



Projeto de Iniciação Científica (**Universidade Federal de Santa Catarina**)

Período: [2017-2/2018-1](#)

Exploração e montagem de um circuito de controle de Feedback ativo para uso no laboratório de Física atômica (ATOMO LAB)

Departamento: Departamento de Física

Unidade: Centro de Ciências Físicas e Matemáticas (CFM) - UFSC

E-mail: massayuki.kondo@ufsc.br

Página eletrônica: www.atomobrasil.com

Data: 8 de agosto de 2018

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Resumo | 3 |
| 2 | Travamento em frequência de lasers | 3 |
| 3 | Controle de Temperatura de laser de Diodo | 3 |
| 4 | Cronograma do plano de trabalho | 4 |
| 5 | Desenvolvimento | 4 |
| 5.1 | Objetivos | 6 |
| 5.2 | Função de Transferência | 6 |
| 5.3 | Técnicas de elaboração de projeto | 7 |
| 5.3.1 | Simulações Matlab Simulink | 7 |
| 5.4 | Sensores e Atuadores | 9 |
| 5.4.1 | Considerações Teóricas - Calor | 9 |
| 5.4.2 | Transferencia de Calor | 10 |
| 5.5 | Determinação das Funções de Transferência | 12 |
| 5.6 | Determinação das constantes de ganho do PID | 14 |
| 6 | Montagem do projeto | 15 |
| 6.1 | Esquema e PCB do circuito PID | 16 |
| 6.2 | Especificações dos Componentes | 19 |
| 7 | Conclusão | 20 |

1 Resumo

Este projeto tem como principais objetivos a montagem de um circuito de estabilização eletrônico de PID. Utilizado para tarefas específicas, como a estabilização em temperatura de lasers de diodos, células atômicas de vapor, cavidades Fabri-Perot e travamento em frequência utilizando um sinal dispersivo originado de espectroscopia de absorção saturada.

2 Travamento em frequência de lasers

Em trabalhos de excitação de estados quânticos atômicos o travamento em frequência de lasers em diversos comprimentos de onda, expandindo o espectro controlável do infravermelho ao ultravioleta, é importante, pois possuem larguras de ressonância da ordem de alguns Kiloherztz. Para isso, experimentos em física atômica, tanto em resfriamento como aprisionamento [1], bem como a obtenção de estados degenerados bosônicos e fermiônicos utilizam espectroscopias de absorção saturada de transições atômicas. Com isso é possível gerar um sinal dispersivo a partir de uma espectroscopia de absorção saturada por polarização [2], ou utilizando métodos mais complexos como a de modulação e demodulação de bandas laterais de picos de absorção. Um problema fundamental neste tipo de estabilização é a restrita modulação de frequências de apenas algumas centenas de Megahertz ao redor das ressonâncias, obtido com ajuda de moduladores Acusto-ópticos ou de cavidades ultra estáveis. Contudo, o interesse em controlar a frequência do laser ao redor da ressonância em alguns Gigahertz é crescente. Para isso utilizamos o regime de alto campo magnético, também chamado de Paschen-Back [3], que para altos campos magnéticos separa os níveis de energia finos do estado atômico.

Para o confiável funcionamento de um aparato experimental que em como pano de fundo a estabilização ativa de algum parâmetro, é de extrema importância a utilização de circuitos eletrônicos ou de *feedback* que corrigem em tempo real o desvio de certo sinal alvo de um sinal de erro [4]. O melhor exemplo de um dispositivo para esta finalidade é a de um circuito analógico conhecido como PID, onde P é a parte proporcional, I a parte Integradora e D a derivativa do circuito. Esse circuito é largamente utilizado em laboratórios de física atômica ao redor do planeta [5]. Um sinal dispersivo gerado por espectroscopia é utilizado para alimentar o circuito, um sinal de controle gerado é utilizado para correção dos desvios. Com isso podemos estabilizar a frequência dos lasers experimentais com pouca variação de seu comprimento de onda.

3 Controle de Temperatura de laser de Diodo

Lasers baseados em semi-condutores (Diodos) são largamente utilizados em experimentos de física atômica, já que possuem funcionamento relativamente simples. Uma corrente elétrica é bombeada por um fotodiodo que emite luz, gerada pelo acoplamento dos elétrons da camada de valência à camada de condução. Esse processo gera luz em um largo intervalo de comprimentos de onda. Para a criação do Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) é necessário que superfícies refletoras filtrem parte da luz emitida, retrorefletindo a maior parte da luz de volta para o diodo (cavidade do diodo). A adição de uma grade de difração externa a cavidade do diodo seleciona um comprimento

de onda específico, que ao ser reinjetado na cavidade do diodo gera o fenômeno da inversão de população dos estados quânticos eletrônicos. O conjunto entre inversão de populações e da disponibilidade de fótons coerentes na cavidade faz com que o sistema apresente o chamado decaimento forçado (induzido) no mesmo comprimento de onda que os fótons de injeção. Esse sistema é conhecido como uma montagem ECDL (*External Cavity Diode Laser*) emitindo luz num comprimento de onda quase puro, normalmente a largura de linha desse tipo de laser é de centenas de Kiloherztz.

Contudo, o semi-condutor sofre forte influência das variações de temperatura do ambiente, já que a separação entre os níveis de energia entre as camadas de valência e condução são fortemente dependentes da temperatura, ou seja, se a temperatura muda, também se altera a frequência (energia) de emissão do laser. Para evitar essa variação um circuito eletrônico é utilizado, o sinal de erro é dado entre a temperatura alvo e a temperatura medida em tempo real da montagem. Um sistema PID estabiliza ativamente o sistema, fazendo com que o comprimento de onda permaneça estável, estando sob ação apenas de *driftings* de longos intervalos temporais.

4 Cronograma do plano de trabalho

Este plano de trabalho contempla um período de projeto de doze meses com início no mês de agosto de 2017. Abaixo segue um cronograma das atividades propostas, dividido em quatro trimestres, e seus respectivos objetivos específicos.

- **Agosto, Setembro, Outubro** → Revisão bibliográfica dos sistemas de controles utilizando circuitos analógicos e digitais de PID, utilizados em física.
- **Novembro, Dezembro, Janeiro** → Desenvolvimento de circuito analógico de PID, para controle de estabilização de temperatura com flutuação menor que 0.1° Celcius. E sistema para travamento em frequência de laser de diodo com flutuação menor que 200 *Khz*.
- **Fevereiro, Março, Abril** → Montagem física dos circuitos com eletrônica embarcada em módulos.
- **Maior, Junho, Julho** → Testes de travamento e utilização para estabilizar a temperatura de laser de diodo de 852 nm ECDL.

5 Desenvolvimento

A partir do livro de engenharia do Prof. Ogata [6], estou desenvolvendo a revisão bibliográfica dos sistemas de controle para início do projeto PID.

Para o projeto do atuador PID, será seguido o fluxograma de projeto abaixo onde cada caixa corresponderá a um esforço de projeto.

Inicialmente com recursos computacionais, como Matlab, serão feitas simulações para que se estabeleçam os melhores parâmetros de sensoriamento e atuação.

Estando os mesmos de acordo os componentes de mercado e de acordo aos equipamentos onde será instalado o sistema, passará a ser montado um protótipo.

