

FONTES DE RADIAÇÃO SINCROTRÔNICA:
CARACTERÍSTICAS GERAIS E SISTEMA DE VÁCUO

Aldo Craievich

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, CNPq/CBPF

Rua Dr. Xavier Sigaud, 150

22290, Rio de Janeiro, RJ

RESUMO

Nos últimos anos os anéis de armazenamento de elétrons ou pósitrons, que eram até 1970 utilizados somente para experiências de física de altas energias, começaram a ser construídos em diversos países exclusivamente como fonte de radiação eletromagnética (radiação sincrotrônica). As fontes são em geral constituídas por injetor (acelerador linear ou microtron), "booster" (síncrotron), anel de armazenamento, inserções ("wigglers" e onduladores) e linhas de luz. O interesse por estas fontes deve-se à alta intensidade, largo espectro (do infra-vermelho aos raios-X), polarização e estrutura pulsada da radiação produzida. Para a obtenção do ultra alto vácuo, necessário para os anéis de armazenamento em funcionamento ($p=10^{-9}$ Torr), utilizam-se diversos procedimentos especiais. No Brasil o Laboratório Nacional de Radiação Síncrotron (LNRS) do CNPq elaborou um projeto conceitual de fonte de radiação sincrotrônica, cuja execução deverá começar pela construção dos protótipos dos diversos componentes.

Anéis de armazenamento, Radiação sincrotrônica.

1. INTRODUÇÃO

A radiação sincrotrônica (ou de síncrotron) é produzida por partículas com carga elétrica em movimento, descrevendo trajetória curva devido à ação de campo magnético estático^[1]. Radiações deste tipo são conhecidas desde tempos remotos. Por exemplo, a luz emitida pela nebulosa do Caranguejo, descoberta em

1054 A.C. pelos astrônomos chineses, é radiação sincrotrônica. Porém, a primeira observação de radiação deste tipo de origem terrestre foi feita por Elder, Pollock e Langmuir apenas em 1947, colocando uma janela transparente no síncrotron de 70 MeV da General Electric nos EEUU. Passaram mais 25 anos sem que se explorasse essa radiação, de características únicas, para aplicações específicas. Isto se deveu a que as fontes disponíveis (síncrotrons ou anéis de armazenamento de elétrons) foram construídas para estudos de colisões (por exemplo elétron-positron) exclusivamente, por físicos de altas energias. Nessas condições, qualquer pesquisador interessado no uso da radiação sincrotrônica, produzida por síncrotrons ou anéis de armazenamento, podia somente trabalhar em regime "parasita".

No início da década de setenta, aumentou o interesse dos físicos e químicos pelo uso da radiação sincrotrônica e, simultaneamente, os físicos de altas energias começaram a se desinteressar dos anéis de armazenamento existentes, por estarem se esgotando as possibilidades que os mesmos lhes ofereciam. Isto levou, naturalmente, ao uso desses equipamentos em forma "partilhada" por físicos de altas energias e usuários da radiação. Em 1976 foi construído no Japão o primeiro anel de armazenamento de 300 MeV dedicado exclusivamente à produção de radiação sincrotrônica. No presente, existem em funcionamento ou em construção cerca de 30 anéis de armazenamento no mundo (Estados Unidos, Inglaterra, França, Alemanha, Itália, URSS, Japão e China) nos quais utiliza-se a radiação sincrotrônica em regime "partilhado" ou "dedicado" para numerosas aplicações em Física, Química, Biologia, Ciência dos Materiais, etc. No Brasil, iniciou-se em 1981 o Projeto Radiação Síncrotron/CNPq, que conduziu à criação, em dezembro de 1984, do Laboratório Nacional de Radiação Síncrotron (LNRS) com os objetivos de projetar, construir e assegurar o funcionamento de um anel de armazenamento de elétrons dedicado à produção de radiação sincrotrônica para aplicações científicas e tecnológicas^[2].

2. DESCRIÇÃO DAS FONTES

Nas fontes de radiação sincrotrônica mais eficientes os

anéis de armazenamento tem o rol principal. Nele, os eletrons (ou positrons) circulam a velocidades relativistas em órbitas fechadas, produzindo radiação nas regiões curvas da trajetória. Um esquema de uma fonte de radiação sincrotrônica é representado na Fig. 1.

