip processador digital de sinais (DSP, do inglês *digital signal processor*).

Em amplificadores digitais o sinal analógico de entrada amplificado é convertido para digital por meio de um conversor analógico digital (A/D) de um certo número de bits a uma determinada taxa de amostragem. Na verdade, o conversor A/D é antecedido por um filtro *anti-aliasing* para limitar a frequência do sinal de entrada a uma frequência abaixo da metade da frequência de amostragem. Então, o conjunto de dados é multiplicado, ponto a ponto, por ambas as referências senoidais (no caso de um lock-in dual) na dada frequência de amostragem.

Os PSDs em lock-ins digitais atuam como multiplicadores lineares, isto é, multiplicam o sinal pelo seno de referência. Já os PSDs analógicos possuem problemas associados, sendo os principais deles a rejeição de harmônicos, offsets de saída, reserva dinâmica limitada e erro de ganho.

Os PSDs digitais multiplicam o sinal digitalizado pela referência senoidal digitalizada, em geral, por um conversor com capacidade de digitalização maior de bits do que o conversor do próprio sinal. Isto faz com que a presença de harmônicos da referência senoidal seja muito baixa, tipicamente em níveis de -120 dB, o que significa que a referência é praticamente um seno puro, e apenas o sinal nesta frequência específica é detectado. Do contrário, um lock-in com multiplicação por onda quadrada, por exemplo, irá detectar todos os harmônicos ímpares da referência.

O offset de saída, por sua vez, é um problema, pois o sinal de interesse é um nível DC na saída do PSD, fazendo com que um offset contribua para erros e desvios em relação ao zero. Os problemas de offset dos PSDs analógicos são eliminados pelos multiplicadores digitais, em que não há erros DC decorrentes da multiplicação do sinal pela referência.

A reserva dinâmica, isto é, a razão entre o maior nível de ruído e o sinal de fundo de escala, de um PSD analógico é limitada a aproximadamente 60 dB (equivalente a um

fator 1000), logo se o nível de ruído for mais do que 1000 vezes superior ao fundo de escala, as medidas com PSD analógico conterà erros, dependentes da amplitude da entrada e causados pela não linearidade na multiplicação. Esses erros podem chegar 10% e, como ruídos são razoavelmente variáveis, os erros podem trazer grande incerteza a respeito das medidas. Em um lock-in digital, a reserva dinâmica pode atingir 100 dB, sendo limitada pela qualidade do conversor A/D: quanto melhor sua linearidade, maior sua capacidade de digitalizar corretamente o sinal. Uma vez digitalizados os dados, não existem mais margem para erros.

Por último, um PSD analógico linear multiplica o sinal por um sinal senoidal analógico de referência. Geradores analógicos de sinais senoidais são susceptíveis a deriva de amplitude, principalmente em função da temperatura, e, neste caso, qualquer variação na amplitude da referência é traduzida diretamente como uma variação no ganho geral. As referências digitais possuem amplitude precisa e constante, que evitam os erros de ganho presentes em PSDs analógicos.

Como as características de desempenho de um amplificador lock-in são majoritariamente definidas pelos PSDs, os amplificadores como PSDs digitais são superiores aos com PSDs analógicos em virtualmente todos os aspectos.

1.2.4 Fiducialização e alinhamento de magnetos

No ramo de aceleradores, a necessidade de garantir as tolerâncias de projeto para o alinhamento entre magnetos fez com que diversas técnicas experimentais fossem desenvolvidas ao longo dos anos. A técnica do fio vibrante foi desenvolvida originalmente por Temnykh (TEMNYKH, 1997), na Universidade de Cornell, como uma técnica para a caracterização completa do campo magnético ao longo de uma linha, que seria equivalente ao próprio eixo do feixe de partículas. Posteriormente, percebeu-se que a técnica poderia ser simplificada para se tornar um procedimento rápido e muito preciso para a fiducialização e o alinhamento de quadrupolos e sextupolos, tal como se espera para o Sirius. Neste contexto, fiducialização consiste na transferência de coordenadas de centro e eixo magnético de um ímã para referências mecânicas utilizadas em procedimentos de alinhamento.

Wolf (WOLF, 2005) faz um trabalho majoritariamente teórico e muito cuidadoso, descrevendo minuciosamente essa técnica, que foi então escolhida para a fiducialização de quadrupolos no LCLS (*Linac Coherent Light Source*), uma parte do laboratório nacional

SLAC (*Stanford Linear Accelerator Center*), nos Estados Unidos. Apresentando uma revisão histórica detalhada das diversas técnicas de fiducialização de quadrupolos utilizadas até então, o conteúdo deste seu trabalho é preciosamente didático, e, portanto, sua apresentação será aqui seguida, incluindo suas referências, para uma melhor contextualização.

1.2.4.1 *Bobina girante*

A bobina girante trata-se de uma técnica bastante comum para a fiducialização de quadrupolos, em que a corrente induzida em uma bobina em rotação permite a reconstrução dos multipolos magnéticos no seu eixo de giro, como demonstrado por Jain *et al.*, em 1998. Ainda, de acordo com Rago (RAGO, SPENCER, *et al.*, 2002), esta técnica apresenta grande sensibilidade, inferior à escala micrométrica, porém, a grande dificuldade associada a ela é na determinação exata do eixo de rotação da bobina, que em geral fica acima de poucos micrometros. Esta dificuldade, somada a limitações práticas de montagem em determinados casos, foi suficiente para motivar muitos grupos a buscarem técnicas alternativas baseadas em fios esticados, em que a definição axial pode ser obtida em nível micrométrico.

1.2.4.2 *Fio móvel*

Em 1991, Brueck *et al.* trabalharam na fiducialização dos quadrupolos do HERA (*Hadron Elektron Ring Anlage*), em Hamburgo, com a técnica do fio móvel, em que a tensão induzida em um fio em movimento por uma região com campo magnético é integrada para indicar a mudança de fluxo magnético no circuito. Isto só foi possível, no entanto, pois os quadrupolos supercondutores lá existentes tinham muitos metros de comprimento, logo, apresentando uma grande região com campo magnético. Ainda assim, cuidados especiais com forças eletromotrizes geradas por variações térmicas, por exemplo, tiveram de ser adotados. É, portanto, uma técnica bastante difícil, principalmente para magnetos menores, que constituem a grande maioria das aplicações.

1.2.4.3 Fio pulsado

Ainda em 1987, Warren e Elliot, no Laboratório Nacional de Los Alamos, e, em 1989, Fortgang no próprio SLAC, desenvolveram e trabalharam com a técnica do fio pulsado, que tem como princípio um fio esticado em que se aplica um curto pulso de corrente. Se o fio estiver em uma região com campo magnético, uma força de Lorentz provocará a sua movimentação. Neste caso, o magneto pode ser movido até que o fio não se mova quando da aplicação desses pulsos. A principal limitação da técnica é quanto a erros angulares dos magnetos em relação ao eixo do fio, apresentando baixa sensibilidade, pois, de fato, existem infinitas linhas em que a integral de campo no fio é zero. Consequentemente, uma única posição reproduzível não pode ser obtida.

1.2.4.4 Fio vibrante por ondas mecânicas

Ainda no SLAC, em 1992, Fischer *et al.* (FISCHER, 1992) utilizaram a técnica do fio vibrante por ondas mecânicas, geradas a partir de alto-falantes. Assim como no fio móvel, é a tensão induzida no fio a variável monitorada, e o magneto é movido até que esta tensão seja zero. A técnica é muito sensível a variações de posição dos ímãs, porém, devido à atuação de partes mecânicas ao longo do fio, torna-se problemático determinar o eixo do fio com precisão. E, a exemplo da técnica anterior, novamente existe o problema de infinitas linhas de integral de campo zero e consequente indeterminação unívoca da posição do magneto.

1.2.4.5 Fio vibrante

Finalmente, em 1996, Temnykh desenvolveu no Laboratório de Estudos Nucleares, na Universidade de Cornell, uma técnica de fio vibrante que é similar à técnica do fio pulsado, mas com o uso de corrente alternada em vez de um pulso de corrente (TEMNYKH, 1997). Por simplicidade, esta técnica de fio vibrante por corrente alternada será chamada a partir daqui apenas de técnica do fio vibrante.

O princípio da técnica é a utilização de ressonâncias de um fio esticado, provocadas pela força de Lorentz, para a detecção dos campos magnéticos. A primeira característica a ser observada é que, estando esticado entre dois nós, o fio possui modos naturais de vibração, como discutido na seção 1.2.2.2. Depois, como visto na seção 1.2.1,

havendo um campo magnético transversal ao fio, a passagem de uma corrente provoca o surgimento de uma força magnética. Finalmente, como visto em 1.2.2.4, se a frequência dessa força, neste caso dada pela frequência da corrente alternada, corresponder a uma das frequências naturais do fio, o sistema entrará em ressonância. A amplitude e a fase dessa excitação dependem da distribuição de campo ao longo do fio e, de fato, por meio da excitação dos diversos modos de vibração, e da medição de amplitude e fase de cada vibração resultante, é possível reconstruir todo o perfil magnético da região do fio, de acordo com o Teorema de Fourier descrito seção 1.2.2.3.

Diferentemente das demais técnicas mencionadas, o fio vibrante permite, via a avaliação de diferentes harmônicos, a determinação dos ângulos de interesse, e, conseqüentemente, uma fiducialização única. Além disso, aproveitando-se do fenômeno de ressonância, esta técnica mostra uma sensibilidade extraordinária, submicrométrica.

1.2.4.5.1 Equações de movimento

Wolf (WOLF, 2005) faz a dedução detalhada do sistema de uma corda esticada entre dois nós, incluindo efeitos de atrito e da gravidade, que são tipicamente desprezados em deduções de livros texto. O desenvolvimento completo pode ser encontrado na referência, logo, aqui serão expostas apenas as equações relevantes para o entendimento e a aplicação da técnica.

Considere-se um segmento de fio como o da Figura 17:

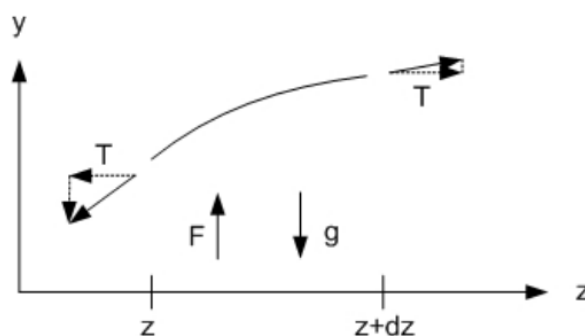


Figura 17: Segmento de fio mostrando a tensão T sobre o fio, e a força por unidade de comprimento e a gravidade atuando sobre ele. [Fonte: (WOLF, 2005)]

A equação diferencial do fio na direção y (vertical) surge diretamente da aplicação da lei de Newton:

$$T \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right) \Big|_{z+dz} - T \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right) \Big|_z - \mu dz g + F_l dz - \alpha_l \frac{\partial y}{\partial t} dz = \mu dz \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (35)$$

onde dz é um elemento infinitesimal do fio; T é a tração, ou tensão, sobre ele; μ é a massa por unidade de comprimento; g é a aceleração da gravidade; F_l é a força por unidade de comprimento; α_l é o coeficiente de atrito por unidade de comprimento, relacionado à força de atrito por meio da velocidade $\partial y / \partial t$; $\partial^2 y / \partial t^2$ é a aceleração; e $\partial y / \partial z$ é a tangente ao fio, avaliada nas duas extremidades.

Fazendo-se uma pequena manipulação e substituindo a força sobre o fio pela força de Lorentz $F_l = I(t)B_x(z)$, a equação anterior é simplificada para:

$$\mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \alpha_l \frac{\partial y}{\partial t} - T \left(\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \right) = -\mu dz g + I(t)B_x(z) \quad (36)$$

As condições de contorno são dadas pelas extremidades fixas do fio, ou seja: $y(z = 0, t) = y(z = L, t) = 0$, para qualquer t . Então, a solução será dada pela composição da solução homogênea com a solução particular do lado direito da equação.

Na solução homogênea, utiliza-se o método de separação de variáveis e as soluções do tipo somatória de Fourier para a parte espacial e exponencial para a temporal, chegando-se a:

$$y_h(z, t) = \text{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n e^{-\frac{\alpha}{2}t} e^{i\sqrt{\omega_n^2 - \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2}t} + B_n e^{-\frac{\alpha}{2}t} e^{-i\sqrt{\omega_n^2 - \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2}t} \right] \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right) \quad (37)$$

onde $\alpha = \alpha_l / \mu$; $\omega_n^2 = (T/\mu)(n\pi/L)^2$, com $\alpha \ll \omega_n$; e A_n e B_n são constantes complexas arbitrárias.

A partir da definição de ω_n , a frequência teórica para o modo fundamental é:

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (38)$$

Uma primeira avaliação experimental de ω_1 , por sua vez, pode ser feita a partir da medida de decaimento da vibração no fio após uma excitação instantânea, com uma

palheta, por exemplo. Neste caso, seguindo a solução da equação homogênea, a frequência de oscilação medida será $\sqrt{\omega_1^2 - (\alpha/2)^2}$, com $\alpha/2$ associado à constante de decaimento do sistema, τ :

$$\tau = \frac{2}{\alpha} \quad (39)$$

A solução particular para a componente da gravidade é independente do tempo, sendo obtida a partir de duas integrações simples. Aplicando-se as condições de contorno, chega-se a:

$$y_g(z) = \frac{\mu g}{2T} z(z - L) \quad (40)$$

que é sempre negativa fora das extremidades, onde $0 < z < L$.

A sagita é o ponto de mínimo de y_g , onde $\partial y_g / \partial z = 0$, e ocorre para $z = L/2$, tal que:

$$s = \frac{\mu g L^2}{8T} = \frac{g}{32f_1^2} \quad (41)$$

Como f_1 pode ser muito precisamente determinada, a sagita também pode ser melhor estimada do que por meio de medição direta. O conhecimento da sagita é importante quando é necessário algum tipo de compensação, como quando a medição da posição do fio é feita longe do magneto, por exemplo.

Rigorosamente, a figura geométrica resultante do peso próprio de um fio esticado é uma catenária, em vez da parábola obtida na equação (40). Entretanto, a equação da catenária, dada, em torno do zero, por $y = (a/2)(e^{z/a} + e^{-z/a})$, é muito bem aproximada por uma parábola se $a \gg z$. No caso, $a = T/\mu g$, é da ordem de 10^4 m, enquanto z é da ordem 1 m, logo, a aproximação é plenamente aplicável. Isso quer dizer que o peso linear do fio é muito menor do que a tração nele aplicada. Na derivação das equações, a aproximação foi feita inadvertidamente ao se considerar, na equação (36), o peso do elemento igual μdzg em vez de $\mu ds g$. De fato, o elemento ds refere-se ao comprimento real ao longo do fio, enquanto dz é apenas sua projeção no eixo z .

Por fim, resta a solução particular devida a um campo externo e uma corrente de excitação do tipo $I(t) = I_0 e^{i\omega t}$. Novamente a opção de solução, em função das condições de contorno, é uma série de Fourier. Perto de alguma ressonância, isto é, $\omega \approx \omega_n$, esta solução particular pode ser simplificada para:

$$y_B^{res}(z, t) \cong \frac{I_0 B_{xn}}{\mu \omega_n \alpha} \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right) \cos\left(\omega_n t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (42)$$

onde $B_{xn} = 2/L \int B_x(z) \sin(n\pi z/L) dz$.

A solução total é dada pela soma das equações (37), (40) e (42), isto é, $y(z, t) = y_h(z, t) + y_g(z) + y_B^{res}(z, t)$, porém, a última é a solução fundamental para a técnica do fio vibrante, uma vez que a solução homogênea decairá com o tempo e não será utilizada nas medidas, e a solução relacionada à gravidade é independente do tempo.

Para o caso da vibração horizontal, a solução é a mesma, a menos de duas mudanças: não existe a componente da gravidade como solução particular e a força de Lorentz na direção x é dada por $F_l = -I(t)B_y(z)$.

1.2.4.5.2 Aplicação da técnica

Em termos de fiducialização, duas abordagens são possíveis. A mais complexa é a técnica original (TEMNYKH, 1997), baseada na medida dos vários harmônicos e, portanto, capaz de reconstruir todo o perfil de campo, como visto na Figura 18. Eventuais desalinhamentos geram perfis característicos de campo e podem ser corrigidos ao final de cada medida completa. Neste caso, as medidas são feitas com o fio na mesma posição, a partir de varreduras em frequência em torno das frequências de ressonância para a determinação das amplitudes máximas de cada modo.

A abordagem mais simples, também utilizada por Temnykh (TEMNYKH, 1997) (TEMNYKH, 1999) (TEMNYKH, 2001), e otimizada por Wolf (WOLF, 2005), utiliza apenas um ou dois modos ressonantes, sendo que, neste último caso, um modo é mais sensível à determinação do centro magnético e outro ao alinhamento do eixo magnético. Desta vez, são realizadas translações e rotações no fio ou no magneto, buscando a minimização da amplitude vibração.

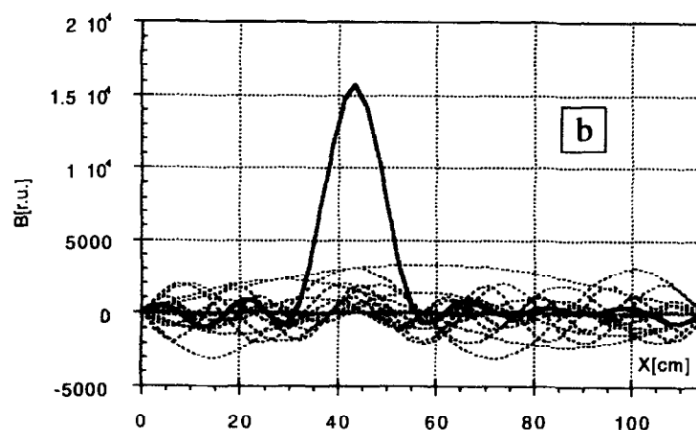


Figura 18: Reconstrução do perfil de campo magnético a partir dos diversos harmônicos ressonantes. As linhas pontilhadas correspondem às componentes do campo magnético de 13 harmônicos analisados, enquanto a linha contínua é o próprio campo reconstruído. [Fonte: (TEMNYKH, 1997)]

Realmente, como pode ser observado no exemplo de Temnykh (1997) da Figura 19, desalinhamentos de translação provocam um máximo de campo magnético na posição longitudinal central do magneto, enquanto que desalinhamentos rotacionais provocam, nesta posição, um “nó”, com campos magnéticos de sentidos opostos antes e depois. Sendo assim, é razoável inferir que o primeiro caso é mais eficiente em estimular modos normais da corda que apresentam um máximo na posição do magneto, ao passo que o segundo é mais eficiente em estimular um modo que apresente um nó nessa posição.

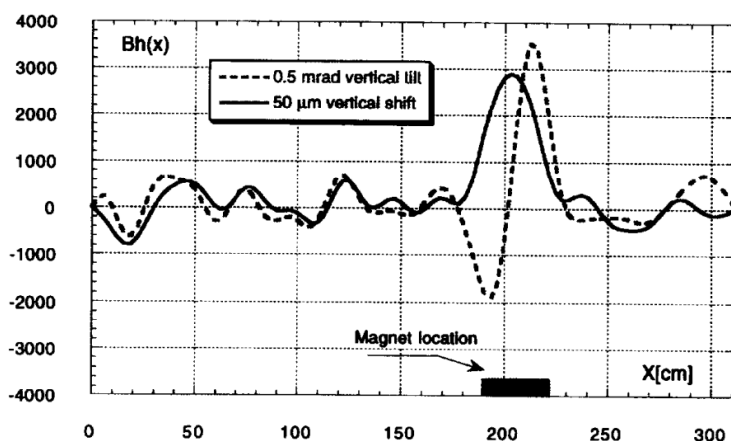


Figura 19: Perfil de campo magnético horizontal de um quadrupolo em duas condições de desalinhamento: a linha contínua é decorrente de um desalinhamento vertical de 50 μm , enquanto a linha pontilhada é causada por um desalinhamento *yaw* de 0.5 mrad. [Fonte: Temnykh, 1997]

Colocando de outra maneira, a posição longitudinal do magneto ao longo do fio pode ser otimizada para que se tenha uma maior sensibilidade a determinados erros em função do harmônico analisado. O harmônico fundamental, apesar de apresentar tipicamente a maior amplitude de vibração, é sensível a campos magnéticos externos constantes, como o campo terrestre, os quais provocam um erro de deslocamento na determinação do centro magnético.

Portanto, como se deseja uma posição do magneto que seja um máximo para um dado modo e um nó para outro, é conveniente trabalhar com o segundo harmônico para alinhamento translacional e com o quarto harmônico para alinhamento rotacional. Com isso, as posições mais adequadas para o magneto são $z = L/4$ ou $z = 3L/4$.

Além da otimização da posição do magneto, a posição do sensor de vibração também deve ser considerada. Como a amplitude do quarto harmônico é tipicamente menor, torna-se conveniente posicionar o sensor em um ponto de máximo deste modo de vibração. Assim, as posições $z = L/8$ ou $z = 7L/8$ são as mais convenientes.

Detecção de desalinhamento translacional em quadrupolos

Supondo-se: um quadrupolo em $z = L/4$, com um desalinhamento vertical constante ao longo do fio; um campo horizontal B_x constante ao longo do comprimento do magneto; e o comprimento do quadrupolo L_Q muito menor do que o comprimento do fio ($L_Q \ll L$); então o coeficiente da expansão de seno B_{x2} na equação (42) pode ser aproximado por:

$$B_{x2} = \frac{2B_x L_Q}{\pi} = -\frac{2GL_Q y}{\pi} \quad (43)$$

onde $B_x = -Gy$ define o campo em função do gradiente do quadrupolo, G , e considera-se y a distância vertical do magneto em relação ao fio, tal que o fio está na posição $-y$ em relação ao centro do quadrupolo.

Finalmente, a amplitude de oscilação na posição do sensor $z = 7L/8$ será dada a partir da equação (42):

$$y_B^{res} \left(z = \frac{7L}{8}, t \right) \cong \frac{\sqrt{2}I_0 G L_Q}{\mu \omega_2 \alpha L} y \cos \left(\omega_2 t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (44)$$

A amplitude de vibração deverá variar linearmente com y :

$$A_{det} = \left(\frac{\sqrt{2}I_0GL_Q}{\mu\omega_2\alpha L} \right) |y| \quad (45)$$

e a fase será:

$$\phi_{det} = -\text{sign}(y) \left(\frac{\pi}{2} \right) \quad (46)$$

Ou seja, assumindo a convenção que $B_x > 0$ para $y < 0$ e $B_x < 0$ para $y > 0$, o primeiro caso leva a uma diferença de fase $\phi_{det} = \pi/2$ e o segundo a $\phi_{det} = -\pi/2$, com uma mudança de fase abrupta ao passar por $y = 0$.

A Figura 20 mostra o comportamento da amplitude e da fase descritas nas equações anteriores:

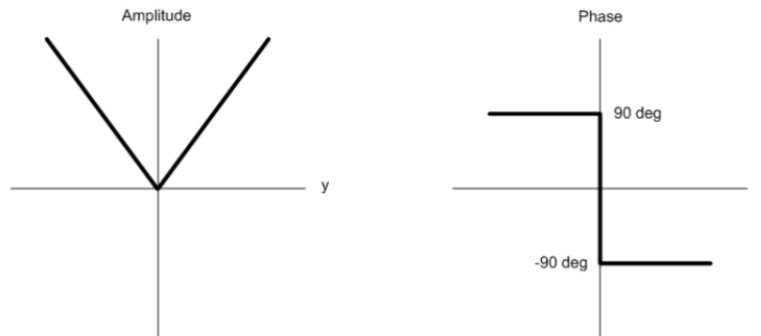


Figura 20: Amplitude (esquerda) e fase (direita) da vibração do fio para uma varredura vertical na posição de um quadrupolo para um dado harmônico. [Fonte: (WOLF, 2005)]

Para um desalinhamento horizontal, a equação (45) é escrita em termos de x : $A_{det} = (\sqrt{2}I_0GL_Q/\mu\omega_2\alpha L)|x|$; e equação (46) apresenta uma inversão de fase, em função da força de Lorentz apresentada anteriormente, tal que $\phi_{det} = \text{sign}(y)(\pi/2)$.

Detecção de desalinhamento rotacional em quadrupolos

Agora para um desalinhamento puro do tipo *pitch* (θ), a posição y do eixo magnético irá variar ao longo de z , tal que $y_{eixo} = \theta(z - L/4)$, onde θ é o pequeno erro angular. Logo, o campo magnético sobre o fio será dado pelo gradiente do campo

multiplicado pela posição y do fio em relação ao centro do magneto, tal que $B_x(z) = -G\theta(z - L/4)$.

Partindo novamente da equação (42) e mantendo a aproximação $L_Q \ll L$, o coeficiente da expansão de seno B_{x4} pode ser aproximado por:

$$B_{x4} = \frac{2\pi}{3} GL_Q \left(\frac{L_Q}{L}\right)^2 \theta \quad (47)$$

Finalmente, a amplitude de oscilação na posição do sensor será:

$$y_B^{res} \left(z = \frac{7L}{8}, t \right) \cong -\frac{2\pi I_0 GL_Q}{3 \mu \omega_4 \alpha} \left(\frac{L_Q}{L}\right)^2 \theta \cos \left(\omega_4 t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (48)$$

De modo análogo ao desalinhamento translacional, percebe-se que a amplitude de vibração deverá variar linearmente com θ :

$$A_{det} = \left(\frac{2\pi I_0 GL_Q}{3 \mu \omega_4 \alpha} \left(\frac{L_Q}{L}\right)^2 \right) |\theta| \quad (49)$$

e a fase será:

$$\phi_{det} = \text{sinal}(\theta) \left(\frac{\pi}{2} \right) \quad (50)$$

Para desalinhamentos do tipo *yaw* (ψ), resultam $A_{det} = \left(\frac{2\pi I_0 GL_Q}{3 \mu \omega_4 \alpha} \left(\frac{L_Q}{L}\right)^2 \right) |\psi|$ e $\phi_{det} = -\text{sinal}(\psi)(\pi/2)$.

Para desalinhamentos do tipo *roll* (φ), infelizmente não existe uma relação analítica simples como para *pitch* e *yaw*. Wolf nem mesmo chega a tratar do problema, pois essa tolerância no LCLS era de 10 mrad, o que é facilmente garantido pela precisão de produção dos magnetos e por técnicas mecânicas. Entretanto, como mostra Vrankovic (VRANKOVIC, WOUTERS, *et al.*, 2014), o desalinhamento tipo *roll* pode ser determinado indiretamente a partir de um procedimento experimental conveniente, que será descrito na seção 2.

1.2.4.5.3 Efeito de erros de posicionamento longitudinal

Como as deduções de detecção de Wolf (WOLF, 2005) presumem posições longitudinais específicas para o magneto e para o sensor, ele prossegue ainda com análises para erros nessas posições. As conclusões são que, de fato, tanto pequenas variações na posição do sensor, como também variações na posição do magneto ($\Delta z \ll L_Q$), provocarão pequenas mudanças na sensibilidade do sinal (A_{det}), porém, não afetarão de nenhum modo a capacidade de determinação do eixo magnético em si.

1.2.4.5.4 Visão esquemática da montagem experimental

Finalmente, para que toda esta teoria possa ser aplicada, deve-se ter uma montagem experimental similar ao diagrama esquemático da Figura 21:

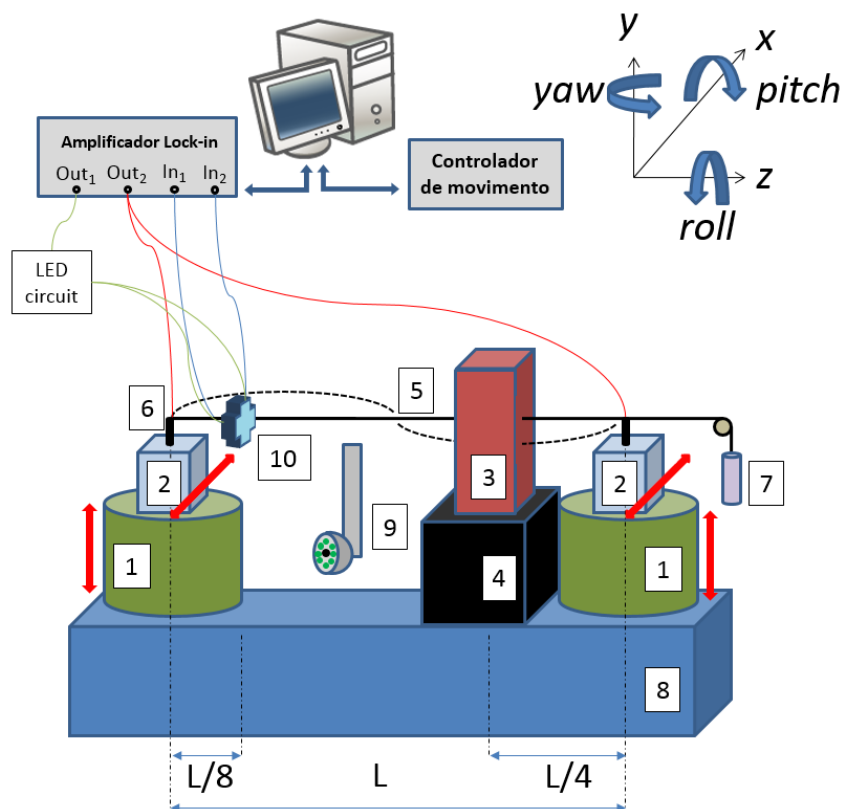


Figura 21: Diagrama esquemático da montagem do fio vibrante no LNLS: 1) estágios de movimentação vertical (y) para as extremidades do fio; 2) estágios de movimentação horizontal (x) para as extremidades do fio; 3) magneto; 4) base para magneto; 5) fio; 6) extremidade fixa do fio; 7) massa conhecida na extremidade móvel do fio para aplicação de uma tensão constante; 8) MMC, responsável pela fiducialização do fio; 9) instrumento de medição da MMC; e 10) sensores de movimentação vertical e horizontal. [Fonte: autor]

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Temnykh (TEMNYKH, 1997) desenvolveu a técnica do fio vibrante por corrente alternada para atender às necessidades de alinhamento de quadrupolos magnéticos no projeto CESR (*Cornell Electron-positron Storage Ring*) Phase III, no Laboratório de Estudos Nucleares da Universidade de Cornell, nos Estados Unidos. Neste projeto, os quadrupolos iriam dentro de um detector, na presença de um forte campo magnético, exigindo que o alinhamento desses dispositivos fosse feito já em suas posições finais. Ferramentas ópticas não poderiam ser utilizadas, pois esses magnetos estariam dentro de criostatos. Sendo assim, a alternativa seria utilizar uma técnica de medida magnética com fio para o alinhamento.

A técnica do fio pulsado, muito utilizada em aplicações similares possui o inconveniente de exigir, de modo a evitar interferências no sensor, um comprimento de fio 50% maior do que o da região de interesse, que neste projeto era de 6 m. O espaço disponível para medições foi, portanto, limitante. Outra complicação da técnica do fio pulsado seria a geração de pulsos curtos de alta tensão. Desse modo, motivado pelas condições práticas restritas, Temnykh elaborou a técnica do fio vibrante por corrente alternada, que supera as questões colocadas.

Na derivação das equações que descrevem o sistema físico, Temnykh destaca que a resolução espacial da reconstrução do perfil de campo magnético é limitada pelo número de harmônicos utilizados, sendo aproximadamente igual ao menor comprimento de onda excitado. Neste formalismo, é definida uma função da frequência que relaciona o deslocamento detectado pelos sensores ao campo magnético do respectivo modo.

Na montagem foram utilizados: um fio de cobre-berílio de 0.1 mm de diâmetro; como sensor, um fototransistor-LED da Motorola, o H21A1; um pequeno magneto permanente e um computador Macintosh Quadra 800, com uma placa de interface Lab-NB para I/Os da *National Instruments*. Um código feito em LabVIEW permitia a varredura em frequência, registro e manipulação de sinais, ajuste de curvas em gráficos, entre outras funções, dando como resultado o perfil de campo magnético ao longo do fio.

Com comprimento de fio de 1 m e o uso de 13 harmônicos, o erro de detecção de campo foi inferior a 17.5 Gcm, equivalente a erros de alinhamento inferiores a 1 μm . Posteriormente, aumentando o comprimento do fio para 3 m, as análises puderam chegar até o 30º harmônico. Então, com um quadrupolo de magnetos permanentes, a partir de

variações translacionais e rotacionais conhecidas, foram feitas considerações a respeito das distribuições magnéticas observadas em cada caso, assim como uma calibração da escala a partir de valores de campo reais obtidos de caracterizações com uma ponta de prova Hall.

Finalmente, algumas considerações práticas importantes foram colocadas. Primeiramente, o fraco amortecimento do sistema, ao mesmo tempo que garantia a excelente sensibilidade da técnica, exigia um tempo de 3 a 5 segundos para a equilíbrio, fazendo com que medidas de muitos harmônicos levassem um tempo não desprezível. Por exemplo, para 13 harmônicos eram necessários 10 minutos, enquanto que para 30, 25 minutos. Diante disso, o procedimento de alinhamento poderia ser simplificado utilizando apenas dois modos, um para a determinação do centro e outro para a correção dos ângulos. Outro ponto é que a largura de pico à meia altura de um sinal para uma distribuição de campo estreita é aproximadamente igual ao menor comprimento de onda. E o terceiro aspecto está relacionado ao efeito de campos na extremidades do fio, havendo duas conclusões principais: a diferença entre os perfis de campo real e medido em torno das extremidades está localizada em uma região aproximadamente igual ao menor comprimento de onda; e, conseqüentemente, campos diferentes de zero nas extremidades não provocam efeitos na determinação do campo longe dessas regiões.

Dando continuidade ao trabalho no CESR, Temnykh (TEMNYKH, 1999) utilizou o modo simplificado de sua técnica para determinar o centro magnético de protótipos dos quadrupolos supercondutores definitivos, com 0.65 m de comprimento. Seu principal objetivo no momento era demonstrar que a técnica poderia, de fato, ser utilizada para este tipo de alinhamento. A simplificação foi pelo fato de que em vez da reconstrução de todo o perfil de campo a partir dos diversos harmônicos, foi utilizado apenas o harmônico de ordem 2, suficiente para detectar o centro magnético e menos sensível a campos uniformes de fundo.

Pelo fato dos mecanismos de ajuste dos quadrupolos estarem dentro de criostatos e, portanto, inacessíveis durante a operação, o alinhamento final precisaria ser feito à temperatura ambiente, o que impediria que altas correntes fossem utilizadas, para não acarretarem o superaquecimento das bobinas. Isto exigiria da técnica escolhida uma grande sensibilidade, compatível com gradientes baixos, no caso, $3.96 \cdot 10^{-2}$ T/m. Com o intuito de maximizar o efeito de ressonância, o magneto foi posicionado em um dos máximos do segundo harmônico.

O fio de cobre-berílio de 0.1 mm foi mantido e o comprimento do fio foi 2.5 m. Além disso, as extremidades do fio foram colocadas sobre mesas lineares motorizadas para movimentação vertical e horizontal. O parâmetro escolhido para análise nessas medidas foi a média temporal do produto da posição transversal do fio (indicada pelos sensores de movimento) pela corrente, o qual varia linearmente com a distância do fio ao centro magnético e é zero precisamente nesta posição.

Um fato interessante é que, trabalhando na frequência de ressonância, pequenas dessintonias provocadas por variações térmicas, por exemplo, provocavam grande ruído. Portanto, optou-se por trabalhar 1.5 Hz abaixo desse valor, onde o ruído foi bastante reduzido e a sensibilidade ainda era alta. Ademais, medidas foram realizadas revertendo-se a polarização das bobinas, de modo a descontar campos de fundo.

As precisões obtidas na determinação do centro magnético foram estimadas em $\pm 17 \mu\text{m}$ na vertical e $\pm 9 \mu\text{m}$ na horizontal, limitadas por erros aleatórios na medição do parâmetro utilizado, principalmente decorrentes de flutuações da frequência de ressonância em função de variações de temperatura e movimentações de ar. A $17 \mu\text{m}$ do centro do quadrupolo, o campo seria de $6.6 \cdot 10^{-7} \text{ T}$, apenas 1% do campo de fundo.

Temnykh (TEMNYKH, 2001) publicou posteriormente os resultados do alinhamento real de quatro quadrupolos supercondutores de 0.65 m, instalados dois a dois dentro de um criostato cilíndrico. A exemplo do que ocorreu com o protótipo, por estarem à temperatura ambiente, a máxima corrente possível nas bobinas na etapa de alinhamento foi de 2 A, resultando em um gradiente de $7.92 \cdot 10^{-2} \text{ T/m}$. As condições experimentais foram as mesmas citadas no trabalho anterior.

A primeira etapa do procedimento de alinhamento foi a localização do centro mecânico do criostato, feita a partir do contato elétrico do fio de medição com fios de referência esticados nos flanges de entrada e saída do criostato. O erro na determinação da posição do fio foi estimado em menos de $25 \mu\text{m}$. Uma vez determinada a posição do fio de prova e com a frequência da corrente do fio ajustada para o segundo harmônico, eram realizadas varreduras com os estágios de translação e a medição do parâmetro já citado, isto é, a média do produto da posição pela corrente.

Após a localização do centro magnético, o fio era retornado para o centro do criostato, levando-se em conta a correção da sagita provocada pela ação da gravidade no fio para os valores encontrados no plano vertical. Então, eram feitos os ajustes necessários nos suportes dos quadrupolos e com algumas iterações o alinhamento

estava completo, quando os quadrupolos ligados ou desligados não produziam qualquer efeito sobre o fio. Cada varredura levava cerca de 15 minutos.

O fio utilizado possuía 3.02 m de comprimento e foi colocado de tal maneira que o nó do segundo harmônico estava simetricamente posicionado em relação aos dois quadrupolos de cada criostato, garantindo a mesma sensibilidade de medida par ambos. O erro estimado na determinação do centro magnético foi entre 10 e 30 μm , e, após os ajustes, os desvios de centro de três quadrupolos estiveram abaixo de 0.1 mm, enquanto o quarto ficou em 0.159 mm em função do limite de ajuste mecânico deste, o que foi considerado suficiente neste caso.

Wolf (WOLF, 2005), como mencionado, também trabalhou a técnica do fio vibrante simplificada para a fiducialização de quadrupolos no LCLS, no SLAC. A escolha foi feita em função da possibilidade de caracterização única e da grande sensibilidade da técnica, com o objetivo de atingir erros de alinhamento inferiores a 25 μm , impostos pelos parâmetros teóricos do acelerador e que estão muito abaixo dos valores aceitos no CESR.

Após a revisão histórica e derivação das equações, foi apresentado o projeto a ser construído no LCLS. Por opção, as extremidades do fio seriam fixas, deixando o estágio de movimentação para o quadrupolo, enquanto a tração no fio seria mantida por um peso conhecido. Além dos sensores de vibração do fio, foram utilizados também sensores para a determinação de sua posição. O procedimento de fiducialização foi, então, dividido em três etapas, a saber: movimentação do quadrupolo até o eixo do fio, monitorando os sensores de vibração; localização do fio com os sensores de posição; e localização de esferas de referência dos sensores de posição do fio e do quadrupolo. O erro final seria a soma em quadratura dos erros esperados em cada uma das etapas: 10 μm , 15 μm e 10 μm , respectivamente.

