

**Relatório Final de F 809**  
**Instrumentação Para Ensino**

**CONSTRUÇÃO DE UM LASER DE AR**



*Lucas Sanfelici RA 002016*

*e*

*Hugo L. O. Meneguele RA008885*

**Orientador: Prof. Leandro R. Tessler**

**Coordenador da Disciplina: Prof. José J. Lunazzi**

**Instituto de Física ‘Gleb Wataghin’  
Universidade Estadual de Campinas – Unicamp**

**15 de Julho/2004**

## Índice

<b>1. O Projeto.....</b>	<b>2</b>
<b>2. Descrição do Funcionamento do Laser de Ar.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Material Utilizado.....</b>	<b>7</b>
<b>4. Desenvolvimento do Projeto/Experimental.....</b>	<b>8</b>
<b>5. Conclusão do Projeto.....</b>	<b>13</b>
<b>6. Referências.....</b>	<b>14</b>

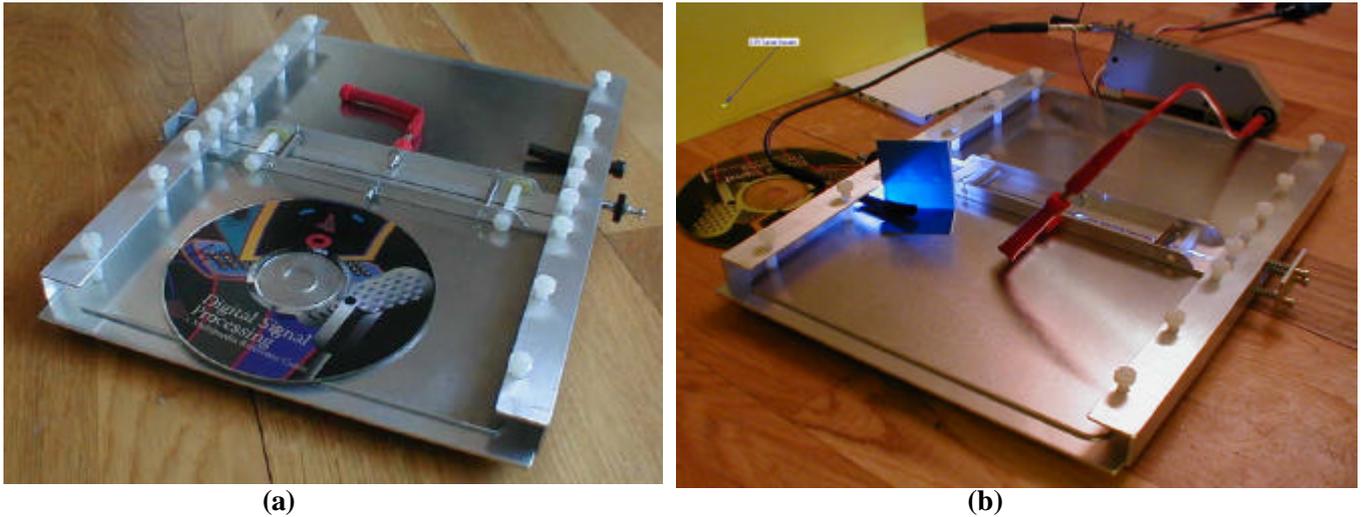
## 1. O Projeto

Neste trabalho nos propomos a desenvolver um laser de extremo baixo custo e fácil construção. Esse laser baseia-se num modelo amplamente divulgado na década de 70 [1] por *James G. Small* e que nos dias de hoje serve de inspiração para os cientistas amadores de todo mundo que desejam construir um laser. Decidimos seguir um roteiro proposto por um desses cientistas amadores disponível na internet. O atrativo da montagem sugerida (*Fig.1*) é que se trata de uma bem sucedida adaptação da idéia original de *James G. Small* que, se seguida à risca, tem garantia de sucesso.

Didaticamente o desenvolvimento de um projeto deste tipo traz consigo a oportunidade de abordar um amplo leque de temas que, em profundidade, podem contemplar tanto estudantes de ensino médio quanto de ensino superior. No último caso, torna-se bastante viável explorar mecanismos hoje corriqueiramente presentes em quaisquer laboratórios de pesquisa científica como: lasers, plasmas, altas-tensões. Já no ensino médio, dada a fácil construção, baixo custo do material, e a possibilidade de observação direta de fenômenos físicos, torna-se extremamente interessante aproveitar-se dessas facilidades para evidenciar uma série de fenômenos muitas vezes intrigantes e estimulantes para esse tipo de público.

