

Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Física

Estudo e solução experimental da transferência de átomos de estrôncio da armadilha magneto-ótica inicial (azul) para a subsequente (vermelha)

Aluna: *Gabriela Borges Comito*
Co-Orientador: *Rodrigo Figueiredo Shiozaki*
Orientador: *Raul Celistrino Teixeira*
Período de vigência: *2018 - 2019*

São Carlos, 31 de Agosto de 2019.

Conteúdo

1	Resumo	2
2	Introdução	3
2.1	Experimento	3
2.2	Objetivos	3
3	Caracterização das Bobinas	5
3.1	Resistência	5
3.2	Temperatura	6
3.3	Perfil Campo Magnético	8
4	Construção dos circuitos de controle	9
4.1	Circuito de desligamento	9
4.2	Circuito de Ligamento	10
4.3	Circuito de Proteção	10
5	Caixa de armazenamento dos circuitos	12
5.1	Construção	12
6	Resultados	13
6.1	Otimização do circuito de desligamento	13
6.2	Testes finais	16
7	Conclusão	17
8	Referências Bibliográficas	18
9	Auto Avaliação	19
10	Avaliação do Orientador	19
11	Destino da Aluna	20

1 Resumo

Iniciamos o projeto com construção das bobinas que seriam utilizadas nas Armadilhas Magneto Ópticas (MOT) para átomos de Estrôncio. Utilizamos as bobinas na configuração anti-Helmholtz, onde em cada bobina circula corrente em sentidos opostos mas com amplitudes iguais, resultando em campo magnético zero no centro do sistema que cresce linearmente em todas as direções, gerando o gradiente de campo magnético necessário para confinar os átomos na câmara.

Com o sistema de bobinas pronto e instalado para os testes, iniciamos a caracterização da máxima temperatura que as bobinas aguentam, do campo magnético e resistência gerado por elas.

Com os testes básicos e a caracterização das bobinas realizados, partimos para construção dos circuitos de controle dos Mot's, os quais são responsáveis pela comutação do Mot nas Bobinas, desligando o Mot azul e ligando o Vermelho.

Como esperado, foi necessário acrescentar um circuito de proteção. Este circuito tem como objetivo evitar que as fontes de corrente do MOT azul e do MOT vermelho possam ser ligadas simultaneamente, impedindo a interferência de correntes inapropriadas entre eles. Depois de muitos testes realizados e aprimoramento dos circuitos, chegamos a um tempo de desligamento e ligamento do campo magnético próximos aos desejados.

2 Introdução

2.1 Experimento

As Armadilhas Magneto-Ótica (MOT) utilizam pressão de radiação e campo magnético para o resfriamento e aprisionamento de átomos.

Primeiramente, há o uso de três pares de feixes contra-propagantes, que são inseridos nos eixos da armadilha. A luz troca momento com os átomos ao incidirem sobre estes e, com isso, gera uma força de pressão de radiação que causa a desaceleração dos átomos (para resfriá-los), fazendo-os perderem energia para serem capturados pela armadilha.

Para o aprisionamento, é necessário o uso do gradiente de campo magnético gerado por um par de bobinas (quadrupolo) iguais, na configuração anti-Helmholtz, as quais são coaxiais e formadas por espiras. Em cada uma delas circula corrente com a mesma amplitude mas em sentido opostos, resultando em campo magnético zero no centro do sistema que cresce linearmente em todas as direções que fazem o campo magnético necessário para confinar os átomos na câmara.

A ideia dessa armadilha é usar o deslocamento Zeeman devido ao campo magnético e o momento angular da luz circularmente polarizada para produzir uma força restauradora que empurra os átomos para o centro da armadilha. O número de átomos aprisionados e o tamanho da nuvem dependem dos parâmetros da armadilha, tais como: gradiente de campo magnético e intensidade dos feixes de luz.

2.2 Objetivos

Trabalharemos com a parte magnética do experimento, que consiste na transição de átomos frios de Estrôncio entre as armadilhas magneto-óticas (MOT) azul e vermelha. Iremos gerar o campo magnético e a mudança do Mot nas bobinas.

O Mot azul, que é o primeiro nível de resfriamento, tem o gradiente de campo magnético de cerca de 70 G/cm, e o segundo que é o MOT vermelho, requer gradiente em torno de 5 G/cm.

Depois dos átomos serem aprisionados e resfriados no Mot azul, a amostra é transferida para o segundo Mot, onde a amostra resultante será ainda mais fria. Devido às altas diferenças de temperatura das amostras, a mudança do MOT azul para o MOT vermelho deve

ser feita suficientemente rápida (na ordem de μs), para evitar que átomos aprisionados do Mot azul escapem.