Os sensores de vibração do fio foram um desenvolvimento próprio e consistiam em dois detectores ortogonais entre si, cada um composto por um laser, uma fenda e um fotodiodo. A sensibilidade esperada era da ordem 10 $\mu\text{V}/\mu\text{m}$. O quadrupolo era convenientemente posicionado a 1/4 do comprimento do fio, garantido uma crista do segundo harmônico, utilizado para o alinhamento de posição (x e y), e um nó do quarto harmônico, utilizado no alinhamento angular ($pitch$ e yaw). O uso do primeiro harmônico seria proibitivo pela interferência de campos externos constantes, tal qual o campo magnético terrestre.

Os sensores de vibração, por sua vez, eram posicionados estrategicamente a $7/8$ do comprimento do fio, garantindo uma boa leitura do segundo harmônico e um máximo do quarto harmônico. Já os sensores de posição do fio, também sem contato, seriam similares aos sensores de vibração, adicionando-se escalas graduadas calibradas e esferas de referência. Dois conjuntos eram utilizados, um de cada lado do quadrupolo, de modo a minimizar os efeitos de sagita. As esferas de referência eram finalmente medidas com uma máquina de medição por coordenada.

Neste trabalho, Wolf demonstrou ainda as soluções completas das equações de movimento do fio para as direções vertical e horizontal, levando em conta a gravidade, a excitação magnética e efeitos de amortecimento. Com os resultados, ele discute a constante de amortecimento do sistema, as condições de ressonância, com a resposta defasada em $\pm 90^\circ$ em relação à excitação, o sinal de resposta em função do gradiente do quadrupolo, e os efeitos de erro de posicionamento para as aproximações realizadas. Finalmente, foram utilizados parâmetros conhecidos e números aproximados para estimar algumas grandezas, tais como a frequência fundamental e a sagita, bem como resultados de sensibilidade esperados com o sistema.

Levashov e Wolf (LEVASHOV e WOLF, 2006) apresentaram os primeiros resultados concretos do projeto descrito anteriormente. A bancada experimental construída contava com um pequeno quadrupolo permante sobre um suporte, em vez dos eletromagnetos reais, uma vez que estes ainda não haviam sido fabricados. Como instrumento de medição da bancada foi utilizado um braço de medição tridimensional FaroArm, em vez de uma MMC.

As respostas dos detectores de vibração, avaliadas para certificação da linearidade na região de operação de forma a garantir sinais de saída senoidais, foram satisfatórias. As respostas dos detectores de posição, por sua vez, apresentaram assimetrias e padrões de interferência nos sinais. Porém, ainda assim apenas a determinação da posição central do fio apresentou repetibilidade de $2 \mu\text{m}$.

A calibração dos sensores foi feita em uma MMC com a leitura das escalas graduadas, resultando em uma incerteza média de $4 \mu\text{m}$. Uma vez os sensores centralizados no fio, o FaroArm foi usado para medir suas esferas de referência e os dados obtidos foram confrontados com valores teóricos do fio naquelas posições, calculados a partir da medição das extremidades do fio também com o FaroArm, que apresenta uma incerteza de aproximadamente $25 \mu\text{m}$. Erros de algumas dezenas de micrometros foram constatados nesta etapa e uma conclusão importante foi que os erros

associados ao uso do FaroArm impediriam o enquadramento do sistema nas tolerâncias necessárias ao projeto.

Na sequência, os autores apresentaram um teste de inversão do quadrupolo, primeiramente na vertical e depois na horizontal, de modo a investigar a contribuição de campos externos, que gerariam um erro entre o eixo magnético do quadrupolo e o eixo de campo magnético nulo determinado pelo fio. Os sensores de posição do fio foram utilizados para reposicioná-lo após cada inversão. Enquanto o resultado das variações foi de $2 \pm 3 \mu\text{m}$ na horizontal, ele chegou a $11 \pm 3 \mu\text{m}$ na vertical, indicando uma possível contribuição de componentes de Fourier de segunda ordem ao campo magnético externo, o que foi atribuído a peças de aço, como parafusos e porcas, na região da montagem.

Para a certificação do domínio da técnica, dados experimentais foram confrontados com os cálculos teóricos do trabalho anterior de Wolf. A frequência do segundo harmônico esperada era de 254 Hz, um pouco superior aos valores encontrados, entre 220 e 240 Hz, o que pode ser devido a atritos entre o fio e as extremidades, reduzindo o valor real de tração do fio. A sagita, calculada a partir da frequência fundamental medida, teria um máximo de 23 μm , no centro do fio, e seus valores intermediários, nos pontos dos sensores e do ímã, foram utilizados para correção dos valores medidos com os sensores de posição verticais.

Medidas do tempo de decaimento, característico do amortecimento do sistema, com um osciloscópio resultaram $760 \pm 50 \text{ ms}$, consistentes, portanto, com o valor de 1 segundo estimado no trabalho anterior. Além disso, as sensibilidades - definidas como a amplitude de vibração do fio no detector por unidade de movimentação vertical/horizontal do quadrupolo (para x e y), ou por unidade de variação angular (para *pitch* e *yaw*) - foram calculadas, resultando, respectivamente: $0.15 \pm 0.01 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ e $0.082 \pm 0.008 \mu\text{m}/\text{rad}$; e confrontadas com as experimentais $0.16 \pm 0.01 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ para x , $0.18 \pm 0.01 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ para y , $0.088 \pm 0.005 \mu\text{m}/\text{mrad}$ para *pitch* e $0.081 \pm 0.006 \mu\text{m}/\text{mrad}$ para *yaw*, mostrando um acordo aceitável.

Por fim, foi feita uma discussão sobre o acoplamento entre movimentos, principalmente entre *pitch* e y e entre *yaw* e x , e constatado que eram necessárias algumas iterações para a convergência do alinhamento, tipicamente entre 3 e 4.

Levashov e Wolf (LEVASHOV e WOLF, 2007) descreveram a continuidade do trabalho no SLAC e o sistema melhorado, com uma nova fonte de alimentação para os detectores de posição e uma mesa de movimentação motorizada com 5 graus de

liberdade (projeto próprio) para o quadrupolo, em vez da mesa óptica utilizada anteriormente. No entanto, o maior ganho foi indiscutivelmente com o uso de uma MMC Leitz 12 10 6 PMM em vez do FaroArm. A MMC era operada em uma sala com controle de temperatura em 0.1°C, permitindo que ela fosse calibrada para uma repetibilidade de 0.2 µm e acurácia de 1.5 µm em toda a faixa de 1 m utilizada nas medidas.

Novas medidas de repetibilidade, a partir das esferas de referência nos detectores de posição e no quadrupolo, foram realizadas com a MMC, e, portanto, incluíam tanto a repetibilidade de alinhamento como a da própria máquina. Os desvios foram sempre inferiores a 4 µm. Ainda em relação aos sensores de posição, dessa vez a calibração foi totalmente feita com a MMC, eliminando a leitura da escala graduada, e os erros finais foram inferiores a 5 µm. Nesta etapa, o alinhamento da perpendicularidade dos sensores em relação ao fio (erros do tipo *yaw*) foram otimizados para melhor do que 2 mrad, assim como o alinhamento em relação à gravidade (erros do tipo *roll*).

Então, mais uma vez com os sensores instalados no sistema, as medidas de posição x e y do fio, dadas pelos sensores, foram comparadas às calculadas a partir de medidas de posição dos nós. A medida dos nós do fio somou uma incerteza máxima de 5 µm, e o resultado desta comparação foi de desvios de até 20 µm. Outra comparação foi para a posição do fio no centro do quadrupolo, agora relacionando valores calculados a partir dos nós com os calculados a partir dos sensores. O resultado foi uma variação de 11 ± 6 µm para x e 4 ± 6 µm para y , a partir de uma média de 5 medidas.

Medidas com inversões do quadrupolo foram novamente realizadas para avaliação de campos externos. As médias das diferenças observadas na horizontal foram reduzidas de 2 µm para 0.1 µm, enquanto na vertical de 11 µm para 0.1 µm. Também foram conduzidos estudos para caracterizar a nova mesa de movimentação do quadrupolo, com testes individuais para x , y , *pitch* e *yaw*. A presença de acoplamento entre graus de liberdade foi novamente encontrada, chegando a cerca de 15 µm e até 250 µrad. Um programa era utilizado para alinhar o magneto em relação ao fio, repetindo o processo até o magneto deixar de se mover entre as iterações. *pitch* e *yaw* apresentaram tipicamente uma relação sinal ruído menos favorável, dificultando o alinhamento.

Para avaliar uma possível variação das condições experimentais com influência significativa nos erros, foram realizadas medidas da espesura do fio (diâmetro nominal de 100 µm) para dois casos, a saber: sem uso e após 10 dias sob a tensão de operação. O

resultado foi de $110 \pm 1 \mu\text{m}$ e $103 \pm 1 \mu\text{m}$, respectivamente, sugerindo o escoamento do material e mostrando uma influência maior do que os $100 \pm 4 \mu\text{m}$ assumidos nos cálculos.

Os erros finais estimados para o sistema foram somados em quadratura, por serem considerados independentes, resultando, respectivamente, $13 \mu\text{m}$ e $8 \mu\text{m}$ para as direções x e y (se somados diretamente resultariam em $25 \mu\text{m}$ e $18 \mu\text{m}$). Ao final, o sistema foi considerado adequado para fiducialização dos quadrupolos do LCLS.

Anderson *et al.* (ANDERSON, CABAN, *et al.*, 2010) mostraram finalmente os resultados obtidos com os quadrupolos construídos no LCLS e resumiram a técnica do fio vibrante utilizada para a fiducialização, destacando que os graus de liberdade que ficam em aberto, isto é, z e $roll$, eram também fiducializados a partir de medidas de superfícies mecânicas dos magnetos e adicionados ao conjunto de dados de fiducialização. Foram também confirmadas as tolerâncias RMS para a instalação dos quadrupolos nos berço: $25 \mu\text{m}$ para x e y , 0.5 mm para z , e 15 , 15 e 20 mrad para $pitch$, yaw e $roll$, respectivamente. Como todos os quadrupolos foram fiducializados sem a presença da câmara de vácuo, efeitos de desmontagem e remontagem dos quadrupolos e de inserção do tubo de vácuo foram também analisados. Os resultados finais dos desvios padrões (Tabela 5) mostraram pouca variação, menos de $3 \mu\text{m}$, na posição do centro magnético do quadrupolo estudado, tanto na horizontal como na vertical.

Tabela 5: Incertezas do procedimento de fiducialização dos quadrupolos do LCLS, com o total obtido a partir de soma em quadratura das 4 componentes, a saber: calibração dos sensores de posição do fio; medição das esferas de referência mecânica no sensor de posição; posicionamento do quadrupolo por meio da técnica do fio vibrante; e medição das referências mecânicas do quadrupolo. [Fonte: (ANDERSON, CABAN, *et al.*, 2010)]

Uncertainty	X (μm)	Y (μm)	Pitch (mrad)	Yaw (mrad)	Z (μm)	Roll (mrad)
Wire Detector Calibration	1.21	1.17	0.004	0.003	----	----
Wire Detector Tooling Balls	2.77	3.16	0.010	0.007	----	----
Quad Positioning	1.99	0.55	0.021	0.369	3.68	0.141
Quad Tooling Sockets	1.84	3.44	0.046	0.024	26.18	0.324
Total Uncertainty	4.06	4.85	0.052	0.369	26.44	0.353

Jansz (JANSZ, 2007) descreveu o uso da técnica do fio vibrante para o alinhamento dos quadrupolos que formam o espectrômetro de massa DRAGON, do laboratório de astrofísica TRIUMF, no Canadá. Neste trabalho de verão do autor na

instituição, foram utilizadas soluções de custo relativamente baixo, como um amplificador de som automotivo e placa de som de computador pessoal para a detecção de sinais. Os sensores de vibração utilizados foram os mesmos utilizados por Temnykh, o fototransistor H21A1. Além disso, um teodolito foi utilizado para fiducialização e transferência de coordenadas, consistindo na maior fonte de erro sistemático das medidas realizadas. Apesar da pequena incerteza na medição angular, estimada a $\pm 8''$, as distâncias envolvidas levaram a altas incertezas posicionais, de até ± 0.5 mm. Outro erro sistemático mencionado foi no alinhamento das polias que consistiam nos nós do fio ± 0.2 mm, enquanto os erros aleatórios encontram na paralaxe da leitura das escalas lineares seu componente mais significativo. (± 0.1 mm). O erro estimado na determinação do centro magnético foi de 0.01 mm, ou seja, comparável ao das demais referências citadas e uma ordem de grandeza inferior aos demais erros de seu trabalho. O erro angular, por sua vez, foi estimado em 0.1 mrad.

Mesmo com as fontes de erro da ordem de décimos de milímetros, o estudo foi considerado bem sucedido e adequado para melhorar as condições experimentais existentes. O trabalho é bastante interessante por descrever detalhadamente os procedimentos adotados e discutir os modos de reconstrução de campo com medição manual e automatizada, com código em LabVIEW. Por fim, uma consideração pertinente foi a opção de caracterização pela reconstrução do campo magnético a partir dos vários harmônicos, como a descrição original de Temnykh, em vez do alinhamento apenas com dois modos de vibração, O argumento foi que o último método poderia ser realizado apenas com um quadrupolo por vez e ainda quando não existissem campos remanentes.

Tsai *et al.* (TSAI, WANG, *et al.*, 2007a) trataram do alinhamento preciso de grupos de quadrupolos em um mesmo berço para o *Taiwan Photon Source* (TPS), em que a precisão de 30 μ m RMS era requerida. Foram citadas novamente as técnicas de bobina girante, fio pulsado e sonda Hall, reforçando que os centros magnéticos de quadrupolos individuais poderiam ser encontrados com elas dentro de um erro de 50 μ m, porém, com a ressalva que estes métodos convencionais associados ao uso de teodolito para alinhamento de três ou quatro magnetos gerariam erros acumulados que poderiam chegar a 0.1 mm, como descrito por Jansz.

Por isso, optou-se pela técnica do fio vibrante, com a argumentação de ser uma técnica facilmente utilizável em berços, necessitando não mais de 10 cm de espaço além de um quadrupolo, e com menor tempo de operação para a mesma precisão de outras

técnicas. Uma inovação foi a associação de um laser e sensores sensíveis à posição (PSD), isto é, fotodiodos de grande área para detectar e registrar a posição de um feixe de luz incidente, para a translação precisa do sistema do fio vibrante entre os quadrupolos, medidos individualmente. O procedimento de alinhamento adotou apenas o modo ressonante fundamental, para verificação da posição, e o segundo harmônico, para verificação angular. Os sensores de vibração utilizados foram também dois fototransistores H21A1. Os erros foram estimados em: 7 μm na localização do centro magnético pela técnica; 0.01 mrad no alinhamento angular; 5 μm no controle da sagita, apesar do rigoroso controle da tração do fio; 5 μm para a repetibilidade do PSD (2 μm devido a flutuações do laser e 3 μm na recolocação dos módulos de PSD); e 15 μm no paralelismo entre o fio e os PSDs.

Na sequência, Tsai *et al.* (TSAI, WANG, *et al.*, 2007b) conseguiram algumas melhorias em relação ao sistema descrito anteriormente. Primeiramente, o erro de paralelismo entre o fio e os PSDs foi reduzido de 15 μm para 10 μm ao se substituir o microscópio utilizado inicialmente por uma MMC Brown & Sharpe, sendo 5 μm da incerteza da máquina e outros 5 μm da remontagem do fio. Além disso, a confiança no controle da sagita também aumentou, reduzindo o erro estimado de 5 μm para 3 μm , com um controle da frequência fundamental dentro de 0.1 Hz. Do ponto de vista operacional, estágios motorizados substituíram os estágios micrométricos de ajuste manual, aumentando a resolução, a repetibilidade e eficiência de operação. Então, foi feita a comparação da técnica do fio vibrante com uma sonda Hall, mostrando resultados consistentes, e iniciada a medição de sextupolos, que deveriam eventualmente ser alinhados dentro das mesmas tolerâncias dos quadrupolos.

Jain *et al.* (JAIN, ANERELLA, *et al.*, 2008) descreveram o sistema de fio vibrante para o alinhamento de quadrupolos e sextupolos dentro de $\pm 30 \mu\text{m}$ em berços de aproximadamente 5 m no *National Synchrotron Light Source* (NSLSII), situado no *Brookhaven National Laboratory* (BNL). A técnica foi escolhida, assim como no TPS, pela facilidade de alinhamento dos magnetos diretamente em seus berços, o que permitiria inclusive um relaxamento nas tolerâncias de fabricação dos berços e conseqüente redução de custos.

Para o estudo e a melhoria sistemática da técnica, além do desenvolvimento de um sistema completamente automatizado para medição em larga escala, foi criado no BNL um programa de Pesquisa e Desenvolvimento. Foram utilizados estágios precisos de

movimentação manual, com resolução de 1 μm , para os magnetos, além dos tradicionais estágios motorizados de movimentação das extremidades do fio. A exemplo do LCLS, como sensores foram utilizados também dois pares de sistemas com LEDs e fototransistores, um para cada extremidade do fio, fornecendo medidas simultâneas independentes. O fio, com comprimento de 7.3 m, apresentava uma sagita da ordem de 600 μm , logo, grande atenção foi dedicada a sua correção, o que exigia a determinação da frequência de ressonância com precisão de ± 0.02 Hz.

Foi discutido que os resultados dos centros magnéticos seriam afetados por campos de fundo, como o campo da Terra ou campos remanentes. Uma forma de corrigir esses efeitos seria com varreduras com os magnetos desligados para posterior subtração dos dados medidos. Ademais, para estudo de eventuais variações do centro magnético em função da excitação, correntes de excitação intermediárias poderiam ser utilizadas.

Magnetos emprestados do *Swiss Light Source* (SLS) foram utilizados para caracterizações iniciais. As medidas de quadrupolo eram feitas em poucas interações, com varreduras horizontais e verticais e simples ajustes lineares. Já o alinhamento de sextupolos era bem mais trabalhoso, exigindo grande número de interações até a convergência, com ajuste de parábolas e análises de inclinação de retas de ajustes lineares. Para o quadrupolo, a concordância entre os sensores foi muito satisfatória e o desvio padrão na determinação do centro foi de 7 μm , em perfeito acordo com o que foi registrado no TPS. Para o sextupolo, o centro poderia ser buscado a partir de análises do campo vertical ou do horizontal, entretanto, existiam erros sistemáticos desconhecidos da ordem de 15 μm entre os sensores nas análises de campo vertical. Ainda, movimentando controladamente um quadrupolo, foi estudada a correlação entre a aplicação da técnica e a variação conhecida, resultando em uma correlação quase perfeita na horizontal e com desvios menores que 5 μm na vertical. Aplicando a mesma técnica para um sextupolo, novamente foram encontrados erros sistemáticos na vertical.

Para as montagens definitivas, os berços seriam mantidos em uma sala com temperatura controlada em $\pm 0.1^\circ\text{C}$, os magnetos seriam alinhados mecanicamente melhor do que 1 mm e, então, sistemas de movimentação (inicialmente manuais e depois automatizados) especialmente projetados seriam utilizados individualmente durante o alinhamento com o fio vibrante. Foi projetado também o sistema de fixação dos magnetos, para que o aperto final não introduzisse erros significativos após o alinhamento. Foram conseguidas variações verticais da ordem de 3 μm e horizontais, de 8 μm .

Wouters *et al.* (WOUTERS, CALVI, *et al.*, 2012) descreveram o uso da técnica para o alinhamento de magnetos no laser de elétrons livres (FEL) *SwissFEL*, um projeto do PSI. A técnica do fio vibrante seria utilizada para um alinhamento preliminar dos ímãs antes do último alinhamento baseado em feixe (*beam based alignment* - BBA) e para investigação de repetibilidade do centro magnético após ciclos de corrente.

Um fio de cobre-berílio de 125 μm de diâmetro e comprimento de 1.2 m foi utilizado. Os sensores de vibração foram posicionados a 1/8 e o magneto, a 3/4 de uma das extremidades, com o segundo harmônico sendo utilizado para encontrar o centro e o quarto harmônico para medidas de *pitch* e *yaw*. Para localização geométrica, pontos de referência eram medidos com um braço de medição FaroArm.

A novidade proposta foi o uso do sistema de PLL de um lock-in da Zurich Instruments para manter a condição de ressonância com a diferença de fase de 90° entre os sinais de excitação do fio e de detecção. Como o sistema é fracamente amortecido, com um alto fator de qualidade, qualquer mudança de frequência de ressonância não rastreada seria responsável por erros de medida significativos. Por isso, o PLL é particularmente útil na situação de movimentação do fio em vez do quadrupolo, que foi a opção do grupo do PSI.

Medidas magnéticas de um quadrupolo de 170 mm de comprimento com força de 0.36 T a 10 A foram repetidas para diferentes condições de temperatura e influências mecânicas. A repetibilidade na determinação do centro magnético foi de 0.7 μm com o PLL contra 1.4 μm sem, tanto para a horizontal como para a vertical. Para *pitch* e *yaw* os erros de 0.1 mrad foram reduzidos para 0.02 mrad com o uso do PLL. A Figura 22 mostra medidas do quadrupolo com e sem o uso do PLL.

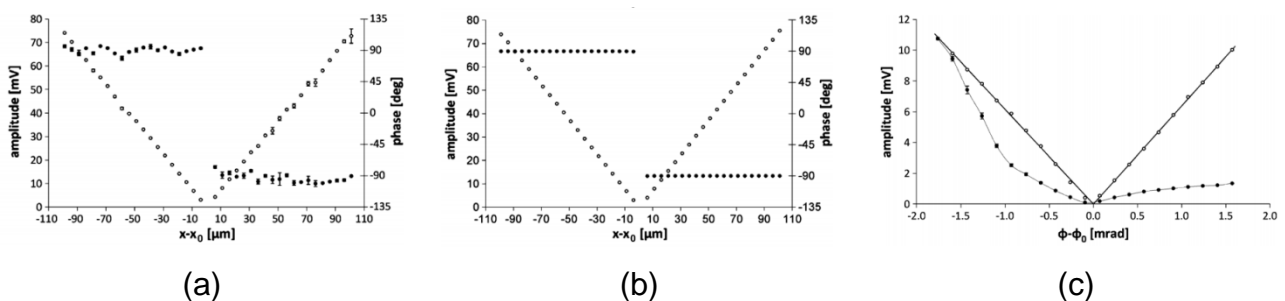


Figura 22: Medidas de centro magnético e alinhamento de quadrupolo no PSI: (a) medida de centro sem PLL; (b) medida de centro com PLL; (c) medida de *yaw* com e sem PLL. [Fonte: (WOUTERS, CALVI, *et al.*, 2012)]

Vrankovic *et al.* (VRANKOVIC, WOUTERS, *et al.*, 2014) deram continuidade ao trabalho para o *SwissFEL*, reforçando a necessidade do conhecimento do centro magnético de quadrupolos abaixo de 50 μm previamente ao alinhamento final com BBA, para uma exatidão de 1 μm . No trabalho foi descrito o aprimoramento do sistema de fio vibrante, com uma repetibilidade submicrométrica e exatidão final melhor do que 10 μm .

Em função da estabilidade necessária para a aplicação, os quadrupolos seriam refrigerados a ar e, portanto, a variação do eixo magnético com a temperatura teve de ser estudada. Nesta nova configuração, o sistema do fio vibrante foi migrado de sua cabana original, com temperatura estabilizada em $\pm 0.2^\circ\text{C}$ e alto fluxo de ar, para uma cabana isolada sem ar-condicionado, onde a mudança de temperatura seria pequena e lenta, sem outras fontes de perturbação. A escolha pela movimentação do fio, com estágios M-ILS150CCL da *Newport Corporation*, foi mantida por questões de economia financeira. Os subsistemas de travamento e guia do fio também foram aprimorados com a experiência. O FaroArm Quantum, com alcance de 2.4 m e exatidão especificada de 25 μm , foi mantido para medição geométrica.

Uma inovação foi um novo sistema de detecção da vibração do fio, com um sensor indutivo feito por dois pares de bobinas para detecção nos dois eixos de movimentação do fio. O princípio de funcionamento era a medição da tensão induzida nas bobinas pelo campo magnético variável no tempo que era gerado pela corrente alternada no fio. O sinal total das bobinas continha informações de amplitude de vibração, bem como de posição relativa ao centro das bobinas. O detector foi posicionado a 1/4 de uma das extremidades do fio, e apenas o segundo harmônico foi utilizado.

Na sequência, foram dados mais detalhes a respeito do lock-in HF2 da Zurich Instruments e do sistema de controle da bancada. Um conversor tensão-corrente também havia sido adicionado para a alimentação do fio para compensar as mudanças de resistência com a variação da temperatura.

Finalmente, o trabalho detalhou o método de medição para determinação do centro e do ângulo *roll*. No procedimento seria fundamental a consideração de que durante a varredura mecânica do fio ocorre uma inversão de fase na ressonância de $+90^\circ$ para -90° , ou vice-versa, ao cruzar-se de um hemisfério do quadrupolo para outro. Conseqüentemente, durante as varreduras seria preciso alterar o valor de referência do PLL, pois, do contrário, o controle seria completamente perdido. O maior problema era justamente que, durante a varredura, não se saberia a priori a posição em que deveria

haver essa inversão. A solução encontrada para isso foi: em vez de se buscar o centro magnético a partir de um procedimento iterativo com varreduras próximas ao centro, isto é, com varreduras verticais próximas do centro horizontal e vice-versa, realizar-se-iam intencionalmente varreduras deslocadas do centro. Dessa maneira, seria possível habilitar o PLL no canal complementar ao da varredura, pois aquele estaria sempre em um mesmo hemisfério do quadrupolo e, portanto, com um mesmo valor de fase.

Se houvesse alguma componente de *roll* no quadrupolo, o valor do zero vertical, por exemplo, obtido em uma posição horizontal diferente do centro, não corresponderia ao zero vertical real do centro magnético. A técnica se completaria, então, ao se realizar um circuito fechado, com duas varreduras horizontais, uma acima e uma abaixo do centro, e duas varreduras verticais, uma à direita e uma à esquerda. Assim, o cruzamento entre a linha que ligaria os pontos de zero das varreduras horizontais com a linha que ligaria os pontos de zero das varreduras verticais definiria o centro magnético, e, adicionalmente, extrair-se-ia a informação do desalinhamento tipo *roll*.

Após uma primeira iteração, o procedimento deveria ser repetido em um espaço amostral menor, mais próximo do centro, de modo a refinar os resultados. A sequência completa é mostrada na Figura 23:

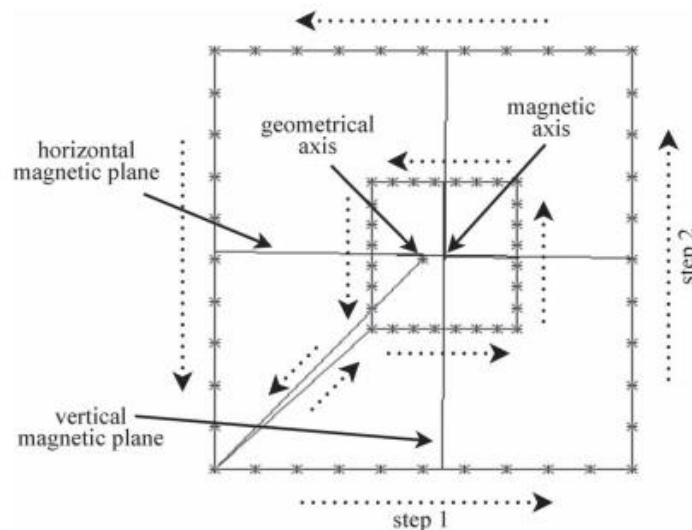


Figura 23: Sequência de medidas mostrando os pontos da varredura do fio onde as medidas de amplitude são tomadas, assim como o centro magnético calculado em comparação com o centro geométrico do magneto. [Fonte: (VRANKOVIC, WOUTERS, *et al.*, 2014)]

Os resultados foram obtidos ao longo de medidas sequenciais em períodos de 10 a 20 horas, durante os quais era monitorada a temperatura e eram medidos o centro

magnético e a componente *roll*. A estabilização era atingida após 5 horas de experimento, com uma mudança de 6 μm na posição vertical do centro em função da dilatação do magneto. A dependência da posição do centro com a temperatura se mostrou linear e a repetibilidade das medidas abaixo de 1 μm . Para *roll* a temperatura parecia influenciar cerca de ± 0.1 mrad/ $^{\circ}\text{C}$, porém, o resultado não poderia ser confirmado, pois a incerteza estimada para a medida dessa componente era de ± 2 mrad. A incerteza final de medição do eixo magnético, estimada em 10 μm , era dominada pela etapa de medição mecânica com o braço de medição.

Além da aplicação para quadrupolos e sextupolos, Temnykh *et al.* (TEMNYKH, LEVASHOV e WOLF, 2010) fizeram o estudo do potencial da técnica do fio vibrante para medida de erros e previsão de trajetória de feixe em campos magnéticos de onduladores do LCLS. A técnica foi escolhida especialmente por: permitir o suporte do fio nas regiões externas dos magnetos, ser adequada a medições em regiões de pequena abertura, e oferecer um complemento a pontas de prova por efeito Hall, que são afetadas pelo efeito Hall planar em onduladores elípticos.

Diferentemente dos demais trabalhos com a técnica (exceto no DRAGON), os quais utilizaram apenas alguns dos harmônicos do fio para alinhamento, este fez uso de todo o poder de reconstrução de campo da técnica, com 25 harmônicos. Nesta montagem foram utilizados apenas um par de sensores de movimento com os fototransistores H21A1 de um dos lados do ondulador e as extremidades do fio foram mantidas fixas.

A repetibilidade do campo magnético reconstruído ao longo do ondulador utilizado nos testes foi de aproximadamente 0.1 G, isto é, apenas 0.0007% do seu valor de campo máximo. Então, introduzindo distorções conhecidas no campo, foram medidas a sensibilidade e a resolução espacial do método, resultando em 0.37 Gcm e 0.9 mm, respectivamente. Por fim, comparando com medidas idênticas realizadas com uma ponta de prova Hall, tanto os erros de campo como as distorções de trajetória de feixe se mostraram em acordo.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Histórico da técnica no LNLS

O trabalho com o fio vibrante foi iniciado no LNLS no começo do ano de 2012 pelo engenheiro James Citadini e o técnico Reinaldo Basílio do grupo IMA, com a montagem de uma bancada de medição preliminar, vista na Figura 24. Nesta bancada, o controle dos estágios lineares era feito por um controlador DMC-4183 da *Galil Motion* (Figura 25), o qual possui drivers integrados para controle independente de até 8 eixos de motores de passo, por meio do software proprietário GalilTools.

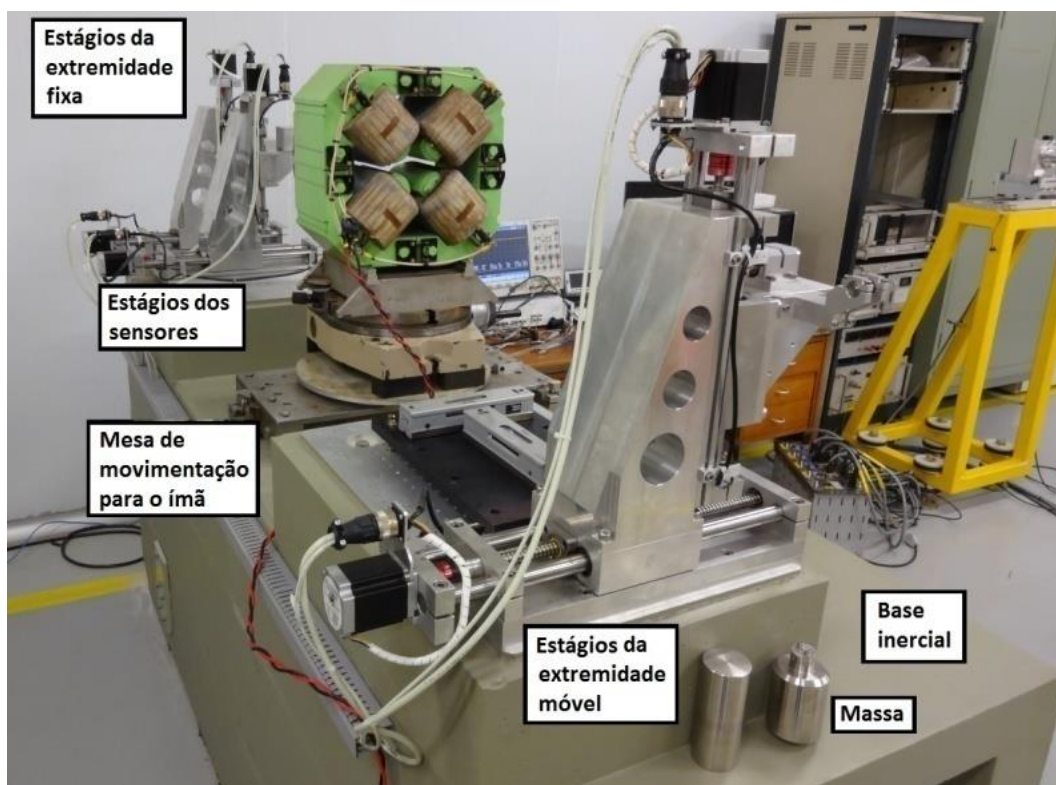


Figura 24: Montagem preliminar para avaliação da técnica do fio vibrante no LNLS, onde destacam-se: a base inercial de concreto; o quadropolo; o suporte caseiro para movimentação do quadropolo; estágios de movimentação bidimensionais para os suportes das extremidades fixa e móvel do fio de tungstênio, e para os sensores ópticos H21A1; e massa. [Fonte: grupo IMA - LNLS]



Figura 25: Controlador e drivers DMC4183 da Galil Motion e fonte de alimentação 24 VDC da Siemens. [Fonte: grupo IMA - LNLS]

Para a determinação do tipo de fio a ser utilizado no sistema, foram realizados estudos com dois fios distintos, a saber: um fio de cobre-berílio com diâmetro nominal de 0.14 mm e um fio de tungstênio de 0.1 mm. Apesar do cobre-berílio ser o tipo mais utilizado para a técnica, o tungstênio foi preferido por ter apresentado uma capacidade de carga mais de duas vezes superior em testes de ruptura. Com isso, o valor da sagita era reduzido à metade, o que levaria a menores erros de medição. Ademais, o fio de tungstênio seria menos susceptível a escoamento com o tempo.

Em determinado momento, em meados de 2012, o projeto foi confiado à estagiária do grupo, Giovana Zanoni, que evoluiu apenas até certo ponto em função de limitações dos equipamentos utilizados e também limitações estruturais no grupo, que ainda não contava com a sala de metrologia necessária ao nível de precisão deste estudo.

As medidas realizadas até então consistiram em medidas de varreduras verticais e horizontais, movendo-se o fio em busca do centro magnético do ímã. Porém, não só os estágios lineares eram desprovidos de encoders de realimentação, como o local onde se encontrava a sala de medições era bastante suscetível a vibrações, agravadas pela construção de um prédio vizinho às instalações naquele momento. Com isso, o nível de precisão e reprodutibilidade micrométricas necessário foi absolutamente comprometido. Ainda assim, resultados preliminares foram obtidos, para ao menos validar a técnica.

A Figura 26 mostra uma varredura horizontal e outra vertical, respectivamente, com o resultado típico esperado para um quadropolo, isto é, com o centro magnético obtido a partir da intersecção dos ajustes lineares antes e após o mínimo de amplitude, onde o fio não sofre a ação de campo magnético. Infelizmente essas imagens foram extraídas do relatório da estagiária e não são claras o suficiente para permitir a leitura das escalas, mas apresentam visualmente o resultado esperado.

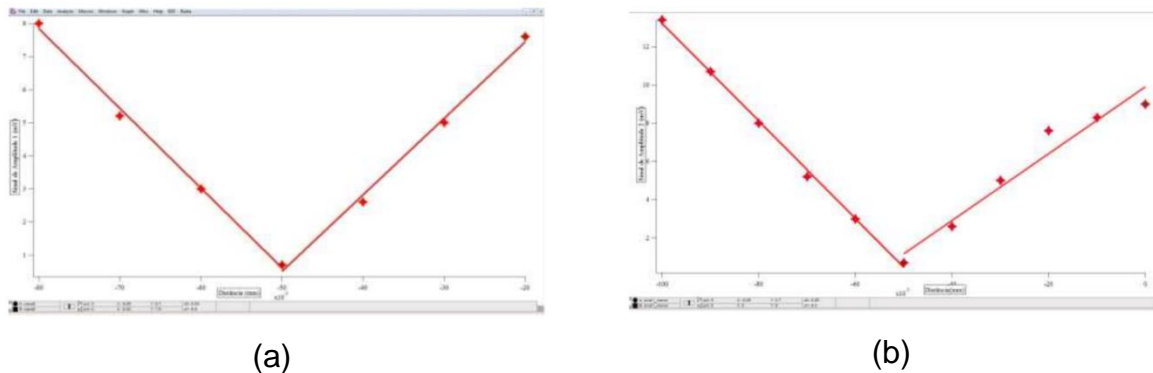


Figura 26: Gráfico de amplitude de oscilação (mV) em função da posição (mm) do estágio de translação para varredura horizontal (a) e vertical (b), com centro magnético determinado a partir da interseção das linhas de ajuste linear antes e após o ponto de mínimo, em que ocorre a inversão do sentido do campo magnético. [Fonte: Giovana Zanoni, IMA - LNLS.]

Após a saída da estagiária o projeto foi assumido como tema do mestrado profissional junto ao CBPF e os diversos subsistemas foram reavaliados, prosseguindo com: a especificação e compra de estágios lineares de precisão e de uma nova unidade de controle; a reestruturação da bancada, objetivando precisão mecânica compatível; a proposta de um novo sensor de vibração; e o desenvolvimento do sistema de controle a ser utilizado pelo usuário no procedimento de alinhamento. A expectativa era de que até o final do mestrado, a bancada estivesse plenamente operacional para a caracterização em série de quadropolos e sextupolos.

3.2 Mecânica e automação

3.2.1 Estágios lineares

No início do projeto, após discussões com os grupos IMA e PRO do LNLS, que seriam os futuros usuários do sistema, chegou-se a um consenso de seguir na direção que vinha sendo adotada no sentido de implementar a bancada do fio vibrante com movimentação do fio em vez do magneto. A principal razão era a complexidade de se construir um sistema mecânico preciso de translação e rotação para os magnetos, os quais teriam diferentes tamanhos e pesos elevados.

A primeira providência foi a substituição dos estágios lineares da primeira versão, que eram antigos, sem realimentação de posição e insuficientemente rígidos, e, conseqüentemente, suscetíveis a problemas de vibração e histerese mecânica no

posicionamento do fio. Uma boa repetibilidade de posicionamento é fundamental para o sistema, e não só para a correta determinação do centro magnético, como também para o reposicionamento o fio neste local no momento da fiducialização.

Portanto, foram imediatamente especificados os estágios de precisão a serem utilizados na bancada definitiva. A escolha foi por 2 pares de estágios da empresa alemã Huber: o 5101.20-XE para movimentos horizontais, com 100 mm de curso, e o 5103.A20-40-XE para movimentos verticais, com 40 mm de curso (Figura 27). Esses cursos são muito superiores aos necessários para as varreduras com o fio, porém, foram os escolhidos por serem versões comerciais com excelente rigidez e com larga aplicação nas linhas de luz do LNLS. Com realimentação por encoder óptico, a resolução alcançada em ambos é de $0.02 \mu\text{m}$, com acurácia final especificada de $\pm 0.1 \mu\text{m}$.

