

## Estudo de Sistema de Alinhamento de Magnetos para o Projeto Sirius a partir de Técnica Difratométrica

Renan R. Gerales, James F. Citadini, e Fernando H. Sá  
*Laboratório Nacional de Luz Síncrotron – LNLS*  
*Rua Giuseppe Máximo Scolfaro,*  
*10000, Campinas – SP, Brasil*

Clécio R. Bom  
*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF*  
*Rua Dr. Xavier Sigaud, 150, Rio de Janeiro – RJ, Brasil*

**Resumo:** O presente trabalho faz uma avaliação da técnica de localização espacial de um anteparo com abertura circular a partir da análise do padrão de difração de um laser em uma CCD. Com isso, busca-se qualificar uma alternativa complementar à técnica adotada atualmente, isto é, ao sistema de fio vibrante, para os procedimentos de alinhamento dos ímãs da rede magnética do anel armazenador de elétrons do Projeto Sirius. As imagens de interesse, são aplicados quatro métodos de processamento distintos, a saber: o cálculo de centro de massa da imagem em tons de cinza; o cálculo de centro de massa da imagem binarizada; o ajuste de uma circunferência ao contorno da imagem binarizada; e o ajuste da imagem em tons de cinza ao padrão teórico. As análises são feitas tanto em conjuntos de imagens reais, obtidas a partir de dois elementos difratantes, um pinhole e um diafragma íris, como também em imagens simuladas, a fim de confrontar os métodos quando aplicados a dados seguramente conhecidos. Os resultados obtidos sugerem que a técnica atende às tolerâncias exigidas na aplicação, e números finais de precisão e acurácia podem ser determinados no futuro próximo com um aperfeiçoamento das condições experimentais.

**Palavras-chave:** processamento de imagem, alinhamento, padrão de difração.

**Abstract:** It is made an evaluation of the technique for finding the position of a circular aperture after the diffraction pattern of a laser in a CCD. It is sought an alternative to complement the vibrating wire technique, which is going to be used for the alignment of the magnets in the magnetic lattice of the Sirius Project. Four different image processing methods are used to study the images of interest: the calculation of the center of mass of the grayscale image; the calculation of the center of mass of the binarized image; the fitting of a circle to the contour of the binarized image; and the fitting of the theoretical intensity function to the grayscale image. The analyses are carried out for real images, captured with two different types of apertures, a pinhole and an iris diaphragm, as well as for simulated images, in order to compare the methods when applied to known data. The results suggest that the technique meets the tolerances required in the application. Final figures of precision and accuracy may be obtained in the near future with some improvement of the experimental setup.

**Keywords:** image processing, alignment, diffraction pattern.

### 1. INTRODUÇÃO

Encontra-se em desenvolvimento no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), o qual faz parte do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), 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 [1]. 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 [1, 2]. Por não haver espaço neste documento para detalhar o projeto, são apresentados na Tabela 1, para conhecimento geral, apenas alguns de seus números mais significativos. A especificação completa pode ser consultada nas referências [2,3].

**Tabela 1:** Parâmetros físicos do anel de armazenamento do Projeto Sirius (adaptado de [2,3]).

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

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, esse parâmetro está próximo do valor mínimo permitido pelo princípio de incerteza de Heisenberg, o qual nesse caso define o limite de difração.

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 [4].

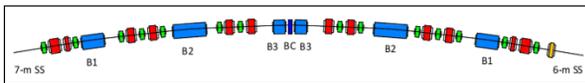


Figura 1: Esquemático com vista superior de um superperíodo da rede magnética do Sirius: dipolos em azul, quadrupolos em vermelho e sextupolos em verde (adaptado de [3]).

Quadrupolos e sextupolos que fazem parte de um mesmo trecho reto entre dipolos possuem especificações de alinhamento com  $30 \mu\text{m}$  rms entre eles [3]. Justamente com a finalidade de realizar um alinhamento preciso entre esses magnetos, está sendo construída no LNLS uma bancada baseada na técnica do fio vibrante por corrente alternada, descrita em [5]. Não existe, entretanto, um consenso sobre a técnica mais precisa para esse fim, e outros aceleradores utilizam ou já utilizaram técnicas diferentes, como: bobina girante, fio pulsado, e fio vibrante por ondas de rádio [6].

Além destas, uma alternativa foi ainda desenvolvida no anel armazenador SPring-8, com sistemas baseados em um laser e uma câmera CCD [7]. De fato, se uma fonte de luz, laser, por exemplo, e um detector CCD são alinhados e mantidos fixos em suportes estáveis, então a posição de um elemento difratante de interesse, como um pinhole fixo em um elemento magnético, por exemplo, pode ser determinada pela análise do padrão por ele gerado. É assim, um estudo da posição relativa de magnetos apontaria o alinhamento entre eles.

O domínio dessa técnica é bastante vantajoso para o Projeto Sirius, pois, se ela for utilizada em paralelo com o fio vibrante no alinhamento e na caracterização de cada trecho ainda na sala de medições, será viável a verificação do alinhamento no futuro, quando o fio vibrante estiver limitado pela montagem do trecho no anel.

A seguir, para uma melhor compreensão das análises, é feita uma breve apresentação da função matemática que descreve o padrão de difração teórico esperado nas imagens.

### 1.1. Padrão de Difração de um Anteparo com Abertura Circular

Quando uma onda plana de comprimento de onda  $\lambda$  atravessa uma anteparo com abertura circular de raio  $a$ , um padrão de difração como o da Figura 2 é obtido em planos normais à direção propagação para distâncias  $z \gg a^2/\lambda$ .

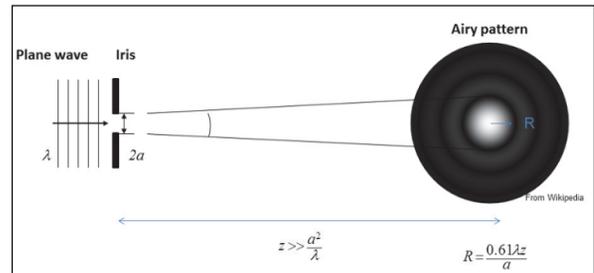


Figura 2: Padrão de difração de uma onda plana por uma abertura circular de raio  $a$  (retirado de [7]).

