

CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE BOMBA IÔNICA DE ALTO DESEMPENHO NA REGIÃO DE ULTRA-ALTO VÁCUO

C. Santos, R. Landers, C.P. Pinelli e
C.A.R.P. Baptista*

Instituto de Física "Gleb Wataghin", UNICAMP,
C.P. 6165, 13081, Campinas, SP.

*Laboratório Nacional de Luz Síncrotron,
C.P. 6192, 13085, Campinas, SP.

RESUMO:

A curva típica de velocidade de bombeamento de bombas iônicas por "sputtering" apresenta um máximo entre $(10^{-5}$ e $10^{-6})$ mbar. A pressões na região de 10^{-9} mbar a velocidade de cai para cerca de 45% do seu valor máximo. Essa característica das bombas iônicas é bastante inconveniente pois significa uma grande redução na eficiência de bombeamento na região de trabalho (10^{-9} - 10^{-10}) mbar. Neste artigo é descrito um protótipo de alto desempenho na região de ultra-alto vácuo. A velocidade máxima é de 70 l/s (N_2 seco), a 10^{-6} mbar, e se reduz a 81% deste valor a 10^{-9} mbar; a pressão final é de $2,4 \times 10^{-10}$ mbar. São descritos, em detalhe, o equipamento e o procedimento utilizados na avaliação das características do protótipo.

1. INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de equipamentos e componentes de ultra-alto vácuo, no Brasil, para uso geral em universidades e institutos de pesquisa, em aceleradores de partículas (Laboratório Nacional de Luz Síncrotron - LNLS, Instituto de Estudos Avançados - CTA e outros), na microeletrônica, na pesquisa e na indústria nuclear, nas câmaras de simulação espacial, no processamento de tubos eletrônicos, em câmaras de evaporação e em muitas outras aplicações, levou o Laboratório de Vácuo do Instituto de Física "Gleb Wataghin" - LVAC, a iniciar um amplo projeto de fabricação e desenvolvimento de protótipos. Em passado recente foram desenvolvidas diversas válvulas, tipo pêndulo e gaveta, com acionamento manual e pneumático, bombas de difusão, criostatos e trocadores de calor, etc. Atualmente o LVAC desenvolve bombas iônicas por "sputtering". Este tipo de bomba produz e mantém vácuo ultra-limpo até pressões da ordem de $(10^{-10}$ a $10^{-11})$ mbar. O LNLS, em implantação no Polo Tecnológico de Campinas, usará bombas iônicas no acelerador linear, nos anéis síncrotron injetor e de armazenamento e nas linhas de luz. Como parte de seu objetivo de promover o desenvolvimento e fabricação dos equipamentos ne-

cessários ao seu projeto, o LNLS vem colaborando com o LVAC no desenvolvimento de bombas iônicas realizando a avaliação e a caracterização dos protótipos fabricados.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O modelo básico da bomba iônica por "sputtering" deriva da célula Penning ou Philips [1,2]. A célula consiste de duas placas paralelas - catodos, com um cilindro - anodo colocado entre elas e tendo o seu eixo normal ao plano das placas (Fig. 1). Um potencial de alguns kV é aplicado entre o anodo e os catodos e um campo magnético de várias centenas de Gauss é aplicado ao longo do eixo do anodo. Os elétrons produzidos por ionização, ou por bombardeamento iônico dos catodos, são forçados a oscilar entre os catodos em órbitas espirais o que resulta em altas probabilidades de ionização das moléculas e átomos do gás a ser bombeado; esta descarga de catodo frio pode ser mantida até pressões da ordem de 10^{-11} mbar. A ação de bombeamento da célula Penning foi aumentada usando-se catodos de materiais quimicamente ativos, tais como Ti [3]; a velocidade de bombeamento obtida era da ordem de centésimos de litros/segundo e a pressão final 5×10^{-7} mbar. Para se obter velocidades de bombeamento maiores e pressões finais mais baixas, Hall [4] combinou várias células unitárias em paralelo (Fig. 2). Foram obtidas velocidades de 10 l/s para o ar, a 10^{-7} mbar, e pressões finais de $\sim 3 \times 10^{-10}$ mbar. A bomba desenvolvida por Hall é a forma básica para a maioria das bombas iônicas por "sputtering".