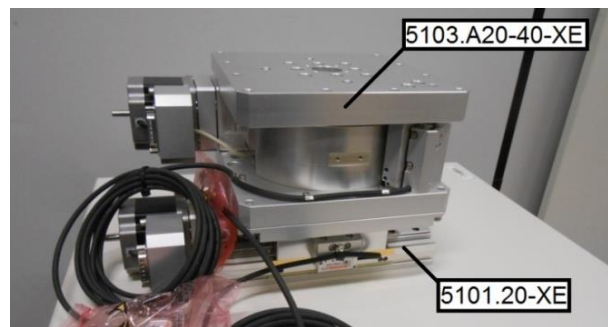
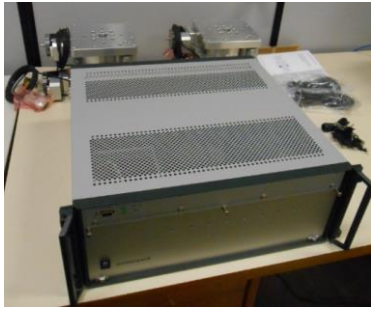


Figura 27: Estágios lineares de precisão, com acurácia especificada em $\pm 0.1 \mu\text{m}$, para posicionamento do fio: 5103.A20-40-XE para movimentação vertical e 5101.20-XE para horizontal. [Fonte: autor]

Junto aos estágios de movimentação, foi adquirida também uma unidade de controle de motores de passo padrão nas linhas de luz do LNLS, denominada PowerPack (Figura 28), que conta com um controlador Galil DCM-4183 e drivers Phytron ZMX+. Estes drivers são mais robustos que os anteriores, os quais eram integrados ao controlador, pois permitem uma maior flexibilidade na seleção da corrente desejada e também maior interpolação de micropassos por passo. O primeiro recurso é importante para controlar a potência dissipada no motor, tanto em operação como em repouso, e o último, para que a resolução de movimento não seja limitada pela resolução dos motores, uma vez que a leitura dos encoders é bastante fina.



(a)



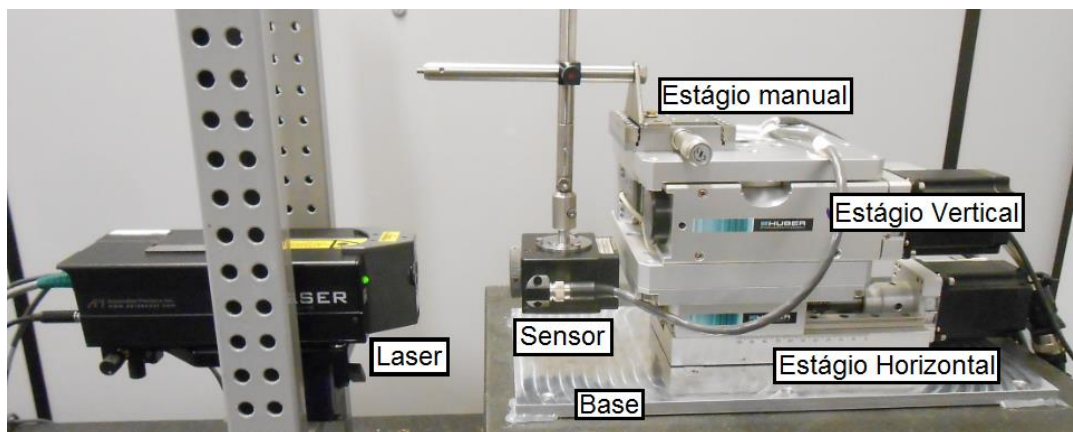
(b)

Figura 28: PowerPack para controle dos estágios lineares. Em (a) a caixa está fechada, em modo de operação, enquanto que em (b) a caixa encontra-se aberta, permitindo a visualização do controlador Galil, e dos drivers Phytron ZMX+. [Fonte: autor]

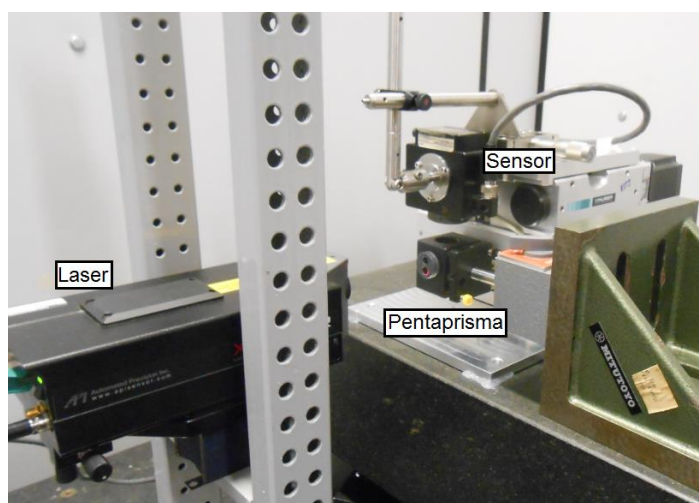
Com a evolução do projeto, tornou-se realidade a opção pela instalação da bancada do fio vibrante diretamente sobre a MMC do grupo de Metrologia e Alinhamento do LNLS, uma *Global Performance Silver Edition 12.30.10* da *Brown & Sharpe Hexagon Metrology*. Então, foram projetadas chapas especiais de alta rigidez mecânica para a adaptação dos estágios à mesa de granito da MMC. Podendo parecer um exagero a princípio, o requinte original dos estágios de movimentação e o nível de precisão mecânica desejado na bancada são tão grandes que, se as partes forem fixadas a bases mal elaboradas, a qualidade de movimentação é severamente comprometida.

Para a caracterização mecânica dos conjuntos de movimentação, utilizou-se o laser interferométrico XD6 da API (*Automated Precision Inc.*), como visto na Figura 29. Com esse instrumento é possível aferir movimentos lineares, medindo-se simultaneamente os movimentos parasitas nos demais graus de liberdade. Ou seja, os resultados indicam a exatidão linear, bem como as retitudes, isto é, as variações translacionais no plano perpendicular ao sentido de movimento, e também as variações angulares (*pitch*, *yaw* e *roll*).

Tanto nas medidas dos estágios horizontais (Figura 29a) como nas dos estágios verticais (Figura 29c), os sensores foram posicionados o mais alinhadamente possível com os eixos de movimento para diminuir influências de erros de Abbé nas medidas lineares. Além disso, utilizando-se um elemento óptico adicional denominado pentaprisma, é possível medir o esquadro entre eixos (Figura 29b), o que é importante nos estágios em questão para garantir movimentos puros nas medidas magnéticas.



(a)



(b)



(c)

Figura 29: Configurações experimentais para caracterização dos estágios lineares: (a) caracterização dos estágios horizontais, o estágio manual é utilizado para ajuste da posição do sensor; (b) caracterização de esquadro entre os movimentos horizontais e verticais, com uso do pentaprisma; (c) caracterização dos estágios verticais, com o laser na posição vertical para garantir a medição sem elementos intermediários. [Fonte: autor]

Essas medições foram feitas nas dependências do grupo de Suporte à Instrumentação de Linhas de Luz (SIL), do qual o autor faz parte, e com o auxílio do estagiário Henrique de Oliveira. Os resultados foram também incorporados ao banco de dados do grupo, onde são arquivados relatórios de estágios lineares de diferentes fornecedores para orientar a escolha de soluções adequadas às diversas aplicações nas linhas de luz.

3.2.2 Alinhamento mecânico

O alinhamento mecânico, do qual as medidas de esquadro fazem parte, é significativo e importante, conforme reforçado por Wouters *et al.* (WOUTERS, CALVI, *et al.*, 2012), pois os ângulos associados a desalinhamentos entre os estágios levam a movimentos impuros, variações na frequência de ressonância e também mudanças na posição do fio na região do magneto e dos sensores.

Esses erros foram simulados em Matlab, buscando-se especificações para comparação com as medidas de esquadro e para o ajuste da montagem experimental. O sistema de coordenadas adotado foi o indicado na Figura 21, ou seja, z na longitudinal do fio, x na horizontal e y na vertical; e as rotações foram referenciadas em relação ao magneto (ou ao fio), isto é, *pitch* para rotação em torno de x , *yaw* para rotação em torno de y e *roll* para rotação em torno de z .

Para *pitch* o paralelismo fica definido pela montagem mecânica, isto é, pelas peças do estágio linear, pela placa de adaptação ao granito da MMC e, em última instância, pela planicidade do próprio granito. Para *roll*, além da montagem mecânica, o esquadro também contribui para os estágios verticais. Já para *yaw*, o ajuste necessário foi feito com a MMC, como visto na Figura 30, a partir de medições sobre as guias lineares dos dois estágios horizontais, que eram as melhores referências mecânicas disponíveis.



Figura 30: Procedimento de ajuste de paralelismo entre os estágios horizontais na MMC. Os estágios estão fixados à chapa de adaptação à mesa de granito da MMC. [Fonte: autor]

3.2.3 Conjuntos de montagem do fio

Definidos os novos estágios de movimentação, as demais partes mecânicas também foram reformuladas para se adequarem a eles, buscando ainda maior praticidade e repetibilidade na montagem do fio, por meio de subsistemas modulares e de uma melhor definição dos nós do fio. Apesar de alguns laboratórios terem optado pelo uso de sistemas alternativos para a tração do fio, a ideia original da tração por uma massa conhecida foi mantida neste projeto. Todos os projetos mecânicos foram feitos pelo autor em CAD, utilizando a ferramenta *Autodesk Inventor*, e posteriormente usinados na oficina mecânica do LNLS.

De fato, como o rompimento do fio durante o experimento não é raro, a ideia era ter módulos de fio com sistemas de engate já pré-montados e no comprimento correto, tornando a reposição praticamente imediata em caso de necessidade. Ademais, o subsistema de fixação do fio ao engate foi pensado de modo a minimizar o acúmulo de tensão sobre ele, o que poderia resultar em seu rompimento. Estes engates com ganchos foram projetados para ser muito facilmente conectados à massa de tração e à extremidade fixa (no sentido de ser o lado oposto à massa em balanço) do fio. O lado da montagem da extremidade fixa do fio é mostrado na Figura 31.

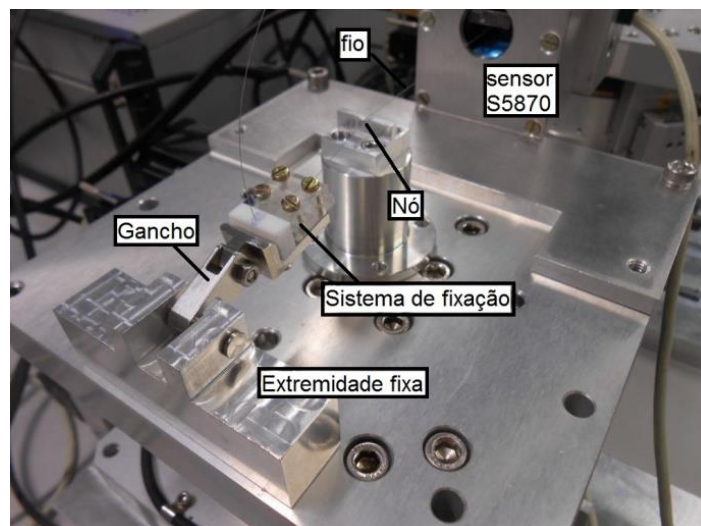
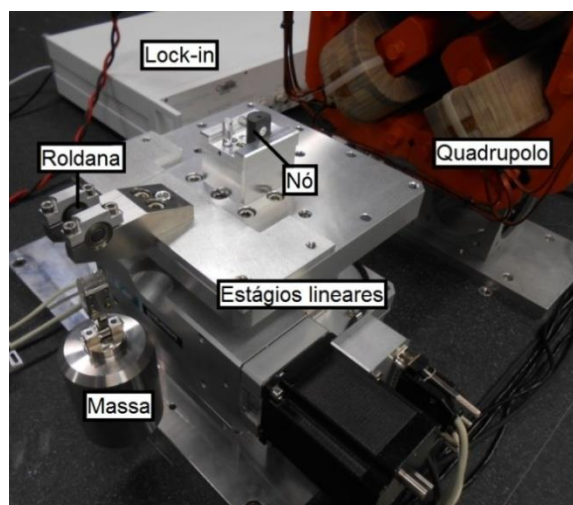


Figura 31: Montagem de uma das extremidades do sistema do fio vibrante após a reformulação. São visíveis: o fio, com seu sistema de fixação e o gancho acoplado à extremidade fixa; a primeira versão do ponto de apoio do fio que define uma das referências mecânicas (nó) do fio; e ao fundo já o conjunto desenvolvido para detecção de vibração do fio com o fotodiodo S5870. [Fonte: autor]

Esta versão de nó havia sido baseada na solução do LCLS, com um perfil em "V" e a eletroerosão de um canal muito estreito no vértice, com a dimensão exata do fio para garantir um posicionamento único. Ocorre que existem algumas dificuldades práticas importantes nesta solução, pois: o processo de usinagem deve ser controlado com resolução micrométrica; ao longo do fio, o diâmetro pode apresentar pequenas variações em relação a seu valor nominal; e, realmente, um canal um pouco mais largo provocaria uma indeterminação na posição do fio, enquanto que um canal mais estreito impediria o fio de se acomodar.



(a)



(b)

Figura 32: (a) Nova versão de apoio para definição dos nós do fio, construído com cerâmica e quartzo, para garantir o isolamento elétrico. (b) Montagem da extremidade do sistema do fio vibrante em que fica a massa de tração do fio. São vistos: o novo apoio para o fio, o quadrupolo em análise (modelo utilizado no acelerador atual do LNLS, o UVX), os estágios lineares vertical e horizontal, o amplificador lock-in, a massa e o sistema de roldana, que visa a reduzir ao máximo um possível desgaste por atrito em função da movimentação longitudinal do fio durante a movimentação dos estágios lineares. [Fonte: autor]

Sendo assim, um novo sistema, inspirado na solução do PSI, foi desenvolvido com uma cerâmica usinável e quartzo, como visto na Figura 32a. Esses materiais foram escolhidos para manter o fio eletricamente isolado do sistema mecânico. No PSI, essas partes eram de metal e o isolamento feito no suporte que a as sustentava. Nessa geometria, a posição vertical do fio no nó é definida pelo cilindro horizontal, pois o fio é forçado para baixo pela massa e por uma diferença de nível conveniente entre os nós e as extremidades do fio. Já a posição horizontal, esta é definida pelo cilindro cerâmico vertical, contra o qual o fio é forçado pelo cilindro de quartzo vertical, ligeiramente deslocado lateralmente em relação ao primeiro. Além de uma melhor definição dos nós,

esses cilindros poderiam ser utilizados como uma saída alternativa para a medição da posição do fio por meio de apalpadores na MMC, caso a nova técnica proposta para fiducialização se mostrasse inviável. A Figura 32b mostra o novo apoio na montagem da extremidade da massa, oposta à mostrada anteriormente na Figura 31.

Com essa configuração, o sinal do lock-in, responsável por fornecer a corrente alternada responsável pela ressonância, era ligado às extremidades do fio, de modo que elas precisavam ultrapassar o sistema de engate e chegar até algum ponto de conexão elétrica. Porém, não havia praticidade de operação e, adicionalmente, percebeu-se que a cerâmica começou a apresentar desgaste na região de contato com o fio.

Portanto, adotou-se uma solução ainda mais próxima daquela do PSI, substituindo o cilindro de cerâmica por aço inox e a base inferior do nó, que era de alumínio, por PVC, para garantir o isolamento elétrico. Ainda, já durante as medidas de alinhamento dos quadrupolos, no final do projeto, percebeu-se que o contato entre o cilindro de inox e o cilindro de quartzo não estava com boa qualidade, a ponto de comprometer o procedimento de alinhamento. Por fim, o cilindro de quartzo horizontal foi também substituído por aço inox para permitir um ajuste mecânico mais preciso.

Finalmente, nessa nova condição, em vez de se fazer a ligação elétrica pelas extremidades do fio, ela passou a ser feita no bloco intermediário de alumínio do nó, fechando o circuito elétrico pelos próprios cilindros de inox, o que também garante a resistência elétrica praticamente constante no sistema, uma vez que o comprimento do fio é praticamente fixo entre os nós. Esse projeto final é mostrado na Figura 33, que destaca também o fio de aterramento ligado aos estágios mecânicos para controle de ruídos elétricos.

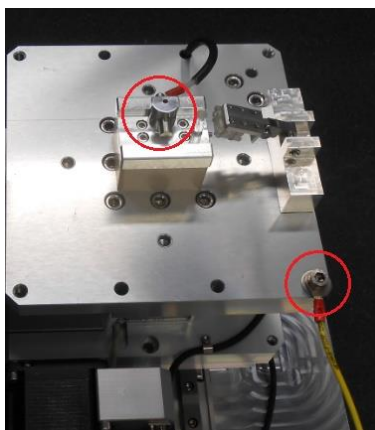
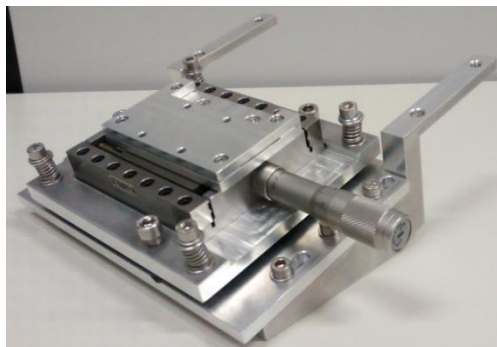


Figura 33: Extremidade do sistema do fio vibrante, com destaque para o ponto de aterramento (à direita na imagem), para o nó em aço inox e para a ligação elétrica do fio feita via o próprio suporte (na parte superior da imagem). [Fonte: autor]

3.2.4 Sensores de vibração

Uma parte significativa do tempo do mestrado foi destinada ao desenvolvimento de sensores de vibração, para os quais diversos projetos mecânicos de invólucros, suportes e mecanismos de ajuste também foram feitos. Visto que esse tema exige uma seção dedicada, esses projetos serão apresentados à medida que os modelos forem tratados na seção 3.3.

Detalhando apenas o suporte de fixação do sensor final (V2) ao estágio linear, ele foi idealizado para oferecer boa rigidez mecânica e ao mesmo tempo permitir ajustes translacionais e rotacionais do detector. Os ajustes longitudinal e de *yaw* são os mais simples, feitos por oblongos na parte inferior do suporte. Intermediariamente, foi desenvolvido um sistema de nivelamento para *pitch* e *roll*, mas que também permite o ajuste de altura. Neste sistema o projeto é de um acoplamento cinemático (comumente utilizado em sistemas ópticos) com 3 Vs e parafusos com cabeças arredondadas, com pré-carga exercida por molas. Finalmente, na parte superior o ajuste lateral é feito por um estágio manual de translação M-UMR8.25 da *Newport Corporation*, que oferece resolução micrométrica e seria também utilizado para caracterização da linearidade do sensor. O suporte pode ser visto na Figura 34.



(a)



(b)

Figura 34: Suporte do detector de vibração V2, com ajuste dos seis graus de liberdade, desenvolvido a partir de oblongos, niveladores com acoplamento cinemático, e estágio de translação Newport M-UMR8.25. [Fonte: autor]

Todo o suporte foi feito em alumínio e aço inox, para limitar a presença de materiais ferromagnéticos próximo ao fio, existentes somente em alguns dos componentes do estágio manual. Além disso, a chapa de fixação do sensor ao suporte foi

feita em PVC, para garantir o isolamento elétrico entre eles. De fato, durante o trabalho constatou-se que um nível de ruído eletromagnético bastante significativo era induzido no detector pelos motores de passo e por seu controlador, o que só foi controlado com o isolamento mencionado e o aterramento dos estágios lineares.

3.2.5 Caixa de proteção

Infelizmente, o controle de temperatura da sala de metrologia onde fica a MMC não é ideal. Não só a estabilidade térmica fica aquém da desejada, que seria em torno de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, mas chega a $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, como também a insuflação de ar não é feita homogeneamente através de difusores de tecido, de acordo com as boas práticas adotadas atualmente em salas com controle de temperatura de alto desempenho, como as encontradas em outros laboratórios de luz síncrotron e empresas de metrologia.

Buscando-se minimizar os efeitos da sala, foi construída uma caixa de proteção em acrílico (Figura 35), que isola o sistema do fio vibrante, deixando uma aberturas suficientes para o acesso do sensor da MMC aos pontos de medição e para a passagem dos cabos via calhas aterradas.

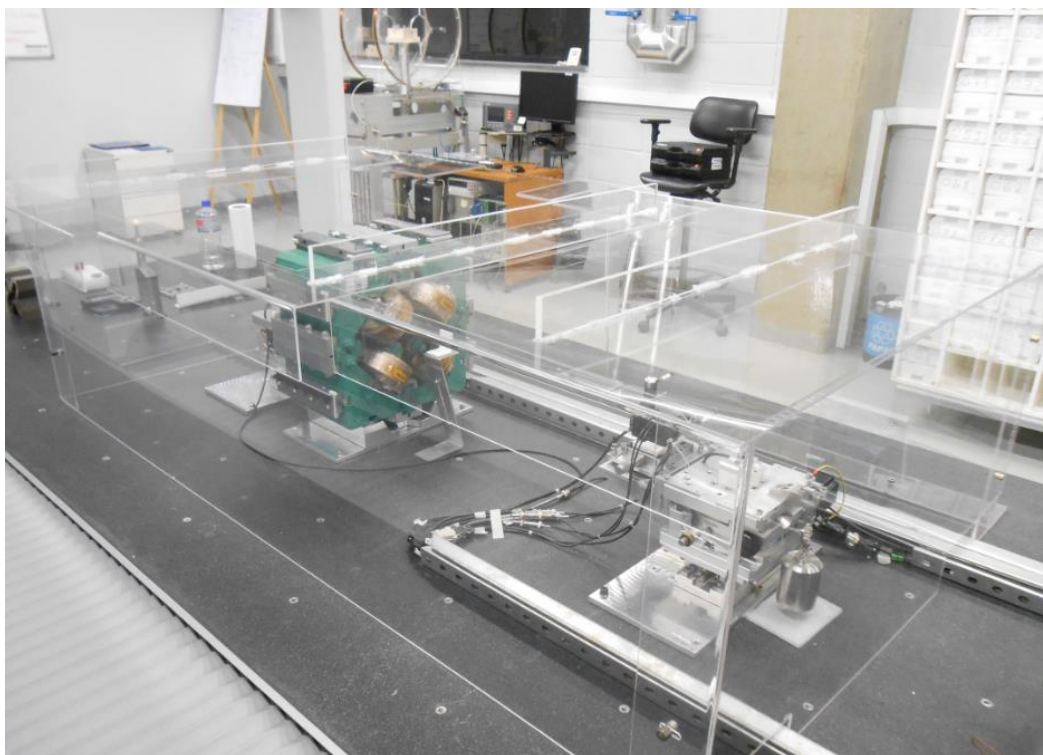


Figura 35: Sistema de fio vibrante em sua configuração final sobre a MMC, isolado pela caixa de proteção em acrílico. [Fonte: autor]

3.3 Sensores de vibração

A grande maioria dos sistemas de fio vibrante existentes se baseia no trabalho original de Temnykh (TEMNYKH, 1997) para detecção das vibrações do fio nos eixos vertical e horizontal, utilizando fototransistores comerciais H21A1 (Figura 36), que consistem em chaves interruptoras ópticas simples,.

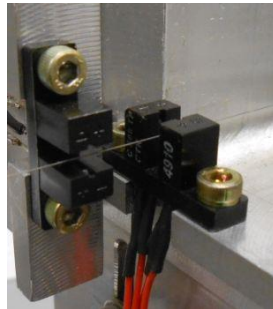


Figura 36: Montagem de dois sensores H21A1 ortogonalmente posicionados. [Fonte: autor]

A Figura 37 mostra curvas de resposta de sensores de vibração desse tipo a partir de varreduras translacionais com fios de 100 μm de diâmetro ao longo do sensor.

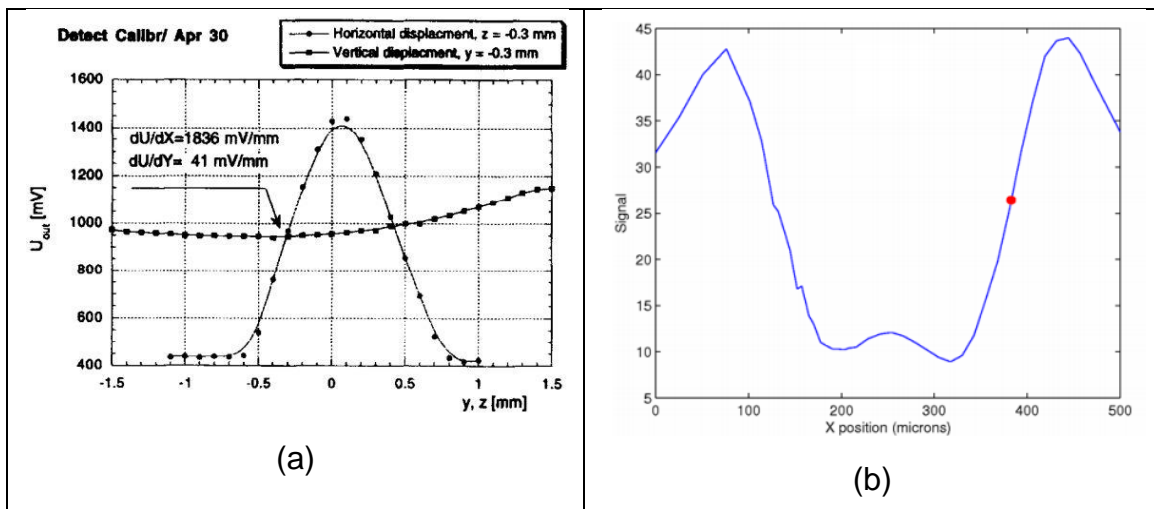


Figura 37: Curvas de resposta de sensores de vibração: (a) a partir de fototransistores H21A1 [Fonte: (TEMNYKH, 1997)]; (b) sensor desenvolvido no LCLS [Fonte: (LEVASHOV e WOLF, 2006)]. Ambas as figuras indicam o ponto de operação ideal, no centro da região onde a resposta é aproximadamente linear.

Nota-se que a região linear é bastante estreita, da ordem de poucas centenas de micrometros. Essa característica define limites práticos de operação, restringindo a

máxima amplitude de oscilação do fio e, caso o sistema seja com movimentação do fio em vez do magneto, exigindo constante realinhamento do sensor em relação ao fio.

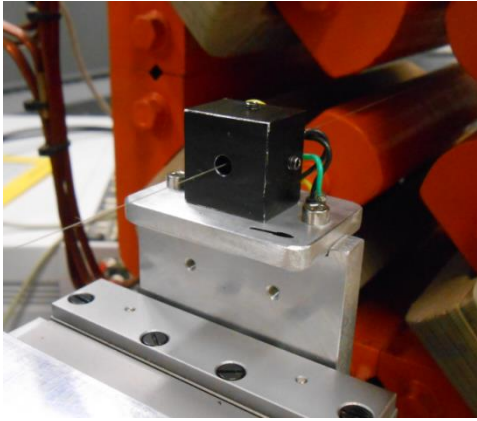
A cada medida é importante que o sinal do fio em repouso esteja próximo ao ponto de operação indicado na Figura 37, pois, caso a amplitude de vibração extrapole a região linear, a onda senoidal ideal resultante da oscilação do fio será distorcida. Essas limitações demandam estágios de posicionamento adicionais para os sensores, os quais, ainda que motorizados, aumentam o tempo e a complexidade do procedimento.

3.3.1 Fototransistor H21A1

A configuração dos fototransistores na montagem original do grupo IMA, era bastante semelhante à dos demais laboratórios que os utilizam, isto é, com o fotoemissor e o fotorreceptor no invólucro original de plástico, sendo posicionados ortogonalmente imediatamente um após o outro ao longo do fio (Figura 36). Neste modelo, entretanto, a ortogonalidade entre os sensores, importante para avaliar independentemente a contribuição das componentes vertical e horizontal dos campos magnéticos dos ímãs a serem medidos, não era garantida e não havia liberdade para alinhamento. Além disso, estando os sensores em posições longitudinais diferentes do fio, a amplitude de vibração e, conseqüentemente, os sinais detectados também seriam diferentes entre os sensores para uma mesma excitação.

O primeiro esforço em termos do sistema de detecção de vibração buscou otimizar, por meio de uma montagem com nova geometria, uma solução simples para essas duas considerações apontadas: os invólucros de plástico foram substituídos por um alojamento comum desenvolvido em alumínio para os dois emissores e receptores. As tolerâncias mecânicas apertadas deveriam garantir, por construção, simultaneamente a ortogonalidade entre os sensores e a mesma posição longitudinal no fio. O alojamento foi, então, pintado com tinta spray preta para eliminar múltiplas reflexões internas e ruído nos sinais (Figura 38a).

O novo sistema foi acoplado a um dos conjuntos de estágios lineares por meio de duas mesas de translação micrométrica manuais, de forma a permitir o ajuste do conjunto em torno do ponto de operação do dispositivo, como já mencionado (Figura 38b).



(a)



(b)

Figura 38: Sistema de detecção com fototransistores H21A1: (a) alojamento desenvolvido para abrigar os emissores e receptores; (b) sensor colocado sobre mesas translacionais vertical e horizontal no sistema do fio vibrante. [Fonte: autor]

Essa mesma montagem permitiu realizar diretamente a caracterização do sensor, por meio do seu deslocamento horizontal e vertical em relação do fio em repouso, fazendo-se uso dos estágios manuais. O circuito eletrônico utilizado para alimentação e leitura dos sensores, visto na Figura 39, foi construído por James Citadini e herdado da montagem original no grupo IMA. Os sinais foram medidos com uma unidade de aquisição de dados Agilent 34970A.

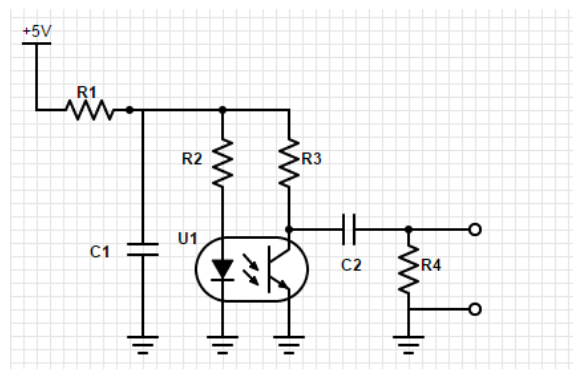


Figura 39: Circuito utilizado para o sensor com fototransistores H21A1, sendo necessários um por canal. [Fonte: autor]

Até este ponto, os resultados haviam sido satisfatórios, entretanto, motivados pelas limitações espaciais desse sensor comercial e pelas ideias do Dr. Ricardo Rodrigues, esta solução foi preterida em favor de projetos alternativos.

3.3.2 Fotodiodo S5870

As alternativas consideradas para sensores de maior flexibilidade foram basicamente duas, a saber: um sistema de dois pares ortogonais de bobinas, atuando a partir de leituras diferenciais dos sinais de indução eletromagnética, como o desenvolvido no PSI (Figura 40) (VRANKOVIC, WOUTERS, *et al.*, 2014); e um sistema com dois fotodiodos de quadrantes, atuando como sensores de posição, uma idealização do Prof. Dr. Ricardo Rodrigues e do técnico eletrônico Carlos Scorzato, do LNLS.

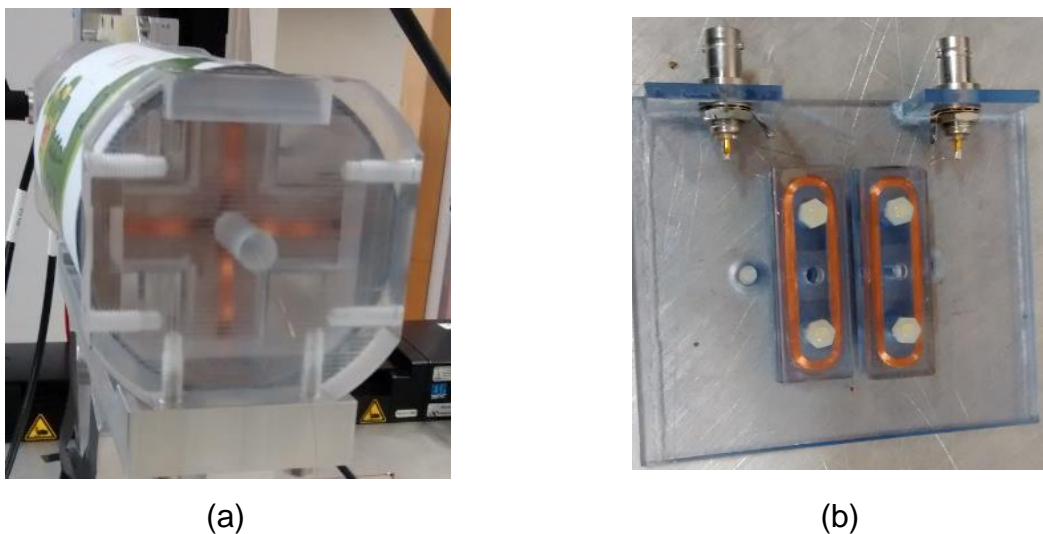


Figura 40: (a) Detector de vibração utilizado no PSI, o fio pode ser visto passando pelo orifício central; (b) Protótipo do detector para um dos planos. [Fonte: autor, com cortesia do grupo de magnetos do PSI]

Uma vez devidamente caracterizados, em ambos os sistemas o sinal de saída indicaria a posição real do fio em qualquer ponto do interior do sensor, o que abre a opção para que sensor de movimento seja também utilizado como sensor de posição em procedimentos de fiducialização dos magnetos.

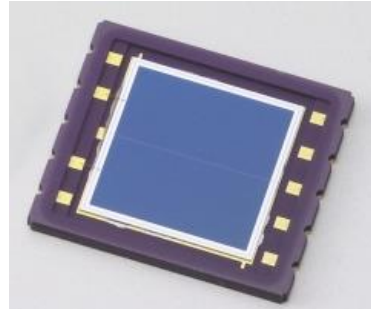
O sistema de detecção baseado em bobinas, contudo, apresenta dificuldades práticas de confecção não desprezíveis, pois cada bobina necessitaria de cerca de 2000 espiras de um fio de 0.02 mm diâmetro. Este desenvolvimento dependeria, portanto, da colaboração dos técnicos do grupo IMA, que são bastante experientes neste tipo de trabalho, porém, estiveram ocupados em outras atividades durante o período.

Enquanto o trabalho com os sensores H21A1 estava em andamento, o Dr. Ricardo Rodrigues e Carlos Scorzato realizaram testes preliminares de detecção do fio com

sensores de quatro quadrantes, como pode ser visto na Figura 41a. Estes resultados apontaram boas possibilidades e motivaram a compra dos fotodiodos de dois quadrantes Hamamatsu S5870, utilizados atualmente (Figura 41b).



(a)



(b)

Figura 41: (a) Fotodiodo Hamamatsu de quatro quadrantes utilizado em testes conceituais; (b) fotodiodo de dois quadrantes Hamamatsu S5870 utilizado na versão oficial dos sensores de vibração da bancada do fio vibrante do LNLS. [Fonte: autor]

A ideia básica consiste em avaliar a variação do sinal diferencial das fotocorrentes geradas nos dois quadrantes do sensor à medida que muda a posição da sombra do fio, colocado entre a fonte de luz e o fotodiodo. Neste caso, a geometria do sensor permite uma região de resposta linear desse sinal diferencial em função da posição do fio, com sensibilidade e faixa de operação diretamente relacionada ao ângulo existente entre a sombra do fio e a linha divisória dos quadrantes do fotodiodo. A grosso modo, é o "negativo" unidimensional daquilo que geralmente se aplica em monitores de posição com feixes de luz em fotodiodos de quatro quadrantes.

3.3.2.1 Primeira versão

Definido o fotodiodo, foi projetada a primeira versão (V1) do detector, com: uma fonte de iluminação de LED convencional branco de 5 mm e seu circuito de estabilização; um difusor de luz, feito com uma lâmina de microscópio tratada com uma pasta para despolimento; e o fotodiodo com seu circuito de detecção. A Figura 42a mostra o interior do sensor e a Figura 42b, o par conjugado de sensores vertical e horizontal, acoplados e montados sobre um dos conjuntos de estágios de movimentação.

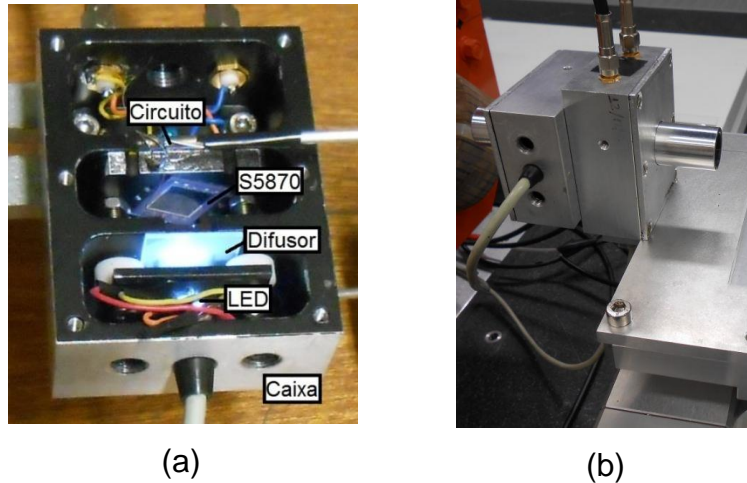


Figura 42: Primeira versão (V1) do detector de vibração com fotodiodo S5870: (a) caixa aberta, mostrando o LED de 5 mm como fonte, o difusor (lâmina de vidro despolido), o fotodiodo e o circuito de condicionamento; (b) par conjugado de sensores montados sobre estágios Huber. O tubo saliente no furo de passagem do fio foi adicionado para diminuir ruídos provenientes da iluminação externa. [Fonte: autor]

Os circuitos eletrônicos de estabilização da alimentação simétrica $\pm 12V$ (Figura 43a), ajuste de intensidade dos LED (Figura 43b) e polarização dos fotodiodos (Figura 43c) foram projetados por Carlos Scorzato, sendo que os dois últimos, são duplicados para os sensores horizontal e vertical. Optou-se pela utilização de polarização inversa dos fotodiodos para minimizar efeitos de *drift*, e por isso da escolha do modelo S5870, que é catodo comum. A detecção de cada canal é feita a partir do sinal diferencial sobre os resistores $R4$ e $R5$ na Figura 43c.

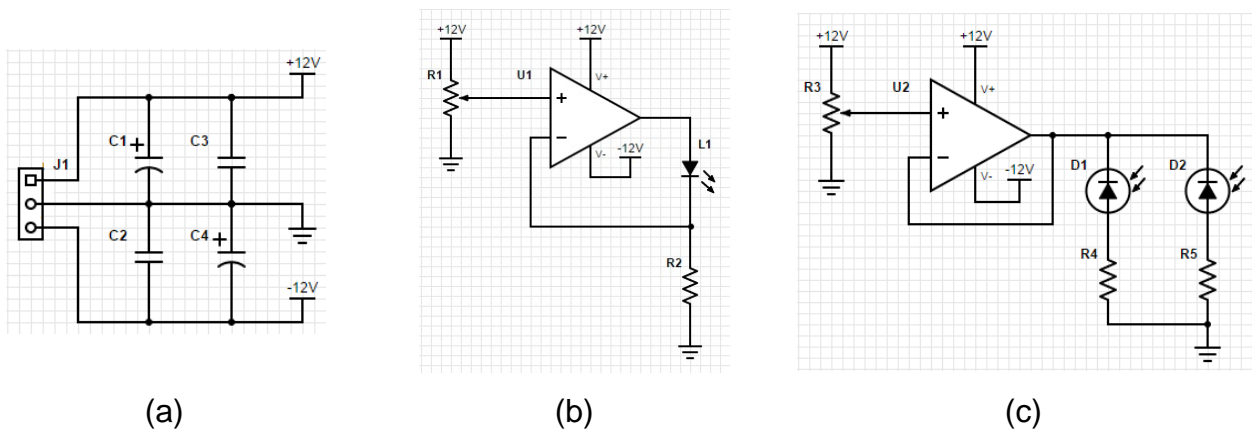


Figura 43: Circuitos utilizados para o detector com fotodiodos S5870: (a) estabilização de alimentação simétrica $\pm 12V$; (b) ajuste de intensidade dos LED; e (c) polarização dos fotodiodos. [Fonte: autor]

Durante o projeto mecânico desta versão do sensor, questões práticas de montagem do fio tentaram ser antecipadas e otimizadas, porém, a assertividade foi pequena: o resultado foi um pouco desajeitado e impossibilitava a colocação e a remoção do fio seguindo a modularidade proposta. Ademais, o acoplamento ao estágio linear foi simples, isto é, nenhum mecanismo de ajuste de posição dos detectores foi proposto, pois esperava-se um detector com ampla região de operação e ainda não se conheciam as reais necessidades de alinhamento.

