

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA– CEFET/RJ**

**Estudo e Projeto de um Sistema de Resfriamento  
com Nitrogênio Líquido para Bobinas Tesla**

Lauro Pessoa Barbieri Bastos

Prof. Orientador: José Paulo Vogel

Paulo Lucio de Aquino

**Rio de Janeiro**

**Junho de 2017**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA– CEFET/RJ**

**Estudo e Projeto de um Sistema de Resfriamento  
com Nitrogênio Líquido para Bobinas Tesla**

Lauro Pessôa Barbieri Bastos

Projeto final apresentado em  
cumprimento às normas do Departamento  
de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte  
dos requisitos para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientador: José Paulo Vogel

Paulo Lucio de Aquino

**Rio de Janeiro**

**Junho de 2017**



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Marcelo e Lilian por me apoiar em todos os momentos dessa jornada, sem nunca me deixar faltar nada. Por acreditar sempre em mim e investir sempre em meu crescimento e evolução. Seu carinho e amor foram fundamentais para que isso tudo tenha acontecido e que possa então concluir mais uma etapa da vida.

À minha irmã Isabela, por ser dentro e fora de casa um exemplo de pessoa que eu quero seguir para o resto da minha vida. Sua luz e dedicação aos estudos e a vida me ensinam a todo o momento como posso me tornar melhor a cada dia.

Aos meus avós, por parte de mãe e de pai que sempre acreditaram no meu potencial e sempre me deram o maior apoio nos estudos e decisões da minha vida.

Aos colegas do CEFET/RJ que tanto me ajudaram e me apoiaram em diversos momentos durante essa jornada.

## RESUMO

O presente trabalho visa ser uma solução que dará a possibilidade ao Laboratório de Novas Tecnologias do CEFET/RJ e ao professor Paulo Aquino de continuar a avançar na linha de pesquisa que envolve Bobinas de Tesla, resfriando-as à temperaturas criogênicas. Os avanços em pesquisa do professor Paulo Aquino chegaram ao ponto em que havia-se a necessidade de uma solução para a refrigeração de bobinas com nitrogênio líquido, com o principal objetivo de otimizar o funcionamento das mesmas ao reduzir a sua resistência elétrica. A partir daí surgiu a ideia de criar um sistema de resfriamento com nitrogênio líquido para o laboratório fazendo com que as mais diversas questões e incertezas em relação ao comportamento de uma bobina desse tipo pudessem ser solucionadas. Instigado pelo professor orientador, pelos desafios de lidar com fluidos criogênicos e após extensa revisão bibliográfica, buscou-se a construção de um sistema que seria o mais indicado para esta finalidade, atendendo aos requisitos principais como operação, facilidade na realização de testes, menor custo de fabricação e fácil observação dos resultados além de um enfoque na segurança do processo. Depois veio o desenvolvimento do projeto e sua construção que atendessem aos requisitos ideais para trabalhos com nitrogênio líquido. Após a montagem e preparação, foram realizados testes em que o desempenho do sistema foi comprovado através dos resultados obtidos, principalmente em relação à redução da resistência elétrica. Dessa maneira, com a solução desenvolvida, a linha de pesquisa vai poder seguir testando diferentes hipóteses que antes eram apenas ideias em um papel.

Palavras-chave: Nitrogênio líquido; Bobina de Tesla; Equipamentos criogênicos; Transferência de calor; Resfriamento.

## ABSTRACT

The following project intends to be an engineered solution that will bring the possibility to the Novas Tecnologias Lab and professor Paulo Aquino to be able to conduct new improvements on the Tesla Coil research project by cooling them to cryogenic temperatures. Paulo Aquino's research got to a point where it was felt the necessity of the development of a solution for Tesla coil cooling by liquid nitrogen, with the main goal to optimize their functionality by reducing its electrical resistance. From there, the idea of creating a liquid nitrogen cooling system for use inside the lab was developed so questions and uncertainties about behavior and consequences while cooling them with cryogenic temperatures could be answered. Intrigued by the project advisor, the challenges of dealing with cryogenics and after long bibliographical review, the design of a system for this intent was pursued, according to requirements, such as, operation, ease while performing the tests, low cost of production and easy observation of the results. Beside that, a big focus on process safety was applied. After that, it was started the process of development and construction of the system that should be capable to function with liquid nitrogen. After assembly and pre-tests adjustment, tests were executed in which the performance of the system was proved by studying the results. The main result was the one focused in reducing electrical resistance. Afterwards, the research can be continued by making new experiments and testing different hypothesis.

Key words: Liquid nitrogen; Tesla coil; Cryogenic equipment; Heat exchange; Cooling.

# SUMÁRIO

Capítulo 1 .....	1
Introdução .....	1
1.1 Motivação .....	2
1.2 Objetivo .....	2
1.3 Metodologia .....	2
1.4 Organização do Trabalho .....	3
Capítulo 2 .....	4
Revisão Bibliográfica .....	4
2.1 Fluidos Criogênicos .....	4
2.2 O Nitrogênio (N <sub>2</sub> ) .....	4
2.2.1 Nitrogênio Gasoso (GN <sub>2</sub> ) .....	5
2.2.2 Nitrogênio Líquido (LN <sub>2</sub> ) .....	5
2.3 Segurança no Uso de Nitrogênio .....	6
2.3.1 Perigos Fisiológicos .....	6
2.3.2 Asfixia .....	7
2.3.3 Excesso de Pressão .....	7
2.4 Sistemas de Refrigeração com Nitrogênio .....	8
2.4.1 Nitrogênio Líquido e Vácuo .....	9
2.4.2 Nitrogênio Líquido e Nitrogênio Gasoso .....	11
2.4.3 Nitrogênio Líquido e Nitrogênio Sólido .....	11
2.5 Materiais e Designs para Sistemas de Refrigeração com Nitrogênio .....	12
2.6 Conceitos em Transferência de Calor .....	19
2.6.1 Condução Térmica .....	19
2.6.2 Parede Plana .....	20
2.6.3 Convecção .....	20
2.6.4 Distribuição de Temperatura e Resistência Térmica .....	21

2.7 Autonomia do Sistema .....	23
Capítulo 3.....	27
Desenvolvimento do Projeto .....	27
3.1 Idealização do Sistema de Refrigeração .....	27
3.2 Projeto do Sistema de Refrigeração .....	29
3.2.1 Base .....	31
3.2.2 Paredes e Compartimentos Internos.....	32
3.2.3 Tampa.....	34
3.2.4 Vedações.....	35
3.3 Construção.....	35
3.4 Cálculos Térmicos .....	37
3.4.1 Fluxo de Calor na Tampa .....	38
3.4.2 Fluxo de Calor na Base .....	39
3.4.3 Fluxo de Calor nas Paredes .....	39
3.4.4 Fluxo de Calor Indireto .....	41
3.4.5 Fluxo Total de Calor .....	42
3.5 Cálculos de Autonomia .....	43
Capítulo 4.....	45
Experimento com Bobina.....	45
4.1 Nitrogênio Líquido Utilizado .....	45
4.2 Bobina .....	46
4.3 Experimento .....	48
4.4 Resultados .....	52
Capítulo 5.....	57
Conclusões .....	57
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros .....	58
Referências Bibliográficas .....	59

ANEXO A..... 61

# Capítulo 1

## Introdução

O Laboratório de Novas Tecnologias do CEFET/RJ tem como objetivo criar soluções para desenvolvimento de ideias e pesquisas que venham a trazer melhorias tanto para a indústria quanto para a qualidade de vida dos seres humanos.

Um desses projetos de pesquisa está sendo desenvolvido pelo professor Paulo Aquino e tem objetivos de estudar e desenvolver as ideias de um cientista mundialmente conhecido por Nikola Tesla. Dentre muitas de suas patentes, Nikola Tesla demonstrou ideias de cunho revolucionário tanto para sua época como para os dias de hoje. Podemos citar como exemplo o desenvolvimento de transmissão de energia elétrica sem fios.

A ideia que deu luz a este projeto vem de uma de suas patentes envolvendo a famosa Bobina de Tesla, que é um dispositivo que contém principalmente fios de cobre enrolados em uma estrutura cilíndrica, além de outras características. A corrente elétrica passa por esses fios conforme as diversas configurações em que podem ser construídas seguindo as limitações de projeto que definem uma Bobina de Tesla.

Existem fatores que limitam os avanços em experimentos realizados com essas bobinas e que impossibilitaram, devido à tecnologia ainda não estar plenamente desenvolvida na época, o avanço nessa tecnologia pelo próprio Tesla no século XX. Um fator foi a resistência elétrica nos fios de cobre que influenciava diretamente nos resultados mais expressivos e que por esses motivos tecnológicos, não foram levados adiante.

Tesla sugere em uma de suas patentes que a bobina seja mergulhada em “ar líquido”, cuja temperatura seria muito inferior à temperatura ambiente, diminuindo assim a resistência elétrica dos fios e tornando possível o avanço das pesquisas nesse campo.

O professor Paulo Aquino, além de estudar a fundo as ideias e hipóteses de Nikola Tesla, conta com a tecnologia dos dias atuais a seu favor. Na sua linha de pesquisa, que envolve o estudo de novas tecnologias criadas a partir de Bobinas de Tesla, foi sugerido mergulhar a bobina em nitrogênio líquido para que seja possível testar diferentes hipóteses criadas por Nikola Tesla e pelo próprio professor Paulo Aquino.

## **1.1 Motivação**

Devido à necessidade de se dar continuidade a essa linha de pesquisa tão revolucionária do Laboratório de Novas Tecnologias, que envolve o estudo com Bobinas de Tesla, foi necessário projetar e desenvolver um sistema de refrigeração com nitrogênio líquido que pudesse ser eficiente o bastante para que os experimentos fossem realizados pelo tempo adequado e nas condições necessárias e que assim se pudesse analisar os resultados obtidos e indicar possíveis melhorias.

Uma solução desse tipo, necessita de ideias que abranjam diversos aspectos, envolvendo desde o estudo das características das bobinas até o estudo da criogenia, uma vez que este projeto envolve o trabalho com gás liquefeito.

## **1.2 Objetivo**

Este projeto tem como objetivo o estudo, projeto e fabricação de um sistema de resfriamento com nitrogênio líquido que seja uma solução com a melhor eficiência térmica possível a baixo custo. Dessa forma poderão ser realizados os experimentos com nitrogênio líquido, incluindo análises e apontamentos de melhorias para futuros avanços nessa linha de pesquisa. Também requer a análise do comportamento de uma bobina de Tesla mergulhada em nitrogênio líquido em contraste ao seu comportamento em temperatura ambiente.

## **1.3 Metodologia**

Na fase inicial desse projeto foi realizado primeiramente um estudo sobre o gás Nitrogênio e suas características principais, visando principalmente à segurança de todo o processo. Em seguida foi realizado um estudo sobre diversos meios de refrigeração por nitrogênio em diferentes tipos de bobinas. A partir desses estudos bibliográficos, começou-se a elaboração do projeto do sistema de resfriamento que iria receber o nitrogênio líquido para a os testes com bobinas. Tanto os cálculos térmicos quanto os materiais envolvidos vieram através desses estudos. Em seguida, a fase de construção do aparato e finalmente os experimentos realizados em laboratório e a análise de resultados.

## **1.4 Organização do Trabalho**

No capítulo 1 serão abordados as motivações e os objetivos deste projeto.

No capítulo 2, será abordada a revisão bibliográfica sobre os diversos conceitos que são necessários para a elaboração do projeto e suas características. Conceitos sobre o nitrogênio, transferência de calor e desenvolvimento de sistemas de resfriamento com fluidos criogênicos.

No capítulo 3, é apresentado todo o desenvolvimento do projeto, com as análises e conceitos necessários para a elaboração do sistema de resfriamento.

No capítulo 4, disserta-se sobre o experimento realizado utilizando o sistema de refrigeração e as características dos testes.

No capítulo 5 conclui-se o experimento em relação às análises teóricas e são elaboradas projeções para futuros experimentos.

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

Nesta seção serão abordados conceitos tanto teóricos quanto práticos que são necessários para a compreensão do desenvolvimento do projeto e seus resultados finais.

#### 2.1 Fluidos Criogênicos

Segundo [7], os fluidos criogênicos mais utilizados para refrigeração são: Oxigênio, Hidrogênio, Nitrogênio, Neônio, e Hélio.

A propriedade mais importante do projeto criogênico é temperatura de ebulição também conhecida como Ponto de Normal de Ebulição (“*Normal Boiling Point*” – *NBP*), definido em [7] como caso especial em que a pressão de vapor do líquido se iguala a pressão atmosférica ao nível do mar, ou seja, nessas condições a pressão de vapor do líquido se torna suficiente para vencer a pressão atmosférica permitindo assim que bolhas de vapor se formem através do líquido para a atmosfera.

Assim, podemos afirmar que na pressão atmosférica um fluido criogênico está sempre em ebulição. Logo, é preciso ter isso em mente ao se trabalhar com fluidos criogênicos e sempre que possível evitar utilizá-los em recipientes completamente fechados que não possuam dispositivos de segurança para alívio de pressão.

#### 2.2 O Nitrogênio (N<sub>2</sub>)

De acordo com [7], de uma maneira geral o Nitrogênio pode ser utilizado em duas formas principais, a primeira sendo utilizado na forma pura de gás ou líquido em diversos processos industriais. Numa segunda forma ele é utilizado combinado com outros elementos que serão de grande utilidade na fabricação de produtos químicos. Cerca de 90% do Nitrogênio é utilizado como gás inerte provendo uma atmosfera controlada para processos metalúrgicos e químicos. Os outros 10 % são utilizados para refrigeração [7].

Também de acordo com [7] a indústria de produtos alimentícios é a maior consumidora de nitrogênio líquido. Além de prover uma maneira rápida e segura de

resfriamento com temperaturas muito abaixo das comparadas a refrigeradores normais, é um processo confiável e com um custo acessível.

Na indústria metalúrgica, o nitrogênio elementar é muito utilizado para o recozimento de aços inoxidáveis e quando misturado com o hidrogênio age como agente não oxidante. Outros produtos siderúrgicos são tratados termicamente com uma atmosfera de nitrogênio. Já na produção de metais não ferrosos, o nitrogênio líquido é usado na montagem de peças causando a contração do metal através do resfriamento severo, conhecido como “*Induction Shrink-fitting*”.

Na indústria eletrônica, o nitrogênio líquido é usado na refrigeração de lasers, circuitos e detectores infravermelhos, por controlar o acúmulo de energia térmica gerada, além de ser um gás inerte.

O nitrogênio também é utilizado em pesquisas acadêmicas em diversas áreas do conhecimento, tanto na engenharia como em áreas de ciências biológicas e afins.

### **2.2.1 Nitrogênio Gasoso (GN<sub>2</sub>)**

Conforme visto em [7], o nitrogênio é de fato o maior constituinte do ar atmosférico, representado por 78,09% em volume e 75,45% por peso. Uma estimativa desse elemento em nossa atmosfera esta para mais de 4000 bilhões de toneladas.

Seu processo de obtenção é feito por liquefação e destilação fracionada em plantas de produção de gases. Podemos obter o gás nitrogênio na sua forma gasosa através de cilindros com nitrogênio em alta pressão, ou através de cilindros com nitrogênio líquido cuja vaporização natural do processo gera o gás que fica armazenado dentro do cilindro como fase gasosa.

### **2.2.2 Nitrogênio Líquido (LN<sub>2</sub>)**

O Nitrogênio Líquido (LN<sub>2</sub>), considerado de grande importância para a engenharia, é um fluido refrigerante considerado seguro, sendo quimicamente inerte, não tóxico e não explosivo [7]. Uma Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ) é apresentada no anexo A como um meio de informações mais detalhadas.

O LN<sub>2</sub> tem como características ser um líquido claro, sem cor que se parece com água visualmente.

De acordo com [7], sua temperatura de ebulição a um bar (0.986923 atm.) é de 77,3K (-195,7 °C) e de congelamento e 63.2K (-209,8 C). Nitrogênio líquido saturado em condições normais de ebulição tem a densidade de 808,8 Kg/m<sup>3</sup>.

Segundo [7], o calor latente de vaporização é uma propriedade muito importante com relação à vaporização do fluido. Sua definição mais básica se dá como a quantidade de calor necessária para evaporar uma determinada quantidade de líquido. O calor latente caracteriza a volatilidade e pode ser expressa por KJ/Kg (Kilo Joules por Kilo gramas). É definido em [7] pelo valor de 198,3 KJ/Kg.

## **2.3 Segurança no Uso de Nitrogênio**

Tem-se por experiência ao longo do tempo que fluidos criogênicos podem ser utilizados de maneira segura tanto na indústria quanto em laboratórios de pesquisa desde que todas as instalações estejam atendendo aos requisitos de segurança e o pessoal seja adequadamente treinado para lidar com esses fluidos.

Todos os requisitos e questões de seguranças trazidas para esse projeto serão relacionados ao nitrogênio líquido e suas aplicações dentro de um laboratório.

Todas as informações de segurança para lidar com fluidos criogênicos descritas nas seções a seguir foram retiradas de [7].

### **2.3.1 Perigos Fisiológicos**

A principal questão a ser levantada quando se trabalha com manuseio de líquidos criogênicos para o ser humano é a queimadura a frio. Quando o corpo humano entra em contato com superfícies resfriadas pelo líquido ocorre um dano à pele que é conhecida por queimadura a frio. Como a maior parte do corpo humano é composto por água, as baixas temperaturas congelam os tecidos, podendo danificá-los ou destruí-los. A intensidade da queimadura depende da quantidade de tempo em que o tecido foi exposto à baixa temperatura e também em que área do corpo o contato ocorreu. A reação imediata é de retirar a parte do corpo em contato com a superfície podendo evitar assim queimaduras mais severas.

O uso de proteção depende do ambiente de trabalho em que será utilizado o fluido. Para as condições do Laboratório de Inovação Tecnológica do CEFET/RJ e na maneira como

o nitrogênio será utilizado, recomenda-se o uso de óculos de segurança, luvas de couro e botas. Um avental que cubra a parte frontal do corpo também é extremamente recomendado. O objetivo principal dos EPIs selecionados e o que se deve ter sempre em mente para esse tópico é evitar o contato da pele com superfícies resfriadas e evitar o contato com respingos que possam ocorrer acidentalmente.

Caso a queimadura ocorra, não esfregue a área afetada de nenhum modo e dirija-se imediatamente ao posto médico mais próximo para receber os primeiros socorros.

### **2.3.2 Asfixia**

Como o nitrogênio é incolor, inodoro e um gás inerte, deve-se atentar para o perigo de asfixia. A principal causa é que quando ocorre um derramamento ou vazamento de nitrogênio na fase líquida que começa a se evaporar, tem-se como consequência a diluição do oxigênio na atmosfera do ambiente, o que pode vir a causar asfixia. Um laboratório é um local em que pode facilmente ocorrer um processo de diluição do oxigênio presente e, portanto, certas medidas devem ser tomadas. Não é recomendado trabalhar sozinho com o nitrogênio líquido dentro do laboratório. Geralmente um grupo ou um mínimo de duas pessoas é necessário para a segurança. Deve-se ter uma boa ventilação dentro do laboratório porque este pode se tornar um local com uma atmosfera com excesso de nitrogênio.

É recomendado que a quantidade de oxigênio não se mantenha abaixo de 16%, assim é recomendado que se tenha dentro do laboratório um dispositivo analisador da quantidade de oxigênio presente no ambiente. Deve-se sempre manter o nível dentro da faixa aceitável de 16 a 25 %.

### **2.3.3 Excesso de Pressão**

Ao se trabalhar com o nitrogênio líquido no laboratório, é necessário atentar-se que em condições normais de temperatura e pressão, o líquido sempre estará em fase de transformação para vapor, ou seja, estará em seu ponto normal de ebulição. Assim, deve-se ter em mente que ao encher um recipiente com o fluido para refrigerar qualquer tipo de peça ou objeto, nunca se deverá fechar de maneira a vedar completamente o recipiente com o líquido. Na indústria, os tanques e reservatórios para esses tipos de fluidos são, por norma, providos com válvulas de segurança e discos de ruptura, que são equipamentos de proteção para

parâmetros críticos de operação, ou seja, quando a pressão do tanque começa a alcançar níveis críticos. Geralmente uma válvula para ventar o produto é utilizada como dispositivo de segurança. No caso de um recipiente para uso em laboratório, não há a necessidade de possuir uma válvula de segurança, porém, não se deve vedá-lo em momento algum. Caso se necessite tampá-lo, basta um pequeno furo para que o vapor gerado possa sair para o ambiente evitando o aumento da pressão interna do recipiente.

## 2.4 Sistemas de Refrigeração com Nitrogênio

Como mencionado na seção 2.2, uma das principais utilizações do LN<sub>2</sub> se dá no âmbito acadêmico, com pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias. Sua utilização para resfriamento é amplamente utilizada no mundo por ser um gás barato e de fácil acesso, sendo necessário apenas elaborar um aparato que possa comportar e atender a demanda do experimento que será realizado. Além de utilizar o gás apenas na sua forma líquida para resfriamento, esses aparatos também podem utilizar combinações do gás na forma gasosa, líquida e sólida para melhorar a eficiência do experimento como visto em [4] [5] [6]. Mundialmente, para efeito de pesquisa acadêmica, esse aparato projetado e construído para realizar tais experimentos em temperaturas criogênicas é nomeado de “*Cryostat*”, que nada mais é do que um aparato cujo objetivo é manter as baixas temperaturas atingidas pelos fluidos criogênicos, minimizando o máximo possível sua troca de calor com a vizinhança.

