



## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Desenvolvimento e análise de Controladores de Atitude de Foguetes de Sondagem  
Bolsista: Mariana de Paiva Lima  
Orientador(a): Dr. Euler C. M. Gonçalves Barbosa  
Período a que se refere o relatório: Fevereiro de 2018 a Julho de 2018

### Resumo

Este documento apresenta os resultados e propostas de desenvolvimento de subsistemas para um simulador de controle de atitude de veículos de sondagem descrito no trabalho de Cunha [1] e Machuca [5]. Descreve ainda as atividades desenvolvidas para o Simulador de Controle de Atitude (SICA) referente ao projeto de iniciação científica do PIBIC/2017. O objetivo é proporcionar uma pesquisa para o desenvolvimento e análise de Controladores de atitude de Foguetes de Sondagem abordado em Wie [2], atualização do sistema de acionamento elétrico em estado sólido e melhorias no projeto eletrônico do simulador SICA do Laboratório de Simulação e Controle (LICS) da Divisão de Sistemas Espaciais, detalhado em Barbosa [3].

A pesquisa consiste em substituir o acionamento dos solenoides atual por um método que tenha uma resposta mais rápida e efetiva e substituir o disco base por uma esfera. Para isso novos atuadores elétricos-eletrônicos são analisados e os resultados da sua implementação são apresentados. A princípio foi realizado o levantamento do esquema elétrico, pinagem dos conectores do simulador para ter mais conhecimento do mesmo, o estudo para encontrar a melhor forma de substituir o circuito de ativação dos solenoides e será feito o carregamento das baterias para teste.

### 1. Introdução

As atividades do projeto foram desenvolvidas no SICA (Simulador de Controle de Atitude) e para entendermos o projeto é necessário o conhecimento de como o simulador funciona. O simulador segundo o relatório técnico <sup>[1]</sup> utiliza ar comprimido para gerar um colchão de ar entre a base de um mancal e uma semiesfera, que pode se mover livremente em torno do eixo X (rolamento) e com limitação de dez graus positivos e negativos nos outros eixos. O SICA

requer fontes de alimentação para o computador de bordo, sensores, relés, sistema wireless bem como módulos existentes em um sistema de tempo-rela denominado CompactRIO, conforme manual da National Instruments [4].

Para alimentar todos os equipamentos é necessário duas fontes de alimentação de 28 V/DC – 5A. Uma fonte é ligada diretamente ao CRIO e ao bloco girométrico, a outra é ligada a uma placa reguladora de tensão que recebe a tensão de 28 V e fornece tensões de alimentação para a placa PCLD de 5 V e 12 V, para o roteador de 28 V e para os solenoides de 24 V.

O roteador será conectado via wireless com um computador que recebe e envia dados para o CRIO. O roteador é ligado ao CRIO através de um cabo de rede. O CRIO possui em sua entrada dois módulos, um módulo analógico (NI 9215) com quatro entradas analógicas de -10V à +10 V. Esse módulo converte os valores para um valor digital de 16 bits. E outro módulo digital (NI 9871) que é responsável por receber as informações do IMU STIM300. Na saída possui um módulo digital (NI 9477) que é responsável por mandar as informações recebidas do bloco girométrico para a PCLD.

O bloco girométrico tem sua saída conectada a um filtro que diminui os ruídos causados pelo bloco girométrico. Na saída do filtro são recebidas velocidades angulares nos três eixos. Essa saída é conectada ao módulo analógico do CRIO que vai converter em bits a informação e sair no módulo de saída digital. Essas informações são de nível lógico alto, porém a PCLD tem entrada em nível lógico baixo, então como solução foi implantado um circuito pull-up que é conectado à PCLD garantindo nível alto para as informações passarem. Assim que a PCLD recebe as informações os relés são chaveados e com isso energiza os solenoides.

Os solenoides comandam a abertura e fechamento de um orifício calibrado. Esse orifício só é ativado se tiver 10 bar de pressão de entrada, sendo assim sai um jato de ar que gera empuxo de 2N de força fazendo com que o SICA se mova.