Depois de caracterizado, o sensor chegou a ser testado em medidas de alinhamento de um quadrupolo, porém, os resultados não foram satisfatórios (vide Figura 92 na seção 4.6.1). Com esta interação, constatou-se a necessidade de melhor compreender as características do sensor proposto, o que motivou um trabalho extenso de modelagem e simulações do sensor em Matlab.

3.3.2.1.1 Montagem para caracterização do sensor V1

Diferentemente da montagem com o H21A1, o sensor V1 não contava com estágios de translação para ajuste de posição, logo, para a sua caracterização foi necessária uma montagem auxiliar. Como visto na Figura 44, foram utilizados: um apoio fixo para uma extremidade do fio; o conjunto mecânico com o sistema de roldana para sustentação da massa; e o segundo conjunto mecânico para translação do sensor.

De modo análogo à caracterização descrita para o H21A1, o estudo consistiu em realizar varreduras simples, horizontais e verticais, do sensor em relação ao fio em repouso, medindo-se os sinais dos sensores com uma unidade Agilent 34970A em função da posição, neste caso, a escala dos estágios lineares.

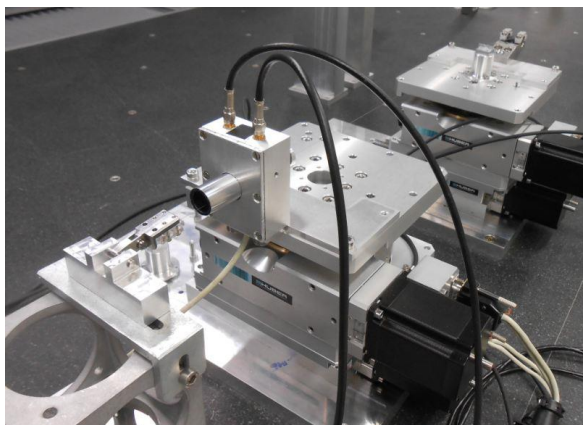


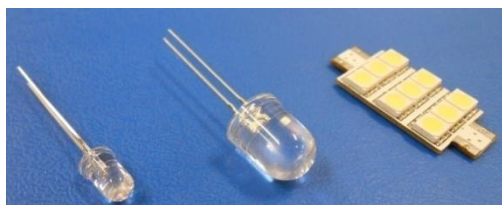
Figura 44: Montagem adaptada para caracterização do sensor V1. [Fonte: autor]

3.3.2.2 Simulações e fonte de iluminação

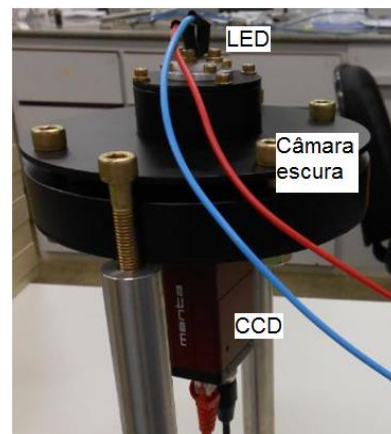
Os estudos foram realizados inicialmente com modelos simplificados para a fonte de luz e para a sombra do fio sobre o sensor, simulando varreduras do fio e analisando linearidade e a sensibilidade.

Então, com esses resultados partiu-se em busca de uma fonte de iluminação conveniente. A alternativa mais segura seria possivelmente o uso de um laser e de um expensor de feixe, todavia buscava-se uma solução simples e econômica.

Após uma busca comercial, foram selecionados 3 tipos de fonte: LED branco de 5 mm, LED branco de 10 mm e matriz de LEDs (Figura 45a). Além deles, difusores foram escolhidos como alternativas para minimizar os padrões dessas fontes na imagem formada sobre o fotodiodo, a saber: vidro despolido, papel manteiga, papel sulfite, papel cartão, lâmina de alumina e lâmina de teflon. Para a avaliação das imagens geradas com cada tipo de combinação foi utilizada uma câmera CCD Manta da *Allied Vision Technologies*. A montagem da câmara escura utilizada nos testes foi improvisada com itens disponíveis nas dependências do grupo SIL, como vistona Figura 45b.



(a)



(b)

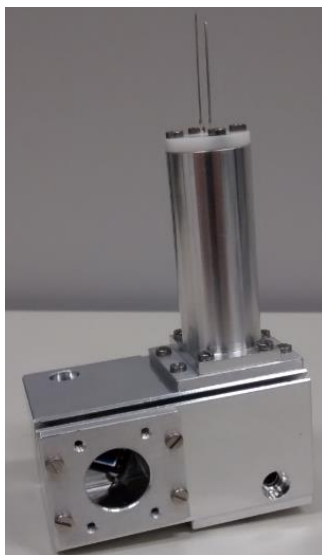
Figura 45: (a) Fontes de luz para otimização do detector com o fotodiodo S5870. Da esquerda para a direita: LED branco de 5 mm, LED branco de 10 mm e matriz de LEDs; (b) Montagem experimental para desenvolvimento de fonte de luz para o sensor com fotodiodo S5870. [Fonte: autor]

Os resultados mostraram que não seria muito fácil a obtenção de uma fonte simples homogênea em toda a área do sensor sem ampliar demais a divergência da luz, a ponto de provavelmente comprometer a região de sombra do fio no sensor. Por isso, à medida que avançava o projeto da segunda versão do detector, foram realizadas

simulações que reproduziam medidas de alinhamento magnético a partir de curvas de caracterização simuladas e reais, de modo a entender mais claramente como condições não ideais da fonte afetariam os resultados de alinhamento.

3.3.2.3 Segunda versão

O novo detector (V2) foi projetado com um design bastante intrincado, que reuni as seguintes características: máxima proximidade longitudinal entre os sensores vertical e horizontal, sem que haja a interferência entre as fontes de luz de cada um deles no complementar; perpendicularidade entre sensores garantida por construção; abertura com cobertura removível para passagem do fio; e recuo de uma fração de milímetro entre as superfícies dos sensores e o orifício de passagem do fio, evitando que o fio as toque, sujando-as ou danificando-as durante a montagem ou a operação. O circuito eletrônico foi embutido em um compartimento isolado, abaixo do fotodiodo. Ainda, como os resultados dos estudos de iluminação não apontaram uma alternativa segura, foram previstos tanto modelos em que a fonte estaria mais distante do fotodiodo (Figura 46a e Figura 46b) como mais próxima (Figura 46b e Figura 46c).



(a)



(b)



(c)

Figura 46: Segunda versão (V2) do detector de vibração com fotodiodo S5870. [Fonte: autor]

Então, com a expectativa de que esta fosse a versão definitiva, em vez de pintadas, as peças foram submetidas ao tratamento de anodização preta, que cumpre o

papel de evitar reflexões internas, além de trazer a vantagem adicional de isolar eletricamente a estrutura e aumentar sua resistência a riscos e avarias.

Foram feitas inúmeras tentativas, buscando a fonte de iluminação mais homogênea possível, todavia apenas as mais relevantes serão mencionadas. O primeiro fato a ser observado é que sem qualquer difusor o padrão característico do LED era muito forte, com luz muito mais intensa na região central. Na realidade, mesmo com difusores era difícil eliminar totalmente este padrão.

Outro fato conhecido dos estudos preliminares era que se difusores fossem utilizados como fonte e tivessem uma grande região de iluminação, por exemplo, compatível com a área do S5870, então, se a distância entre a fonte e o fotodiodo não fosse suficientemente grande, a detecção do fio seria impossível, pois o fio ficaria apagado em uma região de penumbra, oferecendo um sinal muito baixo.

Para evitar que o braço de suporte do LED fosse muito extenso, apostou-se inicialmente nas montagens de curta distância. Primeiramente, utilizaram-se duas folhas de papel-manteiga, um obturador de 1 mm de diâmetro como fonte e 4 LEDs de 5 mm indiretamente posicionados em relação ao furo do obturador, que foi alinhado com o centro do fotodiodo. Contudo, mesmo com uma abertura de apenas 1 mm e separação de cerca de 20 mm até o fotodiodo, o fio não podia ser detectado.

Na sequência, reduziu-se a abertura do obturador para apenas 0.3 mm, mas, neste caso, a intensidade de luz era insuficiente. Então, os 4 LEDs foram substituídos por um LED alinhado com o furo do obturador e houve algum ganho. Ao menos aparentemente o padrão estava adequadamente homogêneo. Nessa configuração, LEDs de 5 mm ou de 10 mm apresentavam o mesmo resultado.

Ainda, para aumentar o nível do sinal, os resistores em série com os fotodiodos foram aumentados de algumas centenas de $k\Omega$ para até $4.7 M\Omega$, o que em contrapartida poderia aumentar a susceptibilidade a ruídos, além de exceder a impedância de entrada do amplificador lock-in.

As caracterizações realizadas em bancada com uma unidade Agilent 34970A eram ruidosas, mas mesmo assim as curvas apresentaram linearidade satisfatória. Infelizmente, porém, ao se colocar o sensor em operação para a medição do quadrupolo, a instabilidade do sinal foi crítica para o uso do PLL.

A alternativa foi, então, modular as fontes de iluminação, passando do nível de referência constante da Figura 43b para o sinal alternado da Figura 47, de forma a

permitir uma filtragem adicional, atuando como um sinal portador de um sinal de rádio AM, antes da ressonância mecânica, a qual é responsável pela modulação.

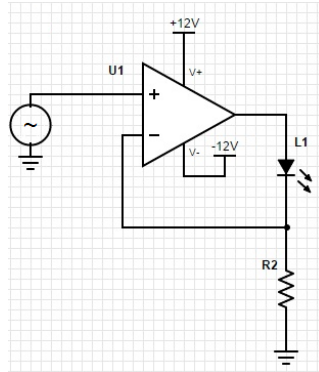


Figura 47: Circuito com modulação da fonte de luz. [Fonte: autor]

Ao implementar essa solução, porém, ocorreu que a intensidade média de luz voltou a ser insuficiente, tornando necessária a recuperação da solução com maior abertura do obturador e, necessariamente, com maior distância entre a fonte de luz e o fotodiodo.

Tudo isso ocorreu nas últimas semanas do desenvolvimento experimental, não havendo tempo para produção de novas peças, portanto, esta configuração da fonte de luz foi confeccionada cuidadosamente de maneira artesanal. Na versão final, como difusor foram utilizadas três camadas de papel manteiga, as quais foram coladas a um anel de borracha do tipo *o'ring*, que foi colado ao interior do tubo extensor. Com cerca de 8 mm de diâmetro interno, foram os anéis que passaram a definir a abertura da fonte.

Cuidou-se para que os difusores não tocassem a superfície dos LEDs, pois isso provoca um ponto de convergência de luz altamente inhomogêneo. Além disso, LEDs de 10 mm tiveram de ser utilizados, pois com os LEDs de 5 mm o padrão central mais intenso ainda era observado. Ao testarem-se uma série de unidades de LED de 10 mm, notou-se que cada um deles apresentava um padrão de iluminação um pouco diferente dos demais e, infelizmente não foi possível eliminar totalmente os traços característicos de cada um com os difusores. Conseqüentemente, as fontes acabaram não sendo tão homogêneas como se esperava, com alguma diferença visualmente perceptível entre os detectores vertical e horizontal. Não obstante, as curvas de linearidade foram consideradas satisfatórias e os detectores foram aceitos dessa forma por não haver mais prazo para desenvolvimento.

Finalmente, ampliando a distância fonte-fotodiodo para cerca de 75 mm e a abertura do obturador, a quantidade de luz tornou-se consideravelmente maior, e os resistores de saída puderam ser reduzidos para 100 k Ω . A Figura 48 mostra o par de detectores em seu estado final, já na montagem definitiva e após a caracterização.

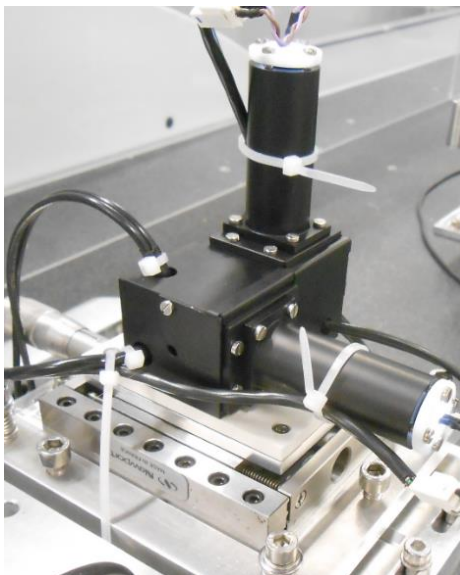


Figura 48: Detetores de vibração do fio na versão V2, com fontes de luz distantes. [Fonte: autor]

3.3.2.3.1 Montagem para caracterização do detector V2

Assim como para o detector V1, a caracterização do detector V2, repetida de acordo com os testes de iluminação, exigiu uma montagem auxiliar. Desta vez, como visto na Figura 49, os estágios mecânicos Huber não foram utilizados. O detector foi colocado sobre dois estágios lineares manuais para ajustes verticais e horizontais, sendo o último utilizado também para as varreduras em si. Para maior precisão, a variação da posição do detector foi medida com um apalpador linear Heidenhain MT2571, ligado a um display ND780 e sustentado por uma base magnética. O fio foi esticado entre um ponto fixo e uma massa, passando por uma roldana, tal como feito na bancada do sistema principal. Antes de se trabalhar com a modulação da fonte de iluminação, os sinais eram lidos pela mesma unidade Agilent 34970A, contudo, uma vez que um sinal portador estava presente, as medidas passaram a ser feitas com o próprio lock-in.

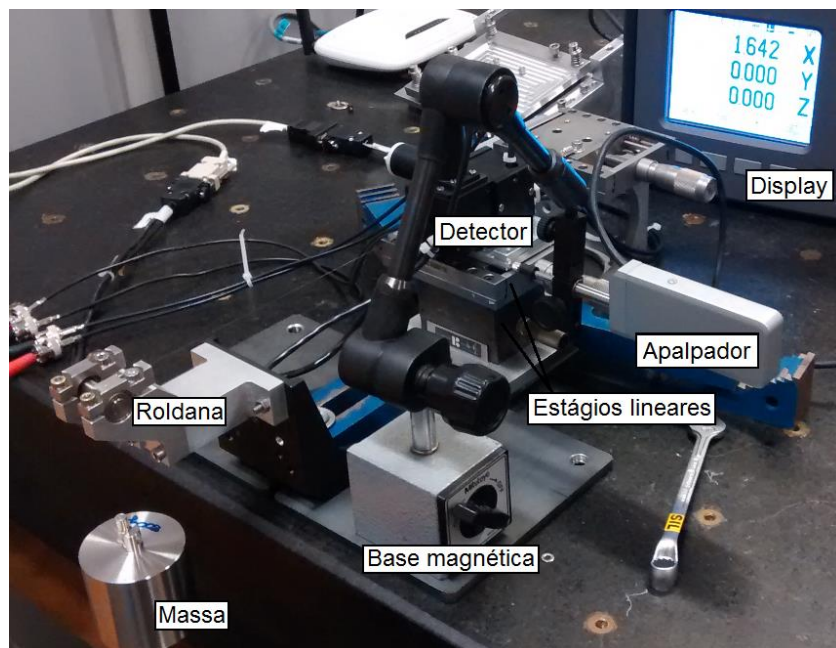


Figura 49: Montagem para caracterização do sensor V2, com destaque para: o apalpador Heidenhain MT2571; o display Heidenhain ND780; o detector anodizado; a base magnética de sustentação do apalpador; a massa e a roldana, que mantêm o fio esticado; e os estágios lineares. [Fonte: autor]

3.4 Amplificador lock-in: geração e detecção de sinais

Como foi visto, toda a técnica do fio vibrante se baseia na medida da amplitude de vibração de modos ressonantes do fio quando ele é estimulado por sinais de corrente alternada, que o excitam pela ação da força de Lorentz quando campos magnéticos externos estiverem presentes. Um amplificador *lock-in* revela-se, então, o instrumento de medida ideal para o sistema, dado que ele é capaz de extrair e amplificar, a partir de um sinal de entrada qualquer, a componente associada à frequência de um sinal de referência, que pode ser interno ou externo, estabelecendo também a relação de fase.

Os diversos laboratórios que utilizam a técnica do fio vibrante escolheram soluções das mais variadas. Para o projeto do LNLS, seguindo sugestões dos colaboradores Vrankovic e Wouters do PSI, foi feita, ainda em 2012, a aquisição do amplificador lock-in HF2LI da *Zurich Instruments* (ZI) (Figura 50). Trata-se de um equipamento bastante robusto e que conta com duas unidades *lock-in* e dois gerados de sinais integrados em um mesmo hardware, mas independentes, oferecendo uma solução única para a excitação do fio e para a detecção dos sensores de vibração vertical e horizontal.



Figura 50: Amplificador *lock-in* HF2LI da Zurich Instruments, utilizado no projeto do fio vibrante. [Fonte: Zurich Instruments]

O HF2LI é um amplificador *lock-in* com processamento digital otimizado para operação com baixo ruído. Sua taxa de amostragem de 210 MS/s é quatro vezes superior à largura de banda analógica para garantir a captação do sinal e evitar *aliasing*, e cobre uma banda de frequências de 0.7 μ Hz a 50 MHz. No projeto do fio vibrante, no entanto, as frequências de interesse não exigem sequer uma fração da capacidade de processamento do hardware.

Como foi dito, o equipamento é extremamente versátil, capaz não só de ler sinais analógicos, como também de gerá-los. Do ponto de vista de geração, ele possui seis geradores internos de sinais senoidais, com frequência entre DC e 50 MHz e amplitude e defasagem individualmente configuráveis, que podem ser combinados linearmente em suas duas saídas. Já para leitura, ele conta com seis demoduladores (associados aos geradores internos), com filtros digitais individuais de 128-bits, cujas propriedades de banda e ordem podem ser configuradas. As vantagens sobre instrumentos analógicos comuns são a alta reserva dinâmica, desvio zero, defasagens precisas e ortogonalidade.

Ele ainda conta com um osciloscópio integrado com memória para 2048 amostras, que fornece o sinal direto em função do tempo; um varredor de resposta de frequência, que fornece o espectro em frequência de um sinal de entrada escolhido; e 4 saídas e 2 entradas auxiliares. A comunicação com o computador é feita via USB 2.0, com taxa de até 480 Mbit/s.

Um dos grandes atrativos do HF2LI para este projeto, é o PLL, em que o sistema realimentado sincroniza o sinal de saída de modo a manter a mesma fase em relação ao sinal de entrada. De fato, como o fio é movido pelos estágios de translação durante as varreduras de alinhamento, pode haver flutuações da tração sobre ele, em função de atrito, ou pequenas mudanças em seu comprimento, alterando a frequência de ressonância. Mantendo-se o PLL ativo, com a diferença de fase entre o sinal de excitação (saída/referência) e de leitura (entrada) fixa em $+90^\circ$ ou -90° , a condição de ressonância

pode ser garantida durante todo o experimento. Caso contrário, como discutido na seção 2, uma redução em amplitude provocada por uma falta de sintonia seria confundida com um campo magnético menor e a cada ponto da varredura dos estágios seria necessária uma pequena varredura em frequência para se certificar da leitura do valor máximo.

Muitos desafios práticos foram encontrados durante o trabalho e grande parte das funcionalidades do hardware foi utilizada para depurar e estabelecer o sistema. Especialmente na configuração final do detector, com a modulação das fontes de luz, foram utilizadas não só ambas as entradas e saídas principais como também entradas e saídas auxiliares, em uma configuração bastante complexa e pouco usual para o equipamento, a qual foi atingida com o suporte extremamente eficiente do fabricante. Não fosse o HF2 tão versátil, dois ou três equipamentos diferentes teriam de ser usados para desempenhar todas as funções.

Excetuando-se a simples leitura e escrita de variáveis pelo software de controle desenvolvido em LabVIEW durante as medidas de alinhamento magnético (vide seção 3.5), todas as atividades com o equipamento foram conduzidas através do software fornecido pelo fabricante, o *ziControl*, cuja interface é mostrada na Figura 51.

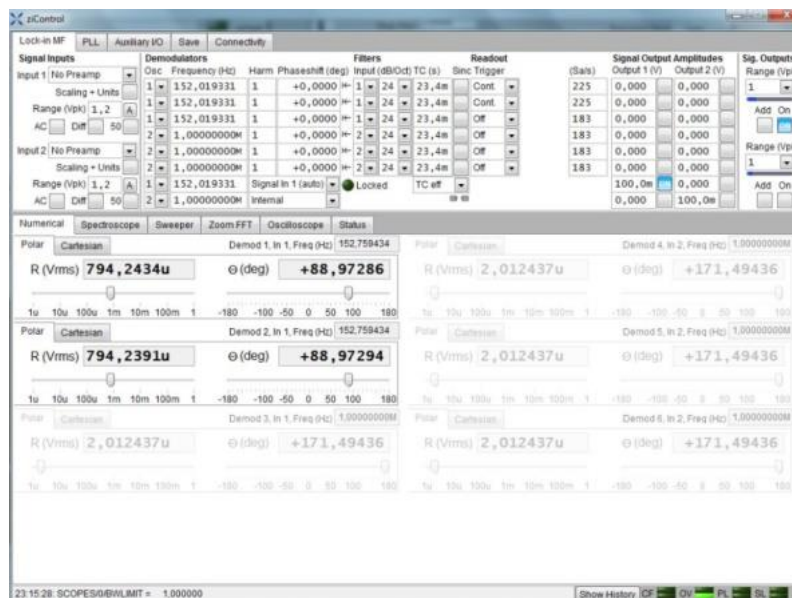


Figura 51: Tela do software *ziControl* fornecido pela Zurich Instruments, utilizado para o HF2LI durante o desenvolvimento do trabalho. [Fonte: autor]

3.5 Software de controle

O procedimento de alinhamento magnético consiste basicamente na movimentação dos estágios de translação em rotinas de varredura, com a excitação elétrica do fio e o monitoramento do sinal dos sensores de vibração feitos pelo lock-in.

Neste cenário, o controle dos equipamentos por computador e a automatização do processos de caracterização são fundamentais, não só para reduzir as fontes de erro experimentais, como também para otimização de tempo nos procedimentos de alinhamento, uma vez que um grande número de magnetos (da ordem de trezentos ímãs) deverão ser caracterizados. Portanto, desde o início do trabalho houve bastante tempo e atenção dedicados à programação e ao interfaceamento desses instrumentos.

O software de controle deveria monitorar e atuar sobre diversos equipamentos simultaneamente, sendo capaz de garantir uma operação segura, tanto do ponto de vista mecânico, uma vez que existem partes móveis, como do eletrônico, visto que há aplicação e leitura de sinais elétricos. Ademais, além de garantir a confiabilidade dos dados, ele não poderia deixar de ser flexível, de modo a permitir a adição ou remoção de recursos conforme a necessidade. Logo, a ferramenta de programação e a arquitetura do código revelam-se pontos-chave neste trabalho.

O LabVIEW, da *National Instruments*, foi escolhido para esta finalidade, uma vez que se trata de um ambiente e de uma linguagem de programação especialmente voltados para a automação de dispositivos em laboratórios e na indústria, sendo amplamente difundido.

Para garantir a flexibilidade e a robustez do código, a filosofia de programação adotada foi totalmente baseada em eventos dinâmicos e variáveis globais, com *loops* de execução paralela dedicados às diversas atividades desempenhadas, a saber: gerenciamento do controlador de motor *Galil*; gerenciamento do lock-in; tratamento das ações do usuário na tela de interface e atualização das variáveis nela dispostas; e traçado de gráficos. Com essa abordagem, a dinâmica de eventos mais rápidos ou mais lentos pode ser respeitada sem impacto no desempenho de todo o conjunto.

Inicialmente, havia a intenção de que o software gerenciasse também a placa de controle das fontes dos magnetos, responsável pela ciclagem e controle do campo magnético. Infelizmente as placas não foram desenvolvidas a tempo, mas o código prevê que recurso possa ser tranquilamente adicionado no futuro.

Um ganho adicional com o uso do LabVIEW é que diversos fabricantes já oferecem bibliotecas específicas para muitos instrumentos comerciais, facilitando enormemente o trabalho de programação. Particularmente para os instrumentos utilizados, a *Galil* oferece uma biblioteca já um pouco antiga com controle *ActiveX*, que foi utilizada no início, mas abandonada ao longo do projeto, enquanto que a ZI oferece uma ótima biblioteca para o HF2, que foi mantida até a versão final do software.

No caso do controlador de motor, ele possui uma série de funções internas e espaço para programação embarcada em linguagem própria. Por isso, buscou-se uma otimização de desempenho, concentrando no próprio hardware pré-configurações e rotinas de movimento, e mantendo o LabVIEW em mais alto nível, comandando ações e gerenciando mensagens recebidas do controlador.

Já para o lock-in, inicialmente buscou-se reproduzir no LabVIEW muitas das funcionalidades existentes no *ziControl*. Contudo, essa estratégia seria muito mais nociva do que benéfica, uma vez que causaria grande poluição visual, dificultaria a operação do usuário e aumentaria desnecessariamente a complexidade do código. Por isso, na versão final do software de controle foram incorporadas apenas as funções de leitura e escrita das variáveis essenciais que devem ser monitoradas e modificadas de acordo com a operação. Por simplicidade e otimização, então, abriu-se mão de concentrar todas as atividades da bancada necessariamente em um único programa.

As formas de comunicação com os instrumentos foram: ethernet para o *Galil*, utilizando o protocolo TCP em um primeiro momento e depois o protocolo UDP, quando a biblioteca foi abandonada; e USB 2.0 para o lock-in, que faz uso de um *driver* do fabricante para que a porta seja reconhecida como um adaptador serial (COM) no computador.

Finalmente, toda a programação foi feita e documentada em inglês, para aumentar a abrangência e facilitar o acesso ao material.

3.6 Fiducialização e metrologia

A fiducialização de um magneto consiste em transferir suas coordenadas de centro e alinhamento magnético para referências mecânicas em sua estrutura, as quais serão utilizadas em etapa posterior para agrupar e alinhar os diversos magnetos dentro das tolerâncias especificadas no projeto do acelerador. De acordo com o grupo de trabalho do

LCLS ((WOLF, 2005), (LEVASHOV e WOLF, 2006) e (LEVASHOV e WOLF, 2007)), para a técnica do fio vibrante este procedimento pode ser dividido em três passos, a saber:

1. centralização e alinhamento do fio no eixo magnético;
2. determinação da posição do fio;
3. determinação da posição do magneto.

O passo 1 depende essencialmente da qualidade dos sistemas mecânicos de movimentação do fio (ou do ímã), dos detectores de vibração e da eletrônica de detecção, cujos desenvolvimentos foram descritos nas seções anteriores. Já os passos 2 e 3, estes estão relacionados à inspeção metrológica.

O passo 3 tipicamente utiliza simplesmente apalpadores por contato em MMCs ou braços de medição para medir a posição das referências mecânicas do ímã. O passo 2, porém, é mais delicado, pois busca-se uma medição sem contato com o fio para que não haja a influência mecânica do instrumento de medição em sua posição.

Com exceção do último trabalho no PSI (VRANKOVIC, WOUTERS, *et al.*, 2014), que utiliza sensores indutivos, os sistemas conhecidos para passo 2 localizam o fio por meio de sensores ópticos similares aos sensores de vibração comumente utilizados, como descrito no trabalho original de Wolf (WOLF, 2005). Entretanto, faz-se necessária a calibração desses sensores por um procedimento rigoroso, que relacione o sinal elétrico com referências mecânicas em seu corpo, as quais são posteriormente medidas pela mesma máquina de inspeção utilizada no passo 3 (Figura 52).

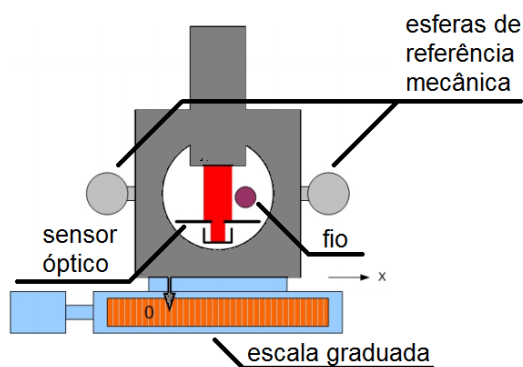


Figura 52: Sensor óptico de posição do fio com destaque para as esferas de referência mecânica, o fio, o próprio sensor e uma escala graduada. (Fonte: adaptado de (WOLF, 2005))

Essa medida de coordenadas da posição do fio de maneira indireta faz com que a incerteza final das medidas tenha componentes relativas à calibração do sensor e às medidas das referências mecânicas, além, é claro, das incertezas na medição do magneto em si. Como fica claro no trabalho de Anderson *et al.* (ANDERSON, CABAN, *et al.*, 2010), a soma dessas incertezas referentes ao sensor de posição é responsável por cerca de 50% da incerteza total na determinação do centro magnético.

3.6.1 Alinhamento magnético

A técnica de alinhamento magnético de quadrupolos foi inspirada naquela desenvolvida no PSI ((WOUTERS, CALVI, *et al.*, 2012) e (VRANKOVIC, WOUTERS, *et al.*, 2014)), baseada no sistema de controle PLL do lock-in HF2. Do mesmo modo, para as medidas de desalinhamento do magneto é utilizado o segundo harmônico e para a correção angular, o quarto.

O primeiro passo consiste, portanto, em habilitar o sistema PLL do lock-in no valor de fase correspondente à ressonância, de modo que durante as varreduras com os estágios lineares as amplitudes de vibração dos sensores de vibração variem somente em função do campo magnético em cada ponto. Depois, resta seguir as etapas do procedimentos de Vrankovic *et al.* (VRANKOVIC, WOUTERS, *et al.*, 2014) para a determinação do desalinhamento translacional.

O que pode parecer simples, contudo, é na verdade extremamente delicado. A estabilidade do controle PLL e a repetibilidade dos resultados são absolutamente não triviais e todo e qualquer detalhe de montagem e operação é fundamental. Na busca por micrometros, problemas ou erros de construção ou montagem, elétricos ou mecânicos, são suficientes para elevar os erros de medida acima das tolerâncias.

Infelizmente, com o atrasos no desenvolvimento dos sensores de vibração, restou pouquíssimo tempo para medidas de alinhamento. Na verdade, além da dificuldade em se definir o sensor, outras questões foram decisivas para o atraso do projeto e sua consequente interrupção antes de que todos os resultados desejados fossem obtidos.

Por exemplo, no início do projeto, ao final de 2012, imaginava-se que os magnetos do Sirius já estariam em produção ao longo de 2014, entretanto, atrasos fizeram com que somente um protótipo de quadrupolo do *booster* (o acelerador preliminar que prepara o feixe para o acelerador principal) estivesse disponível para os testes realizados. Ademais, as fontes de alimentação dos quadrupolos tampouco ficaram prontas a tempo, fazendo

com que os testes fossem realizados com fontes adaptadas e com correntes de cerca de 10% da corrente de operação. Não havia também um sistema de refrigeração dedicado, que seria necessário se as fontes tivessem sido terminadas. Por fim, as placas de controle das fontes, responsáveis pelas rotinas de ciclagem dos ímãs também vinham passando por revisões constantes. Tudo isso, perturbava o fluxo de desenvolvimento e levantava dúvidas a respeito dos resultados intermediários obtidos, pois não se sabia se os desvios observados eram em função de problemas no detector, na mecânica, ou nas características não ideais do campo, por campo remanente ou instabilidade da fonte.

Foi somente em dezembro, no último dia de operação do LNLS em 2014, quando se esgotava o prazo estipulado para o projeto de mestrado, que os primeiros e únicos resultados repetitivos de alinhamento magnético foram obtidos, ainda com o protótipo de quadrupolo do *booster* operando a 10%. Foram, então, possíveis medidas de alinhamento translacional, mas não rotacional, pois o sinal de vibração do quarto harmônico não apresentou estabilidade suficiente e não houve tempo de investigação das causas do problema.

3.6.2 Metrologia

Neste trabalho, foi desenvolvida, a partir de uma ideia inicial de Regis Neuenschwander, uma técnica completamente nova para atender aos passos 2 e 3 do procedimento de fiducialização. O princípio é a substituição da medição por contato por apalpadores pelo sistema de visão da MMC multissensor no LNLS - a *Global Performance Silver Edition 12.30.10* da *Brown & Sharpe Hexagon Metrology*.

O procedimento de metrologia foi desenvolvido colaborativamente com Rodrigo Leão, responsável pelo grupo de Metrologia e Alinhamento do LNLS, que é parte do grupo de Projetos Mecânicos (PRO), liderado por Regis Neuenschwander. O grupo PRO é responsável pelas medidas mecânicas dos novos magnetos, assim como pelos mecanismos de posicionamento e pelo alinhamento. O suporte do técnico mecânico Eli Wenzel também foi providencial para o andamento das atividades nesta etapa.

Desde o princípio de nossas atividades, já era sabido de trabalhos anteriores (LEVASHOV e WOLF, 2007) que os braços de medição não teriam acurácia suficiente para garantir as especificações, visto que partem, tipicamente, de incertezas da ordem de 25 μm . Conseqüentemente, sendo o uso de uma MMC realmente necessário, a derivação lógica foi a tentativa de eliminar a medição indireta da posição do fio, partindo para a

visualização do fio através do software PC-DMIS, que acompanha a MMC. O sistema de visão da MMC e a imagem do fio no software são mostrados na Figura 53.



Figura 53: (a) Módulo de visão da MMC multissensor *Global Performance Silver Edition* 12.30.10 da *Brown & Sharpe Hexagon Metrology*; (b) Imagem do fio no software PC-DMIS. [Fonte: autor]

Além de uma medida direta da posição do fio, esta alternativa permite que essas medidas sejam feitas imediatamente antes e após o magneto, minimizando os efeitos de catenária.

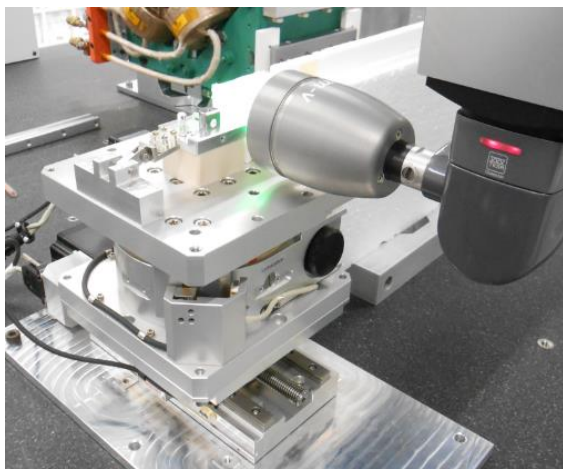
Fora esta MMC no LNLS, de que se tenha conhecimento existe apenas uma outra máquina desse tipo no Brasil que faz uso do sistema de visão e, ainda assim, para procedimentos de metrologia simples. Portanto, o suporte técnico do fornecedor foi bastante limitado, tanto nacionalmente como na matriz, exigindo um esforço não desprezível do grupo de Metrologia e Alinhamento para trabalhar com os recursos da máquina. De fato, ao longo de todo o desenvolvimento ocorreu uma série de aperfeiçoamentos, desde a otimização dos parâmetros da câmera, como iluminação, foco, contraste e detecção, até a extensão do processo de calibração da câmera sugerido pelo fabricante.

Evidentemente, a evolução do processo foi mediante o acompanhamento constante de que os níveis de repetibilidade das medidas estavam de acordo com as tolerâncias buscadas, e o objetivo final era o estabelecimento de uma técnica de metrologia precisa o suficiente e capaz de fiducializar magnetos em série, seguindo um programa de comando numérico para encontrar as referências mecânicas dos magnetos e medir as posições de entrada e saída do fio.

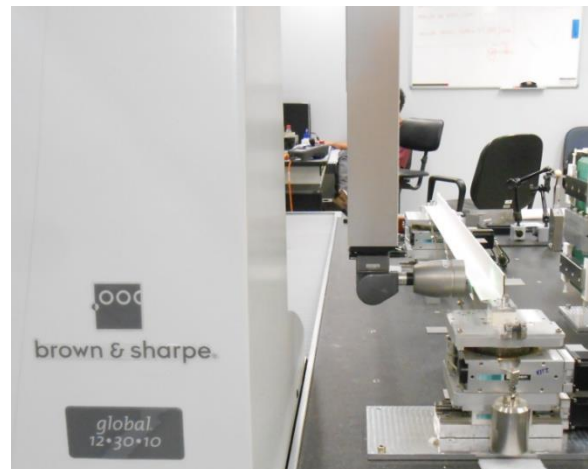
Dos dois modos de medição disponíveis com a câmera, a saber: por detecção de foco e por detecção de bordas, isto é, de diferenças em níveis da escala de cinza, apenas o último se mostrou repetitivo e exato o suficiente. Por essa razão, todas as medidas das referências mecânicas e do fio foram feitas com a detecção de bordas, e o sistema de foco foi utilizado apenas para otimização do contraste do objeto a ser medido.

3.6.2.1 Catenária

O primeiro critério utilizado para a validação da técnica, ainda em uma etapa primitiva do desenvolvimento, foi a medição da catenária do fio, para o que inicialmente foi utilizado um anteparo de isopor (Figura 54a) e depois de nylon com cobertura de papel branco (Figura 54b). As mudanças de material do anteparo ocorreram porque tanto o isopor quanto o nylon apresentavam inhomogeneidades que impossibilitavam a definição de um nível de contraste único para a detecção precisa de bordas.



(a)



(b)

Figura 54: Medida da catenária com o sistema de visão da MMC no sistema do fio vibrante: (a) vista em perspectiva, com anteparo em isopor; (b) vista longitudinal do sistema, com anteparo de nylon coberto com folha de papel. [Fonte: autor]

Com os resultados positivos, isto é, com a concordância das medidas em relação ao diâmetro do fio e ao perfil teórico da catenária, os passos seguintes envolveram a busca por uma maneira de utilizar o sistema de visão para encontrar referências confiáveis no magneto.

3.6.2.2 Referências metrológicas nos magnetos

A melhor opção encontrada até o momento para referenciar metrologicamente os ímãs foi por meio das sapatas metálicas que serão confeccionadas junto aos magnetos (Figura 55) e utilizadas, entre outros fins, para a fixação nos berços. A justificativa é por se tratarem de itens que serão parte dos ímãs e com bom acabamento de usinagem.

Foram necessários estudos para otimização do material do anteparo, de sua profundidade em relação à face medida e do modo de fixação. Como pode ser observado na Figura 55, as alternativas foram: (a) isopor, mantido por pressão; (b) PVC, travado por parafusos laterais; e (c) papel sobre acrílico encaixado em canal usinado na sapata. A última opção é única que garante a inexistência de lacunas entre a borda que se deseja medir e o anteparo; e o papel oferece uma melhor homogeneidade, como já foi mencionado.

