



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



DESENVOLVIMENTO DE UMA CENTRÍFUGA PARA SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS EUTÉTICAS EM MACROGRAVIDADE

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Pedro Tiago Bernabé Lomas (Fatec São José dos Campos, Bolsista
PIBIC/CNPq)
E-mail: ptiago.lomas@gmail.com

Dr. Rafael Cardoso Toledo (LAS/CTE/INPE, Orientador)
E-mail: rafael.toledo@inpe.br

Dr. Chen Ying An (LAS/CTE/INPE, Orientador)
E-mail: chen@las.inpe.br

COLABORADORES

Me. Edson Fernando Fumachi (LAS/CTE/INPE)
Me. Filipe Estevão de Freitas (LAS/CTE/INPE)

Julho de 2016



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



DESENVOLVIMENTO DE UMA CENTRÍFUGA PARA SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS EUTÉTICAS EM MACROGRAVIDADE

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq/INPE)

Pedro Tiago Bernabé Lomas (Fatec São José dos Campos, Bolsista
PIBIC/CNPq)

E-mail: ptiago.lomas@gmail.com

Dr. Rafael Cardoso Toledo (LAS/CTE/INPE, Orientador)

E-mail: rafael.toledo@inpe.br

Dr. Chen Ying An (LAS/CTE/INPE, Orientador)

E-mail: chen@las.inpe.br

COLABORADORES

Me. Edson Fernando Fumachi (LAS/CTE/INPE)

Me. Filipe Estevão de Freitas (LAS/CTE/INPE)

Julho de 2016

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo projetar e manufaturar o comando eletroeletrônico de uma centrífuga capaz de simular as rotações dos voos sub-orbitais do VSB-30 (veículo sub-orbital) em laboratório e realizar ensaios de solidificação de metais em macrogravidade para o Laboratório Associados de Sensores e Materiais da Coordenadoria de Tecnologias Espaciais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LAS/CTE/INPE). É de consenso na literatura, que a gravidade afeta de forma direta ou indireta a solidificação de metais e suas ligas, e que a centrífuga é um equipamento capaz de simular ambientes de macrogravidade. Tomando como base o sistema eletroeletrônico dos fornos do LAS (controle térmico), desenvolveu-se em ambiente CAD (*computer aided design*) um módulo de controle térmico para centrífuga, o qual foi manufaturado por processos de usinagem e posteriormente montado na oficina de eletrônica do LAS. Também se instalou um sistema de aquisição de dados (temperatura em função do tempo) dos experimentos no braço da centrífuga; e realizou-se a adequação da rede elétrica do laboratório para a montagem da centrífuga. Com a parte de controle instalada, e a centrífuga funcional, obteve-se o perfil térmico do forno para diferentes sets de temperatura.

Palavras-chave: Centrífuga, Solidificação, Ligas eutécticas, Macrogravidade.

ABSTRACT

This work aims to design and manufacture an electric and electronic control of a centrifuge to simulate the rotational speed during VSB-30 sounding rocket flight in the laboratory environment. It is well known that gravity affects directly or indirectly the solidification process of metals and alloys, and an attached electric furnace also was developed in order to perform materials solidification experiments under macrogravity conditions at Associate Laboratory Coordination sensors and Materials of Space Technologies National Institute for Space Research (LAS / CTE / INPE). The temperature control module for centrifuge was designed using CAD (*computer aided design*) software, manufactured by machining processes and retrofitted at electronics workshop of LAS. There is a data acquisition system fixed at the centrifuge arm in order to collect the temperatures during solidification process and also for monitoring the furnace thermal profile at different temperature sets.

Keywords: Centrifuge, Solidification , Eutectic alloy, Macrogravity

SUMÁRIO

1. Introdução.....	8
2. Fundamentação Teórica.....	10
2.1 Princípios físicos da centrifuga.....	10
3. Forno solidificação em macrogravidade.....	11
4. Projeto módulo de potência do forno.....	13
4.1 Projeto Conceitual.....	13
4.2 Diagrama elétrico.....	14
4.3 Recipiente.....	15
5. Proposta do funcionamento do experimento.....	17
6. Conclusão.....	19
7. Referências.....	20
APÊNDICE A.....	21
APÊNDICE B.....	22
APÊNDICE C.....	23
APÊNDICE D.....	24
APÊNDICE E.....	25
APÊNDICE F.....	26