Em várias fontes já construídas, o injetor do sistema é composto por um acelerador linear que acelera os eletrons até energias da ordem de 100 MeV e por um sincrotron ou "booster" que produz uma elevação suplementar da energia dos eletrons, até atingir a energia de injeção no anel. Em algumas fontes recentemente construídas, o acelerador linear foi substituído por um microtron. O "booster" não é utilizado quando se dispõe de aceleradores lineares capazes de acelerar os eletrons até as energias de trabalho do anel. Em alguns dos anéis de armazenamento a injeção se faz a uma energia relativamente baixa, sendo acelerados neles os eletrons até atingir a energia de trabalho. Isto é possível às custas de certa perda de intensidade da corrente eletrônica final.

Os eletrons são conduzidos pelas linhas de transporte do injetor até o anel de armazenamento. As linhas são tubos, em alto vácuo, com imãs focalizadores apropriados.

Os eletrons penetram no anel de armazenamento através de um dispositivo magnético chamado septum. Este elemento força os eletrons a entrarem numa única órbita no interior do anel.

No anel de armazenamento propriamente dito (Fig. 2), os eletrons circulam dentro de uma câmara em ultra alto vácuo (10^{-10} Torr), em pacotes com seção da ordem de 1 mm^2 e comprimento da ordem do cm. O anel está composto por um número par de seções curvas nas quais estão situados os eletro-imãs dipolares (defletores), e por um número equivalente de seções retas, nas quais estão instalados elementos indispensáveis para o funcionamento do anel (cavidade de rádio-frequência e imãs quadrupolares e hexapolares), ou que permitem melhorar a sua qualidade ("wigglers" e onduladores).

Os imãs dipolares são responsáveis pela curvatura da trajetória dos eletrons. O número destes imãs depende do tipo

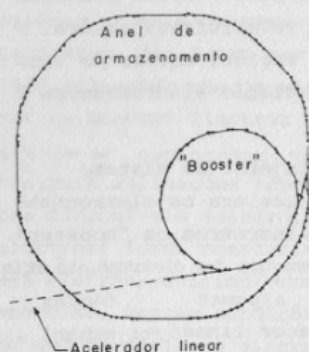


Fig. 1: Componentes do projeto de fonte de radiação sincrotrônica LNRS [4], indicando a trajetória dos elétrons e a posição dos elementos magnéticos. O acelerador linear se situa num plano inferior ao do anel.

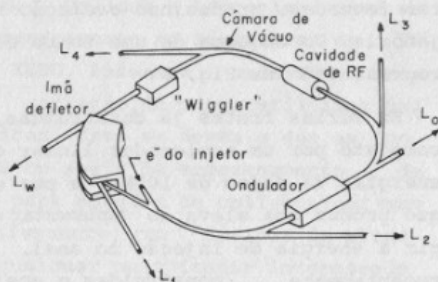


Fig. 2: Esquema de anel de armazenamento. Desenhou-se somente um ímã defletor para maior clareza. L_1 , L_w e L_0 são linhas de radiação emergentes dos ímãs dipolares, wiggler e ondulator, respectivamente.

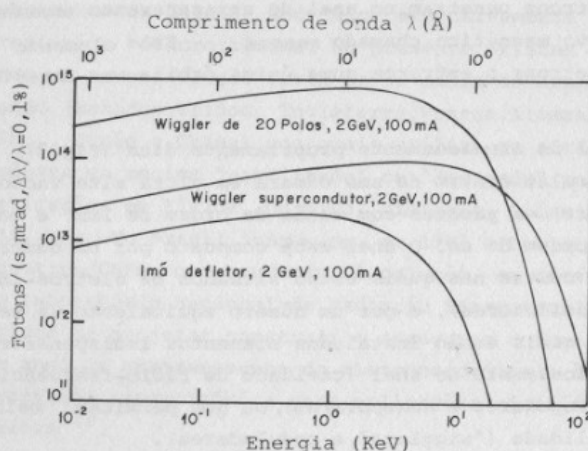


Fig. 3: Espectros correspondentes à fonte de radiação sincrotrônica projetada pelo LNRS [4].

de rede utilizada. Eles devem produzir um campo magnético es tático constante e homogêneo, para se conseguir uma órbita e letrônica estável.

Os imãs quadrupolares e hexapolares, situados nas se ções retas do anel, são utilizados para focalizar o fei xe eletrônico e reduzir as suas aberrações, respectivamente.