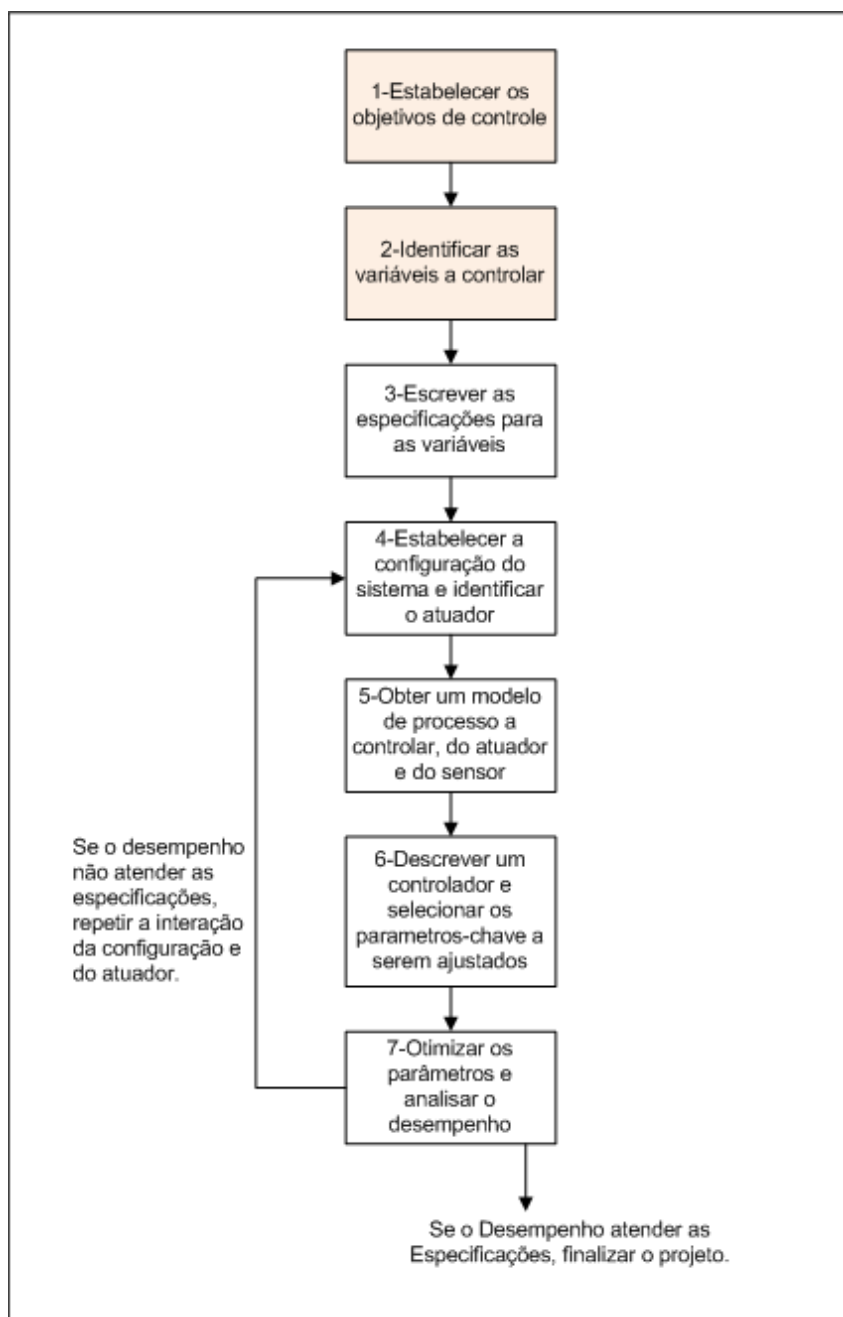


Figura 1: Organograma de Projeto

Conforme o fluxograma do projeto, os itens 1 e 2 já estão em desenvolvimento e para próxima semana será mais especificado cada um deles.

5.1 Objetivos

O objetivo deste circuito vem a ser a estabilização da temperatura do *LASER* na temperatura ajustada dinamicamente durante um ensaio de análise de amostras atômicas. Como já descrito no resumo deste projeto, durante o processo a própria construção do *LED* que emite o *LASER* se aquece e este aquecimento altera as características do ajuste e desta forma necessita de um dispositivo de ajuste dinâmico.

Em sistemas de automação o circuito de *PID* vem a ser o adotado para este tipo de controle. Uma vez ajustado o set point do *LASER* e com o aquecimento decorrente do tempo de uso, o controle *PID* deve, estar projetado em um ajuste de amortecimento crítico para mater o set point.

No equipamento está se pensando em usar um sensor de temperatura *AD 590* (características na lista de equipamentos) o qual já se tem conhecimento da adequação e que irá gerar o sinal de aquecimento que será convertido em um sinal de erro que será tratado pelo *PID* que fará a compensação mantendo o set point.

5.2 Função de Transferência

Para elaboração do sistema *PID* que tenha a performance desejada, mantendo o equipamento *LASER* nos parâmetros de operação desejados usarei as técnicas de Engenharia de Controle para modelar o sistema através das equações de transferência do sistema.

Para elaborarmos a Equação de Transferência para o sistema temos que seguir o seguinte diagrama de blocos genérico:

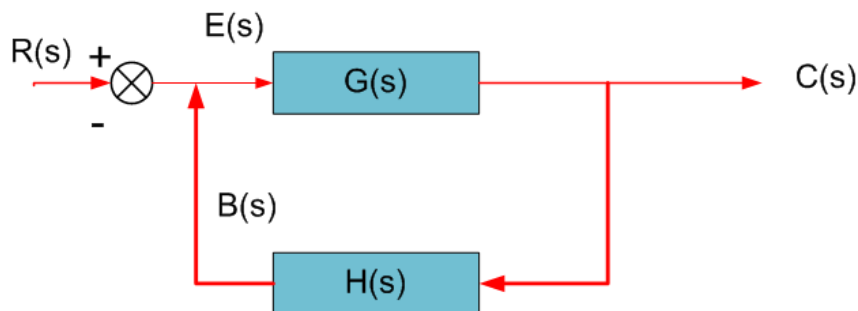


Figura 2: Diagrama de Bloco Func. Transferência

Assim para esse diagrama de blocos, podemos formular a seguinte equação:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

Ainda referente ao cronograma do processo, após termos identificado as questões 1 e 2, do organograma da figura 1, e conhecendo os dados genéricos de uma função de transferência, passamos a tratar de escrever as especificações das variáveis desta equação de transferência (item 3 da mesma figura).

É necessário que se tenha bem estudada e planejada tal função, para obter um sistema de alta performance em sua aplicação. Dispondo deste conhecimento, o mesmo sirva para novas implementações e garanta que ao se necessitar de alterações tenha-se todo o histórico e o tratamento analítico do processo de projeto.

Tecnicamente, que vem a ser a importância maior neste trabalho o sistema tendo sua *Função de Transferência* garante que o sistema atenda as necessidades do projeto com a máxima precisão, pois no decorrer do projeto, caso haja necessidade, esta Função pode ir sendo alterada e melhorada a cada avanço.

5.3 Técnicas de elaboração de projeto

Para este projeto, vou usar as ferramentas de software, como *Matlab®*, que será usado nos cálculos matemáticos para equilibrar o equipamento *PID* obtendo o melhor arranjo matemático para o mesmo, simulações do sistema em geral. Após determinado as melhores condições matemáticas para o sistema passa-se para a elaboração do circuito elétrico que pode ser projetado, montado e ensaiado no aplicativo *Eletronic Workbench®*, que desta forma evita danos em componentes elétricos e diminui os custos do projeto devido a estas ocorrências.

Assim que efetivado o melhor esquema elétrico do circuito elétrico e o mesmo tenha sido efetivamente montado e ensaiado em laboratório, passa-se a prototipagem da placa de circuitos e para tal, pode ser utilizado o Software *Electronics Rapid Prototyping - DesignSpark PCB 8.0®* que elabora a placa de circuitos e deixa pronta para prototipagem.

Para documentação do trabalho estou usando o editor de textos para \LaTeX o *Texmaker®*.

5.3.1 Simulações Matlab Simulink

O programa *Matlab®* dispõe de um ambiente de simulações (Simulink) que possibilita através de montagem de diagramas de blocos que contenham funções, elementos de circuitos, modelagens, etc. fazer simulações matemáticas desses sistemas e auxiliar o projetista encontrar a melhor situação do projeto em execução.

No nosso caso será usado para promover o melhor resultado de ajustes para os parâmetros de ganho do sistema *PID*.