LISTA DE FIGURAS

1 – Centrífuga do LAS/INPE.....	9
2 – Forças na centrífuga.....	10
3 – (a) corte longitudinal do forno; (b) vista geral do forno tubular.....	11
4 – Forno vista aproximada do conector DB-9.....	12
5 – Forno de indução vista superior.....	12
6 – Esquema elétrico do módulo de potência.....	14
7 – Esquema de configuração dos pinos do conector DB-9.....	14
8 – Módulo de controle completo.....	15
9 – Módulo de controle vista superior.....	15
10 – Centrífuga completa.....	17
11 - Preparação da posição do forno, e do setup de temperatura.....	17
12 – Perfil térmico do forno na vertical.....	18
13 – Perfil térmico do forno na horizontal.....	18
14 – Desenho técnico 2D da chapa lateral de fixação do relé de estado sólido.....	21
15 – Desenho técnico da chapa traseira para a fixação do conector da tomada.....	22
16 – Desenho técnico 2D da chapa frontal para a fixação do controlador, conector DB-9, fusível, chave de alavanca, e disjuntor.....	23
17 – Desenho técnico 2D da chapa inferior para a fixação do fusível DIAZED.....	24
18 – Desenho técnico do módulo de potência completo.....	25
19 – especificações técnicas do disjuntor B16 da Steck.....	26

LISTA DE SÍMBOLOS

°C – Grau Celsius

g – Grama; aceleração da gravidade

K – Kelvin

m – Metros

s – Segundos

RPM – Rotações por minuto

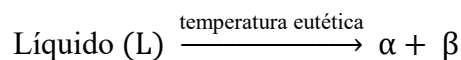
V - Volt

1. INTRODUÇÃO

A metalurgia, ciência que lida com metais e suas ligas, constituem um dos domínios mais importante da produção de materiais. Praticada por vários milhares de anos, continua a ser um importante campo para investigações científicas.

A solidificação de metais e suas ligas depende de uma variedade de mecanismos, e estes são, geralmente, agrupados sob os termos genéricos de nucleação e crescimento, sendo que ambos são afetados de forma direta ou indireta pela gravidade. Até agora, a importância mais significativa para pesquisas em micro e macro gravidade na metalurgia foi a aceitação da gravidade como parâmetro independente na teoria solidificação. Segundo Kurz e Fisher (1992), até cerca da primeira metade do século XX a maior parte das teorias desenvolvidas para descrever os fenômenos da solidificação era baseada no pressuposto que não ocorria convecção (fenômeno associado diretamente à gravidade) durante o processo de solidificação, considerando a convecção desprezível e, portanto, não diretamente ligada ao processo, ou seja, os fenômenos da solidificação eram baseados em mecanismos de transporte puramente difusivos. A partir da década de 1970, a gravidade (convecção) vem aparecendo explicitamente em equações de teorias nas áreas de segregação, estabilidade morfológica, bem como nos crescimentos celulares e dendríticos e, assim, os experimentos em ambiente de microgravidade são um meio importante de validar essas teorias (HAMACHER et al., 1987; HURLE et al., 1987; FAVIER et al., 1987; DHINDAW, 2001, TOLEDO, 2013).

A análise de diversos diagramas de fases de sistemas binários revela, em grande parte, a ocorrência de uma transformação caracterizada pelo crescimento simultâneo de duas fases sólidas (α e β) a partir do líquido em ponto de fusão menor do que os apresentados pelos constituintes que compõem o sistema. Tal transformação é denominada eutética e ocorre em um ponto do diagrama de equilíbrio fases a uma temperatura e concentração específicas:



Este tipo de reação é uma reação invariante, porque se encontra em equilíbrio térmico, ou seja, a variação da energia livre de Gibbs é igual à zero, conseqüentemente o líquido e as soluções sólidas coexistem e estão em equilíbrio químico, e a temperatura permanece constante durante a transição de fase.

A solidificação de uma liga eutética binária envolve a nucleação e o crescimento de duas fases, α e β , que se interferem mutuamente. A morfologia observada nessas ligas é decorrente da nucleação e do crescimento dessas fases. Portanto, os fatores que influenciam a nucleação e o crescimento (gradiente térmico na fase líquida; velocidade de crescimento das fases sólidas; presença de impurezas na liga) determinam as microestruturas resultantes e conseqüentemente afetam nas propriedades físicas da liga.

O uso de centrífugas para o processamento e fundição de materiais é uma prática antiga. Como por exemplo, as centrífugas de bancada e ultra centrífugas, a primeira por décadas é utilizada para separar partículas coloidais de líquidos, já a segunda na separação de moléculas pesadas de soluções, e ocasionalmente para o crescimento de

cristais. A utilização de uma centrífuga é justificada porque a mesma pode proporcionar variações na aceleração e na convecção fatores que influencia no processamento/solidificação dos materiais, o que pode resultar na produção de materiais únicos que não podem ser obtidos pelos métodos convencionais (gravidade terrestre) (REGEL, WILCOX 1997; FREITAS, 2011).