Vários mecanismos resultam na ação de bombeamento. Íons produzidos na descarga ganham energia suficiente para penetrar nos catodos e produzir "sputtering". Como a corrente iônica decresce radialmente a partir do eixo dos anodos, a erosão dos catodos é mais intensa na área sob a projeção dos eixos e menos intensa nas periferias sob a projeção das paredes dos anodos. Os íons de gases ativos implantados nos catodos formam compostos quimicamente estáveis (quimissorção); os íons inertes podem, todavia, ser reemitidos por processos de

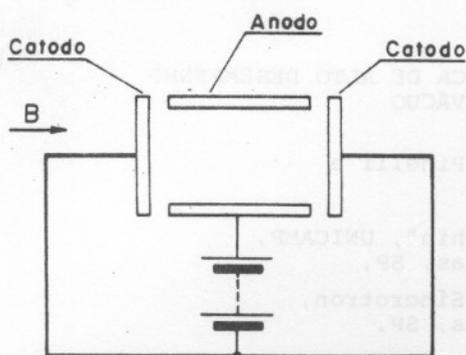


Fig. 1 - Célula Penning.

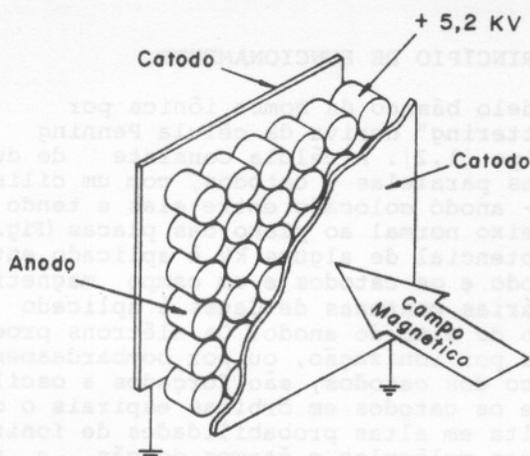


Fig. 2 - Células em paralelo.

"sputterings" subsequentes; assim, apenas nas regiões dos catodos onde a taxa de erosão é menor do que a taxa de deposição de material proveniente do "sputtering" do catodo oposto há um bombeamento permanente de gases inertes; este mecanismo é confirmado por bombeamento de Kr radioativo [5]. Os gases quimicamente ativos também podem se combinar com o material retirado dos catodos e em trânsito para as regiões de deposição ou podem ser adsorvidos ao atingirem os depósitos, sendo soterrados pela chegada subsequente de material dos catodos. Gases inertes são adsorvidos também nas deposições sobre as superfícies dos anodos [5]. A descrição deste mecanismo foi proposta por Jepsen [6]: "Íons incidentes nos catodos podem, sob condições convenientes, ser refletidos como átomos neutros energéticos e penetrar nos anodos". A energia desses átomos refletidos depende do ângulo de incidência e do número atômico do material do catodo. Para Ti bombardeado em incidência normal, a energia efetiva dos gases inertes refletidos é pequena e a velocidade de bombeamento é muito

baixa. Por outro lado, a liberação de íons e átomos pela erosão dos catodos leva a flutuações na pressão quando se bombeia gases inertes. No caso de bombeamento de argônio, essas flutuações, conhecidas como "ciclos de Ar", provocam aumentos na pressão de mais do que uma ordem de grandeza.

3. DESCRIÇÃO

A bomba iônica desenvolvida pelo LVac, e apresentada neste trabalho, destina-se ao bombeamento de ar atmosférico (*). A Fig. 3 mostra a bomba com os magnetos e as Figs. 4 e 5 mostram a bomba em cortes transversais.

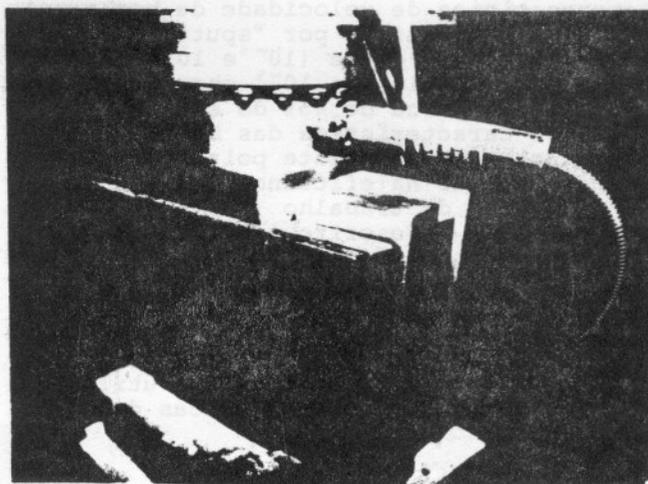


Fig. 3 - Bomba iônica com magnetos.

