

## PROJETO LINAC - ESTÁGIO ATUAL

Nelson Carlin Filho  
Instituto de Física da Universidade de São Paulo  
Laboratório Pelletron - C.P. 20516 - 01498 - São Paulo, SP

### 1. Considerações Iniciais

Desde 1972, com a instalação do acelerador Pelletron, vem-se desenvolvendo um programa de pesquisa concentrado na física de ions pesados dando-se ênfase ao estudo de mecanismo de reações, estrutura nuclear e física nuclear aplicada. O máximo potencial atingido pelo acelerador Pelletron acaba por colocar certas limitações ao programa de pesquisa, como por exemplo restringir a variedade de sistemas que podem ser estudados devido às barreiras Coulombianas e os mecanismos a serem observados.

As limitações em questão, aliadas à experiência adquirida em desenvolvimento de aceleradores, levaram ao estabelecimento de uma proposta para expansão das instalações no sentido de dinamizar o programa de pesquisa, tornando-o mais competitivo. Levando-se em consideração fatores como a quantidade de pessoal técnico e científico e capital a ser investido, achamos que uma solução viável seria a construção de um acelerador ou sistema de aceleradores capaz de fornecer feixes de diversas massas e energias até 20 MeV/A.

Considerando-se a opção de um único acelerador, analisaram-se duas configurações, sendo uma um acelerador eletrostático de 25 MV e outra um acelerador eletrostático de 12 MV, ambos compatíveis com as dimensões atuais da torre do edifício Pelletron. No primeiro caso, o feixe seria injetado na base do tanque, acelerado até o terminal (onde é feita a troca de carga), defletido de  $180^\circ$  e novamente acelerado no sentido inverso, saindo na base do tanque. A partir daí o feixe seria então conduzido às áreas experimentais da mesma maneira que atualmente. No segundo caso, a energia seria aumentada de 50% em relação ao estágio atual e com um terminal de maiores dimensões seria possível a instalação de um seletor de estados de carga, melhorando portanto a qualidade e intensidade do feixe.

O tipo de solução descrito acima satisfaria grande parte dos requisitos que um razoável programa de expansão requer,

entre os quais, características que permitam que o feixe apresente qualidades semelhantes às atuais e compatibilidade com os recursos humanos existentes.

Por outro lado, a opção por um sistema do tipo descrito traria o problema de um custo relativamente elevado, aliado a uma falta de flexibilidade para expansões futuras a baixo custo. Além disso, uma solução desta categoria levaria a uma inevitável paralisação do programa de pesquisa por um período que poderia chegar a dois anos. Uma solução que evitaria este tipo de problema seria a instalação de um segundo acelerador, utilizando-se o atual Pelletron como um injetor.

Ao considerar-se a instalação de um segundo acelerador, as possibilidades apontaram para um Ciclotron ou um acelerador linear, sistemas já em utilização em alguns laboratórios. Na maioria dos casos as máquinas operavam em temperatura ambiente, acarretando um grande consumo de energia e sistema de rádio-freqüência de grande potência. Entretanto, já estavam em franco desenvolvimento máquinas supercondutoras, como por exemplo o Ciclotron K-500 na Michigan State University e o acelerador linear ATLAS no Argonne National Laboratory. Sendo assim, levando-se em conta os requisitos estabelecidos, decidiu-se optar por um acelerador linear supercondutor, em particular semelhante ao já existente em Argonne. Esta opção permite que se atinja as energias desejadas a um custo moderado e facilita futuras expansões.

Feita a escolha, estabeleceu-se então contato com o Argonne National Laboratory dando-se início aos entendimentos para a construção de parte dos ressoadores necessários para a concretização do projeto, bem como a um intercâmbio onde físicos e engenheiros serão enviados a Argonne com a função de obter informações que nos permitam auto-suficiência.

Na figura 1 apresentamos um esquema simplificado mostrando o acelerador Pelletron atual e dois dos seis criostatos que comporão o projeto. Para se obterem as características adequadas do feixe a ser injetado no acelerador linear (LINAC), alguns elementos devem ser incorporados à atual configuração do acelerador Pelletron. Tais elementos encontram-se indicados na figura e serão considerados mais adiante