Essa distribuição possui simetria cilíndrica e é dada por:

$$I = \left| \frac{2J_1\left(\frac{2\pi ar}{\lambda z}\right)}{\frac{2\pi ar}{\lambda z}} \right|^2 \quad (1)$$

onde,  $J_1(x)/x$ , é a função de Bessel de primeira ordem amortecida, e a partir da qual definimos,  $jinc(x) := 2J_1(x)/x$ , tal que  $\lim_{x \rightarrow 0} jinc(x) = 1$  [8,9]. A Figura 3 mostra a curva de  $|jinc(x)|^2$ , onde fica claro que o segundo máximo de difração é muito menos intenso, apenas 1.75% do pico.

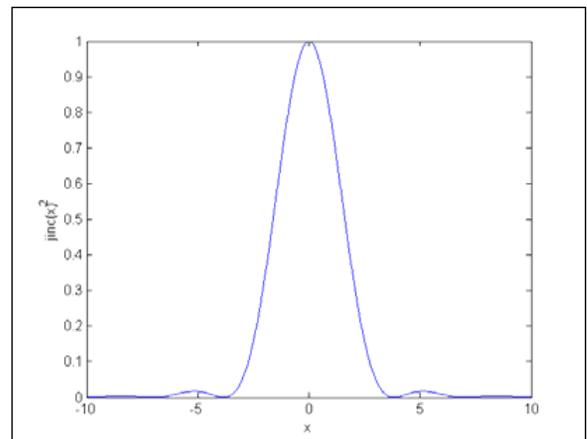


Figura 3: Função  $|jinc(x)|^2$ .

O primeiro zero de  $jinc(x)$ , conhecido por disco de Airy, ocorre no primeiro mínimo de  $J_1(x)$ , isto é,  $x \cong 3.83$  [8]. Consequentemente, da equação (1) é obtido o raio do primeiro mínimo de difração:

$$R \cong 0.61 \frac{\lambda z}{a} \quad (2)$$

## 2. METODOLOGIA E RESULTADOS

Para alinhar elementos magnéticos a diferentes distâncias da CCD, é conveniente a variação da abertura do elemento difratante, de forma que o padrão da imagem seja sempre otimizado. Isso pode ser obtido por meio do uso de um difractor íris, chamado daqui em diante apenas de íris, em vez de um pinhole com diâmetro fixo. A Figura 4 mostra a variação do padrão no arranjo experimental da referência [7], com aberturas de íris e distâncias  $z$  variadas.

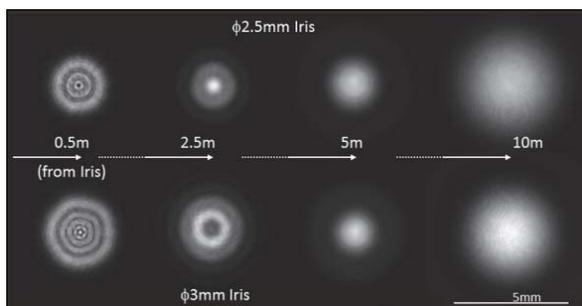


Figura 4: Variação do padrão de uma íris com seu raio e distância (retirado de [7]).

A partir da equação (2) e de diferentes aberturas de íris, é possível calcular o raio teórico do disco de Airy com a variação da distância  $z$  (Figura 5).

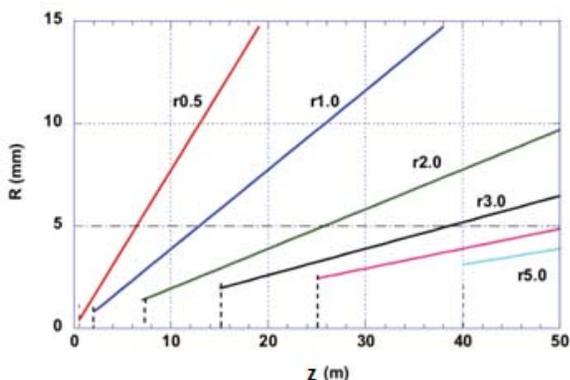


Figura 5: Raio do disco de Airy com a distância  $z$  para diferentes aberturas de íris. As linhas pontilhadas indicam as distâncias mínimas para o aparecimento dos discos (adaptado de [7]).

Uma vez que o padrão deve estar contido na imagem, e ao mesmo tempo com um tamanho não muito reduzido, para permitir a extração da informação desejada, fica evidente que as aberturas devem ser escolhidas de acordo como o tamanho da CCD e com as distâncias dos magnetos. Para o Sirius, seria adequado e suficiente um sistema para operar entre 1 e 10 m, pois atenderia tanto aos conjuntos menores, como aos maiores trechos retos.

Os trabalhos no SPring-8 utilizam o valor do centro de massa do disco central do padrão de difração para o alinhamento transversal dos magnetos [7]. Como será mostrado, essa abordagem exige que todo o círculo esteja contido na

área analisada e ainda pode ser consideravelmente afetada por assimetrias decorrentes de aberrações na imagem.

Isto não se mostra um problema se a CCD for grande o suficiente e se a imagem for bastante próxima do padrão esperado. Entretanto, neste primeiro trabalho com a técnica no LNLS, são feitas comparações entre quatro métodos de tratamento das imagens adquiridas, buscando não só maior flexibilidade na identificação da posição do padrão, ou seja, mesmo quando ele se encontra próximo à borda, como também informações a partir do disco de Airy.

### 2.1. Montagem Experimental

O estudo foi feito na bancada de testes mostrada na Figura 6, sendo constituída por itens disponíveis no grupo de instrumentação científica do LNLS: um laser vermelho circular, classe II, 635 nm, 0.9 mW CW, modelo NT-83-836 da Edmund Optics; um pinhole de precisão, também da Edmund Optics, com diâmetro de  $10 \mu\text{m}$ ; uma íris Thorlabs ID25, de abertura variável, com diâmetro mínimo de 1 mm; uma câmera CCD Manta MG 146C IRC, da Allied Vision Technologies, com resolução de  $1388 \times 1038$  píxeis e tamanho de pixel igual a  $4.65 \mu\text{m}$  (i.e.  $6.45 \times 4.83 \text{ mm}^2$ ); um trilho de montagem da Newport e dois estágios lineares manuais com resolução de  $2 \mu\text{m}$  para ajuste e variação da posição da CCD. Os dados foram tratados com o software Matlab® versão R2010b e o pacote *ImageProcessing Toolbox* versão 7.1.