Na verdade, o título para nosso projeto ao propor a construção de um laser de ar, tem a intenção de reiterar uma das principais facilidades no desenvolvimento deste tipo de laser: ele funciona à pressão atmosférica, a ar aberto, sem a necessidade de qualquer tipo de confinamento gasoso, além de possuir um ganho gigantesco, o que dispensa a necessidade de espelhos. Outro fato que merece esclarecimento é que não se trata exatamente de laser de ar; é o  $N_2$ , gás mais abundante no ar atmosférico, que serve como meio de ganho. A maior dificuldade técnica deste projeto é a alimentação do laser que deve chegar a 12KV.

Nas próximas seções, buscaremos contextualizar o tipo de laser que nos propomos a construir dentro do amplo cenário que o tema 'lasers' encerra nos dias de hoje. Também fundamentaremos tanto técnica quanto fisicamente o funcionamento da montagem escolhida. Por fim, relataremos o sucesso obtido no desenvolvimento do projeto.



**Figura 1** – Modelo de Laser de Ar sugerido no site <http://spt06.chez.tiscali.fr/00/air.htm> [2]. Em (a) o destaque da montagem; em (b) o laser em operação.

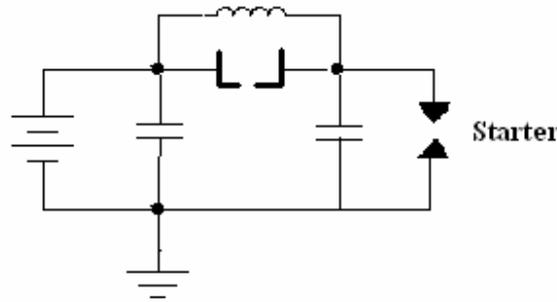
## 2. Descrição e Funcionamento do Laser de Ar

O laser construído trata-se de um laser do gênero a gás, como os famosos lasers de  $\text{CO}_2$  ou de He-Ne. Em geral, esses tipos de laser exigem uma série de cuidados especiais: baixa pressão, atenção à liberação de gases tóxicos, e muitas vezes um segundo laser para bombeio. No caso do laser de ar (ou mais convenientemente de  $\text{N}_2$ ) que construímos, ele enquadra-se na classe dos chamados lasers de pressão atmosférica excitados transversalmente – ou *TEA lasers* (*Transversely Excited Atmospheric Pressure*). Um laser do tipo *TEA* sempre é pulsado e é excitado por uma descarga de arco voltaico que se propaga perpendicularmente ao eixo do laser.[3]

Agora que contextualizamos nosso laser, vamos partir para a questão fundamental da origem da luz laser em lasers em geral. A emissão de luz se dá em um laser quando o material de que o laser é composto, átomos ou moléculas, decai de um estado excitado para outro de energia inferior emitindo um fóton que estimula as moléculas ou átomos vizinhos, ainda excitados, a decaírem, também emitindo fótons em fase com o primeiro, o que podemos entender como a origem da coerência da luz laser. Ao falarmos em transições entre níveis de energia, falamos de transições de toda sorte, dependendo do tipo de laser e do material utilizado como meio de ganho. Por exemplo, em gases, as possíveis transições são eletrônicas ou vibracionais; já em lasers baseados em tecnologia de estado-sólido como os de diodo, estaremos lidando com bandas de energia ao invés de níveis.