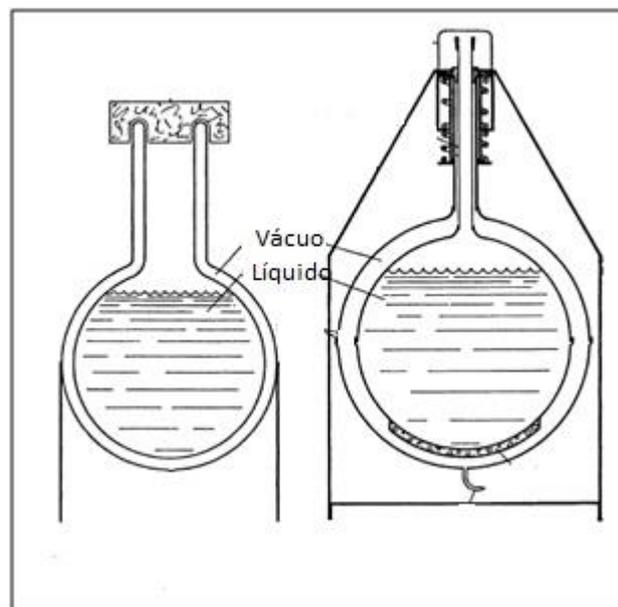
No meio acadêmico, existem diferentes maneiras de se alcançar resultados, especialmente quando se trata de manter baixas temperaturas e um bom isolamento térmico. Pode-se perceber, através da pesquisa, que diferentes combinações de gases resfriados, em sua maioria o nitrogênio, para efeito desse projeto, foram utilizadas para diminuir a temperatura de dispositivos e equipamentos elétricos até temperaturas criogênicas, além de diferentes materiais e *designs* que foram abordados e que serão citados nas seções a seguir.

A forma mais simples de se resfriar algum dispositivo ou equipamento utilizando o nitrogênio é através do simples ato de “mergulhar” algum objeto ou equipamento em um “banho” de nitrogênio líquido [1] [2] [3]. Como mencionado, o nitrogênio é um gás inerte e não reage com o que está em seu meio e tem a importante propriedade de se encontrar no estado líquido nas CNTP à -195,7 °C [7], o que torna o “banho” uma eficiente forma de resfriamento.

Um fator que deve ser levado em consideração e de extrema importância é o isolamento térmico utilizado no projeto. Como o nitrogênio líquido encontra-se em baixíssima temperatura, a diferença de temperaturas ( $\Delta T$ ) em relação à vizinhança torna-se muito grande, gerando uma enorme troca de calor caso o isolamento não seja bom o suficiente. Essa troca de calor aumenta a taxa de ebulição do nitrogênio e caso seja muito intensa acaba gerando borbulhamento no sistema assim como instabilidade térmica.

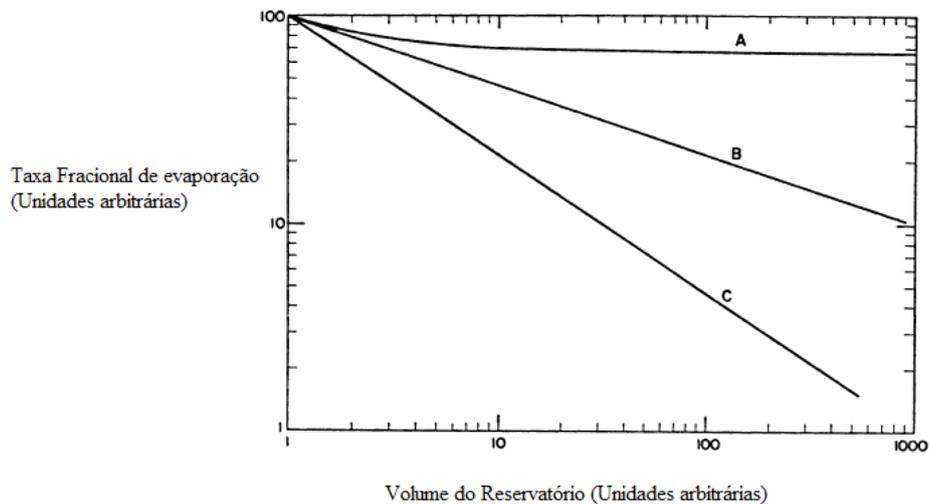
### 2.4.1 Nitrogênio Líquido e Vácuo

É evidente a importância do isolamento a vácuo quando se pode praticamente eliminar a transferência de calor por condução e convecção, umas das duas principais maneiras de troca de calor como será visto na seção a frente. Se forem tomadas medidas que previnam a transferência de calor por radiação e condução sólida, o isolamento a vácuo é o mais eficiente conhecido atualmente de acordo com [7]. Na engenharia, as empresas de gases industriais e medicinais estocam seus gases em tanques criogênicos onde o isolamento utilizado é o vácuo. Pequenos reservatórios também podem apresentar tais características. Esses tanques são compostos por dois compartimentos, um dentro do outro, onde no interior fica armazenado o gás no estado líquido em baixíssimas temperaturas e no externo fica a camada de vácuo que realiza o isolamento adequado [7]. Uma ilustração dessa maneira de isolar termicamente pode ser vista na Figura 1.



**Figura 1:**Exemplo de isolamento térmico a vácuo para recipientes criogênicos.[7]

A combinação de vácuo com o pó de alguma substância como, por exemplo, Perlita, é amplamente utilizada para melhorar ainda mais o isolamento a vácuo. Pode-se notar no gráfico a seguir da Figura 2 a melhoria citada.



**Figura 2:** Dependência da Taxa de Evaporação em relação ao tamanho do reservatório. A curva “A” representa reservatórios com diâmetro fixo e diversos comprimentos; “B”, representa reservatórios com uma camada constante de isolamento a vácuo e geometria similar; e C, reservatórios com isolamento a vácuo com pó (Sílica, por exemplo) e geometria similar [7].

Portanto, uma das soluções possíveis para melhorar o isolamento térmico consiste em produzir uma camada de vácuo ao redor do sistema de resfriamento que comporta o nitrogênio líquido. Com vácuo é possível obter-se pequenas variações de temperatura como num “*Cryostat*” projetado e construído para resfriar uma bobina RF (Radio-Frequency), em um aparelho (“*3-Tesla Whole Body Scanner*”) que gera imagens de alta resolução para o exame de ressonância magnética, onde foi atingido, com um bom isolamento a pressão de vácuo de 0,8 mbar e uma temperatura criogênica de 90 K (-183 °C), além de uma variação térmica de temperatura  $\Delta T$  de 1°C em 2 horas de experimento com imagens conforme visto em [1].

### 2.4.2 Nitrogênio Líquido e Nitrogênio Gasoso

Outra maneira de melhorar o isolamento térmico é com a aplicação do nitrogênio na sua forma gasosa. Como a temperatura do nitrogênio líquido é menor que a temperatura do nitrogênio gasoso, pode-se utilizar o nitrogênio líquido para manter o nitrogênio gasoso resfriado, reduzindo sua taxa de troca de calor [4].

Um experimento que faz uso dessa combinação foi realizado em [4], em que uma bobina Toroidal foi testada com nitrogênio gasoso resfriado por nitrogênio líquido em um “*Cryostat*” projetado para tal função. Foi discutido nesse experimento que um aparato resfriado dessa maneira seria mais rápido e mais barato de ser construído e forneceria isolamento suficiente para atingir as temperaturas do nitrogênio líquido comparado a um sistema de isolamento a vácuo.

Em [4] o sistema foi projetado para resfriar a bobina até 80 K (-193°C) numa taxa de resfriamento de 2°C/h e manter uma diferença de temperatura  $\Delta T$  de no máximo 30°C entre os sensores instalados no equipamento. Obteve-se como resultado, para um resfriamento de aproximadamente sete dias, uma temperatura média de -176°C para a bobina em [4]. Como nesse experimento o resfriamento foi realizado por nitrogênio gasoso resfriado, pode-se notar que mesmo apesar da taxa de resfriamento ser baixa em razão de estudo do comportamento estrutural do dispositivo, que o tempo para atingir temperaturas criogênicas é maior do que o observado para o resfriamento com o nitrogênio líquido em contato direto com o dispositivo ou equipamento como visto em [1] por razões termodinamicamente óbvias. Uma ideia que surgiu a partir desse experimento seria de utilizar uma camada de nitrogênio gasoso em volta do recipiente com nitrogênio líquido, ao invés de vácuo, para melhorar o isolamento e reduzir a troca de calor com o ambiente, uma vez que seria mais rápido e fácil de introduzir uma camada com gás ao invés de uma camada de vácuo.

### 2.4.3 Nitrogênio Líquido e Nitrogênio Sólido

Um método não tão comum, mas também utilizado para resfriamento de dispositivos e equipamentos envolve o uso de nitrogênio no estado sólido.

De acordo com [6], o nitrogênio líquido é utilizado para resfriamento na faixa de -208 ~ -195,7°C (65~77,3K). Também de acordo com [6], o nitrogênio no estado sólido (SN<sub>2</sub>),

opera numa faixa de temperatura de  $-268,8 \sim -210 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $4,2 \sim 63 \text{ K}$ ), sendo uma fonte alternativa quando são necessárias temperaturas muito baixas.

No experimento realizado em [6], o aparato é resfriado até a temperatura de  $77 \text{ K}$  ( $-196^\circ\text{C}$ ) e então nitrogênio líquido é injetado e resfriado até sua solidificação por um resfriador criogênico GM (“*Gifford-McMahon*”) visando-se atingir a temperatura de  $30 \text{ K}$  ( $-243^\circ\text{C}$ ) numa taxa de resfriamento de  $0,00121 \text{ K/s}$ . Na análise dos resultados em [6], pode-se notar que o nitrogênio passou da fase líquida para a fase sólida na temperatura de  $63,15 \text{ K}$  ( $-209,84^\circ\text{C}$ ) e a diferença de tempo para atingir a temperatura desejada foi de  $30 \text{ min}$ . Um aspecto interessante foi o de envolver todo o dispositivo com nitrogênio líquido e então solidificá-lo, o que faz com que a zona de contato seja maior e então a troca de calor torna-se mais eficiente. Conclui-se ainda nesse experimento que a melhor maneira de trocar calor seria uma mistura entre as fases líquida e sólida.

Em [5] o nitrogênio líquido foi utilizado junto com neônio em fase líquida para o resfriamento de uma bobina. No experimento, o nitrogênio líquido foi resfriado dentro de um resfriador criogênico GM (“*Gifford-McMahon*”) a uma taxa de  $7,40 \text{ mK/s}$  até se tornar sólido. De acordo com [5], um problema analisado é a zona de contato com a bobina que é muito menor quando o gás encontra-se no estado sólido, portanto, em [5], foi utilizado, além o nitrogênio sólido, uma pequena quantidade de neônio líquido para aumentar a zona de contato térmico com a bobina, o que resultou em uma melhoria notável na troca de calor como é discutido no artigo. A combinação resultou num resfriamento em torno de  $27 \text{ K}$  ( $-246^\circ\text{C}$ ) durante o processo de operação da bobina.

## **2.5 Materiais e Designs para Sistemas de Refrigeração com Nitrogênio**

Durante o curso de engenharia, nos deparamos com algumas disciplinas em que nos é requisitado o raciocínio de projetar e desenvolver algo a partir de certa demanda. Projetar é levar diversos fatores em consideração, desde a engenharia propriamente dita, onde entram os parâmetros do projeto em que é necessário levar em consideração aquilo que vai atender as demandas físicas e mecânicas como temperatura, pressão, resistência mecânica, etc., até os que influenciam a seleção de materiais e o desenvolvimento das características e dimensões do projeto. Além da parte técnica, também aprende-se que existe uma parte gerencial por trás de tudo, onde além dos fatores mencionados, deve-se levar em consideração a questão financeira, onde o custo tem uma importante relevância no projeto como um todo, o que muitas vezes

nos leva a realizar projetos com materiais mais baratos e que atendam a necessidade, tornando o projeto mais viável e rápido de ser realizado.

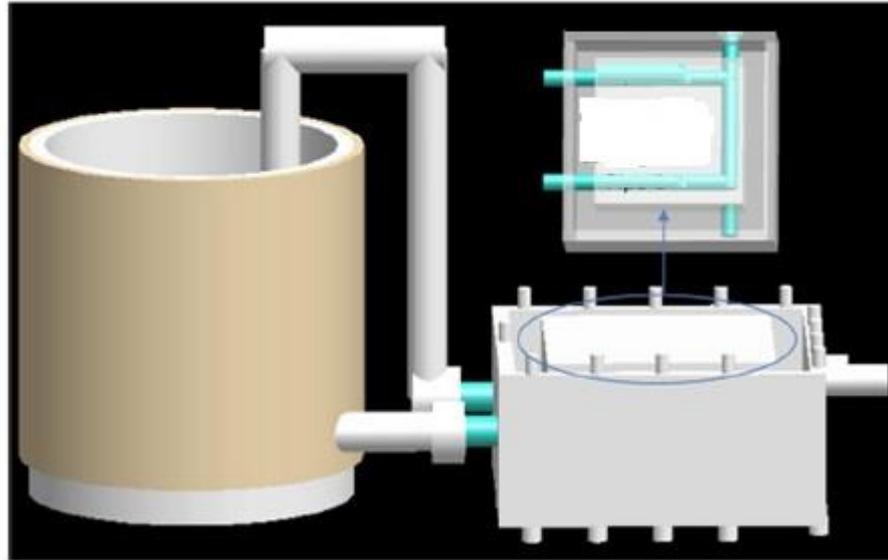
Entrando no escopo desse projeto e através de pesquisa bibliográfica, foi tomado conhecimento de diversos experimentos que trouxeram inspiração para o trabalho demonstrado aqui. Através da revisão bibliográfica aqui realizada pode-se notar que a refrigeração de equipamentos ou de dispositivos com fluidos criogênicos é utilizada no meio acadêmico onde em muitos casos as baixas temperaturas conseguidas por meio desses gases podem trazer as características necessárias para que se possam obter resultados aos projetos propostos pelos pesquisadores.

É interessante notar como no processo de projeto e construção do experimento, entram em consideração alguns fatores principais, entre eles como o aparato será construído (design), qual o material a ser utilizado, como vai ser feito o isolamento térmico, uma vez que se lida com temperaturas baixíssimas e a perda de calor é um fator de extrema importância tanto para manter a temperatura do experimento constante quanto para economizar, no caso, o fluido de refrigeração, para que não ocorram perdas. Gerando assim economia e melhor obtenção de resultados.

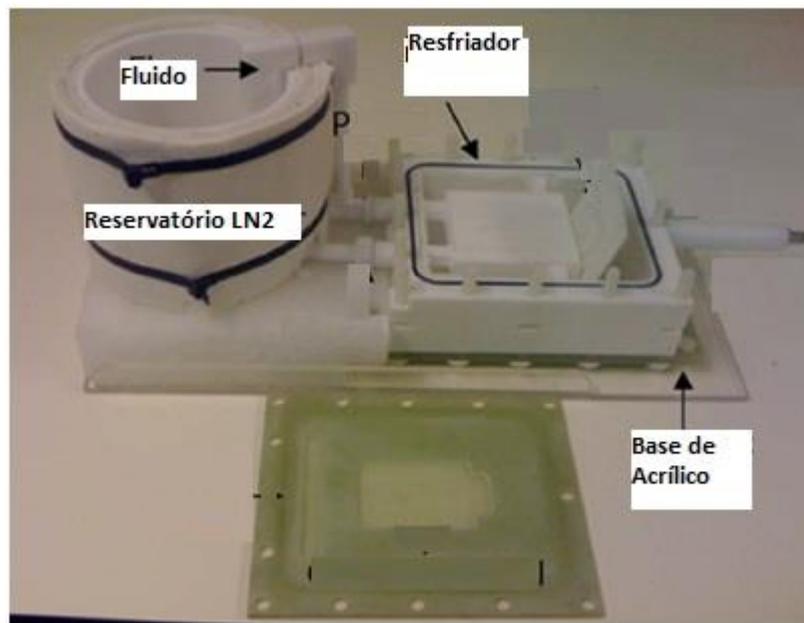
A seleção de materiais para o sistema é de extrema importância, como foi visto em [7], materiais comuns na construção mecânica como aço carbono tornam-se inviáveis quando o trabalho envolve temperaturas criogênicas porque se comportam de maneira extremamente frágil e qualquer tipo de tensão gerada poderia romper o sistema e acabar com o experimento. Assim, como uma alternativa a esse aspecto e até mesmo pela facilidade de trabalhar com tais materiais, os polímeros são muito utilizados para estes projetos de forma alternativa.

Em [1], o projeto do “*Cryostat*” utilizou um bloco de 10 x 10 cm de Politetrafluoroetileno, também conhecido como PTFE ou Teflon, onde foram feitos três furos para entrada dos tubos de circulação do nitrogênio líquido. Em [4], O PTFE também foi utilizado para envolver a bobina toroidal como parte da estrutura do experimento. Ainda em [1] foi utilizado espuma de poliuretano para envolver o reservatório de nitrogênio líquido reduzindo a taxa de transferência de calor e conseqüentemente sua ebulição. Como uma alternativa ainda ao PTFE, pode ser utilizado o poliestireno tornando ainda mais barato e rápido de se construir o aparato como visto em [4], já que é um material de fácil acesso e barato.

Nas Figuras 3 e 4, temos um exemplo do projeto na fase de desenvolvimento e na fase pós-construção, respectivamente.



**Figura 3:** Projeto do aparato para refrigeração de uma bobina RF (“*Radio-Frequency*”) com nitrogênio líquido para um “*3-Tesla Whole Body Scanner*” [1].



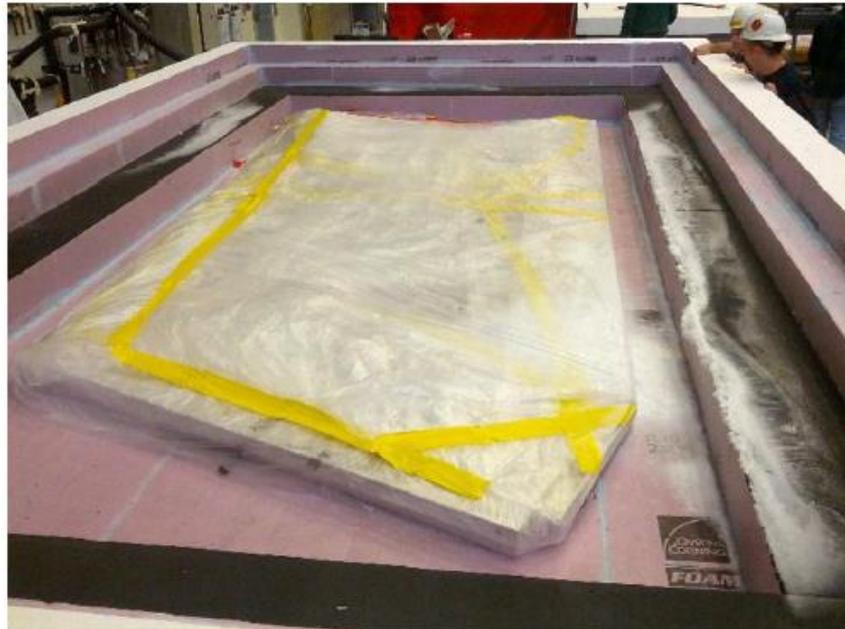
**Figura 4:** Imagem do aparato projetado para resfriamento de uma bobina RF em um “*3-Tesla Whole Body Scanner*” [1].

Na Figura 5 pode-se observar a utilização do PTFE como revestimento.



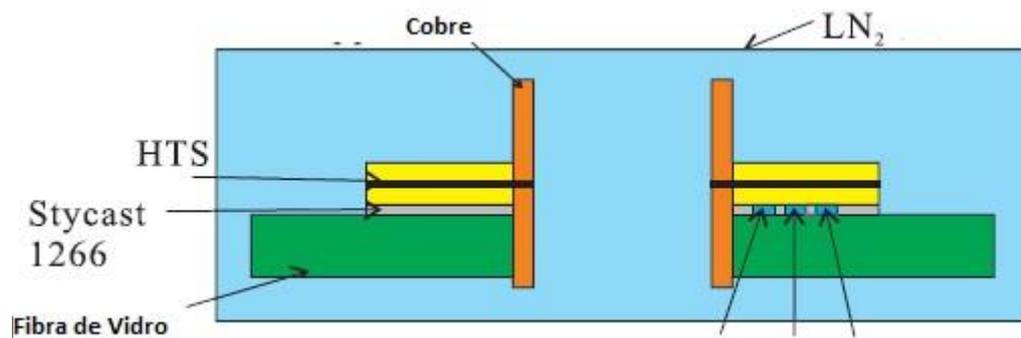
**Figura 5:** Revestimento de PTFE envolvendo uma bobina Toroidal como parte da estrutura do experimento em [4].

Observando novamente que em [4], o experimento foi realizado com nitrogênio gasoso resfriado por nitrogênio líquido. Ainda nesse experimento, para tornar mais barato e rápido de ser executado, a base utilizada para apoiar a bobina é feita de poliestireno, sendo assim fácil de ser modelada e trabalhada. Além disso, todo o aparato foi envolvido por plástico durante o teste enquanto uma contínua purga de 3 a 4 litros por minuto de nitrogênio gasoso foi utilizada, tudo isso para manter a bobina numa temperatura de resfriamento intenso. A Figura 6 mostra o experimento pronto para testes.