O SICA hoje têm realizado suas simulações com equipamentos de teste composto basicamente por mancal a ar, por um disco base e por quatro cilindros para armazenamento do ar comprimido, porém surgiu uma nova proposta que consiste em substituir o disco base do SICA por uma esfera, pois a simulação realizada no disco base tem movimento livre em torno do eixo X (rolamento), mas possui limitação de dez graus positivos e negativos nos outros eixos, substituindo o disco base pela esfera não haverá essa limitação de dez graus positivos e negativos nos outros eixos. Para desenhar a esfera será usado como base uma

meia esfera chamada de Air Bearing Unit da VectronicAerospace. Segue abaixo a foto da meia esfera que será usada como base para desenhar a esfera base.

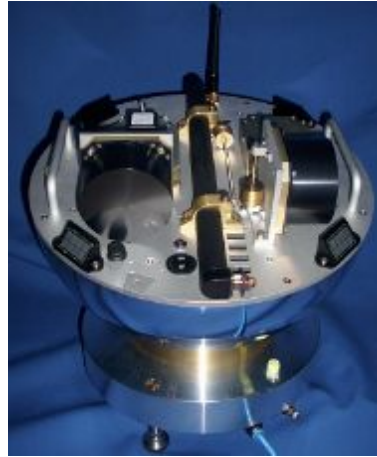


Figura 1 – Mancal a ar da “Air Bearing Unit” (VABU – 12)

A proposta sugere também que o SICA deverá atuar usando a mínima energia possível, para isso será necessário substituir as duas fontes de 28 V/DC – 5A por baterias recarregáveis de níquel-cádmio. Outro fator que ajudará o SICA a operar com mínima energia é a substituição do acionamento dos solenoides.

Atualmente o acionamento dos solenoides é feito através da placa PCLD, que é constituída por dezesseis reles eletromecânicos, porém são utilizados doze desses reles, pois são doze válvulas solenoides atuantes. A proposta de melhoria é substituir os reles eletromecânicos por reles de estado sólido, já que os reles de estado sólido quando utilizados corretamente apresentam diversas vantagens em relação ao eletromecânico. Algumas vantagens em utilizar o rele de estado sólido são: não produz ruído na atuação, não geram interferência por rádio frequência ou eletromagnética na comutação, vida útil e durabilidade maiores, pois não há desgaste de contatos nem partes mecânicas, requerem correntes muito menores para o acionamento e têm menor tamanho físico e o principal, o tempo de comutação é consideravelmente menor.

O SICA possui um driver e dentro desse driver têm a PCLD e um regulador de tensão que faz com que a tensão de 28 V que vem da fonte seja reduzida para 5 V e 12 V alimentando a PCLD e 24 V alimentando os solenoides. Esse driver hoje é representado por uma caixa-preta e essa caixa ocupa bastante espaço no SICA. Com a substituição da PCLD (placa com os reles eletromecânicos) vai ser possível a eliminação dessa caixa-preta, pois será necessário apenas os 24 V para alimentar o novo circuito. A eliminação da caixa-preta será relevante na

implementação da esfera, já que a esfera terá uma área reduzida em relação ao disco, portanto ficará um pouco limitado o espaço para os equipamentos.

## 2. Materiais e Métodos

A primeira opção encontrada para substituição dos reles eletromecânicos foi a utilização de um mosfet junto a um optoacoplador para isolar a parte digital da parte analógica, porém o optoacoplador escolhido continha um triac, então na hora dos testes percebeu-se que quando era aplicado uma corrente no circuito, o triac disparava corretamente, porém em vez de parar de conduzir, o triac continuava acionado e só desligava com a retirada total da corrente. Como o objetivo é de acionar e desligar os solenoides de acordo com a necessidade e não os manter acionados sempre, resolveu-se então em vez de usar o optoacoplador, usar o CI 7414 que são portas inversoras com schmitt trigger junto ao mosfet. Ao realizar os testes com a segunda opção de substituição conseguimos obter o resultado desejado. Seguem abaixo figuras do circuito teste com o optoacoplador e o integrado 7414.