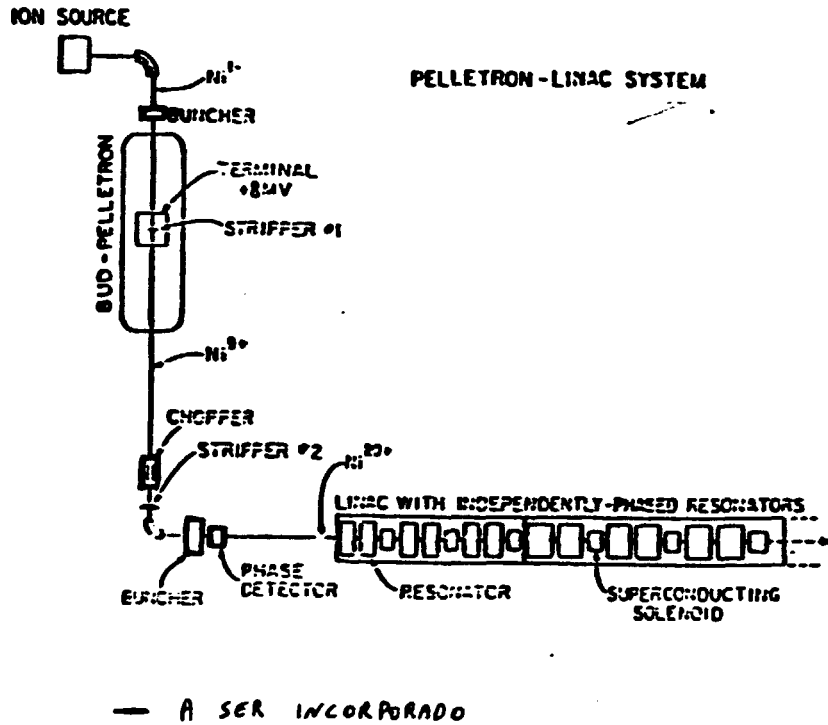


Fig. 1

Na figura 2 mostra-se a configuração do que será o andar inferior do novo prédio a ser construído para alojar as instalações referentes ao LINAC. Na figura estão destacadas a área designada à instalação dos criostatos, criogenia, área experimental e sala para tomada de dados. A parte de controle do novo acelerador será alojada na sala já utilizada para controle do Pelletron.

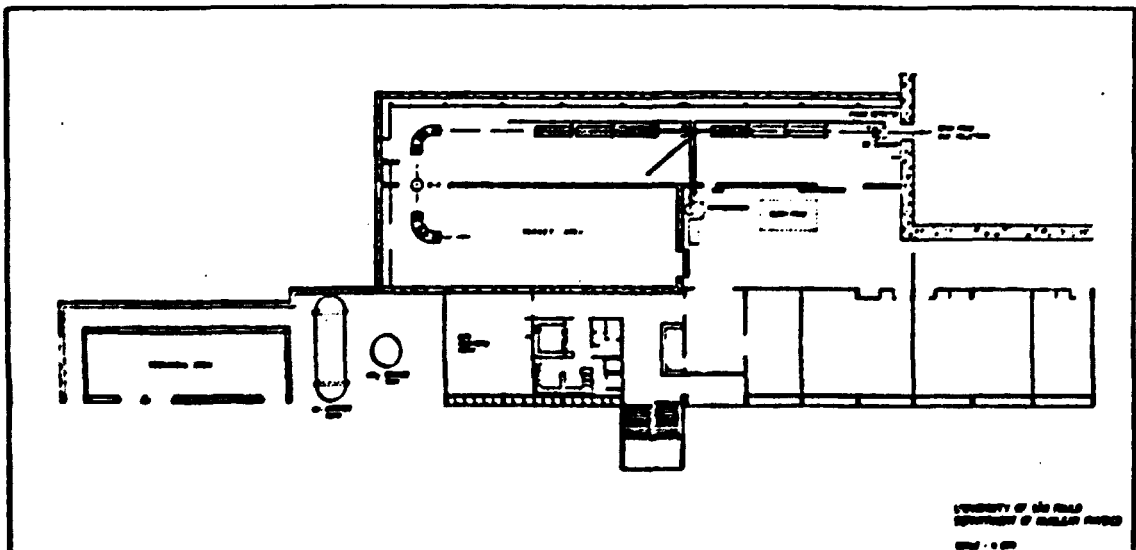


Fig. 2

## 2. Desenvolvimento

### 2.1. Estruturas Aceleradoras

No que tange ao LINAC propriamente dito, a parte mais importante é a estrutura aceleradora. No caso em questão, esta consiste de um ressoador do tipo split-ring. Este tipo de ressoador foi inicialmente desenvolvido no Cal-Tech utilizando chumbo depositado sobre cobre como supercondutor. No desenho dos ressoadores de Argonne, os quais serão por nós adotados, os braços indutivos são dobrados, de forma a colocar os tubos de drift concêntricos com o corpo do ressoador (figura 3) o que tornou