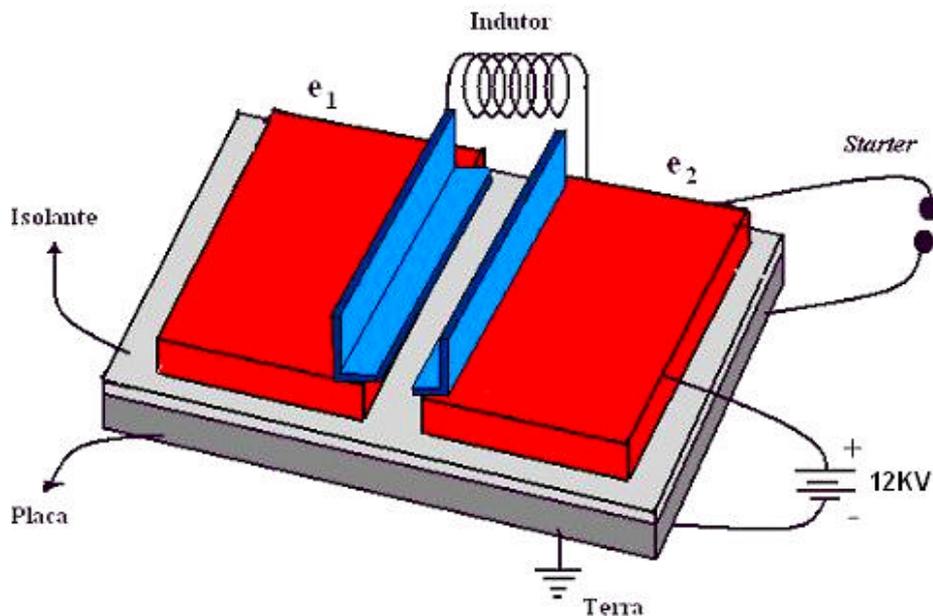
O fenômeno descrito no início do parágrafo anterior é conhecido como Emissão Estimulada. Para efeito de clareza, antes de detalhá-lo um pouco mais no contexto do laser de ar, vamos apresentar a estrutura física do mesmo e seu funcionamento.

A espinha dorsal de nosso laser é um par artesanal de capacitores de placas paralelas polarizados pela fonte de alta tensão e conectados por um indutor. Observe no esquema abaixo:



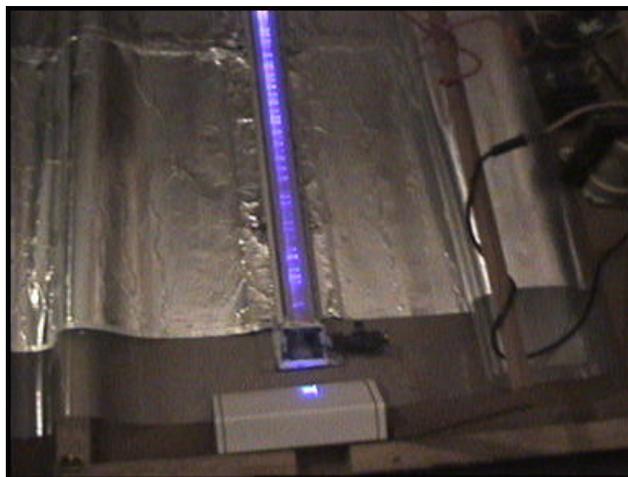
**Figura 2** – Esquema simplificado do laser de ar.

As estruturas em ‘L’ em paralelo com o indutor estão colocadas sobre os eletrodos superiores de cada capacitor e, devido ao indutor, estão em “curto-circuito”. O componente à direita trata-se de um *spark gap*, ele tem a função de curto-circuitar os pólos dos capacitores quando entre eles houver uma tensão superior a certo valor limite determinado pela rigidez dielétrica do ar, cerca de 30KV/cm. Para melhor ilustrar, observe um modelo da montagem experimental na figura 3.



**Figura 3** – Modelo do laser de ar baseado no *TEA N<sub>2</sub> Laser da SciAm* [1].

O fundamental para o funcionamento de nosso laser é obter uma estrutura física que viabilize uma rápida descarga elétrica para excitar as moléculas de  $N_2$  presentes no ar. A estrutura apresentada na figura acima possibilita obter uma *ddp* variável entre os trilhos em forma de 'L' (destacados em azul no modelo), o que depende da distância entre os trilhos e/ou entre as pontas do *spark gap*. Uma *ddp* capaz de romper a rigidez dielétrica entre os trilhos ocasiona o aparecimento de um arco voltaico que excita as moléculas de  $N_2$  presentes no ar entre os trilhos. Além disso, também é possível notar a formação de um plasma violeta no mesmo local da descarga. Veja a figura abaixo [4] que mostra o plasma na cavidade. Mas como isso se dá exatamente?