Mudar o gradiente de campo em um curto período de tempo é um grande desafio, pois envolve uma mudança brusca de intensidade de corrente através das bobinas em pouco tempo, mudando de 9A (corrente usada para o Mot azul) para 1A (corrente usada para o Mot vermelho).

Para isso, foram feitos circuitos que seriam utilizados para controlar todas essas etapas de transição, que são os chamados de circuitos de controle.

3 Caracterização das Bobinas

Foi construído um par de bobinas para a Armadilha Magneto-Ótica com as seguintes especificações: base de metal com raio interno de 37mm, raio externo de 54mm, largura de 26,5mm e 160 voltas de fio de cobre.

O sistema de bobinas será usado na configuração da Figura 1, onde as bobinas estão ligadas em série e separadas por uma distancia d . A corrente tem sentidos opostos na bobinas criando a configuração de anti-Helmholtz.

Para todos os testes as bobinas foram utilizadas isoladas, sem estarem na armadilha.

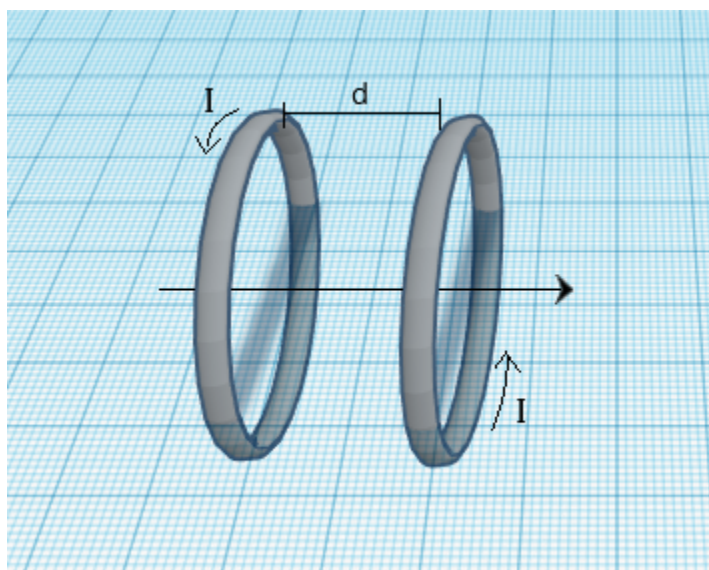


Figura 1: Esquematização do sistemas de bobinas.

3.1 Resistência

Para obter a resistência de cada bobina foi medida a corrente e a tensão nos terminais das bobinas, que variam linearmente.

Nomeando as Bobinas de A e B, temos os seguintes resultados para cada uma delas.

Para Bobina A temos o gráfico da Figura 2, onde os dados variam linearmente. Assim o coeficiente angular da reta é de $0,508 \Omega$ que é a resistência da Bobina A.

Fazendo o mesmo procedimento para Bobina B temos que sua resistência é de $0,493 \Omega$.

No sistema, as bobinas são usadas em série, o que resulta em uma resistência de aproximadamente 1Ω .