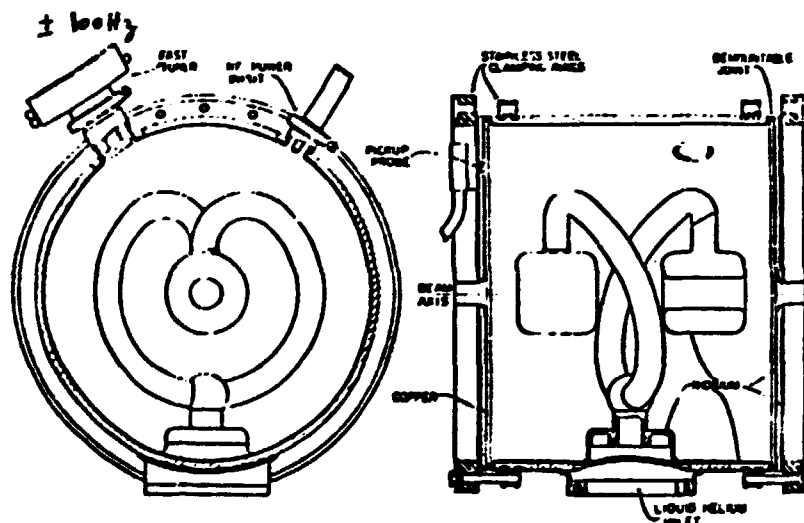


Fig. 3

possível atingir a frequência desejada de 96 Mhz com um diâmetro relativamente pequeno para o corpo ( $\approx 40$  cm). O material supercondutor a ser utilizado neste caso é o nióbio, que de forma geral é melhor supercondutor que o chumbo (resistividade residual cerca de cinco vezes menor para nióbio e temperaturas críticas de 9,2 K para nióbio e 7,2 K para chumbo), além de ser disponível em abundância no Brasil. Este tipo de cavidade possui um valor de Q bem elevado, da ordem de  $10^9$  e dissipa aproximadamente 4 Watts e os campos axiais aceleradores produzidos são da ordem de 3 MV/m. O campo acelerador é definido como o ganho em energia por estado de carga

dividido pelo comprimento efetivo do ressoador calculado para a velocidade ótima do ion.

Uma característica importante do sistema LINAC será o controle independente de fase para os ressoadores, de forma que um eventual problema em um dos componentes não afetaria o desempenho do acelerador de forma drástica.

A escolha da frequência de operação na faixa dos 100 Mhz reside no fato de se manterem os efeitos de tempo de trânsito os menores possíveis para os ions mais lentos. Além disso, as frequências menores facilitam o trabalho de agrupamento do feixe (bunching) e requerem um tamanho maior para os ressoadores, fornecendo então um maior ganho em energia por unidade. Entretanto, um cuidado deve ser tomado, pois uma diminuição maior na frequência tornaria os ressoadores muito grandes, o que traria problemas quanto à construção e a grande quantidade de energia de rádio-frequência armazenada.

Neste ponto é conveniente definirmos o fator de tempo de trânsito, que é uma grandeza importante por estar presente em praticamente todos os cálculos referentes a ressoadores e transporte de feixe. É importante levar-se em conta o tempo de trânsito quando o tempo para percorrer um gap acelerador é comparável ao período da rádio-frequência.

Para simplificar, se assumirmos um campo axial da forma

$$E_z = \frac{V}{D} \cos \omega t \quad (1),$$

o fator de tempo de trânsito  $F$  é então dado por:

$$F = \frac{\delta c}{\delta c_{\bullet}} \quad (2)$$

onde  $\delta c$  é a modulação em energia quando o efeito do tempo de trânsito é levado em conta e  $\delta c_{\bullet}$  é a modulação quando o efeito é desprezível. Neste caso teríamos então para um gap de comprimento  $D$ :

$$\delta c = \int_0^D q \vec{E}_z \cdot d\vec{z} \quad (3)$$

$$\delta c_{\bullet} = qV_{\bullet} \cos \omega t \quad (4)$$

O ganho em energia seria então descrito por:

$$\Delta E = q \bar{e}_z L F \cos \theta \quad (5)$$

sendo  $q$  a carga do íon,  $\bar{e}_z$  o campo acelerador médio sobre o comprimento  $L$  do ressoador e  $\theta$  seria uma fase medida com relação ao pico da curva de aceleração. Tendo em vista este efeito, podemos verificar por uma análise da figura 4, que mostra o fator de tempo de trânsito como função de  $\beta$ , que o pequeno número de gaps, em nosso caso três, permite aceleração com boa eficiência em um intervalo largo de velocidades.