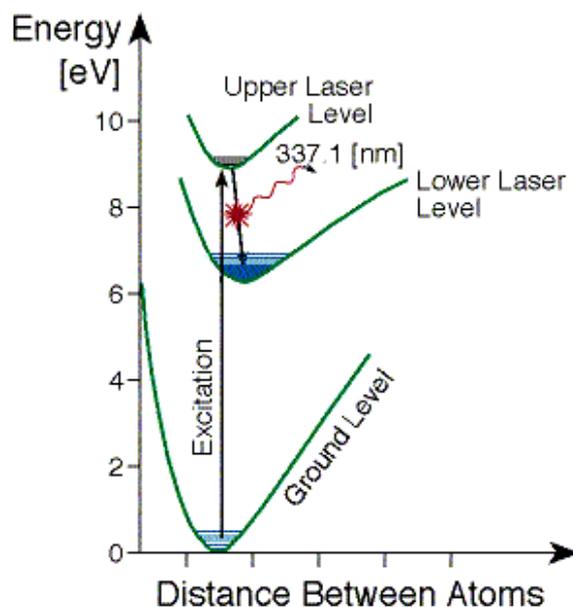
**Figura 4** – Plasma na cavidade.

Para responder a essa pergunta, repare em cada detalhe em destaque por uma cor diferente na montagem da figura 3. A placa em cinza escuro é o pólo comum entre os dois capacitores mencionados anteriormente (figura 2) que está aterrado; os outros dois pólos (eletrodos  $e_1$  e  $e_2$ ) estão destacados em vermelho, eles estão conectados ao terminal positivo da fonte de alta tensão, e o contato elétrico entre eles é feito pelo indutor. Sobre cada um dos pólos positivos do capacitor estão, em contato elétrico com os mesmos, os trilhos em 'L' destacados em azul. Tais trilhos devem estar cuidadosamente dispostos paralelamente a fim de que o eixo-óptico, ou eixo de ganho, do laser fique bem definido. É o paralelismo entre os trilhos o maior responsável pelo sucesso da montagem.

Note que na descrição feita até o momento os pólos superiores dos capacitores estão no mesmo potencial de modo que não existe *ddp* alguma entre os trilhos (o indutor está em regime permanente), não havendo, portanto, arco voltaico algum. Para viabilizar o aparecimento dessa *ddp*, é inserido um *spark gap* em paralelo com o capacitor da direita. Esse dispositivo entra em curto-circuito toda vez que o capacitor atinge uma carga limite, ou seja, quando a tensão entre seus bornes é capaz de romper a

rigidez dielétrica do ar entre as pontas. Quando isso acontece o capacitor da direita é descarregado e o indutor que o conecta com o da esquerda impede que haja fluxo imediato de carga da esquerda para direita, fazendo com que surja uma *ddp* da ordem da fornecida pela fonte de tensão entre os dois trilhos em 'L'. Com isso, temos a ocorrência do arco voltaico! As moléculas de  $N_2$  ficam, assim, excitadas e a presença do plasma violeta pode ser notada concomitantemente à emissão do desejado UV na direção definida pelo eixo-óptico.

Durante a descarga elétrica do arco voltaico, os elétrons colidem com as moléculas de  $N_2$  fazendo com que os elétrons que antes ocupavam o estado fundamental absorvam energia e transicionem para níveis mais elevados. Dentre esses níveis mais elevados, o que interessa no caso do  $N_2$  é o que podemos chamar de "upper laser level". Em algumas moléculas, elétrons oriundos desse nível decaem para o "lower laser level" emitindo, espontânea e desordenadamente, radiação em  $337,1nm$ . Observe a descrição na figura 5 abaixo:



**Figura 5** - Níveis de Energia da molécula de  $N_2$  ilustrando o fenômeno de Inversão de População.

A fração da radiação emitida espontaneamente na direção eixo óptico encontra outras moléculas excitadas que as força a emitirem radiação na mesma frequência e em fase com a inicial, e assim vai acontecendo entre cada fóton que é emitido e cada molécula excitada que o mesmo encontra pelo caminho. A outra parcela da radiação emitida em outras direções não encontra moléculas de  $N_2$

excitadas já que a descarga ocorreu apenas na região limitada pelos trilhos. Assim, a direção definida pelos trilhos define o eixo óptico do laser, que é a direção em que o laser apresentará ganho.