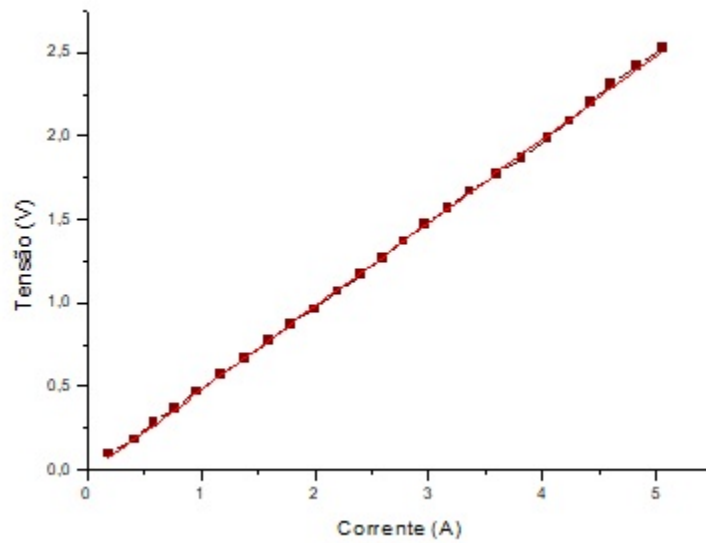


Figura 2: Gráfico de resistência para bobina A

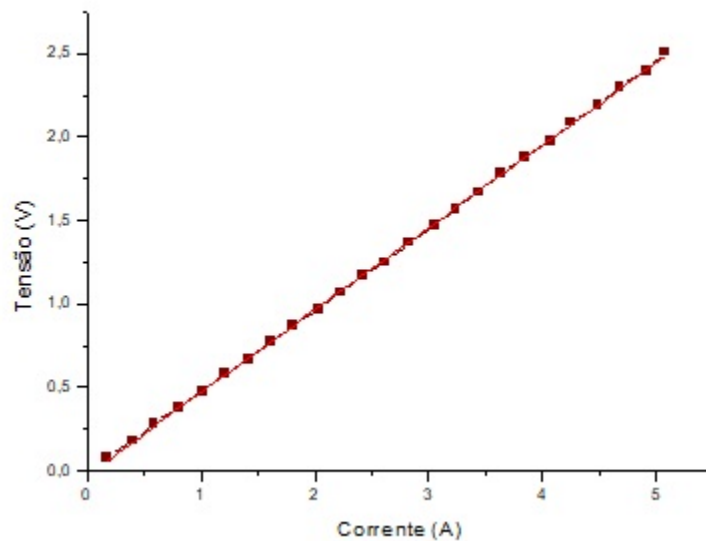


Figura 3: Gráfico de resistência para bobina B

3.2 Temperatura

Para o teste de temperatura, foi ligada a corrente no sistema de bobinas em série e com um termopar media-se a variação de temperatura a medida que aumentava a corrente.

A temperatura foi medida no intervalo de corrente de 1A a 8A. Conforme aumentava 1A,

esperava a temperatura estabilizar e analisava-se a situação.

O seguinte gráfico foi construído com as medidas obtidas.

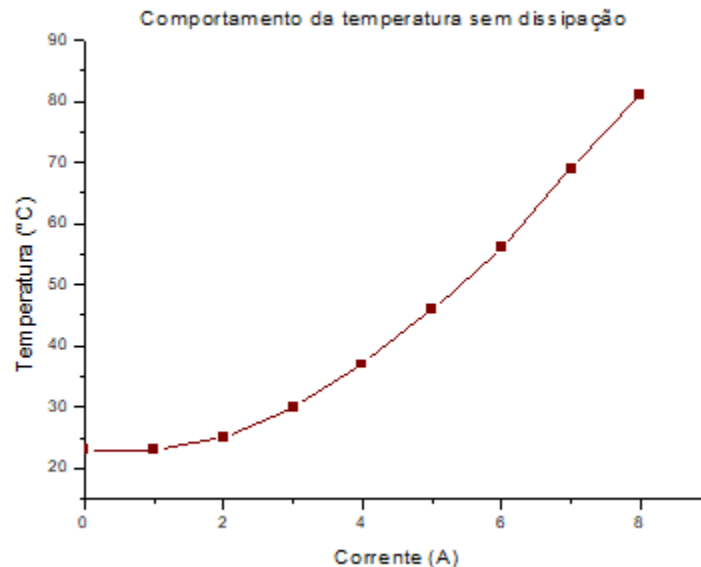


Figura 4: Teste de temperatura.

Assim podemos ver que ao chegar a 8A, a temperatura chegava a 81°C que é crítica ao sistema, não sendo possível nem obter a temperatura para 9A, que é a amperagem utilizada no Mot Azul. Assim, foi necessário um dissipador de calor para que as bobinas não superaquecessem com 9A.

Inicialmente, foi construído um dissipador de cobre, no qual as bobinas seriam apoiadas, transferindo o calor das bobinas para a mesa do experimento que é feita de metal evitando o aquecimento do sistema.

Porém, a dissipação passiva não foi suficiente para evitar o superaquecimento, sendo necessário o resfriamento por água nas bobinas. A água resfriada passa por um tubo de cobre anexado em volta das bobinas. O mesmo ocorreu com o mosfet do circuito de desligamento que, com o aquecimento, acabava queimando. Sendo assim, foi preciso colocar o componente separado do circuito e passar água por ele também.

3.3 Perfil Campo Magnético

Usando uma Hall Probe, foi medido o campo magnético em função da distância em relação ao centro da montagem (eixo de simetria das bobinas que estão a mesma distância que estariam na armadilha), obtendo o seguinte perfil do campo magnético.

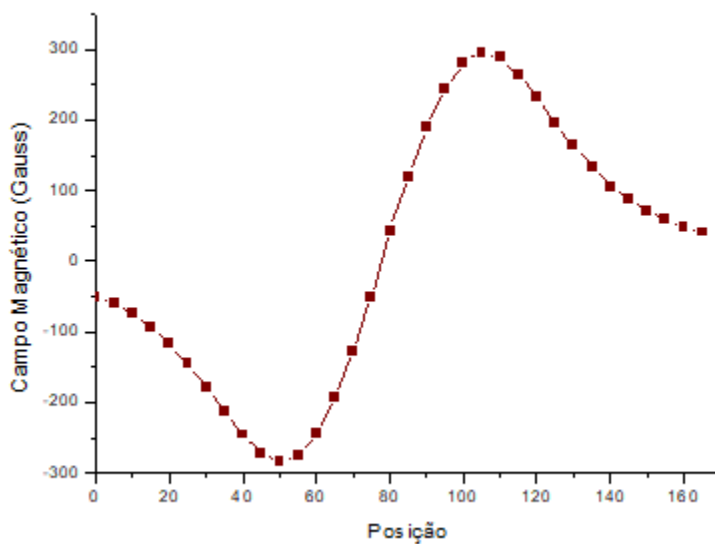


Figura 5: Perfil do Campo Magnético no sistema de bobinas.