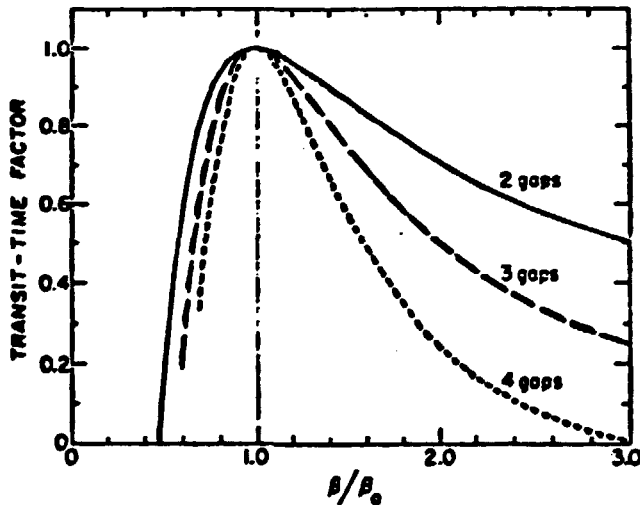


Fig. 4

Para a construção de nossas cavidades, dois valores de  $\beta$  foram escolhidos para comporem os dois primeiros criostatos, sendo  $\beta_1 = 0.06$  e  $\beta_2 = 0.105$ . No que se refere à primeira fase, teremos catorze ressoadores construídos nas oficinas de Argonne, devendo estar prontos em dois anos e meio ou três anos, sendo um utilizado como buncher na entrada do LINAC. O primeiro criostato será composto por três ressoadores com  $\beta_1$  e quatro com  $\beta_2$  e o segundo com seis ressoadores de  $\beta_2$ . Na figura 5 temos um gráfico de energia por nucleon como função da massa do íon a ser acelerado para a situação atual somente com o Pelletron e para duas configu-

rações para dois e três criostatos (assumindo utilização de um segundo stripper). A partir dos resultados, podemos então

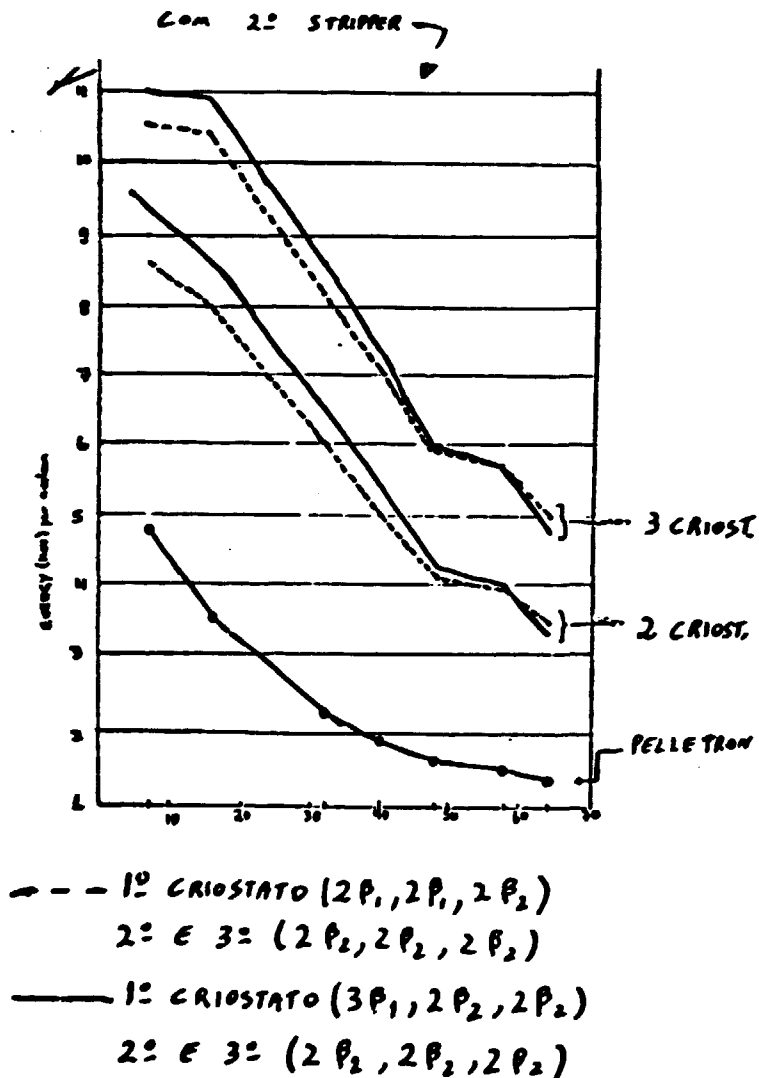


Fig. 5

verificar a razão da escolha da configuração dos criostato como a descrita acima. Na figura 6 temos para ressoadores de vários valores de  $\beta$ , o fator de tempo de trânsito como função da energia do projétil em MeV/nucleon e podemos então notar que para o intervalo de massas por nós escolhido, ou seja, acelerar ions até massa da ordem de 60 para esta fase inicial, a escolha de  $\beta_2 = 0.105$  permite uma eficiência de aceleração, no pior dos casos, da ordem de 80%.