Por fim, é interessante esclarecer o motivo porque este laser é pulsado, não sendo possível uma emissão contínua. Isso se deve ao tempo de vida dos elétrons no “*lower laser level*” ser superior ao tempo de vida dos mesmos no “*upper laser level*”, o que impossibilita a definição de um ciclo contínuo de transições entre esses dois níveis. Sendo assim, os elétrons permanecem mais tempo no “*lower laser level*”, tempo suficiente dos elétrons que estavam no “*upper laser level*” decaírem e a população desse nível nas moléculas de  $N_2$  ser superada pela população de elétrons no “*lower laser level*”, o que torna, a partir daí, o gás altamente absorvente em  $337,1nm$ , cessando o fenômeno da Emissão Estimulada. O ciclo recomeça naturalmente se se manter a alimentação do circuito continuamente.

### 3. Material Utilizado

Para construção do laser proposto pedimos na oficina mecânica do DEQ (Departamento de Eletrônica Quântica) a confecção de algumas peças em alumínio e também adquirimos outras no estoque do GLA (Grupo de Lasers e Aplicações - DEQ) e na oficina mecânica do LEI. Veja a lista do material utilizado:

- ? 1 placa de alumínio de tamanho 210x297 e espessura 1,5mm;
- ? 2 placas de mesma espessura e de tamanho 135x190 mm;
- ? 2 trilhos em ‘L’ com 10 x 20 x 250mm;
- ? 2 trilhos em ‘L’ com 10 x 20 x 200mm;
- ? pedaços de fios de cobre para confecção de indutores;
- ? 1 placa de acrílico de 210x297 mm e 1,5 mm de espessura;
- ? 2 folhas plásticas de transparência;
- ? 4 “pés” de borracha para suporte da montagem;
- ? Parafusos;
- ? 2 prendedores artesanais de madeira;
- ? 1 monitor colorido de PC 14’’;
- ? Fonte de tensão baseada em uma bobina de automóvel.

Para o acabamento da montagem proposta foram necessários diversos parafusos e “pézinhos” de borracha para isolar a placa do capacitor da superfície onde seria colocada a montagem. Também foi necessário 2 folhas de transparência para servir de dielétrico na confecção dos capacitores. A instrumentação de apoio como fontes de tensão, multímetros e o que mais foi necessário contamos com o apoio dos laboratórios do Prof. Flávio C. Cruz (GLA) e do LEI.

#### 4. Desenvolvimento do Projeto – Percalços e Vitórias

Seguindo o plano inicial que era confeccionar as peças em alumínio, pedimos esse serviço ao técnico mecânico do DEQ que, prometendo um serveço rápido, disse que em breve estariam prontas. No entanto, houve um atraso de quase quatro semanas na entrega das peças por conta do surgimento de trabalhos prioritários na oficina mecânica. Isso atrasou o cronograma de execução de nosso projeto, inviabilizando muitos dos planos iniciais como o desenvolvimento de uma fonte de alta tensão adequada para alimentação do laser.

Superada essa dificuldade inicial para obter as chapas e trilhos, procedemos com a fixação das partes (fig. 6) segundo proposto originalmente na figura 3. Em seguida, foi necessário preparar o *spark gap*, dois indutores (30 voltas – 8mm de diâmetro) a partir de fios de cobre, além de adquirir a placa de acrílico no LEI.



**Figura 6** – À esquerda: montagem baseada no modelo da fig. 3; à esquerda: vista em perfil da cavidade.

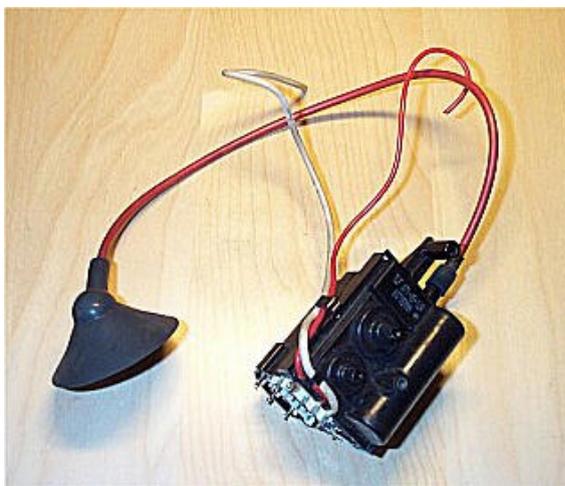
A confecção do *spark gap*, cuja função já foi detalhada na seção anterior, foi feita utilizando dois pedaços de fio tipicamente utilizado em instalações elétricas residenciais. Qualquer outro tipo de fio poderia ser utilizado para o mesmo fim desde que fosse rígido o bastante. Esse requisito é necessário

para que, ao serem fixados na montagem, a disposição dos dois permaneça fixa, impedindo a variação do *gap* entre eles. Uma extremidade de cada um deles foi lixada até que uma ponta ficasse bem definida. Com uma ponta voltada para a outra na montagem, isso favorece o acúmulo de cargas em ambas, contribuindo significativamente para facilitar a descarga elétrica através do ar. Note o *spark gap* em ação.