Verifica-se, através da Figura 5, que o campo magnético, a partir da região central, varia linearmente, tanto da esquerda quanto à direita até o fim do eixo de simetria entre as duas bobinas e que o seu valor no centro da montagem da bobina anti-Helmholtz é nulo (0 mT), assim como o esperado, pois há a sobreposição de dois campos de mesmo módulo, porém, de sentido contrários.

Após ultrapassar a região entre as duas bobinas, o campo magnético, ligeiramente, aumenta em módulo, pois há a influência apenas de uma bobina, porém, devido à distância volta a decrescer. O gráfico é compatível ao esperado e necessário do comportamento do Campo Magnético no sistema.

4 Construção dos circuitos de controle

4.1 Circuito de desligamento

Como citado na seção 1, a amostra produzida pelo Mot azul tem que ser transferida para o Mot vermelho, ou seja, tem que ocorrer a comutação do Mot nas bobinas. O circuito de desligamento foi o primeiro a ser construído e tem como objetivo desligar o Mot Azul na bobina, para o Mot vermelho ser ligado em seguida. Essa transição leva a um aumento de voltagem muito grande, sendo necessário acrescentar um circuito snubber neste circuito que fornece um meio de descarga mais segura para as bobinas, proporcionando um caminho mais seguro para a passagem da corrente elétrica.

O circuito de desligamento é alimentado por 9A e necessita de um sinal de 15V que alimenta outra plaquinha de controle responsável pelo funcionamento e controle do Mosfet no circuito de Desligamento. Tínhamos esse circuito de controle do mosfet pronto no laboratório, não sendo necessário sua construção.

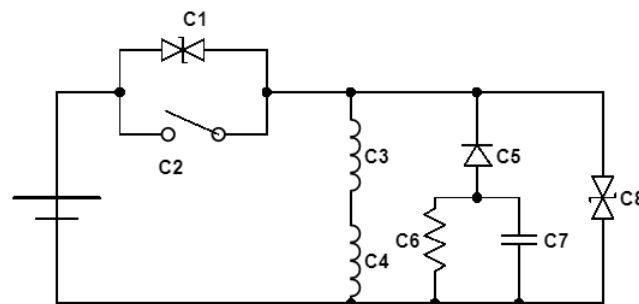


Figura 6: Circuito de desligamento do Mot azul.

Componentes do circuito:

C1: Dois diodos de supressão de 440V e um de 300V

C2: Mosfet SCT2080(1220V-44A)

C3: Bobina A - 2mH

C4: Bobina B - 2mH

C5: Diodo MBR4045WT

C6: Resistor

C7: Capacitor

C8: Quatro diodos de supressão de 300V

4.2 Circuito de Ligamento

É o circuito responsável pelo ligamento do Mot vermelho após o desligamento do Mot azul. O circuito é alimentado por 1A e também precisa de um sinal de 15V para alimentação do controle do Mosfet.

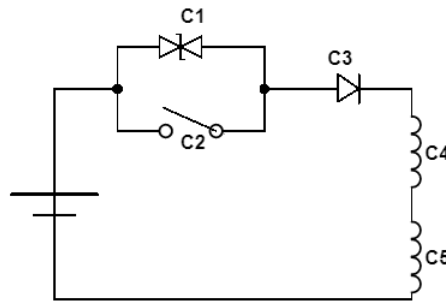


Figura 7: Circuito de Ligamento.

Componentes do circuito:

C1: Dois diodos de supressão de 440V e um de 300V

C2: Mosfet SCT3080(1220V-44A)

C3: Diodo MBR4045WT

C4: Bobina A - 2mH

C5: Bobina B - 2mH

4.3 Circuito de Proteção

Como o esperado, foi necessário a construção do circuito de proteção. Este circuito tem como objetivo garantir a segurança na hora da comutação dos Mots, impossibilitando que as fontes de corrente do MOT azul e do MOT vermelho possam ser ligadas ao mesmo tempo (impede a interferência de correntes inapropriadas entre eles) e evita que o processo de carga e descarga do capacitor ocorram conjuntamente.