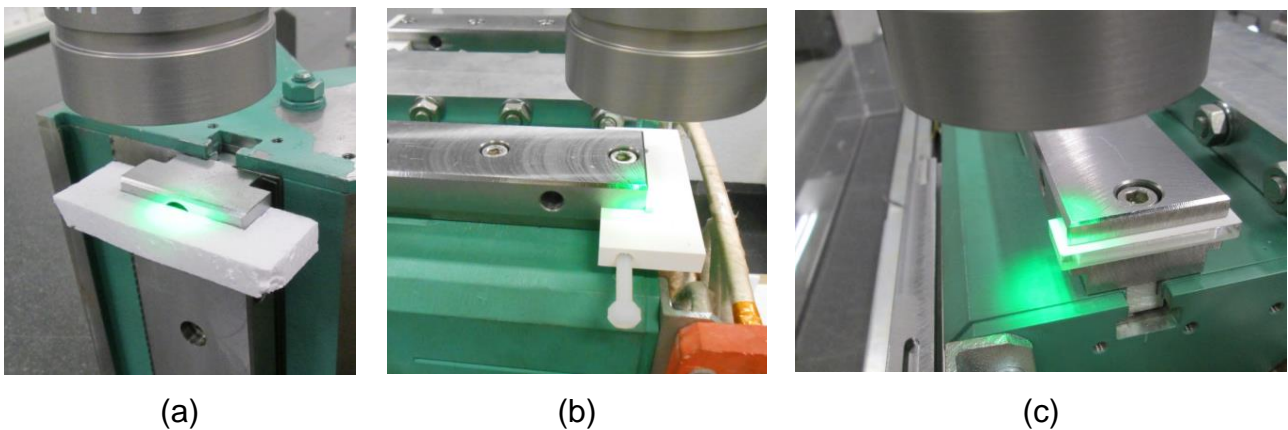


Figura 55: Estudo de anteparos para medidas de sapatas dos magnetos com o sistema de visão da MMC: (a) isopor, mantido por pressão; (b) PVC, travado por parafusos laterais; e (c) papel sobre acrílico encaixado em canal usinado na sapata. [Fonte: autor]

Então, por meio da detecção de pontos de borda (Figura 56), são gerados pontos, linhas e planos, que são utilizados para a definição de um novo sistema de coordenadas, referenciado no magneto e a partir do qual os pontos de entrada e saída do fio seriam medidos uma vez que o centro magnético fosse encontrado.

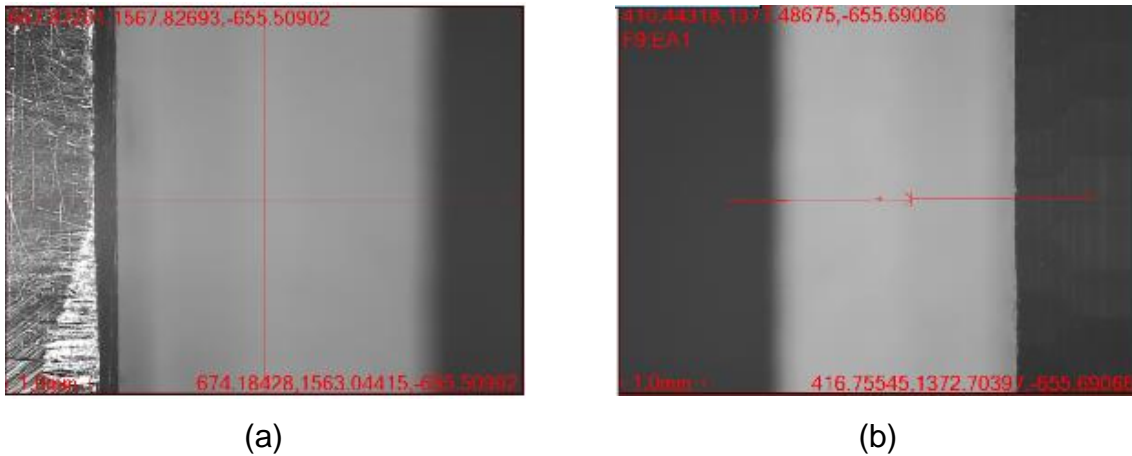


Figura 56: Imagem da detecção de bordas das sapatas metálicas dos magnetos no software PC-DMIS. Em (a), a detecção é feita da direita para a esquerda, enquanto que em (b), o oposto. [Fonte: autor]

3.6.2.3 Medida do fio

Nas medidas da catenária o fio permanecia imóvel, sem qualquer vibração ou translação dos estágios de movimentação, então, o foco sobre o fio, essencial para a correta determinação de suas bordas, pôde ser ajustado visualmente pelo operador e mantido constante. A Figura 57 mostra duas condições do fio no software PC-DMIS, primeiro fora de foco (a) e depois corretamente focalizado (b).

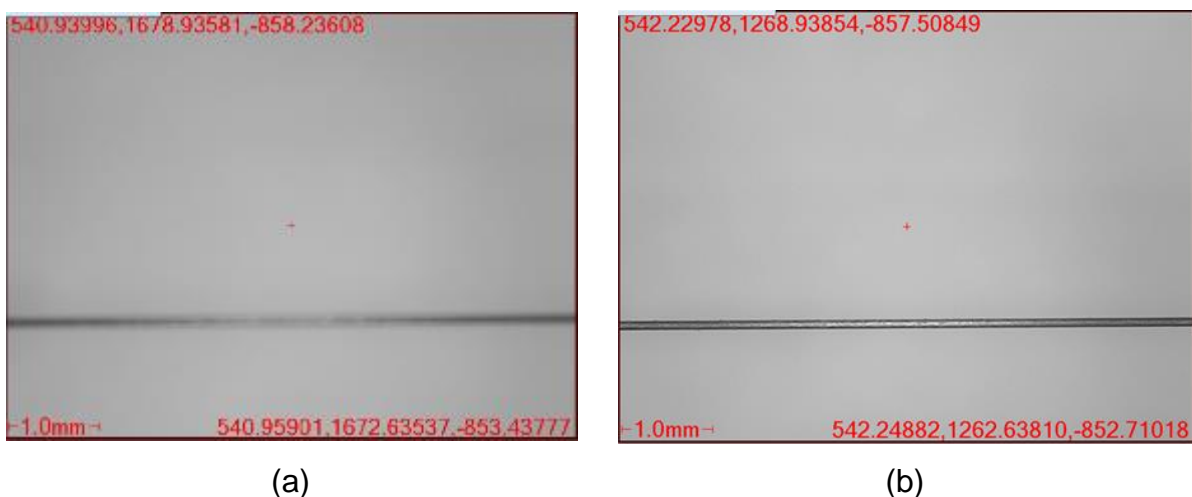


Figura 57: Imagem do fio no software PC-DMIS, fora de foco (a) e em foco (b). [Fonte: autor]

Porém, para as rotinas de fiducialização de magnetos em série, as posições dos centros magnético de ímãs diferentes podem variar por alguma quantidade ainda desconhecida. Neste caso, o processo de focalização manual é impraticável e rotinas

automáticas precisaram ser implementadas, sendo capazes de localizar o fio corretamente dentro de um espaço mínimo de ± 1 mm, tanto na vertical como na horizontal. Particularmente para as referências mecânicas nos magnetos essa questão deve ser menos significativa, desde que se assuma que eles serão posicionados sobre suportes mecânicos com boa repetibilidade. Na verdade, esperava-se já projetar esses suportes também como parte da bancada do fio vibrante, mas o projeto dos magnetos definitivos não terminou a tempo.

Imaginava-se que o foco automático do software pudesse ser diretamente utilizado para este fim, mas foram encontrados diversos problemas que não puderam ser solucionados pelo fabricante. O mais grave deles foi um erro intermitente durante o procedimento de foco automático quando a CCD era indexada, isto é, posicionada na orientação horizontal. A partir disso, a customização de rotinas de focalização e critérios de avaliação de foco teve de ser feita por Rodrigo Leão.

A Figura 58 mostra o anteparo local, utilizado na entrada e na saída do magneto para a medição do fio.

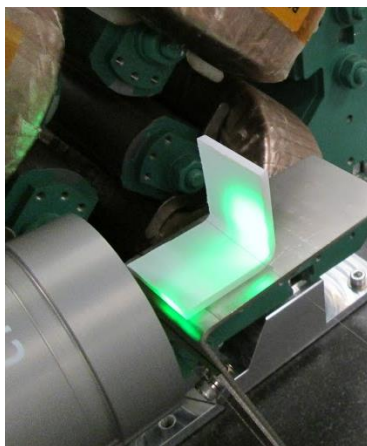


Figura 58: Medida da posição vertical do fio em processo de fiducialização, com anteparo em "L" para as medidas horizontais e verticais. [Fonte: autor]

3.6.2.4 Calibração da câmera

Para a obtenção de números confiáveis em qualquer inspeção metrológica, a primeira etapa é a calibração, ou qualificação, do instrumento de medição, no caso, a câmera. O procedimento sugerido pelo fabricante, entretanto, é insuficiente, pois ele atende apenas à orientação vertical da câmera, o que chamaremos de indexação a 0° .

No procedimento de fiducialização aqui proposto, são necessárias as indexações também a $+90^\circ$ e a -90° , isto é, com a câmera posicionada horizontalmente em dois sentidos. Essas configurações são utilizadas tanto para a medição dos pontos de borda das sapatas em três faces ao redor do magneto, como para a medida do fio, que deve ser visto de cima para a determinação de sua posição horizontal e de lado, para a vertical. Por isso, houve um complemento em relação ao procedimento original.

Antes da solução definitiva, detalhada na seção 0 e que faz uso de um bloco cerâmico padrão para a correção dos erros presentes na indexação da câmera, foram feitas inúmeras tentativas com a esfera de calibração padrão da MMC, utilizada nas medidas com apalpador. Por exemplo, como visto na Figura 59, foram desenvolvidos anteparos escuros frontais e traseiros; porém, a combinação da geometria com a cor clara da esfera sempre dificultou muito a iluminação e o contraste para a detecção das bordas.

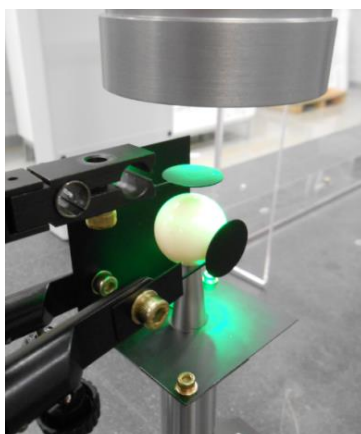


Figura 59: Tentativas de calibração da câmera com a esfera de calibração da MMC, onde são vistos anteparos escuros frontais e traseiros na busca de se obter uma melhor condição de iluminação e contraste para a detecção das bordas. [Fonte: autor]

Outro teste preliminar, realizado com uma esfera extra para não comprometer o padrão da máquina, foi o enegrecimento dessa outra esfera cerâmica clara com a fuligem provocada pela chama de um isqueiro para tentar melhorar o contraste de borda. Contudo, além desse método adicionar uma camada de material e poder causar algum dano permanente ao objeto por causa do calor, o recobrimento não era homogêneo o suficiente.

3.6.2.5 Repetibilidade

Tendo-se o sistema do fio vibrante montado, a câmera calibrada e programa de inspeção pronto, com as posições de medição e os parâmetros da câmera corretamente definidos, o fio foi mantido parado aproximadamente no centro do magneto e 50 medições consecutivas foram realizadas. Com isso, extraíram-se as repetibilidades da geração do novo sistema de coordenadas, a partir das referências mecânicas do magneto, e da medida de posição do fio – uma das parcelas que compõem a incerteza final da técnica.

3.6.2.6 Exatidão

Finalmente, para completar o estudo e fechar os números referentes à metrologia, restava uma avaliação da exatidão da medida da máquina com o sistema de visão. Desejava-se medir a exatidão no volume utilizado pela máquina durante um procedimento de fiducialização completo, que era de aproximadamente $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ m}^3$.



(a)



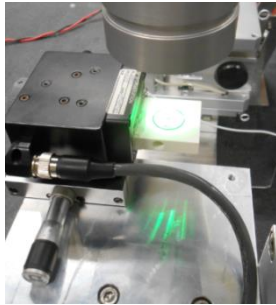
(b)

Figura 60: Abordagens para medida de exatidão da MMC com o sistema de visão: (a) aferição de blocos cerâmicos padrões alinhados; e (b) medida interferométrica com interferômetro API XD6. [Fonte: autor]

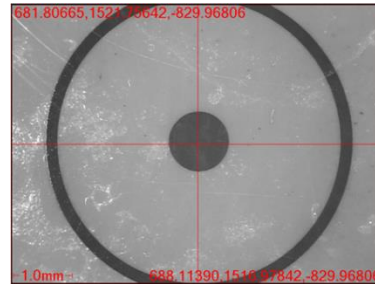
Uma primeira abordagem simples foi com a medição de blocos cerâmicos padrões alinhados, como visto na Figura 60a. No entanto, esta foi logo descartada, pois havia muitas fontes de possíveis erros experimentais e pouca praticidade.

Então, a melhor alternativa encontrada no momento foi o uso do interferômetro API para este serviço, visto que a calibração de MMCs é mesmo uma das aplicações mais comuns de interferômetros desse tipo na indústria. Ainda assim, uma solução alternativa teve de ser proposta, pois, tipicamente, os sensores dos interferômetros são presos diretamente à MMC e neste caso desejava-se incluir a leitura da câmera nas medidas

para a avaliação de eventuais erros. Logo, como observado na Figura 60b, foram utilizados estágios lineares auxiliares de cerca 400 mm de extensão para transportar o sensor do interferômetro, ao qual foi colado um alvo (Figura 61). Dessa maneira, pôde-se confrontar as leitura do interferômetro com as da MMC e concluir as análises.



(a)



(b)

Figura 61: Alternativa de para medida de exatidão da MMC com a câmera. Em (a) é vista a câmera sobre o alvo colado ao corpo do sensor e em (b) a imagem do alvo no software PCDMIS. [Fonte: autor]

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Cálculos básicos

Os primeiros resultados são referentes aos cálculos que caracterizam o sistema, de acordo com a seção 1.2.4.5. Tendo-se escolhido: o fio de tungstênio, com diâmetro de 0.1 mm e densidade de 19.3 g/cm³; a massa com 1755 g, cerca de 75% do valor máximo encontrado nos testes de ruptura; e o comprimento do fio de 1200 mm; então, os valores teóricos para a frequência fundamental e a sagita são:

$$\begin{aligned} f_1 &= 140.5 \text{ Hz} \\ s &= 15.5 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned} \tag{51}$$

Outros números de interesse são as sensibilidades esperadas para as medidas magnéticas, isto é, as amplitudes de vibração em função distância entre fio e o eixo magnético ou em função do desalinhamento angular, de acordo com as equações (45) e (49). Os parâmetros de gradiente e comprimento dos quadrupolos do Sirius, necessários para essas estimativas, são apresentados na Tabela 4.

Um parâmetro necessário para esses cálculos é a taxa de decaimento α do sistema, que está associado aos fatores de amortecimento. O tempo de decaimento $\tau = 2/\alpha$ foi medido com um osciloscópio Agilent DSQ-X-3014 no início do trabalho, quando se trabalhava com o fio um pouco mais curto e o primeiro harmônico em torno de 260 Hz . Para isso, o sinal de vibração (Figura 62a) era monitorado após se tocar o fio em repouso com uma palheta, como se fosse uma corda de violão. Na oportunidade, foram feitos testes tanto com o detector com H21A1 como com o fototransistor S5870 V1 e os resultados foram tratados em Matlab (Figura 62b).

Na Figura 62a, nota-se uma assimetria entre as envoltórias positiva e negativa, com maior tempo de decaimento e uma aparente quebra de derivada no primeiro caso, o que é provavelmente causado por não-linearidades no sensor óptico. O tempo de decaimento extraído da envoltória inferior foi da ordem de 1 s, compatível com os 760 ms reportados no LCLS (LEVASHOV e WOLF, 2006). Este foi o valor adotado para as estimativas de sensibilidade, pois essas medidas não foram repetidas com o sistema definitivo por falta de tempo.

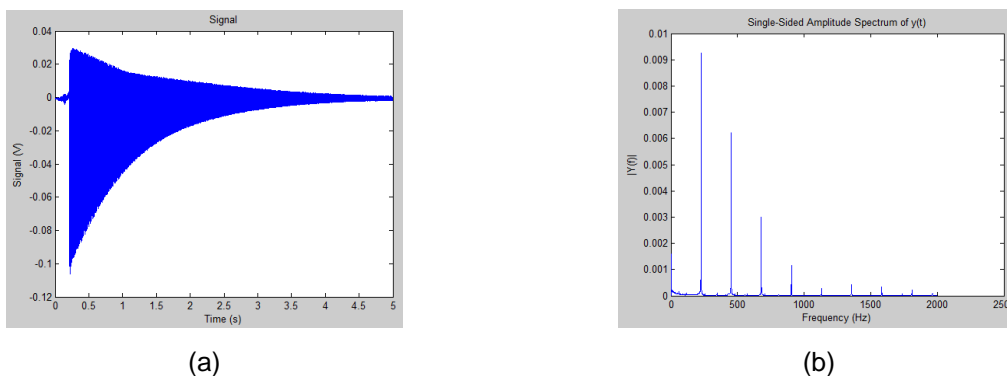


Figura 62: Estudos de decaimento do sistema do fio vibrante em montagem preliminar: (a) sinal extraído do osciloscópio; (b) FFT com a presença dos diversos harmônicos. [Fonte: autor]

Finalmente, utilizando valores médios para os quadrupolos, isto é, gradiente $G = 30$ T/m e comprimento $L_Q = 0.25$ m, corrente $I_0 = 10$ mA, taxa de decaimento $\alpha = 2$ Hz, massa linear do fio $\mu = 1.5 \cdot 10^{-4}$ kg/m e $L = 1.2$ m, as sensibilidades esperadas para o segundo e quarto harmônicos seriam de aproximadamente:

$$\begin{aligned} A_{det2} &= 0.17 \cdot |x| \text{ ou } A_{det2} = 0.17 \cdot |y| \\ A_{det4} &= 0.006 \cdot |\theta| \text{ [m] ou } A_{det4} = 0.006 \cdot |\varphi| \text{ [m]} \end{aligned} \quad (52)$$

Ou seja, a sensibilidade em translação seria idealmente de $0.17 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ e a de rotação, $6 \mu\text{m}/\text{mrad}$. Nas referências do LCLS, entre 2005 e 2007, esses valores medidos foram $0.16 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ para x , $0.18 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ para y , $0.088 \mu\text{m}/\text{mrad}$ para $pitch$ e $0.081 \mu\text{m}/\text{mrad}$ para yaw (WOLF, 2005; LEVASHOV, WOLF, 2006; LEVASHOV, WOLF, 2007). A maior sensibilidade para a rotação no LNLS se deve ao fato do comprimento do quadrupolo, que entra com peso quadrático nesses cálculos, ser quase 10 vezes maior do que no LCLS.

Para este trabalho, dado que o máximo de avanço conseguido foi o uso de um protótipo do quadrupolo do *booster* a baixa corrente, esses números de sensibilidade previstos não chegaram a ser confrontados com medidas reais.

4.2 Mecânica e automação

4.2.1 Caracterização dos estágios lineares

As medidas com o laser interferométrico XD6 foram primeiramente feitas com o laser sobre um tripé e o conjunto mecânico sobre a mesa óptica do grupo SIL, porém, a estabilidade do piso da sala era insatisfatória e as medidas foram repetidas com todos os itens sobre a mesa óptica utilizada pelo grupo (Figura 29).

No total, foram quase 3 semanas de medidas dedicadas a esta etapa, pois, em primeiro lugar os procedimentos de alinhamento e medida são lentos, e depois, mesmo após a migração para a mesa de granito, ainda eram observadas tendências de deriva nas leituras. Desconfiava-se de flutuações térmicas, porém, nenhuma confirmação foi encontrada, a temperatura da sala era estável em $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ e o aquecimento dos motores não parecia ser suficiente para provocar os desvios observados. Na verdade, o interferômetro do grupo havia apresentado um problema e sido enviado para manutenção, por isso, o equipamento utilizado foi um empréstimo da empresa, o qual era tipicamente utilizado para demonstrações. Eventualmente, um maior desgaste desse equipamento pode tê-lo tornado menos estável.

O sistema de coordenadas adotado foi o padrão adotado durante todo o projeto (Figura 21). As medidas foram padronizadas com três varreduras de ida e volta em todo o curso, isto é, 100 mm para os estágios horizontais e 40 mm para os verticais. Para os primeiros há dados da variação linear em x , das retitudes em y e z , além de *pitch*, *yaw* e *roll*, enquanto que para os estágios verticais há dados da variação linear em y , das retitudes em x e z , e de *pitch* e *roll*. O ângulo *yaw* não pôde ser medido neste caso porque o sensor foi utilizado na vertical e o sexto grau de liberdade é dado por um sensor de nível, que trabalha apenas na orientação horizontal.

O software de tratamento de dados do laser fornece, para cada medida, estatísticas de repetibilidade e exatidão para o erro linear que seguem uma de diversas normas, como a ISO 230-2:1997, por exemplo. Os demais graus de liberdade são medidas de movimento parasitas e, conseqüentemente, para eles não faz sentido falar em exatidão. Por isso, o software fornece apenas, a partir da diferença entre o valor máximo e mínimo de cada média, valores de erros máximos. Nem mesmo os valores de repetibilidade são calculados para eles.

Os valores de exatidão e erros máximos em si servirão apenas como referência, pois, na prática, durante as medidas de alinhamento, a faixa de operação será de cerca de 2 mm, fazendo com que os números obtidos sejam na realidade reduzidos por fatores entre 20 e 50. Além disso, esses valores terão pouco ou nenhum efeito prático, porque no máximo provocam algum desalinhamento em função da movimentação dos estágios, mas que, para erros da ordem de micrometros, resultam em variações desprezíveis de poucos microrradianos no fio. De fato, o ajuste das retas na determinação do centro magnético elimina esses erros, visto que o fio apenas responderá ao efeitos do campo magnético na posição onde ele se encontra. Portanto, muito mais importante e sensível é a

repetibilidade dos movimentos, para que se possam reproduzir medidas, voltar a posições desejadas e, enfim, posicionar o fio corretamente no ponto definido como centro magnético ao final de cada medida.

Então, a repetibilidade foi calculada para todos os resultados e o padrão adotado foi de um desvio padrão (σ), porque este é o intervalo definido nas especificações de alinhamento dos magnetos e é também o utilizado pelos demais grupos que utilizam o sistema de fio vibrante. Optou-se por mostrar separadamente as repetibilidades unidirecionais (ida e volta) e bidirecional, porque em alguns casos houve histerese mecânica, de sorte que certos números para repetibilidade bidirecional foram muito piores do que aqueles em cada sentido. De posse desse conhecimento, o procedimento de alinhamento pode ser programado para minimizar estes efeitos.

Para não estender demasiadamente a apresentação dos resultados, os dados serão resumidos em tabelas a seguir, e apenas os gráficos de erro linear serão apresentados na Figura 63 para uma ilustração simples.

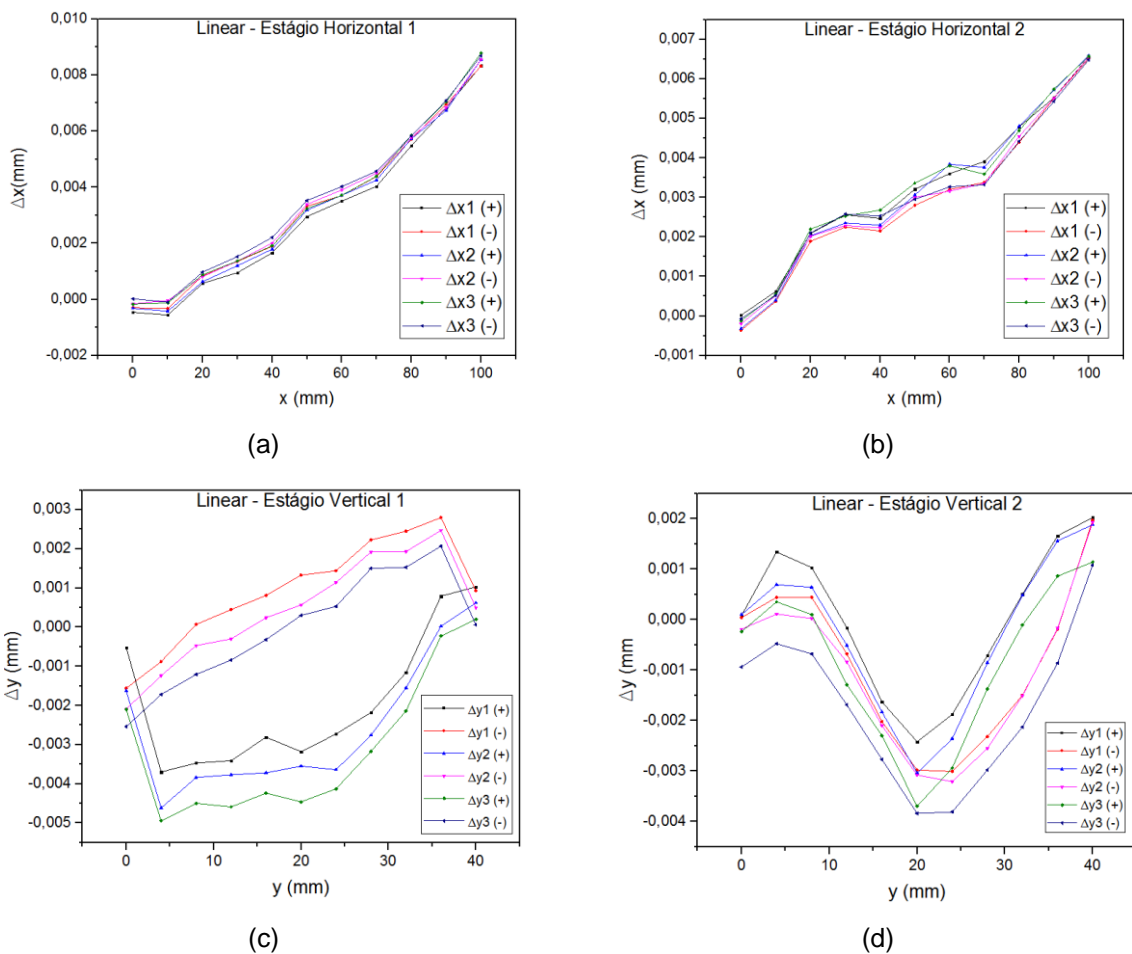


Figura 63: Erro linear dos quatro estágios mecânicos, seguindo o padrão de três varreduras completas com ida e volta. [Fonte: autor]

Tabela 6: Repetibilidades (1σ) e exatidão do erro linear. [Fonte: autor]

Erro Linear	Repetibilidade (+)	Repetibilidade (-)	Repetibilidade	Exatidão*
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
<i>Horizontal 1 (x)</i>	0.0002	0.0002	0.0002	0.0098
<i>Horizontal 2 (x)</i>	0.0002	0.0002	0.0004	0.0071
<i>Vertical 1 (y)</i>	0.0008	0.0006	0.0025	0.0089
<i>Vertical 2 (y)</i>	0.0006	0.0006	0.0011	0.0070

*Exatidão segundo o padrão ISO 230-2:1997.

Nota-se que todas as repetibilidades unidirecionais dos erros lineares são submicrométricas. No que se refere à repetibilidade bidirecional, o pior caso ocorre para o estágio vertical 1, caracterizando realmente uma pequena histerese mecânica.

Tabela 7: Repetibilidades (1σ) e erro máximo da retitude tipo 1. [Fonte: autor]

Retitude 1	Repetibilidade (+)	Repetibilidade (-)	Repetibilidade	Erro máximo
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
<i>Horizontal 1 (y)</i>	0.0009	0.0007	0.0007	0.0045
<i>Horizontal 2 (y)</i>	0.0004	0.0009	0.0007	0.0045
<i>Vertical 1 (x)</i>	0.0004	0.0005	0.0044	0.0160
<i>Vertical 2 (x)</i>	0.0005	0.0008	0.0030	0.0113

Tabela 8: Repetibilidades (1σ) e erro máximo da retitude tipo 2. [Fonte: autor]

Retitude 2	Repetibilidade (+)	Repetibilidade (-)	Repetibilidade	Erro máximo
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
<i>Horizontal 1 (z)</i>	0.0003	0.0004	0.0003	0.0025
<i>Horizontal 2 (z)</i>	0.0003	0.0005	0.0004	0.0012
<i>Vertical 1 (z)</i>	0.0017	0.0013	0.0088	0.0092
<i>Vertical 2 (z)</i>	0.0021	0.0021	0.0019	0.0110

Para as retitudes, em grande parte delas as repetibilidades também se concentraram abaixo de $1\ \mu\text{m}$, e os maiores desvios estão na direção z , que é a menos sensível para o alinhamento. Novamente o estágio vertical 1 teve o pior resultado.

Tabela 9: Repetibilidades (1σ) e erro máximo de *pitch*. [Fonte: autor]

Pitch	Repetibilidade (+) (μrad)	Repetibilidade (-) (μrad)	Repetibilidade (μrad)	Erro máximo (μrad)
<i>Horizontal 1</i>	4.68	3.50	3.51	16.97
<i>Horizontal 2</i>	5.09	3.78	4.30	34.42
<i>Vertical 1</i>	3.62	4.81	46.67	88.72
<i>Vertical 2</i>	3.41	2.82	4.18	67.87

Tabela 10: Repetibilidades (1σ) e erro máximo de *roll*. [Fonte: autor]

Roll	Repetibilidade (+) (μrad)	Repetibilidade (-) (μrad)	Repetibilidade (μrad)	Erro máximo (μrad)
<i>Horizontal 1</i>	1.09	1.37	2.73	52.36
<i>Horizontal 2</i>	1.58	1.14	3.39	37.33
<i>Vertical 1</i>	4.04	3.64	24.78	48.48
<i>Vertical 2</i>	5.09	3.67	19.06	77.08

A compreensão dos efeitos de ângulo requer um pouco mais de esforço, pois essas rotações se transformam em translações no pontos dos nós do fio, que estão localizados aproximadamente a 200 mm de altura em relação ao eixo de deslocamento do estágio horizontal e a 100 mm do centro do estágio vertical.

Tomando os piores casos, a pior repetibilidade bidirecional de *pitch* horizontal provocaria uma variação equivalente de 0.9 μm (200 mm x 4.30 μrad), enquanto que o vertical, de 4.7 μm (100 mm x 46.67 μrad), ambos na direção *z*. Já para *roll*, seriam 0.7 μm (200 mm x 3.39 μrad) pelos horizontais e 2.5 μm (100 mm x 24.78 μrad) pelos verticais, na direção *x*.

Agora, se forem consideradas somente as repetibilidades unidirecionais, o pior caso resulta em apenas 1 μm . Portanto, com algum cuidado na implementação das rotinas de varredura, esses efeitos podem ser mantidos em torno desse valor, se um refinamento máximo da técnica for desejado.

Finalmente, a Tabela 11 mostra os dados de *yaw*, que não levam a translações na posição dos nós porque estes estão centralizados nas placas dos estágios.

Tabela 11: Repetibilidades (1σ) e erro máximo de yaw . [Fonte: autor]

Roll	Repetibilidade (+)	Repetibilidade (-)	Repetibilidade	Erro máximo
	(μrad)	(μrad)	(μrad)	(μrad)
<i>Horizontal 1</i>	1.56	1.15	1.39	43.63
<i>Horizontal 2</i>	2.58	2.48	2.28	20.85

Esses erros de repetibilidades de linearidade, retitude e erros angulares contribuem para a incerteza da inspeção magnética e, além disso, constituem incertezas no posterior reposicionamento do fio no eixo magnético para a inspeção metrológica. A avaliação dessa incerteza no reposicionamento do fio sobre as coordenadas x , y , $pitch$ e $roll$ do eixo magnético é feita pela soma quadrática das componentes e pela propagação de erros dentro da geometria da bancada. Esses resultados são apresentados, na Tabela 12, tanto para a repetibilidade bidirecional, que foi a utilizada no decorrer deste trabalho, como para a unidirecional, de modo a evidenciar o possível refinamento do procedimento.

Tabela 12: Incerteza no reposicionamento do fio sobre o eixo magnético do ímã após o procedimento de alinhamento magnético. [Fonte: autor]

Coordenada/Orientação	Desvio Padrão	Desvio Padrão
	(Repetibilidade Bidirecional)	(Repetibilidade Unidirecional)
$x_m (\mu\text{m})$	3.0	0.79
$y_m (\mu\text{m})$	1.2	0.74
$pitch_m (\mu\text{rad})$	2.4	1.2
$yaw_m (\mu\text{rad})$	5.2	1.0

Para complemento da análise, vale observar que pela forma como o fio é montado e esticado pela massa existem forças e momentos adicionais atuando sobre os estágios. O pior caso é na extremidade fixa do fio, onde a força é praticamente horizontal na altura dos nós e gera momentos de 3.6 e 1.8 Nm nos estágios horizontal e vertical, respectivamente. Consultando o catálogo do fabricante, a capacidade máxima é de 63 Nm para o estágio horizontal e não indicada a priori para o vertical. Mesmo o último não sendo citado, a robustez mecânica é inquestionável e capacidades da mesma ordem de grandeza podem ser esperadas. Portanto, como os momentos envolvidos na montagem são muito inferiores às capacidades, não há razões para se crer que a montagem do fio vá influenciar significativamente os resultados obtidos nas caracterizações.

Por fim, os últimos resultados da caracterização são os valores de esquadro entre os estágios horizontal e vertical de cada conjunto. Neste caso, as medidas de esquadro foram realizadas na sequência das medidas horizontais e com o pentaprisma, logo, os dados de varreduras verticais utilizados para isso não são os mesmos que foram utilizados oficialmente para repetibilidade e exatidão, os quais foram extraídos das medidas com o laser na posição vertical em busca de uma maior precisão. Entretanto, as diferenças para esquadro não são consideradas significativas, visto que os números são sempre pequenos. Os valores, destacados na Tabela 13, são fornecidos diretamente pelo software do laser, a partir da combinação de ajustes lineares de medidas de retitude de cada elemento.

Tabela 13: Esquadro entre estágio horizontal e vertical dos conjuntos mecânicos, exibido em microrradianos e graus. [Fonte: autor]

Roll	Esquadro (μrad)	Esquadro ($^\circ$)
<i>Conjunto 1</i>	57.7	0.00331
<i>Conjunto 2</i>	4.36	0.00025

4.2.2 Alinhamento mecânico

4.2.2.1 Simulação

Seguindo o sistema de coordenadas adotado, supomos que idealmente os estágios lineares se movimentariam nas direções x e y , horizontal e verticalmente, respectivamente, sendo separados por uma distância l na direção do eixo z , também horizontal.

O erro mais simples (tipo 1) é o de desalinhamento entre os estágios horizontais ou verticais em relação ao plano ideal XY, ou seja, os primeiros com um ângulo α em relação ao eixo x no plano ZX (*yaw*) ou os segundos com um ângulo α em relação ao eixo y no plano YZ (*pitch*). Vistos isoladamente, cada caso provocaria a variação do ângulo θ do fio em relação ao eixo z em apenas um plano, ZX ou YZ. No modelo, o ângulo α foi considerado positivo no sentido em que provoca um aumento de l .

A Figura 64 exemplifica o caso, com a vista superior (plano ZX) de uma varredura com distância d com os estágios horizontais, saindo de A e B e chegando a A' e B':

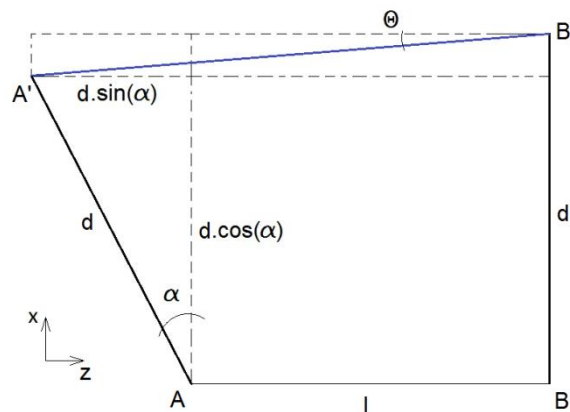


Figura 64: Modelagem geométrica do problema de desalinhamento básico entre os estágios de translação. [Fonte: autor]

O comprimento do fio é $l = 1200$ mm, e para as varreduras considerou-se $d = 2$ mm. Os gráficos a seguir mostram os parâmetros de interesse com a variação de α .

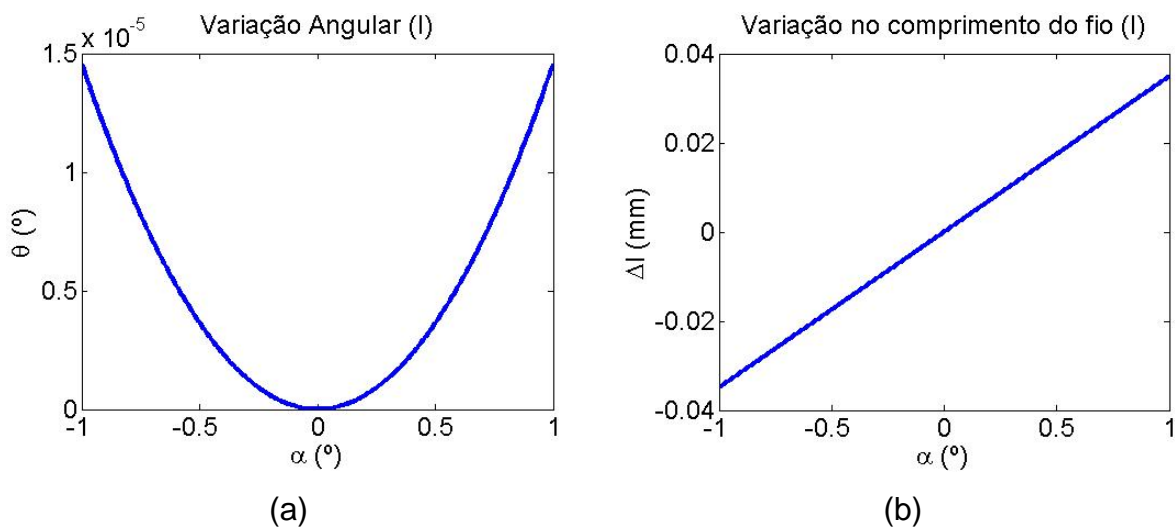


Figura 65: (a) variação angular do fio em relação ao eixo z em função do ângulo de desalinhamento α ; (b) variação no comprimento do fio em função do ângulo de desalinhamento α . [Fonte: autor]

A segunda possibilidade de desalinhamento (tipo 2) consiste em um ângulo entre o eixo de movimentação dos estágios horizontais e o eixo x no plano XY, ou entre o dos estágios verticais e o eixo y no plano XY, ambos erros do tipo *roll*.

Neste caso, analisando os desalinhamentos isoladamente temos que o ângulo do fio com o eixo z possui componentes não mais em apenas em um, mas nos dois planos sensíveis, isto é, tanto no ZX como no YZ.