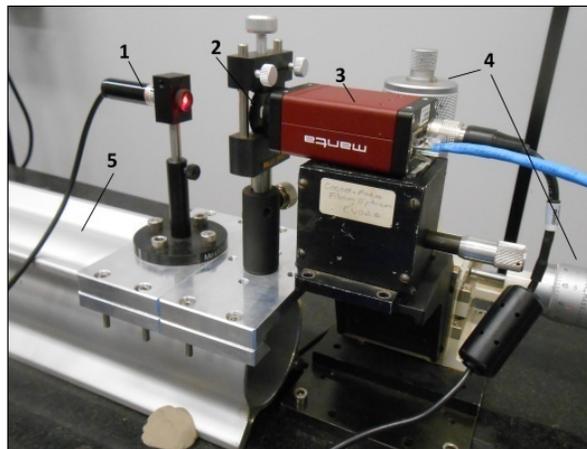


Figura 6: Bancada experimental: 1. laser de 635 nm da Edmund Optics; 2. pinhole de  $10 \mu\text{m}$  de diâmetro da Thorlabs; 3. câmera CCD Manta da AlliedVision Technologies; 4. estágios lineares micrométricos; e 5. trilho de montagem Newport.

### 2.2. Técnicas de Análise de Imagem

Para realizar as medidas de centro e de raio do padrão de difração foram utilizados quatro métodos diferentes. O primeiro, denominado *momentos*, é análogo à técnica apresentada em [3] para o SPring-8. O segundo, chamado de *binário*, é uma variante do primeiro para o caso em que a imagem é binarizada. O terceiro, denominado *contorno*,

ajusta um círculo por meio de mínimos quadrados. Finalmente, o algoritmo *jinc* ajusta a função teórica à imagem. A seguir são apresentados os detalhes de cada um deles.

Com *momentos*, temos: a imagem colorida é convertida em tons de cinza; um filtro médio 2D é aplicado; a imagem é projetada nos eixos  $x$  e  $y$ , gerando duas distribuições unidimensionais; de cada distribuição é subtraída sua moda (pelo que se verificou na prática eliminar a intensidade de fundo da imagem - *offset*) e também uma pequena fração (5%) do valor de pico, para eliminar sinais menores, como o segundo máximo de difração; finalmente, o centro de massa da imagem, o par  $(X_0, Y_0)$ , é obtido pela média ponderada, isto é, pela esperança ou primeiro momento em cada eixo (Figura 7(b)). Para o nosso interesse, o problema é que caso o disco central não esteja completamente inserido na imagem, ou se houver distorções mais importantes, esse centro não será coincidente com o centro do padrão de difração.

Em *binário*, após a aplicação do filtro na imagem em escala de cinza, esta é binarizada com valor de corte determinado pela função *graythresh* do Matlab, a qual utiliza o método de Otsu, um método de limiarização global conhecido por sua eficácia [10]; então o centro de massa é calculado também pelo método dos momentos (Figura 7(c)). As limitações são as mesmas da primeira técnica.

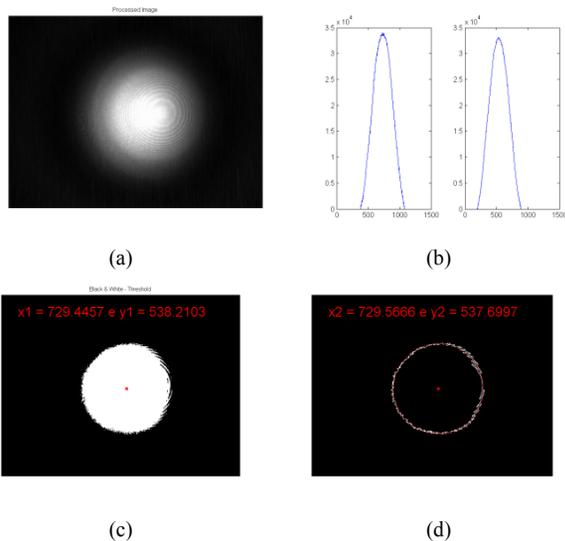


Figura 7: Exemplo de análise: (a) imagem original convertida em tons de cinza; (b) distribuições unidimensionais já tratadas; (c) imagem binarizada; (d) ajuste de circunferência.

A terceira técnica, *contorno*, parte da imagem binarizada e prossegue com: a eliminação de objetos pequenos (*bwareopen*); o preenchimento de buracos (*imfill*); a geração do contorno do objeto, a partir da subtração da imagem dilatada (*imdilate*) pela erodida (*imerode*); e o ajuste de uma circunferência pelo método de minimização de Pratt [11,12] (código disponível na Central Matlab [13]), retornando o centro  $(X_0, Y_0)$  e o raio da circunferência (Figura 7(d)). Este raio, no entanto não possui nenhum valor prático, pois seu valor depende apenas do limite de intensidade escolhido na binarização. Já o centro é real e significativo, e, como será apresentado, esta técnica se mostrou a menos sensível a dis-

torções ou variações quando o padrão está nas bordas da imagem.

Por fim, a técnica *jinc* foi implementada como alternativa para investigar o mínimo de difração, e não apenas o centro, como as demais, além de também buscar melhores ajustes quando o padrão está nas bordas. Este método gera uma função de intensidade ( $I_a$ ), como a da equação (1), e para uma matriz de mesmo tamanho das imagens coletadas (1388 x 1038 pixels), porém, com parâmetros de ajuste ( $A_1, A_2, A_3, X_a$  e  $Y_a$ ), de acordo com as equações (3) e (4):

$$I_a = A_1 \cdot \left| \frac{2J_1(A_2 \cdot R)}{A_2 \cdot R} \right|^2 + A_3 \quad (3)$$

onde,

$$R = \sqrt{(X - X_a)^2 + (Y - Y_a)^2} \quad (4)$$

Desse modo, é possível alterar a amplitude com  $A_1$ , a frequência de oscilação com  $A_2$ , o *offset* com  $A_3$ , e o centro com  $X_a$  e  $Y_a$ .

Então, partindo de parâmetros com valores predefinidos após algumas tentativas práticas, para cada imagem analisada é feito um número de iterações, em que ela é comparada com a imagem teórica daquela iteração. A cada iteração os parâmetros são variados aleatoriamente dentro de 5% de seus valores anteriores, e é calculada a soma das diferenças (elevadas ao quadrado) pixel a pixel entre as imagens. Caso essa soma seja menor do que a de iteração anteriores, ela é aceita como novo valor de referência e os parâmetros são atualizados; caso contrário, tanto ela como os novos parâmetros são desprezados. Este algoritmo simples implica uma maior dificuldade ou impossibilidade de escapar de mínimos locais, pois as variações são pequenas. Entretanto, os resultados mostrados são válidos porque foi feita a verificação da adequação dos ajustes de todas as análises realizadas.