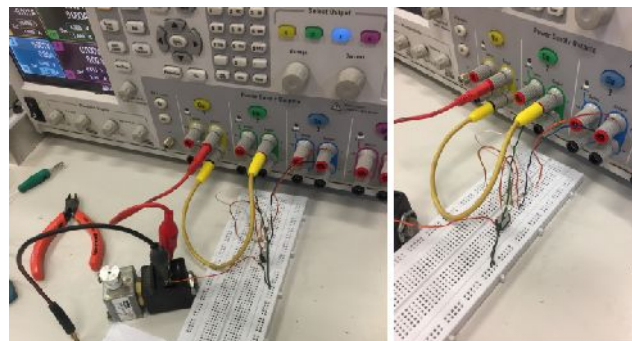


Figura 2 – Circuito teste com o optoacoplador.

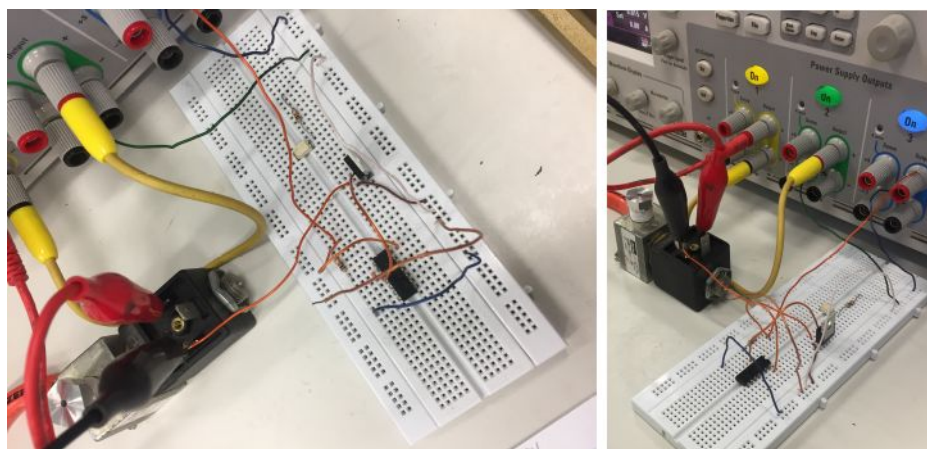


Figura 3 – Circuito teste com o CI7414

A figura a seguir apresenta o circuito teste com o CI7414 no Software Proteus.

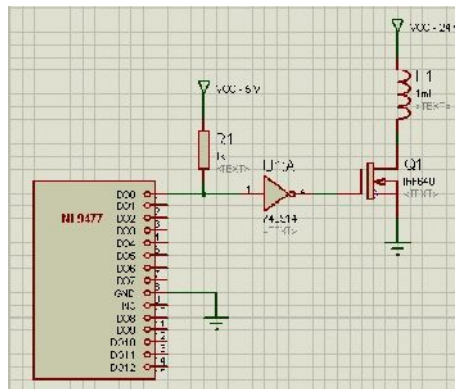


Figura 4 – Circuito de teste de uma única válvula ilustrado no Proteus.

Para realizar o teste do circuito foi utilizado o analisador de alimentação DC da Agilent Technologies modelo N6705A. Essa fonte possui quatro canais. Nos canais 1 e 2 estão instalados módulos de alimentação DC de 20 Volts e nos canais 3 e 4 estão instalados módulos de alimentação DC de 5 Volts. Apenas os canais com módulos de alimentação DC idênticos podem ser ligados em série, ou seja, apenas os canais 1 e 2 podem ser ligados em série para fornecer 40 Volts ou apenas os canais 3 e 4 podem ser ligados em série para fornecer 10 Volts. Em hipótese alguma devem ser ligados em série canais cujos módulos de alimentação DC são diferentes. Foram utilizados os canais 1 e 2 em série. O canal 1 foi configurado com 20 Volts e 1 Ampère e o canal 2 foi configurado com 4 Volts e 1 Ampère, totalizando 24 Volts e 2 Ampères. O mosfet utilizado foi um IRF640. Segue abaixo a foto do analisador de alimentação DC.



Figura 5 – Analisador de alimentação DC da Agilent Technologies modelo N6705A.

Além do circuito foi feito o esquema elétrico do SICA para maior conhecimento do simulador e também para facilitar a visualização das pinagens e conexões. As figuras 6, 7 e 8 apresentam o esquema elétrico foi dividido em visão geral, alimentação, controlador, sensor e atuador.