A cavidade de rádio-frequência é instalada numa das seções retas, sendo o seu objetivo fazer recuperar aos eletrons, (me- diante um campo elétrico alternado com frequência da ordem de 100MHz), a energia que perdem por radiação, mantendo-se assim o feixe eletrônico com energia aproximadamente constante. A cavidade de radio-frequência induz a formação de pacotes de eletrons. A frequência da cavidade é uma harmônica da frequên- cia de circulação dos eletrons no anel. Mediante calibrações apropriadas podem-se definir regimes de circulação de um ou vários pacotes de eletrons.

Nos primeiros anéis de armazenamento, a radiação utiliza- da provinha dos eletrons acelerados centripetamente pelos imãs defletores nas seções curvas da órbita. As seções retas eram minimizadas até as dimensões indispensáveis para alojar a cavidade de radio-frequência e os imãs qua- dri e hexapolares. Na geração mais recente de anéis a tendên cia é oposta, aumentando-se as seções retas o máximo possí- vel para possibilitar a inserção de acessórios especiais.

A radiação sincrotrônica tem espectro contínuo desde o in fravermelho até um valor mínimo de comprimento de onda λ_m , além do qual a intensidade é desprezível (Fig.3). Esse valor está relacionado com o campo magnético B e a energia E dos eletrons pela relação [1]:

$$\lambda_m [\text{\AA}] = \frac{4}{B [\text{Tesla}] E^2 [\text{GeV}^2]}$$

A utilização de radiação sincrotrônica em cristalografia requer a disponibilidade de intensidade apreciável no domí- nio dos raios X ($\lambda \approx 1 \text{\AA}$). Sendo o valor máximo de B atingí- vel pelos eletro-imãs dipolares, de aproximadamente 1,8 Tesla, necessita-se para se dispor de raios X, de um anel com ener- gia eletrônica superior a 1,5 GeV.

As dimensões dos anéis de armazenamento, e também o seu custo, aumentam com a energia. Por isso existem alguns projetos nos quais pretende-se obter raios X a partir de anéis de baixa energia ($E \approx 800$ MeV), adicionando-se nas seções retas dispositivos chamados "wigglers". Estes dispositivos são sequências de pares dipolares alternados com campos B_w . A utilização de imãs supercondutores possibilita se atingir campos B_w de até 6 Teslas. Isto faz que o λ_m da radiação produzida pelos eletrons, circulando nos wigglers, possa se deslocar para um valor inferior, se comparado ao λ_m da radiação produzida nos eletro-imãs dipolares. Por isso este tipo de wiggler é chamado "wave-shifter".

Existem, também, "wigglers" com imãs normais (não supercondutores). Neste caso eles não se comportam em geral como um "wave-shifter". A utilização de um número N elevado de polos (na prática algumas dezenas) produz um incremento da intensidade gerada pelo "wiggler", obtendo-se intensidades até N vezes superiores à intensidade de radiação produzida por um polo individual.

Os onduladores estão, também, constituídos por um conjunto N de imãs dipolares (que podem ser imãs permanentes) com campos fracos. Nestas condições, é possível se obter do ondulador radiação sincrotrônica com espectro discreto, com intensidades de até N^2 vezes a intensidade produzida por um polo individual.

Nos últimos projetos de anel armazenamento incluem-se numerosas e longas seções retas para possibilitar a instalação de um número elevado de "wigglers" e onduladores.

Isto parece indicar que nas novas fontes, a radiação útil será produzida apenas pelas diversas inserções nas seções retas do anel.

As características principais da radiação produzida pelos anéis de armazenamento são as seguintes [1]:

- a) Alta intensidade (superior em várias ordens de grandeza às de fontes convencionais);
- b) Espectro amplo e contínuo (do infravermelho até os raios X)

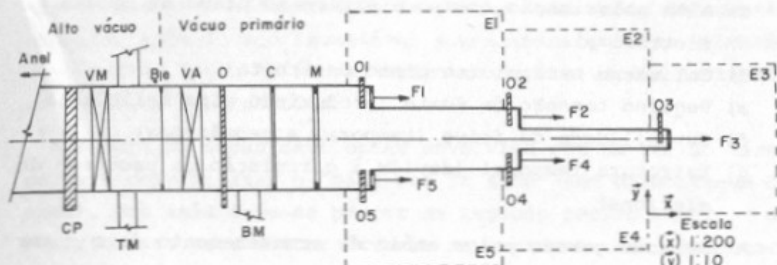


Fig. 4: Esquema de linha de radiação X em corte horizontal (Escala diferente segundo $\vec{x}$ e $\vec{y}$). CP: Anteparo de proteção da válvula manual. BI: Bomba iônica. TM: Bomba turbo-molecular. Be: Janela de berílio. VA: Válvula automática. O: Obturador principal. BM: Bomba mecânica. C: Colimador. M: Máscara para supressão de espalhamento. O1: Obturadores secundários. Ei: Estações de utilização da radiação sincrotrônica. Fi: Feixes emergentes nas estações experimentais.