A utilização de centrífugas para o processamento de materiais utilizando a alta gravidade é realizado em poucos lugares (FRIEDRICH, MÜLLER 1997). Devido a isso (AN et al., 1997) desenvolveu para o Laboratório Associado de Sensores e Materiais da Coordenadoria de Tecnologias Espaciais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LAS/CTE/INPE), uma pequena centrífuga para acelerações de até 10g atingindo temperaturas de superiores a 500°C e após algum tempo de utilização foi restaurada por (FREITAS, 2011).

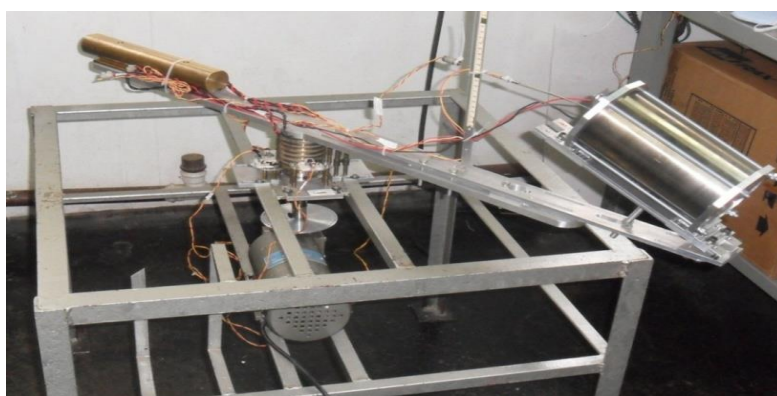


Figura 1 - Centrífuga do LAS/INPE.
FONTE: FREITAS (2011)

A proposta de uma nova centrífuga para o LAS/INPE se deu após a atualização realizada por Freitas, onde se observou que a centrífuga existente não atendia mais as necessidades do laboratório, devido a sua capacidade de carga limitada e mau controle de velocidade.

Assim, este trabalho de Iniciação Científica tem como objetivo dar prosseguimento ao projeto iniciado por Tenório (2015) de projetar e manufaturar uma nova centrífuga capaz de simular as rotações dos voos suborbitais do VSB-30 em laboratório e realizar ensaios de solidificação materiais em macrogravidade. Sendo que o foco do trabalho desenvolver o controle térmico necessário para realizar os ensaios de solidificação materiais em macrogravidade.

O trabalho é estruturado da seguinte maneira, uma abordagem teórica sobre os mecanismos de solidificação em uma centrífuga, e sobre o funcionamento e componentes do forno de indução, em seguida o projeto do módulo de potência descrevendo os componentes elétricos e eletrônicos, as chapas de aço usadas para sua concepção seus desenhos técnicos em 2D, e os métodos de manufatura utilizados, é apresentado o diagrama elétrico do módulo, e descrita a montagem final do módulo, finalizando é realizado um experimento para gerar o perfil térmico do forno, e as conclusões gerais sobre o trabalho, uma seção com vários apêndices trazem os desenhos 2D de todas as peças que foram manufaturadas na oficina do LAS/CTE/INPE para a confecção do recipiente do módulo, e especificações técnicas de alguns componentes elétricos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. FÍSICA DA CENTRÍFUGA NA SOLIDIFICAÇÃO DE MATERIAIS

Todo objeto quando rotacionado é imposto nele uma velocidade angular (ω) que gera uma força centrífuga (F_c) que tende a jogar nesse caso o fluido para fora, e junto com a força centrífuga atua também a força peso (F_p), gerada pela gravidade da Terra, a soma vetorial dessas duas forças formam uma resultante (F_r) (Figura 2), além disso, é incluída a aceleração de Coriolis, que como efeito causa uma deflexão no fluido e cria circulação (REGEL, WICOX 1997; DOMELEN 2015).

$$g_a = \omega^2 * r$$

$$F_{coriolis} = -2m (\omega * V_r)$$

Onde “r” é a distancia a partir do eixo de rotação, “m” a massa de rotação, “v” a velocidade rotacional.