Objetivando melhorar o ajuste nas regiões do primeiro mínimo e segundo máximo, regiões estas que são grande interesse, mas que possuem menor peso em termos de intensidade, foi aplicado um peso gaussiano (Figura 8(a)) à equação 3. Além disso, após alguns testes, foi visualmente definido um valor de corte, de intensidade igual a 50% do valor máximo, para compensar efeitos de saturação e artefatos no pico de difração (Figura 8 (b) e (c)).

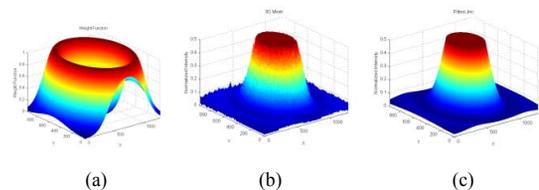


Figura 8: Exemplo de análise com a *jinc*: (a) a função peso gaussiana com simetria cilíndrica, para enfatizar o ajuste do mínimo e do segundo máximo; (b) gráfico 3D da imagem original, já com o valor de corte; (c) o gráfico do ajuste pela técnica.

Por ser um procedimento de alta demanda computacional, com uma pequena alteração no código foi conseguida uma melhoria de desempenho de duas ordens de grandeza no

tempo de cálculo para convergência do processo. Detalhando a mudança: a equação (3) foi separada nas coordenadas de linha ( $Y$ ) e coluna ( $X$ ), e a minimização passou a ser feita, em uma primeira rodada de iterações, apenas na linha e na coluna do centro de massa calculado pelo *momentos*. Este cálculo é capaz de convergir rapidamente para parâmetros muito próximos dos finais, os quais são apenas refinados na segunda rodada de iterações, com toda a imagem.

Ainda assim, o tempo de cálculo desse último método é uma desvantagem importante, cerca de 150 vezes mais lento que os demais, porém, foi mantido por ter aparentemente oferecido bons resultados em medidas preliminares com o pinhole, mesmo quando o padrão se encontrava em alguma das bordas da imagem. Nestes casos preliminares, a saturação do disco central era quase que absoluta, e o anel de segundo máximo bastante intenso, próximo de 50%, o que não ocorreu nas imagens discutidas doravante.

### 2.3. Desenvolvimento

O procedimento experimental foi repetido com o pinhole e com a íris, e, portanto, os resultados serão apresentados paralelamente. Para o pinhole, de diâmetro igual a  $(1.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-2} mm$ , a distância  $z$  mínima para a formação do padrão é de aproximadamente  $4.0 \cdot 10^{-2} mm$ . A montagem adotada foi com  $z = (3.0 \pm 0.3) \cdot 10^1 mm$ , e esta incerteza de 10% é majoritariamente devida à limitação de acesso à CCD pela embalagem da câmera. Com isso, pela equação (2), o raio esperado para o mínimo é  $2.3 \pm 0.3 mm$ . Já para a íris em sua abertura mínima, com diâmetro igual a  $1.0 \pm 0.1 mm$ , a distância mínima é cerca de  $4.0 \cdot 10^2 mm$ . A distância adotada foi de  $(8.4 \pm 0.1) \cdot 10^2 mm$ , e assim o raio esperado é igual a  $(6.5 \pm 0.7) \cdot 10^{-1} mm$ .

Primeiramente foi feita uma medida de estabilidade e variação do tempo de exposição: com os componentes fixos, para cada um dos cinco valores de exposição escolhidos foram geradas cinco imagens, a fim de se obter uma estatística dos dados. Uma imagem de cada conjunto é exibida: na Figura 9 para o pinhole, e na Figura 10 para a íris.

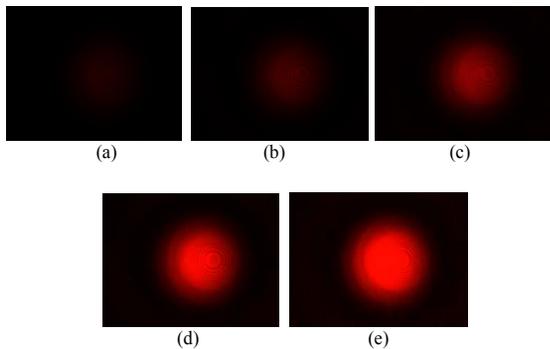


Figura 9: Imagens com variação do tempo de exposição para o pinhole: (a) 100 ms, (b) 200 ms, (c) 400 ms, (d) 800 ms e (e) 1200 ms.

Como a íris permite a passagem de uma quantidade de luz muito mais significativa, os tempos de exposição para minimizar a saturação são cerca de 3000 vezes menores.

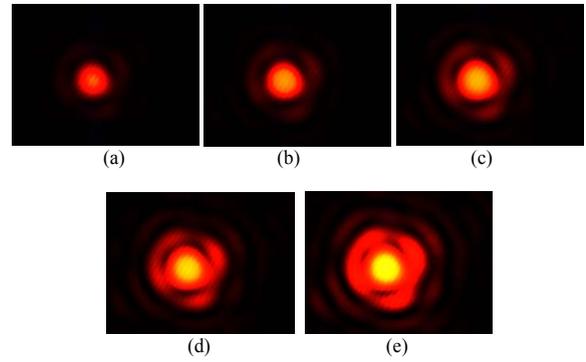


Figura 10: Imagens com variação do tempo de exposição para a íris: (a) 32  $\mu s$ , (b) 64  $\mu s$ , (c) 128  $\mu s$ , (d) 256  $\mu s$  e (e) 512  $\mu s$ .

Com o pinhole é possível ver o disco central e, com intensidade muito baixa, o anel do segundo máximo, incompleto, cortado pelas bordas. A imagem é clara e próxima do padrão teórico, a menos de um padrão de difração espúrio, proveniente do laser em si, e que pode ser facilmente observado dentro dos máximos de difração centrais da Figura 9. Os valores de raio do mínimo de difração, calculado com a técnica *jinc*, e seus desvios padrões, assumidos como as medidas de erro, são mostrados na Tabela 2. Eles se encontram sempre dentro do valor esperado.

Já para a íris, mesmo no tempo mínimo de exposição da câmera, 32  $\mu s$ , já se observam aberrações importantes, como a variação de intensidade do anel de segundo máximo, já a partir da Figura 10(b), e ligação entre os objetos, tão mais acentuada quanto maior o tempo de exposição. Na Figura 10(e), o primeiro mínimo já está totalmente comprometido. Também na Tabela 2, percebe-se que o ajuste não foi realizado com sucesso em nenhum dos casos, ou seja, as aberrações foram suficientes para impedir a localização do primeiro mínimo corretamente.