**Figura 7** – Dois fios com pontas trabalhadas (lixadas) servindo como *spark gap*.

Como a idéia inicial era utilizar como fonte de alta tensão uma *flyback* (fig. 8) de monitor ou uma bobina de automóvel, procedemos com a idéia adquirindo um monitor velho de PC de 14'' do LEI. Tipicamente, o *flyback* de um monitor colorido, como o utilizado, fornece uma tensão de 25kV, mais do que o necessário para que conseguíssemos propiciar as condições para observação de algum tipo de emissão laser em UV.



**Figura 8** – *Flyback* de TV, de monitor de PC.

Quando se abre um monitor, nota-se conectada ao tubo de imagem uma “chupeta” de borracha como terminal de um fio vermelho um pouco mais espesso que os demais. Este fio é justamente a saída de alta tensão do *flyback*. Como terra utilizamos a própria carcaça metálica interna do monitor. Desta forma, à carcaça e à “chupeta” conectamos fios especiais para alta tensão que viabilizassem operar a alta tensão do monitor com o mesmo fechado, oferecendo menos riscos durante a operação. Foi necessário usar fios especiais para alta tensão pois se não fosse assim, em fios comuns poderiam aparecer arcos voltáicos quando estivessem próximos à superfícies que permitissem um descarga.

A princípio, ligando os novos terminais de alta tensão à montagem e acionando o monitor, notamos um número incrível arcos voltáicos se formando entre algumas rachaduras existentes nas bordas da placa de acrílico e entre os eletrodos em L. Reposicionamos as placas dos capacitores sobre a placa de acrílico e conseguimos eliminar os arcos voltáicos entre as rachaduras. No entanto, pequenas alterações na posição dos capacitores ocasionavam o retorno de um número expressivo de arcos nas laterais. Para contornar definitivamente este problema, providenciamos 1 placa de madeira um pouco mais extensa que a de acrílico a fim de reforçar o isolamento entre os capacitores, o que eliminou as fugas laterais. No entanto, esse procedimento não foi uma boa escolha já que o aumento da distâncias entre as placas dos capacitores equivale e reduzir a indutância e, conseqüentemente, a carga disponível para descarga. Com menos carga fluindo na descarga transversal que ocorreria no trilho, haveria uma redução no número de moléculas de  $N_2$  que seriam excitadas.

Após testarmos uma série de configurações para distância entre os eletrodos e para distância entre as pontas do *spark gap*, o monitor parou de fornecer alta tensão! Achando que uma possível sobrecarga de corrente tivesse ocorrido no monitor, decidimos acoplar 5 resistores de potência em série à saída de um novo *flyback* (ou um novo monitor se desprezarmos o eufemismo). Os resistores que tínhamos disponíveis eram de 1M $\Omega$  – 1W. Mesmo sabendo que a potência na saída do *flyback* era maior que a suportada pelos resistores, resolvemos utilizá-los já que eram a única opção. Evidentemente, tais resistores mostraram-se inapropriados para uso como limitadores de corrente na saída do *flyback* pois um deles pegou fogo durante a operação, o que indica a necessidade de resistores que suportassem maior potência.

De fato, os acontecimentos narrados anteriormente suscitam uma série de dúvidas quanto à pertinência da fonte de tensão empregada. Sendo assim, decidiu-se investir no uso de uma bobina de automóvel. Após buscar auxílio na oficina de eletrônica do LEI, fomos lembrados das existência de uma fonte utilizada em um experimento de F 129, que, coincidentemente, utiliza uma bobina de automóvel em seu circuito interno.