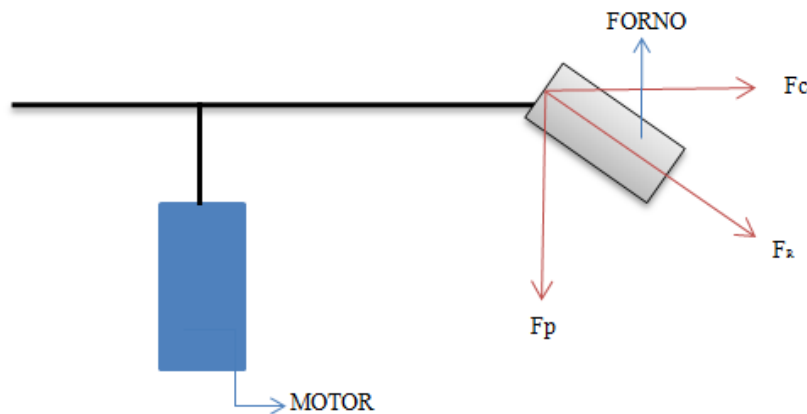


Figura 2 – Forças na centrífuga

O aumento da aceleração resultante no fluido gera uma maior convecção, maior sedimentação da segunda fase e aumento do peso do material. Tais alterações podem causar: modificação na transferência de calor e massa em todo o sistema; alterar a posição e a forma da interface sólido-líquido; colaborar a incorporação de impurezas no estresse térmico no sólido e na propagação de discordâncias e contornos e grão; sedimentação de partículas estranhas; alteração no tamanho de grão; diminuir a nucleação de novos cristais durante o crescimento (REGEL, WILCOX 1994; FREITAS 2011).

Para determinar qual o RPM necessário para causar uma aceleração resultante desejada para os ensaios com as ligas eutéticas, foi desenvolvido um algoritmo que parte do determinado princípio que $a_c = F_g * \cos(\tan^{-1}(1/a_c))$, chegando assim na seguinte equação:

$$RPM = \frac{60 * a_c * 9,8}{4\pi^2 * r}$$

3. FORNO SOLIDIFICAÇÃO EM MACROGRAVIDADE

O forno foi concebido para funcionar de forma semelhante como aqueles utilizados na técnica de solidificação direcional (técnica de Bridgman-Stockbarger), com o objetivo de fundir e solidificar materiais com ponto de fusão de até 1000 °C, e suportar acelerações de no mínimo 13 g (aceleração do VSB-30 durante a subida). O forno será capaz de proporcionar um resfriamento a altas rotações, com o objetivo de solidificar amostras de até 15 mm de diâmetro e até 70 mm de comprimento.

O forno resistivo, de formato tubular, é aquecido e controlado a partir da bancada através de um cabo, ligado a centrífuga, até que se atinja a temperatura necessária. Nos momentos antes que a centrífuga seja acionada o cabo é desconectado e o forno é desligado, tendo sua temperatura mantida por inércia térmica até o início da rotação. A temperatura do experimento é medida por dois termopares e os seus sinais são armazenados em um registrador interno (*data-logger*) e coletados após o experimento.