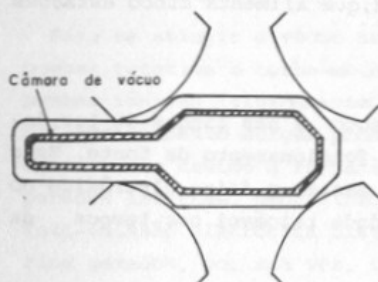


Fig. 5: Seção transversal da câmara de vácuo (perpendicular à direção do feixe eletrônico), na parte da seção reta ocupada por ímãs quadrupolares. O alargamento (parte esquerda) da câmara evita o impacto dos fótons na parede interior da câmara [3].



Fig. 6: Seção horizontal (no plano da órbita eletrônica) da câmara de vácuo, em setor ocupado por ímã defletor [3]. Mostra-se como a radiação sincrotrônica emerge do anel pela linha de luz ou incide num obstáculo absorvente ("crotch").

- c) Alta polarização (campo elétrico no plano da órbita eletrônica);
- d) Colimação natural (no plano da órbita)
- e) Pequeno tamanho de fonte (produzindo alta brilhância)
- f) Estabilidade do feixe (temporal e geométrica)
- g) Estrutura temporal (devida à circulação de pacotes de elétrons)

A radiação gerada pelos anéis de armazenamento deve ser transportada, através de guias apropriados ou linhas de luz, até as estações experimentais, onde é utilizada em técnicas de difração, espalhamento, absorção, fluorescência, foto-emissão, etc. As estações experimentais devem estar equipadas com a instrumentação necessária: monocromadores de cristal ou de rede, espelhos focalizantes, câmaras ou goniômetros, detectores e dispositivos de controle e de segurança. Monitores de intensidade e posição dos feixes de radiação são úteis para se controlar e, eventualmente, contribuir para se melhorar a estabilidade da órbita eletrônica. Na Fig. 4 representamos esquematicamente uma linha de raios X, que alimenta cinco estações experimentais.

3. SISTEMA DE VÁCUO

O vácuo, no anel de armazenamento e nas linhas de luz, deve atingir 10^{-10} Torr antes do funcionamento da fonte. Esta pressão é indispensável para se manter o feixe eletrônico no anel, após injeção, com intensidade razoável por tempos da ordem de dez horas.

O primeiro passo para se atingir o alto vácuo necessário na câmara é se escolher o material apropriado. No SSRL (Stanford) e NLS (Brookhaven) as câmaras foram feitas de alumínio (Fig. 5), porque este material permite a obtenção dos perfis necessários por simples extrusão. No LURE (França) utiliza-se o aço inoxidável. Apesar de se precisar de soldas para se obter os perfis necessários, o aço inoxidável oferece maior resistência mecânica e facilita a desgasagem. As soldas no aço não ocasionam problemas se elas são interiores para evitar vazamentos virtuais. O aspecto desfavorável do aço inoxidável é o seu maior custo.

Não há, na atualidade, consenso sobre o material mais

apropriado para a construção das câmaras de anéis de armazenamento. Além do aço inoxidável e do alumínio, outros materiais, como certas ligas de cobre, estão sendo atualmente testados em diversos laboratórios.

A câmara de vácuo deve estar envolvida com um tecido térmico para possibilitar o "bake-out in situ" (sem desmontagem do anel). Nos imãs deve-se prever um segundo tecido exterior de resfriamento, para evitar excessivo aquecimento dos elementos magnéticos.

A construção dos componentes da câmara, flanges e válvulas deve ser acompanhada pelas precauções usuais nas técnicas de ultra alto vácuo: supressão de elementos orgânicos (o-rings elásticos), limpeza química (sem ácidos), "bake-out" dos componentes, montagem em sala limpa e "bake-out" do conjunto após a montagem.

As temperaturas típicas de "bake-out" para câmaras de aço inoxidável são de 900°C para os componentes e 300°C para o sistema montado.