**Tabela 2:** Cálculos médios, com desvios padrões, dos raios ajustados pela *jinc* para o pinhole e para a íris.

Exposição (ms):	Raio (mm) Pinhole	Exposição ( $\mu s$ ):	Raio (mm) Íris
100	2.28±0.01	32	$(8.83 \pm 0.01) \times 10^{-1}$
200	2.20±0.02	64	$(8.79 \pm 0.02) \times 10^{-1}$
400	2.23±0.01	128	1.82±0.02
800	2.25±0.01	256	2.36±0.05
1200	2.27±0.01	512	3.1±0.1
Teórico	2.3±0.3	Teórico	$(6.5 \pm 0.7) \times 10^{-1}$

Inicialmente, cogitou-se a hipótese de, uma vez tendo o raio bem determinado, como ocorreu com o pinhole, poder aplicar a equação (2) inversamente para investigar a distância  $z$  do elemento até a CCD. Entretanto, essa opção mostrou-se inviável, pois, utilizando propagação de erros, o erro em  $z$  seria maior do que 0.1 mm para o pinhole e 5 mm para a íris. Essa imprecisão é ordens de grandeza superior à oferecida por instrumentos de medida geralmente utilizados no ramo para fins de posicionamento, tais como *laser trackers*, com acurácia tipicamente da ordem de 30  $\mu m$ .

Na localização do centro ( $X_0, Y_0$ ), os desvios padrões são mostrados na Tabela 3 e na Tabela 4, e os resultados qualitativos, na Figura 11 e.

**Tabela 3:** Desvio padrão na localização do centro da imagem para os conjuntos de medidas com o pinhole e variação do tempo de exposição.

Desvio padrão do centro - Pinhole								
Exposição (ms)	Momentos		Binário		Contorno		Jinc	
	X0 ( $\mu\text{m}$ )	Y0 ( $\mu\text{m}$ )	X0 ( $\mu\text{m}$ )	Y0 ( $\mu\text{m}$ )	X0 ( $\mu\text{m}$ )	Y0 ( $\mu\text{m}$ )	X0 ( $\mu\text{m}$ )	Y0 ( $\mu\text{m}$ )
100	6,23	1,91	3,68	1,67	5,40	2,30	12,05	10,45
200	14,21	4,47	13,53	3,22	14,02	4,07	16,05	4,22
400	12,54	3,23	13,63	3,50	15,83	5,40	14,48	5,33
800	3,29	6,43	4,15	7,24	4,06	6,85	3,67	7,24
1200	5,21	7,86	3,49	1,30	3,32	1,45	5,80	8,60

**Tabela 4:** Desvio padrão na localização do centro da imagem para os conjuntos de medidas com a íris e variação do tempo de exposição.

Desvio padrão do centro - Íris								
Exposição ( $\mu\text{s}$ )	Momentos		Binário		Contorno		Jinc	
	X0 ( $\mu\text{m}$ )	Y0 ( $\mu\text{m}$ )	X0 ( $\mu\text{m}$ )	Y0 ( $\mu\text{m}$ )	X0 ( $\mu\text{m}$ )	Y0 ( $\mu\text{m}$ )	X0 ( $\mu\text{m}$ )	Y0 ( $\mu\text{m}$ )
32	4,10	3,35	1,81	1,27	1,70	1,21	8,56	5,45
64	0,76	1,06	0,35	0,95	0,34	0,99	4,88	1,83
128	2,05	2,77	1,63	1,88	1,59	1,92	10,37	20,75
256	6,28	3,80	15,00	12,65	7,19	7,74	8,04	32,82
512	0,75	3,77	0,90	0,62	2,26	0,96	48,04	66,40

#### 2.4. Varreduras

Na sequência, a fim de comparar os ajustes de centro a partir de deslocamentos conhecidos, foram realizadas varreduras verticais com a câmera, isto é, transversalmente à propagação da luz, de acordo com a montagem experimental da Figura 6. Isso seria equivalente à movimentação do anteparo, para um fonte laser suficientemente grande, no caso prático de alinhamento dos ímãs, por exemplo.

Para cada elemento difratante foram feitas varreduras com passos de 0.5 mm, 0.05 mm e 0.01 mm, e o erro de movimentação em todos os casos pode ser estimado em  $2 \cdot 10^{-3}$  mm, para mais ou para menos.

Os tempos de exposição escolhidos foram 800 ms para o pinhole e 32  $\mu\text{s}$  para a íris, pois optou-se por trabalhar com imagens não saturadas, e estes foram os limiares a partir dos quais havia saturação.

Visto que seriam esperados comportamentos lineares dos ajustes nessas varreduras, um dos elementos utilizados na comparação entre as técnicas foi o coeficiente de determinação  $R^2$  para regressão linear. Ele é uma medida do ajuste do modelo estatístico linear em relação aos valores observados, e varia entre 0 e 1. Quanto maior o valor de  $R^2$ , mais o modelo se ajusta à amostra [14].

A Figura 12 (a) e (b), mostra respectivamente a variação de X0 e Y0 com cada técnica na varredura com a íris e passo de 0.5 mm.

Como não houve um alinhamento rigoroso da coluna pixels com o eixo de translação, é natural que seja observada uma correlação não só na direção y variada, com  $R^2$  entre 0.998 (*momentos*) e 0.99999 (*contorno*), como também na direção x, com  $R^2$  entre 0.8 (*jinc*) e 0.935 (*contorno*). Essa condição experimental explica também o fato do coeficiente angular da reta de ajuste ser ligeiramente (menor que 5%) inferior a 1000, resultado ideal pelas unidades utilizadas nos gráficos. Em y, o desvio médio dos pontos em relação à reta foi menor do que 4.5  $\mu\text{m}$  para a *contorno*, porém, 58  $\mu\text{m}$  para a *momentos*, 49  $\mu\text{m}$  para a *binário*, e 35  $\mu\text{m}$  para a *jinc*. Na figura (b) é interessante observar nos pontos das extremidades o distanciamento da tendência linear, principalmente das curvas *momentos* e *binário*. Esse comportamento é causado pelo erro decorrente da perda de informação nas bordas