Este circuito tem 2 entradas (Red In e Blue In) e uma saída (Red Out) e precisa de uma alimentação de 15V.

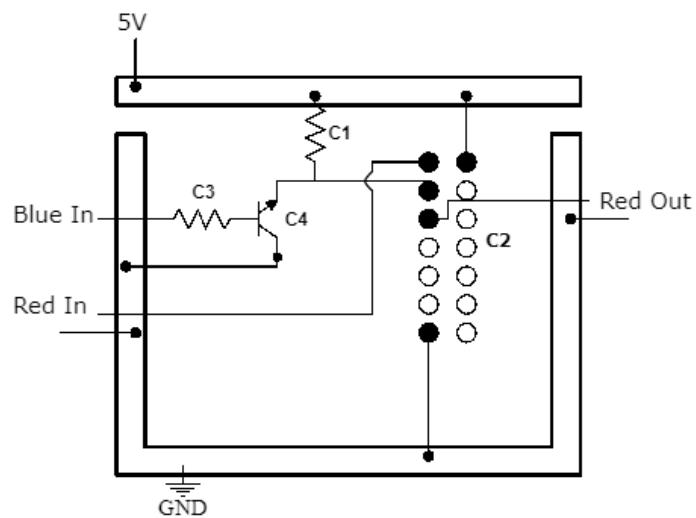


Figura 8: Circuito de Proteção.

Componentes do circuito:

C1: Resistor de $1\text{k } \Omega$

C2: Quadruple 2-input AND gate HEF4081BP

C3: Resistor de $10\text{k } \Omega$

C4: Transistor BC337

5 Caixa de armazenamento dos circuitos

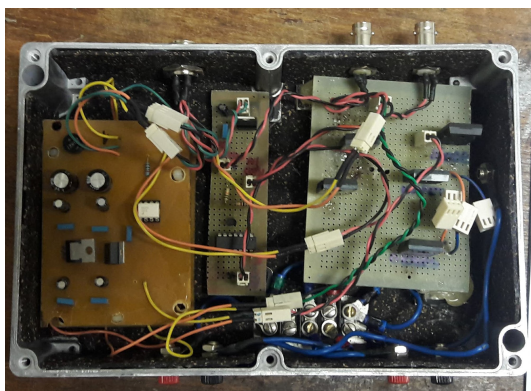
5.1 Construção

Após todos os circuitos serem testados, foi construída uma caixa metálica para abrigá-los afim de organizar e isolar todo o controle das bobinas em um só local e facilitar a conexão de todos os circuitos.

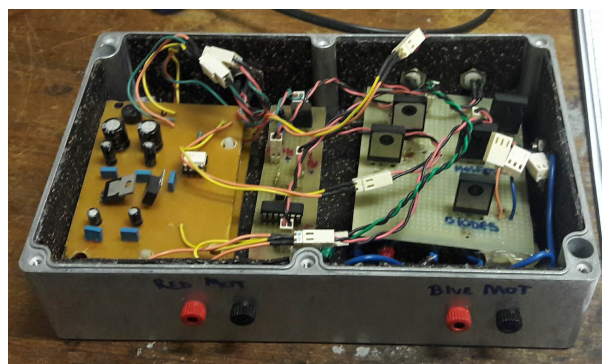
Primeiramente, foram feitos furos na caixa nos quais seriam colocados os conectores de alimentação dos circuitos e as entradas das bobinas que são conectadas ao circuito de ligamento e desligamento.

Em seguida, a caixa foi revestida internamente com cortiça para não entrar em contato com os componentes elétricos por ela ser metálica.

Os circuitos foram organizados da seguinte forma dentro da caixa: em um lado estão as plaquinhas de controle, estando uma em cima da outra; ao meio está o circuito de proteção e do outro lado está a plaquinha que contém o circuito de ligamento e desligamento.



(a) Vista superior.



(b) Vista lateral.

Figura 9: Caixa de controle.

6 Resultados

Como nosso objetivo era obter um tempo de transição na ordem de μs entre os Mots, tínhamos que ter um desligamento do Mot Azul rápido, pois ele decaía com o tempo e não desligava instantaneamente, e após o desligamento tinha um tempo até o Mot vermelho poder ser ligado. Como falado esse intervalo entre a transição de Mots deveria ser suficientemente rápido para que os átomos não escapassem.

Assim iniciamos a otimização do decaimento do Campo Magnético no Mot Azul.

6.1 Otimização do circuito de desligamento

Usando apenas o circuito de desligamento no sistema, inciamos testes experimentais afim de otimizar o tempo de desligamento do Mot Azul. Analisamos a mudança do comportamento do campo magnético ao alterar capacitância e resistência no circuito.