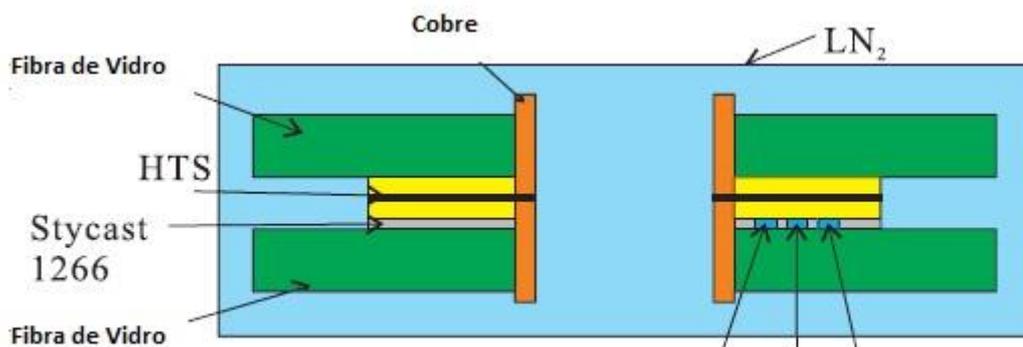


**Figura 6:** O sistema com poliestireno, sem a tampa e envolvido com o plástico para proteger a o gás purgado para dentro do sistema em [4].

Em [3] foi realizado o experimento em uma maneira bem mais simples, onde uma bobina do tipo “Pancake” foi testada em três modelos diferentes. Em um desses modelos a bobina foi presa a uma pequena placa de fibra de vidro através de uma resina Epoxy, chamada “Stycast 1266”, e então levada ao banho de nitrogênio líquido como pode ser visto na Figura 7. Em outro modelo proposto nesse mesmo experimento a mesma bobina foi presa entre duas placas de fibra de vidro, com a mesma resina Epoxy utilizada, e então levada ao banho em nitrogênio líquido como pode ser visto na Figura 8.



**Figura 7:** Desenho esquemático do primeiro modelo de experimento realizado [3].

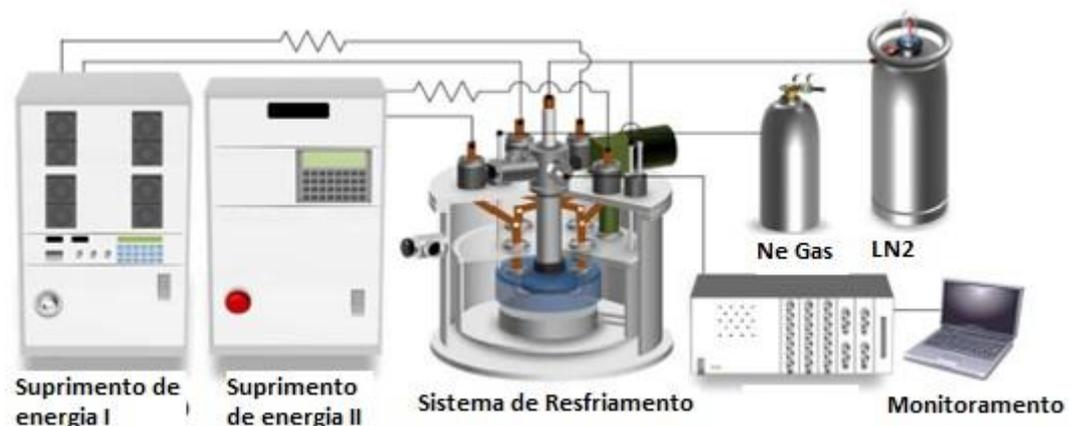


**Figura 8:** Desenho esquemático do segundo modelo de experimento realizado [3].

Alguns experimentos são realizados em aparatos mais sofisticados em que se utiliza de uma engenharia mais avançada junto com materiais mais caros de serem trabalhados. De qualquer maneira é válido para efeito de revisão bibliográfica estudar também como são idealizados esses projetos como no caso do estudo dos efeitos do resfriamento de uma bobina em um sistema criogênico misto [5]. Nesse experimento, que tem o diagrama demonstrado na Figura 9, foi utilizado nitrogênio líquido junto com gás neônio dentro de um aparato feito em

alumínio com dois estágios de resfriamento, tendo o objetivo de no primeiro estágio atingir-se faixas de temperaturas em torno de 41K (-232°C) e no segundo estágio em torno de 4,2 K (-268,8°C). Para tais temperaturas foram utilizados isolantes de altíssima capacidade térmica, uma pressão de vácuo de  $10^{-7}$  Torr e uma mistura de nitrogênio sólido, proveniente do nitrogênio líquido ainda mais resfriado, e Neônio líquido. Um recipiente de 40L de nitrogênio líquido foi utilizado.

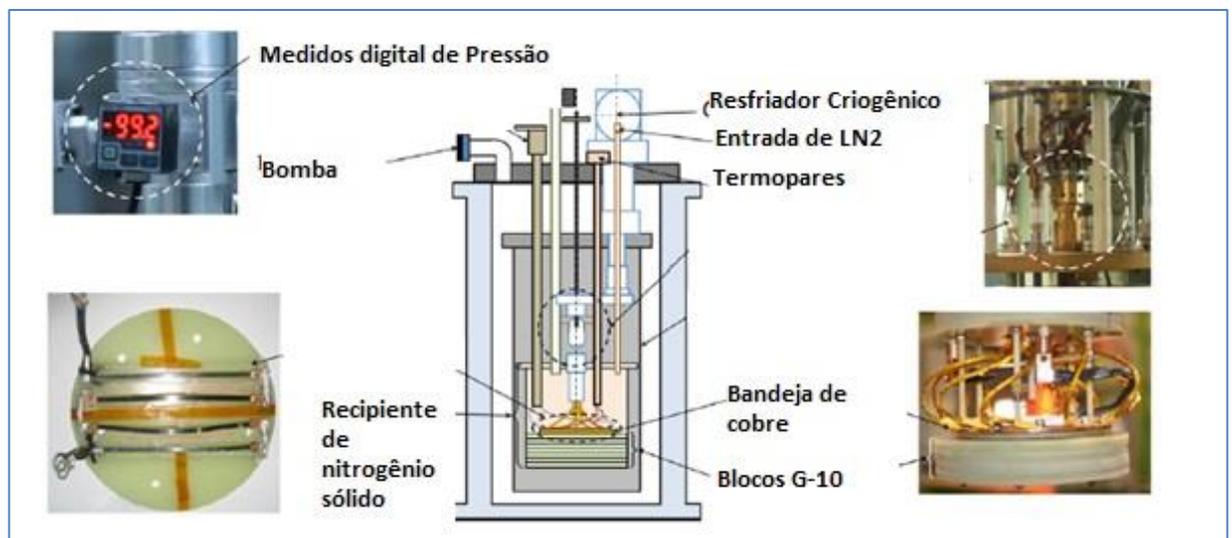
O estudo em [5] examinou as propriedades elétricas e térmicas que uma bobina “2G HTS” resfriada por um mistura de elementos criogênicos (gás, líquido e sólido) levando em consideração a quantidade de líquido utilizada, que, no caso foi o próprio nitrogênio líquido. A partir dos resultados obtidos para tais propriedades, foi altamente recomendado que, de uma maneira geral, para melhorar a eficiência da transferência de calor em temperaturas tão baixas (25 ~27 K ou -248°C ~ -246°C) seja adicionado pequenas quantidades de nitrogênio líquido junto ao nitrogênio sólido no sistema. Como comentado anteriormente, com equipamentos mais avançados, é possível resfriar o nitrogênio líquido até sua fase sólida e mantê-lo nessa condição para realizar ensaios.



**Figura 9:** Diagrama esquemático do aparato experimental realizado para o estudo em [5].

No experimento realizado em [6], havia a necessidade de se resfriar um limitador de corrente em que a temperatura do nitrogênio líquido não seria suficiente para se conseguir o resultado esperado porque seu desempenho seria melhorado apenas com temperaturas abaixo da fase líquida do nitrogênio, além disso, experiências anteriores mostraram um aumento grande no volume do nitrogênio gasoso devido à ebulição relacionada à troca de calor com o uso do nitrogênio líquido. Por esses motivos e devido a disponibilidade de se usar uma

tecnologia mais avançada para o estudo, fez-se o uso também de nitrogênio sólido para se conseguir temperaturas mais baixas e melhores resultados. Portanto o sistema de refrigeração era composto de um recipiente para o nitrogênio sólido, um resfriador criogênico (“*Cryocooler*”) de dois estágios, escudo radiativo e bomba de vácuo para diminuir a convecção e radiação devido à troca de calor como visto na Figura 10. O estudo obteve bons resultados em relação à melhora da sobre corrente com a aplicação do nitrogênio sólido, porém, vale observar que também foi experimentada a mistura com nitrogênio sólido e líquido onde foram obtidos resultados melhores em relação à troca de calor e ao tempo de recuperação. Em [6], é recomendado o uso do nitrogênio em mistura para o estudo em questão como forma de se atingir um melhor resultado.



**Figura 10:** Desenho esquemático do sistema de refrigeração com nitrogênio sólido e líquido do experimento realizado em [6].

## 2.6 Conceitos em Transferência de Calor

Para esse projeto serão abordados alguns temas em que é necessário um entendimento de alguns conceitos trazidos durante o curso de engenharia mecânica. No caso, esses conceitos são relacionados aos mecanismos de transferência de calor conhecidos como condução e convecção. De acordo com [9], sempre que um corpo aquece ou esfria, ocorre uma troca energética e as propriedades de cada material influenciam de maneira direta nessa relação.

### 2.6.1 Condução Térmica

A condução térmica, segundo [9], refere-se ao transporte de energia em um meio devido a um gradiente de temperatura e os mecanismos físicos por trás desse transporte refere-se a atividade randômica das moléculas do meio em que a condução acontece. A condução térmica é escrita matematicamente através da lei de Fourier sendo essa lei utilizada para determinação do fluxo de calor que depende de como a temperatura está sendo distribuída através do meio.

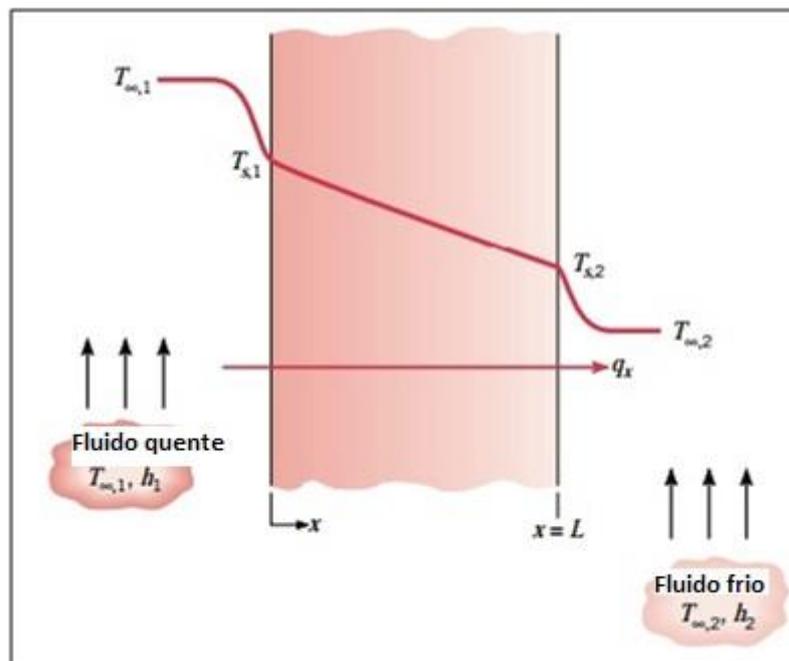
A equação para a condução térmica através de duas superfícies isotérmicas e planas é normal à superfície e definida em [9], sendo vetorialmente escrita como

$$q'' = -k\nabla T = -k \left( \mathbf{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Assim, obtemos a equação para a condução térmica em qualquer direção, uma vez que  $\nabla$  se refere ao operador nas três dimensões e  $T(x,y,z)$  o campo escalar de temperaturas. Observa-se também que o fluxo de calor é sempre na direção perpendicular às superfícies isotérmicas. Além disso, observamos outro fator importante nessa equação,  $k$ , que representa a condutividade térmica do material. É definido em [7] e [9] que a condutividade térmica é uma propriedade de transporte que indica a taxa em que a energia é transferida pelo processo de difusão. Também é definido que essa propriedade depende da estrutura física atômica e molecular da matéria, que está relacionada diretamente ao estado da matéria. Essa propriedade é amplamente conhecida e tabelada para diversos materiais.

## 2.6.2 Parede Plana

Para a condução unidimensional é definido em [9] que o fluxo de calor é dependente da temperatura e é distribuído apenas em uma direção. Além disso, se a parede plana está separando dois fluidos em diferentes temperaturas, é definido que a transferência de calor vai ocorrer por convecção a partir de um fluido mais quente para uma das superfícies que se encontra menos quente, por condução através da parede plana e por convecção novamente através da outra superfície conforme mostra a Figura 11.



**Figura 11:** Exemplo do fluxo de calor numa parede plana. [9].

## 2.6.3 Convecção

O conceito de convecção é definido por [9] como um modo de transferência de calor que é gerado através do movimento de um fluido, sendo que esse movimento indica que um grande número de moléculas está se movendo coletivamente. Essa movimentação, junto com um gradiente de temperatura, gera transferência de calor. Portanto se uma superfície está exposta ao ambiente, a convecção também existirá como forma de transferência de calor. A convecção é classificada conforme a natureza do movimento do fluido. Em [9] é dito que a convecção pode ser forçada ou natural. A convecção forçada existe quando o movimento do fluido é causado por forças externas, como por exemplo, um ventilador, uma bomba ou até mesmo ventos atmosféricos. A convecção natural é definida forças de flutuabilidade, causadas por diferenças de densidades no fluido causadas por variações na temperatura.

Independente do tipo de convecção é definido por [7] e [9] que a taxa de transferência de calor devido à convecção é escrita da forma

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Onde  $q''$  é o fluxo de calor convectivo ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) e é proporcional à diferença de temperaturas entre a superfície,  $T_s$ , e o fluido,  $T_\infty$ . Além disso,  $h$  é o parâmetro definido como coeficiente de convecção ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ). Esse termo é uma propriedade similar ao  $k$  para condução e também é conhecido e tabelado para diferentes fluidos.

#### 2.6.4 Distribuição de Temperatura e Resistência Térmica

A distribuição de temperatura numa parede plana, caso não haja nenhuma forma de geração de calor ou de dissipação de calor além do próprio gradiente de temperatura que ocorre entre as superfícies e o ambiente externo a elas, é descrita, por [9] de uma forma apropriada através da equação do calor unidimensional que é

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (3)$$

Lembrando que quando não há geração de calor, o fluxo de calor é constante, independente de "x" [9]. É definido também por [9], que após o desenvolvimento da equação (3) com as determinadas condições de contorno, chega-se a conclusão que a distribuição de temperatura varia linearmente com "x". Com isso concluído, pode-se utilizar a lei de Fourier para determinar a taxa de condução de calor [9], que fica da forma

$$q''_x = -kA \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L} (T_{s,1} - T_{s,2}) \quad (4)$$

Onde  $k$  é o coeficiente de condutibilidade térmica,  $A$  é a área da parede plana,  $L$  sendo a espessura da parede e  $T_{s,1}$  e  $T_{s,2}$  sendo as diferentes temperaturas em cada uma das superfícies da parede conforme mostra a Figura 11.

A partir dessa equação, de acordo com [9] nota-se que para o caso especial em que não há geração de calor interna e as propriedades sendo constantes, surge um conceito importante conhecido como resistência térmica. O conceito de resistência térmica é definido em [9] como o potencial de condução correspondente a taxa de transferência de calor.

A resistência térmica associada à transferência de calor por condução é definida em [9] como

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (5)$$

Onde os termos são os mesmo conhecidos para a equação que determina a taxa de condução de calor.

Também por [9], a resistência térmica associada à transferência de calor por convecção é determinada como

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \quad (6)$$

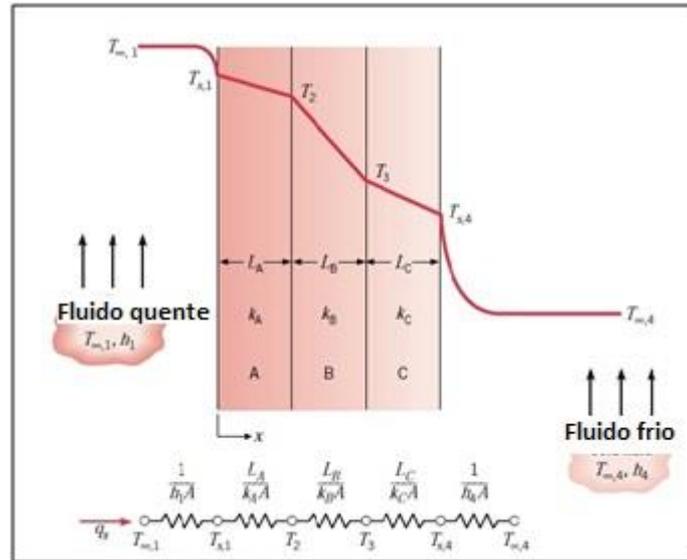
Onde  $T_s$  e  $T_\infty$  são as temperaturas da superfície e ambiente, respectivamente,  $q$  é a taxa de transferência de calor,  $h$  sendo o coeficiente de convecção e  $A$  sendo a área da superfície onde a convecção está ocorrendo.

A partir das definições de resistência térmica tanto para condução quanto para convecção, pode-se trazer um conceito interessante conhecido por parede composta onde várias camadas de diferentes materiais criam uma resistência térmica em conjunto, ou seja, cada camada responde de uma forma a troca de calor ou energia, umas facilitando mais do que outras a passagem de calor e todas influenciadas pelas mesmas propriedades que geram as resistências térmicas conforme foram citadas aqui.

É definido então, conforme [9], que o fluxo de calor através de uma parede unidimensional com mais de uma camada de diferentes materiais, mostrado na Figura 12 é escrito matematicamente como

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\sum R_t} \quad (7)$$

A partir de (7), pode-se obter o fluxo de calor unidimensional que está entrando no sistema através de uma superfície. O somatório de todos os  $q_x$  que atuam durante a execução de qualquer experimento vai determinar o fluxo total de calor para aquele momento.



**Figura 12:** Resistência térmica na parede composta. [9]

## 2.7 Autonomia do Sistema

Uma vez que os cálculos analíticos que determinam o fluxo de calor trocado entre o nitrogênio líquido e o ar ambiente forem determinados, torna-se necessário determinar a quantidade de tempo que o sistema poderá resfriar a bobina sem que seja necessária uma nova recarga com nitrogênio. Dessa maneira, podemos identificar de que maneira o sistema de isolamento térmico está influenciando na taxa de vaporização do nitrogênio líquido. Medir o quanto o sistema está trocando de calor com o ambiente fornece informações de extrema importância para qualquer projeto ou teste futuro que venha a ser feito com maior precisão. Dessa maneira, podemos saber exatamente a quantidade de nitrogênio líquido necessária para realizar qualquer experimento e assim ter uma melhor avaliação de um custo inicial para cada atividade em termos de matéria prima.

A partir da taxa com que a massa de nitrogênio líquido varia no tempo pode-se mensurar a quantidade real de calor que está sendo trocada com o ambiente. Para isso, necessitamos de uma equação que descreva o que acontece no sistema de resfriamento no momento em que o nitrogênio se encontra dentro do recipiente interno e inicia a troca de calor com a vizinhança.

De acordo com [7] e [13], quando energia é transferida para uma substância ou retirada da mesma, ela esquenta ou esfria de acordo com a intensidade dessa transferência. Essa energia é dependente da massa da substância, do calor específico e da variação de

temperatura. Logo, de acordo com essas referências podemos escrever a variação da quantidade de energia  $\Delta Q$  como

$$\Delta Q = mc\Delta T \quad (8)$$

Onde  $m$  é a massa da substância,  $c$  é o calor específico e  $\Delta T$  sendo a variação de temperatura.

O calor específico  $c$  é definido em [7] e [13] como sendo a energia necessária para aumentar a temperatura de um grama de uma substância em um grau Celsius. Também é definido que em certas circunstâncias o calor adicionado ou removido de uma substância não causa mudanças em sua temperatura, ao invés disso, causa uma mudança de fase. Essa relação entre o calor adicionado e a mudança de fase resultante é escrita em [13] como sendo

$$\Delta Q = Lm \quad (9)$$

Onde  $\Delta Q$  é a quantidade de calor adicionado ou removido da substância,  $L$  é o calor latente associado à transformação de fase em questão e  $m$  é a massa da substância que sofreu uma transformação de estado.

É definido em [7] e [13] que de acordo com a termodinâmica, o calor latente de vaporização ( $L_v$ ), é definido como a energia que deve ser adicionada ao sistema para completar a transformação de fase líquido-vapor sem mudar a temperatura do sistema.

Como o nitrogênio líquido tem seu ponto de ebulição bem abaixo da temperatura ambiente na pressão atmosférica, qualquer energia que entra no sistema provoca uma variação em sua massa líquida, ou seja, em uma perda de massa líquida mantendo sua temperatura constante [7].