Para se atingir o vácuo necessário, precisam-se grupos de bombas rotativa e turbo-molecular e um número elevado de bombas iônicas (tipicamente acima de uma centena). Nos anéis de armazenamento surgem problemas específicos com a qualidade do vácuo devido à radiação sincrotrônica, que atinge as paredes internas, produzindo aquecimento, foto-desorção e foto-emissão eletrônica distribuídas. Os eletrons secundários gerados, por sua vez, também produzem desorção. Tudo isto representa um problema sério, que deve ser contornado mediante apropriada escolha do material da câmara, utilização de geometria que minimize a irradiação distribuída nas paredes e concentração das bombas iônicas em regiões de máxima desorção.

Os materiais devem ser testados quanto a suas propriedades de desorção quando irradiados com raios X, ultra-violeta, e eletrons. Estes testes devem ser realizados com o material que viria a ser realmente utilizado, já que a capacidade de desorção pode depender da concentração de impurezas, textura, etc.

Aos efeitos de minimizar os efeitos da desorção, as bombas iônicas devem ser instaladas o mais perto possível das regiões da câmara com máxima irradiação. Como no setor ocupado pelos ímãs dipolares não é possível se instalar bombas iônicas de alta velocidade, nos projetos mais recentes utiliza-se uma geometria de câmara que evita a incidência da radiação nas paredes interiores da mesma. Para isso, alarga-se, convenientemente, a câmara e se colocam em posições predeterminadas, na saída do ímã dipolar, obstáculos apropriados para absorver localmente a radiação que não é extraída do anel para sua utilização [3]. Os obstáculos, ou "crotchs" formam um dispositivo integrado composto por um cilindro de cobre (absorvente), resfriado por circulação de água, e uma bomba iônica de alta velocidade, que reduz a maior pressão local devida à intensa foto-desorção (Fig. 6).

Nas seções retas, também devem ser utilizadas câmaras de vácuo alargadas radialmente, para evitar o impacto da radiação produzida nas seções curvas sobre as paredes laterais. Absorventes localizados, associados com bombas iônicas de alta velocidade, também devem ser colocados nas seções retas (Fig. 5).

Sendo o anel formado por diversos componentes com geometria da câmara de vácuo diferente, as peças de união devem ter uma forma que assegure uma transição suave, a fim de minimizar as perdas por radiofrequência [3].

O anel e as linhas devem estar equipados com um elevado número de sensores para se conhecer a distribuição de pressão. Também devem se instalar válvulas que dividam o anel e as linhas em setores possíveis de serem isolados. Estes elementos facilitam a detecção de vazamentos e simplificam os trabalhos necessários de "bake-out" exterior quando necessário.

É interessante atingir nos anéis de armazenamento a menor pressão possível, a fim de reduzir o espalhamento dos elétrons pelos gases residuais e, conseqüentemente, incrementar a vida média do feixe eletrônico. Consegue-se com anéis de armazenamento de elétrons típicos, vidas médias da ordem de dez horas. Nos anéis de armazenamento de pósitrons percebeu-se que, para pressões equivalentes, obtém-se uma vida média maior. No anel de armazenamento DCI do laboratório LURE de Orsay

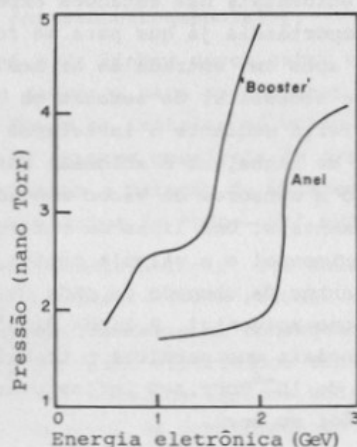
(2 GeV), os positrons tem uma vida média de aproximadamente 30 horas. O único aspecto desfavorável no uso de positrons é a necessidade de injetores com maior número de estágios, para possibilitar a produção e posterior aceleração dos mesmos.

As diversas linhas de luz, que permitem extrair a radiação e transportá-la até as estações de utilização, são de diversos tipos, dependendo da região do espectro a ser utilizada. Em caso de radiação visível pode-se utilizar uma janela de vidro, não requerendo o transporte da luz de precauções especiais. Em caso de radiação X, coloca-se, à saída do anel, uma janela de Be fina ($\sim 100\mu$). A linha de transporte é composta neste caso por um tubo de espessura apropriada para se evitar vazamentos perigosos de radiação nas salas de experiências. O tubo deve ser bombeado para reduzir a pressão e evitar assim, a diminuição por absorção pelo ar da intensidade da radiação a ser utilizada. Uma pressão atingível com bomba mecânica, da ordem de 10^{-2} Torr, é suficiente para esse fim.