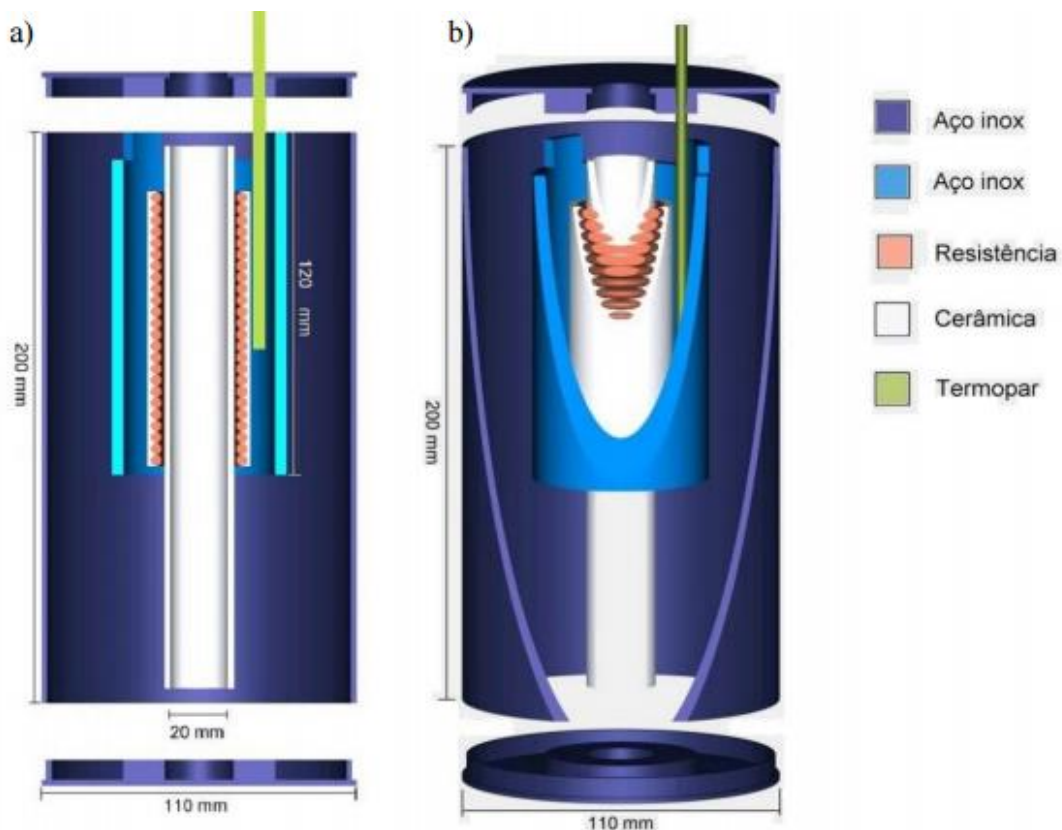


Figura 3—(a) corte longitudinal do forno; (b) vista geral do forno tubular.
FONTE: FREITAS (2011)