O corpo da bomba e os anodos são de aço inox AISI 304L nacional, de espessura 3,0mm e 4,0mm, respectivamente; os catodos são placas de titânio (USA) de espessura 2,0mm e alta pureza (Tabela 1). Os isolantes elétricos e o passante para alta tensão são fabricados com alumina nacional de alta pureza (99%); a brazagem do passante é feita pelo processo Mo-Mn [7]. Os magnetos, nacionais, são placas de ferrite de bário (ou estrôncio), especialmente produzidas nas dimensões 152x75x20mm³, e produzem campos de ~ 2000 Gauss na separação de 38mm entre polos. A bomba é formada de quatro módulos de 36 células unitárias cada um. Foram desenvolvidas duas versões de módulos para o mesmo corpo da bomba. Na versão denominada LVac-I, com velocidade máxima de bombeamento de 63 l/s (N₂ seco), a 10⁻⁵mbar, 40% dos anodos são mais curtos (maior condutância, menor carga armazenada em relação aos anodos mais compridos); na versão LVac-II, com velocidade máxima de

(*) Protótipo para bombeamento eficiente de gases nobres está em fase final de desenvolvimento

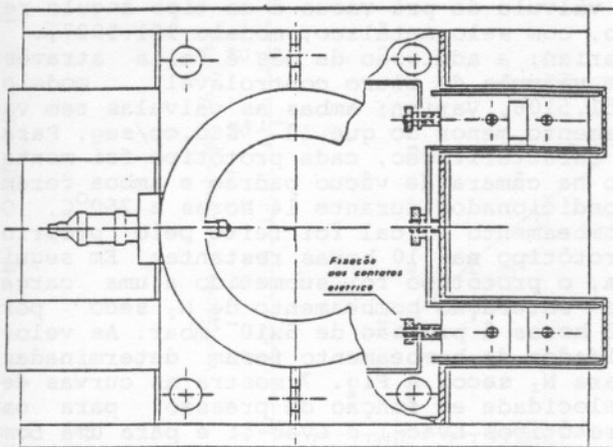


Fig. 4 - Bomba iônica em corte transversal.

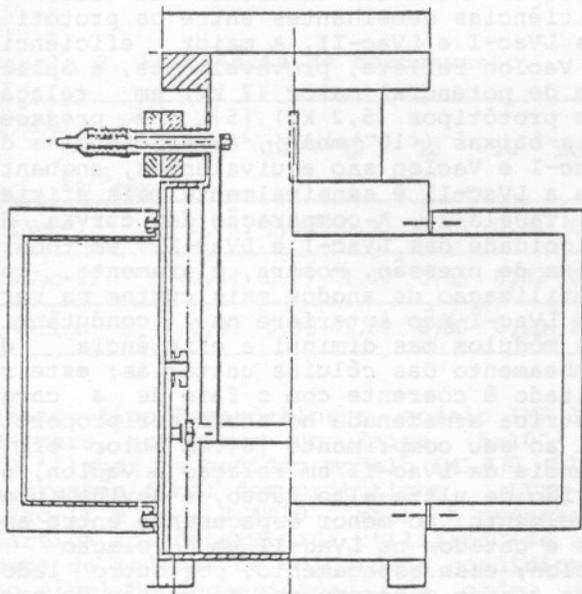


Fig. 5 - Bomba iônica em corte transversal.

bombeamento de 70 l/s (N₂ seco), a 10⁻⁶ mbar, todos os anodos tem o mesmo comprimento dos anodos maiores da versão LVac-I. A utilização e a distribuição de dois tipos de anodos nos módulos das duas versões LVac-I e LVac-II visam estudar a influência da condutância e da carga armazenada nos anodos sobre a velocidade de bombeamento. O cabo de conexão entre a bomba e a fonte de alimentação foi especialmente desenvolvido para suportar tensões de até 10 kV e variações de temperatura de até 250°C. O isolamento e a proteção do fio condutor são obtidos com espagete de teflon e tubo flexível em aço inox. Os terminais de conexão com a bomba e a fonte foram projetados e

Tabela 1. Análise de impurezas nos catodos de Titânio.