As informações e instruções de uso deste aplicativo estão sendo tiradas do livro da própria *Matworks®* [7]. Para o ilustrar a utilização pretendida do aplicativo Simulink, abaixo temos uma figura de um esquema de blocos para um sistema utilizando *PDI*:

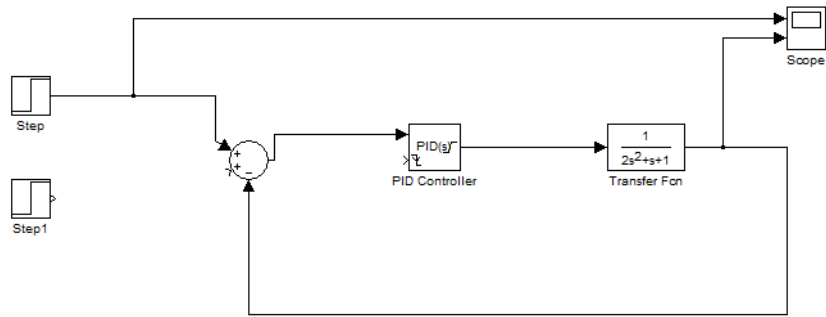


Figura 3: Diagrama De Blocos - Simulink

Ensaiaando esse circuito no aplicativo, temos como resultados os gráficos abaixo, sendo que no primeiro temos um pulso de 5V em 20s e vemos a resposta para os parâmetros do *PDI* sem ajuste correto que pode-se ver apresentar oscilações antes de equilibrar o sinal:

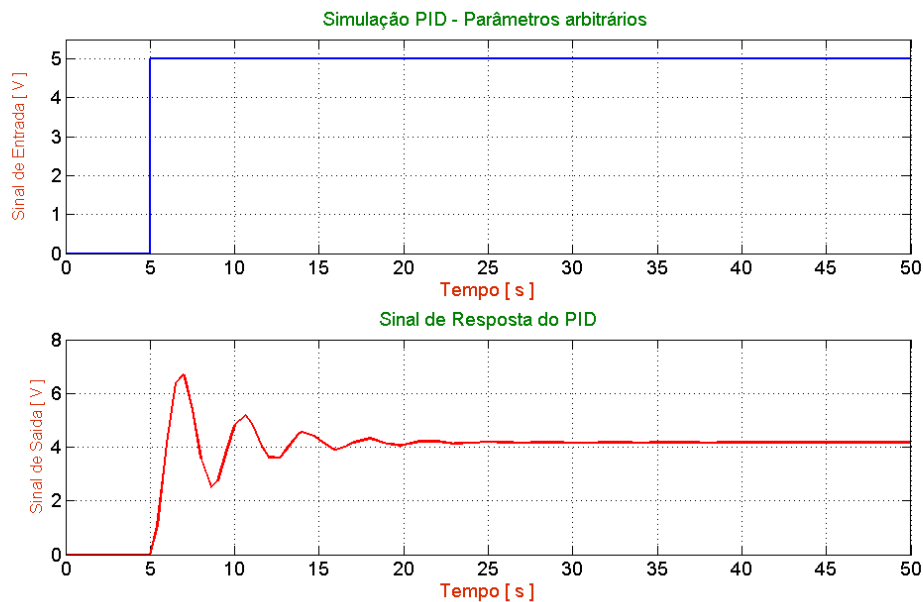


Figura 4: Gráfico - Ensaio 01 sem parâmetros

Neste próximo gráfico, temos o mesmo circuito acima sendo ensaio com os parâmetros sugeridos pelo aplicativo Simulink, onde podemos ver uma resposta melhor para o sistema para as mesmas condições do gráfico acima:

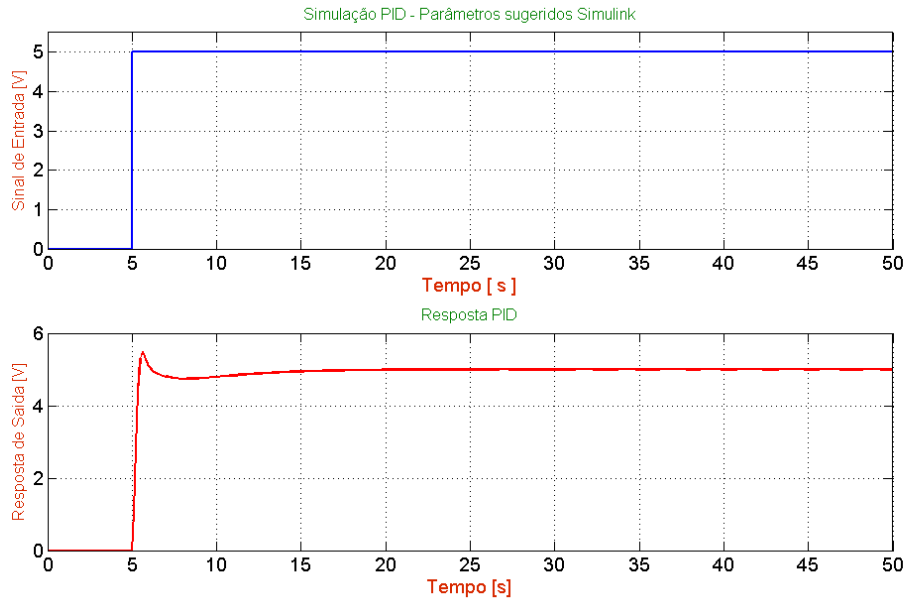


Figura 5: Gráfico - Ensaio 02 com parâmetros corrigidos

Assim com auxílio destes recursos, poderemos obter um sistema *PDI* com bons parâmetros de resposta para podermos passar para simulações de circuitos e finalmente montagem do protótipo tentando corrigir possíveis desvios.

Isso faz que se ganhe tempo e possa obter maiores informações antes mesmo de se necessitar montar um circuito genérico para testes.

5.4 Sensores e Atuadores

Conforme exposto nos objetivos desse trabalho, o sistema deve atuar para manter uma determinada temperatura de operação do equipamento *LASER*. Desta forma, teremos em nosso circuito sensores, que no caso serão de temperatura e atuadores que provocarão redução da temperatura do equipamento.

Em nosso projeto, teremos como equipamento sensor o dispositivo AD 590 que fará a medição de temperatura e será usado na geração de sinal de erro do dispositivo *PID*.

Como atuador para redução da temperatura e manutenção do *setpoint* será usado um circuito *Peltier*.

Mais descrições de elementos do circuito do dispositivo serão dadas no decorrer deste projeto.

Para estes elementos de circuitos, deveremos formular as *Equações de Transferência* para que possamos inseri-las no ambiente de simulação e verificar quais as melhores condições de circuito para, então, iniciarmos o projeto elétrico do circuito.

5.4.1 Considerações Teóricas - Calor

Em termodinâmica, calor é o processo de transferência de energia em que esta é transferida de um sistema para outro devido ao contato térmico e a uma diferença de temperatura. O termo energia térmica é utilizado para definir a energia de um corpo que aumenta com a

temperatura. Temperatura é uma medida da energia interna ou entalpia e está associada ao grau de agitação das moléculas.

A partir deste conceito, vamos inferir os termos matemáticos que serão necessários para nosso propósito de elaborar as Equações de Transferência.

Passemos a estudar como se dá a condução térmica entre materiais pois isso vem ser a essência de nosso sistema em estudo.

5.4.2 Transferencia de Calor

É um fenómeno de troca de energia que ocorre naturalmente onde o fluxo de energia percorre um corpo de maior temperatura para um corpo de menor temperatura até que ambos atinjam o equilíbrio térmico.

1. Condução

Na condução existem duas superfícies em contato que devido ao gradiente de temperatura promovem o equilíbrio térmico sem que haja troca de matéria entre estas superfícies.

Temos a *Lei de Fourier* que nos dá a taxa de transferência de calor através de uma superfície S é proporcional à sua área e ao gradiente de temperatura sobre a mesma, dada pela equação:

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx}$$

$\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura na direção perpendicular à superfície dado em K/m.

Quando utilizamos as propriedades de condutância e resistência térmica dos materiais, temos a seguinte equação para *Lei de Fourier*:

$$\frac{dQ}{dt} = -U\Delta T = -\frac{\Delta T}{R}$$

onde U é a condutância do material e R é a resistência.