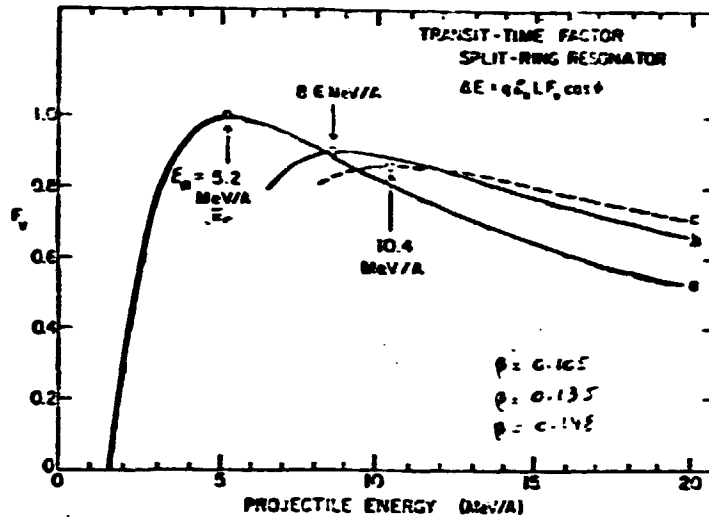


Fig. 6

No tocante aos ressoadores restantes para complementação do projeto, os componentes do terceiro criostato, ainda iguais aos de Argonne, deverão ser construídos no Brasil e para tal já existe um intercâmbio com o IPEN/COPESP em São Paulo. Quanto aos outros ressoadores, estes também devem ser construídos aqui, mas as características podem ser alteradas e a decisão quanto a isto não foi ainda tomada.

## 2.2. Criostatos e Criogenia

A idéia quanto à construção dos criostatos é de se utilizar tecnologia nacional. Já existe uma equipe em Argonne cuidando do projeto dos criostatos para o LINAC de São Paulo. De forma geral, os criostatos são unidades modulares de mesmo tamanho. Um criostato básico é um tanque de vácuo de aproximadamente 1 m de diâmetro, com um isolante refrigerado por nitrogênio líquido associado ao mesmo. Dentro do tanque estão todos os componentes necessários para suprir as necessidades elétricas e criogênicas dos ressoadores. Na figura 7 mostramos como é instalado um ressoador no interior do criostato a ele associado.



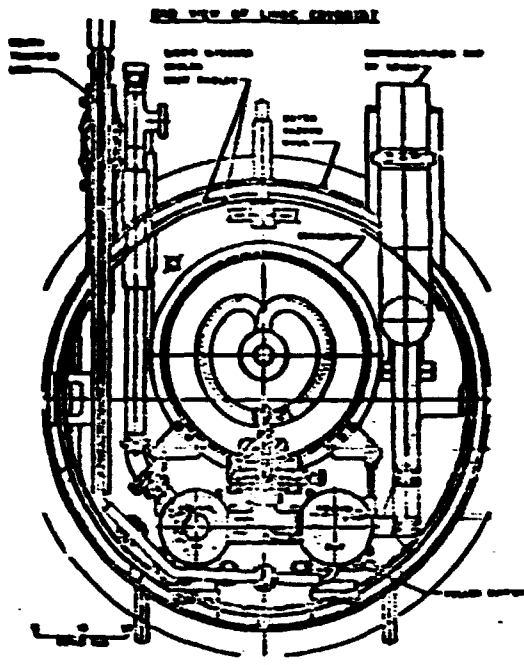
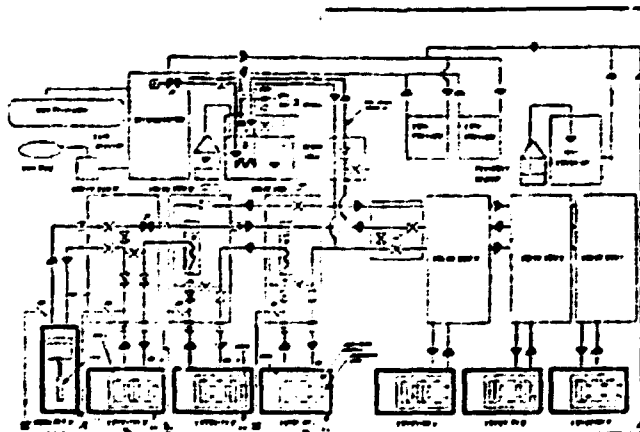


Fig. 7

O sistema criogênico para distribuição de hélio para o LINAC já está projetado e considera principalmente como cargas geradoras de calor a dissipação da rádio-freqüência (assumindo-se 4 Watts por ressoador) nos ressoadores e a perda de calor nos criostatos e linhas de distribuição.