Com o auxilio de um osciloscópio recolhemos dados suficientes para nosso objetivo. Plotamos as curvas de campo magnético ($a\mu$) versus tempo (s) para cada situação, afim de observar o decaimento do campo magnético ao passar do tempo.

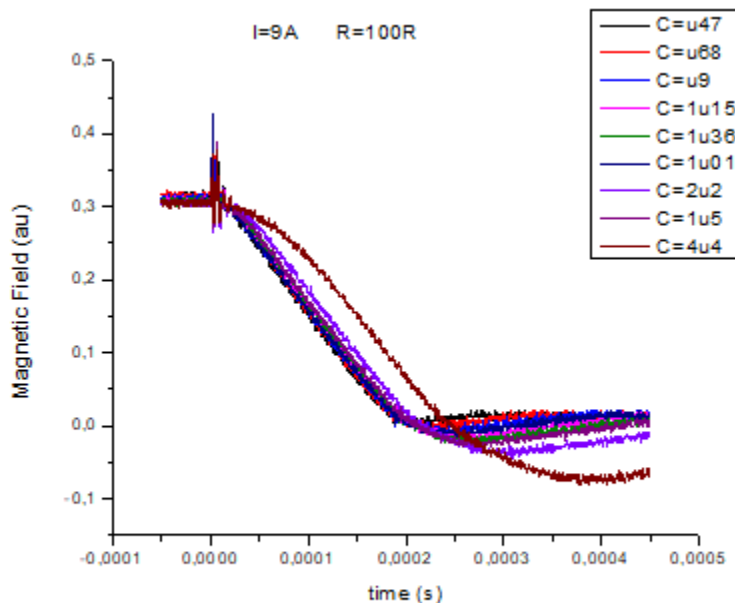


Figura 10: Resistência fixa em 100Ω e variou-se a capacitância.

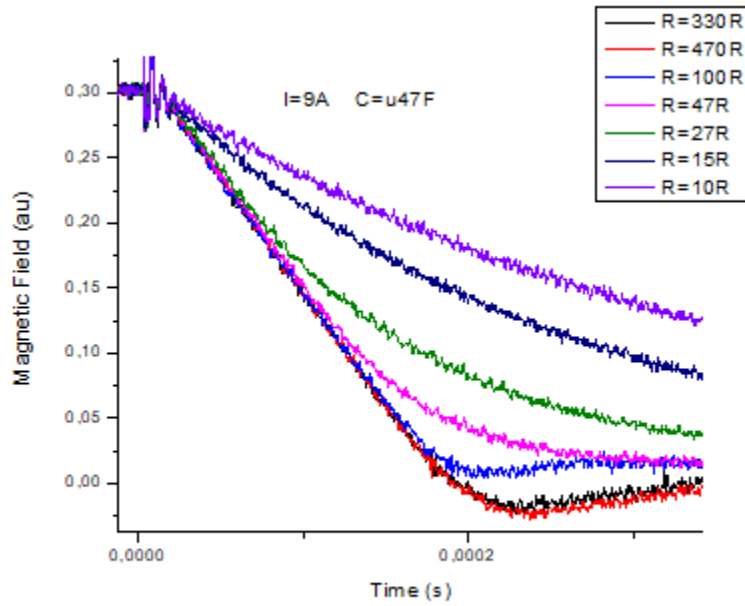


Figura 11: Capacitância fixa em 0.47F e variou-se a resistência.

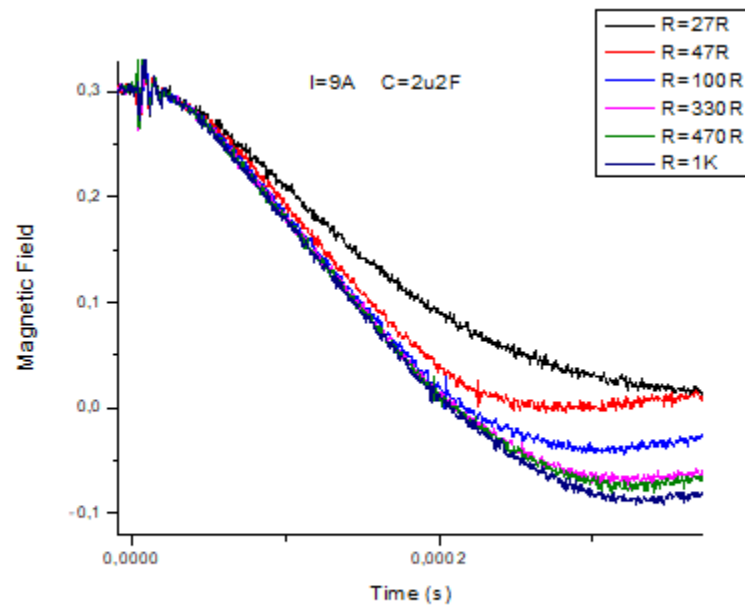


Figura 12: Capacitância fixa em 2.0F e variou-se a resistência.