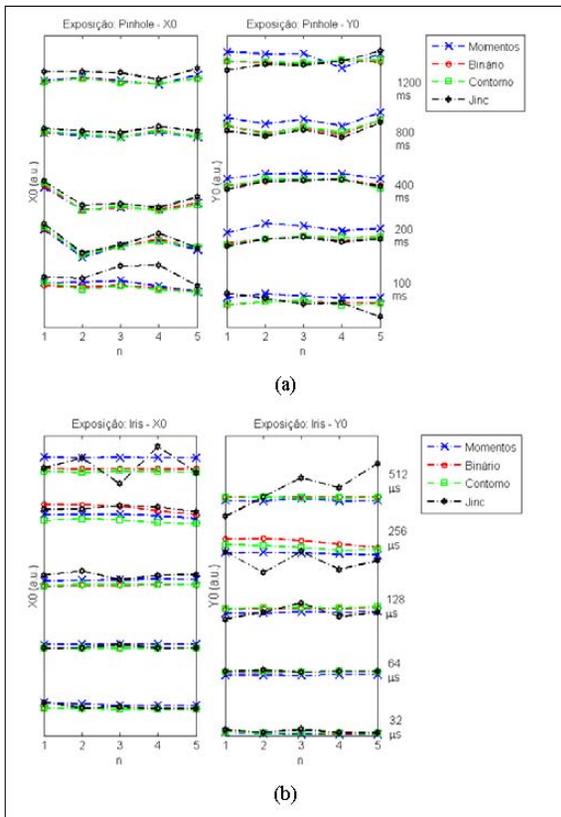
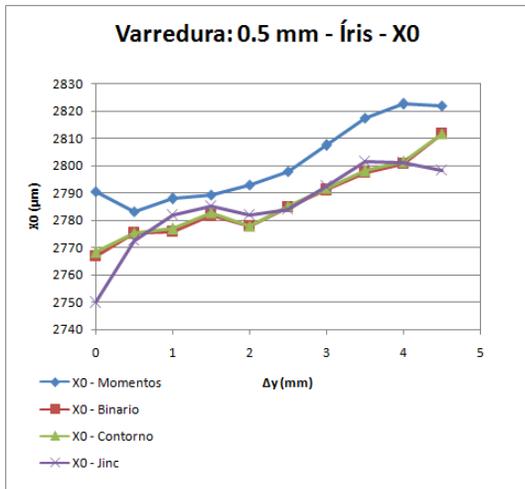
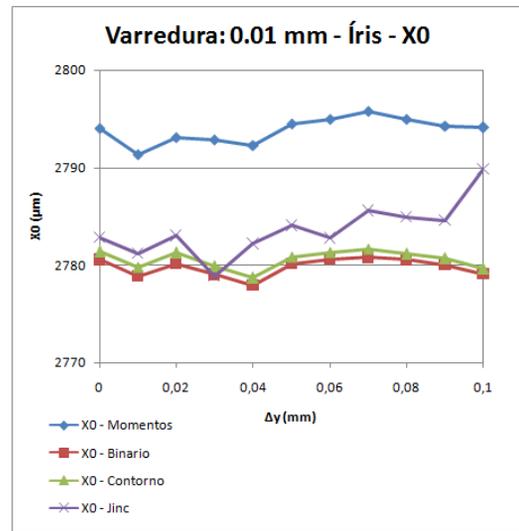


Figura 11: Avaliação qualitativa da estabilidade do centro calculado para a variação do tempo de exposição com o pinhole (a) e a íris (b). Aos resultados de cada intensidade foram somados *offsets* arbitrários para facilitar a visualização, ou todas as curvas ficariam superpostas.

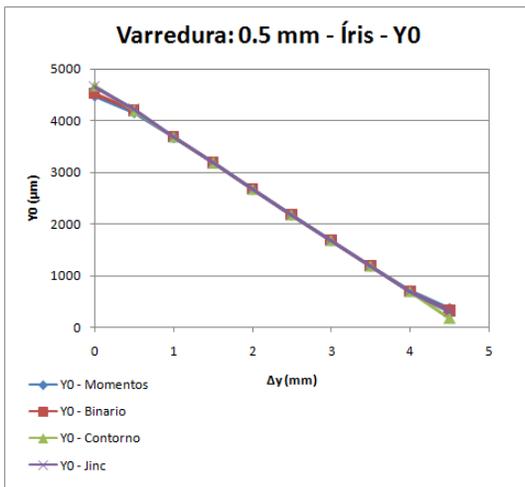
Com exceção da *jinc*, que teve o ajuste muito prejudicado pelas distorções da imagem, os desvios com a íris foram sen-



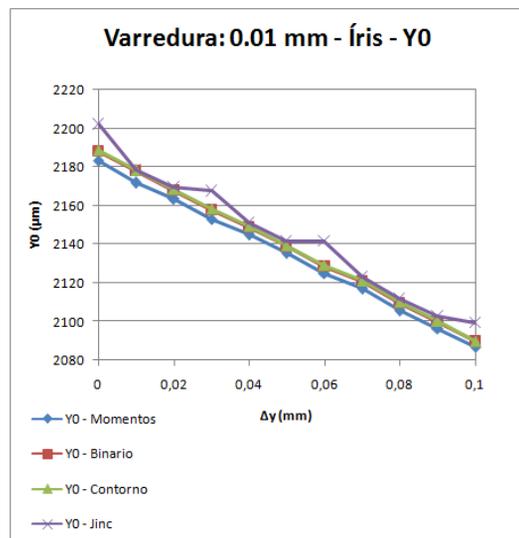
(a)



(a)



(b)



(b)

Figura 12: Gráficos das posições dos centros em varredura de 0.5 mm com íris.

da imagem.

Para a varredura de maior passo com o pinhole, foram obtidos essencialmente os mesmos resultados. Nos casos de varredura intermediária, 0.05 mm, os coeficientes  $R^2$  foram todos de 0.999 para Y0, mas já não foram verificadas correlações para X0, devido ao fato dos desvios já serem da mesma ordem de grandeza da variação nessa direção. Os desvios médios foram da ordem de  $5 \mu\text{m}$ , e um pouco menores para a íris do que para o pinhole.