**Figura 9** – Faiscador “Ealing” feito com uma bobina de carro.

Essa fonte de tensão trata-se de um faiscador “Ealing” alimentado na rede elétrica, ele possui um retificador de meia-onda na saída. Além disso, também é possível regular a frequência de saída, graças a seu oscilador ajustável.

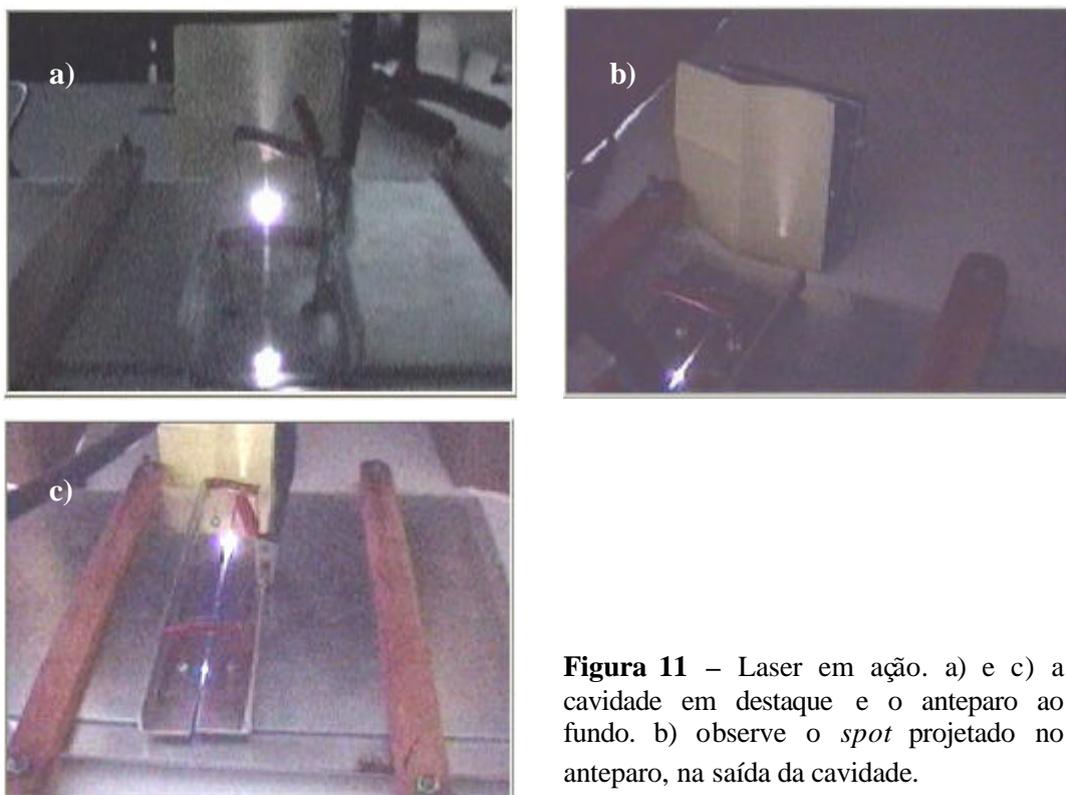
Em posse dessa nova fonte de tensão foi possível, com reprodutibilidade garantida, variar alguns parâmetros na montagem e avaliar o efeito de cada um deles sobre a distribuição de faíscas (descarga) ao longo do trilho. A homogeneização das faíscas ao longo do trilho é primordial para se atingir a emissão laser. Para que isso ocorresse, a um espaçamento constante de 1mm entre os trilhos, a distância entre as pontas do *spark gap* foi variada.



**Figura 10** – Distribuição homogênea das faíscas na cavidade. Note o plasma que ocorre concomitantemente.

Observou-se que para obter um número considerável de faíscas na cavidade era necessário que a distância entre as pontas não fosse superior à 8mm. Caso isso ocorresse, o aparecimento de faíscas no *spark gap* ficaria dificultado devido à distância, impedindo, assim, o aparecimento de ddp entre os trilhos que ocasiona as descargas, que são imprescindíveis para excitar as moléculas de  $N_2$ . Analogamente, o controle sobre a distância entre os trilhos é muito importante. Se eles estão muito longe, o *spark gap* é acionado mas não ocorre descarga na cavidade devido à distância; se estão muito próximos, o controle sobre a homogeneidade fica extremamente difícil. Logo, uma distância não mínima quanto possível de tal modo que a homogeneidade fique controlável é o desejável. Em nossa montagem, essa distância ficou em torno de 1mm.