Trabalhando novamente com o caso horizontal, um ângulo β entre um estágio horizontal e o eixo x no plano XY levaria a seguinte configuração, com a vista superior (plano ZX) e a vista lateral (plano YZ):

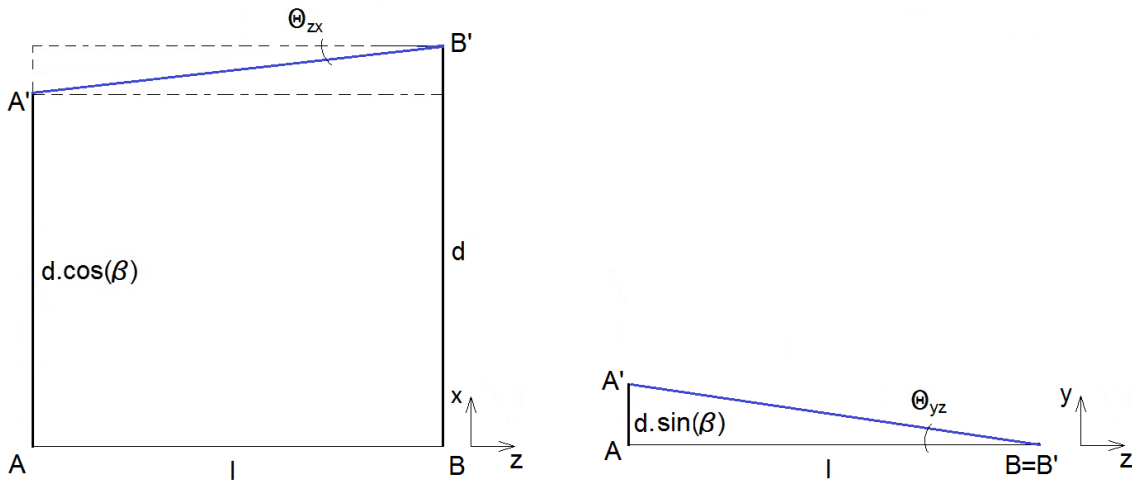


Figura 66: Modelagem geométrica do problema de desalinhamento de segunda ordem entre os estágios de translação. [Fonte: autor]

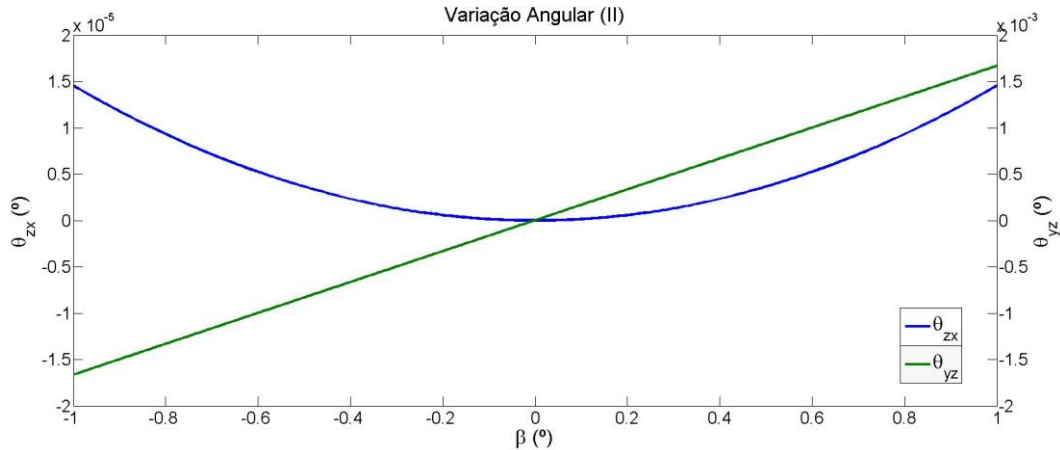


Figura 67: Variação angular do fio em relação ao eixo z em função do ângulo de desalinhamento β . [Fonte: autor]

Do gráfico, tem-se que a variação angular no plano horizontal possui o mesmo comportamento parabólico e é da mesma ordem de grandeza do primeiro caso (Figura 65a). Já o ângulo no plano vertical apresenta um comportamento linear simétrico e é uma ordem de grandeza superior em relação ao horizontal.

Aqui, a variação do comprimento do fio tem o comportamento da Figura 68, com um perfil parabólico, mas valor desprezível.

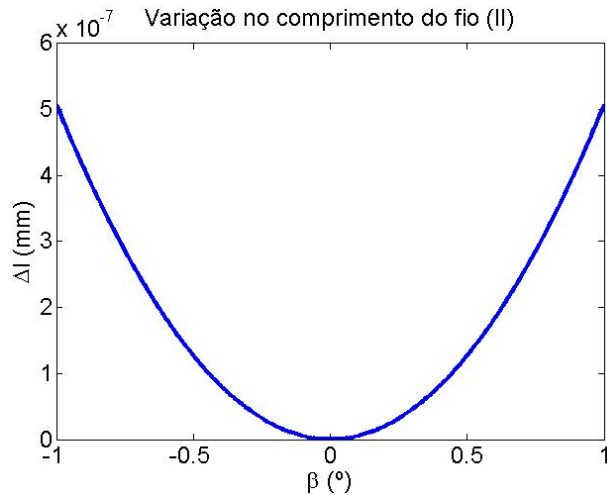


Figura 68: Variação no comprimento do fio em função do ângulo de desalinhamento β . [Fonte: autor]

Para o caso de desalinhamento no estágio vertical, as variações angulares são trocadas em relação às da Figura 67, isto é, a maior variação ocorre na projeção sobre o plano horizontal; ao passo que a variação de comprimento do fio é equivalente à da Figura 68.

Diferenciando-se a equação (38) em relação l (L na equação):

$$df_0 = -\frac{1}{2l^2} \sqrt{\frac{T}{\mu}} dl = -\frac{f_0}{l} dl$$

Portanto, com f_0 da ordem de 150 Hz, variações de alguns centésimos de milímetro no comprimento do fio, que, de acordo com a Figura 65, ocorreriam para ângulos da ordem de 1° , as variações na frequência seriam da ordem de apenas 5 mHz. Na prática, podem-se esperar variações maiores, pois variações no fio provocam também variações na tração, uma vez que os nós do fio não são completamente livres de atrito longitudinalmente. De qualquer modo, essas mudanças deveriam ser plenamente compensadas pelo sistema de PLL do *lock-in*.

A existência de erros angulares durante a varredura também provoca variações na posição do fio na posição longitudinal do magneto em $l/4 = 300$ mm. A Figura 69 mostra o erro vertical nessa posição para o pior caso verificado, isto é, θ_{yz} no erro tipo 2, assumindo-se ainda o ponto de giro no nó distante do magneto: 1° seria suficiente para adicionar erros translacionais da ordem $30 \mu\text{m}$ em uma varredura de 2 mm.

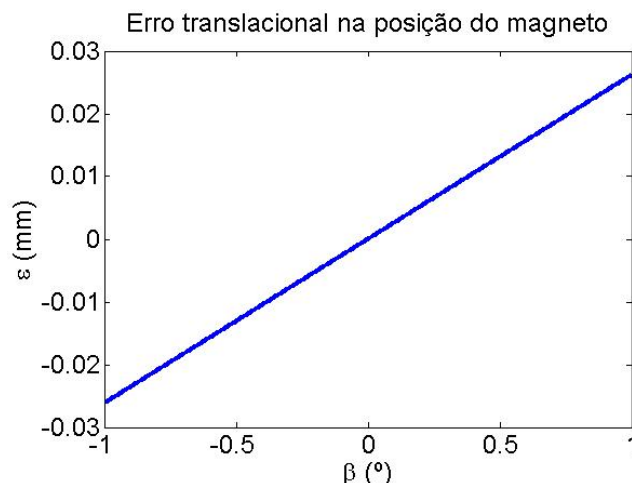


Figura 69: Erro da translacional do fio na posição do magneto (300m de um dos nós) para θ_{yz} da Figura 67. [Fonte: autor]

Especificou-se então 0.02° , ou cerca de $350 \mu\text{rad}$, como a tolerância de alinhamento, para que esses erros se mantivessem submicrométricos.

4.2.2.2 Montagem experimental

O alinhamento mecânico dos dois estágios foi realizado a partir de uma das guias lineares de cada um dos estágios lineares. Com a MMC seis pontos eram medidos em cada uma das duas guias, tanto na lateral para avaliação de *yaw* como na parte superior para *roll* entre os estágios, e então o melhor ajuste linear de cada conjunto de pontos era realizado pelo software PC-DMIS. Finalmente, os ângulos entre as retas ajustadas definia o alinhamento. Um dos estágios foi mantido fixo enquanto o outro era manualmente ajustado até que o melhor resultado fosse obtido. O desalinhamento tipo *pitch* não foi avaliado, porém, como foi dito, ele deveria depender somente da montagem mecânica, para o que seria esperado um erro da ordem daquele medido para *roll*.

Os resultados finais, apresentados na Tabela 14, indicam que todas as componentes ficaram abaixo da especificação definida na seção anterior. Portanto, a contribuição dos erros de desalinhamento devem ter influência submicrométrica nos procedimentos de alinhamento magnético. Finalmente, os erros de esquadro (Tabela 13), quatro vezes menores do que o desalinhamento *roll*, são desprezíveis.

Tabela 14: Desalinhamento do tipo *roll* e *yaw* entre os estágios lineares. [Fonte: autor]

Componente	Desalinhamento (°)
<i>roll</i>	0.014
<i>yaw</i>	0.001

4.3 Sensores de vibração

4.3.1 Fototransistor H21A1

Após o ajuste de perpendicularidade entre os estágios de translação manuais com a MMC, com erro estimado menor do que 0.15° , foram levantadas as curvas de caracterização sensor projetado com os fototransistores H21A1, mostradas na Figura 70.

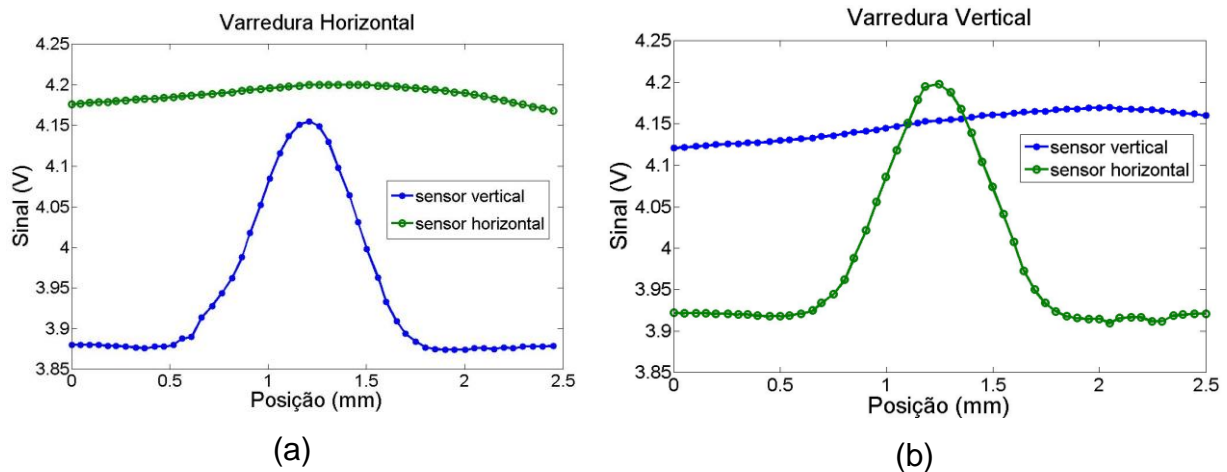


Figura 70: Curvas de caracterização dos sensores de vibração com fototransistores H21A1. Em (a) uma varredura do estágio de translação horizontal, com pequenas variações de sinal no sensor vertical e em (b), o complemento. [Fonte: autor]

A semelhança com a curva de referência de Temnykh (TEMNYKH, 1997), mostrada na Figura 37a, é notável. Naquele trabalho, as sensibilidades em torno do ponto de operação foram de 1836 mV/mm para o sinal principal e 41 mV/mm para o complementar, o qual seria zero no caso ideal. Este fator 45 foi considerado suficientemente bom para assumir a independência entre os eixos de medição. Jansz (JANSZ, 2007) também mostra curvas similares com sensibilidade de 1100 mV/mm.

Na caracterização feita a sensibilidade obtida para o sinal principal foi da ordem de 650 mV/mm, enquanto que o sinal complementar, idealmente constante, apresentou a

derivada de 27 mV/mm. Este fator 24 entre os sinais é apenas a metade do que foi obtido por Temnykh. As principais causas de menor sensibilidade poderiam ser a separação cerca de 1 mm maior entre o emissor e o receptor, em relação ao invólucro comercial, ou algum desalinhamento entre eles; Já a menor independência entre os eixos, pode ser devida um pior alinhamento na ortogonalidade dos estágios manuais.

Visto que o trabalho com esse detector foi interrompido, não foi possível investigar realmente se esse fator já seria suficiente para operação, ou se seriam necessárias melhorias. De qualquer modo, independentemente do fator entre os canais, o ganho do circuito poderia ser aumentado para elevar os níveis dos sinais de saída..

Ainda durante os testes com o H21A1 foram notados os primeiros problemas de ruído eletromagnético. A Figura 71 mostra os sinais de saída com a unidade de controle dos motores desligada em (a) e ligada em (b), gerando picos de tensão superiores a 2 V_{pp} na faixa de 8 MHz. Este efeito pôde ser eliminado somente após o isolamento elétrico entre os estágios lineares Huber e o sensor, o que foi feito com substituição do suporte de alumínio que acoplava os estágios manuais ao estágio motorizado por um de PVC.

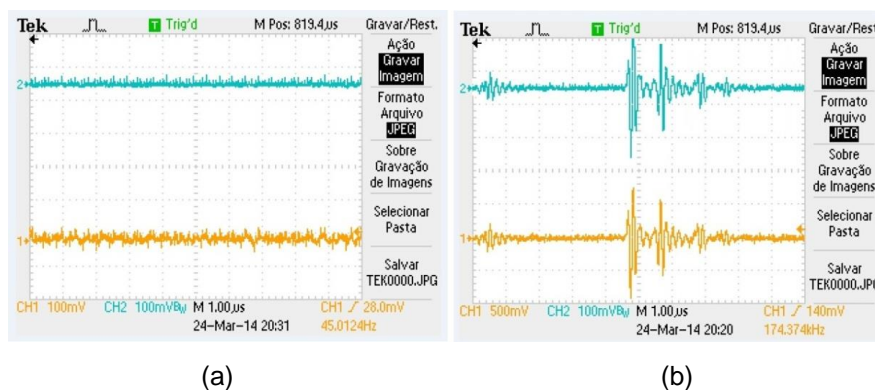


Figura 71: Sinais de saída dos fototransistores H21A1 em um osciloscópio Agilent DSQ-X-3014: (a) com a unidade de controle de motores desligada; (b) com a unidade de controle de motores ligada, onde são vistos picos com amplitude superior a 2 V_{pp} na faixa de 8 MHz. [Fonte: autor]

4.3.1 Fotodiodo S5870

4.3.1.1 *Primeira versão*

A caracterização do sensor V1 foi feita de modo automático com o conjunto de estágios mecânicos Huber. É mostrado na Figura 72 o resultado de apenas um dos sensores, mas que pode ser fielmente estendido para o de seu complementar.

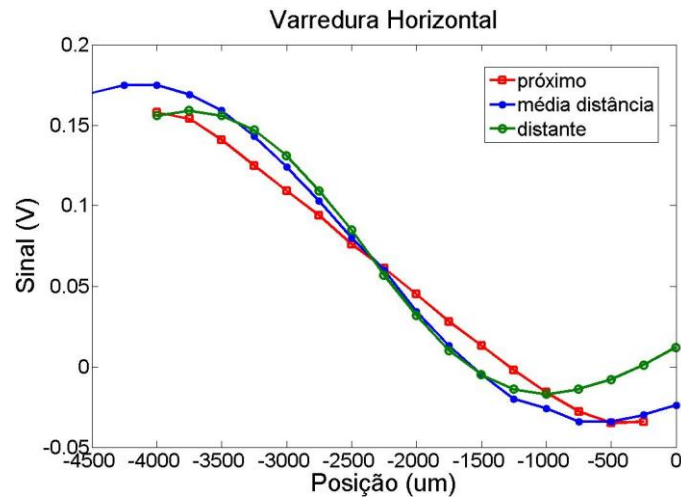


Figura 72: Curvas de caracterização do sensor a partir de varreduras automatizadas com o estágio linear da Huber para diferentes distâncias entre fio e o fotodiodo. [Fonte: autor]

A constatação imediata foi a de que a distância entre o fio e o fotodiodo afetava consideravelmente a linearidade da resposta do sensor. Fica clara diferença entre a resposta da varredura com o fio bastante próximo ao sensor, separados por cerca de 1 mm, e das varreduras com o fio mais distante, respectivamente com 7 e 13 mm de separação. O melhor resultado de linearidade apresentou uma faixa de operação de aproximadamente 3 mm, isto é, uma ordem de grandeza superior à região linear do H21A1. Já a sensibilidade foi apenas de 60 mV/mm, uma ordem de grandeza inferior à obtida com o H21A1.

Apesar da linearidade ser crescente com a maior proximidade entre o sensor e o fio, a aplicação prática coloca limites para essa questão, pois deve permitir a vibração do fio e mesmo a variação de sua posição, levando-se em conta que um sensor fica na horizontal e outro na vertical.

4.3.1.2 Simulações e fonte de iluminação

4.3.1.2.1 Linearidade e sensibilidade

Visto que o conjunto de dados gerados foi muito grande, será feito um breve resumo dos resultados principais. Os seguintes parâmetros foram trabalhados nas simulações iniciais:

- fonte: homogênea ou com distribuição gaussiana circular (com sigma variável);

- centro (x,y) da fonte gaussiana;
- sombra do fio: sombra com bordas bem definidas (umbra apenas) ou gaussiana simples (umbra + penumbra), com desvio padrão (sigma) variável;
- posição do centro do fio;
- ângulo do fio em relação ao ângulo de otimização (orientação vertical nas imagens);
- assimetria da sombra gaussiana do fio, simulando variações de altura entre o fio e sensor ao longo do sensor, entre a entrada e a saída, o que ocorre no caso de variações angulares no plano ortogonal ao sensor analisado.

A Figura 73 mostra imagens que facilitam o entendimento do estudo realizado. Em (a) é visto o sensor rotacionado de acordo com o ângulo otimizado e como se iluminado por uma fonte perfeitamente homogênea; (b) mostra a característica de uma fonte de iluminação com perfil gaussiano centralizada em relação ao sensor; (c) mostra o sensor já com a sombra ideal de um fio; (d) mostra um perfil de sombra gaussiano em sua largura, enquanto (e) mostra este perfil com sigma variável longitudinalmente, simulando uma possível variação da distância entre o fio e o fotodiodo; finalmente, (f) mostra variações do ângulo do fio em relação ângulo ótimo, o que ocorre para varreduras de *pitch* e *yaw*.

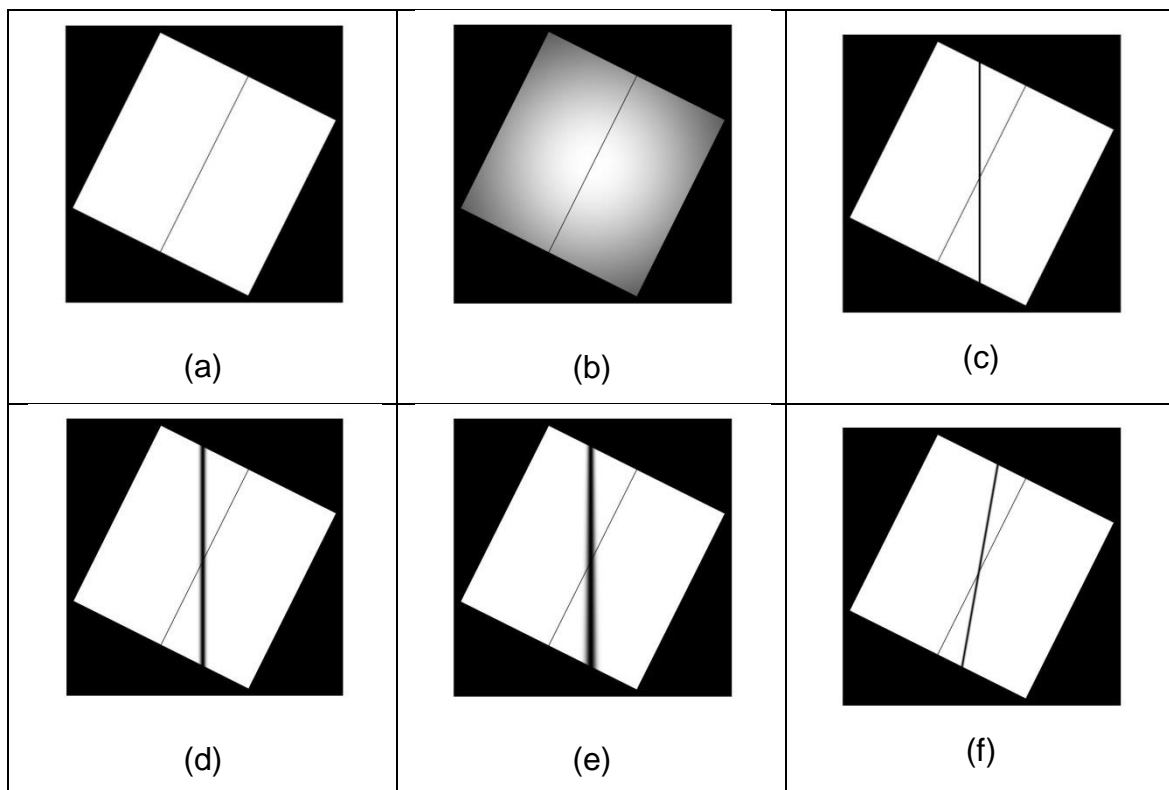


Figura 73: Conjunto de imagens que mostram as simulações para o detector S5870. [Fonte: autor]

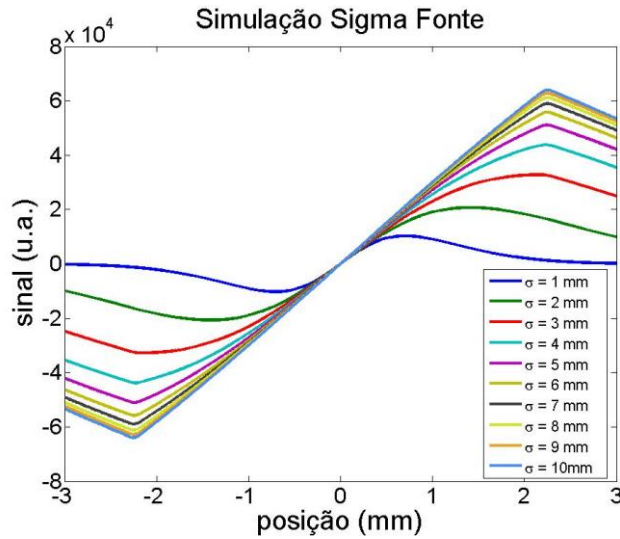


Figura 74: Varreduras translacionais de um fio com bordas bem definidas e fonte gaussiana. [Fonte: autor]

De fato, como poderia ser esperado, a não-homogeneidade da fonte é a maior responsável pelo comprometimento da linearidade do sinal, como pode ser visto na Figura 74. As simulações de 1 a 10 são com variações do sigma de uma fonte gaussiana entre 1 e 10 mm. Como comparação, seguindo um critério de linearidade de ajuste com um coeficiente de correlação melhor do que 0.9999, a região linear chega a ± 2.25 mm com uma fonte homogênea, mas não passa de ± 0.75 para o melhor caso desta simulação.

Ademais, o ângulo otimizado no projeto apresenta realmente a maior região linear possível. Variações de $\pm 3^\circ$ provocariam, por exemplo, mudanças de cerca de 10% tanto na extensão da região linear como na sensibilidade. Felizmente, apenas ângulos de frações de grau são utilizados durante os procedimentos com a fio vibrante.

Finalmente, pequenos desalinhamentos da posição da fonte gaussiana em relação ao centro ($\epsilon \ll \sigma_{fonte}$) provocam apenas um offset do sinal. Já para um perfil de fio gaussiano, desde que o sigma dessa sombra seja da ordem de grandeza da largura do próprio fio os efeitos não são críticos. O mesmo é válido para o caso da variação longitudinal desse sigma, isto é, não há maiores efeitos se a variação for da ordem de até 5%, o que deve ser plenamente satisfeito em vista dos pequenos ângulos envolvidos.

4.3.1.2.2 Fonte de iluminação

A primeira constatação dos estudos das fontes de iluminação sobre a CCD foi que a iluminação direta, isto é, sem difusores, carrega o padrão das fontes, o que é especialmente negativo para a matriz de LEDs neste caso.

A Figura 75 e a Figura 76 mostram imagens a partir de diferentes difusores e da fonte de LED de 10mm, primeiro sem obstáculos e depois passando pelo fio. O LED de 10 mm foi escolhido por apresentar simetria cilíndrica, assim como o LED de 5 mm, e possuir uma área maior, mais próxima do valor da do fotodiodo. Nota-se que mesmo com os difusores a homogeneidade buscada em toda a região não estava próxima. Além disso, apesar dos difusores suavizarem o padrão de iluminação, a abertura óptica dessas fontes era muito grande, impedindo a resolução da sombra do fio.

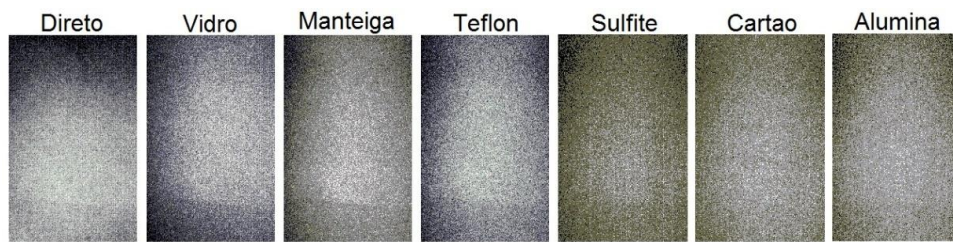


Figura 75: Imagens na CCD para os diferentes difusores testados com a fonte LED de 10 mm. [Fonte: autor]

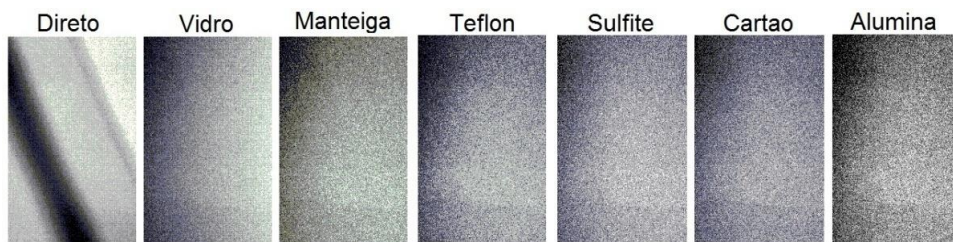


Figura 76: Imagens na CCD para os diferentes difusores testados com a fonte LED de 10 mm, agora passando pelo fio. [Fonte: autor]

Tentando tornar viável o uso dos difusores, o tamanho da fonte foi controlado com uma íris. Na Figura 77 e na Figura 78 são mostradas as diferenças de contraste do fio de acordo com o tamanho da fonte, primeiramente com iluminação direta e depois passando pelo difusor de papel manteiga, aquele com maior transmissibilidade dentre os avaliados.

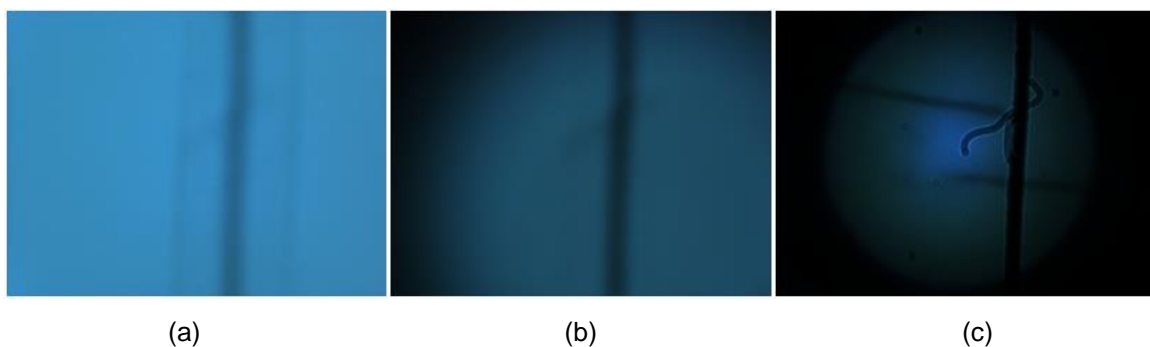


Figura 77: Padrão de iluminação na CCD com LED de 10 mm e nenhum difusor, variando-se o diâmetro da fonte: (a) 10 mm; (b) 3 mm; e (c) 0.01 mm. [Fonte: autor]

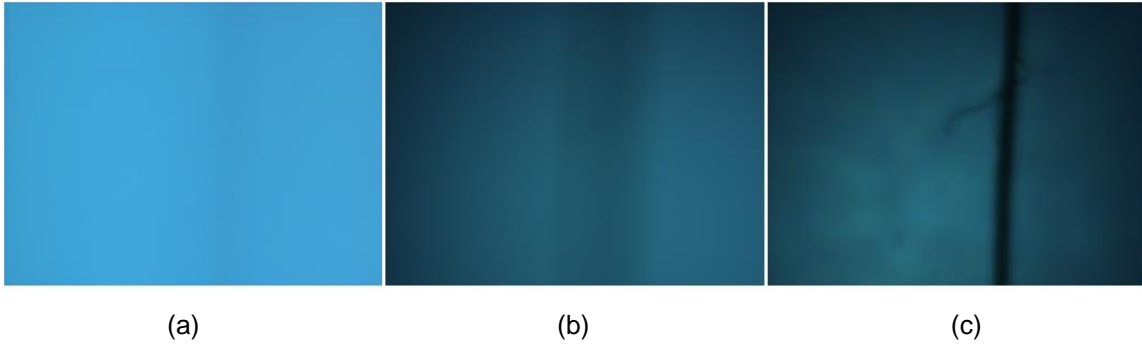


Figura 78: Padrão de iluminação na CCD, com LED de 10 mm e difusor de papel manteiga, e com a variação do diâmetro da fonte. Da esquerda para a direita: 10 mm, 3 mm e 0.01mm. [Fonte: autor]

Com a redução do tamanho da fonte fica clara a melhora do contraste do fio, porém, às custas da diminuição da homogeneidade da iluminação. Posteriormente, sem o fio, os casos extremos da Figura 77 e da Figura 78 foram tratados na Figura 79, em que são apresentadas as imagens em escala de cinza, seus centros de massa, seus perfis de linha e coluna no ponto do centro de massa, suas entropias e seus histogramas. A intensidade foi ajustada em cada configuração para impedir a saturação da CCD.

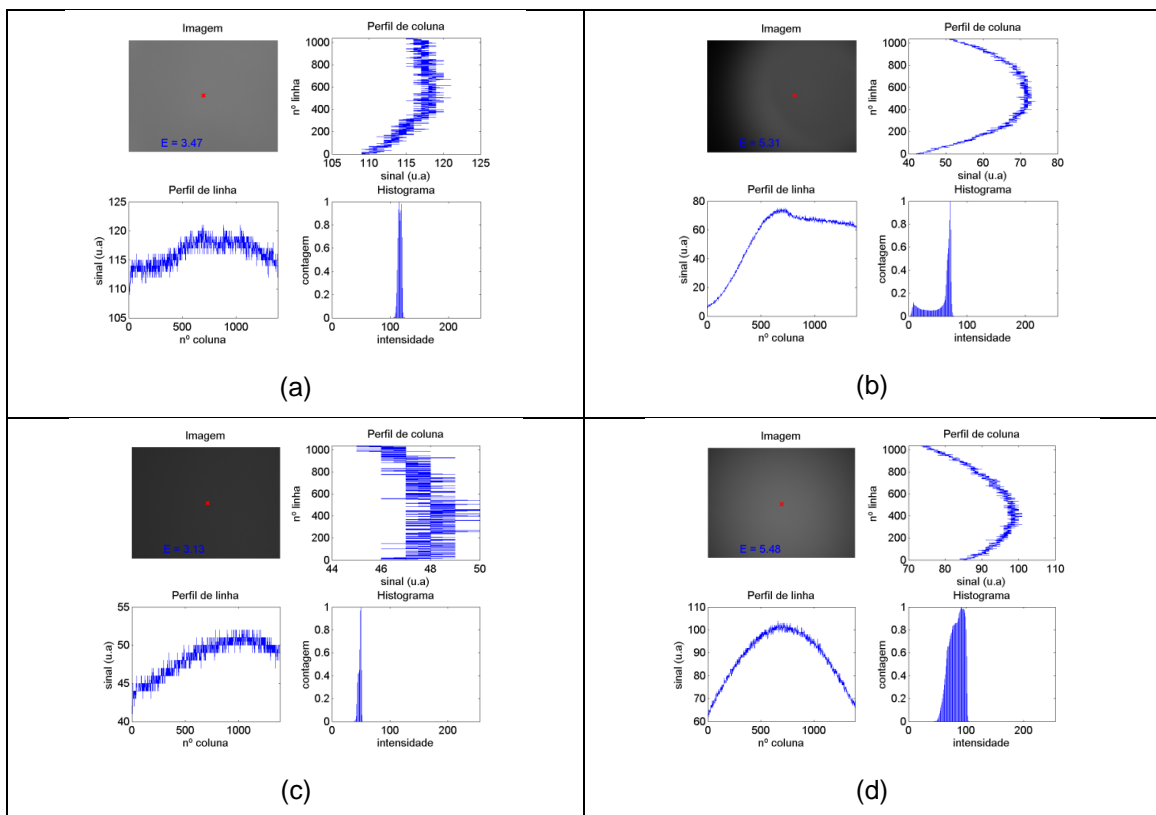


Figura 79: Imagens em escala de cinza com seus centros de massa, seus perfis de linha e coluna no ponto do centro de massa, suas entropias e seus histogramas. (a) sem difusor e abertura de 10 mm; (b) sem difusor e 0.01 mm; (c) difusor de papel manteiga e 10 mm; e (d) difusor de papel manteiga e 0.01 mm. [Fonte: autor]

A fonte ideal, homogênea, teria uma entropia igual a zero e o histograma com um único tom de cinza. Segundo esse critério, portanto, os melhores resultados seriam obtidos sem a íris. Além disso, os sinais variam cerca de 10% com a fonte completa, e quase que 40% com a fonte em seu menor tamanho.

Enfim, a avaliação rápida que se buscava não se mostrou tão simples e esse estudo foi insuficiente para apontar um candidato claro e bem definido para a fonte da nova versão do detector. Neste momento, o prazo para a finalização do mestrado já era curto e não se pretendia onerar a oficina mecânica com mais trabalho do que o que seria necessário para a construção da segunda versão do detector.

4.3.1.2.3 Medidas de alinhamento magnético

Para reproduzir medidas de alinhamento magnético, a vibração do fio em cada ponto da varredura foi simulada por um sinal senoidal com amplitude em acordo com uma sensibilidade de $0.3 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ (um pouco maior do que a estimada na equação (52)) e, então, este sinal foi interpolado com a curva de caracterização que se desejava avaliar, real ou teórica. Finalmente, a amplitude do pico da FFT desse sinal reproduzia a função do amplificador *lock-in*.

Como esperado, as não linearidades das curvas de caracterização dos sensores provocam a deformação do sinal senoidal ideal e o aparecimento de componentes em outros harmônicos da frequência simulada original, "roubando energia" da frequência fundamental e confundindo não linearidades do sistema de detecção com campo magnéticos menores.

O principal ganho com o uso S5870 deveria ser uma região de operação maior do que a do H21A1, de modo que, mesmo o detector estando solidário a um dos estágios lineares e variando a posição do fio sobre o detector (em função de varreduras angulares ou erros de alinhamento entre os estágios mecânicos), a resposta ainda seria linear. Essa situação foi simulada por meio de desvios aleatórios (dentro de um erro máximo) da posição do fio em relação ao ponto operação no centro do sensor. Não-linearidades do sensor fariam com que o fio vibrasse em torno de pontos da curva de caracterização com sensibilidade possivelmente diferentes, atrapalhando o ajuste linear correto em busca do centro magnético.

As simulações envolveram, respectivamente, o sensor S5870 ideal simulado, o sensor H21A1 e a primeira versão do detector com S5870. Para facilitar as análises, o centro do quadrupolo teórico, isto é, o zero de amplitude, foi mantido sempre em zero.

A Figura 80 mostra o resultado do S5870 ideal para seis varreduras entre ± 1 mm com amplitudes de desvio aleatório variando entre zero (ponto de operação ideal em todos os pontos) e 0.25 mm. Como esperado, todas as curvas são coincidentes, isto é, dada a linearidade perfeita, a sensibilidade do sensor é a mesma, quer seja no ponto de operação nominal, no centro do sensor, quer seja fora dele.

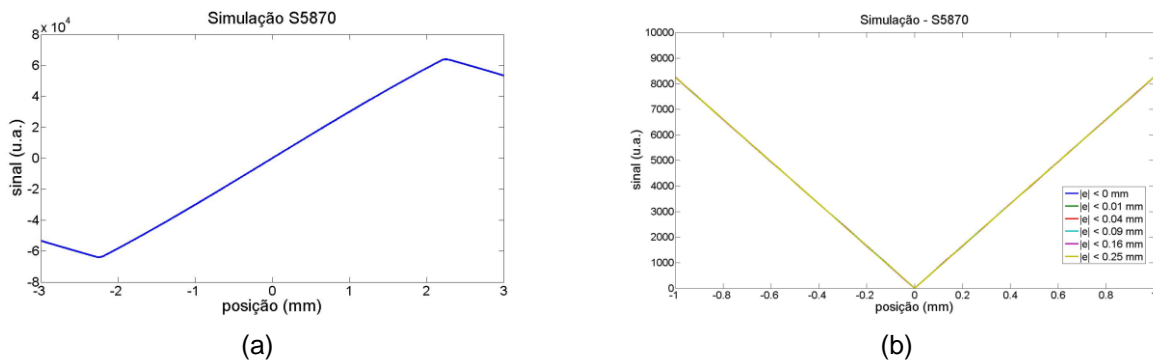


Figura 80: Simulação de alinhamento com o sensor S5870 simulado: (a) curva de caracterização simulada; (b) simulação de medida de alinhamento magnético. [Fonte: autor]

O resultado da Figura 81 para o H21A1 mostra que mesmo para o alinhamento ideal, com desvio igual zero, a região onde o ajuste linear é adequado é limitada. De fato, como a região de linearidade é restrita a cerca de apenas ± 0.15 mm, à medida que amplitude de vibração do fio cresce, ao se afastar da origem, o sinal de oscilação é distorcido com a contribuição de outros harmônicos. Pela mesma razão, exige-se que o sensor opere com o fio o mais centralizado possível no ponto de operação ideal, não tolerando erros maiores que 0.1 mm.