Finalmente, a Figura 13 exibe os dados da varredura de menor passo para a íris:

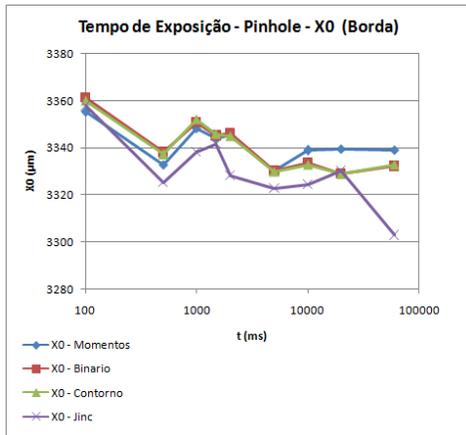
Figura 13: Gráficos das posições dos centros em varredura de 0.5 mm com íris.

Neste caso,  $R^2$  para Y0 foi 0.98 para o pinhole e 0.999 para a íris – com exceção da *jinc*, 0.97. Para X0, mais uma vez não houve correlação. Os desvios médios para Y0 foram da ordem de  $5 \mu\text{m}$  para o pinhole e de apenas  $1 \mu\text{m}$  para a íris – a menos da *jinc*,  $4.8 \mu\text{m}$ . Para X0, os desvios foram também de  $1 \mu\text{m}$  para a íris, mas de  $10 \mu\text{m}$  para o pinhole.

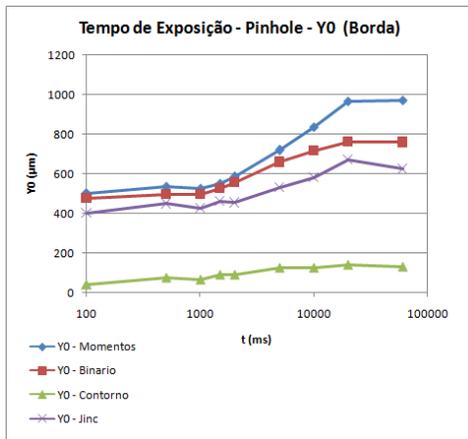
## 2.5. Análises em Bordas

A fim de avaliar as técnicas nas bordas da imagem, foram feitas duas novas análises com a variação do tempo de exposição. O centro do padrão foi mantido fixo, próximo à borda superior da imagem e no centro horizontal, isto é,  $x \cong 3230 \mu\text{m}$  e  $y$  próximo de zero. O estudo para o pinhole

é mostrado na Figura 14, em que se observa que a *contorno* fornece o ajuste mais próximo do real.



(a)



(b)

Figura 14: Estudo da posição do centro com a variação da intensidade para o pinhole. O centro do padrão foi mantido estático em coordenada próxima a (3230,0).

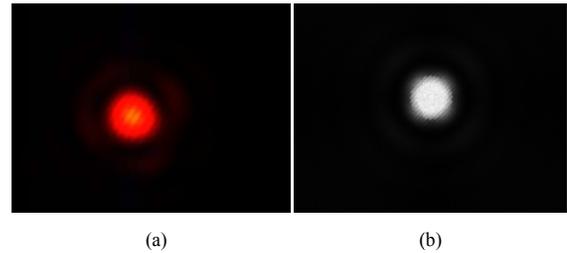
Com o aumento do tempo de exposição há o aumento do erro, pelo aumento de aberrações e da saturação, principalmente nas técnicas que trabalham com o centro de massa da imagem. Para a íris, o ajuste da *jinc* parte do mesmo ponto que a *contorno*, mas passa a estar cada vez mais distante a partir do segundo ponto.

## 2.6. Simulações

Para a comprovação dos limites das técnicas, em confronto com dados conhecidos, foi gerada uma série de imagens simuladas, incluindo uma varredura. As imagens foram simuladas para serem próximas ao padrão da íris com  $32 \mu\text{s}$  (Figura 15), por se tratar do caso prático de maior interesse, uma vez que as medidas com pinhole levam a padrões extremamente grandes a metros de distância.

Nessa simulação, foi gerada uma função de intensidade como a da equação (3), partindo de valores dos parâmetros de ajuste encontrados durante as análises. Então, sobre a

imagem "pura" foram aplicados alguns efeitos, a saber: uma função senoidal em  $\theta$  para intensidades menores ou iguais à do segundo máximo; uma modulação senoidal de pequena amplitude em toda a imagem ao longo da reta  $x=y$ ; e ruídos (*imnoise* do Matlab) do tipo *speckle* e de *poisson*, para os efeitos da CCD.

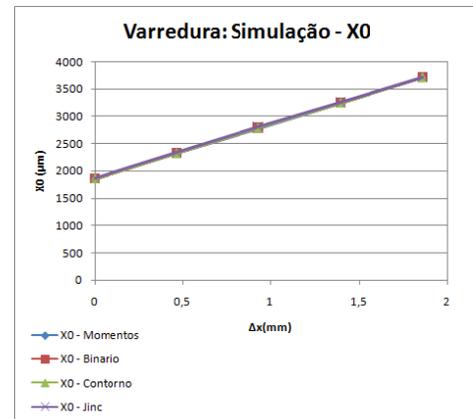


(a)

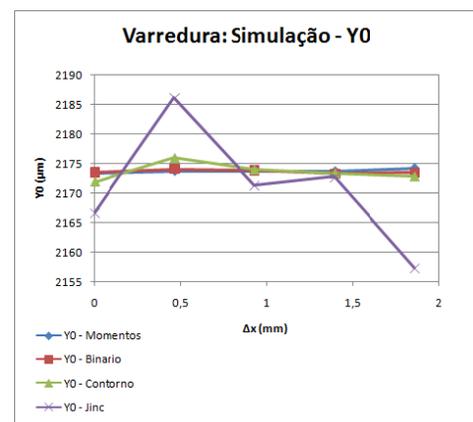
(b)

Figura 15: Comparação entre a imagem real com íris e exposição de  $32 \mu\text{s}$  (a) e a imagem simulada (b).

Foi feita uma varredura de cinco pontos em  $x$ , com  $Y0$  fixo em  $2176,2 \mu\text{m}$ . O resultado é apresentado na figura a seguir:



(a)



(b)

Figura 16: Varredura com imagens simuladas para confrontação das técnicas com valores conhecidos.

Os coeficientes  $R^2$  para X0 foram superiores a 0.99999, com vantagem para a *momentos*, e exceto para a *jinc*, com apenas quatro nove. Para Y0, apenas a *momentos* apresentou certo grau de correlação, igual a 0.77. Os desvios são mostrados na Tabela 5, em que é possível notar que, à exceção da *jinc*, bastante afetada pelas aberrações que descaracterizam a função, os desvios são da ordem de apenas 1  $\mu\text{m}$ .