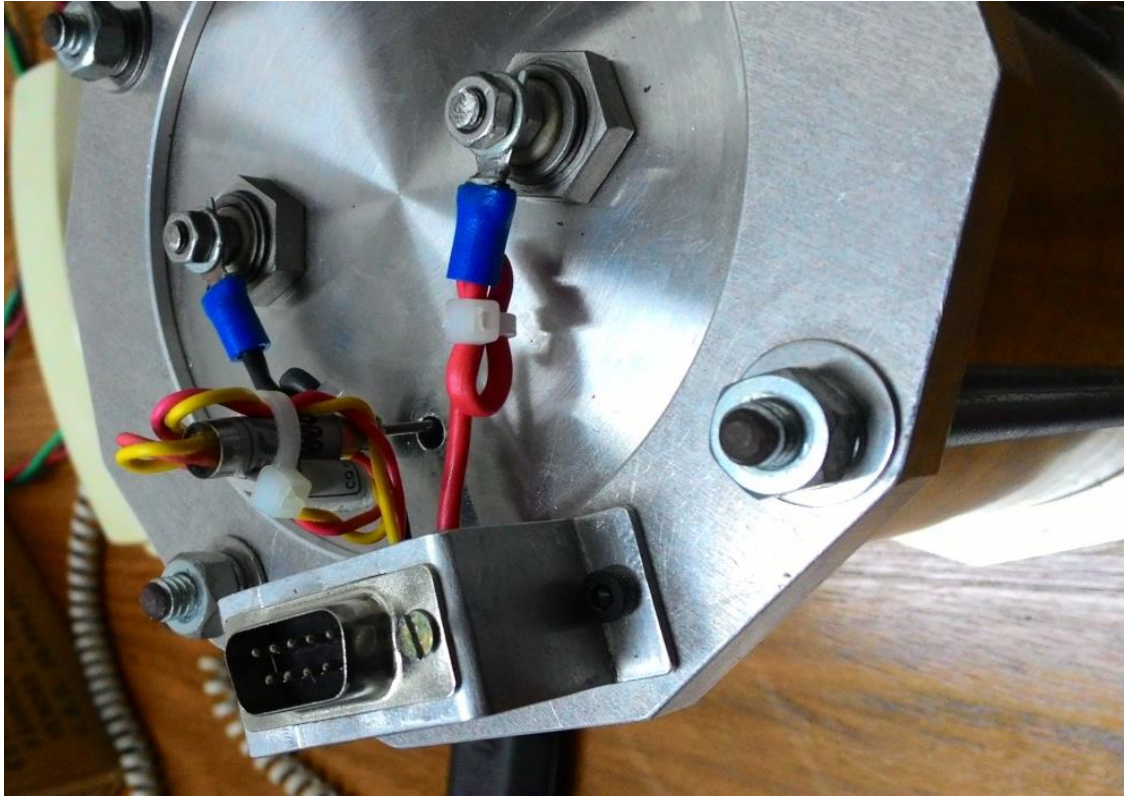


Figura 4 – Forno vista aproximada do conector DB-9
FONTE: Produção do autor

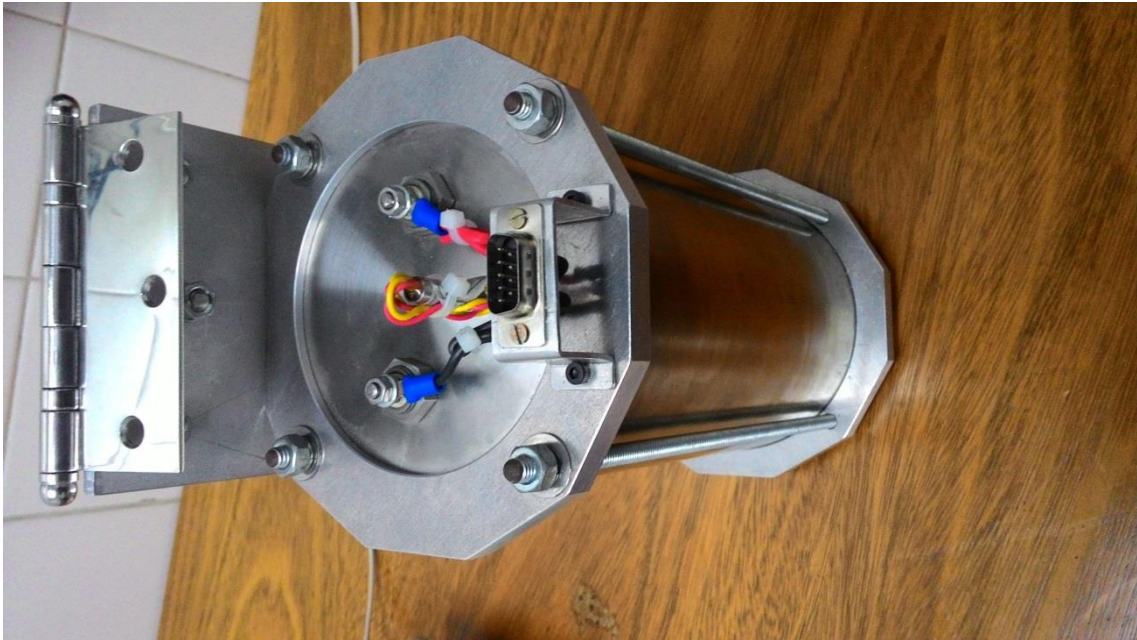


Figura 5 – Forno de indução vista superior
FONTE: Produção do autor

4. PROJETO MÓDULO DE POTÊNCIA DO FORNO

4.1. CONCEITOS INICIAIS DO PROJETO

O módulo de potência do forno de macrogravidade da centrífuga foi baseado no controle de temperatura do forno da operação Maracati (ref), uma vez que o princípio de funcionamento do experimento de solidificação em macrogravidade será semelhante ao adotado na operação.

Dessa forma, o módulo de potência consistirá em um sistema elétrico que realizara a interface de controle do forno e potencia, alimentado por uma tensão de 127V. O módulo de potencia é composto por:

a) Controlador Universal Novus N2000

O controlador é o a única interface homem-máquina (IHM) do módulo, e nele é configurado a temperatura alvo que se deseja alcançar para a fundição da liga, sendo uma peça fundamental da a flexibilidade de ajustar o forno ao processamento de qualquer liga.

b) Disjuntor monopolar B16 Steck

Como o projeto trabalha com alta e baixa potencia há basicamente uma chave e um fusível para cada nível potenciam de trabalho, o disjuntor assume a função de ser uma chave liga-desliga para o nível de alta potencia, e caso o sistema receba uma sobre carga o disjuntor desarma evitando o comprometimento de todo o módulo. No apêndice F encontre as especificações técnicas.

c) Fusível

O fusível é o componente que evita que uma corrente acima do aceitável danifique os componentes de baixa potencia que no caso em questão é a chave de alavanca e o controlador universal Novus N2000, é um componente de segurança bastante prático e barato, podendo ser simplesmente trocado se danificado.

d) Conector DB-9

Esse componente será a ligação entre a fase e o neutro da tensão que será aplicada no forno, e fará a leitura do termopar ligado ao forno.

e) Chave de alavanca

É o interruptor que liga e desliga os componentes de baixa potência.

f) Fusível de alta potencia

Embora o disjuntor já seja um componente de segurança ainda não continua sendo totalmente eficaz, por se tratar do manuseio de um forno de indução há um alto valor de potencia de trabalho envolvido, caso o módulo venha a se sobre carregar este fusível irá impedir que essa sobre carga passe para o resto dos componentes de alta potencia, no módulo utilizamos um fusível de 16A e 500V da Siemens.

g) Relé de estado sólido Novus KSD225AC8

Esse componente funciona como um relé tradicional, deixando passar a corrente na linha quando recebe um sinal, sendo usado para o acionamento da carga indutiva, ou seja, o acionamento da bobina do forno, porém sua comutação funciona por tiristores.