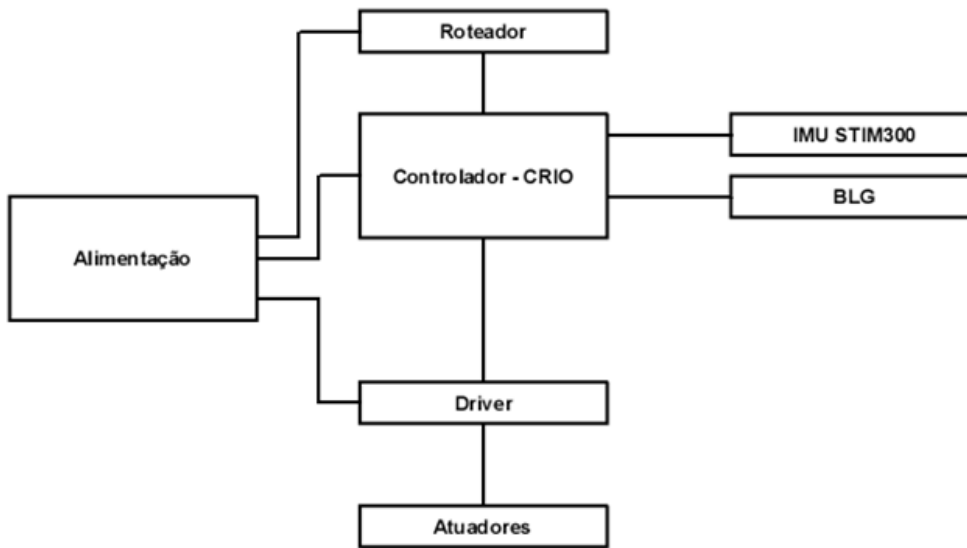
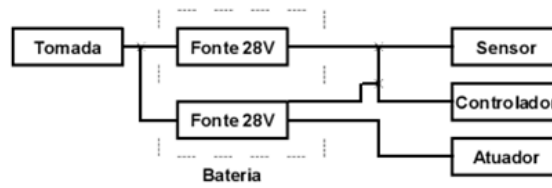


Figura 6 – Diagrama funcional do sistema de controle de atitude.



As fontes podem ser substituídas por baterias

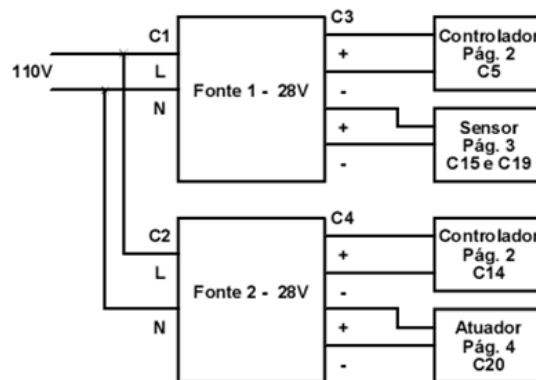


Figura 7 – Diagrama de blocos do sistema de alimentação elétrica.