A partir da equação (9), podemos rearranjar e tomar as diferenciais para obter a taxa de variação de massa de nitrogênio líquido resultante da quantidade de calor que entra no sistema através da vizinhança, segundo [12] e [13]. Portanto, temos

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{\text{vizinhança}} = L \left. \frac{dm}{dt} \right|_{\text{nitrogênio líquido}} \quad (10)$$

Onde  $\frac{dQ}{dt}\Big|_{vizinhan\c{a}}$  é a transferência de calor entre o nitrogênio líquido e o ambiente,  $L$  é o calor latente de vaporização e  $\frac{dm}{dt}\Big|_{nitrog\tilde{e}nio\ l\acute{iqu}ido}$  é a variação em massa correspondente do nitrogênio líquido.

Essa equação serve para determinar a quantidade de variação em massa do nitrogênio quando somente o ambiente interfere no sistema. Porém, em muitos testes com equipamentos eletrônicos podemos ter outra forma de energia entrando no sistema, por exemplo, se algum equipamento que dissipe calor estiver sendo resfriado, esse calor dissipado também deve ser levado em consideração uma vez que estará em contato direto com o nitrogênio líquido. Se houver a necessidade de se obter a variação em massa de nitrogênio líquido enquanto algum equipamento estiver sendo resfriado e caso este dissipe calor constantemente no tempo, basta adicionar um termo à equação através de uma análise do balanço de energia, portanto teremos como mostrado em [12] e [13]

$$P + \frac{dQ}{dt}\Big|_{vizinhan\c{a}} = L \frac{dm}{dt}\Big|_{nitrog\tilde{e}nio\ l\acute{iqu}ido} \quad (11)$$

Onde  $P$  é a quantidade de calor, em Watts, adicionada ao sistema por algum outro meio de dissipação, enquanto os outros elementos continuam sendo os mesmos da equação (10).

A equação (11) representa uma abordagem total do que está acontecendo durante um experimento de resfriamento de algum equipamento que produza algum tipo de calor. A partir dela é possível prever de uma forma mais generalizada a taxa de vaporização do nitrogênio líquido e em consequência a quantidade de recargas que serão necessárias ou a própria quantidade inicial depositada no compartimento interno.

Com a informação da variação de massa obtida, pode-se determinar fazer uma comparação através da variação de volume junto com o peso específico para se determinar o quanto de massa é necessário para submergir algum equipamento por inteiro.

Em [10], é escrito a equação que relaciona a massa com o volume e peso específico da seguinte maneira

$$w = \rho \cdot v \quad (12)$$

Onde o  $w$  é a massa em Kg,  $\rho$  é o peso específico e  $v$  é o volume ocupado pela substância.

Dessa maneira, a partir de um volume pré-determinado, pode-se obter a quantidade de massa necessária para preencher todo o espaço. Case seja necessário, por exemplo, encobrir algum objeto por inteiro dentro de um compartimento, pode-se calcular pelo volume desse mesmo compartimento a quantidade de massa necessária para ocupar esse espaço e a partir daí ter uma estimativa próxima da quantidade de matéria prima que seja necessária para tal experimento.

## Capítulo 3

### Desenvolvimento do Projeto

Este capítulo aborda a aplicação dos conceitos estudados na seção de revisão bibliográfica para o desenvolvimento de uma solução que atende aos requisitos do projeto desenvolvido no Laboratório de Novas Tecnologias do CEFET/RJ.

A partir disso, a ideia do projeto, trazida pelo professor José Paulo Vogel, faz parte do projeto Tesla criar e desenvolver um sistema que pudesse resfriar uma Bobina de Tesla, construída e elaborada para este projeto, até temperaturas criogênicas, a fim de se analisar as diferenças e o comportamento da Bobina dentro e fora do sistema.

Levou-se em consideração, que nesse projeto de âmbito acadêmico, deve ser realizado de maneira mais simples a fim de não aumentar o custo de Fabricação do Sistema, tornando-o assim inviável de ser construído. Por isso, desde os materiais utilizados, o design e construção, e forma como deve ser realizado o experimento em si, leva-se em consideração esse fator, mantendo, claro, o necessário para que se possa trabalhar em temperaturas criogênicas e para que se possam obter resultados de uma maneira mais confiável conforme citado nos artigos estudados.

#### 3.1 Idealização do Sistema de Refrigeração

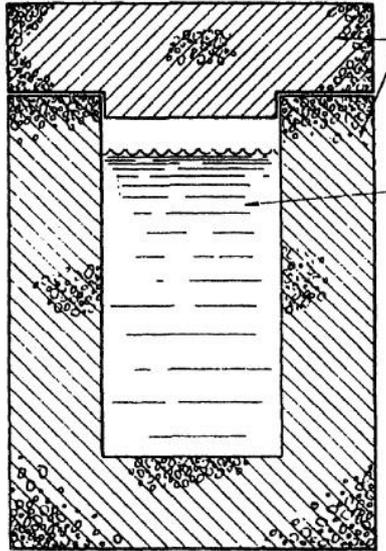
A partir do estudo realizado na revisão bibliográfica, veio surgindo aos poucos a ideia do que entraria no escopo desse trabalho em relação ao design e funcionamento do sistema de refrigeração. O gás a ser utilizado é o Nitrogênio e ele será trabalhado nas suas duas formas, líquida ( $LN_2$ ) e gasosa ( $GN_2$ ). A escolha desse gás para o experimento foi realizada porque ele pode ser envasado de forma líquida e trabalhado tanto como líquido ou como gás, atingido faixas de temperaturas baixíssimas que entram no escopo do trabalho. Além de ser um gás inerte, não tóxico e não explosivo [7]. Como o equipamento a ser resfriado é uma bobina, a característica do nitrogênio de ser inerte é de extremo valor, uma vez que mesmo em estado líquido não irá afetar os circuitos eletrônicos instalados ou a fiação necessária para captura dos dados. Além de ser um gás seguro de ser utilizado.

A Bobina de Tesla, conforme mencionado na revisão bibliográfica é composta por um cilindro envolvido por espiras de fio com uma bitola menor e outra camada com menos espiras composta por um fio de bitola maior. Os fios geralmente são de cobre.

Durante esse processo de projeto do sistema, diversas dúvidas foram levantadas em relação à maneira como deveria ser montado e quanto consequências e características dos materiais e da própria bobina durante o experimento em contato com o nitrogênio. Antes de tudo, o desafio era manter o nitrogênio líquido refrigerando a bobina por tempo suficiente para que as diversas medições do experimento pudessem ser realizadas. De acordo com [7], sabe-se que o nitrogênio líquido se encontra em estado de vaporização nas condições normais de temperatura e pressão e possui um calor latente de vaporização muito baixo, ou seja, pouca energia é necessária para transformar um grama de nitrogênio líquido em vapor. Assim, ao se colocar o nitrogênio líquido aberto na atmosfera, ele dura um período de tempo muito curto devido à intensa troca de calor. Portanto a primeira dificuldade seria projetar algo que pudesse retardar esse tempo de vaporização do nitrogênio líquido e assim pudesse resfriar a bobina por um tempo suficiente para seja possível obter algum resultado expressivo.

A partir desse parâmetro, é possível encontrar na literatura materiais que possuem baixíssimo coeficiente de condutibilidade térmica e que resistam a temperaturas criogênicas, mais especificamente à temperatura do nitrogênio líquido ( $-196^{\circ}\text{C}$ ), segundo [7].

Após ter uma noção de quais materiais seriam os mais viáveis de serem utilizados, parte-se para a ideia da disposição em que a bobina ficaria mergulhada no nitrogênio. A questão seria qual a melhor geometria possível e que pudesse ser construída. A principal ideia veio a partir de [1], [6] e [7], que é de criar um compartimento que recebesse o nitrogênio líquido formado pelo melhor material possível dentro do escopo do projeto. A Figura 13 mostra como começou a surgir à ideia de uma “caixa térmica” para trabalhar com nitrogênio.

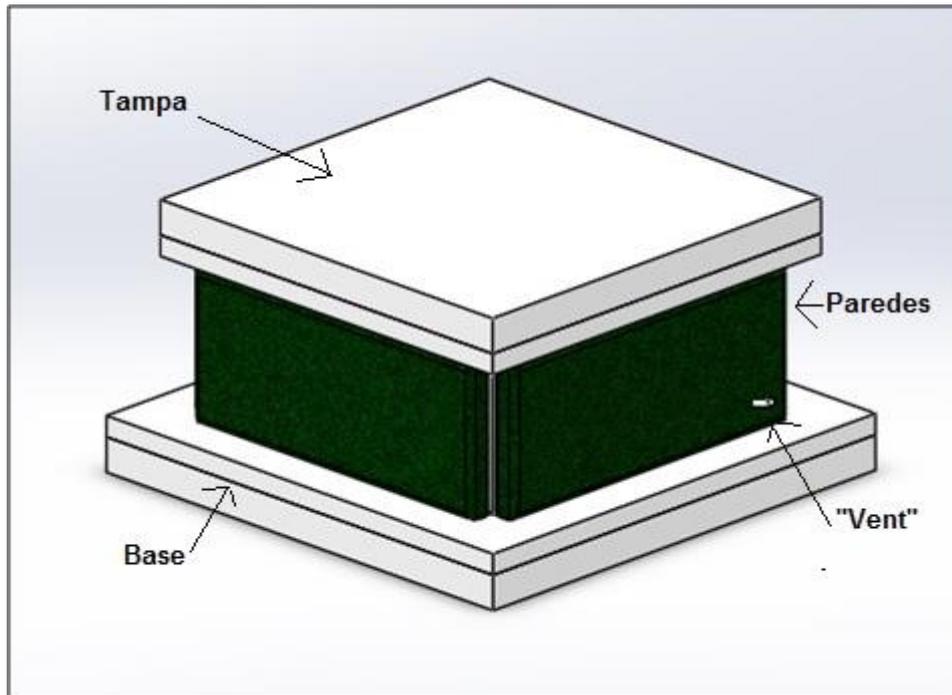


**Figura 13:** Recipiente para armazenamento de nitrogênio feito de Poliestireno.[7]

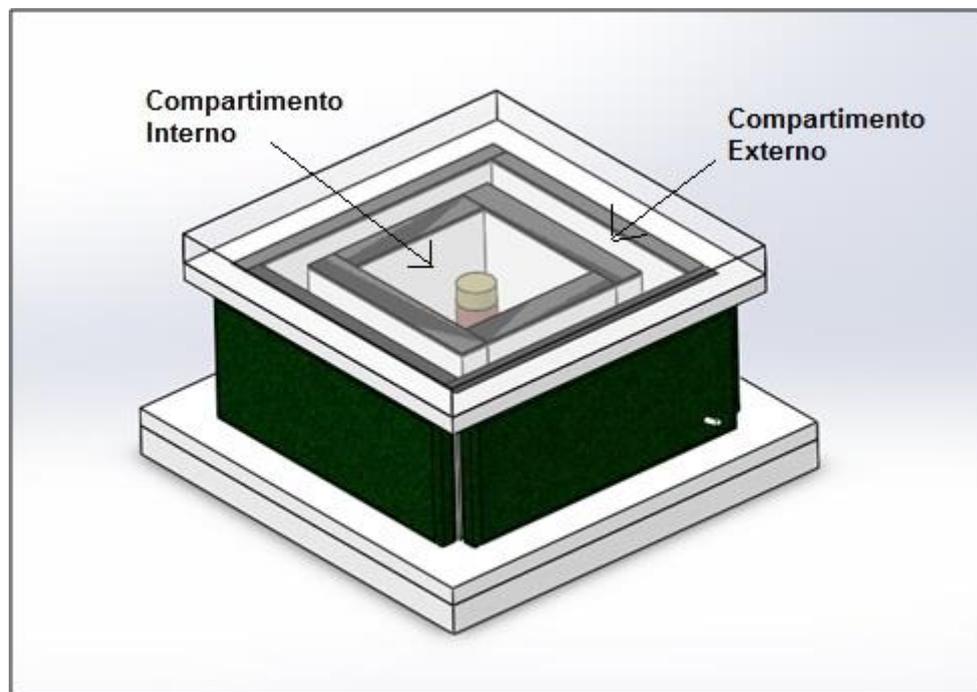
É importante observar que foi especificado pelo Professor Paulo Aquino que para o experimento com a bobina seja realizado, o sistema não poderia conter nenhum material condutor de eletricidade, ou seja, não poderiam se utilizar os metais em nenhum momento, tanto para estrutura quanto para fixação de componentes. Além disso, o Professor Paulo estabeleceu que seriam utilizadas bobinas com diâmetro em torno de 60mm e comprimento em torno de 230mm para que fosse realizado o experimento. Em seguida se fez necessário projetar a alimentação com nitrogênio entre outros fatores que serão descritos nas seções seguintes.

### **3.2 Projeto do Sistema de Refrigeração**

Após todos os esclarecimentos mencionados na seção 3.1 e estimativas dos cálculos térmicos que geraram diversas modificações ao longo do caminho, o projeto final do sistema pode ser visto na Figura 14 e Figura 15 sem a parte de alimentação do nitrogênio líquido.



**Figura 14:** Ilustração do projeto em “SolidWorks”. Fonte própria.

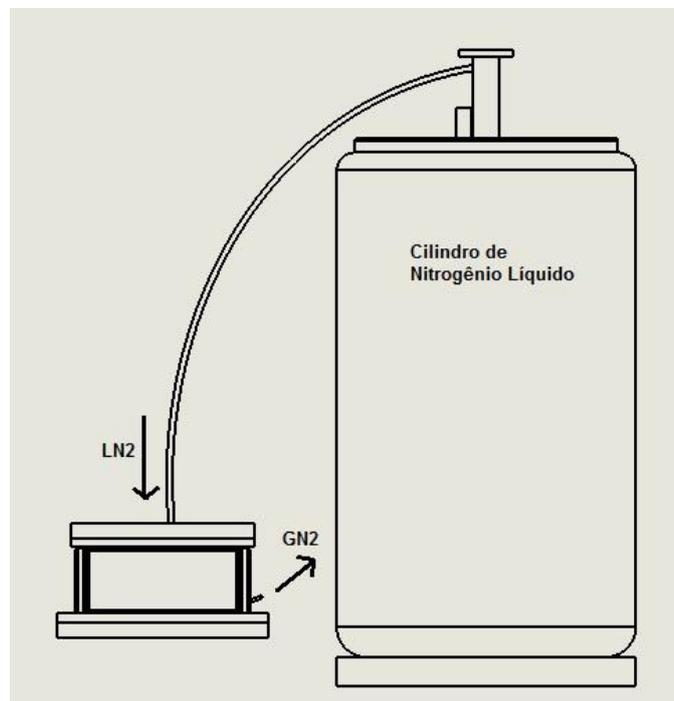


**Figura 15:** Ilustração do Projeto em “SolidWorks” com transparência da tampa alterada para detalhamento da parte interior. [Fonte Própria]

O material principal escolhido para a construção foi o Poliestireno Expandido de alta densidade porque possui baixíssimo coeficiente de condutibilidade térmica, em torno de 0,036 W/m.K, segundo o fabricante [11], ter custo muito reduzido comparado com outros materiais

vistos na revisão bibliográfica e ser um material fácil de ser trabalhado e que é vendido em placas. Além do Poliestireno, a Lã de rocha também entrou para aumentar a resistência térmica conforme será mais bem detalhado nas seções seguintes.

A Figura 16 mostra o esboço do sistema completo de circulação do nitrogênio, que entra na forma líquida para encher a parte que a bobina será resfriada e então sai do sistema pelo “vent” ou exaustão, na forma de vapor, que é fruto da troca de calor com o ambiente e a bobina. As siglas LN2 e GN2 referem-se ao nitrogênio na fase líquida e na fase gasosa respectivamente.

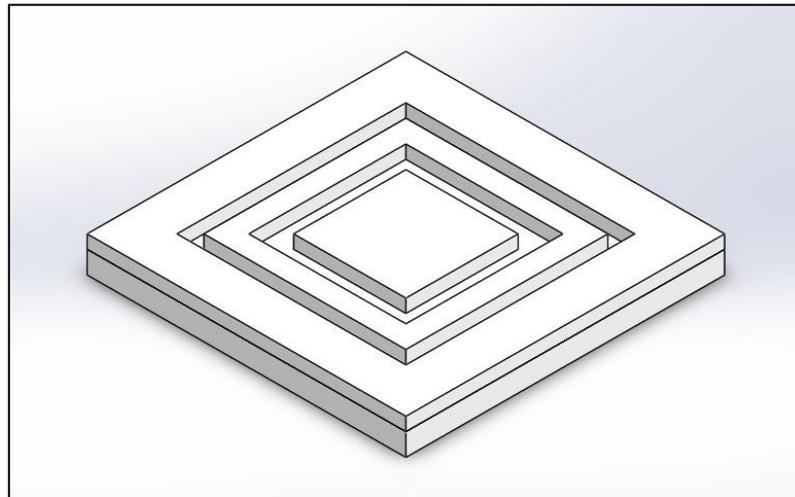


**Figura 16:** Esboço do sistema de refrigeração. [Fonte Própria]

### 3.2.1 Base

A base é composta por duas placas de poliestireno expandido de alta densidade tipo 5, cujas propriedades estão descritas no catálogo de especificação técnica do fabricante no anexo A [11]. A placa inferior tem as dimensões totais de 710x710x50mm e superior tem dimensões externas de 710x710x30mm. Elas são projetadas para serem sobrepostas e coladas com cola comum especificada para o material conforme o esboço na Figura 17. A placa inferior é cortada em diferentes formatos de molduras que criam espaçamentos para que seja possível encaixar as paredes do compartimento. O projeto visa o encaixe justo e a fixação através de

cola apropriada para não serem necessários outros meios de fixação. O poliestireno apresenta características naturais em que se torna possível realizar um encaixe justo. Além de o encaixe ser justo, as paredes são também coladas à base inferior. Todas as arestas serão vedadas com resina Epóxi conforme indicado por [4]. Maiores detalhes são encontrados nos desenhos técnicos no Anexo A. A escolha das dimensões de espessura levaram em consideração as estimativas dos cálculos térmicos para a transferência de calor com o ambiente e a disponibilidade do fornecedor.



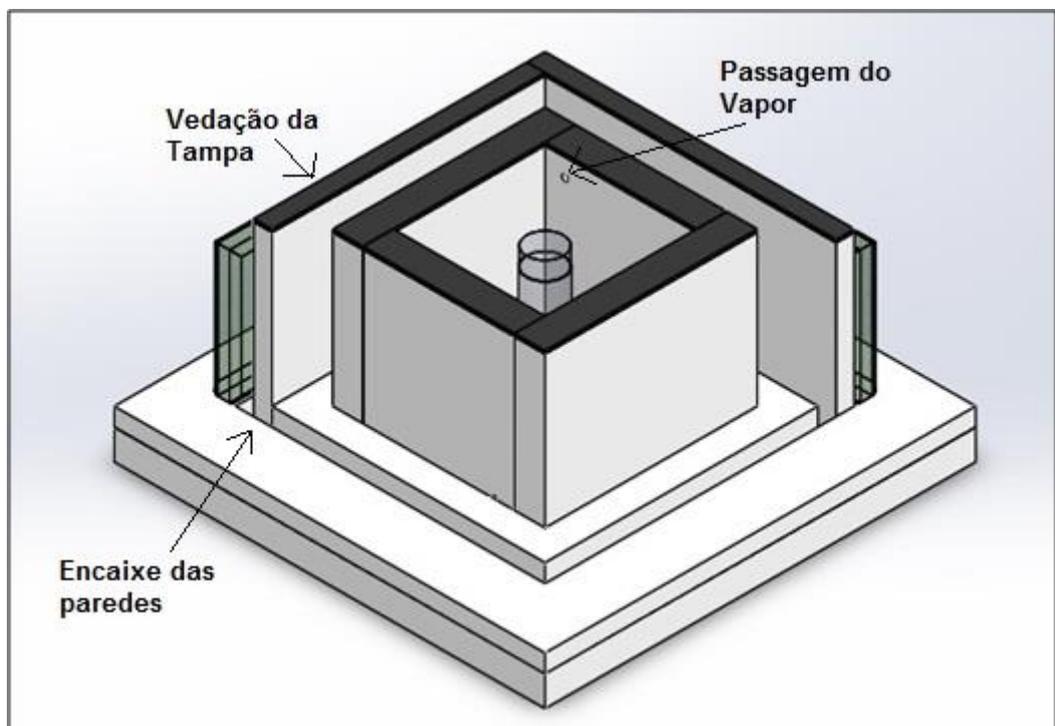
**Figura 17:** Ilustração da base em “SolidWorks”. [Fonte Própria]

### 3.2.2 Paredes e Compartimentos Internos

As paredes externas são compostas por quatro placas de Poliestireno Expandido de alta densidade do tipo 5, com as propriedades descritas pelo fabricante [11]. Duas placas que ficam posicionadas em direções opostas têm dimensões 510x280x30mm e as outras duas possuem dimensões de 450x280x30mm e ficam posicionadas também em posições opostas umas as outras. Estas quatro placas externas são encaixadas na moldura maior e coladas com cola para poliestireno à base e também em cada contato lateral. O vão entre essas paredes e as paredes internas foi projetado para servir como barreira de vapor. Conforme visto em [7], as barreiras de vapor são formas de se reaproveitar o vapor gerado pelo líquido para que se melhore a eficiência do isolamento térmico. O vapor gerado pelo líquido passa para esse compartimento através de furos na parte superior das paredes internas. Assim, a pressão do compartimento do líquido não vai subir, gerando riscos, e o vapor que é gerado em temperaturas baixíssimas, serve como barreira para o fluxo de calor que vem do ambiente em

direção ao nitrogênio líquido. Um pequeno tubo de plástico liga o interior do compartimento do vapor ao meio externo, dessa forma, o vapor circula por esse compartimento e em seguida é liberado para a atmosfera.