Impurezas	N ₂	C	H ₂	Fe	O ₂	outros
% (máxima)	0,03	0,10	0,01	0,30	0,25	0,40

desenvolvidos pelo LVac; o terminal junto à bomba suporta temperaturas de até 250°C. A fonte de alimentação foi construída usando-se apenas componentes nacionais; a tensão de 5,2 kV utilizada na bomba é obtida com um multiplicador de tensão capacitivo; o circuito possui um limitador de corrente para evitar que a corrente iônica no interior da bomba, a pressões acima de 10⁻⁶ mbar e a potenciais de 5,2 kV, se torne excessivamente alta com consequente ionização em avalanche; isto provocaria um superaquecimento da bomba com degaseificação excessiva e rápida degradação dos catodos. Como a corrente iônica é proporcional à pressão na faixa acima de 10⁻⁹ mbar, a fonte foi calibrada para medir pressão nesta faixa.

4. CARACTERIZAÇÃO

O desempenho de uma bomba iônica é avaliado através de suas pressões final e de partida e das curvas de velocidade de bombeamento. O campo magnético dentro e fora da bomba, bem como a corrente de fuga, também devem ser determinados. A pressão final é o limite inferior de pressão atingido pela bomba em uma câmara apropriada; a pressão de partida é a maior pressão a partir da qual a bomba consegue entrar em operação. O bombeamento iônico é discriminatório; os mecanismos de captura dependem da natureza do gás bombeado e, assim, as características de projeto de uma bomba influem no seu comportamento em presença de diferentes gases; a performance da bomba para gases específicos é determinada pelas curvas que relacionam a velocidade de bombeamento com a pressão. A velocidade de bombeamento pode ser determinada, sob condições de equilíbrio dinâmico, medindo-se o fluxo de gás bombeado e a pressão na entrada da bomba. Para a determinação das baixas taxas de fluxo existentes na região de ultra-alto vácuo, é adotado o método da queda de pressão através de orifício de condutância conhecida [8]. A velocidade de bombeamento S (l/s) é expressa como

$$S = C(P_1/P_2 - 1) \quad (1)$$

onde C é o valor da condutância (l/s), P₁ é a pressão a montante da condutância e P₂ é a pressão na entrada da bomba. A condutância de um orifício para o escoamento em regime molecular é expressa como

$$C = 3,64(T/M)^{1/2} A \quad (2)$$

onde T é a temperatura (K), M é o peso molecular do gás (g) e A é a área do orifício (cm^2). As primeiras tentativas de se medir a velocidade de bombeamento de bombas iônicas mostraram que o desempenho é influenciado pela carga de gás previamente bombeada; desse fato surgiu a necessidade de se preparar convenientemente a bomba antes da caracterização a fim de se obter reprodutibilidade dos resultados. A norma ISO/DIS 3556/1, de 1974, especifica os procedimentos a serem adotados na avaliação da velocidade e da pressão final de bombas iônicas; esta norma tem por objetivo assegurar que as medidas sejam feitas sob condições uniformes, possibilitando a comparação correta dos resultados obtidos por diferentes fabricantes e laboratórios.

A avaliação dos protótipos LVac-I e LVac-II foi realizada no Laboratório de Vácuo do LNLs seguindo a norma acima. A câmara de medidas foi construída em aço inox AISI 304L, nas proporções estabelecidas pela norma (Fig. 6), onde D é igual ao diâmetro da entrada da bomba; as flanges de conexão seguem o padrão DN 100CF para câmara e bomba e DN 35CF para medidores de pressão e válvulas. Os anéis de vedação, o tubo de admissão de gás e a condutância entre as duas metades da câmara são de cobre eletrolítico de procedência nacional. Os medidores foram calibrados na bancada de calibração do LNLs e são do tipo Bayard-Alpert, modelo AL 310L, marca SVT; operam na faixa (5×10^{-3} a 10^{-10}) mbar. A pressão na câmara de admissão foi determinada com medidor tipo Pirani, modelo BG 546 920-T, Balzers, que opera na faixa (10^3 a 8×10^{-4}) mbar. O pré-vácuo foi obtido com sistema turbomo-