2. Convecção

Convecção é a transferência de calor devido ao deslocamento da matéria, mais especificamente, o movimento de fluidos. Este fenómeno será estudado aqui pois teremos o *heatsink* (dissipador de calor) que vem a ser regido por essa condição de troca de calor.

- *Convecção natural*: Quando o deslocamento do fluido é causado pelo empuxo resultante de uma diferença de densidade, causada por variações na temperatura do fluido.
- *Convecção forçada*: Quando o fluido é forçado a se deslocar por um dispositivo externo como um ventilador ou bomba.

Assim temos que pela *lei de Newton* para o resfriamento diz que a taxa de transferência de calor de um corpo, devido à convecção, é proporcional à diferença de temperatura entre o corpo e o ambiente e à sua área de contato.

$$\frac{dQ}{dt} = hA\Delta T$$

Onde:

$\frac{dQ}{dt}$ é o fluxo de calor em Watts, ou seja, a quantidade de calor por unidade de tempo que deixa o corpo;

h é o coeficiente de transferência térmica dado em W/m^2K ;

ΔT é a diferença entre a temperatura do corpo e a temperatura ambiente K.

3. Efeito Termoelétrico

É o efeito gerado através da aplicação de uma diferença de potencial elétrico em um elemento de circuito que converte diretamente em uma diferença de temperatura neste elemento e vice-versa.

Portanto, dispositivos termo-elétricos podem ser utilizados para gerar eletricidade, medir temperatura, aquecer ou resfriar objetos. Em nosso projeto faremos uso destes elementos de circuito para deles obter 3 dos principais efeitos termo-elétricos:

- **O efeito Seebeck** [8], descoberto pelo físico Estoniano Thomas Johann Seebeck;

O efeito de Seebeck é o princípio de operação dos termopares, dispositivos utilizados para medir temperatura.

Pode ser calculado por:

$$V = (S_A - S_B) (T_2 - T_1)$$

- **O efeito Peltier** [8], descoberto pelo físico Frances Jean Charles Athanase Peltier;

O efeito peltier é o princípio de operação dos dispositivos de refrigeração termo-elétricos. Esse efeito pode ser calculado por:

$$\frac{dQ}{dt} = (\Pi_B - \Pi_A) * I$$

Onde:

Π_A e Π_B são os coeficientes de Peltier para os materiais A e B respectivamente e dependem da temperatura da Junção. Nota-se que se $\Pi_A > \Pi_B$ há geração de calor, caso contrário há absorção de calor.

- **O efeito Thomson** [8], descoberto pelo físico Britânico William Thomson (Lord Kelvin).

Cada um destes efeitos, são utilizados em sensores de temperatura atuadores de resfriamento e/ou aquecimento, em cada um deles será feito o devido tratamento matemático afim de se obter sua respectiva *Equação de Estado*.

Estes efeitos se relacionam com portadores de difusão de cargas em circuitos semicondutores.

4. Módulo Peltier

Módulos de peltier são dispositivos que utilizam o efeito Peltier para transferir calor de um lado frio para um lado quente com a aplicação de uma corrente em seus terminais. São frequentemente utilizados para o resfriamento de dispositivos eletrônicos como CPUs, sensores de infravermelho, manutenção de temperaturas de referência em termopares e refrigeradores. A eficiência de um módulo de peltier depende da quantidade de calor transferida, da diferença de temperatura entre seus lados e da corrente aplicada. Um módulo de Peltier típico é composto de junções tipo P e N do semicondutor Teluro de Bismuto com um metal M como na figura.

Duas junções tipo P e N formam o que se denomina uma junção ou par. O módulo possui várias junções conectadas eletricamente em série 4.

Os semicondutores tipo *P* e *N* e o metal *M* são tais que seus coeficientes de Seebeck obedecem:

$$\alpha_N > \alpha_M > \alpha_P$$

Quando a corrente *I* atravessa cada junção da figura 4, o calor é absorvido nas junções P-M e M-N e produzido nas junções M-P e N-M.

Deste modo, cria-se uma região de absorção de calor (topo) e produção de calor (base). Várias junções são dispostas termicamente em paralelo para amplificar este efeito. O módulo de peltier típico usa também duas pastilhas cerâmicas finas em ambos os lados que fornecem a isolamento elétrica e a rigidez mecânica necessária.

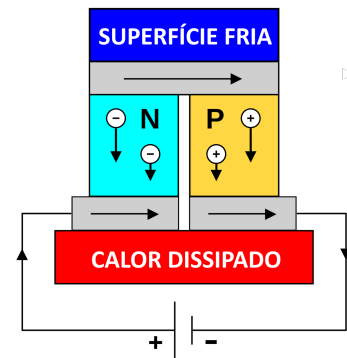


Figura 6: Esquema Pastilha Peltier

5.5 Determinação das Funções de Transferência

Em nosso sistema, para o controle de temperatura do emissor de LASER, temos o seguinte diagrama de blocos:

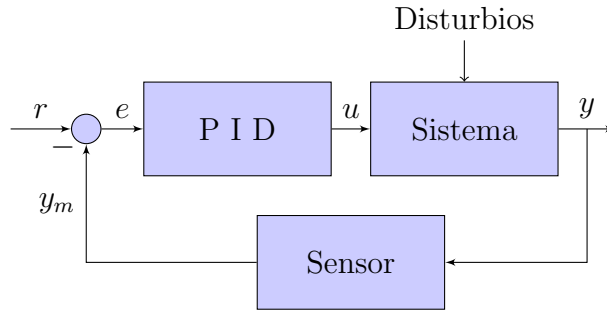


Diagrama de Blocos do sistema com realimentação.

Tendo-se conhecimento do funcionamento básico do bloco *Peltier*, pode-se formular a *Equação de Transferência* deste dispositivo que em nosso projeto atuará utilizando a propriedade de refrigeração para reduzir a temperatura do *LASER* até que se obtenha a temperatura desejada como setpoint.

As propriedades termicas do Bloco Peltier, devem ser analisadas do lado quente e do lado frio, e assim obtemos a *Equação de Transferência*.

Procedendo esta análise chega-se a seguinte equação:

$$(M_F C_F + M_H C_H) \frac{dT_H}{dt} = -\frac{(T_H - T_a)}{R_{th}} - k A_m \frac{dT(x, t)}{dx} + I n \alpha_{PN} T_H$$

Onde temos:

M_F e M_H - São as massas do dissipador e da placa cerâmica respectivamente;

C_F e C_H - São seus calores específicos;

T_H - É a temperatura do lado quente;

T_a - É a temperatura do ambiente;

R_{th} - É a Resistência térmica do dissipador;

A_m - É a área das placas cerâmicas do módulo de Peltier;

$dT(x, t)$ - É a temperatura do semiconductor a uma distância x e instante t ;

I - É a corrente fornecida ao módulo de Peltier;

n - É o número de junções do módulo;

$\alpha_{PN} = \alpha_P - \alpha_N$ é a diferença entre os coeficientes de Seebeck para o semiconductor tipo P e tipo N.

Através do catálogo do fabricante (*data sheet- anexo*) obtemos os dados necessários para o calculo, que resulta na seguinte *Equação de Transferência*:

$$H(s) = \frac{4.5047}{50s + 1}$$

Emissor LASER ECDL

Sabendo-se que sistemas térmicos são sistemas lineares e através de aproximações tomadas da temperatura que pretendemos utilizar o sistema LASER ($T_{uso} = 10^\circ C$), e adotando um tempo τ para que o emissor LASER atinja o valor de 63.2 % do degrau de temperatura, como sendo de 1 segundo teremos a seguinte *Equação de Transferência*:

$$H(s) = \frac{10}{s + 1}$$

Para o sensor de temperatura que utilizaremos no projeto (AD 590), analisando a curva de trabalho o sensor obtemos a seguinte relação:
Variação de temperatura

$$T_{min} = -55^{\circ}C \rightarrow T_{Max} = 150^{\circ}C$$

Variação de tensão (utilizando-se um resistor de $10K\Omega$ para corrente de trabalho do sensor) temos:

$$V_{min} = 2.18V \rightarrow V_{Max} = 4,23V$$

Fazendo-se a relação temos o seguinte ganho:

$$H(s) = \frac{1}{100}$$

Com estas três *Equação de Transferência*, podemos montar o circuito para determinação dos parâmetros do PID para estabilizar a tensão de referência que nos dará a temperatura desejada de trabalho.