Para o uso de três criostatos, um refrigerador com somente um dos dois compressores disponíveis será necessário. A capacidade do sistema completo é de 300 Watts. A idéia básica do sistema é que os compressores forneçam pressão suficiente para manter um fluxo de hélio contínuo no sistema de distribuição, ressoadores e solenóides supercondutores. A figura 8 mostra um esquema do sistema de refrigeração.



### 2.3. Ótica

Conforme mencionamos no início, certos elementos devem ser incorporados à atual configuração do acelerador Pelletron, de modo a fornecer as condições ideais de feixe para injeção no LINAC. Além disso, um novo trecho de canalização em  $0^\circ$  deve ser construído indo da saída do atual switching magnet até a entrada do LINAC, perfazendo um comprimento da ordem de 30 m. Quando se considera o transporte de feixe, deve-se ter em mente as emitâncias transversal e longitudinal do mesmo. No que se refere à emitância transversal, os elementos usuais, especialmente dubletos e tripletos de quadrupolo dão conta de levar o feixe com as condições ideais à entrada do novo acelerador. Já a parte ligada à emitância longitudinal é mais complicada. Isto deve-se ao fato de que é necessário um feixe pulsado para injeção no LINAC, em fase com os ressoadores. Para tal, vai ser instalado um sistema de dois bunchers sendo que o primeiro fornece pacotes agrupados com  $\Delta t = 1$  ns com eficiência de  $\approx 70\%$  e o segundo nos dá pacotes com  $\Delta t = 100$  ps que é o valor para injeção na máquina. Um valor típico para a emitância longitudinal é de 10-100 KeV ns, dependendo do íon em questão e características do buncher e stripper. Na figura 9 mostra-se o perfil do feixe calculado para a linha de  $0^\circ$ , com as posições dos elementos óticos buncher e chopper a serem utilizados.

$$x_{\min} = 0.49 \text{ mm} \quad x_{\max} = 15.06 \text{ mm} \quad y_{\min} = 0.20 \text{ mm} \quad y_{\max} = 30.34$$

$$z_{\min} = 31.955 \text{ n} \quad z_{\max} = 63.954$$

A ser instalado

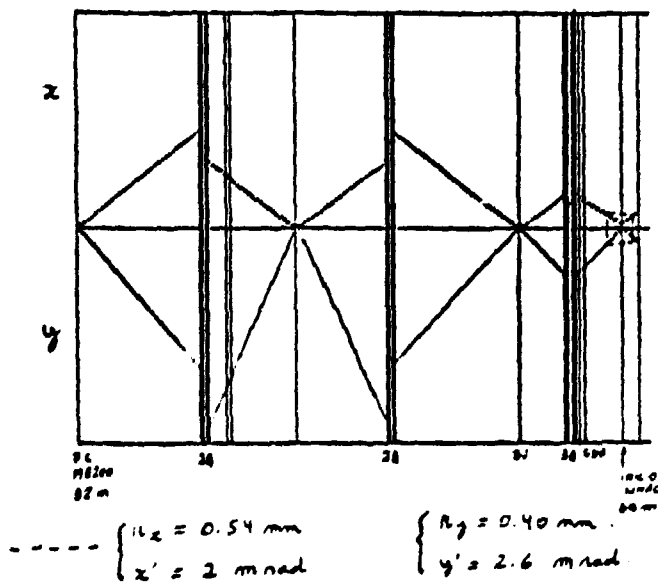


Fig. 9

Na figura 10 mostra-se a emitância longitudinal antes do buncher superconductor, de forma que neste ponto o feixe (com características determinadas pelo pré-buncher) tem boa definição em