4.2. Diagrama elétrico

O módulo tem basicamente dois circuitos diferentes, um feito para o controlador universal que utiliza uma corrente e potência baixa, e um outro circuito que trabalha com uma potência maior e utiliza componentes mais robustos, pois são os responsáveis em gerar a energia necessária para aquecer todo o forno.

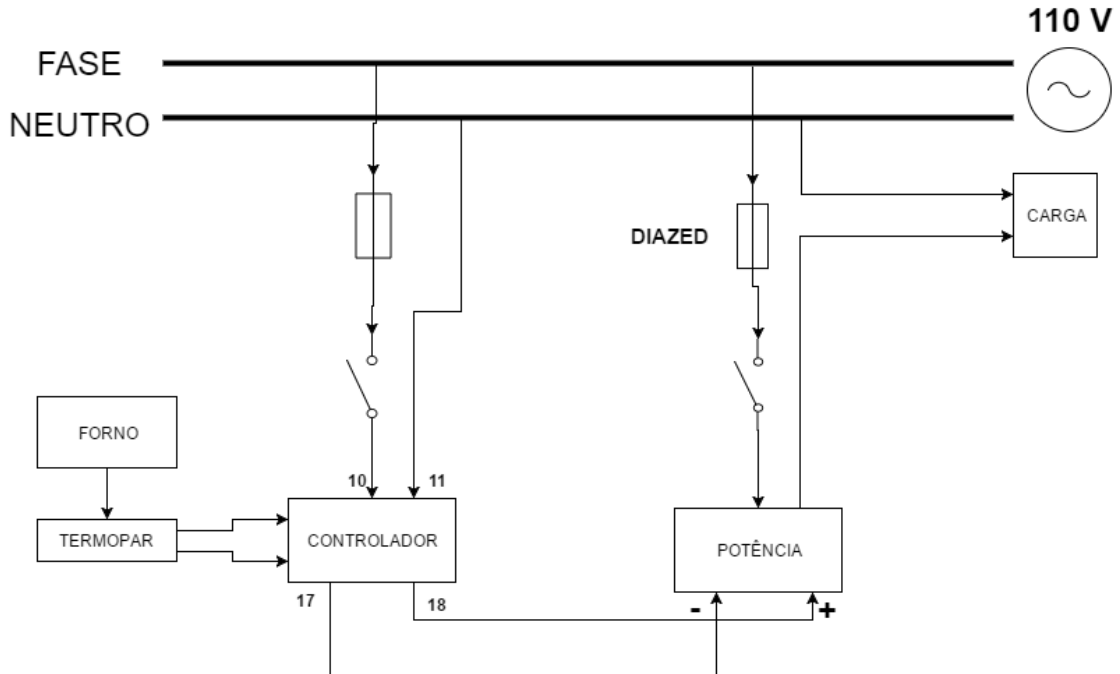


Figura 6 – Esquema elétrico do módulo de potência
FONTE: Produção do autor

Segue abaixo um diagrama esquemático da configuração de pinos usados no conector DB-9 para a ligação entre o termopar de controle, e para o acionamento do forno.