5.6 Determinação das constantes de ganho do PID

No aplicativo de simulações do programa *Matlab®*, *Simulink*, cria-se no ambiente de simulações o seguinte diagrama de blocos:

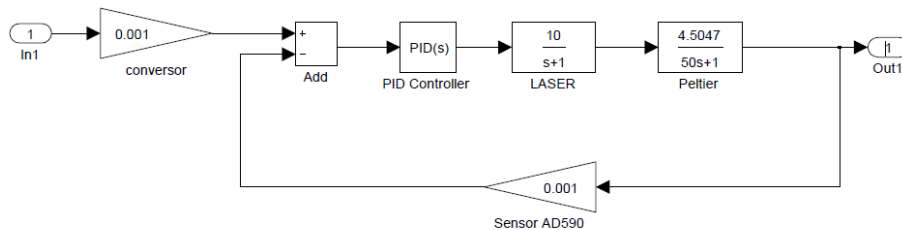


Figura 7: Diagrama De Blocos emissor de LASER

Em seguida executasse a simulação e análise do sistema onde obtemos os melhores parâmetros para os ganhos de Kp (proporcional), Ki (integral) e Kd (diferencial) para os quais a resposta seja mais rápida e atinja o valor de setpoint. Os valores obtidos que melhor operaram o PID no ambiente de simulação do *Matlab®* *Simulink* foram os seguintes valores:

$$K_p = 390; K_d = 11; K_i = 20$$

Para estes valores, a resposta bem rápida e com o valor de set point parametrizado em Volts [V], podemos adotar uma larga faixa de ajustes de temperatura. Seguem os dados obtidos da simulação:

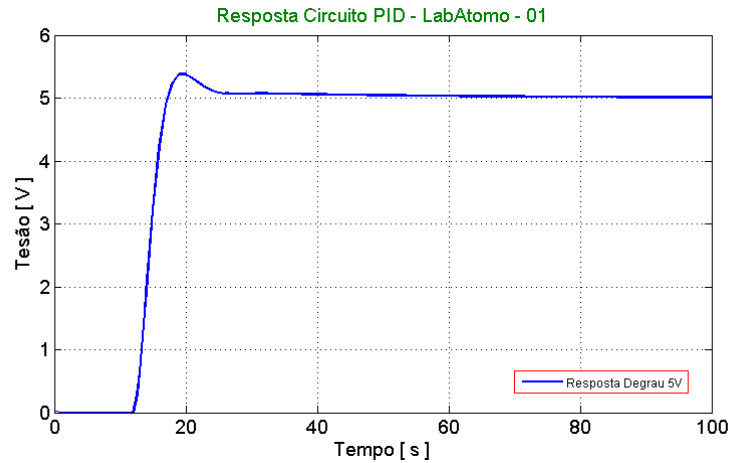


Figura 8: Curva de resposta ao degrau de 5V - Set point

Com estes ajustes de ganho obtidos através da simulação, temos os seguintes valores para os resistores e capacitores do circuito, utilizando-se de valores comerciais temos:

Tabela 1: Parâmetros elementos de circuito PID

| Kp | Ki | Kd |
|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| $R_1 = 1K\Omega$ | $C_2 = 47\mu F$ | $C_1 = 47\mu F$ |
| $R_2 = 390K\Omega$ | $R_5 = 1069\Omega$ | $R_4 = 75k\Omega$ |
| $R_{2comercial} = 220K\Omega$ | $R_5 = 700\Omega$ | $R_4 = 60K\Omega$ |
| $Trimpot = 1volta200K\Omega$ | $Trimpot = 1volta1K\Omega$ | $Trimpot = 1volta10K\Omega$ |

6 Montagem do projeto

O próximo passo do desenvolvimento do projeto, será o de fazer uma montagem do circuito para testes e verificar se o circuito projetado atende aos requisitos solicitados.

Para tal será necessário a seguinte lista de material:

Tabela 2: tabela material

| Lista de componentes para montagem de circuito PID - Lab Atomo | | | |
|--|-----------------|------------|---------------------|
| Componente | Parametro | Quantidade | Obs |
| Trimpot | 1 volta 200K | 2 | |
| Trimpot | 1 volta 10K | 2 | |
| Trimpot | 1 volta 1K | 2 | |
| Resistores | 220 k | 2 | |
| Resistores | 68 K | 2 | |
| Resistores | 10 K | 2 | |
| Resistores | 1K | 10 | |
| Resistores | 100K | 4 | |
| Resistores | 560K | 4 | |
| Capacitores | 47 micro F /25V | 4 | eletrolitico |
| Amp Operacional | LM 741 | 15 | |
| Regulador de Tensão | 7805 | 1 | 78XX sinal positivo |
| Regulador de Tensão | 7812 | 1 | |
| Regulador de Tensão | 7815 | 1 | |
| Regulador de Tensão | 7905 | 1 | 79XX sinal Negativo |
| Regulador de Tensão | 7912 | 1 | |
| Regulador de Tensão | 7915 | 1 | |

6.1 Esquema e PCB do circuito PID

Para o circuito projetado utilizando-se das equações de transferencia (acima) e ensaiado no programa *Simulink* do *Matlab*®, fez-se o esquema de circuito no software *DesignSparks PCB 8.0*®, que possibilita além do esquema de circuito a obtenção da placa PCB.

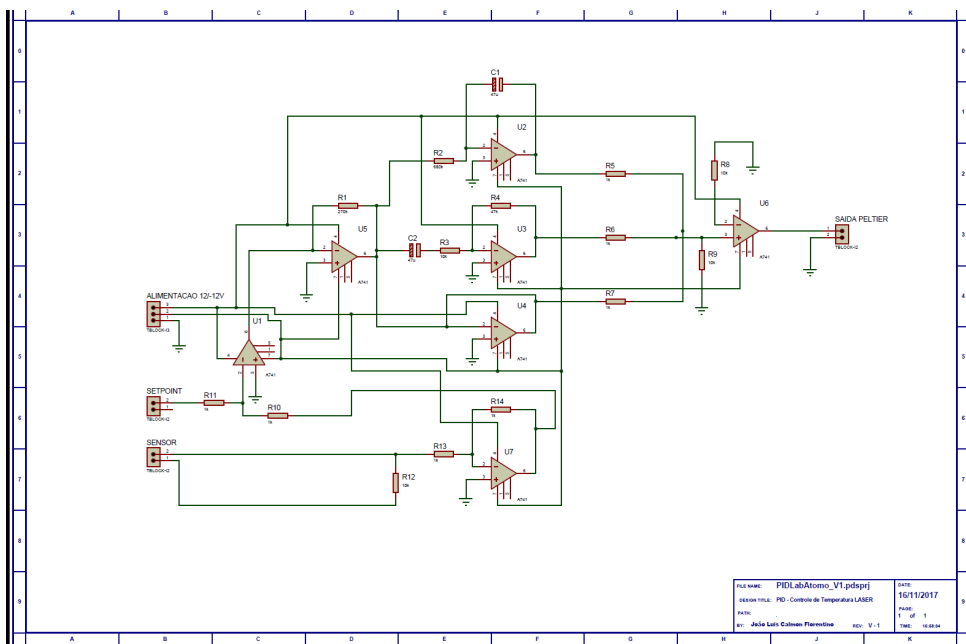


Figura 9: Esquema de Circuito

Esquema: Após a montagem deste esquema no software, fez-se a montagem da placa PCB para este arranjo de circuito.