A moldura interna recebe as placas que formam as paredes internas. São duas placas com dimensões 350x280x50mm e as outras duas com dimensões 250x280x50mm formadas pelo mesmo material das paredes externas e são fixadas da mesma maneira. Essas quatro placas formam o compartimento que recebe o nitrogênio líquido e a bobina. Esse compartimento tem um volume de 250x250x250mm ou 0,0156m<sup>3</sup> e foi projetado de acordo com o que foi especificado para o projeto conforme mostra a Figura 18.



**Figura 18:** Ilustração com corte para mostrar em detalhe os compartimentos para nitrogênio vapor e nitrogênio líquido e o encaixe das paredes nas molduras em “SolidWorks”  
[Fonte Própria].

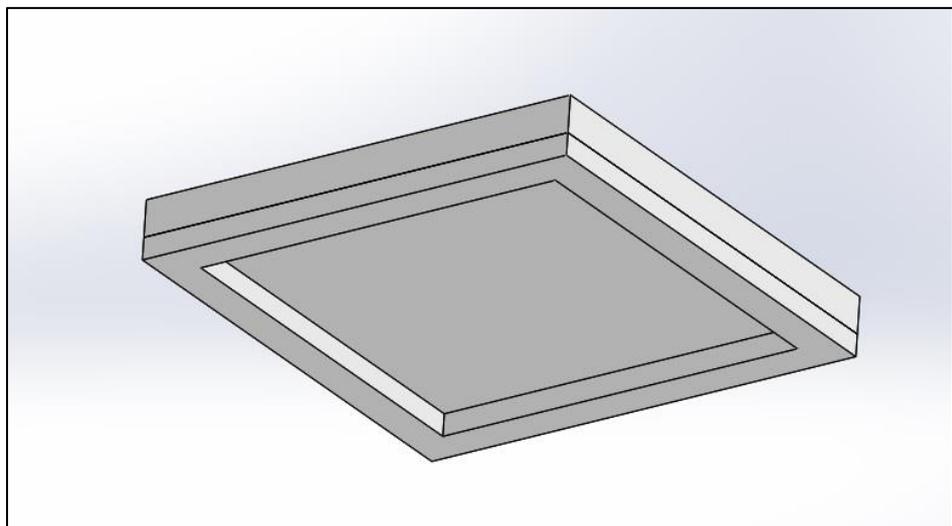
Resumidamente, o nitrogênio que é recebido pela alimentação vinda do cilindro através de uma mangueira entra no compartimento menor ou o interno onde se encontra a bobina para ser resfriada. A partir daí, mesmo sendo minimizada a taxa com que o nitrogênio passa de líquido para vapor, a fase gás é formada e então conforme a pressão aumenta, o gás é naturalmente forçado a circular para o compartimento externo criando a barreira de vapor, uma vez que esse gás está em baixas temperaturas principalmente quando comparado a

temperatura ambiente. Após a circulação e formação da barreira de vapor, o gás é liberado para a atmosfera através da saída de “Vent” localizada na parte inferior de uma de suas paredes externas.

Ainda como uma maneira de melhorar a eficiência do sistema diminuindo a taxa de transferência de calor para o nitrogênio, foi projetado que nas paredes externas seja aplicado uma camada de Lã de Rocha que é um excelente isolante térmico e que possui características parecidas com a do poliestireno expandido de alta densidade quando se trata de condutibilidade térmica, segundo [7] e [11]. Essa camada é na forma de uma “chapa” de Lã de Rocha e ocupa toda a parede lateral possuindo as dimensões de 510x250x50mm e pode ser vista na Figura 14 com característica esverdeada.

### 3.2.3 Tampa

A tampa é formada por uma placa inteira de Poliestireno expandido de alta densidade do tipo 5 com as propriedades descritas pelo fabricante em [11] e por uma moldura que é colada na parte de baixo da placa principal de modo a realizar o encaixe nas paredes externas da caixa conforme mostra Figura 19. Essa moldura também é do mesmo material da placa principal. A placa principal da tampa tem dimensões de 610x610x50mm e a moldura tem 100 mm de largura e 30 mm de espessura. Maiores detalhes são mostrados nos desenhos encontrados no anexo A.



**Figura 19:** Imagem ilustrativa da tampa com a moldura para encaixe nas paredes.

Desenho em “SolidWorks”. [Fonte Própria]

### 3.2.4 Vedações

Uma das maiores preocupações quanto ao desenvolvimento do projeto está ligada à vedação. Como o compartimento que vai receber o nitrogênio líquido é projetado partir de um combinado de placas montados em uma base, um conjunto de arestas que são provenientes desses encaixes existe e um risco de vazamento ou má vedação é iminente.

Por esses motivos, se faz necessário buscar uma solução que vede todo o sistema e que resista às baixíssimas temperaturas do nitrogênio líquido. A solução surgiu a partir de [4], onde é utilizada resina Epóxi para vedar partes do sistema e na seção de conclusão é dito que o Epóxi resistiu muito bem às baixas temperaturas do nitrogênio. Dessa maneira a resina Epóxi fará a vedação das arestas dos compartimentos, impedindo o nitrogênio líquido ou mesmo o nitrogênio gasoso de escapar do sistema senão por onde for determinado.

Outro detalhe que surgiu durante o desenvolvimento foi de como a tampa seria vedada ao conjunto no momento em que estivesse fechada. Uma vez que o poliestireno de alta densidade é consideravelmente rígido, não se adaptando perfeitamente as formas de uma maneira elástica, pensou-se que o uso de borrachas na parte superior das paredes laterais dos dois compartimentos do sistema seria a melhor maneira de vedação para a tampa. A Figura 18 mostra o esquema de vedação projetado para a tampa, com detalhamento em preto, imitando teoricamente algum tipo de revestimento emborrachado.

## 3.3 Construção

As placas de Poliestireno foram compradas com o fabricante [11] com as dimensões de 1000x1000 mm e duas espessuras diferentes de 50 mm e 30 mm. A partir daí, foram cortadas com estilete os formatos das placas menores que formam as bases, paredes, tampa e as molduras que formariam o conjunto estrutural do sistema. Cada encaixe foi acompanhado de uma mão de cola comum especificada para poliestireno e conforme a montagem acontecia, as vedações eram realizadas com resina Epóxi a base d'água da marca Suvinil, como pode ser visto na Figura 20. Primeiramente foi montada a base junto com as molduras para encaixe das paredes. Em seguida as placas já cortadas que compõe as paredes foram encaixadas, coladas e vedadas de maneira da mesma forma. Em seguida foi realizada a montagem da tampa, a colocação de fitas emborrachadas no todo para melhor vedação da tampa e a montagem final

com o encaixe da tampa. A preocupação com vedação sempre esteve muito presente e por isso três camadas de resina foram aplicadas em cada aresta para se ter certeza de que estaria suficientemente vedado.

Em seguida foram feitos os furos no compartimento interno que recebe o nitrogênio líquido para que o vapor pudesse passar para o compartimento externo formando a barreira de vapor. Após foi furado e instalado o sistema de “vent”, que nada mais é do que um furo na parte inferior da parede externa onde um pequeno tubo de plástico foi instalado para que o gás passasse com maior facilidade entre as camadas de poliestireno e lã de rocha.

Por último foi aplicada a camada de Lã de Rocha que foi adquirida em placas também pelo mesmo fornecedor das placas de poliestireno. Essa camada foi colada na parede externa com dimensão suficiente para que se pudesse fechar a tampa.



**Figura 20:** Etapa de construção da base [Fonte Própria]

### 3.4 Cálculos Térmicos

Conforme mencionado, foram realizadas diversas estimativas quanto à quantidade de calor que estaria sendo trocada com o sistema durante a fase de idealização. Sabe-se por [9] que quanto maior a diferença de temperatura entre dois meios, mais intensa será a troca de calor entre eles principalmente se nenhuma proteção ou isolamento térmico se fizer presente.

A maior preocupação desse projeto é manter o nitrogênio líquido refrigerando a bobina por tempo suficiente para que todos os experimentos possam ser feitos e consequentemente todos os dados e resultados possam ser coletados. Por mais que a temperatura do laboratório seja refrigerada e ficando em torno de 23°C, o nitrogênio líquido apresenta temperatura de -196°C gerando uma diferença de temperaturas  $\Delta T$  de 219°, o que dificulta imensamente manter grandes quantidades de nitrogênio refrigerando para que se obtenham bons resultados.

Conforme visto no item 2.6, foi realizado um estudo para a obtenção da quantidade de calor sendo trocada com o compartimento que recebe o nitrogênio líquido através do conceito de condução, convecção e principalmente resistência térmica, que foram encontrados em [7] e [9]. A partir daí, assim como na seção de desenvolvimento do projeto, os cálculos de resistência térmica foram divididos por cada direção em que a troca de calor ocorre no sistema, ou seja, a troca de calor que entra no compartimento interno vindo da tampa, a troca de calor que atinge o compartimento interno vindo das paredes do sistema e a troca de calor que atinge o compartimento interno vindo da base. Dessa maneira é possível obter analiticamente o fluxo de calor que está influenciando diretamente a taxa de vaporização do nitrogênio líquido conforme será visto mais a frente e assim estimar o tempo que o nitrogênio poderá existir na forma líquida para que os testes sejam realizados de maneira adequada.

De acordo com [9], pode-se assumir que para a geometria apresentada no sistema, os materiais e a maneira como os experimentos ocorrem, que a troca de calor é considerada unidimensional na direção perpendicular à superfície que está sendo analisada, com condição estacionária do processo, ou seja, o sistema continua o igual mesmo após o início da troca de calor e finalmente com propriedades constantes, ou seja, os materiais e os fluidos utilizados aqui mantêm suas propriedades constantes durante todo o processo.

Para os cálculos de resistência térmica, será utilizada principalmente a equação 7 da seção 2.6.4, que apresenta o fluxo de calor de acordo com o somatório das resistências

térmicas presentes de acordo com as camadas de isolamento térmico que foram projetadas para o sistema.

### 3.4.1 Fluxo de Calor na Tampa

A tampa, conforme mencionado anteriormente é uma placa de dimensões 610x610x50mm que possui uma moldura conforme Figura 20. Quando fechada junto ao sistema ela tampa o compartimento interno na medida da área que o mesmo apresenta, ou seja, quando fechada, é coberta uma área de 250x250mm que está em trocando calor com o nitrogênio líquido. A tampa é toda feita de poliestireno expandido de alta densidade tipo 5 que apresenta coeficiente de condutibilidade térmica  $k$  de 0,036 W/m.K segundo [11]. Além disso a tampa é formada por uma placa de 0,05m de espessura. O coeficiente de convecção de acordo com [16] pode ser aproximado para uma placa plana horizontal em contato com o ar para convecção natural como

$$h = 0,61 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{1/5} \quad (8)$$

onde  $\Delta T$  é a diferença de temperatura e  $L$  a espessura da chapa. Assim,  $h$  será igual a 3,26W/m.K.

Assim, dessa maneira a partir da equação (5) e (6), podemos calcular a resistência térmica que a tampa da caixa está impondo ao fluxo de calor entre o ambiente e o compartimento interno do sistema. Logo

$$\sum R_t = \frac{L}{kA} + \frac{1}{hA} = \frac{0,05}{0,036 \cdot 0,0625} + \frac{1}{3,26 \cdot 0,0625} = 27,13 \text{ K/W}$$

Com esse valor, podemos determinar o fluxo de calor que entra na caixa a partir da tampa pela equação (7), sabendo que a temperatura do nitrogênio líquido é de -196°C [7] e a do ambiente estimada em 23°C, portanto,

$$q_x = \frac{T_i - T_\infty}{\sum R_t} = \frac{\Delta T}{27,13} = \frac{219}{27,3} = 8,1 \text{ W}$$

Pode se concluir que o fluxo de calor que entra no compartimento interno através da tampa é de 8,1W.

### 3.4.2 Fluxo de Calor na Base

A base é formada por duas placas de poliestireno expandido de alta densidade tipo 5 conforme mencionado na seção anterior. A área da base do compartimento interno é de 250x250mm e o fluxo de calor precisa percorrer toda a espessura formada pelas duas placas que é de 0,08m. O coeficiente de condutibilidade térmica Segundo [11] é de 0,036W/m.K e como está em contato com a superfície de uma mesa, a convecção não se faz presente, o calor é trocado diretamente por condução a partir da superfície inferior da placa, segundo [9]. Assim, podemos encontrar a resistência que a base possui com relação a troca de calor entre o compartimento interno e a base de apoio a partir de

$$\sum R_t = \frac{L}{kA} = \frac{0,08}{0,036 \cdot 0,0625} = 35,5 \text{ K/W}$$

Com o valor da resistência térmica determinado, podemos então determinar o fluxo de calor que atravessa a base e influencia na taxa de vaporização do nitrogênio líquido, a partir da equação (7) como

$$q_x = \frac{T_i - T_s}{\sum R_t} = \frac{\Delta T}{35,5} = \frac{219}{35,5} = 6,16 \text{ W}$$

Sabendo-se que a temperatura do nitrogênio líquido é de -196°C e que a temperatura da mesa é estimada em 23°C, temos o fluxo de calor que atravessa a base do sistema.

### 3.4.3 Fluxo de Calor nas Paredes

O sistema possui quatro paredes com diferentes camadas de isolamento térmico conforme visto na seção anterior foi projetado dessa maneira para que se possa reduzir ao máximo possível o fluxo de calor que vai em direção ao compartimento interno pelas laterais, ou seja, tentando aumentar ao máximo possível a resistência térmica. O cálculo teórico para a resistência térmica foi feito primeiro uma parede apenas e depois multiplicado para as outras paredes. Isso pode ser feito segundo [9] que diz que as resistências térmicas são somadas no total e também pelo fato das quatro paredes serem iguais e apresentarem as mesmas

características e propriedades. A parede lateral possui uma camada de poliestireno expandido de alta densidade do tipo 5 que está em contato direto com o nitrogênio líquido, ou seja, essa camada faz parte do compartimento interno e possui coeficiente de condutibilidade térmica  $k$  igual a  $0,036\text{W/m.K}$  segundo o fabricante [11]. Essa camada interna tem espessura de  $0,05\text{m}$ . Junto com essa camada do compartimento interno está a camada de vapor de nitrogênio, ou a camada conhecida por barreira de vapor conforme visto em [7]. O vapor que é gerado pela própria troca de calor entre o nitrogênio líquido e o ambiente entra nesse compartimento e auxilia na refrigeração de todo o sistema, ou seja, o vapor em baixa temperatura circula ao redor do compartimento interno entre as duas camadas de paredes trocando calor com o fluxo que vem do ambiente externo através da camada de nitrogênio vapor. Segundo [7], essa camada melhora o isolamento térmico, uma vez que ao invés de ar se tem o nitrogênio vapor. Essa camada de nitrogênio vapor, segundo [7], apresenta um coeficiente de condutibilidade de aproximadamente  $0,018\text{ W/m.K}$ , diferente do ar atmosférico que apresenta o coeficiente de condutibilidade térmica de cerca de  $0,023\text{ W/m.K}$ . Além disso, a espessura dessa camada de nitrogênio vapor é de  $0,05\text{m}$ .

Seguindo a linha de isolamento térmico proposta para a parede do sistema, após a barreira de vapor de nitrogênio, encontra-se a parede externa que é formada mais uma vez por uma placa de poliestireno expandido de alta densidade do tipo 5 e possui as mesmas características da parede do compartimento interno, exceto pela espessura que é de  $0,03\text{m}$ .

Por último e não menos importante, foi colocada uma camada de Lã de Rocha cujo coeficiente de condutibilidade térmica, segundo o fabricante [11], é de  $0,042\text{ W/m.K}$ . Materiais orgânicos são amplamente conhecidos e utilizados para isolamento não apenas térmico, mas também acústico, além de serem baratos e acessíveis ao público em geral. A espessura dessa camada de Lã de Rocha utilizada para este projeto é de  $0,05\text{m}$  e conforme visto na Figura 15, envolve toda a parede externa. A Lã de rocha foi envolvida por um plástico transparente para assegurar sua estrutura, uma vez que por ser um produto que se desfaz facilmente, caso não houvesse nada para impedir, a camada iria se desfazer. O coeficiente de convecção utilizado para a parede lateral vem de [16] e é utilizado como uma aproximação para o ar em convecção natural. O valor encontrado para  $h$  é de  $25\text{ W/m}^2\text{.K}$ .

Com todos os dados estipulados e a ordem das camadas, pode-se a partir de (5) e (6) montar a equação para o somatório das resistências térmicas das paredes. Para facilitar o entendimento dos cálculos cada camada recebe um número, assim a camada 1 é a camada do compartimento interno, a primeira a ser descrita, a camada 2 é a barreira de vapor de nitrogênio, a camada 3 representa a parede externa e a camada 4 é a camada de Lã de rocha.

Dessa maneira podemos resumir melhor a equação adotando apenas um número para cada propriedade como por exemplo  $k_2$  representando o coeficiente de condutibilidade da camada 2, ou seja, a camada da barreira de vapor. Portanto

$$\sum R_t = \frac{L_1}{k_1 A_1} + \frac{L_2}{k_2 A_2} + \frac{L_3}{k_3 A_3} + \frac{L_4}{k_4 A_4} + \frac{1}{h_4 A_4}$$

Logo,

$$\sum R_t = \frac{0,05}{0,036 \cdot 0,0625} + \frac{0,05}{0,018 \cdot 0,1035} + \frac{0,03}{0,036 \cdot 0,1035} + \frac{0,05}{0,042 \cdot 0,1035} + \frac{1}{25 \cdot 0,1035}$$

Então,

$$\sum R_t = 22,2 + 26,8 + 8 + 11,5 + 0,4 = 68,9 \text{ K/W}$$

A partir de (7), pode-se ter o fluxo de calor através de uma parede,

$$q_x = \frac{T_i - T_s}{\sum R_t} = \frac{\Delta T}{68,9} = \frac{219}{68,9} = 3,18 \text{ W}$$

Como esse resultado é apenas para uma parede e as quatro apresentam as mesmas características, temos o fluxo de calor total via paredes multiplicando esse resultado por 4. Assim,

$$q_{total} = 3,18 \times 4 = 12,7 \text{ W}$$

### 3.4.4 Fluxo de Calor Indireto

Para tentar aproximar ao máximo o valor do fluxo de calor real no sistema, leva-se em consideração nesse projeto fluxos que estão interagindo de maneira indireta com o nitrogênio, ou seja, são de acordo com áreas que não fazem contato direto com o compartimento interno. Nesse caso, será adicionado o fluxo de calor que entra através da tampa e através da base no compartimento da barreira de vapor, que de maneira geral também vai influenciar na taxa de vaporização do nitrogênio líquido do sistema segundo [7].

Temos tanto para a tampa como para a base o mesmo material conforme visto na seção anterior e com coeficiente de condutibilidade térmica  $k=0,036 \text{ W/m.K}$ . A espessura da camada na tampa é  $L=0,05\text{m}$  e na base  $L=0,08\text{m}$ .

Para a tampa, a resistência térmica fica da forma

$$\sum R_t = \frac{L}{kA} + \frac{1}{hA} = \frac{0,05}{0,036 \cdot 0,039} + \frac{1}{3,26 \cdot 0,039} = 35,91 \text{ K/W}$$

Logo, o fluxo de calor levando em consideração que a temperatura do vapor de nitrogênio já está um pouco maior que a temperatura do nitrogênio líquido de acordo com [7], é escrita da seguinte maneira

$$q_x = \frac{T_i - T_s}{\sum R_t} = \frac{\Delta T}{35,91} = \frac{200}{35,91} = 5,56 \text{ W}$$

O mesmo raciocínio é aplicado à base e dessa forma tem-se a resistência térmica como

$$\sum R_t = \frac{L}{kA} = \frac{0,08}{0,036 \cdot 0,039} = 57 \text{ K/W}$$

E, portanto o fluxo de calor na forma

$$q_x = \frac{T_i - T_s}{\sum R_t} = \frac{\Delta T}{57} = \frac{200}{57} = 3,5 \text{ W}$$

### 3.4.5 Fluxo Total de Calor

Tendo todos os valores calculados para o fluxo de calor que atinge o nitrogênio líquido no compartimento interno vindo das paredes, da tampa e da base. Conforme visto em [9], pode-se somar esses fluxos vindos dessas direções para poder obter o fluxo total agindo no sistema. Portanto temos

$$q_{total} = q_{base} + q_{tampa} + q_{paredes} + q_{indireto} = 36 \text{ W}$$

Esse é o valor que a vizinhança, ou seja, o ar do laboratório na temperatura de 23°C troca com o nitrogênio líquido dentro do sistema a -196°C.

### 3.5 Cálculos de Autonomia

Após a determinação do fluxo de calor que o nitrogênio líquido está trocando com o ambiente é necessário se ter uma ideia ou pelo menos uma aproximação teórica do tempo que o nitrogênio líquido se manterá dentro do recipiente, ou seja, descobrir a taxa de vaporização que o sistema consegue manter para então, poder se fazer um estudo do tempo necessário para que cada teste seja realizado e a quantidade correta de nitrogênio líquido seja depositada.

Levando em consideração o fluxo de calor estimado de troca entre o sistema e o ambiente descrito na seção 3.3 e a estimativa da quantidade de calor que a bobina gera enquanto está sendo testada podemos estimar quanto tempo o nitrogênio líquido terá de autonomia em um teste sem que seja necessário reabastecer o compartimento interno.