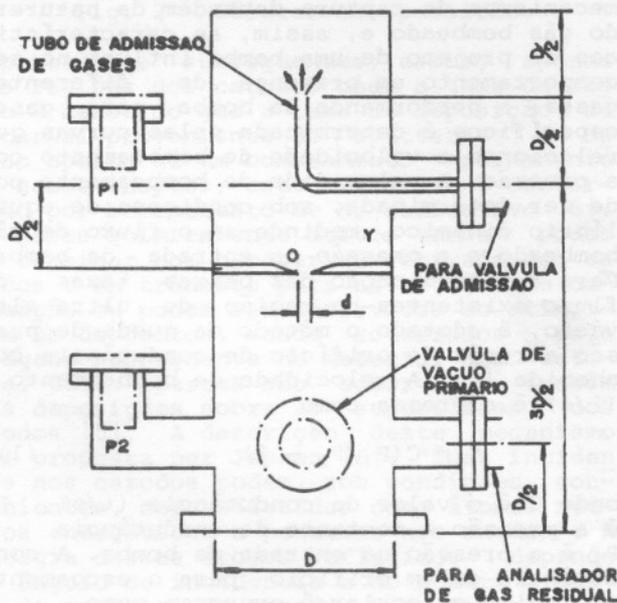


Fig. 6 - Câmara de medidas.

lecular, modelo TSH 242 (240 ℓ/s), Balzers. A válvula de pré-vácuo é do tipo ângulo reto, com selo metálico, modelo 951.5027, Varian; a admissão de gás é feita através de válvula de fluxo controlável, modelo 951.5106, Varian; ambas as válvulas tem vazamento menor do que 10^{-10} Std.cc/seg. Para a caracterização, cada protótipo foi montado na câmara de vácuo padrão e ambos foram condicionados durante 14 horas a 250°C . O bombeamento inicial foi feito pelo próprio protótipo nas 10 horas restantes. Em seguida, o protótipo foi submetido a uma carga de saturação-bombeamento de N_2 seco por 18 horas à pressão de 5×10^{-7} mbar. As velocidades de bombeamento foram determinadas para N_2 seco. A Fig. 7 mostra as curvas de velocidade em função da pressão para os protótipos LVac-I e LVac-II e para uma bomba VacIon, Varian, de 60 ℓ/s (ar seco) - a velocidade de bombeamento para ar seco é aproximadamente 10% maior do que para N_2 seco. A pressões mais altas ($>10^{-5}$ mbar), observa-se uma maior eficiência da VacIon e eficiências semelhantes entre os protótipos LVac-I e LVac-II. A maior eficiência da VacIon reflete, provavelmente, a aplicação de potencial maior (7 kV) em relação aos protótipos (5,2 kV) [5]. A pressões mais baixas ($<10^{-6}$ mbar), as eficiências da LVac-I e VacIon são equivalentes, enquanto que a LVac-II é sensivelmente mais eficiente (Tabela 2). A comparação das curvas de velocidade das LVac-I e LVac-II, em toda a faixa de pressão, mostra, claramente, que a utilização de anodos mais curtos na versão LVac-I não interfere na condutância dos módulos mas diminui a eficiência de bombeamento das células unitárias; este resultado é coerente com o fato de a carga elétrica armazenada no anodo ser proporcional ao seu comprimento [6]. A maior eficiência da LVac-II em relação à VacIon, na região de ultra-alto vácuo, é devida, provavelmente, ao menor espaçamento entre anodos e catodos na LVac-II em relação à VacIon; esse espaçamento, por outro lado, pode afetar o desempenho na região de pressões mais altas o que refletiria na menor eficiência da LVac-II nesta região. O deslocamento da pressão de máxima velocidade de bombeamento de $\sim 10^{-6}$ mbar (LVac-II e VacIon) para $\sim 10^{-5}$ (LVac-I) provavelmente seja consequência dos efeitos conjugados de potenciais elétricos aplicados, espaçamento anodos-catodos e relação comprimento/diâmetro dos anodos. Um melhor entendimento das influências desses fatores sobre a eficiência de bombeamento exige o prosseguimento do estudo da configuração dos eletrodos bem como do potencial elétrico aplicado; este estudo continua sendo realizado pelo LVac.