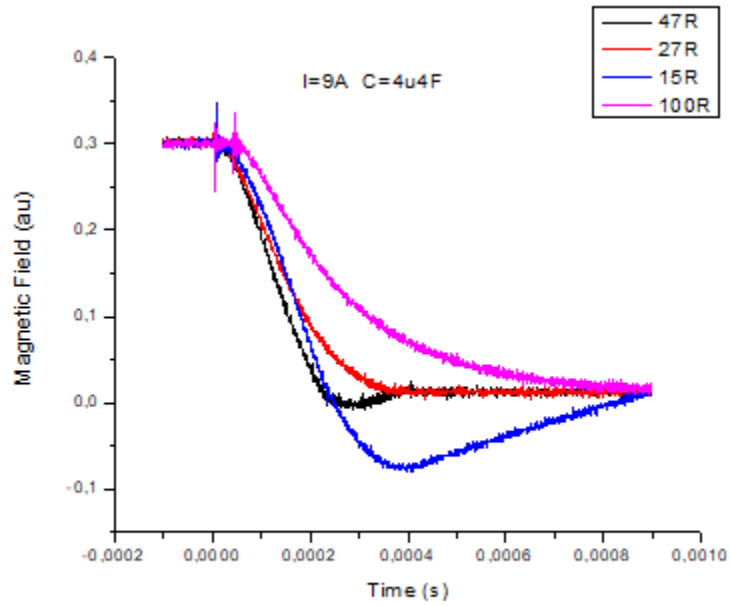


Figura 13: Capacitância fixa em $4\mu\text{F}$ e variou-se a resistência.

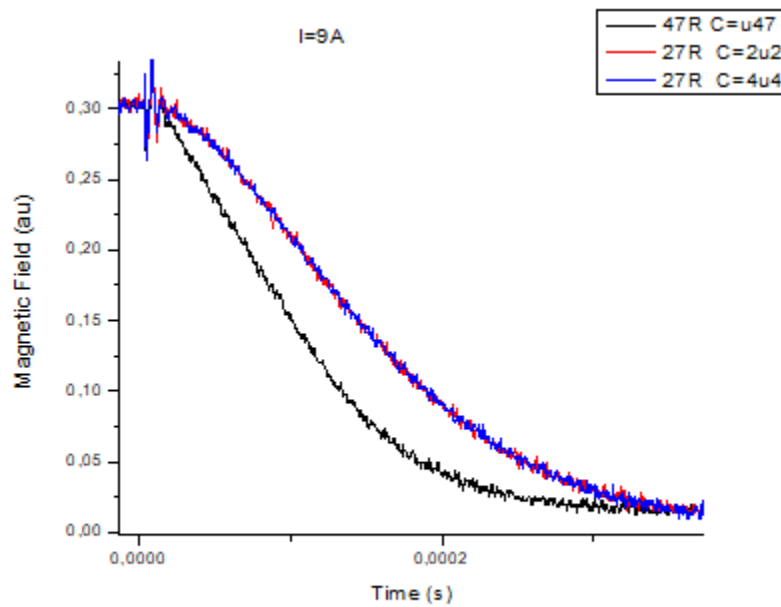


Figura 14: Melhores desempenhos.

Com todas essas curvas obtidas, separamos as que mais se adequavam ao esperado, juntando as curvas de melhor desempenho como mostradas na Figura 14.

Nota-se que utilizando o capacitor de $\mu 47F$ e a resistência de 47Ω a curva decai em $100\mu s$, sendo o melhor tempo comparado aos outros.

Por fim, foi realizado o mesmo teste utilizando os componentes escolhidos incluindo os outros circuitos (Ligamento e Proteção) para analisar se haveria mudanças nos resultados encontrados. Constatamos que não houve alterações.

6.2 Testes finais

Após a otimização do circuito do desligamento, iniciamos o teste para ver o tempo de transição.

Utilizando o sistema de bobinas com todos os circuito conectados, vemos que o tempo de transição dos Mot's nas bobinas chega a $150\mu s$. Este tempo é adequado para o nosso objetivo, concluindo que o experimento prossiga como o esperado.

Assim, com os teste finalizados, as bobinas estavam prontas para serem incluídas no experimento.