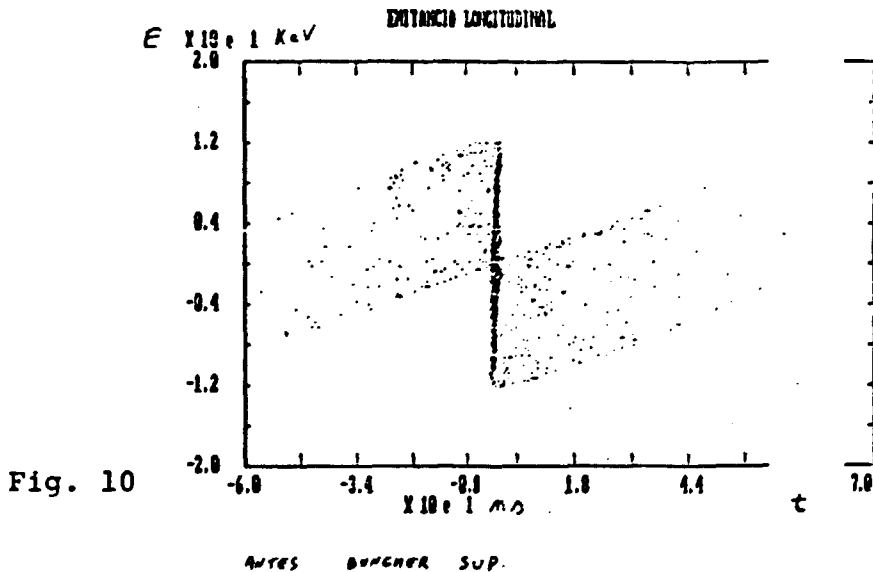


Fig. 10

energia ( $\approx 20 \text{ KeV}$ ) e cerca de 1 ns para  $\Delta t$ . Na figura 11 temos a emitância longitudinal após o buncher superconductor ( $f = 96 \text{ Mhz}$  e  $V = 150 \text{ KV}$  comparada a 12 Mhz do pré-buncher) e podemos notar a resolução em tempo  $\Delta t \approx 100 \text{ ps}$  em oposição a um valor de  $\Delta E$  da ordem de 2 MeV. Sendo assim, notamos a necessidade da existência, após o processo de aceleração, de um sistema que nos permita desagrupar o feixe para recuperar definição em energia se um dado experimento assim o exigir.

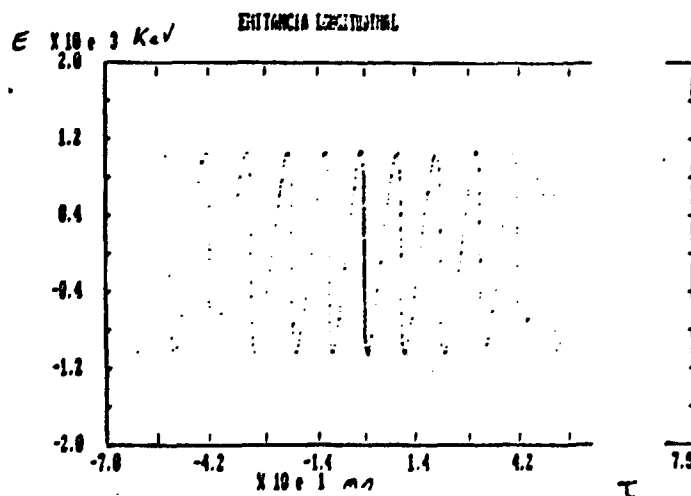


Fig. 11

Quanto ao transporte de feixe no interior do LINAC, estão no momento sendo iniciados os cálculos.

## 2.4. Elementos a serem incorporados ao Pelletron

Conforme citamos, um sistema de dois bunchers vai ser instalado, sendo um deles supercondutor, já em construção em Argonne. O pré-buncher está sendo construído no Pelletron e tem no momento a parte mecânica concluída, restando sua instalação e alinhamento no local a ele designado na parte superior do tanque contendo o tubo acelerador. Este pré-buncher vai funcionar numa frequência de 12 Mhz para o fundamental, sendo composto de três harmônicos com  $V_0 = 2.4$  KV,  $V_1 = 0.74$  KV e  $V_2 = 0.16$  KV. A figura 12 apresenta um esquema simplificado do pré-buncher, onde se deve destacar os cones que tem como função moldar o campo de modo a diminuir o fator de tempo de trânsito na região fora do gap.

PRÉ-BUNCHER

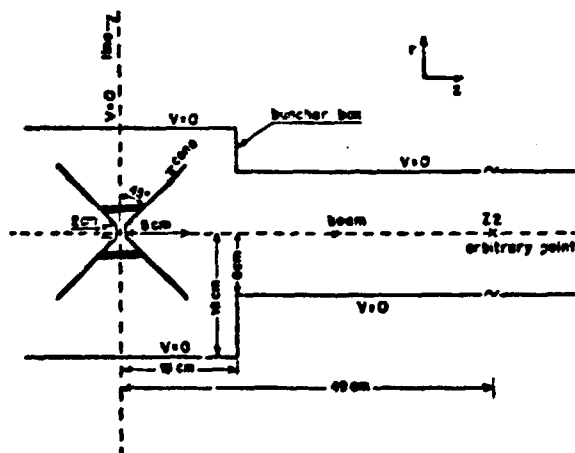
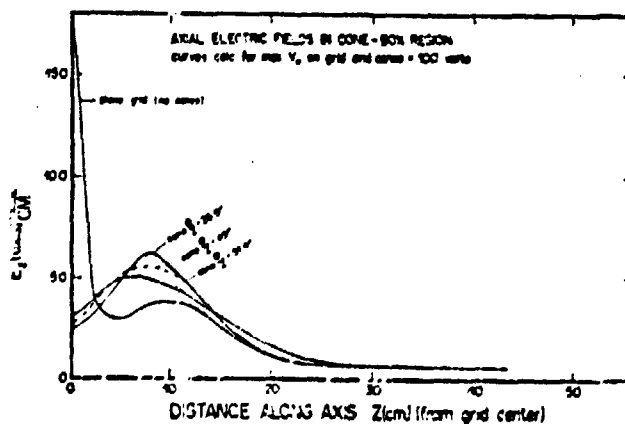


Fig. 12

Na figura 13 mostram-se cálculos de campo para vários ângulos de abertura dos cones em comparação com a configuração sem uso de cones.