Foi com o procedimento de ajuste descrito acima que obtivemos sucesso, veja a figura 10. A partir disso notou-se um *spot* projetado sobre o anteparo, bem na saída da cavidade. Até então esse *spot* não era observado. Mais tarde, analisando com cuidado os vídeos que havíamos feito dos testes iniciais, com a homogeneização das faíscas na cavidade bastante rudimentar, foi possível constatar o aparecimento de um *spot* menos intenso que o que havíamos então obtido. Seu aparecimento estava condicionado às vezes que as faíscas melhor se distribuíam ao longo da cavidade, o que reforçou o esforço dispendido no controle das distâncias (trilho e *spark gap*). Veja abaixo o laser em ação.



**Figura 11** – Laser em ação. a) e c) a cavidade em destaque e o anteparo ao fundo. b) observe o *spot* projetado no anteparo, na saída da cavidade.

É interessante notar na figura 11 (resultado da edição da filmagem feita durante os testes), em especial em c, o plasma violeta que se forma na cavidade. Na fig. 11a fica evidente a dinâmica da cavidade, além de se notar claramente, ao fundo, o *spot* no anteparo ('post-it'); em b) nota-se na base da luz projetada o *spot*.

É possível melhorar a intensidade do *spot* a capacitância das placas dor aumentada, o que implicaria em uma maior carga disponível para descarga na cavidade. Na construção deste laser, uma placa acrílica foi empregada como dielétrico entre os capacitores. Com uso de um material de rigidez dielétrica superior ao do acrílico é possível aproximar mais as placas aumentando, assim, a capacitância do sistema.

Uma falha de projeto que se tornou bastante evidente durante o período de testes foi o fato de não haver um ajuste fino para o vão do trilho. Sem dúvida um dispositivo mecânico deste tipo teria polpado muito trabalho e, possivelmente, melhorado ainda mais a distribuição das faíscas ao longo da cavidade. Portanto, este e o parágrafo anterior tratam de dois refinamentos na montagem que poderiam conduzir a um feixe mais intenso.

Para que não houvesse dúvidas sobre o tipo de luz (laser) observada no *spot*, uma análise espectral poderia ser feita.

## 5. Conclusão

Do ponto de vista instrumental, embora a construção do laser de ar tenha uma proposta extremamente simples, se não houver desde o início do desenvolvimento do projeto a preocupação com ajuste fino da cavidade, certamente haverá problemas no momento de colocar o laser em funcionamento. Como o tempo dispendido na obtenção do laser foi muito grande, não foi possível implementar um fonte de tensão própria ou métodos de caracterização da luz emitida como o sugerido no final da seção anterior. Também havíamos levantado a possibilidade de se variar o tamanho da cavidade com o intuito de observar variações na intensidade da luz emitida, ou pulverizar N<sub>2</sub> sobre a cavidade e fazer a mesma observação, o que acaba ficando como sugestões para o refinamento deste projeto.

Didacamente, consideramos este projeto de instrumentação extremamente rico na medida que possibilitou vivenciar não apenas os fenômenos físicos envolvidos, mas requereu o exercício de conhecimentos de eletrônica, o manuseio de altas tensões, e, acima de tudo, mostrou a necessidade de estratégia durante seu desenvolvimento.

Enfim, foi possível a observação do fenômeno proposto que é emissão laser a partir de descargas elétricas no ar atmosférico sem a necessidade de qualquer tipo artifício comumente utilizado em lasers de gás como vidraria, misturas gasosas, ou vácuo. Isso tudo, por sim só, já valeu um grande trabalho e uma enorme alegria.

## 6. Referências

- [1] Stong, C. L. *The Amateur Scientist – An unusual kind of gas laser that puts out pulses in the ultraviolet*. **SciAm**, June, 1974;
- [2] Site: <http://spt06.chez.tiscali.fr/00/air.htm>;
- [3] Young, Matt. *Óptica e Lasers*. São Paulo, EDUSP (1998)
- [4] Site: <http://www.geocities.com/resalles/N2/fire2.jpg>
- [5] Site: <http://www.theburnfieldcastle.com/laser.html>
- [6] Site: <http://www.technology.niagarc.on.ca/people/mcsele/lasers/lasersTEA.htm>