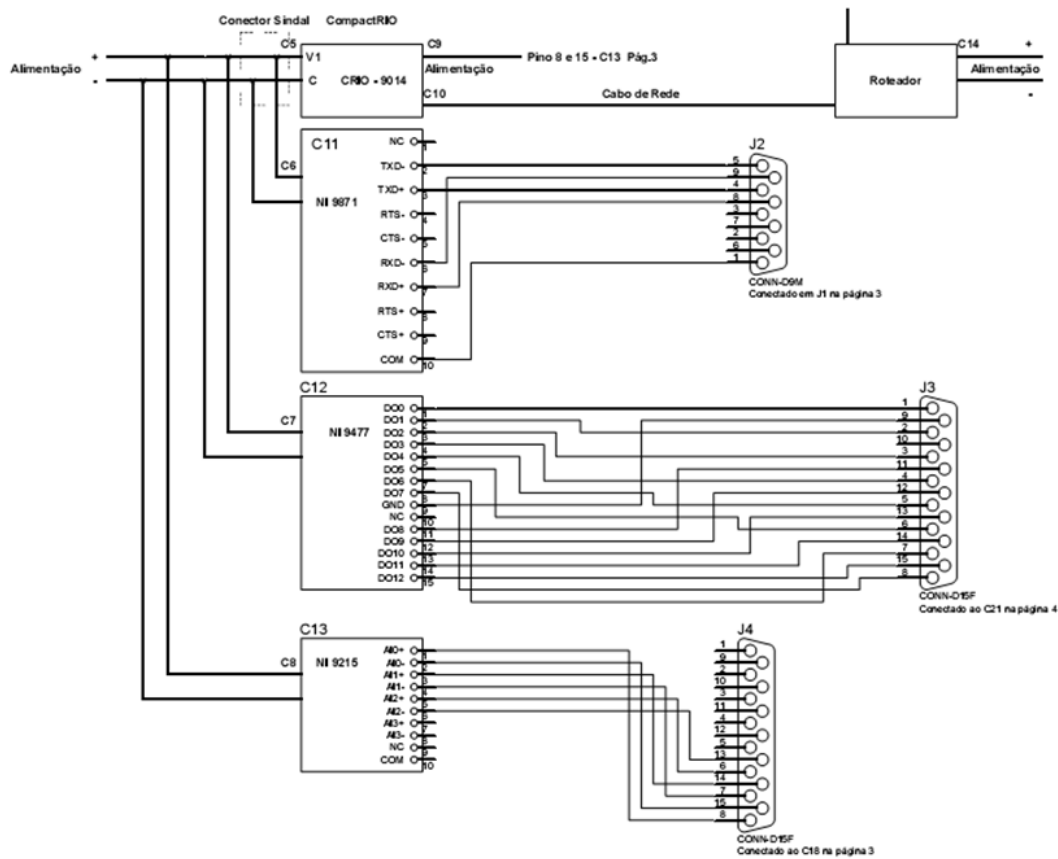


Figura 8 – Controlador digital implementado no CompactRIO.

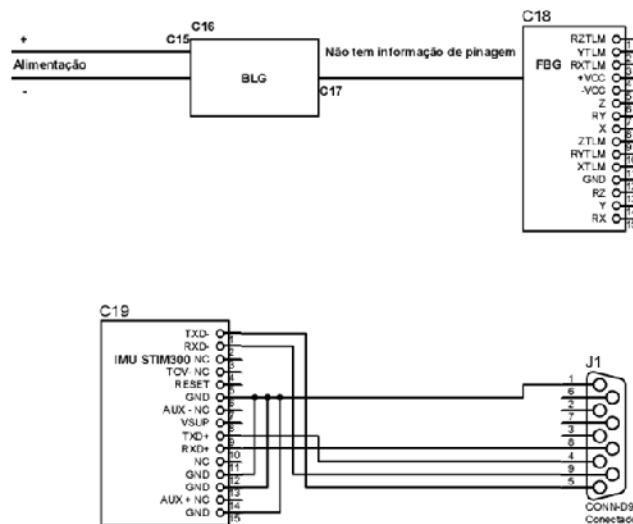


Figura 9 – Esquema elétrico do sensor de velocidade angular.

A figura 9 apresenta o esquema elétrico do sensor de velocidade angular com sua pinagem e a figura 10 o esquema elétrico de acionamento dos atuadores.