A partir da equação (11) podemos estimar o valor da taxa de nitrogênio líquido para o sistema somente através da estrutura e do calor estimado que é gerado pela bobina, logo,

$$10 + 36 = 198,3 \cdot \left. \frac{dm}{dt} \right|_{\text{nitrogênio líquido}}$$

Portanto,

$$\left. \frac{dm}{dt} \right|_{\text{nitrogênio líquido}} = 0,23 \text{ g/s}$$

A taxa de vaporização teórica, é de 0,23g/s de nitrogênio, cerca de 14g/s somente em relação ao sistema e sua estrutura. Dessa maneira, podemos estimar o tempo necessário para repor o nitrogênio líquido no compartimento interno, levando em consideração seu volume e peso específico.

Para efeito de análise do sistema como um todo é preciso levar em consideração o calor liberado pela bobina e, além disso, outros fatores que não podem ser tão facilmente controlados e que fogem do escopo desse projeto. Fatores como o tempo de equilíbrio térmico discutido em [12] e [13] podem elevar substancialmente a taxa de vaporização até que seja

atingido o equilíbrio total do sistema. Espera-se, a partir dessas análises obter-se uma taxa de vaporização do nitrogênio em torno de 20g/min para os experimentos com a bobina.

## Capítulo 4

### Experimento com Bobina

Após a conclusão do desenvolvimento do projeto e montagem de todo o sistema térmico, foram montados e realizados os testes com bobinas. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Inovação Tecnológica que se encontra no Pavilhão VI do CEFET/RJ. As condições para o experimento quanto a temperatura eram normais em torno de 23°C conforme previsto durante o projeto e para efeito dos cálculos analíticos. O laboratório consta com todo o equipamento necessário para obtenção dos dados e resultados que se busca nessa fase do projeto. Além disso, EPIs foram utilizados conforme descrito na sessão 2.3 de segurança com nitrogênio.

#### 4.1 Nitrogênio Líquido Utilizado

O nitrogênio líquido que foi utilizado durante os testes com bobinas foi adquirido através da empresa White Martins Gases Industriais Ltda. e enviado ao laboratório envasado num cilindro do tipo XL com capacidade para 103m<sup>3</sup> de nitrogênio tipo industrial com pureza mínima de 99 %, segundo [15], conforme Figura 21. O cilindro possui duas saídas para utilização em linhas e uma saída para alívio de pressão. A pressão máxima de segurança do cilindro é de 230 psi, que quando atingida, abre uma válvula de segurança que mantém a pressão nessa faixa máxima permitida. Como visto em [7], é impossível armazenar o nitrogênio líquido de uma maneira 100% eficiente em relação às trocas térmicas com o ambiente, por isso, mesmo em um cilindro desse tipo que possui isolamento térmico a vácuo, o nitrogênio apresenta uma taxa de vaporização, o que faz sua pressão interna aumentar e por isso torna-se difícil manter o cilindro em uma mesma pressão constante durante muito tempo, havendo assim perda de produto.



**Figura 21:** Cilindro XL de Nitrogênio com 103m<sup>3</sup> [Fonte Própria]

## 4.2 Bobina

A bobina de Tesla resfriada em nitrogênio líquido foi montada no próprio Laboratório de Inovação Tecnológica onde foram realizados os testes. Conforme previsto para a construção e desenvolvimento do projeto, ela possui as dimensões de 60mm de raio com 230mm de comprimento. O material que da estrutura à bobina é formado por um cilindro de PVC cortado de um pedaço maior comumente utilizado para tubulações. A bobina é preenchida internamente com ferrites que servem para intensificar o campo magnético dentro da bobina. A primeira bobina testada possui 3 camadas de espiras uma por cima da outra e cada camada com 314 espiras de fio de cobre com bitola pequena. Por cima dessas camadas entrou a camada de espiras mais grossas com 3 voltas em um fio de cobre de bitola maior. A bobina foi toda envolvida por Kapton que é um tipo de fita adesiva que resiste a uma variedade de temperaturas, incluindo as criogênicas. Toda a montagem da bobina foi de acordo com os critérios estabelecidos pelo professor Paulo Aquino.

Cada camada da bobina foi enrolada separadamente e em seguida foram tomadas as medidas de resistência e indutância conforme mostrado nas Figuras 22, 23 e 24.



**Figura 22:** Bobina após a finalização da terceira camada e já coberta pelo kapton.

[Fonte Própria]



**Figura 23:** Medindo a resistência total da bobina com três camadas já dentro do compartimento interno [Fonte Própria]



**Figura 24:** Medindo a indutância da bobina pronta para ser resfriada [Fonte Própria]

A medida encontrada para resistência da bobina depois de pronta foi de 16 ohms, sendo em média 5,3 ohms por camada de espiras. A medida encontrada para a Indutância foi de 126 mH.

As medida de resistência foi tomada com o multímetro digital da marca Minipa modelo ET-2082B e a indutância foi medida pelo medidos ponte digital da Minipa modelo MX-1010.

### 4.3 Experimento

Após a montagem da bobina, foi dado início ao procedimento de preparação para os testes com nitrogênio. Os testes foram realizados dentro do laboratório seguindo as medidas de segurança quanto à proteção individual e a ventilação do ambiente descritos na seção 2.3. Com todo o sistema posicionado a bobina foi depositada no interior do compartimento interno que recebe o nitrogênio líquido conforme Figura 25. As ligações entre a bobina e a instrumentação foram feitos pelo professor Paulo Aquino. Quatro pequenos furos foram feitos para passar a fiação na parte superior frontal da parede da caixa conforme mostra a Figura 25. Foram feitos do menor tamanho possível para que se evitasse ao máximo o contato direto com o ambiente externo.



**Figura 25:** Imagem mostrando como a fiação foi conectada entre a bobina e os instrumentos de medição. [Fonte Própria]

Com toda a fiação conectada e os aparelhos ligados, as medidas foram tomadas novamente para a resistência e indutância a fim de se verificar se não ocorreu nenhuma mudança quanto ao posicionamento da bobina no interior do compartimento interno, ou se algum circuito foi realizado de maneira incorreta. A Figura 26 mostra o posicionamento da bobina no interior do compartimento.

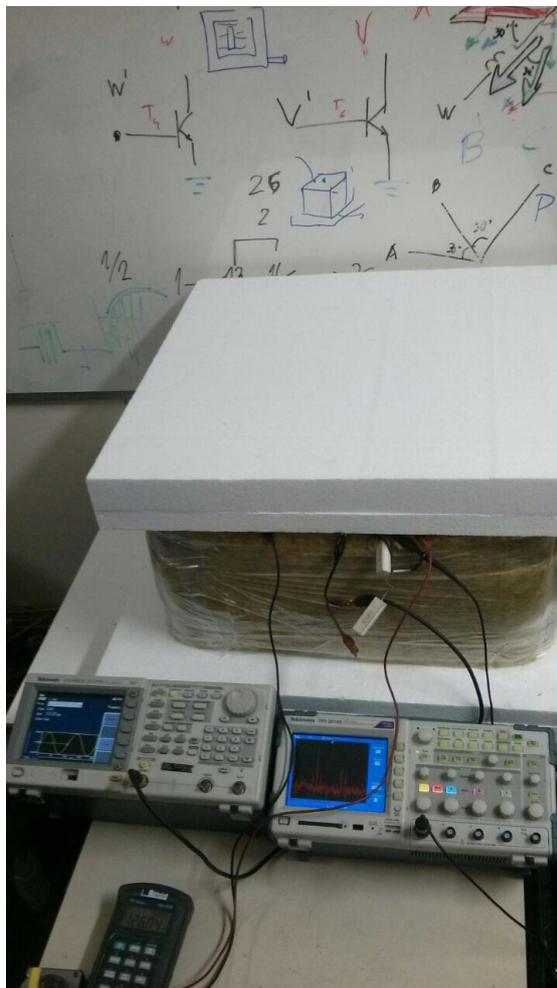
Com todos os dados verificados e compatíveis com as primeiras medições com a bobina do lado de fora, a primeira seção de teste com nitrogênio líquido começou. O nitrogênio líquido foi derramado até cerca de metade da altura da bobina na posição horizontal. Em seguida a tampa foi fechada e foi iniciado o período de observação com os instrumentos. O sistema todo fechado pode ser visto na Figura 27.



**Figura 26:** Posição da Bobina no interior do compartimento interno antes dos testes.

A tampa permaneceu fechada por volta de 15 minutos no primeiro teste e então foi aberta para se verificar a condição da bobina e o nível de nitrogênio líquido.

Em seguida foi realizado outro teste, dessa vez o nitrogênio líquido foi derramado até que a bobina ficasse totalmente coberta e em seguida a caixa foi fechada e começou o período de observação. Após cerca de 15 minutos, a tampa foi aberta para verificar o nível de nitrogênio e o estado da bobina. Ainda com bastante nitrogênio líquido voltou-se a fechar a tampa e realizar mais um período de observações por cerca de 20 minutos.

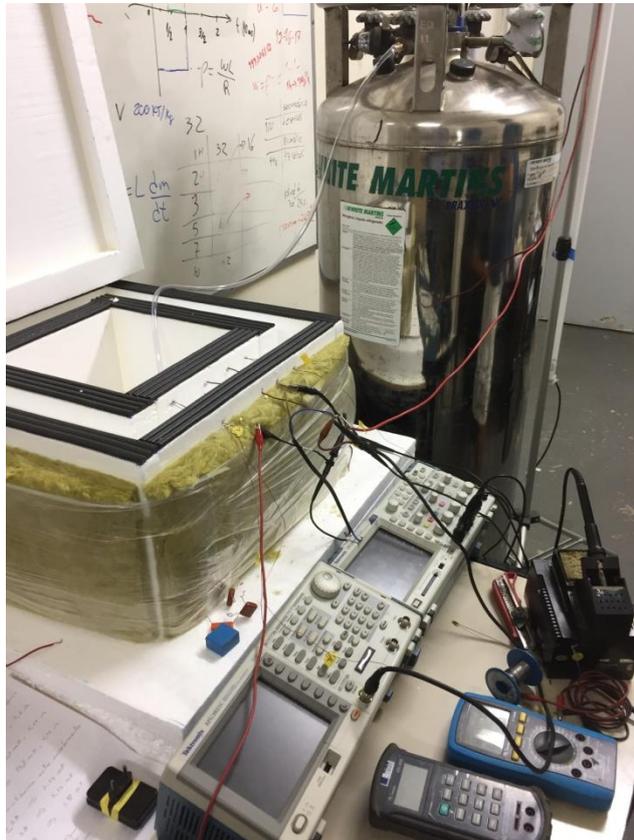


**Figura 27:** Posição do sistema com a tampa fechada. [Fonte Própria]

Outro teste foi realizado em seguida repetindo o mesmo procedimento do segundo teste encobrindo a bobina por completo para análise e coleta de resultados.

Foi utilizado uma mangueira de 3/8" de diâmetro interno 9,53 mm para derramar o nitrogênio no compartimento interno do sistema e a pressão no cilindro se encontrava a 10

kgf/mm<sup>2</sup>. O que gerou bastante vazão de nitrogênio líquido na saída da mangueira. A Figura 28 mostra todo o sistema montado e pronto para os teste com bobina.



**Figura 28:** Sistema pronto para realizar os testes com bobina.

## 4.4 Resultados

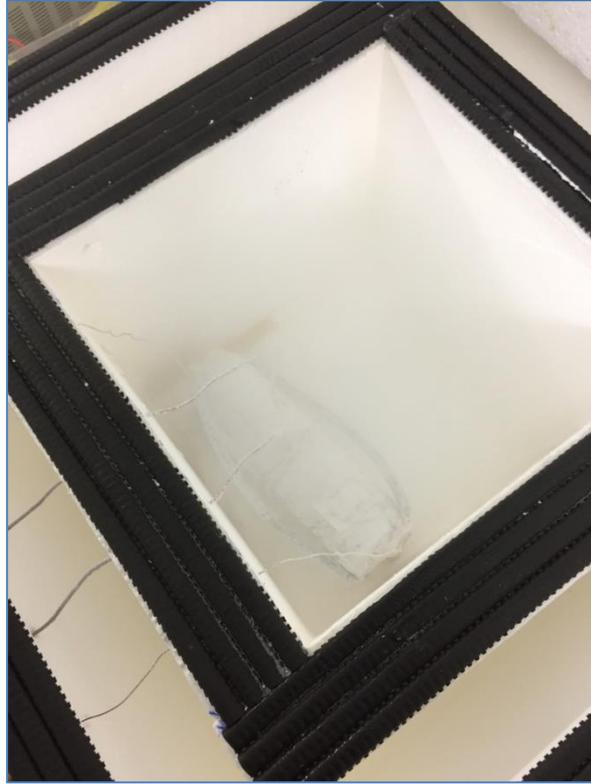
Em relação ao sistema térmico, durante todos os testes as vedações se comportaram de maneira ótima não havendo nenhum vazamento por nenhum lado e a resina epóxi utilizada mais uma vez se mostrou resistente às temperaturas criogênicas conforme concluído em [4]. A resina utilizada foi Epóxi Base Água da marca Suvinil.

A taxa de evaporação foi um pouco maior comparado com a análise teórica, através da variação de volume pode-se estipular, por massa, quanto variou e comparar com as estimativas. Apesar disso, o nitrogênio durou tempo suficiente para que excelentes resultados pudessem ser atingidos conforme citado a frente, concluindo com êxito o desempenho do sistema térmico.

A bobina posicionada horizontalmente dentro do recipiente foi completamente coberta pelo nitrogênio líquido durante o teste principal que gerou os melhores resultados. A bobina, conforme mencionado tem diâmetro de 60 mm e como o nitrogênio líquido encobriu todo o seu diâmetro, o volume de nitrogênio utilizado foi de  $0,25 \times 0,25 \times 0,06 \text{ m}^3$  ou  $0,0037 \text{ m}^3$ . A partir de (12), temos uma massa de nitrogênio líquido para esse volume equivalente a 3 kg. Após 20 minutos, ao abrir a tampa o nível de nitrogênio líquido estava acerca de  $\frac{5}{6}$  do nível inicial, indicando uma diminuição de volume para  $0,0031 \text{ m}^3$ , equivalente a 2,52Kg de nitrogênio de acordo com (12). Dessa forma, temos uma variação de massa de aproximadamente 0,48Kg em cerca de 20 minutos para o segundo experimento, em que toda a bobina foi encoberta pelo líquido indicando uma taxa de vaporização de nitrogênio, segundo (11) de 24g/min.

Uma variação de massa alta foi encontrada para o primeiro experimento, onde a bobina ficou mergulhada em torno de  $\frac{1}{3}$  de seu volume, equivalente a uma massa de 1 Kg de nitrogênio líquido, segundo (12), e que durou aproximadamente 30 min até não restar mais líquido dentro do compartimento, resultando em uma taxa de vaporização em torno de 33g/min. A taxa encontrada para a terceira rodada de testes foi similar ao da segunda rodada, a bobina foi novamente coberta por completo com nitrogênio líquido e obteve uma taxa de vaporização de 25g/min seguindo o mesmo raciocínio.

Quanto à bobina, resistiu perfeitamente durante todos os experimentos, mesmo mergulhada em nitrogênio líquido não sofreu alterações em sua estrutura nem em sua fiação conforme mostram as Figuras 29 e 30.



**Figura 29:** Bobina após o banho a  $-196^{\circ}\text{C}$  com aparência de “congelada”. [Fonte Própria]



**Figura 30:** Estado da Bobina após experimento. [Fonte Própria]

Os resultados mais expressivos e significantes para o experimento e que são o objetivo principal desse projeto surgiram ao longo dos testes. No primeiro teste a bobina ficou por um período menor semimergulhada em nitrogênio líquido. Como o nitrogênio se tornou vapor mais rapidamente por conter menos volume líquido, a resistência não caiu tanto quanto esperado, porém caiu bastante quando comparado com seu valor original. O resultado da resistência elétrica para o primeiro teste foi de cerca de 4 ohms. A resistência elétrica foi reduzida no primeiro experimento em torno de 75% comparado com seu valor original de 16 ohms. Outro fator importante e positivo para esse teste foi a indutância que permaneceu inalterada em 126 mH, o que era esperado ser comprovado pelo Professor Paulo Aquino para que seus futuros experimentos possam ser realizados. O comportamento dos Ferrites no interior da bobina também foi excelente, não trazendo nenhuma modificação que pudesse atrapalhar futuros experimentos ou perturbar as medições com a bobina. A estrutura em PVC também resistiu às baixas temperaturas como esperado uma vez que nenhum esforço tenha sido aplicado à bobina.

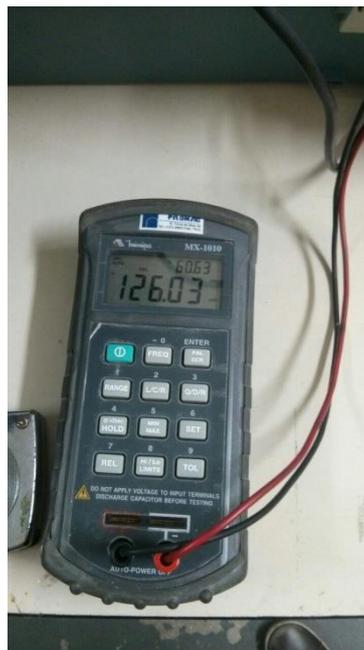
O segundo experimento foi o mais significativo em termos de resultados, mais uma vez o sistema apresentou boa vedação após o primeiro teste uma vez que para o segundo teste um volume maior de nitrogênio líquido tenha sido adicionado ao compartimento interno. O nitrogênio durou cerca de 20 minutos com pequena variação de volume dentro do recipiente, mesmo abrindo após algum tempo para a verificação de nível, o que deu tempo suficiente para que todos os dados pudessem ser observados e coletados.

A bobina mais uma vez apresentou boas condições estruturais, mesmo estando dessa vez completamente mergulhada no nitrogênio. No segundo experimento a resistência elétrica atingiu um surpreendente valor de 2,7 ohms, que significa uma redução de 83,1% em relação ao seu valor original de 16 ohms conforme mostra a Figura 31. A resistência levou cerca de 18 minutos para atingir esse valor estando o tempo todo mergulhada em nitrogênio. Mais uma vez a indutância permaneceu inalterada em 126 mH, um excelente resultado mais uma vez. Um ponto negativo foi o durante o acompanhamento da frequência, com um bom valor gerado pela bobina, foi o aparecimento de harmônicos, conforme Figura 32, que segundo o professor Aquino, atrapalharia projetos futuros. Porém a causa acredita-se que tenha sido devido à construção da bobina e não ao resfriamento em si. Os Ferrites também resistiram ao maior tempo em contato com a temperatura criogênica assim como o PVC e a fiação da bobina.

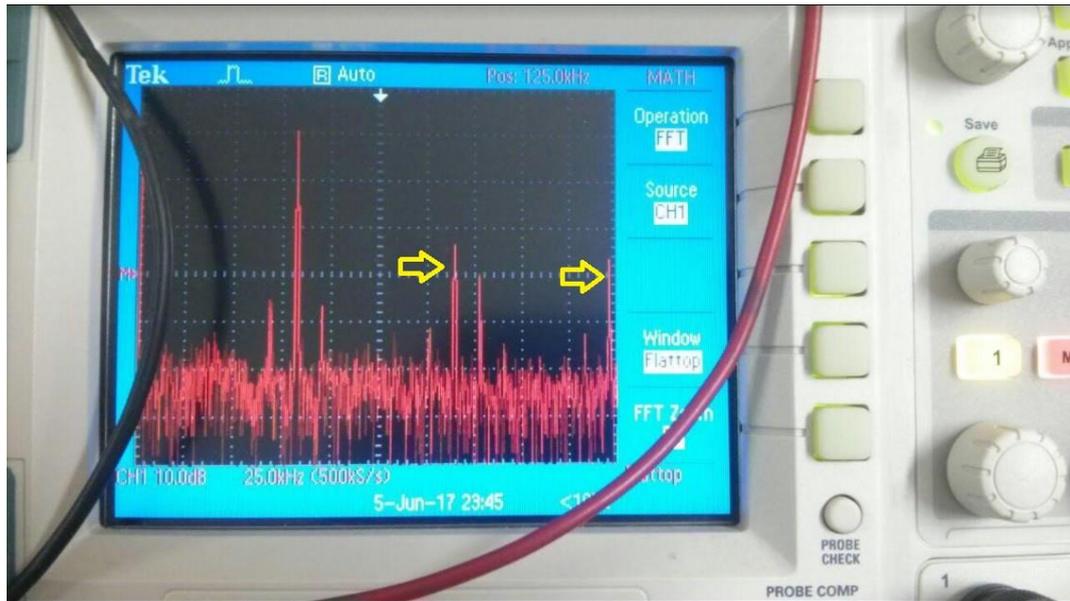
O terceiro teste apresentou condições semelhantes ao do segundo e mais uma vez todo o sistema apresentou desempenho favorável para os testes com bobina, tanto quando a vedação quanto ao tempo de duração do nitrogênio líquido durante o teste. A bobina resistiu da mesma maneira que nos teste anteriores apresentando boas condições mesmo após o resfriamento. A resistência baixou novamente para 2,7 ohms em cerca de 20 minutos e a indutância permaneceu constante em 126 Hm durante todo o experimento conforme mostra Figura 33.