A idéia quanto à rádio-freqüência tanto para o pré-buncher quanto para os demais elementos é inicialmente comprar a eletrônica para aprender e posteriormente iniciar produção no Brasil.

Outro elemento a ser instalado e em início de construção é um detector de fase, o qual dará conta do controle dinâmico da fase de rádio-freqüência para o pré-buncher, garantindo assim que os pulsos cheguem ao buncher supercondutor no tempo correto. Este detector consiste de uma cavidade ressonante operada à temperatura ambiente e excitada pelos pacotes de fusão os quais realizam um trabalho sobre o campo de rádio-freqüência. A estrutura de load é feita de cobre e tem forma de espiral contendo um tupo de drift. Na figura 14 mostra-se um esquema simplificado do detector de fase.

DETECTOR DE FASE

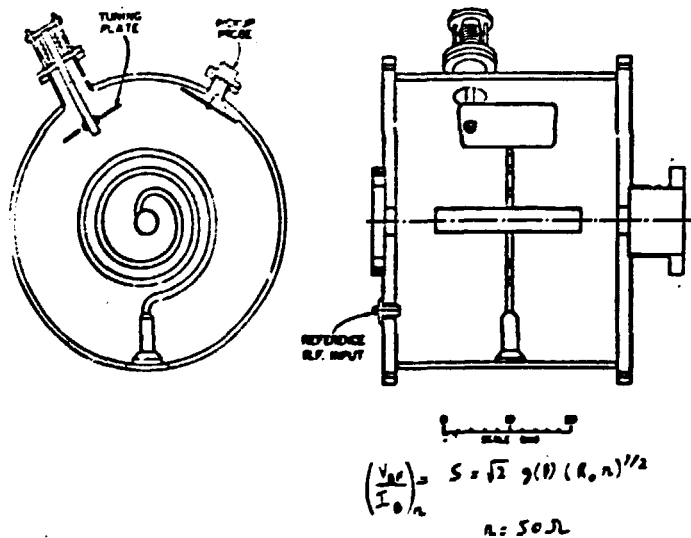


Fig. 14

Este detector deve operar numa freqüência de 48 Mhz.

Resta ainda a construção de um chopper o qual vai ser operado a  $V = 4 \text{ KV}$  e  $f = 6 \text{ Mhz}$  e que consiste de um sistema de placas paralelas de 30 cm de comprimento, distanciadas de 1 cm.

### 3. Pessoal

No que se refere ao intercâmbio com Argonne, acaba de retornar, depois de um período de doze meses, um engenheiro que se especializou na parte de rádio-frequência e está para retornar, depois de um período de 18 meses, outro engenheiro ligado à parte de criogenia e que projetou o sistema de refrigeração a ser por nós utilizado. Estão indo em breve para o mesmo local um físico que vai se especializar em cavidades e um físico ligado à computação, para tratar em conjunto com o pessoal de Argonne de um sistema para controle do acelerador, já que é de interesse também de Argonne modernizar o sistema atual. Além disso, no Brasil, conforme já mencionado, existe intercâmbio com a COPESP no sentido de dominar a tecnologia da construção de ressoadores.

### 4. Área Experimental

Em discussões recentes foi rediscutida a configuração do que seria a atual área experimental de acordo com a figura 2. Esta área teria dimensões aproximadas de 10x30m e aparentemente seria necessária uma ampliação da mesma para se alojar as linhas de feixe de forma mais adequada. A decisão sobre a ampliação depende de discussões com engenheiros e arquitetos e ainda não se tem uma definição. De acordo com as discussões, é de consenso que devemos ter um espectrógrafo, uma linha para raios gama, uma câmara grande multi-propósito, possibilidade para espectrômetro de recuo e uma ou duas linhas a serem definidas.

### REFERÊNCIAS

1. O. Sala e E.F. Pessoa. Preprint IFUSP/P-762, 1988.
2. ATLAS Manual.
3. A. Schempp e H. Klein. Nucl. Instr. and Meth. 135 (1976) 409.
4. F.J. Lynch et al.. Nucl. Instr. and Meth. 159 (1979) 245.
5. E.F. Pessoa, R.A. Douglas e O. Sala. Preprint IFUSP/P-824, 1990.