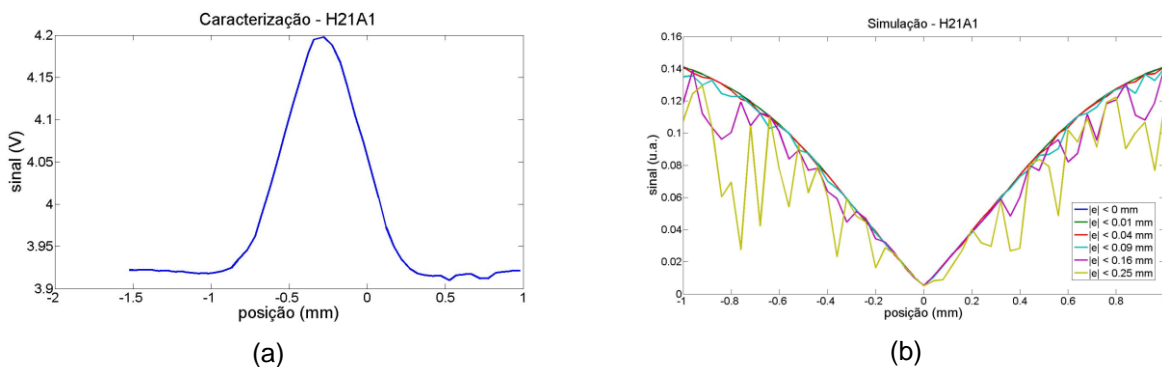


Figura 81: Simulação de alinhamento com sensor H21A1: (a) curva de caracterização real; (b) simulação de medida de alinhamento magnético. [Fonte: autor]

A Figura 82 mostra o resultado para o S5870 V1. A simulação realizada foi análoga às demais, porém, em uma região de varredura maior, ± 3 mm, e com desvios também maiores, de até 1 mm, em relação ao ponto de operação ideal.

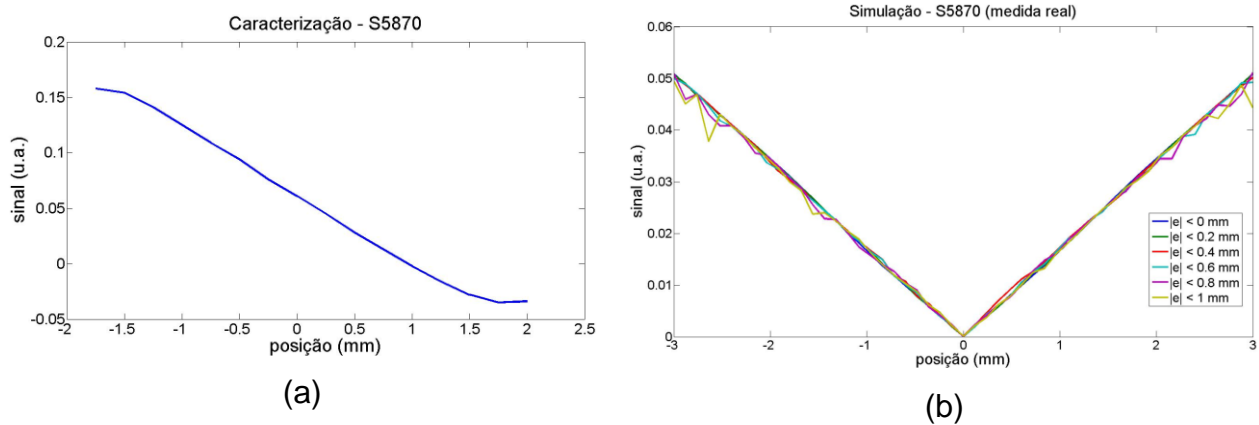


Figura 82: Simulação de alinhamento com a primeira versão do detector com S5870: (a) curva de caracterização real; (b) simulação de medida de alinhamento magnético. [Fonte: autor]

Felizmente, de acordo com a proposta original para o sensor, a linearidade é bastante satisfatória mesmo com desvios de até 1 mm em relação à posição de operação ideal e com pontos da varredura até 3 mm distantes do centro magnético, onde a amplitude de vibração é de quase 1 mm. Isso sugere que o sensor realmente atenderia ao procedimento de alinhamento sem a necessidade de reposicionamento no ponto de operação a cada medida.

4.3.1.3 Segunda versão

Como foi dito, as caracterizações do detector V2 tiveram dois momentos, primeiramente sem e depois com modulação da fonte luz. Na primeira parte, o valor médio (DC) das saídas dos sensores eram medidos com a unidade Agilent 34970A, e, apesar do ruído presente, que era bastante evidente pela flutuação dos valores no display, curvas razoáveis foram obtidas, como visto na Figura 83. Como não havia modulação, precisava-se avaliar a influência da luz ambiente, por isso, as medidas foram feitas tanto com a luz apagada (I) como acesa (II).

Desses gráficos, nota-se que a luz ambiente exercia pouca influência nos sinais, validando, ao menos nesse aspecto, a solução do projeto do detector. A diferença de

sensibilidade do sinal entre dois canais decorre de diferentes valores das resistências de saída (Figura 43b) em cada canal durante esses testes.

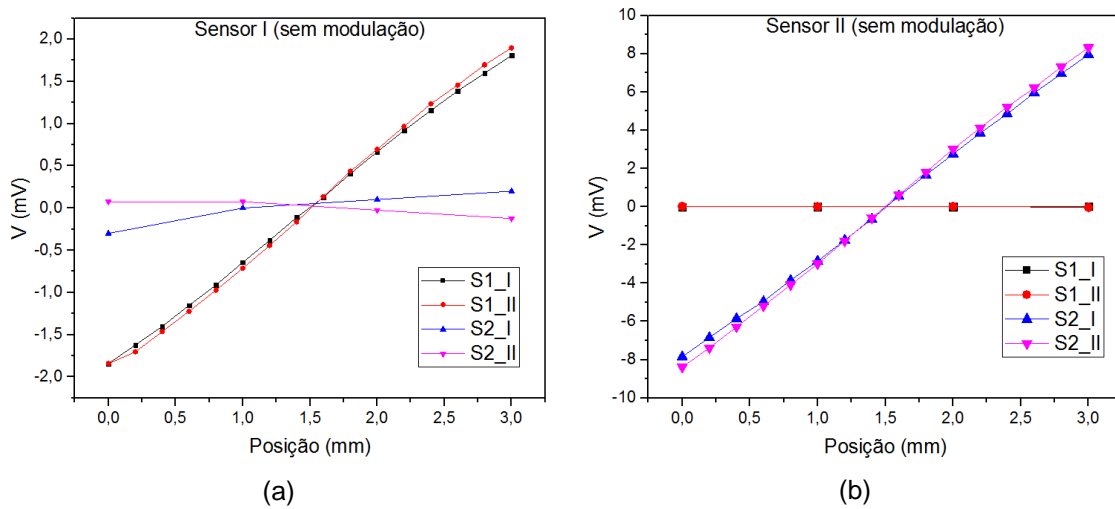


Figura 83: Curvas de caracterização dos sensores do detector V2 sem modulação na iluminação, com (I) e sem (II) luz ambiente: (a) varredura para um dos sensores, batizado de sensor 1; (b) varredura para o sensor complementar, sensor 2. [Fonte: autor]

A Figura 84 mostra as curvas de caracterização dos sensores do detector V2 após a inclusão da modulação do sinal. Essas curvas diferem um pouco das demais caracterizações, pois, neste caso, as medidas, feitas com o lock-in, eram da amplitude do sinal na frequência de modulação dos LEDs. A figura mostra ambas as varreduras no mesmo gráfico, sendo que as curvas (a) são referentes à varredura para a caracterização do sensor chamado de "sensor 1", enquanto que as curvas (b) são para a varredura do "sensor 2".

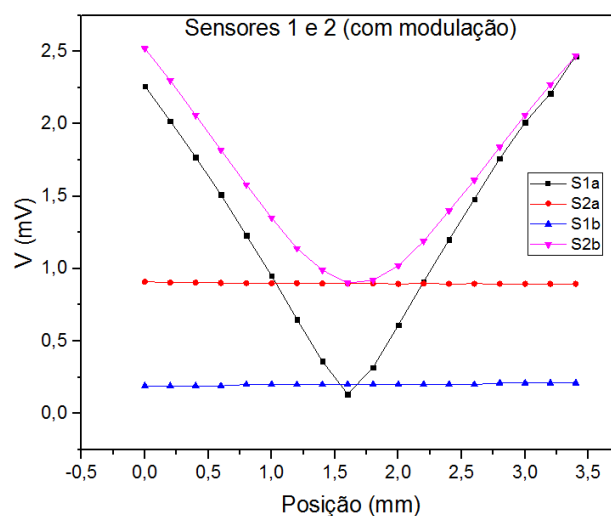


Figura 84: Curvas de caracterização dos sensores do detector V2 com modulação da iluminação. As curvas (a) são referentes à varredura para o sensor 1 e as curvas (b), para o sensor 2. [Fonte: autor]

Como as curvas (a) e (b) foram medidas separadamente, invertendo-se a posição do sensor para se poder utilizar a mesma montagem experimental, e com ajustes visuais, pequenas diferenças são notadas, por exemplo: o centro de cada varredura não é coincidente, e na varredura (b) o fio não foi perfeitamente centralizado no mínimo do sensor 1.

De acordo com o que foi mencionado na seção de desenvolvimento, os LEDs apresentavam particularidades que não puderam ser completamente eliminadas. Essa é principal razão da diferença entre os canais. Para o canal 1, nota-se uma melhor linearidade, melhor sensibilidade (maior inclinação da curva) e um mínimo mais próximo do zero, todas essas, características de uma fonte mais homogênea. O comportamento curvo do sensor 2 em torno do zero seria particularmente indesejado, mas aparentemente não se trata de uma resposta real, pois em nenhuma outra medida foi percebida alguma influência associada a essa característica. Infelizmente, não houve mais tempo para se investigar o problema e o detector foi levado à montagem principal para que algumas medidas de magnetos fossem tentadas antes da finalização do projeto.

Felizmente, mesmo com essas questões, resultados relevantes foram obtidos nas medidas do magneto. Portanto, tudo considerado, o detector proposto com fotodiodos parece ser realmente uma boa opção para uma região de trabalho ampla, sem a necessidade de estágios auxiliares e rotinas de correção de posicionamento em torno do ponto de operação durante os procedimentos de alinhamento.

O fato dos sinais dos sensores serem lidos sobre resistores levanta suspeitas sobre estabilidade, casamento de impedâncias e ruído. A primeira melhoria proposta para o futuro é a substituição do circuito original (Figura 43) por um circuito com amplificador operacional, como, por exemplo, o circuito de detecção de balanceamento de luz da Figura 85. Então, caso seja necessário, novas opções para a fonte de luz podem ser exploradas.

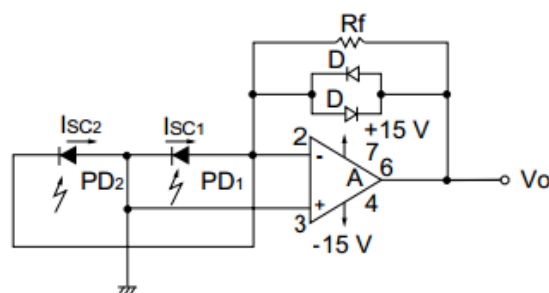


Figura 85: Circuito de detecção de balanceamento de luz. [Fonte: Hamamatsu]

Um estudo pertinente para o futuro seria a avaliação da linearidade da resposta do sensor através da mudança de corrente no quadrupolo (preferencialmente já com as placas de controle de corrente definitivas), para o que se esperaria um comportamento linear.

4.4 Amplificador lock-in

O modo simples de uso do lock-in para a aplicação do fio vibrante, utilizado para o detector com H21A1 e para o detector V1, consistia em conectar cada canal a uma entrada e utilizar o PLL associado a um ou a outro para travar o sistema na ressonância.

Com o detector V2, o lock-in passou a ser usado de acordo com o esquema da Figura 86:

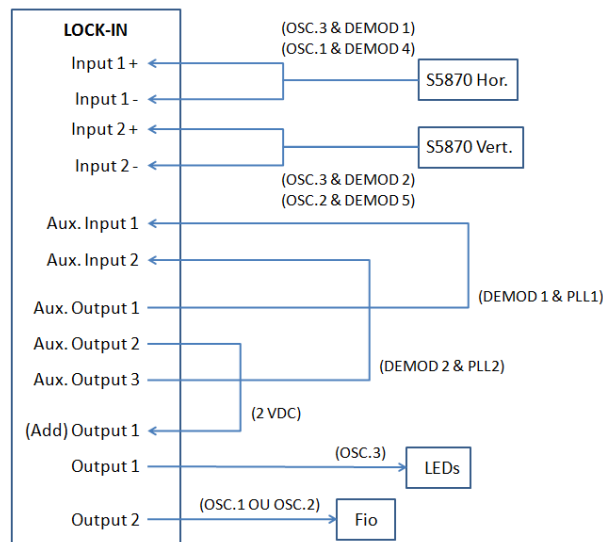


Figura 86: Esquema de ligação final do lock-in para alimentação e detecção do sistema do fio vibrante. [Fonte: autor]

Três osciladores internos do lock-in são utilizados: o oscilador 3, para a geração do sinal alternado na saída 1, que faz a modulação dos LEDs, e para a demodulação do sinal da portadora do sinal dos detectores S5870 nas estradas 1 (demodulador 1) e 2 (demodulador 2); e os osciladores 1 e 2, que são vinculados aos PLLs 1 e 2 e fazem a leitura do sinal desejado das entradas 1 e 2 através dos demoduladores 5 e 6, agora nas frequências determinadas pelos PLLs. Além da modulação do LED, feita pelo oscilador 3, um nível DC de 2 V, fornecido pela saída auxiliar 2, é somado ao sinal de saída.

Cabe aqui um detalhamento da passagem intermediária desse processo de detecção, necessária pelo fato de que os sinais vindos dos sensores são demodulados

duas vezes independentemente. A primeira filtragem, destinada à otimização do travamento dos PLLs, ocorre nos demoduladores 1 e 2, extraído da portadora a modulação da vibração do fio. A esses sinais filtrados são aplicados ganhos ajustáveis, para a elevação de seus níveis, bem como ajustes de offset, para eliminação do nível de tensão principal sobre o qual ocorre a modulação. Então, esses sinais modificados são disponibilizados nas saídas auxiliares 1 e 3, que, finalmente, são realimentadas nas entradas auxiliares 1 e 2, às quais estão associados os PLLs. A segunda filtragem, que extrai a amplitude e a fase do sinal de vibração em si, ocorre nos demoduladores 4 e 5. São os sinais de amplitude e fase destes demoduladores que são monitorados pelo software de controle.

Existe uma questão limitante importante decorrente da configuração utilizada que foi observada no momento em que se faziam medidas de varreduras angulares. O problema é que as entradas auxiliares, que recebem os sinais tratados das saídas auxiliares, são limitadas em ± 10 V. Ao se ajustarem os ganhos, os níveis nessas entradas ficam otimizados para aquela posição média do fio sobre os sensores. Para varreduras translacionais, nenhuma mudança significativa acontece, porém, em varreduras angulares, à medida que o ângulo do fio muda durante uma varredura, a posição do fio nos sensores também muda. Neste caso, o valor médio do sinal sobre o qual a modulação da vibração do fio atua pode saturar os limites, e o PLL deixa de atuar. Em alguns testes, os ganhos foram variados manualmente durante varredura para impedir a saturação. A Figura 87 mostra os níveis das entradas auxiliares no início e no final de uma varredura de *pitch*.



Figura 87: Níveis das entradas auxiliares no ponto inicial e final de uma varredura de *pitch*. [Fonte: autor]

Essa é uma condição que limita justamente um dos atrativos do sistema de detecção proposto, isto é, a maior flexibilidade em termos de faixa de operação espacial. Sendo assim, a continuação do trabalho precisará resolver essa questão. A principal alternativa é a reavaliação e a otimização dos sistemas de ganho, com eventuais

correções automáticas dos parâmetros por meio do próprio software de controle, o que é bastante simples de ser implementado.

Em último caso, um lock-in auxiliar pode vir a ser utilizado, quando, além de eliminadas as limitações das entradas auxiliares do HF2, uma filtragem dupla em série poderia ser realmente utilizada. De fato, do modo atual, o sinal da portadora é utilizado apenas para o PLL e o sinal de vibração é extraído diretamente da entrada. A outra alternativa, impossível com apenas o HF2, pois ele não tem a opção de utilizar os demoduladores sobre as entradas auxiliares, consiste em alimentar as entradas principais do HF2 com um sinal já filtrado na portadora. Seriam necessários mais estudos para se avaliar se uma filtragem dupla forneceria verdadeiramente resultados melhores do que aqueles que podem ser atingidos com a manipulação dos filtros do HF2.

4.5 Software de controle

A interface final do software de controle, vista separadamente na Figura 88 e na Figura 94, conta com: uma caixa de parâmetros do fio, prevendo a frequência de ressonância do harmônico fundamental; uma caixa de controle de movimento, para movimentos simples, paradas e definições de zero; uma caixa de visualização de parâmetros do lock-in; e três gráficos, um para amplitudes e outro para fases dos sinais em varreduras, além do gráfico de definição de centro e *roll* em varreduras completas.

Várias versões intermediárias foram feitas, prevendo o controle da fonte de corrente do quadrupolo e a reprodução de todos os recursos necessários para configurar o lock-in, por exemplo. Porém, os atrasos e incertezas impediram definições e atuações mais objetivas. Nem mesmo o sistema de salvamento de arquivos foi levado a cabo, pois o cenário de utilização não estava maduro o suficiente.

Felizmente, graças à estrutura modular adotada, a adição de recursos no futuro deve ser simples. A versão atual, com as diversas configurações de varreduras já implementadas, foi suficiente para os testes realizados e a extração de resultados relevantes. A Figura 89 mostra o módulo dedicado ao lock-in no diagrama de blocos do software de controle, onde pode ser vista a estrutura de eventos dinâmicos utilizada. Todos os demais blocos de controle seguiram a mesma filosofia.

Wire Parameters			
INPUTS		OUTPUTS	
Length (m)	1,2	Tension (N)	0
Diameter (um)	100	Linear Density (kg/m)	0E+0
Density (kg/m3)	19250	Stress (MPa)	0E+0
Load (kgf)	1,9	F0 (Hz)	0

(a)

Motion Controller			
Remote Host: 10.0.3.10			Ready ●
		MOVE	
		STOP	
		SET ZERO	
	Targets	Positions	
X1	0	0	um
Y1	0	0	um
X2	0	0	um
Y2	0	0	um

(b)

Lock-in Amplifier							
Signal Amplitude (Vrms)	0E+0						
Osc Phase (deg)	0						
Freq (Hz)	0						
HF2error	<table border="1"> <tr> <td>status</td> <td>code</td> </tr> <tr> <td>✓</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>source</td> <td></td> </tr> </table>	status	code	✓	0	source	
status	code						
✓	0						
source							

(c)

Figura 88: Interface do LabView: (a) a caixa de propriedades do fio; (b) caixa de interface com o controlador de motor; e (c) caixa de interface com o lock-in. [Fonte: autor]

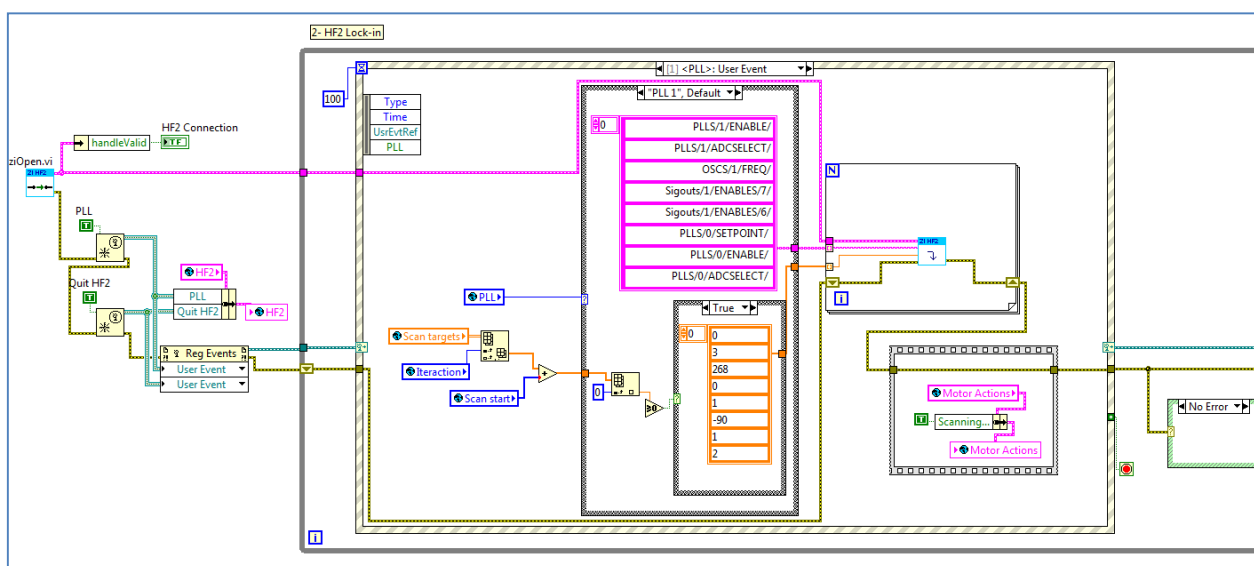


Figura 89: Módulo dedicado à leitura e ao controle do lock-in no diagrama de blocos do software de controle. [Fonte: autor]

Com base nos resultados obtidos, apresentados na seção 4.6.1, algumas melhorias podem ser propostas de imediato, como: o refinamento da parte estatística, sobretudo em relação às médias computadas para os sinais e aos ajustes lineares dos pontos, de modo que *outliers* sejam automaticamente desprezados, por exemplo; e a implementação de varreduras unidirecionais mesmo nas varreduras completas, para minimizar os efeitos de histerese mecânica dos estágios lineares.

4.6 Fiducialização e metrologia

No início do projeto do mestrado, imaginava-se que até o final do trabalho ao menos os protótipos dos magnetos do Sirius já estariam prontos. Com o passar do tempo, porém, essa realidade tornou-se cada vez mais distante e os ensaios foram conduzidos com magnetos que estavam disponíveis. As medidas de alinhamento magnético preliminares com o fio vibrante foram realizadas com um quadrupolo extra do UVX, que estava à disposição. Posteriormente, este foi substituído por um quadrupolo do *booster* do Sirius e, ainda assim, sem a fonte definitiva, operando com uma fração da corrente nominal, que nem mesmo exigia refrigeração.

Se, do ponto de vista magnético, as condições foram longe das ideais para uma avaliação final dos números de sensibilidade, por exemplo, a substituição do quadrupolo do UVX pelo do *booster* ao menos ofereceu condições de uma aproximação daquilo que eventualmente será o sistema de referência do magneto com o sistema de visão da MMC.

Os números finais do trabalho, dentro das limitações mencionadas, serão dados justamente pela combinação do alinhamento magnético com a metrologia mecânica desenvolvida.

4.6.1 Alinhamento magnético

4.6.1.1 Ressonância

Como se sabe, todo o procedimento é baseado na ressonância do fio, quando percorrido por uma corrente alternada de frequência específica e na presença de campo magnético. A Figura 90 mostra um resultado obtido já na bancada definitiva, com o fio posicionado em algum ponto fora do centro do quadrupolo, em que é feita uma varredura em frequência dessa corrente alternada com o monitoramento da amplitude de vibração

do detector. Este é o modo básico de se avaliar a resposta do sistema antes das medidas de alinhamento serem iniciadas.

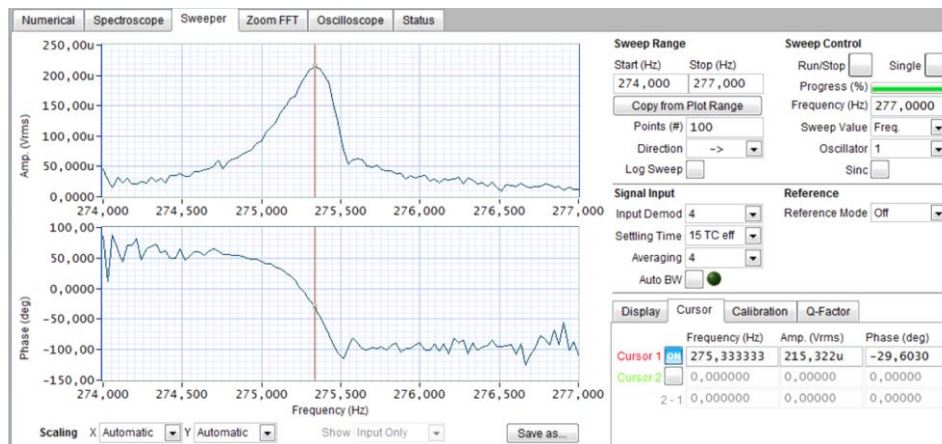


Figura 90: Tela do software *ziControl* da Zurich Instruments, com varredura em frequência para determinação da ressonância do segundo harmônico, em torno de 275 Hz. [Fonte: autor]

Nota-se que o pico de ressonância ocorre em torno de 275.3 Hz, próximo do segundo harmônico do valor calculado na seção 4.1. Ainda, em função do fenômeno de ressonância, idealmente a amplitude de vibração seria máxima quando a fase do sinal fosse $\pm 90^\circ$. Na prática, porém, ocorrem pequenos desvios em função da complexa interação entre os elementos não ideais que compõem o sistema. Não obstante, em $\pm 90^\circ$ a amplitude é menor do que a máxima apenas em uma pequena porcentagem, fazendo com que o valor teórico seja a melhor referência a ser seguida pelo PLL.

A Figura 90 mostra o segundo harmônico, utilizado para alinhamento translacional. A Figura 91, por sua vez, mostra varreduras de frequência em torno do quarto harmônico, utilizado para alinhamento angular de *pitch* e *yaw*.

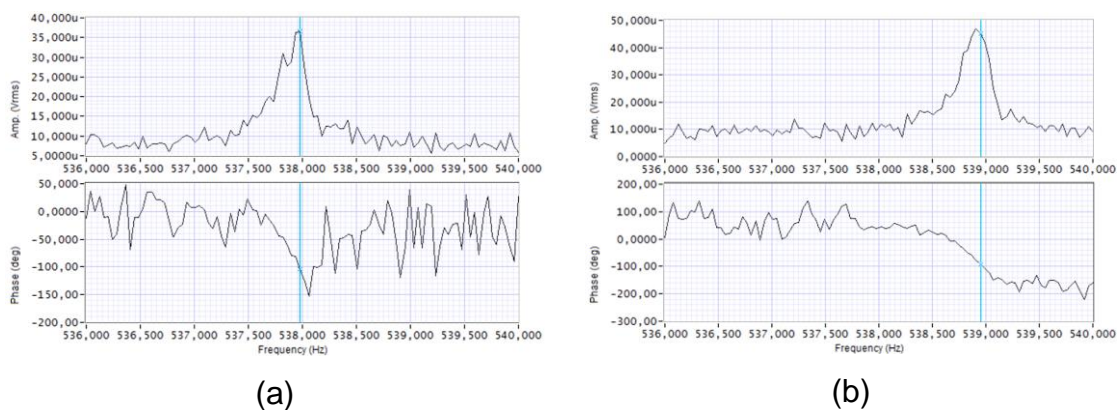


Figura 91: Varreduras em frequência para determinação das frequências de ressonância do quarto harmônico, com alto ângulo *pitch* em (a), e alto ângulo *yaw* em (b). [Fonte: autor]

Nota-se que a resposta de *pitch* apresenta uma estranha assimetria e a fase mais ruidosa do que os demais sinais. Isso pode ser devido ao sensor, mas não houve tempo de avançar nessas investigações. Observa-se também que as ressonâncias diferem em 1 Hz entre a Figura 91a e Figura 91b, o que se explica pela posição bastante diferente dos sistema mecânico em cada caso, de modo a produzir uma maior resposta em *pitch* no primeiro, e *yaw* no segundo.

Realmente, como visto, as movimentações angulares provocam pequenas variações no comprimento do fio, assim como sua movimentação longitudinal sobre os nós e a roldana, o que salienta os efeitos de atrito. Essas frequências ainda diferem em alguns Hz do dobro da frequência encontrada para o segundo harmônico, que seria a esperada para o quarto harmônico, mas esta é uma característica presente nos demais trabalhos das referências e perfeitamente natural, em função da resposta mecânica da montagem.

4.6.1.2 Medidas de alinhamento de quadrupolo

4.6.1.2.1 Medidas preliminares

Exceto pelo trabalho anterior da estagiária do grupo de ímãs, o detector H21A1 não foi utilizado para medidas magnéticas. A Figura 92 mostra uma medida de quadrupolo realizada com o sensor V1 e o sistema de PLL inativo, onde se notam que nem o sinal de um dos canais permanece constante durante a varredura horizontal, nem o outro apresenta um bom comportamento linear para os dois hemisférios do magneto.

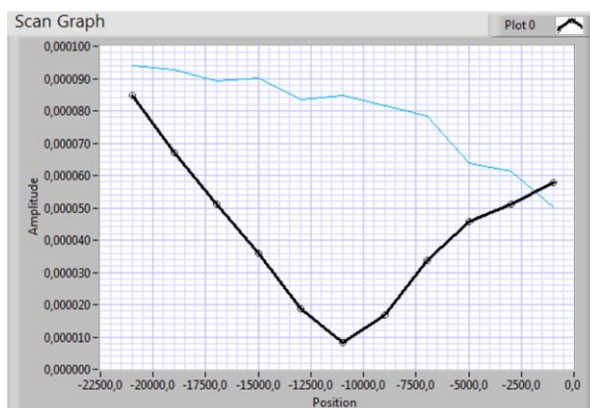


Figura 92: Interface do LabVIEW mostrando os dois canais de uma medida magnética com o detector V1 e o PLL inativo. [Fonte: autor]

Neste momento o uso do PLL não estava bem dominado e o problema mecânico encontrado posteriormente no nó do fio (apresentado na próxima seção) não estava resolvido. Por isso, não se sabe ao certo se mesmo a versão V1 do detector poderia ser considerada operacional, ainda que houvesse uma série de melhorias a serem implementadas. De qualquer maneira, o detector V2 foi desenvolvido e utilizado na última etapa do trabalho.

4.6.1.2.2 Medidas finais

Com a validação parcial dos sensores V2, a expectativa era de que imediatamente o sistema poderia ser remontado sobre a MMC e resultados seriam extraídos. Entretanto, mais algum tempo foi necessário, pois as varreduras em frequência não apresentavam resultados repetitivos e estáveis no tempo. Um fato grave e limitante foi o de que varreduras em frequência para a vibração vertical e horizontal não apresentavam a mesma frequência de ressonância, chegando por vezes a mais de 0.5 Hz de diferença.

Consequentemente, não eram possíveis varreduras mecânicas de acordo com o procedimento proposto, isto é, com o PLL travado no canal complementar, uma vez que a ressonância de um sentido não correspondia ao máximo de amplitude do outro.

Analisando os sinais do lock-in, tanto de entrada como de saída, com um osciloscópio auxiliar, eles pareciam suficientemente bons e pouco ruidosos. Por isso, diminuíram-se as suspeitas sobre interferência eletromagnética ou mau contato elétrico do fio com os nós e aumentaram-se aquelas sobre questões mecânicas, que iam da qualidade dos contatos do fio nos nós até a massa em balanço ou atritos.

Testes manuais afastavam efeitos relacionados ao sistema da massa. Então, visto que as peças que compunham os nós não haviam sido feitas por processo de eletroerosão, como inicialmente previsto, as principais incertezas recaíram sobre o encaixe entre os cilindros de quartzo (horizontais) e de aço inox (verticais). Chegou-se a cotar a manufatura de novas peças por prestadores de serviços de eletroerosão fora do LNLS, mas o laboratório já havia encerrado as atividades de compra no ano.

Foi então que, utilizando o sistema de visão da MMC, notou-se um defeito de usinagem grosseiro na peça de inox de um dos nós. Como pode ser visto na Figura 93a e na Figura 93c, aquilo que deveria ser um ponto de contato estava muito mal definido dentro de uma região mal usinada. Portanto, mesmo um serviço de usinagem simples seria capaz de melhorar as condições desses suportes do fio e, às pressas, a oficina

mecânica foi capaz de produzir novos conjuntos. Os cilindros de quartzo, que já não justificavam o propósito inicial de isolamento elétrico, foram substituídos por inox, para permitir um melhor ajuste e, de fato, o resultado alcançado foi excelente, como visto na Figura 93b e na Figura 93d.

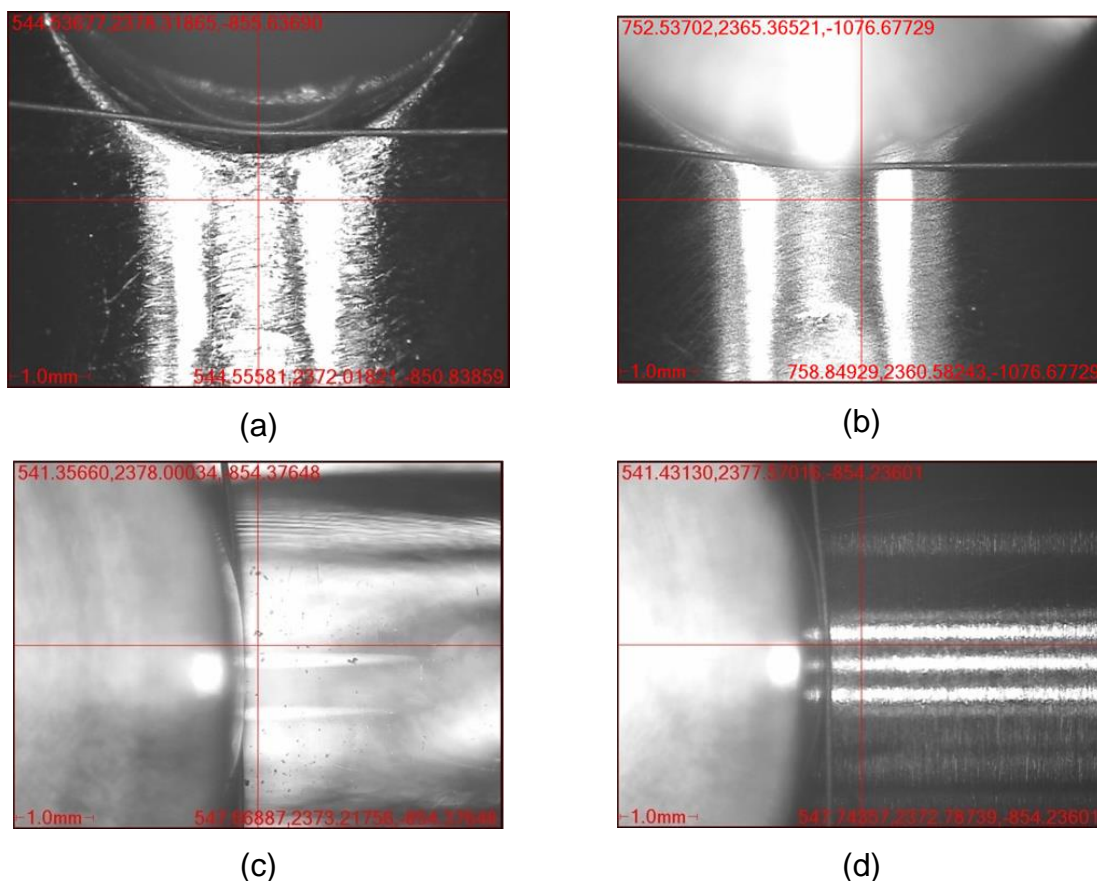
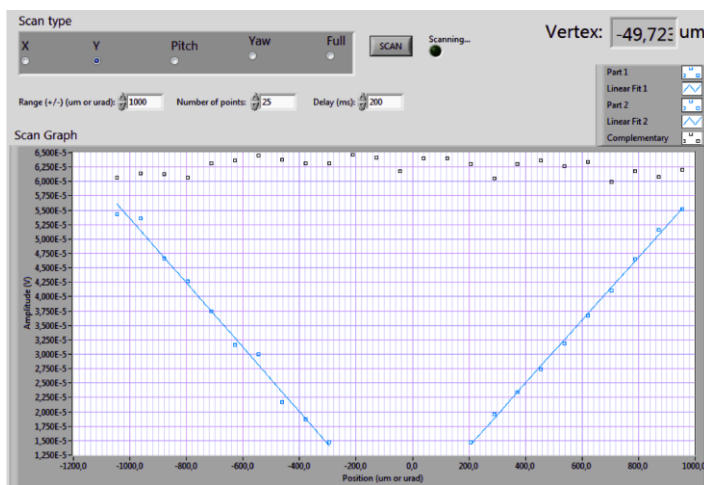


Figura 93: Imagens do sistema de visão da MMC de um dos nós com o fio esticado. (a) e (b) mostram a vista lateral do sistema do nó, com o fio na horizontal na imagem, antes e depois, respectivamente, do retrabalho da peça. (A imagem aparece invertida em função da indexação da câmera.) (c) e (d), por sua vez, mostram a vista superior, com o fio na vertical na imagem. [Fonte: autor]

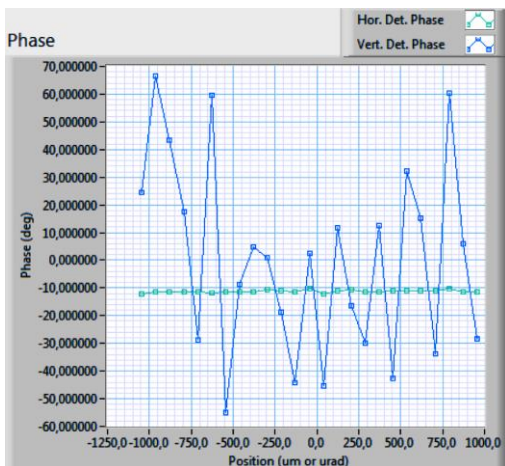
Finalmente, o sistema passou a se comportar como o esperado, com a concordância entre a horizontal e a vertical tipicamente em torno de 0.03 Hz. Mesmo com essa boa concordância, testes consecutivos de remontagem do fio para avaliação de repetibilidade mostraram que, a despeito dessa correção, as variações entre montagens para a ressonância do segundo harmônico chegavam a 4 Hz (entre 271 e 275 Hz), reforçando as suposições sobre os efeitos de atrito no sistema.

Não havendo mais tempo de trabalho para refinamento, as últimas atividades consistiram em avaliar o sistema da maneira como ele estava. Foram realizadas

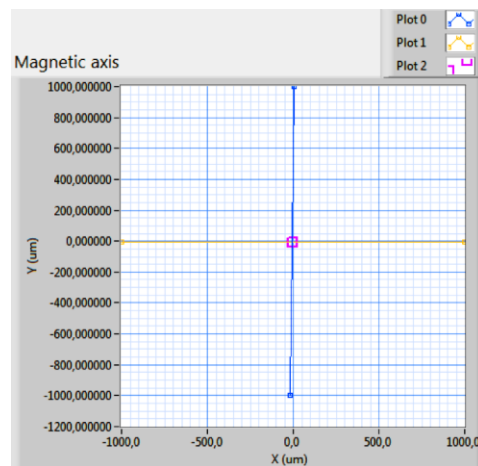
varreduras translacionais individuais e, na sequência, medidas de alinhamento completo do quadrupolo disponível. A Figura 94a mostra a tela do LabVIEW de uma varredura vertical de ± 1 mm, em que se percebe o sinal estável do canal horizontal e o comportamento linear do canal vertical; a Figura 94b mostra as medidas das fases dos canais durante essa varredura, em que a fase do canal horizontal é vista constante (com um offset numérico apenas em relação aos 90° reais); e a Figura 94c mostra o resultado do cruzamento dos vértices dos quatro trechos de uma varredura completa para determinação do centro magnético do quadrupolo e o ângulo *roll*.



(a)



(b)



(c)

Figura 94: Interface do LabVIEW mostrando uma varredura mecânica vertical, com sinal (a) e fase (b), e também o resultado de um medida de alinhamento completa (c). [Fonte: autor]

Algumas tentativas foram feitas para alinhamento de *pitch*, como visto na Figura 95, porém, foram notadas instabilidades no sistema PLL, principalmente em torno do zero.

Outras poucas tentativas de varredura de *yaw*, por sua vez, não deram resultados consistentes. É importante frisar, entretanto, que esses testes em particular foram realizados durante um par de horas do último dia de operação do LNLS em 2014. Qualquer conclusão negativa seria, portanto, algo precipitada.