**Figura 31:** Multímetro indicando o valor da resistência elétrica obtida durante o segundo teste. [Fonte Própria]



**Figura 32:** Indutância permaneceu constante em 126Hm durante todos os testes. [Fonte Própria]



**Figura 33:** Surgimento de harmônicos durante o acompanhamento da frequência gerada pela bobina. [Fonte Própria]

## Capítulo 5

### Conclusões

Analisando os resultados obtidos para o sistema, pode-se dizer que estruturalmente o sistema suportou as baixas temperaturas impostas pelo nitrogênio líquido e mais uma vez, a resina epóxi resistiu à temperatura criogênica e funcionou como um bom vedante impedindo o vazamento de nitrogênio líquido para outros compartimentos do sistema. A vedação de borracha localizada na parte superior não apresentou desempenho conforme esperado, uma vez que seu natural resfriamento fez com que perdesse a capacidade elástica que seria ideal para que a tampa fosse vedada. Assim, foi notada pouca quantidade de vapor de nitrogênio vazando pela tampa. O ideal aqui é procurar um outro material para a vedação na tampa.

Analisando não apenas o resultado principal da resistência elétrica, mas também outros fatores como os materiais e as características do projeto da bobina e do sistema pode-se concluir que o sistema de refrigeração serviu para estes testes e servirá para outros experimentos que venham a ser realizados no laboratório, uma vez que este projeto faz parte de uma linha de pesquisa realizada pelo professor Paulo Aquino e que em outras aplicações

será necessário o uso do sistema para o avanço das pesquisas. O estado final da bobina pode ser visto na Figura 29.

A excelente redução da resistência elétrica devido ao tempo de exposição ao nitrogênio trouxe a certeza de que o sistema funciona e que outros testes podem ser realizados com sucesso.

## **5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Com o trabalho realizado até aqui, pode-se avaliar que muitas questões ainda precisam ser melhoradas para aumentar ainda mais o desempenho de testes com nitrogênio líquido.

Melhorar o sistema de isolamento térmico é essencial para se atingir resultados menores para taxa de vaporização por exemplo. Assim, uma camada de vácuo no lugar da camada da barreira de vapor aumentaria muito essa eficiência térmica.

Outra melhoria seria no sistema de vedação da tampa, encontrar algum material que não fique tão enrijecido em baixas temperaturas e que ainda assim mantenha comportamento elástico de maneira a auxiliar a vedação da tampa.

Outra boa melhoria é encontrar uma mangueira mais apropriada que diminua a quantidade de vapor liberada ao derramar nitrogênio no compartimento interno e também buscar diminuir a pressão do cilindro para que se tenha uma menor vazão na hora de encher com nitrogênio. Pode-se utilizar um regulador de pressão.

## Referências Bibliográficas

[1] B. Hu, G. Varma, C. Randell, S. F. Keevil, T. Schaeffter e P. Glover, “A Novel Receive-Only Liquid Nitrogen (LN<sub>2</sub>)-Cooled RF Coil for High-Resolution *In Vivo* Imaging on a 3-Tesla Whole-Body Scanner”, Janeiro, 2011.

[2] A. N. Dranitchnikov, V.V. Oreshonok, “An Automated Liquid Nitrogen Refilling System for Cryopumps in the 1-MW Heating Neutral-Beam Injector of the TCV Tokamak”, Setembro, 2015.

[3] L. Lai, T. Qu, C. Gu, N. Hu, S. Meng, Z. Zhong e Z. Han, “Study of AC Loss and Temperature Distribution of a BSCCO Coil Cooled in Liquid Nitrogen or Using a Cryocooler”, Junho, 2016.

[4] R. Legg, D. Kashy, R. Fair, P. Goshal, R. Bachimanchi, K. Bruhwel, M. Taylor, J. Fischer, D. Machie e J. Powers, “Liquid Nitrogen Tests of a Torus Coil for the Jefferson Lab 12-GeV Accelerator Upgrade”, Junho, 2015.

[5] K. L. Kim, J. B. Song, Y. H. Choi, D. G. Yang, I. K. Yu, M. W. Park, H. G. Lee, “The Effects of Liquid Cryogen on the Thermal/Electrical Characteristics of a GdBCO Coil in a Mixed Cryogen Cooling System”, Junho, 2013.

[6] J. B. Song, K. L. Kim, K. J. Kim, J. H. Lee, H. M. Kim, W. S. Kim, S. W. Yim, H. R. Kim, O. B. Hyun e H. G. Lee, “The design, fabrication and testing of a cooling system using solid nitrogen for a resistive high-T<sub>c</sub> superconducting fault current limiter”, Setembro, 2008.

[7] T. M. Flynn, “Cryogenic Engineering” 2<sup>a</sup> ed. 2005.

[8] K. D. Skeldon, A. I. Grant, G. MacLellan e C. McArthur, “Development of a portable Tesla coil apparatus”, Outubro, 1999.

[9] Incropera, DeWitt, Bergman, Lavine, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer” 6<sup>a</sup> ed. 2007.

[10] B. R. Munson, D. F. Young, T. H. Okiishi, “Fundamentos da Mecânica dos Fluidos”, tradução da 4<sup>a</sup> edição Americana, 2004.

[11] Catálogo Informações Técnicas – Empresa Isoplus.

[12] G. S. Sagoo, “Latent Heat of Liquid Nitrogen”, Março, 2009.

[13] N. Chetty, N. Basi, “Reducing the experimental error in an experiment to determine the latent heat of vaporization of liquid nitrogen”, Novembro, 2012.

[14] W. Mahmood, W. Zia, M. S. Anwar, “Latent Heat of Vaporization and Specific Heat Capacity Measurements using Liquid Nitrogen”, Agosto, 2011.

[15] Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (White Martins Gases Industriais Ltda)

[16] [engenhariaarquitectura.com.br](http://engenhariaarquitectura.com.br) – Transferência de calor por convecção.

# **ANEXO A**

## Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos

Produto: **Nitrogênio, Líquido refrigerad**  
 Emitido: 16/04/2015  
 Data da última revisão: 01/10/2015

FISPQ nº: **P-4630**  
 Página 1 de 11

### 1 – Identificação do Produto e da Empresa

**Produto:** NITROGÊNIO, LÍQUIDO REFRIGERADO

**Código do Produto:** P-4630

**Nome(s) Comercial(s):** Nitrogênio Líquido

**Principais Usos Recomendados:** Uso industrial. Realizar uma avaliação de risco antes do uso.

**Empresa:** White Martins Gases Industriais Ltda.  
 Av. Pastor Martin Luther King Jr, 126 – Bloco 10 – Ala A – S401 – Del Castilho – Rio de Janeiro/RJ CEP: 20760-005

**Site:** [www.whitemartins.com.br](http://www.whitemartins.com.br)

**Telefone de Emergência:** 0800 709 9003

Para maiores informações de rotina consulte o fornecedor White Martins mais próximo.

### 2 – Identificação de Perigos

- **Classificação da substância ou mistura:** Gases sob pressão – Gás liquefeito refrigerado – At enção (H281)

- **Elementos de rotulagem do GHS, incluindo as frases de precaução:**

- **Pictogramas:**



- **Palavra de advertência:** Atenção

- **Frases de Perigo:** H281: Contém gás refrigerado; pode causar queimaduras ou lesões criogênicas.

- **Frases de Precaução:**

- **Prevenção:** P282: Use luvas de proteção contra o frio/ proteção facial/ proteção ocular.

- **Resposta à emergência:** P336: Descongele com água morna as áreas afetadas. Não esfregue a área afetada.  
 P315: Consulte imediatamente um médico.

- **Armazenamento:** P403: Armazene em local bem ventilado.

- **Outros perigos que não resultam em uma classificação:**

- Gás e líquido extremamente frio sob pressão.
- Pode causar rápido sufocamento.
- Pode causar queimaduras graves.
- Evite o acúmulo de carga eletrostática.
- Pode causar vertigem e sonolência.
- Equipamento autônomo de respiração pode ser necessário para a equipe de salvamento.



## Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos

Produto: **Nitrogênio, Líquido refrigerad**  
 Emitido: 16/04/2015  
 Data da última revisão: 01/10/2015

FISPQ nº: **P-4630**  
 Página 2 de 11

### 3 – Composição e Informações sobre os Ingredientes

- **Substância ou mistura:** Substância
- **Nome Químico:** Nitrogênio
- **Concentração:** 99,0% min.
- **Sinônimo:** Nitrogênio Líquido
- **Número CAS:**7727-37-9
- **Número CE:**231-783-9

### 4 – Medidas de Primeiros-socorros

#### - Inalação:

Em elevadas concentrações pode causar asfixia. Os sintomas podem incluir perda de conhecimento e motricidade. A vítima pode não ter percepção da asfixia.

Remova a vítima da área contaminada utilizando equipamento autônomo de respiração. Manter a vítima aquecida e em repouso. Se não estiver respirando, administre respiração artificial. Se a respiração estiver difícil, uma pessoa qualificada pode administrar Oxigênio. Afrouxar as roupas apertadas (ex.: colarinho, gravata, cinto ou cós). Chame um médico imediatamente.

#### - Contato com a pele:

Lavar imediatamente a área atingida com água corrente por pelo menos 15 minutos. Em caso de congelamento, molhar com água morna (não exceder 41 °C) por pelo menos 15 minutos e colocar uma compressa esterilizada. Em caso de grande exposição, remova as roupas enquanto banha a vítima com água morna. Chamar um médico imediatamente.

#### - Contato com os olhos:

No caso de respingo do produto, imediatamente banhe os olhos com água corrente durante 15 minutos no mínimo. Mantenha as pálpebras abertas e longe do globo ocular para assegurar que toda a superfície seja completamente enxaguada. Procure imediatamente um médico, de preferência um oftalmologista.

#### - Ingestão:

É uma maneira improvável de exposição, mas o contato com o líquido pode resultar no congelamento dos lábios e da boca.

Havendo o contato, imediatamente banhe o local com água corrente durante 15 minutos no mínimo.

#### - Sintomas mais importantes, agudos ou tardios:

*Gás sfíxiante.*

Em concentrações moderadas pode causar dor de cabeça, sonolência, vertigem, náusea, excitação, excesso de salivação, vômito e inconsciência. Os efeitos são devido à falta de Oxigênio.

A falta de Oxigênio pode levar a morte.

O gás frio ou o líquido pode causar congelamento.



## Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos

Produto: **Nitrogênio, Líquido refrigerad**  
Emitido: 16/04/2015  
Data da última revisão: 01/10/2015

FISPQ nº: **P-4630**  
Página 3 de 11

### - Notas para o médico:

*Não há tratamento específico. Este produto é um gás inerte. O tratamento da superexposição deve ser dirigido diretamente para o controle dos sintomas e condições clínicas da vítima.*

## 5 – Medidas de Combate a Incêndi

### - Meios de extinção apropriados:

O Nitrogênio não é inflamável. Utilize extintores de CO<sub>2</sub>, pó químico seco ou jatos de água em forma de neblina para o controle do fogo circundante.

Evacue todo o pessoal da área de risco. Imediatamente resfrie os recipientes com jatos de água em forma de neblina, guardando uma distância segura. Então remova os recipientes para longe da área de fogo, se não houver risco. Não dirija os jatos de água para dentro do Nitrogênio líquido, pois poderá congelar a água rapidamente.

Equipamento autônomo de respiração pode ser necessário para resgate de trabalhadores no local. Antes de entrar nas áreas, especialmente confinadas, verifique a atmosfera com um equipamento adequado (ex. Explosímetro).

### - Meio de extinção não recomendados:

Se o recipiente estiver envolvido em fogo, não tente removê-lo.

Resfrie o recipiente até que o fogo diminua ao ponto de poder extingui-lo.

### - Perigos específicos da substância:

Gás extremamente frio.

Em caso de grande vazamento do produto, haverá o deslocamento do ar ambiente.

Os recipientes podem se romper devido ao calor do fogo.

Nenhuma parte do recipiente deve estar sujeita a temperaturas maiores que 52

°C Os vapores do produto ventilado podem reduzir a visibilidade.

O produto líquido provoca lesão com queimaduras graves.

### - Medidas de proteção da equipe de combate a incêndio:

Nenhuma ação deve ser tomada que envolva qualquer risco pessoal ou sem formação adequada. Equipamento autônomo de respiração operado em pressão positiva e roupa de proteção completa para combate a incêndio. Antes de entrar nas áreas, especialmente confinadas, verifique a atmosfera com um equipamento adequado (ex. Explosímetro).

## 6 – Medidas de Controle para Derramamento ou Vazamento

### - Precauções pessoais, equipamento de proteção e procedimento de emergência:

#### - Para o pessoal que não faz parte dos serviços de emergência:

- Imediatamente retire-se da área de risco.
- Líquido e gás extremamente frio sob pressão.
- Gás asfixiante. Desloca o ar do ambiente.
- Em grandes vazamentos, procure verificar a direção do vento e dirija-se em sentido contrário.
- Não toque no líquido, pois pode causar graves queimaduras.

#### - Para o pessoal do serviço de emergência:

- Equipamento autônomo de respiração de pressão positiva e macacão retardante de chama pode ser necessário para entrar em áreas confinadas.



## Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos

Produto: **Nitrogênio, Líquido refrigerad**  
Emitido: 16/04/2015  
Data da última revisão: 01/10/2015

FISPQ nº: **P-4630**  
Página 4 de 11

- Antes de entrar nas áreas, especialmente as confinadas, verifique a atmosfera com instrumento adequado (ex. explosímetro).
- Remova todas as fontes de ignição, se não houver risco.
- Reduza vapores com neblina ou jatos finos de água .
- Interrompa o vazamento se não apresentar riscos.
- Ventile a área do vazamento ou remova os recipientes com vazamento para área bem ventilada se não houver risco.
- Se houver suspeitas de que os vapores do produto pode estar presente, a equipe de socorro deve usar um equipamento autônomo de respiração.
- Nenhuma ação deve ser tomada que envolva qualquer risco pessoal ou sem treinamento apropriado.

### - Precauções ao meio ambiente:

- Previna para que o produto não entre em galerias de esgoto, fossas etc.
- Mantenha o pessoal não autorizado distante da área de risco.
- Descarte qualquer produto, resíduo ou invólucro de acordo com os Regulamentos Locais, Estaduais e Federais existentes.

### - Métodos e materiais para a contenção e limpeza:

- Ventile a área antes de iniciar o processo de limpeza.
- Mantenha o pessoal não autorizado distante da área de risco.

## 7 – Manuseio e Armazenamento

### - Precauções para manuseio seguro:

- Utilize o produto somente em áreas bem ventiladas .
- Não deixe que qualquer parte do corpo entre em contato com tubulações sem isolamento ou recipientes que contenham líquidos criogênicos.
- Não deixe que respingo do líquido entre em contato com os olhos, pele ou com a roupa.
- Não entrar em áreas de armazenamento e em espaços confinados, a menos que adequadamente ventiladas.
- Proteja os recipientes contra danos físicos. Manter afastado do calor, faíscas e chamas.
- O controle de vazamento deve ser realizado com água e sabão.
- Utilize um carrinho de mão para movimentar os recipientes.
- O recipiente deve ser manuseado na posição vertical.
- Abra a válvula lentamente. Se estiver muito dura, descontinue o uso e entre em contato com seu fornecedor.
- Não utilize o recipiente como parte de um circuito elétrico ou para formação de um arco elétrico. O efeito produzido por um arco elétrico na parede do recipiente poderá levá-lo a ruptura.
- Para outras precauções, veja seção 16.

### - Prevenção da exposição do trabalhador:

- Utilizar EPI conforme descrito no item 8.
- Não comer, beber ou fumar na área onde o produto for manuseado, produzido ou armazenado.
- Lavar as mãos após manuseio deste produto, antes de entrar em áreas de alimentação.

### - Condições de armazenamento seguro, incluindo qual quer incompatibilidade:

- Armazene em locais com ventilação.
- Assegure-se de que os recipientes estejam fora de risco de queda ou da possibilidade de roubo.



## Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos

Produto: **Nitrogênio, Líquido refrigerad**  
Emitido: 16/04/2015  
Data da última revisão: 01/10/2015

FISPQ nº: **P-4630**  
Página 5 de 11

- Os recipientes devem ser armazenados na posição vertical.
- Os recipientes criogênicos são equipados com dispositivo de alívio de pressão e uma válvula de controle.
- Em condições normais, esses recipientes liberam o excesso de produto vaporizado por um dispositivo de alívio de pressão evitando o acúmulo de pressão do líquido aprisionado e que poderá gerar pressões extremas quando vaporizado de vido ao aquecimento.
- Não permita estocagem em temperaturas maiores que 52 °C.
- Armazene separadamente os recipientes cheios dos vazios.
- Use um sistema de rodízio, para prevenir o estoque de recipientes cheios por longos períodos.

### 8 – Controle de Exposição e Proteção Individual

#### - Parâmetros de controle:

#### - Limites de exposição ocupacional:

Ingrediente	Limite de Exposição (NR-15)	ACGIH (2015 )
Nitrogênio	Asfixiante Simples	Asfixiante Simples

IDLH= Não disponível

- **Indicadores Biológicos:** Não disponível

#### - Medidas de controle de engenharia:

- **Exaustão Local** Utilize sistema de exaustão local, se necessário, para prevenir a deficiência de oxigênio na zona de respiração dos trabalhadores.
- **Mecânica (Geral):** Sob certas condições de trabalho, ventilação geral é recomendável se puder manter adequadamente o suprimento de ar.
- **Especiais:** Não aplicável.
- **Outros:** Não aplicável.

#### - Medidas de proteção pessoal:

- **Proteção dos olhos/face:** Usar óculos de segurança com proteção lateral e lentes incolores para o manuseio do recipiente. No caso do manuseio do produto, utilize protetor facial.
- **Proteção da pele e do corpo:** Utilizar luvas folgadas para manuseio de produtos criogênicos. Para operações de movimentação dos recipientes utilize luvas de raspa de couro, sapatos de segurança com biqueira de aço e proteção de metatarso. Roupas de proteção podem ser necessárias. Calças sem bainha devem ser utilizadas para fora dos sapatos.



## Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos

Produto: **Nitrogênio, Líquido refrigerad**  
 Emitido: 16/04/2015  
 Data da última revisão: 01/10/2015

FISPQ n°: **P-4630**  
 Página 6 de 11

- **Proteção respiratória:** Não é necessário no uso normal do produto em locais com ventilação. Suprimento de ar ou equipamento autônomo de respiração com pressão positiva deve ser utilizado quando se trabalha em espaços confinados com este produto.

- **Perigos térmicos:** Durante o manuseio do produto, deve-se ter o cuidado de não deixar o produto entrar em contato com nenhuma parte do corpo. O produto liquefeito e o gás são extremamente frios. Devem-se utilizar roupas protetoras, protetor facial e luvas.

### 9 – Propriedades Físicas e Químicas

- <b>Aspecto:</b>	Líquido criogênico, incolor
- <b>Odor:</b>	Inodoro
- <b>pH:</b>	Não aplicável
- <b>Ponto de fusão</b> a 10 psig (170 kPa abs):	-210,0 °C
- <b>Ponto de ebulição</b> a 10 psig (170 kPa abs):	-195,80°C
- <b>Ponto de fulgor:</b>	Não aplicável
- <b>Taxa de evaporação (Acetato de butila = 1):</b>	Alta
- <b>Taxa de Expansão</b> p/líquido no ponto de ebulição do gás a 21,1 °C:	1 para 696,5
- <b>Limite de inflamabilidade no ar, % em volume:</b>	
<b>Inferior:</b>	Não aplicável
<b>Superior:</b>	Não aplicável
- <b>Pressão de vapor</b> a 20 °C:	Não aplicável
- <b>Peso Específico do vapor</b> a 21,1°C, 1 atm:	1,160 kg/m <sup>3</sup> (0,0724 lb/ft <sup>3</sup> )
- <b>Peso Específico do líquido</b> no ponto de ebulição e 1atm:	808,5 kg/m <sup>3</sup> (50,7 lb/ft <sup>3</sup> )
- <b>Densidade do gás</b> (ar = 1) a 0°C:	0,967
- <b>Solubilidade em água</b> vol/vol a 15,6°C:	0,023
- <b>Coefficiente de partição: n-octano/água:</b>	Não disponível
- <b>Temperatura de auto-ignição:</b>	Não aplicável
- <b>Temperatura de decomposição:</b>	Não aplicável
- <b>Viscosidade:</b>	Não aplicável
- <b>Porcentagem de matéria volátil em volume:</b>	100 %



## Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos

Produto: **Nitrogênio, Líquido refrigerad**  
 Emitido: 16/04/2015  
 Data da última revisão: 01/10/2015

FISPQ n°: **P-4630**  
 Página 7 de 11

- **Peso molecular:** 28,01  
 - **Fórmula:** N<sub>2</sub>

### 10 – Estabilidade e Reatividade

- **Reatividade:** Não disponível
- **Estabilidade química:** Estável
- **Possibilidade de reações perigosas:**
  - Pode reagir violentamente com Lítio, Neodímio, Titânio (acima de 800°C) e Magnésio, sob certas condições, formando nitretos.
  - Pode haver combinação com Oxigênio e Hidrogênio a alta temperatura.
- **Condições a serem evitadas:** Altas temperaturas, exposição ao Lítio, Neodímio, Titânio e Magnésio.
- **Materiais incompatíveis:** Nenhum conhecido.
- **Produtos perigosos da decomposição:** Nenhum conhecido.