Este programa, após a elaboração do layout do circuito, possibilita uma visualização da placa montada, que resultou no seguinte layout:

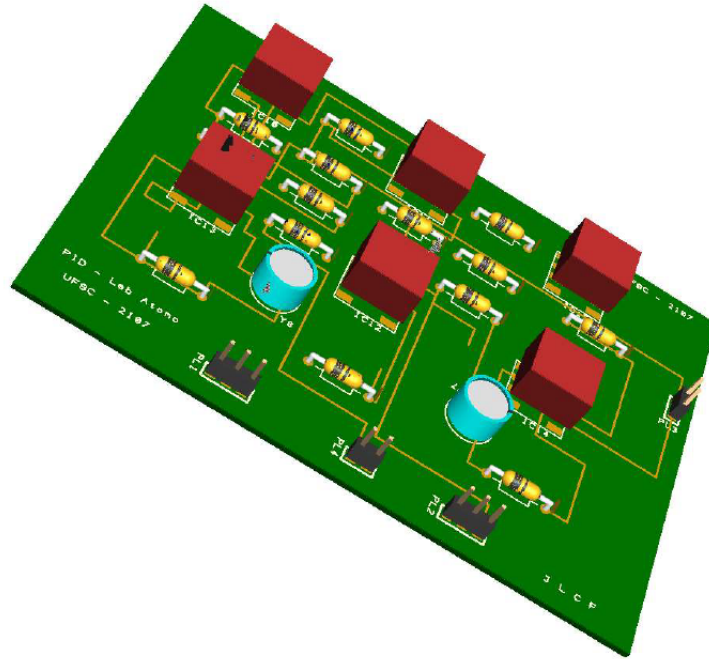


Figura 10: Layout de Circuito

Atualização de Projeto: Durante a montagem do esquema de circuito, encontrei um circuito integrado, o *Power Drive for Peltier - MAX1968-MAX1969* (ver anexos).

Este circuito integrado, vem a ser um *Driver* (circuito dedicado) que fornece a um elemento *Peltier* os parâmetros de polarização necessários para que o mesmo atinja a temperatura ajustada em um *setpoint*.

Foram comprados quatro unidades destes integrados para que se possa estudar o circuito, e através do circuito sugerido no *datasheet* do dispositivo montar o mesmo para testes.

O circuito sugerido pelo *datasheet* funciona da seguinte maneira:

- **Funcionamento Básico:**

O circuito é energizado em 5V, e o modelo que foi adquirido é capaz de fornecer uma corrente de $\pm 3A$. Esta corrente polariza, de acordo a um sinal de *setpoint* o elemento *Peltier* ligado diretamente ao integrado, com uma corrente positiva, ou negativa, o que possibilita a obtenção de temperaturas negativas e positivas no elemento *Peltier*.

Diretamente ao circuito integrado *MAX1968*, também é inserido o circuito responsável pelo sensor de temperatura, o qual, para este projeto, está sendo usado o *AD 590*.

O circuito para este projeto está no anexo, e segue, basicamente, o que está sugerido no circuito do datasheet (anexo) figura 1, no entanto para o circuito de ajuste do set-point, será usado um dispositivo *PIC 16F877A* (Microcontrolador PDIP 40 pinos - características e funcionalidades no datasheet anexo) que reduzirá consideravelmente o número de componentes no circuito de ajuste de setpoint bem como proporciona saídas analógicas que será usado no comando do circuito *MAX1968*. Além disso este Microcontrolador tem um custo reduzido e facilidade de encontrar no mercado (custo aproximado de catorze Reais). Este Microcontrolador é programado via software linguagem C, gravado no dispositivo e pode ser alterado a qualquer instante, para aperfeiçoamento ou mesmo correções e manutenções. A rotina de programação também está nos anexos deste trabalho.

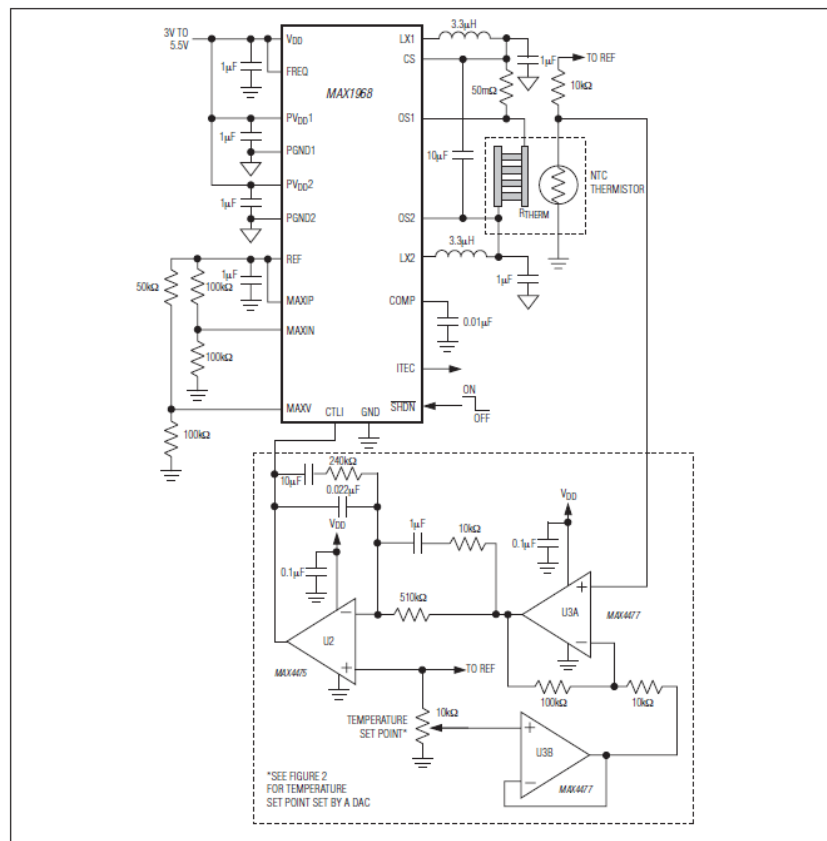


Figura 11: Esquema Datasheet - fig 1

- **Componentes e características do circuito:**

O Circuito projetado terá 02 botões de ajuste de temperatura, de forma digital, iniciando a marcação em zero grau, e após o ajuste desejado, um botão que iniciará o ciclo.

A temperatura ajustada (que será o *setpoint*) será visualizado em um painel de display de 7 segmentos, com marcação de temperatura negativa e 02 dígitos decimais e

02 dígitos para os milésimos formando, por exemplo o ajuste de $-10.05^{\circ}C$ no painel. O dispositivo *MAX1968* possui internamente, em sua implementação, o recurso de *PID*, recurso esse que vinha a ser o objetivo desse trabalho. Este elemento de circuito mantém a temperatura do ajustada no *setpoint*, desta forma não é necessário um circuito paralelo de *PID*. Todas essas características e funcionalidades serão testadas no protótipo do circuito.

Nesta etapa do trabalho, estou usando o *software PROTEUS* © versão 8 profissional para desenvolvimento do esquema de circuitos, testes eletrônicos via software e implementação da placa de PCI.

6.2 Especificações dos Componentes

Para este projeto de controlador automático *PID* será usado componentes eletrônicos discretos composto de amplificadores operacionais, sensores térmicos, bloco Peltier, resistores e capacitores os quais serão especificados no final da montagem de acordo como o *as built*.

Porém, será agora especificado os componentes que serão usados na fase de projeto para obtenção dos parâmetros iniciais do projeto e que serão usados nas simulações no *Simulink*® e *Electrical Work Bench Simulink*®.

1. Bloco Peltier

Este componente será usado com atuador de arrefecimento do sistema *LASER* trazendo a temperatura para o *set point* pré ajustado.

Especificações do fabricante:

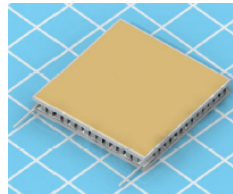


Figura 12: Peltier - Catálogo

Tabela 3: Catálogo Fabricante

| Type | Dtmax K | Qmax W | Imax A | Umax V | AC R ohm | H mm |
|---------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-------------|---------|
| 1MX 06-063-xx (N=126 núcleos) | | | | | | |
| 1MX 06-063-08 | 70 | 18.20 | 6.0 | 7.70 | 1.50 | 1.9 |

7 Conclusão

O objetivo da iniciação científica do *LabAtomo da UFSC*, vinha a ser o desenvolvimento de um sistema eletrônico baseado em atuadores *PID* para controle de temperatura do sistema emissor de *LASER*.