Para a determinação da pressão final atingida pelos protótipos, foi utilizada uma câmara de dimensões iguais à da metade superior da câmara de medida de velocidade (Fig. 6). A pressão final foi medida com

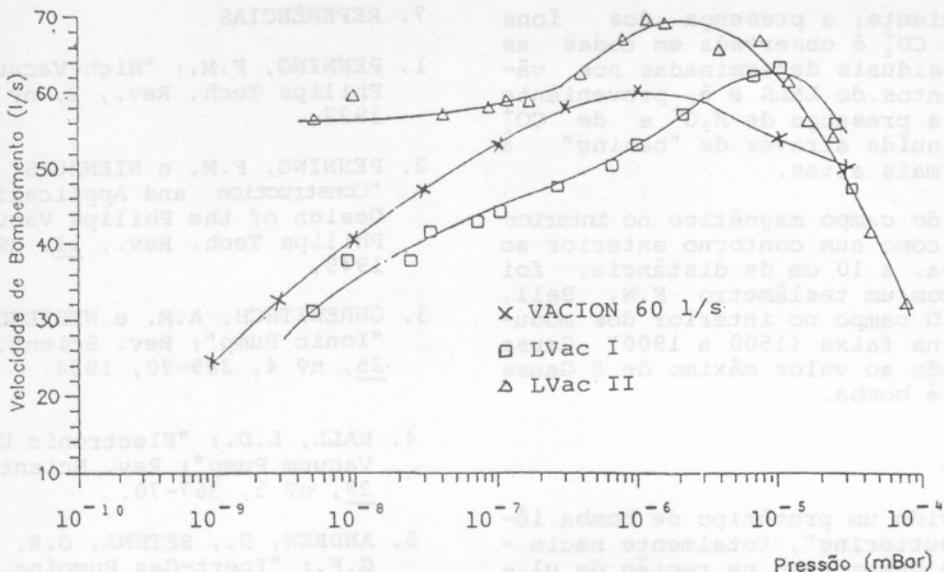


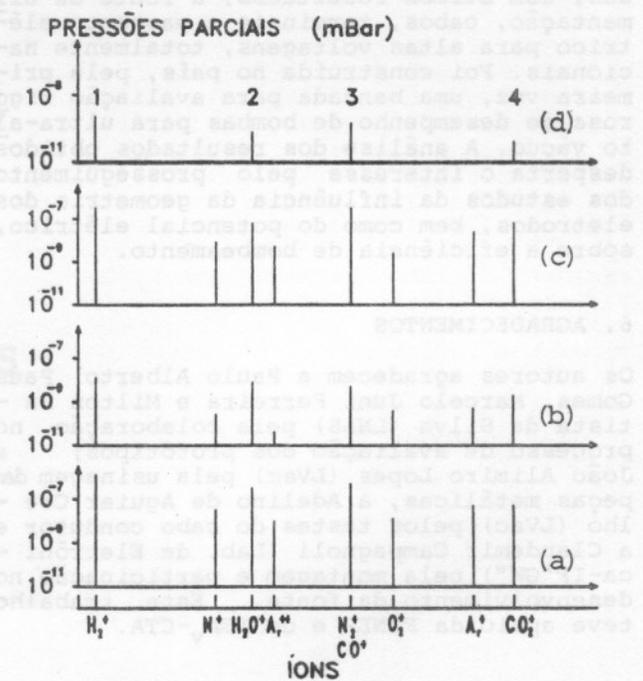
Fig. 7 - Curvas de velocidade.

Tabela 2. Eficiência de bombeamento.

P/mbar \ S _P /S _{máx}	4x10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	5x10 ⁻⁹
LVac-I	0,75	1,00	0,90	0,70	0,60	0,49
LVac-II	0,44	0,77	1,00	0,85	0,82	0,81
VacIon	0,82	0,90	1,00	0,90	0,68	0,45

sensor tipo Bayard-Alpert, modelo IMR 132, Balzers, que opera na faixa (5x10⁻³ a 10⁻¹¹) mbar, e medidor modelo IMG 070, Balzers. A pressão final dos protótipos LVac-I e LVac-II é de ~ 2,4x10⁻¹⁰ mbar. A pressão de partida foi determinada utilizando-se a câmara de medidas de velocidade condicionada ao nível de degaseificação da ordem de 5x10⁻¹² mbar l/cm²s; em seguida o sistema foi ventilado com N₂ seco até atingir pressões atmosféricas; fazendo-se o pré-vácuo com sistema turbomolecular, verificou-se que a pressão de partida é da ordem de 1,3x10⁻⁴ mbar.