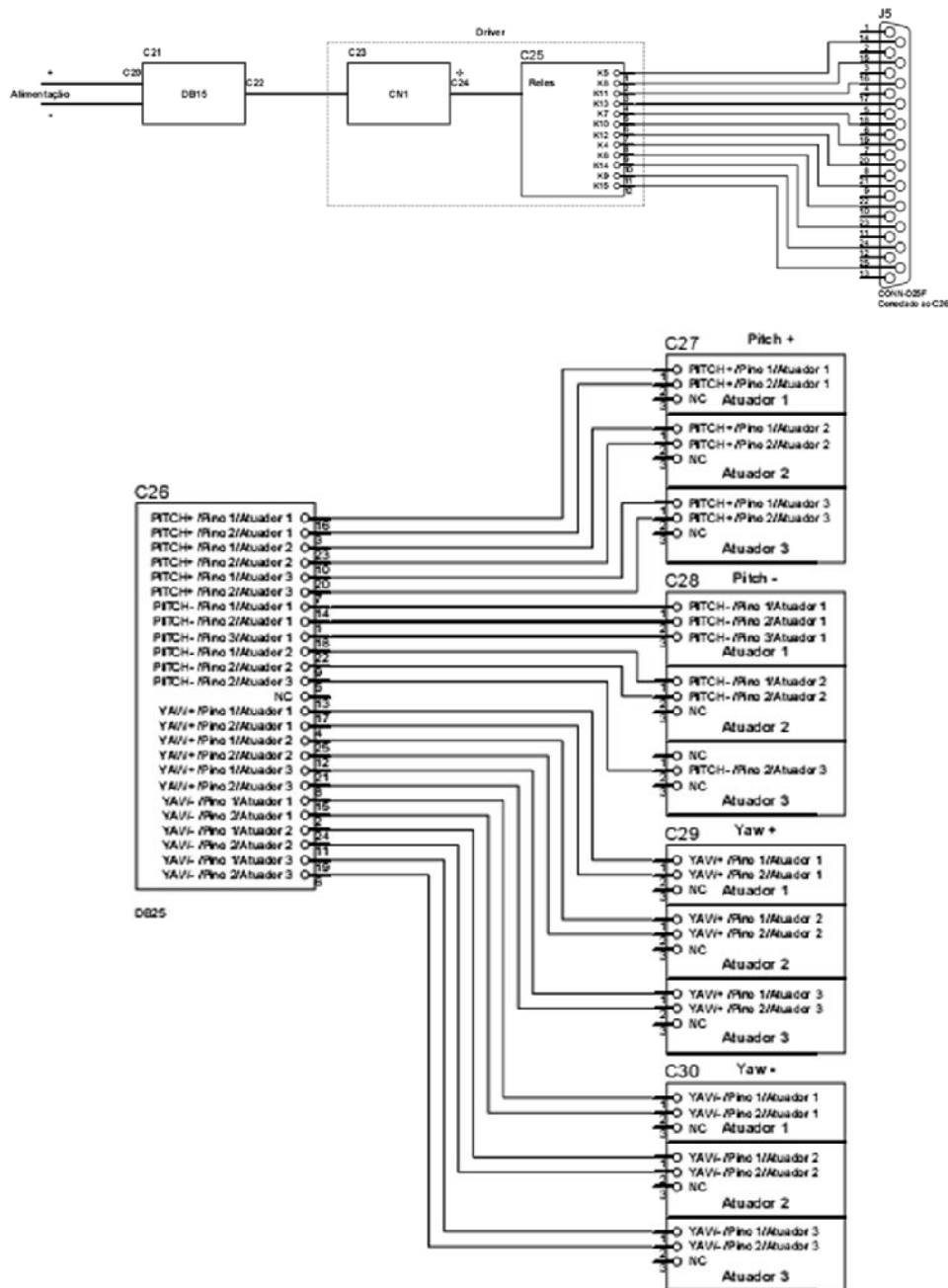


Figura 10 – Esquema elétrico de acionamento dos atuadores.

Outro procedimento que será feito para a melhoria do SICA é o carregamento das baterias recarregáveis de níquel-cádmio. A melhor forma de realizar a carga da bateria é em carga lenta. A duração padrão desse procedimento é de 16 horas, submetida a uma corrente de 0,22 Ampéres. Segundo procedimentos consolidados no laboratório para o carregamento da bateria é necessário utilizar o módulo de carga e descarga da bateria que foi concebido no laboratório do IAE. Foi criado de modo a proteger a fonte de alimentação DC e a bateria do SISNAV



durante o procedimento de carga e descarga da bateria. Este módulo tem como elementos de proteção fusíveis de 3,2A conectados em série com cada borne positivo do módulo e dois diodos que permitirão que a corrente circule no circuito somente na direção desejada. O módulo também possui algumas funções extras, como uma chave de seleção de procedimento de carga ou descarga com LED'S indicando qual procedimento está sendo realizado. São disponibilizados também dois bornes externos (EXT+/EXT-) para conexão da fonte de alimentação DC ou resistor de descarga, dois bornes para conexão da bateria (BAT+/BAT-) e, por fim, dois bornes para monitoramento e aquisição de dados (DAQ+/DAQ-). A figura 11 abaixo mostra o esquema elétrico do módulo de carga e descarga da bateria.