### 11 – Informações Toxicológicas

- **Toxicidade aguda:** O Nitrogênio é um asfixiante simples..
- **Corrosão/irritação da pele:** Podem ocorrer queimaduras criogênicas, por contato com o produto líquido.
- **Lesões oculares graves/irritação oculares:** O contato com respingo do líquido pode causar danos irreversíveis.
- **Sensibilização respiratória ou à pele:** Pode causar rápido sufocamento.
- **Mutagenicidade em células germinativas:** Não disponível
- **Carcinogenicidade:** Esta substância não é listada pelo NTP, OSHA ou IARC.
- **Toxicidade à reprodução:** Não ocorrerá.
- **Toxicidade para órgão – alvo específico – exposição única:** Não ocorrerá.
- **Toxicidade para órgãos – alvos específicos – exposição repetida:** Não ocorrerá.
- **Perigo por aspiração :** Esta substância é um asfixiante simples e portanto o pode causar sufocamento rápido.

### 12 – Informações Ecológicas

- **Ecotoxicidade:** Pode causar danos a vegetação por congelamento.
- **Persistência e degradabilidade:** Não disponível.



## Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos

Produto: **Nitrogênio, Líquido refrigerad**  
 Emitido: 16/04/2015  
 Data da última revisão: 01/10/2015

FISPQ n°: **P-4630**  
 Página 8 de 11

- **Potencial bioacumulativo:** Não disponível.
- **Mobilidade no solo:** Não disponível.
- **Outros efeitos adversos:**
  - Nenhum conhecido.
  - Este produto não contém nenhum material químico das Classes I ou II (destruidores da camada de Ozônio).

### 13 – Considerações sobre Destinação Final

- **Método recomendados para destinação final:**
  - Não tente desfazer-se de resíduos ou quantidades não utilizadas.
  - No caso de emergência, mantenha o recipiente criogênico em local bem ventilado, então descarregue lentamente o gás para a atmosfera.
  - Devolva o recipiente criogênico ao seu fornecedor quando vazio e sem risco para o transporte do mesmo.

### 14 – Informações sobre Transporte

- **Regulamentações nacionais e internacionais**
- **Terrestres (ferroviário, rodoviário):** Agência Nacional de Transporte Terrestre – ANTT
  - **DECRETO 96044** - Regulamento para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos.
  - **RESOLUÇÃO 420** - Aprova as Instruções Complementares ao Regulamento para o transporte Rodoviário de Produtos Perigosos.
  - **NBR 7500** - Símbolos de risco e manuseio para o transporte e armazenamento de materiais.
- **Número ONU:** 1977
- **Nome apropriado para embarque:** NITROGÊNIO, LÍQUIDO REFRIGERADO
- **Classe/subclasse de risco principal e subsidiário:** 2.2
- **Número de Risco:** 22
- **Grupo de embalagem:** Não aplicável
- **Perigo ao meio ambiente:** Esta substância não é considerada como poluente marinho pela ANTT.
- **Símbolo para o transporte terrestre, marítimo e aéreo:**

Produto: **Nitrogênio, Líquido refrigerad**  
 Emitido: 16/04/2015  
 Data da última revisão: 01/10/2015

FISPQ n°: **P-4630**  
 Página 9 de 11



### 2.2 – Gás Não Inflamável Não Tóxico

- **Marítimo** (marítimo, fluvial, lacustre): Agência Nacional de Transportes Aquaviário - ANTAQ
  - **IMDG** – International Maritime Dangerous Goods – Code
  - **DPC** – Diretoria de Portos e Costas do Ministério da Marinha – Norma-5
  - **UN number:** 1977
  - **Proper shipping name:** NITROGEN, REFRIGERATED LIQUID
  - **Class or division:** 2.2
  - **Subsidiary risk:** 22
  - **Packing group:** P203
  - **Marine pollutant:** No
- **Aéreo:**
  - **ICAO-TI** – International Civil Aviation Organization – Technical Instructions
  - **IATA-DGR** – International Air Transport Association – Dangerous Goods Regulations
  - **ANAC** – Agência Nacional de Aviação Civil
    - **Resolução n° 129** de 08 de dezembro de 2009
    - **RBAC n° 175** – Regulamento Brasileiro da Aviação Civil para o Transporte de Artigos Perigosos em Aeronaves Civis.
    - **IS n° 175-001** – Instrução Suplementar - IS
  - **UN number:** 1977
  - **Proper shipping name:** NITROGEN, REFRIGERATED LIQUID
  - **Class or division:** 2.2
  - **Subsidiary risk:** 22
  - **Packing group:** P203
  - **Marine pollutant:** No



## Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos

Produto: **Nitrogênio, Líquido refrigerad**  
Emitido: 16/04/2015  
Data da última revisão: 01/10/2015

FISPQ nº: **P-4630**  
Página 10 de 11

### - Informações especiais para embarque:

- Os recipientes devem ser transportados na **posição vertical**, em veículo onde o espaço da carga está separado e não tem contato com a cabine de condução.
- Assegurar que o condutor do veículo tenha conhecimento dos riscos potenciais da carga bem como das medidas a tomar em caso de acidente ou emergência.
- Antes de transportar os recipientes:
  - Verificar se os recipientes estão bem fixados.
  - Verificar se a válvula está fechada e se não tem fugas.
  - Verificar se o compartimento de carga tem ventilação adequada.
- O enchimento deste recipiente somente deverá ser realizado pela White Martins.

### 15 – Informações sobre Regulamentações

As seguintes leis relacionadas são aplicadas a este produto. Nem todos os requerimentos estão identificados. O usuário deste produto é o único responsável pela obediência de todas as leis Federais, Estaduais e Locais.

#### - Regulamentações específicas de segurança, saúde e meio ambiente para o produto:

- Portaria 3214 – NR-15 – Anexo 11
- Lei 9605 – Lei de Crimes ambientais
- Norma ABNT NBR 14725-4: 2014 – Instruções para elaboração de uma FISPQ.

### 16 – Outras Informações

Leia e entenda todas as informações de risco, contida nos rótulos e etiquetas deste produto antes de iniciar a sua utilização.

#### OUTROS RISCOS EM CASO DE MANUSEIO, ARMAZENAGEM E USO:

- **Líquido e gás extremamente frio sob pressão.**
- Use tubulação e equipamentos adequadamente projetados para resistirem às pressões que possam ser encontradas. Evite materiais incompatíveis com líquido criogênico, alguns materiais como aço carbono podem fraturar facilmente a baixas temperaturas.
- Para prevenir que líquido ou gás frio seja aprisionado em tubulação entre válvulas, insira um dispositivo que libere pressão. Use somente linhas de transferência específicas para líquidos criogênicos.
- **Gás pode causar sufocamento rápido em caso de deficiência de oxigênio.**
- Armazene e use com ventilação adequada.
- A White Martins recomenda ventar o produto para o exterior do prédio. Feche a válvula do recipiente depois de cada uso; mantenha fechado mesmo quando vazio.
- **Nunca trabalhe em sistema pressurizado.**
- Se ocorrer um vazamento, feche a válvula do cilindro, ventile o vapor para um local seguro, então repare o vazamento.

#### MISTURA:

- Quando dois ou mais gases ou gases liquefeitos são misturados, suas propriedades perigosas podem se combinar e criar perigos inesperados e adicionais.
- Obtenha e avalie as informações de segurança para cada componente antes de produzir a mistura.
- Consulte um Especialista ou outra pessoa capacitada, quando você fizer sua avaliação de segurança do produto final. Lembre-se: gases e líquidos possuem propriedades que podem causar danos ou a morte.



## Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos

Produto: **Nitrogênio, Líquido refrigerad**  
 Emitido: 16/04/2015  
 Data da última revisão: 01/10/2015

FISPQ nº: **P-4630**  
 Página 11 de 11

### CLASSIFICAÇÃO NFPA:

SAÚDE = 3  
 INFLAMABILIDADE = 0  
 INSTABILIDADE = 0  
 ESPECIAL = **Asfixiante simples**

**POR MEDIDA DE SEGURANÇA É PROIBIDO O TRANSVASAMENTO DESTES PRODUTOS DE UM RECIPIENTE PARA OUTRO.**

**PARA O TRANSPORTE DESTES PRODUTOS, O RECIPIENTE DEVERÁ SER FIXADO NA POSIÇÃO VERTICAL.**

### Abreviaturas:

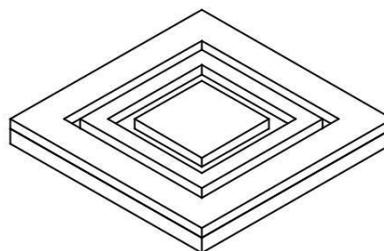
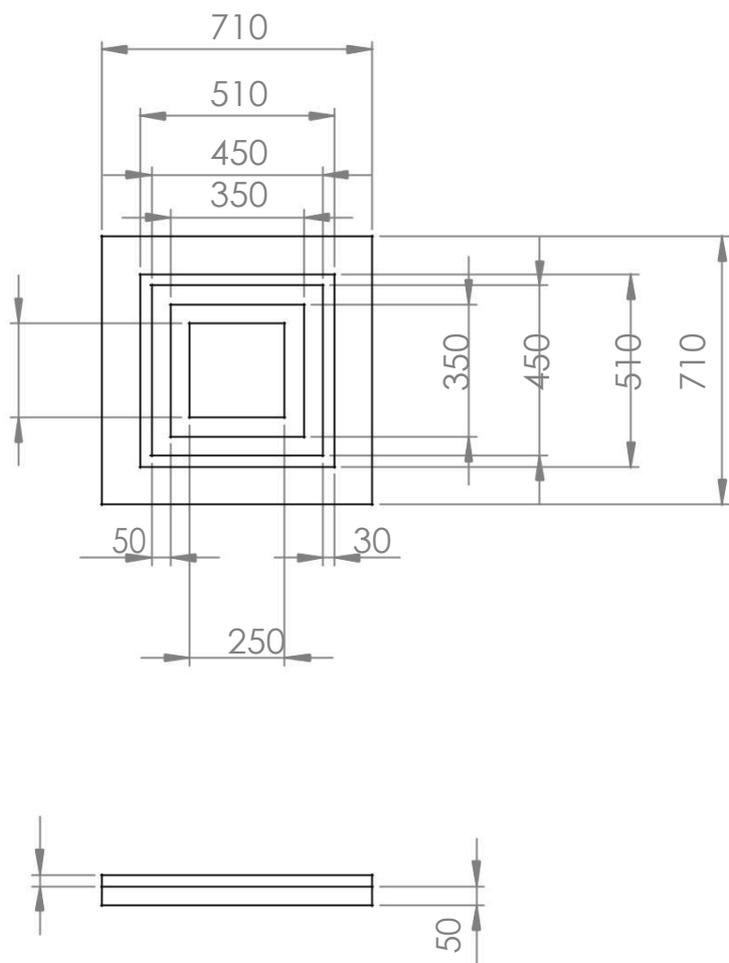
**CAS:** Chemical Abstract Service  
**CE:** Comunidade Européia  
**OSHA:** Occupational Safety and Health Administration  
**IARC:** International agency for research on Cancer  
**CAS:** Chemical Abstracts Service  
**TLV:** Limite de tolerância (LT)  
**DOT:** Department of transportation  
**NFPA:** National Fire Protection Association

### Referências bibliográficas:

- **ACGIH** – AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
- **HSDB** – HAZARDOUS SUBSTANCES DATA BANK
- **IARC** – INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER
- **NIOSH** – NATIONAL INSTITUTE OF OCCUPATIONAL AND SAFETY
- **MSDS – P-4630-J** – NITROGEN, REFRIGERATED LIQUID – PRAXAIR INC.

**A White Martins recomenda que todos os seus funcionários, usuários e clientes deste produto estudem detidamente esta folha de dados a fim de ficarem cientes da eventual possibilidade de riscos relacionados ao mesmo. No interesse da segurança deve-se:**

- 1) Notificar todos os funcionários, usuários e clientes acerca das informações incluídas nestas folhas e fornecer um ou mais exemplares a cada um;**
- 2) Solicitar aos seus clientes que também informem aos seus respectivos funcionários e clientes e, assim, sucessivamente.**



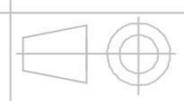
ALUNO	
PROF	
DATA ESC.	VISTO

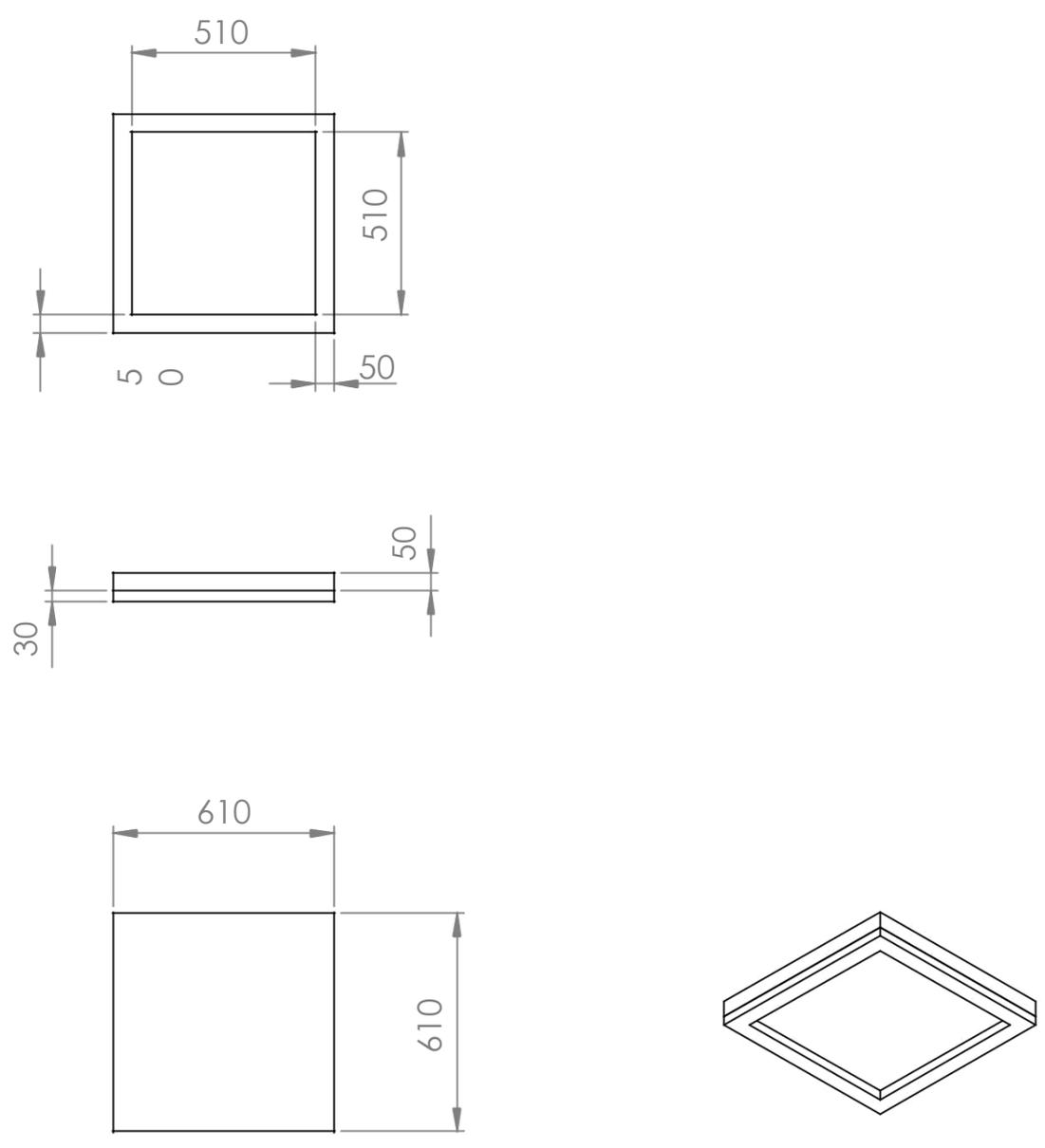


TÍTULO  
DIMENSIONAMENTO DA BASE

TURMA NÚMEROFOLHA Nº

NUMERO DO DESENHO



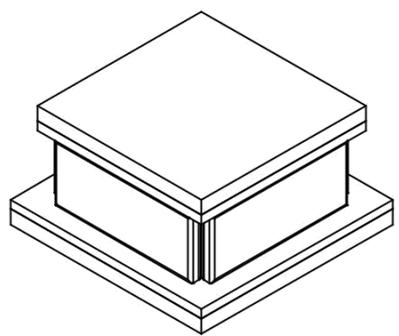
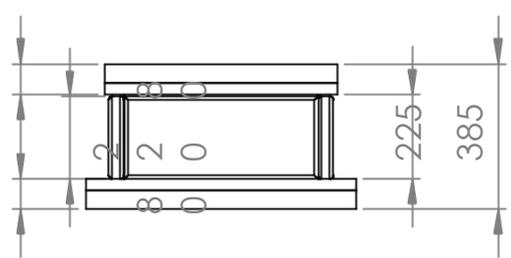
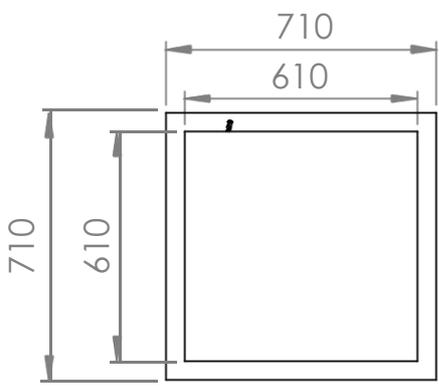


ALUNO	
PROF	
DATA ESC.	VISTO



TÍTULO  
DIMENSIONAMENTO DA TAMPA

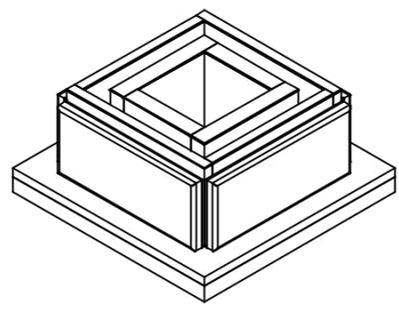
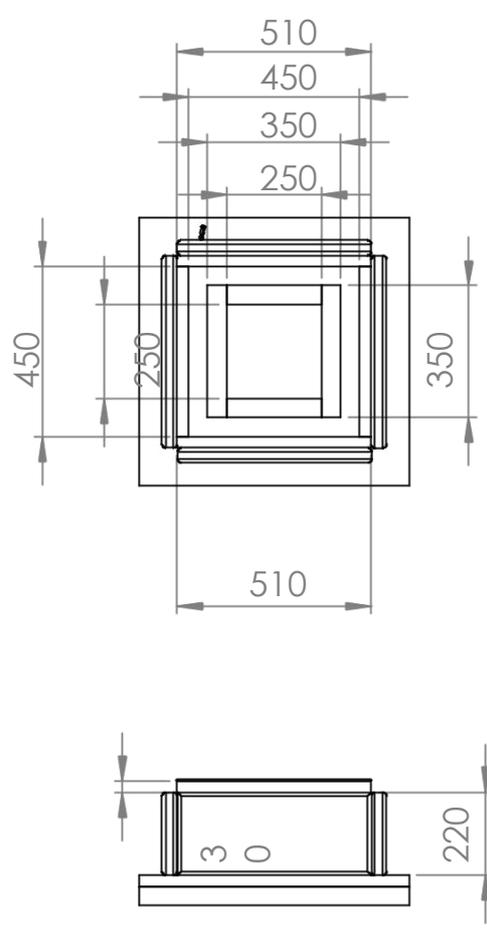
TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº
NUMERO DO DESENHO 02		



ALUNO	
PROF	
DATA	VISTO



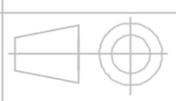
ESC.	TÍTULO	TURMA	NÚMERO FOLHA Nº
	DIMENSIONAMENTO DO CONJUNTO		
		NUMERO DO DESENHO	
		03	



ALUNO	
PROF	
DATA	VISTO



TÍTULO	DIMENSIONAMENTO DO CONJUNTO SEM A TAMPA	TURMA	NÚMERO FOLHA Nº
		NUMERO DO DESENHO	04





## Isolamentos Térmicos e Acústicos

Tudo em EPS (ISOPOR)  
Lã de Rocha (painéis, calhas, feltros etc)  
Lã de Vidro (painéis, calhas, Isoflex etc)  
Borr. Elastomérica (tubos, mantas etc)  
Vermiculita em flocos e painéis  
Forros e acessórios diversos

# PROPRIEDADES FÍSICAS

## BLOCOS DE EPS

Prop.	Método de Ensaio	Un.	Tipos de EPS						
			Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6	Tipo 7
Densidade aparente nominal	ABNT NBR 11949	kg/m <sup>3</sup>	10,0	12,0	14,0	18,0	22,5	27,5	32,5
Densidade aparente mínima	ABNT NBR 11949	kg/m <sup>3</sup>	9,0	11,0	13,0	16,0	20,0	25,0	30,0
Condutividade térmica máxima 23°C	ABNT NBR 12094	W/(mK)	-	-	≤0,036	≤0,035	≤0,034	≤0,034	≤0,034
Tensão por compressão com deformação de 10%	ABNT NBR 8082	KPa	≥35	≥55	≥70	≥80	≥120	≥170	≥185
Resistência mínima à flexão	ASTM C-203	KPa	≥50	≥60	≥120	≥160	≥220	≥275	≥340
Resistência mínima ao cisalhamento	EN 12090	KPa	≥40	≥60	≥75	≥90	≥100	≥135	≥180
Flamabilidade (se classe F)	ABNT NBR 11948	-	Material retardante à chama						