**Tabela 5:** Desvios médios em relação a ajuste linear para varredura com imagens simuladas.

Desvio Médio do Ajuste Linear		
	X0 ( $\mu\text{m}$ )	Y0 ( $\mu\text{m}$ )
Momentos	0,15	0,14
Binário	0,77	0,27
Contorno	0,71	1,52
Jinc	7,03	9,15

O raio médio calculado nas imagens foi 5,5% superior ao real, confirmando a tendência verificada no experimento, e a limitação do método *jinc*. Finalmente, para a verificação do que ocorre quando o padrão está próximo à borda, foi gerada uma imagem na posição (93, 2176.2). Os resultados são exibidos na Tabela 6, confirmando que apenas o método do contorno é capaz localizar o padrão dentro de um erro aceitável, neste caso, equivalente a um pixel.

**Tabela 6:** Desvio do centro calculado com imagem simulada na borda.

Desvio para Imagem na Borda		
	X0 (%)	Y0 (%)
Momentos	195,5	0,1
Binário	178,3	0,1
Contorno	4,7	0,2
Jinc	168,5	0,4

### 3. CONCLUSÕES

Seguindo a linha trabalho para o alinhamento de dispositivos do acelerador de partículas SPRing-8, este estudo vali-

do três técnicas de processamento de imagem: *momentos*, *binário* e *contorno*; para a localização espacial de elementos a partir de seus padrões de difração. Uma técnica com precisão menor que 5  $\mu\text{m}$  seria suficiente para atender as especificações de alinhamento entre magnetos do Projeto Sirius, que é de 30  $\mu\text{m}$  rms. O método chamado de *contorno* foi o que apresentou melhor desempenho quando o padrão analisado encontra-se nas bordas da imagem.

A expectativa sobre a quarta técnica de ajuste, com a função *jinc* não se concretizou. Ela é poderosa quando a imagem é muito próxima do padrão teórico e com o segundo máximo de intensidade apreciável, porém ela é lenta, mostrou-se muito limitada para imagens não saturadas, e também absolutamente sensível a distorções no padrão, ainda que com alguma simetria. Além disso, a intenção de utilizar o raio de Airy para uma possível medida longitudinal também se revelou impraticável. Caso os resultados com essa técnica tivessem sido melhores, seria conveniente a implementação de um algoritmo menos sensível a mínimos locais durante o procedimento de minimização, entretanto, isso não foi necessário.

Antes que o procedimento seja adotado efetivamente para o alinhamento de ímãs no projeto Sirius, é desejável a determinação de figuras finais para precisão e acurácia. Para isso, é conveniente a construção de uma bancada experimental mais robusta em um futuro próximo: térmica e mecanicamente mais estável; com estágios de translação com encoders, a fim de se obterem dados experimentais mais acurados; e com uma óptica mais refinada, ou seja, com laser mais potente, de cerca de 3.5 mW, como o utilizado no SPRing-8, além de lentes e expansores de feixe de alta qualidade, visando a uma fonte de luz mais uniforme e estável.

### 4. AGRADECIMENTOS

Clécio R. Bom gostaria de agradecer ao CNPq pelo apoio financeiro. Os autores agradecem ao LNLS pelo laboratório e pelos equipamentos cedidos para os estudos, e também ao Prof. Dr. Marcelo Portes de Albuquerque pelas discussões e pelo curso de Processamento de Sinais e Imagens, ministrado no programa de Mestrado Profissional em Instrumentação Científica do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).

- [1] Liu, L., Resende, X. R., Rodrigues, A. R. D., Sá, F. H., Westfahl, H., Sirius: A 5BA Low-Emitance Lattice with Superbends for the New Brazilian Synchrotron Light Source, *Synchrotron Radiation News*, 26:3, p. 34 - 38, 2013.
- [2] Escobar, H., Sirius: o maior projeto da ciência brasileira, O Estado de São Paulo - Política Científica/Tecnologia, São Paulo, 21 abr. 2013.
- [3] Rodrigues, A. R. D., *et al.*, Sirius Design Report, Campinas, SP - Brasil, 2013. Disponível em: <[http://lnls.cnpem.br/sirius/files/2013/02/SiriusDR\\_02\\_Jan-2013.pdf](http://lnls.cnpem.br/sirius/files/2013/02/SiriusDR_02_Jan-2013.pdf)>. Acesso em: 31/07/2013.

- [4] Wiedemann, H., Particle Accelerator Physics, 3<sup>rd</sup> ed., Springer, 2007.
- [5] Temnykh, A., Vibrating wire field-measuring technique, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Elsevier Science B. V., Vol. 399, p. 185 - 194, 1997.
- [6] Wolf, Z., A Vibrating Wire System for Quadrupole Fiducialization, *LCLS-TN-05-11*, Menlo Park, California, EUA, 2005. Disponível em: <<http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/technotes/lcls-tn-05-11.pdf>>. Acesso em: 31/07/2013.
- [7] Zhang, C., Matsui, S., Developing an Iris Diaphragm

- Laser Alignment System for SPRing-8 Storage Ring Magnets, *12th International Workshop on Accelerator Alignment*, Fermilab, Batavia, Illinois, EUA., 2012. Disponível em: <<https://indico.fnal.gov/getFile.py/access?contribId=39&sessionId=45&resId=0&materialId=paper&confId=4712>>. Acesso em: 31/07/2013.
- [8] Wolfram MathWorld, *Bessel Function Zeros*. Disponível em: <<http://mathworld.wolfram.com/BesselFunctionZeros.html>>. Acesso em: 31/07/2013.
- [9] Wolfram MathWorld, *Jinc Funtion*. Disponível em: <<http://mathworld.wolfram.com/JincFunction.html>>. Acesso em: 31/07/2013.
- [10] Zhang, J., Hu, J., *2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering*, IEEE Computer Society, p. 105 - 108, 2008. DOI 10.1109/CSSE.2008.206
- [11] Pratt, V., *Direct least-squares fitting of algebraic surfaces*, Computer Graphics, Vol. 21, p. 145 - 152, 1987.
- [12] Al-Sharadqah, A., Chernov, N., Error analysis for circle fitting algorithms, *Electronic Journal of Statistics*, Vol. 3, p. 886-911, 2009. DOI: 10.1214/09-EJS419
- [13] Chernov, N., *Circle Fit (Pratt Method)*, Matlab Central. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22643-circle-fit-pratt-method/content/CircleFitByPratt.m>>. Acesso em 31/07/13.
- [14] Draper, N.R., Smith, H., *Applied Regression Analysis*, Wiley-Interscienc, 1998.