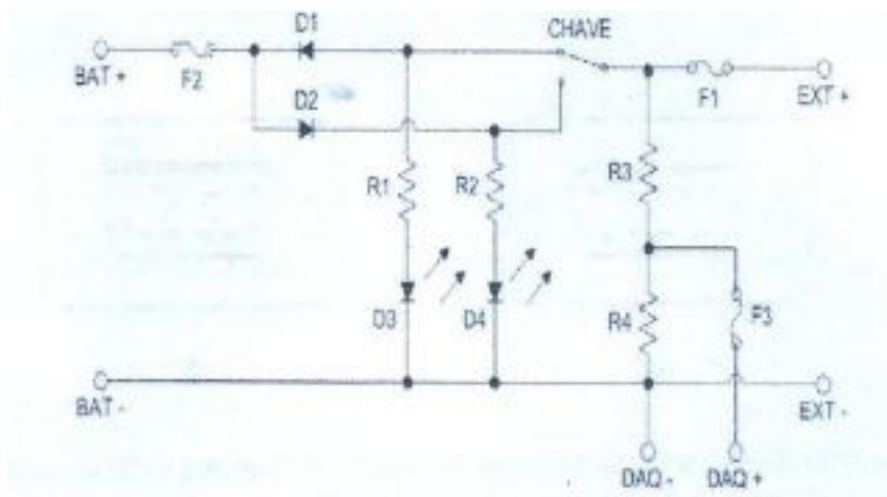


Figura 11 – Esquema elétrico do módulo de carga e descarga da bateria.

A carga lenta é realizada da seguinte forma, primeiro deve-se configurar a tensão e a corrente dos canais um e dois da fonte DC da Agilent Technologies modelo N6705A para 20 V e 0,22A. Em seguida deve-se colocar os canais configurados em série e mudar a chave de seleção do módulo de carga e descarga para “carga”. Feito isso conecta-se a fonte de alimentação DC ao borne externo do módulo e conecta-se a bateria ao borne de conexão específico do módulo. Feito isso iniciará a carga lenta.

Quando a carga lenta atinge de 88% a 93% a tensão da bateria aumenta e em seguida decai. Neste momento a carga lenta deve ser interrompida.

Assim que a carga estiver completa, deve-se desconectar primeiro um dos conectores da bateria antes de desconectar a fonte DC, pois assim impede que haja curto.

### 3. Resultados

No primeiro momento foram feitos apenas testes em protoboard. Como são doze válvulas atuantes será necessário doze mosfets e dois CI 7414. Os CI 7414 já estão no Laboratório de Simulação e Controle (LICS) da Divisão de Sistemas Espaciais (ASE), faltando apenas os doze mosfets. Assim que tiver disponível todos os componentes será desenhado uma placa de circuito impresso para implantar esse novo sistema de acionamento no SICA.

#### 4. Próximas Etapas

As próximas etapas do trabalho são projetar e fabricar a esfera que substituirá o disco base do SICA, implementando assim o acionamento dos solenoides e realizar o carregamento das baterias para a alimentação do SICA.

#### 5. Conclusões

Conclui-se que o SICA ainda está em atualização e o esquema elétrico, o novo circuito para acionamento dos solenoides e o carregamento das baterias proporcionam melhorias no sistema e isso é de grande importância, pois torna possível um projeto eficiente quanto a energia embarcada.

#### Referências

- [1] Cunha, Neves Thiago. *Sistema de controle de atitude do mancal a ar utilizando CompactRIO e técnica de quatérnios*. São José dos Campos: Instituto de Aeronáutica e Espaço, 2016.
- [2] Wie, B. (2008). *Space Vehicle Dynamics and Control Second Edition*. Ames, Iowa, Estados Unidos da América: AIAA Education Series.
- [3] Barbosa, E.G., Cunha, T.N., Batagini, C.M., Machado, R.C., *Performance analysis of attitude control using Euler angles and quaternion techniques applied to a real-time work bench*, COBEM, 2015, São José dos Campos.
- [4] National Instruments, 374126E-01 Operating Instructions And Specifications CompactRIO NI cRIO-9012/9014, Junho/2010.
- [5] Machuca, L., Sobrinho, L.C., de Paula, A.P., *Simulação de controle de atitude em mesa de Mancal Aerostático*, Trabalho de Graduação, Universidade Brás Cubas, 2003.