Inicialmente em um projeto de circuito de controle *PID*, há necessidade de se estabelecer uma equação de controle (*Função de Transferência*). Esta *Função de Transferência* procura simular o comportamento do sistema a ser controlado matematicamente. No caso desta pesquisa, o sistema de controle, é basicamente o ajuste (resfriamento) de temperatura do *Emissor de LASER* a ser utilizado no experimento, de acordo a descrição do projeto, e esta *Função* pode ser representada por uma equação linear que corresponde a evolução do aquecimento do sistema.

Após a elaboração da *Função de Transferência*, fez-se um estudo, utilizando o software *Matlab*®, dos termos desta função com o objetivo de estabelecer os parâmetros de controle e simular diversas situações do sistema a ser implementado.

Com a conclusão do estudo matemático do sistema, e obtenção dos parâmetros de controle *P Proporcional*, *I Integral* e *D Diferencial*, o circuito eletrônico pode ser projetado.

O projeto iniciou-se baseado em um sistema que utilizasse circuitos discretos (resistores, capacitores, indutores, diodos, amplificadores operacionais, etc) para implementação do controle *PID*. Com o desenvolvimento da mesma, outras possibilidades de circuitos tornaram-se viáveis.

Durante as pesquisas de componentes a serem utilizados para implementação do circuito, encontrei um circuito que faz o papel de *Drive* de pastilhas *Peltier* e possibilita o controle de uma gama de temperaturas, tanto do lado quente quanto do lado refrigerado, deste elemento atuador, o circuito integrado **MAX 1968** (*Datasheet anexo*). Internamente a este circuito integrado, ele possui um circuito *PID* que gerência a temperatura controlando a mesma até o ponto de ajuste solicitado *set point*.

Para gerenciamento do circuito (ajuste de *set point* e leitura de sensores de temperatura) fiz a opção de utilizar um Microcontrolador **PIC** (*Peripheral Interface Controller*) que utilizando de poucos componentes externos e através de um programa de controle, que após desenvolvido, é gravado no microcontrolador, faria, no caso deste circuito, o controle dos displays de ajuste de temperatura, inserção do sinal no circuito **MAX 1968** bem como a leitura dos sensores de temperatura . O esquema deste sistema pode ser visto na figura 11 deste trabalho.

Este trabalho de pesquisa, proposta para iniciação científica foi realizada no período compreendido entre o segundo semestre de 2017 e primeiro semestre de 2018. Infelizmente a montagem final física do Laser e do controle de temperatura não puderam ser concretizados por falta de verbas para pesquisa. Contudo, um grande esforço teórico levou ao estudo detalhado do sistema de controle e todos os parâmetros de controle do *PID*.

Devo dizer que foi uma grande oportunidade de aprendizado tanto no desenvolvimento de circuitos elétricos como na **Física da UFSC** que me trouxe um conhecimento sobre o futuro laboratório de *Física Atômica* em desenvolvimento na UFSC que tive muito orgulho em ter tido a chance de participar.

Agradeço também as orientações do **Jorge Douglas Massayuki Kondo, PHD** e dos demais colegas ligados ao projeto.

Referências

- [1] Jorge M. Kondo, Luis F. Gonçalves, Jader S. Cabral, Jonathan Tallant, and Luis G. Marcassa. Two-body förster resonance involving $rb\ nd$ states in a quasi-electrostatic trap. *Phys. Rev. A*, 90:023413, Aug 2014.
- [2] Jorge D. Kondo, Nikola Šibalić, Alexander Guttridge, Christopher G. Wade, Natalia R. De Melo, Charles S. Adams, and Kevin J. Weatherill. Observation of interference effects via four photon excitation of highly excited rydberg states in thermal cesium vapor. *Arxiv.org*, <http://arxiv.org/abs/1510.01729v2>, 2015.
- [3] Daniel J. Whiting, James Keaveney, Charles S. Adams, and Ifan G. Hughes. Direct measurement of excited-state dipole matrix elements using electromagnetically induced transparency in the hyperfine paschen-back regime. *Phys. Rev. A*, 93:043854, Apr 2016.
- [4] John Bechhoefer. Feedback for physicists: A tutorial essay on control. *Rev. Mod. Phys.*, 77:783–836, Aug 2005.
- [5] Florian Seidler. Digital high bandwidth feedback controller. Master’s thesis, Institute für Angewandte Physik, Germany, 2015.
- [6] Katsuhiko Ogata et al. Engenharia de controle moderno; tradução paulo álvaro maya; revisão técnica fabrizio leonardi.[et al]. *São Paulo: Prentice Hall*, 12:15–17, 2003.
- [7] Alberto Bemporad, Manfred Morari, and N Lawrence Ricker. Model predictive control toolbox user’s guide. *The mathworks*, 2010.
- [8] BJ Huang and CL Duang. System dynamic model and temperature control of a thermoelectric cooler. *International journal of refrigeration*, 23(3):197–207, 2000.

ANEXOS

LM741 Operational Amplifier

1 Features

- Overload Protection on the Input and Output
- No Latch-Up When the Common-Mode Range is Exceeded

2 Applications

- Comparators
- Multivibrators
- DC Amplifiers
- Summing Amplifiers
- Integrator or Differentiators
- Active Filters

3 Description

The LM741 series are general-purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439, and 748 in most applications.

The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and output, no latch-up when the common-mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

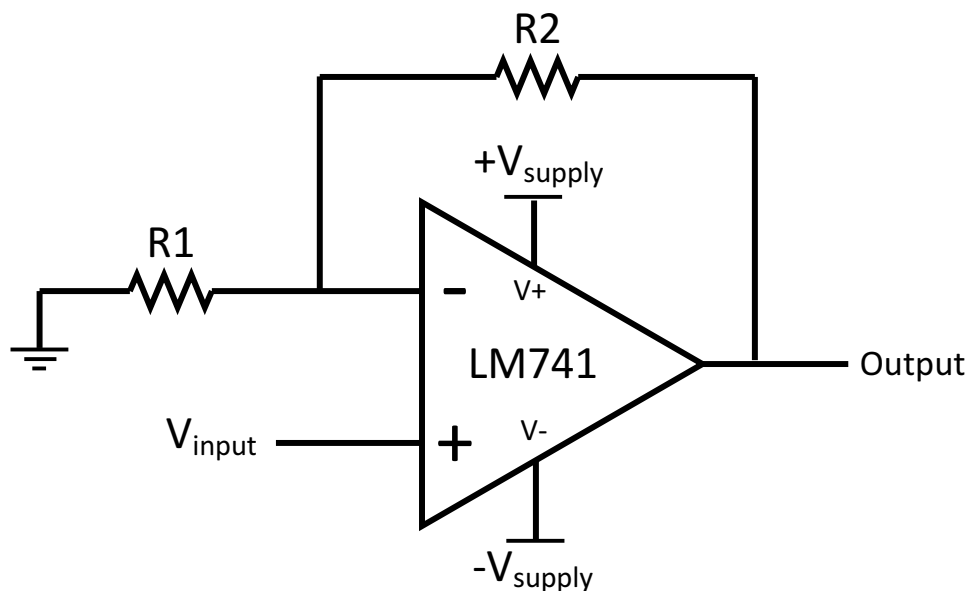
The LM741C is identical to the LM741 and LM741A except that the LM741C has their performance ensured over a 0°C to +70°C temperature range, instead of –55°C to +125°C.