O espectro da atmosfera residual foi obtido com um analisador de gases modelo EQ 100F, Edwards, e a mesma câmara utilizada para a determinação da pressão de partida. A Fig.8 mostra o espectro durante o pré-vácuo com bomba turbomolecular, a pressão de 4x10⁻⁶ mbar (a), sem "baking", a pressão de 2,5x10⁻⁸ mbar (b), durante o "baking" a 200°C, a pressão de 10⁻⁶ mbar (c) e 16 horas após o "baking", a pressão de 1,9x10⁻⁹ mbar (d). Esses resultados são preliminares (não foram usados selos metálicos na câmara e o "baking" foi feito apenas a 200°C) mas mostram que foi obtido um bom -



Pressões Parciais

- 1 - 1,0x10⁻⁹
- 2 - 2,3x10⁻¹⁰
- 3 - 5,0x10⁻¹⁰
- 4 - 8,0x10⁻¹¹

- (a) Pré-vácuo
- (b) Depois 20h de bombeamento
- (c) Durante o baking
- (d) 16h após o baking

Fig. 8 - Espectro de atmosfera residual.

beamento eficiente; a presença dos íons H_2^+ , N_2^+ , CO^+ e CO_2^+ é observada em todas as atmosferas residuais determinadas nos vários equipamentos do LNLS e é proveniente do aço inox; a presença de H_2O^+ e de CO_2^+ pode ser diminuída através de "baking" a temperaturas mais altas.

O mapeamento do campo magnético no interior da bomba bem como num contorno exterior ao corpo da bomba, a 10 cm de distância, foi determinado com um teslâmetro F.W. Bell, modelo 4048. O campo no interior dos módulos situa-se na faixa (1500 a 1900) Gauss e está limitado ao valor máximo de 8 Gauss externamente à bomba.

5. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um protótipo de bomba iônica, por "sputtering", totalmente nacional, de ótimo desempenho na região de ultra-alto vácuo e que atinge pressão final de $2,4 \times 10^{-10}$ mbar. Também foram desenvolvidos, com ótimos resultados, a fonte de alimentação, cabos, terminais e passante elétrico para altas voltagens, totalmente nacionais. Foi construída no país, pela primeira vez, uma bancada para avaliação rigorosa de desempenho de bombas para ultra-alto vácuo. A análise dos resultados obtidos desperta o interesse pelo prosseguimento dos estudos da influência da geometria dos eletrodos, bem como do potencial elétrico, sobre a eficiência de bombeamento.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Paulo Alberto Paes Gomes, Marcelo Juni Ferreira e Milton Batista da Silva (LNLS) pela colaboração no processo de avaliação dos protótipos; a João Alimiro Lopes (LVac) pela usinagem das peças metálicas, a Adelino de Aguiar Coelho (LVac) pelos testes do cabo condutor e a Claudemir Campagnoli (Lab. de Eletrônica-IF"GW") pela montagem e participação no desenvolvimento da fonte. Este trabalho teve apoio da FINEP e do IEA_V-CTA.

7. REFERÊNCIAS

1. PENNING, F.M.; "High-Vacuum Gauges"; Philips Tech. Rev., 2, nº 7, 201-8, 1937.
2. PENNING, F.M. e NIENHUIS, K.; "Construction and Applications of a New Design of the Philips Vacuum Gauge"; Philips Tech. Rev., 11, nº 4, 116-22, 1949.
3. GUREWITSCH, A.M. e WESTENDORP, W.F.; "Ionic Pump"; Rev. Scient. Instrum., 25, nº 4, 389-90, 1954.
4. HALL, L.D.; "Electronic Ultra-High Vacuum Pump"; Rev. Scient. Instrum., 29, nº 5, 367-70.
5. ANDREW, D., SETHNA, D.R. e WESTON, G.F.; "Inert-Gas Pumping in a Magnetron Pump"; Proc. 4th International Vacuum Congress, Inst. of Physics, London, 1, 337-40, 1968.
6. JEPSEN, R.L.; "On the Physics of Sputter-Ion Pumps"; Proc. 4th International Vacuum Congress, 1, 317-32, 1968.
7. SANTOS, C., LANDERS, R., PINELLI, C.P. e TESSAROTTO, L.A.B.; (a ser publicado).
8. FISCHER, E. e MOMMSEN, H.; "Monte Carlo Computations on Molecular Flow in Pumping Speed Test Domes", Vacuum 17, nº 6, 309-15, 1967.