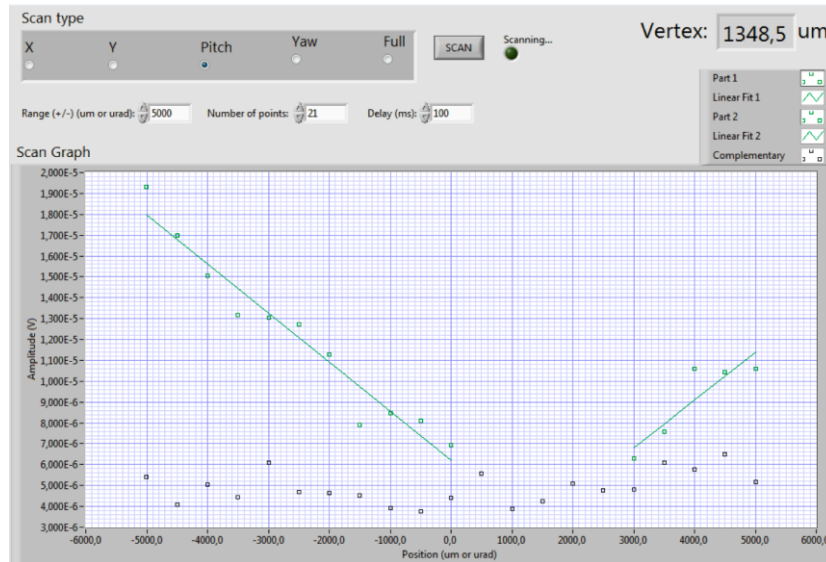


Figura 95: Interface do LabVIEW mostrando varredura mecânica de *pitch*. [Fonte: autor]

4.6.1.2.3 Repetibilidade

Finalmente, para concluir o trabalho com ao menos um resultado parcial da repetibilidade da parte magnética do sistema, a medida de alinhamento completo do quadrupolo, com tempo médio de execução de 15 minutos, foi repetida um certo número vezes. Por falta de tempo, o espaço amostral mínimo ideal de 30 medidas para definição do desvio padrão da técnica foi limitado a 12. Os resultados estão resumidos abaixo:

Tabela 15: Desvio padrão de medidas magnéticas. [Fonte: autor]

Coordenada/Orientação	Desvio Padrão
x (μm)	6.3
y (μm)	7.3
$roll$ ($mrad$)	6.3

Os resultados obtidos para x e y são bastante razoáveis e suficientes para as tolerâncias especificadas. O ângulo $roll$, no entanto é muito mais exigente e delicado,

pois depende de cálculos a partir dos pontos x e y em cada trecho da varredura completa. De acordo com o algoritmo utilizado, portanto, um erro 0.2 mrad seria atingido, em um braço de 1 mm (que é a aproximadamente a amplitude de varredura trabalhada), somente com um erro de definição do zero magnético em cada trecho menor do que 0.2 μm . Essa proporção direta do desvio de *roll*, em mrad, com o desvio de x e y , em μm , também constatada na Tabela 15.

O erro de *roll* estimado por Vrankovic (VRANKOVIC, WOUTERS, *et al.*, 2014) é de ± 2 mrad, isto é, uma ordem de grandeza maior do que a especificação para os magnetos do Sirius. Algumas das melhorias já mencionadas para o sistema poderão reduzir significativamente esse desvio, bem como um tratamento estatístico dedicado ou uma ampliação da região de varredura para este propósito. Contudo, esta promete ser uma tarefa árdua. Em última instância, segundo James Citadini, o ângulo *roll* poderia ser medido com precisão em relação à gravidade na bancada da bobina girante utilizada pela equipe do grupo IMA. Esta pode ser uma alternativa válida, que será melhor avaliada com o decorrer das atividades do grupo.

4.6.2 Metrologia

4.6.2.1 Catenária

Como primeiro resultado da etapa de metrologia, a Figura 96 mostra duas medidas para a avaliação da catenária.

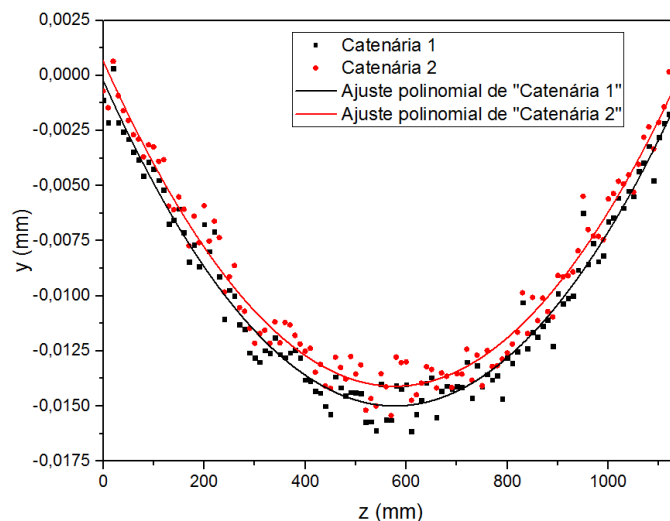


Figura 96: Medidas da catenária formada pelo fio, com ajuste polinomial de segunda ordem. [Fonte: autor]

O procedimento adotado foi a medição das bordas superior e inferior do fio, com 1200 mm de extensão, em 115 pontos ao longo de 1140 mm. Com isso, foi possível extrair as informações de diâmetro e de altura do fio em cada ponto. Nas duas medidas, o diâmetro médio encontrado para o fio foi de 0.101 ± 0.002 mm, com a variação de um desvio padrão. O valor nominal do diâmetro do fio é 0.1 mm e uma aferição média com um micrômetro resultou em 0.100 ± 0.001 mm. Portanto, todos os resultados apresentaram um casamento perfeito.

Na figura, observa-se um pequeno offset entre as duas medidas. O valor médio dessa diferença foi de 0.0009 ± 0.0004 mm, isto é, houve uma variação sistemática de apenas cerca de 1 μ m entre elas, o que é considerado um resultado excelente.

Na sequência, em função do limite de aproximação da catenária por uma parábola, como explicado na seção 1.2.4.5.1, os dados foram ajustados por polinômios de segundo grau. Tanto as médias da diferença entre os pontos medidos e os polinômios de ajuste como os desvios padrões foram iguais para as duas medidas, a saber: 10^{-8} mm e 0.0008 mm, respectivamente. Esse desvio padrão de quase 1 μ m pode ser uma variação real, resultado do efeito de memória de torção do fio devido ao seu armazenamento em rolos. Ademais, em ambas as medidas a sagita resultou no mesmo valor de 0.015 mm, ou seja, exatamente o valor teórico esperado, calculado na seção 4.1.

Portanto, duas conclusões podem ser tiradas: a primeira é que o sistema de visão se adequa muito bem à proposta de medida da posição do fio; e depois, que o método, utilizado por todos os demais usuários do fio vibrante, de descontar o valor teórico da catenária em função da posição longitudinal do magneto e do sensor de posição do fio é realmente uma boa aproximação, com desvios da ordem de 1 μ m.

Por fim, decidiu-se avaliar o erro intrínseco da técnica em função da determinação do eixo magnético por meio de um elemento de perfil parabólico no plano vertical. Para a variação translacional, supondo que os efeitos de campo se manifestem no fio de forma média, o eixo magnético foi aproximado pelo ajuste linear dos pontos medidos entre as posições longitudinais $z = 100$ mm e $z = 500$ mm, ou seja, -200 mm e $+200$ mm a partir do centro do magneto, onde são feitas as medidas de posição do fio. A Figura 97 esclarece esse estudo, onde a faixa de análise foi entre 70 e 470 mm uma vez que as medidas da catenária foram realizadas entre distâncias de 30 mm de cada um dos nós.

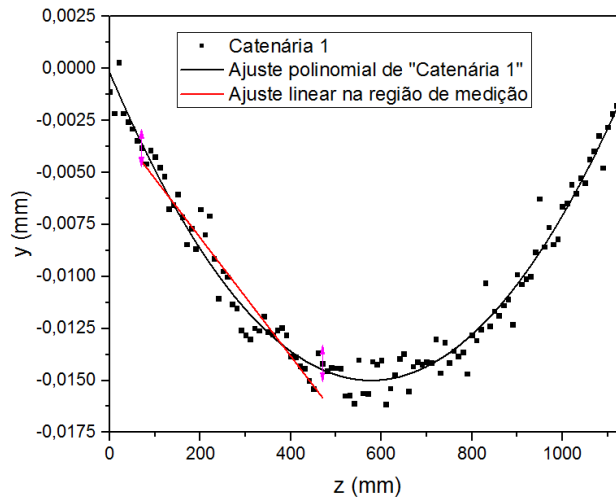


Figura 97: Avaliação do erro na medição do eixo magnético do ímã em função perfil parabólico do fio. [Fonte: autor]

O maior erro entre a catenária e o ajuste linear dentro desta região foi de $1.3 \mu\text{m}$ e ocorre justamente em $z = 500 \text{ mm}$. Trata-se, então, de um erro sistemático que pode ser visto como uma incerteza na exatidão da determinação da coordenada y_m do eixo magnético. Eventualmente essa variação poderia ser computada nos cálculos, caso essa hipótese seja realmente aceita e, em última análise, esse valor chegue a ter um impacto significativo.

Para fins de alinhamento, entretanto, esse erro não faria diferença, pois estaria presente em todos os magnetos, que serão finalmente alinhados relativamente um ao outro. Em termos angulares, esse erro de medida nas extremidades seria responsável por um erro apenas da ordem de $1 \mu\text{rad}$ em *pitch*, portanto, absolutamente desprezível.

O segundo erro avaliado é de *pitch*, uma vez que a reta tangente à catenária varia ao longo da região do magneto. Derivando a equação das parábolas ajustadas, o ângulo do fio varia cerca de $35 \mu\text{rad}$, e de forma não simétrica, entre a entrada e a saída do magneto. Sendo assim, poderia-se considerar uma incerteza de $\pm 17.5 \mu\text{rad}$ na exatidão da determinação desse ângulo, o que também pode ser desprezado.

Com algum conservadorismo, a Tabela 16 resume as incertezas associadas à determinação do eixo magnético do quadruplo avaliado por causa do perfil parabólico do fio no plano vertical. Vale reforçar que esses números dependem dos parâmetros que definem a catenária e da posição onde é feita a medição do fio. Assim, para outras condições ou tamanhos de quadrupolos pode ser necessário recalcular esses valores.

Tabela 16: Incerteza máxima associada ao perfil parabólico do fio na determinação do eixo magnético do quadrupolo avaliado. [Fonte: autor]

Coordenada/Orientação	Incerteza máxima
$y_m (\mu m)$	1.3
$pitch_m (\mu rad)$	20.0

4.6.2.2 Calibração da câmera

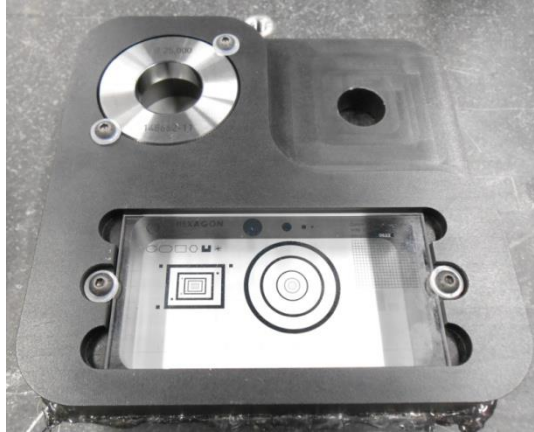
A calibração final padronizada para o sistema de visão da MMC, desenvolvido por Rodrigo Leão, envolveu os seguintes passos:

- carregamento do apalpador da MMC com ponta-estrela ((Figura 98a);
- medição de esfera de calibração (Figura 98a) para diferentes indexações;
- medição de superfície e diâmetro de anel de referência (Figura 98b);
- medição da altura de bloco cerâmico padrão Mitutoyo (Figura 98c)
- substituição da ponta-estrela pela câmera;
- medição de superfície (via foco) e diâmetro (via detecção de borda) de anel de referência;
- por software, adição de ângulos permitidos para a câmera, partindo dos ângulos calibrados pela ponta-estrela;
- utilizando o padrão óptico (Figura 98b e Figura 99), ajuste de iluminação, campo de visão, deslocamento do sensor e rotações;
- compensação de erro de altura do bloco cerâmico padrão, com a câmera indexada e detecção de borda.

Antes da compensação de erro com a medida do bloco cerâmico, existia um erro sistemático de aproximadamente 0.3 mm em medidas do eixo vertical da máquina com a câmera, o que pôde ser reduzido para menos de 1 μm . Este erro talvez fosse completamente transparente para o tipo de medida realizada, porém, é mais confortável trabalhar com a melhor qualificação possível.



(a)

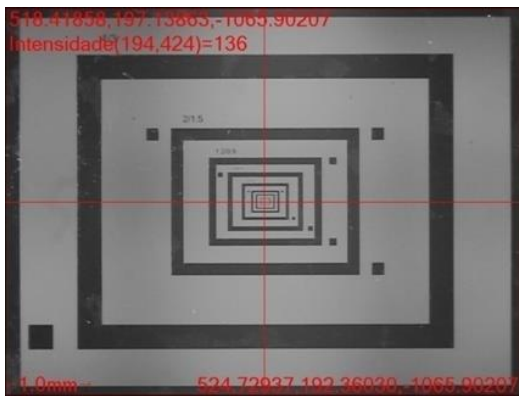


(b)



(c)

Figura 98: Conjunto de calibração da MMC: (a) ponta-estrela e esfera de calibração; (b) anel de referêcia e padrão óptico; (c) bloco cerâmico padrão sobre estrutura metálica, e anteparo escuro para permitir a medição da borda superior. [Fonte: autor]



(a)



(b)

Figura 99: Imagens do padrão óptico para calibração de campo de visão, rotação e tamanho de pixel no sistema de visão da MMC no software PC-DMIS. [Fonte: Rodrigo Leão, PRO - LNLS]

4.6.2.3 Sistema de coordenadas do magneto

A MMC tem seu sistema de coordenadas original, mas para as medidas dos magnetos é mais conveniente trabalhar novos sistemas de coordenadas, que neles sejam referenciados. Portanto, referências mecânicas construtivas dos magnetos, as sapatas de fixação, foram escolhidas e são utilizadas para determinar 36 pontos na estrutura do magneto, a partir dos quais um novo sistema de referência, que idealmente seria o centro geométrico do magneto, pode ser criado.

Não convém descrever todos os detalhes de como o sistema é criado, basta dizer que com esse número de pontos determinam-se univocamente os 6 graus de liberdade do sistema de coordenadas, com uma estatística suficiente para reduzir os desvios à escala micrométrica, como reportado na próxima seção.

4.6.2.4 Repetibilidade

Para caracterização da técnica de metrologia, Rodrigo Leão realizou 50 medidas do protótipo do quadrupolo do booster e do fio na entrada e na saída do magneto, a partir das quais puderam-se extrair valores de repetibilidade da criação do sistema de coordenadas do magneto e de medição do fio. Durante todo o tempo, a temperatura da sala de metrologia se manteve estável em 23.7 ± 0.2 °C.

Primeiramente a respeito do sistema de coordenadas, a Figura 100 mostra os histogramas dos valores encontrados para a origem e para a orientação do sistema. De acordo com o esperado, todas as distribuições se aproximam de distribuições normais.

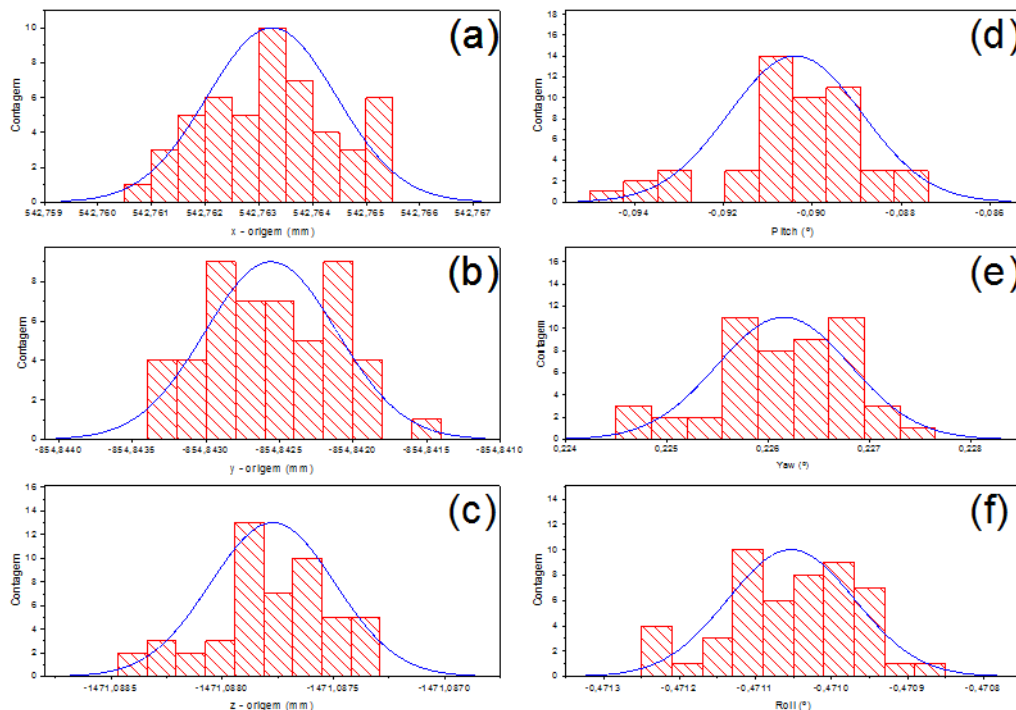


Figura 100: Distribuições dos valores encontrados para a origem e para a orientação do sistema de coordenadas criado a partir das referências do magneto, respectivamente: x , y , z , $pitch$, yaw e $roll$. [Fonte: Rodrigo Leão, PRO - LNLS]

A Tabela 17 apresenta os desvios de um sigma dessas distribuições, mostrando que exceto para x , que atingiu $1 \mu\text{m}$, os demais são da ordem de poucos décimos de micrometros e, no máximo, poucas dezenas de microrradianos, o que é um resultado notável.

Tabela 17: Desvio padrão da repetibilidade da criação do sistema de coordenadas referenciado no magneto. [Fonte: Rodrigo Leão, PRO - LNLS]

Coordenada/Orientação	Desvio Padrão
$x (\mu\text{m})$	1.2
$y (\mu\text{m})$	0.5
$z (\mu\text{m})$	0.3
$pitch (\mu\text{rad})$	26.1
$yaw (\mu\text{rad})$	11.5
$roll (\mu\text{rad})$	1.5

Analogamente para o fio, a Figura 101 mostra os histogramas com a distribuição dos valores encontrados para as coordenadas na entrada e na saída do magneto, a aproximadamente 200 mm do centro para cada lado.

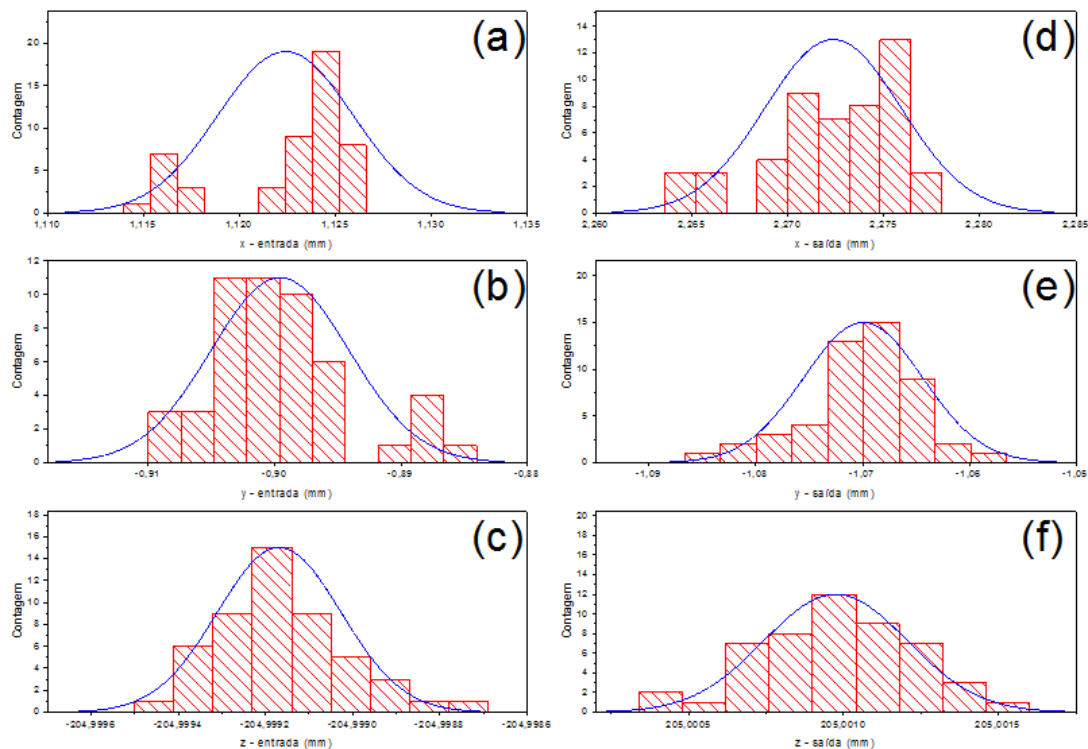


Figura 101: Distribuições das coordenadas x , y e z do fio na entrada (de (a) a (c)) e na saída (de (d) a (f)) do magneto. [Fonte: Rodrigo Leão, PRO - LNLS]

A Tabela 18 apresenta os desvios de um sigma dessas distribuições. É importante destacar que, como cada medida do fio foi feita em relação ao sistema de coordenada criado em cada repetição, esses resultados acumulam os desvios apresentados anteriormente com os da medição do fio em si.

Tabela 18: Desvio padrão da repetibilidade de medição das coordenadas x , y e z do fio, na entrada e na saída do quadrupolo.

Coordenada	Desvio Padrão (μm)
x - entrada	3.5
y - entrada	5.5
z - entrada	0.1
x - saída	3.5
y - saída	5.6
z - saída	0.2

Neste caso, os resultados apresentam algumas características fora do esperado, mas com concordância de desvios entre a entrada e a saída. Começando pela componente x , com pior histograma, mas melhor desvio do que y , o sistema de focalização adotado foi o foco automático da MMC em uma faixa de ± 1 mm, com a CCD na vertical. Apesar da concordância entre os desvios de entrada e saída, principalmente o histograma de entrada sugere como que duas posições possíveis, separadas por quase 10 μm . Essa mesma aberração ocorreu em y de entrada, de modo que o ponto de medição possa ter sido em um lugar em que fio apresentasse alguma sujeira ou imperfeição, provocando variações parcialmente repetitivas nas detecções de borda. Para a medição em y , com a CCD na horizontal, foi encontrado um problema intermitente no software para o foco automático, que exigiu a programação de um algoritmo alternativo de variação de foco incremental, com passo de 0.1 mm em uma faixa de ± 1 mm, com análise de dados *a posteriori*. As componentes z tiveram uma distribuição normal praticamente perfeita e um desvio de 0.2 μm , mas elas dependem essencialmente da tolerância de posicionamento da máquina em relação à posição comandada.

Finalmente é válida a análise dos resultados de diâmetro do fio, que desde o princípio foi critério para validação das medidas. A Tabela 19 apresenta o desvio do diâmetro nas medidas de repetibilidade, a partir da vista superior, que é usada para determinar x , e da vista lateral, para y .

Tabela 19: Desvio padrão da medição dos diâmetros do fio pela vista superior e lateral, para a entrada e para a saída do fio. [Fonte: Rodrigo Leão, PRO - LNLS]

Vista/Posição	Desvio Padrão (μm)
<i>Superior/entrada</i>	3.6
<i>Lateral/entrada</i>	0.9
<i>Superior/saída</i>	2.0
<i>Lateral/saída</i>	1.4

Vê-se que o desvio do foco programado é menor do que o automático. Esse fato, é em grande medida justificado pelo critério implementado para seleção da posição de foco cujos resultados foram considerados. Isso, pois, a distância focal escolhida foi baseado na combinação de duas condições: proximidade do diâmetro médio do fio em relação a seu diâmetro nominal e um baixo desvio padrão.

Para comparação, nas medidas de catenária, em que não houve ajuste de foco, o desvio padrão dessa quantidade foi cerca de 1.5 μm . Logo, o sistema de focalização programado e o critério de seleção de dados foram aparentemente mais próximos do melhor ajuste visual utilizado para a catenária, com um resultado melhor do que a focalização automática.

Em resultados não apresentados, histogramas de diâmetro do fio apresentaram a mesma característica "biestável" vista nas coordenadas de entrada. Portanto, no futuro o trabalho deverá ser continuado para melhor compreender essas questões e otimizar a forma de medição.

4.6.2.5 Exatidão

Buscando-se avaliar a exatidão do posicionamento da MMC, um estudo foi conduzido com o laser interferométrico. Infelizmente, houve pouco tempo de trabalho e durante essa investida as medidas do laser apresentaram uma deriva de leitura aparentemente injustificável, com um comportamento igual ao que provocou os atrasos na caracterização dos estágios lineares.

Por isso, números finais não puderam ser obtidos, contudo, essas medidas foram suficientes para a constatação de que no volume analisado o erro de posicionamento da máquina de fato obedecia ao máximo erro permitido (MPE), definido pela calibração da

MMC. De acordo com o fabricante, o MPE dessa máquina (2σ) é dado, em micrometros, pela seguinte relação:

$$MPE = 2.4 + 3 \cdot L/1000 \quad (53)$$

onde L é o comprimento de medição em milímetros.

Levando-se em consideração o comprimento de medição utilizado por cada eixo na determinação das posições de entrada e saída do fio, após a definição do sistema de coordenadas do magneto, as incertezas relacionadas à exatidão da máquina estão resumida na Tabela 20:

Tabela 20: Incertezas associadas à inexatidão da MMC na medição das coordenadas do fio. [Fonte: Rodrigo Leão, PRO - LNLS]

Coordenada	Desvio Padrão (μm)
x	1.5
y	1.5
z	2.1

4.6.2.6 Incerteza metrológica total

Identificando-se as limitações encontradas nas medidas de repetibilidade, mas aceitando-se os resultados obtidos como uma primeira aproximação, pode-se calcular a incerteza total da etapa de medição do fio. Isso é feito por meio da soma quadrática das incertezas de repetibilidade da medida e de exatidão da máquina, pois estas são independentes. Então, combinando os resultados da Tabela 18 e da Tabela 20, tem-se:

Tabela 21: Incerteza combinada da repetibilidade do procedimento e da inexatidão da MMC na medida das coordenadas x , y e z do fio, na entrada e na saída do quadropolo. [Fonte: autor]

Coordenada	Desvio Padrão (μm)
x - entrada	3.8
y - entrada	5.7
z - entrada	2.1
x - saída	3.9
y - saída	5.8
z - saída	2.1

Finalmente, os valores de x , y e z do fio na entrada e na saída do quadrupolo podem ser combinados por meio de propagação de erros para encontrar as medidas de posição, x_m e y_m , e alinhamento, $pitch_m$ e yaw_m , do eixo magnético do ímã em relação ao sistema de coordenadas criado. A Tabela 22 resume esses resultados.

Tabela 22: Incerteza metrológica total na determinação do centro e do alinhamento do eixo magnético do quadrupolo. [Fonte: autor]

Coordenada/Orientação	Desvio Padrão (μm)
x_m (μm)	2.7
y_m (μm)	4.0
$pitch_m$ (μrad)	20.0
yaw_m (μrad)	13.4

Os resultados mostram que, do ponto de vista de medição do eixo magnético, representado pelo fio esticado, todos os resultados estão uma ordem de grandeza abaixo das especificações técnicas, isto é, 40 μm para translação e 0.2 mrad para rotação. Portanto, mesmo com pontos passíveis de melhorias, a técnica de metrologia proposta já se mostra adequada para ser associada à técnica do fio vibrante e capaz de atender às demandas deste projeto.

4.6.3 Incerteza final

A incerteza final da técnica para cada componente é dada pela soma quadrática dos termos de desvio ou incerteza, isto é: da repetibilidade da medição magnética, na Tabela 15; da incerteza intrínseca da medida magnética, na Tabela 16; da repetibilidade (bidirecional) no reposicionamento do fio sobre o eixo magnético, na Tabela 12; e da repetibilidade e da incerteza da medição de posição do fio, que foram combinadas na Tabela 22. A Tabela 23 resume esses valores, podendo ser comparada à Tabela 5, com os resultados do LCLS.

As incertezas em x e y já são suficientes para o alinhamento especificado. Para z , foi considerado o erro na criação do sistema de coordenadas. Nos casos angulares de $pitch$ e yaw , as incertezas de medição mecânica também são plenamente suficientes para a técnica, restando a avaliação da medição magnética. O alinhamento tipo *roll* é

particularmente pouco sensível pelo fio vibrante, exigindo provavelmente o auxílio de uma técnica complementar.

Tabela 23: Incerteza total na determinação do centro e do alinhamento do eixo magnético do quadrupolo.
[Fonte: autor]

Incerteza	x_m (μm)	y_m (μm)	z_m (μm)	$pitch_m$ (mrad)	yaw_m (mrad)	$roll_m$ (mrad)
<i>Repetibilidade magnética</i>	6.3	7.3	–	?	?	6.3
<i>Exatidão magnética</i>	–	1.3	–	0.018	–	–
<i>Reposicionamento do fio</i>	3.1	1.5	–	0.002	0.005	–
<i>Medição de posição</i>	2.7	4.0	1.5 *	0.020	0.013	0.004 *
Total	7.5	8.6	0.3	> 0.03 **	> 0.01 **	6.3

* Dados retirados da avaliação de incerteza da criação do sistema de coordenadas do quadrupolo.

** Valores parciais para *pitch* e *yaw*, visto que medidas de repetibilidade magnética não foram possíveis.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Este trabalho apresentou o desenvolvimento da técnica do fio vibrante no LNLS, para alinhamento dos magnetos do novo acelerador de partículas brasileiro - o Projeto Sirius. A bancada proposta possui pouca semelhança com aquela que foi iniciada pelo grupo IMA, pois durante todo o tempo houve uma grande preocupação em desenvolver sistematicamente um instrumento de caracterização em que as incertezas fossem controladas e conhecidas.

Por exemplo, apesar do sistema de realimentação e das especificações do fornecedor dos novos estágios de movimentação comerciais, eles foram avaliados segundo caracterizações cuidadosas, de uma maneira não vista antes em outros trabalhos sobre o tema. Além disso, o sistema mecânico foi modelado matematicamente para determinação de critérios de alinhamento na montagem das bancada.

O recurso computacional foi também utilizado no modelamento de um novo sensor de vibração, de forma a estimar efeitos diversos e oferecer diretrizes para o seu desenvolvimento. O resultado foi um sensor com uma região de operação cerca de dez vezes maior do que os sensores comerciais tipicamente utilizados nesta aplicação, sendo comparável nesse aspecto apenas ao novo sensor indutivo que foi desenvolvido no PSI.

De fato, a inovação foi priorizada em relação à simples replicação de sistemas conhecidos, com o desenvolvimento, desde o conceito até a validação, não somente do sensor de vibração, como também de uma nova técnica de metrologia. Neste caso, a técnica proposta com o sistema de visão da máquina MMC é a primeira capaz de realizar medidas diretas da posição do fio, enquanto todas as demais exigem sistemas intermediários e calibrações de sensores de posição, com inevitável acúmulo de erros. Apesar dos números obtidas nesta etapa estarem alguns micrometros acima do que os reportados para outros sistemas, a técnica já se mostrou viável e adequada à aplicação, havendo ainda bastante espaço para otimização uma vez que ela acaba de nascer.

Toda inovação é fonte de risco para o seguimento de cronogramas e dessa vez não foi diferente. Realmente, os novos desenvolvimentos foram responsáveis por um significativo aumento do volume de trabalho e do tempo de desenvolvimento. Outrossim, a produção dos próprios magnetos e de suas fontes de corrente não ocorreu dentro do

espaço de tempo esperado. Portanto, resultados com números finais e a medição dos magnetos definitivos não puderam ser obtidos.

Tudo considerado, o projeto se encerra com a entrega uma bancada operacional, que, apesar de ter alguns pontos em aberto, como o refinamento das medidas de *pitch* e *yaw*, já atende a boa parte das necessidades de alinhamento de quadrupolos do Sirius. Com seu sistema de controle expansível e modular, que integra os diversos equipamentos utilizados, caberá aos futuros operadores a inclusão da medida de sextupolos e a customização das funções conforme a necessidade.

5.2 Trabalhos futuros

Ao final deste projeto de mestrado, algumas melhorias para as medidas definitivas de quadrupolos e sextupolos podem ser sugeridas.

Começando pelo sensor de vibração, seria conveniente o uso de um circuito de detecção mais robusto, com o uso de um amplificador operacional, para um melhor controle do ganho e da estabilidade do sinal de saída, bem como uma diminuição de sua impedância. Depois, caso a operação revele efeitos de não-linearidade associados à fonte de luz, esta poderia ser substituída por um sistema óptico mais elaborado, eventualmente composto por uma fonte laser, obturadores e lentes para controle da homogeneidade e divergência da luz.

Na parte de detecção, de imediato será preciso investigar se a solução proposta com as entradas auxiliares do lock-in será conveniente e suficiente também para as medidas de *pitch* e *yaw*. Caso essas varreduras mostrem que realmente os limites dessas entradas são superados nessas medidas, a primeira alternativa seria um ajuste por software e o último recurso, o uso de um hardware auxiliar. Ainda sobre o lock-in, tanto os filtros de entrada de sinais como o PID de seu sistema PLL podem ser mais cuidadosamente analisados, de forma a otimizar relações de sinal-ruído e a estabilidade do rastreamento da frequência de ressonância, garantindo sinais mais precisos.

A respeito do fio, pode ser feita uma investigação sobre a necessidade de um eventual tratamento de relaxamento antes do uso na bancada, de modo a eliminar tensões e deformações decorrentes da fabricação e do armazenamento. É sabido que tal trabalho foi realizado no PSI para o fio de cobre-berílio, com resultados relevantes.

Também a exemplo do que foi realizado no PSI (VRANKOVIC, WOUTERS, *et al.*, 2014), uma maior estabilidade operacional da bancada pode ser alcançada com um conversor tensão-corrente, transformando o sinal de tensão de saída do lock-in em um sinal de corrente para a excitação do fio, independente de variações de propriedades térmicas ou elétricas no próprio fio.

Em relação ao software de controle, as varreduras podem ser programadas levando-se em conta as histereses mecânicas identificadas nos estágios lineares, o que deveria reduzir o erro de repetibilidade na medição magnética. Também neste sentido, o tratamento estatístico pode ser melhorado, tanto em termos da promediação dos sinais de leitura, como dos métodos de ajuste de curvas para a eliminação de *outliers*, por exemplo. Ainda, o ajuste linear já realizado para os quadrupolos, precisará ser também expandido para medidas de sextupolos.

Por fim, para a metrologia mecânica, o sistema de visão da MMC deve ser mais explorado, tentando-se resolver junto ao fornecedor o problema de focalização automática quando a CCD encontra-se indexada, e aprimorando-se os critérios de detecção de bordas, de forma que os erros hoje encontrados possam ser eventualmente eliminados.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, S. et al. **Magnetic Measurement Results of the LCLS Undulator Quadrupoles**. SLAC. Menlo Park, p. 1-13. 2010. (LCLS-TN-09-1).
- FISCHER, G. **Precision fiducialization of transport components**. SLAC. Menlo Park, p. 1-3. 1992. (SLAC-PUB-5764).
- JAIN, A. et al. **Vibrating Wire R&D for Alignment of Multipole Magnets in NSLS-II**. The 10th International Workshop on Accelerator Alignment. Tsukuba: [s.n.]. 2008. p. 1-6.
- JANSZ, M. **Quadrupole Alignment via the Vibrating Wire Field Measuring Technique**. TRIUMF. Vancouver, p. 1-18. 2007.
- LEONOV, G. A.; KUZNETSOV, N. V.; YULDASHEV M. V., Y. R. V. Computation of Phase Detector Characteristics in Synchronization Systems. **Doklady Mathematics**, p. 586 - 590, 2011.
- LEVASHOV, M. Y.; WOLF, Z. **Set Up and Test Results for a Vibrating Wire System for Quadrupole Fiducialization**. SLAC. Menlo Park, p. 1-15. 2006. (LCLS-TN-06-14).
- LEVASHOV, M. Y.; WOLF, Z. **Commissioning a Vibrating Wire System for Quadrupole Fiducialization**. SLAC. Menlo Park, p. 1-20. 2007. (LCLS-TN-07-8).
- LIU, L. et al. Sirius: a 5BA low emittance lattice with superbends for the new Brazilian Synchrotron Light Source. **Synchrotron Radiation News**, p. 34 - 38, 2013.
- LNLS. **Sirius Detailed Design Report**. Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS). Campinas. 2014.
- RAGO, C. et al. **High reliability prototype quadrupole for the next linear collider**. SLAC. Menlo Park, p. 1-4. 2002. (SLAC-PUB-8990).
- SERWAY, R. A.; JEWETT, J. W. **Physics for Scientists and Engineers**. 6^a. ed. [S.I.]: Thomson Brooks/Cole, 2004.
- STANFORD RESEARCH SYSTEMS. **Model SR830 DSP Lock-In Amplifier**. SRS Inc. Sunnyvale, California. 2011.
- STANFORD RESEARCH SYSTEMS. About Lock-In Amplifiers. Disponível em: <<http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/ApplicationNotes/AboutLIAs.pdf>>. Acesso em: Setembro 2014.
- TEMNYKH, A. Vibrating wire field-measuring technique. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 399, p. 185-194, 1997.

TEMNYKH, A. **The Magnetic Center Finding using Vibrating Wire Technique.** Laboratory of Nuclear Studies, Cornell University. Ithaca, p. 1-6. 1999. (CBN 99-22).

TEMNYKH, A. **The Use of Vibrating Wire Technique for Precise Positioning of CESR Phase III Super-Conducting Quadrupoles at Room Temperature.** Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference. Chicago: [s.n.]. 2001. p. 3469-3471.

TEMNYKH, A.; LEVASHOV, Y.; WOLF, Z. A Study of Undulator Magnets Characterization Using the Vibrating Wire Technique. **Nuclear Instruments and Methods in**, v. 622, p. 650-656, 2010.

TSAI, L. et al. **Precise Positioning of Magnetic Field Centers of Quadrupole Magnets on the Girder.** APAC 2007. Indore: [s.n.]. 2007a. p. 749-751.

TSAI, L. et al. **Multiple Quadrupole Magnetic Center Alignment on the Girder.** Proceedings of PAC07. Albuquerque: [s.n.]. 2007b. p. 395-397.

VRANKOVIC, V. et al. A Method for the Submicrometer Accuracy Determination of Quadrupole Magnetic Axis. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 24, Junho 2014. ISSN 9001605.

WIEDEMANN, H. **Particle Accelerator Physics.** 3a. ed. New York: Springer, 2007.

WOLF, Z. **A Vibrating Wire System for Quadrupole Fiducialization.** SLAC. Menlo Park, p. 1-23. 2005. (LCLS-TN-05-11).

WOUTERS, C. et al. Vibrating Wire Technique and Phase Lock Loop For Finding the Magnetic Axis of Quadrupoles. **IEEE Transactions on applied superconductivity**, v. 2, Junho 2012. ISSN 9001404.

ZURICH INSTRUMENTS. **HF2 User Manual.** Zurich. 2011.