Device Information⁽¹⁾

| PART NUMBER | PACKAGE | BODY SIZE (NOM) |
|-------------|-----------|---------------------|
| LM741 | TO-99 (8) | 9.08 mm × 9.08 mm |
| | CDIP (8) | 10.16 mm × 6.502 mm |
| | PDIP (8) | 9.81 mm × 6.35 mm |

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

Typical Application



MAX1968/MAX1969

Power Drivers for Peltier TEC Modules

General Description

The MAX1968/MAX1969 are highly integrated and cost-effective, high-efficiency, switch-mode drivers for Peltier thermoelectric cooler (TEC) modules. Both devices utilize direct current control to eliminate current surges in the TEC. On-chip FETs minimize external components while providing high efficiency. A 500kHz/1MHz switching frequency and a unique ripple cancellation scheme reduce component size and noise.

The MAX1968 operates from a single supply and provides bipolar $\pm 3A$ output by biasing the TEC between the outputs of two synchronous buck regulators. Bipolar operation allows for temperature control without “dead zones” or other nonlinearities at low load currents. This arrangement ensures that the control system does not hunt when the set point is very close to the natural operating point, requiring a small amount of heating or cooling. An analog control signal precisely sets the TEC current. The MAX1969 provides unipolar output up to 6A. Reliability is optimized with settable limits for both TEC voltage and current, with independently set limits for heating and cooling current. An analog output also monitors TEC current.

The MAX1968/MAX1969 are available in a low-profile 28-pin TSSOP-EP package and is specified over the -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$ temperature range. The thermally enhanced TSSOP-EP package with exposed metal pad minimizes operating junction temperature. An evaluation kit is available to speed designs.

Applications

Fiber Optic Laser Modules
WDM, DWDM Laser Diode Temperature Control
Fiber Optic Network Equipment
EDFA Optical Amplifiers
Telecom Fiber Interfaces
ATE
Biotech Lab Equipment

Pin Configuration and Functional Diagram appear at end of data sheet.

Benefits and Features

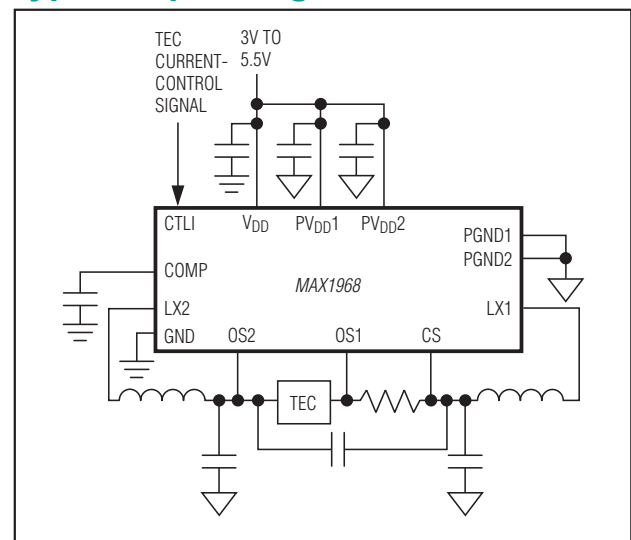
- High Accuracy and Adjustability Improves System Performance by Optimizing TEC Operation
 - Direct Current Control Prevents TEC Current Surges
 - Ripple Cancellation for Low Noise
 - No Dead-Zone or Hunting at Low-Output Current
 - 1% Accurate Voltage Reference
 - Adjustable TEC Voltage Limit
 - Separately Adjustable Heating and Cooling Current Limits
 - ITEC Output Provides Proportional Voltage to TEC Current for Monitoring
- High-Efficiency Switch-Mode Design
 - On-Chip Power MOSFETs Improve Efficiency While Reducing External Components
 - 500kHz/1MHz Switching Frequency
- Choose from $\pm 3A$ Output Current (MAX1968) or 6A Output Current (MAX1969)
- Thermally Enhanced TSSOP-EP Package Minimizes Operating Junction Temperature

Ordering Information

| PART | TEMP RANGE | PIN-PACKAGE |
|------------|--|--------------|
| MAX1968EUI | -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$ | 28 TSSOP-EP* |
| MAX1969EUI | -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$ | 28 TSSOP-EP* |

*EP = Exposed pad.

Typical Operating Circuit





PIC16F87XA

28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers

Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873A
- PIC16F874A
- PIC16F876A
- PIC16F877A

High-Performance RISC CPU:

- Only 35 single-word instructions to learn
- All single-cycle instructions except for program branches, which are two-cycle
- Operating speed: DC – 20 MHz clock input
DC – 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of Flash Program Memory,
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM),
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to other 28-pin or 40/44-pin
PIC16CXXX and PIC16FXXX microcontrollers

Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler,
can be incremented during Sleep via external
crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period
register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
 - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
 - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
 - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI
(Master mode) and I²C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver
Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address
detection
- Parallel Slave Port (PSP) – 8 bits wide with
external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for
Brown-out Reset (BOR)

Analog Features:

- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital
Converter (A/D)
- Brown-out Reset (BOR)
- Analog Comparator module with:
 - Two analog comparators
 - Programmable on-chip voltage reference
(VREF) module
 - Programmable input multiplexing from device
inputs and internal voltage reference
 - Comparator outputs are externally accessible

Special Microcontroller Features:

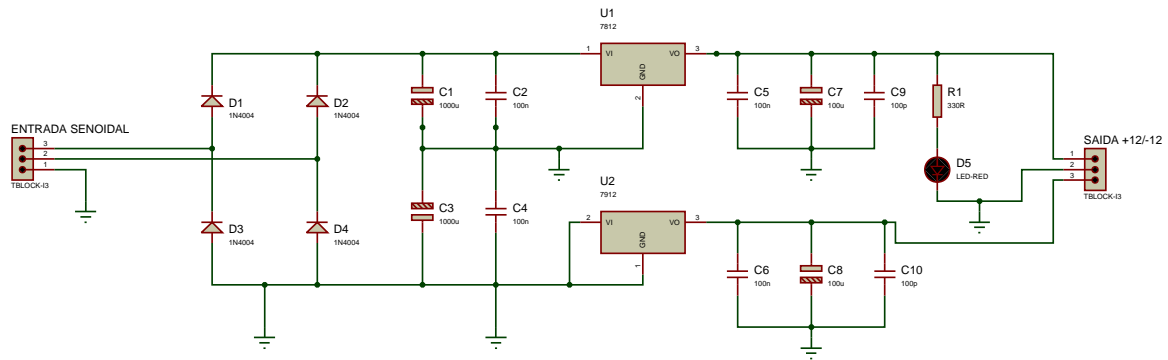
- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash
program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM
memory typical
- Data EEPROM Retention > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)
via two pins
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC
oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving Sleep mode
- Selectable oscillator options
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

CMOS Technology:

- Low-power, high-speed Flash/EEPROM
technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption

| Device | Program Memory | | Data SRAM (Bytes) | EEPROM (Bytes) | I/O | 10-bit A/D (ch) | CCP (PWM) | MSSP | | USART | Timers 8/16-bit | Comparators |
|------------|----------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------|-----|--------------------|--------------|------|----------------------------|-------|--------------------|-------------|
| | Bytes | # Single Word Instructions | | | | | | SPI | Master I ² C | | | |
| PIC16F873A | 7.2K | 4096 | 192 | 128 | 22 | 5 | 2 | Yes | Yes | Yes | 2/1 | 2 |
| PIC16F874A | 7.2K | 4096 | 192 | 128 | 33 | 8 | 2 | Yes | Yes | Yes | 2/1 | 2 |
| PIC16F876A | 14.3K | 8192 | 368 | 256 | 22 | 5 | 2 | Yes | Yes | Yes | 2/1 | 2 |
| PIC16F877A | 14.3K | 8192 | 368 | 256 | 33 | 8 | 2 | Yes | Yes | Yes | 2/1 | 2 |

Fonte de alimentação Simétrica $\pm 12V$ para circuito PID



| | | | |
|---------------|-------------------------------------|-------|------------|
| FILE NAME: | FONTE DE TENSÃO SIMETRICA +12/-12 V | DATE: | 16/11/2017 |
| DESIGN TITLE: | Fonte Simétrica Regulada +12/-12V | PAGE: | 1 of 1 |
| PATH: | | TIME: | 16:43:05 |
| BY: | João Luís Calmon Florentino | REV: | A1 |