O problema é mais crítico com as linhas de ultra-violeta porque não é possível, neste caso, se utilizar janelas de qualquer tipo, já que o feixe seria proibitivamente absorvido. Por isso, as estações experimentais de ultra violeta se comunicam diretamente com o anel. Neste tipo de linhas é necessária a instalação de sistemas de segurança, que protejam o anel contra eventuais vazamentos acidentais nas estações experimentais. Isto é de capital importância já que para se recuperar um anel de armazenamento após uma entrada de ar, mediante desgasagem "in situ", pode se necessitar de semanas ou até meses. A proteção do anel é feita mediante a instalação de uma válvula rápida no início da linha, que é acionada automaticamente por um sistema ligado a sensores de vácuo montados em cada uma das estações experimentais. Uma linha de retardo acústica, entre a estação experimental e a válvula rápida, garante o total fechamento desta antes da chegada da onda de choque associada a uma quebra de vácuo acidental. A linha dispõe, também, de bombas iônicas diferenciais que permitem o trabalho nas estações a pressões da ordem de 10^{-6} Torr, sem influenciar o vácuo de 10^{-9} Torr (com radiação) no anel.

TABELA 1: Características do Ante-Projeto LNRS

Parâmetros:	Anel	Booster	Unidade
Energia dos eletrons (E)	2	2	GeV
Corrente do feixe (I)	100	50	mA
Circunferência	205,86	92,64	m
Raio dos imãs defletores (B)	6,366	4,584	m
Campo nos imãs defletores	1,04	1,453	T
Número de imãs dipolares	80	36	
Número de imãs quadripolares	120	42	
Número de imãs hexapolares	64	36	
Potência total irradiada	22,2	15,4	Kw
Frequência do sistema RF	349,5	349,5	MHz
Tempo de vida dos eletrons (total)	23	35,3	h
<u>Sistema de Vácuo:</u>			
Pressão média de projeto	2,9	4,9	nTorr
Potência média dissipada	0,28	0,166	Kw/m
Eficiência de electro-desorção	10^{-5}	10^{-5}	mol/e ⁻
Número de setores de vácuo	8	3	
Velocidade de bombeamento	8940	4770	ℓ/s
Número de bombas iônicas	168	90	
Número de bombas turbomoleculares	8	3	
Material	Al	Al	
Tempo de vida devido a gas residual	61	35,3	h



Pressões estimadas no anel
e no "booster" em função
da energia dos eletrons
(câmara de alumínio).

5. PROJETO BRASILEIRO DE ANEL DE ARMAZENAMENTO

Um projeto conceitual de fonte de radiação sincrotrônica realizado pelo LNRS foi concluído em abril de 1985^[4], prevendo um sistema composto por injetor acelerador linear, "booster", anel de armazenamento e duas linhas de luz (raios X e ultravioleta) com várias estações experimentais associadas a cada uma delas. As características gerais do anel e do sistema de vácuo em particular estão resumidas na Tabela 1.

É intenção do LNRS proceder à construção no Brasil, da maior fração possível de componentes da fonte projetada. Começar-se-á pela construção de protótipos de ímãs dipolares, quadrupolares e hexapolares e bombas iônicas, com as suas respectivas fontes. A construção do anel propriamente dito (câmara de vácuo), precisará de estudos prévios de foto-desorção e eletro-desorção de diversos materiais disponíveis no Brasil. O injetor está sendo projetado pelo grupo do Acelerador Linear do Instituto de Física da USP e o "wiggler" supercondutor pela Fundação de Tecnologia Industrial (Lorena). Vários grupos de pesquisa de diversas Universidades manifestaram interesse pelo desenvolvimento da instrumentação necessária (detetores, monocromadores, etc). A contribuição de grupos com experiência já adquirida será indispensável para se conseguir dispor da fonte de radiação planejada no prazo estimado de seis anos.

5. BIBLIOGRAFIA

1. H. Winnick and S. Doniach, "Synchrotron Radiation Research", Plenum, New York (1980)
D. E. Eatsman and Y. Farge, Ed. "Handbook on Synchrotron Radiation", North Holland, Amsterdam (1983).
2. R. Lobo e A. Craievich, Ed. "Técnicas e Aplicações da Radiação Sincrotron", CBPF/PRS-008 (1983).
3. J. Bijleveld "Geometry of the vacuum envelope", ESRP-IRM 47 (1984).
4. A. R. Rodrigues, S. Zilio, L. Lin e H. Tolentino, "Anteprojeto de anel de armazenamento do LNRS", a ser publicado na série LNRS (1985).