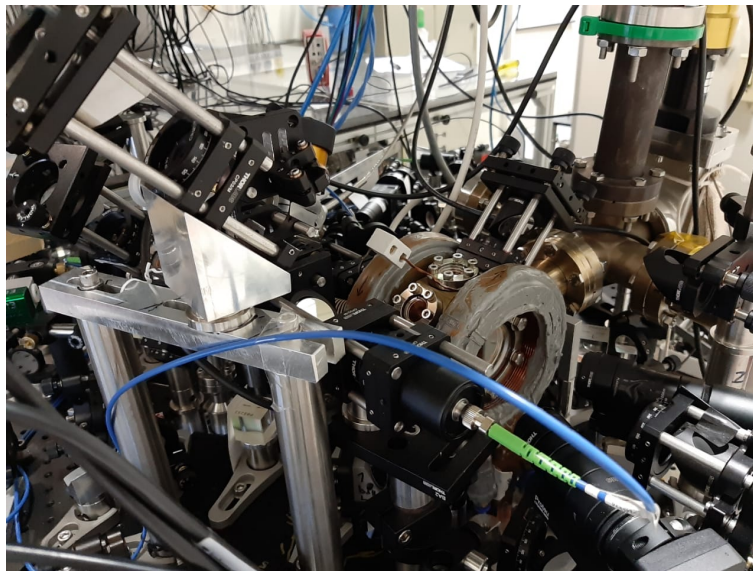


Figura 15: Bobinas no experimento.

Com a parte experimental finalizada, demos início à simulação em Phyton da dinâmica, inicialmente em uma dimensão, de uma distribuição de átomos sob a ação da pressão de radiação dos feixes azul e vermelho na presença do campo variando.

7 Conclusão

O projeto teve como objetivo obter um tempo de transição do Mot azul para o vermelho mínimo possível, na ordem de μs , para isso foi construído circuitos de controles e realizado testes e otimizações dos resultados. Após análise dos dados e teste final, conseguiu-se um tempo de 150 μs . O tempo final alcançado foi o mais satisfatório durante toda a realização do projeto, sendo adequado ao que precisávamos.

Por fim, com as bobinas caracterizadas e testadas, elas foram incluídas no experimento, Figura 15, em que operaram devidamente como o explorado. Mesmo após a inclusão das bobinas no arranjo experimental, as nossas medidas e resultados obtidos continuam condizendo, mostrando a validação dos nossos testes. Assim, como vimos as bobinas e os circuitos produzidos funcionaram adequadamente, cumprindo com os objetivos.

8 Referências Bibliográficas

FIRMINO, Marcel Eduardo.; Construção de um sistema experimental para desaceleração de átomos. *Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.*, 2016.

GOMES, N. D.; CARACANHAS, M. A.; BAGNATO, V. S.; Modelo clássico para resfriamento atômico: Uma forma pedagógica de entender o problema. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 1, p. 1311, 2014.

HE, Hélio Zhang.; Construção de uma armadilha magneto-ótica para aplicações em informação quântica e física atômica. *Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.*, 2009.

JUNIOR, Mosman; DE OLIVEIRA, Edson.; Aprisionamento magnético de um gás neutro de átomos de sódio para a realização da condensação de bose-einstein. *Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.*, 2000.

MIGUEZ, Maria Luiza.; Técnicas de resfriamento e aprisionamento de átomos aplicadas a átomos de estrôncio. *Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.*, 2013.

MILORI, Débora Marcondes Bastos Pereira.; Caracterização de uma armadilha magneto-optica para átomos de sódio em célula de vapor. *Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.*, 1994.

9 Auto Avaliação

Durante a realização desse projeto adquiri muito conhecimento tanto teórico como prático que provavelmente não teria a oportunidade de ver na graduação, sendo muito significativo na minha evolução acadêmica, além de colocar em prática temas já estudados no curso de Física.

Durante todo o período de vigência da pesquisa me dediquei ao máximo nas tarefas no laboratório, conseguindo seguir a programação esperada.



Gabriela Borges Comito

10 Avaliação do Orientador

A aluna demonstrou grande responsabilidade e disciplina na execução do projeto, o que é demonstrado pela sua assiduidade no laboratório e presença nas reuniões marcadas para discussões e testes. Também mostrou boa capacidade de iniciativa na busca por soluções para os diversos problemas que apareciam ao longo do desenvolvimento do projeto. Ainda que não estivessem previstas no projeto, mostrou interesse em compreender e ajudar em diversas outras tarefas do experimento, particularmente na parte de alinhamento ótico. Desta forma, avalio o desempenho da aluna de forma bastante positiva nas diversas habilidades importantes para atividades de pesquisa, destacando apenas sua proficiência em língua inglesa, o que deve ser melhorado futuramente.



Rodrigo Figueiredo Shiozaki

11 Destino da Aluna

A aluna está cursando o terceiro ano de Bacharelado em Física. Depois de concluída pretende ingressar na pós-graduação.