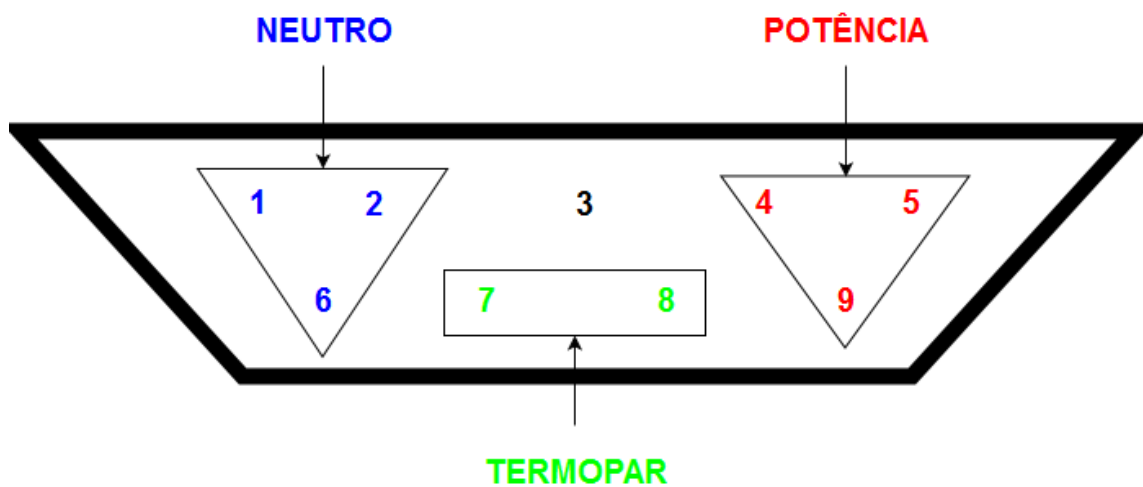


Figura 7 – Esquema de configuração dos pinos do conector DB-9
FONTE: Produção do autor

4.3. Recipiente

Para conter todos estes itens foi projetado um caixa em ambiente CAD que agrupa todos os componentes em um único recipiente, tornando o manuseio seguro, e oferecendo maior praticidade e agilidade, uma vez que tudo esta integrado em um conjunto portátil.

Os desenhos 2D das chapas lateral, traseira, frontal e inferior com suas furações e cotas, podem ser encontradas nos apêndices A, B, C, e D respectivamente

Após projetado a caixa em ambiente CAD, os outros componentes também foram projetados para uma análise de conjunto, verificando se os espaços e as disposição dos componentes não entravam em interferência, ou seja, se eles não se tocavam, conforme o apêndice E.

Com o projeto verificado e validado, deu-se inicio a produção do módulo através do fresamento e corte de chapas de 2mm e 6mm de espessura, também utilizamos cantoneiras de junta.



Figura 8 – Módulo de controle completo
FONTE: Produção do autor

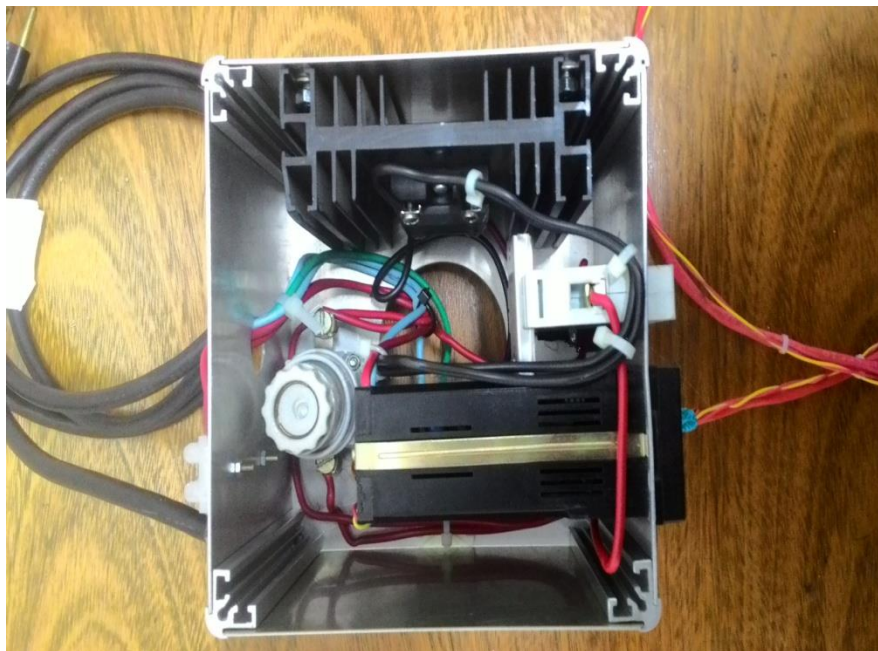


Figura 9 – Módulo de controle vista superior
FONTE: LOMAS (2016)

5. PROPOSTA DO FUNCIONAMENTO DO EXPERIMENTO

Para a realização do experimento a liga metálica que já estará contida em um tubo de quartzo será no centro do forno, e sua altura em relação à base do forno será ajustada de acordo com o perfil térmico do forno que relaciona a temperatura em função do comprimento, pelo fato da bobina de indução não envolver todo o comprimento do tubo com a amostra. Com a amostra já posicionada, o forno será fechado e ligado no módulo de potência que estará ligado na rede elétrica, no controlador será programada a temperatura de set-point de acordo com a liga analisada, que será a temperatura que se deseja alcançar para a sua fusão, após a temperatura de fusão ter sido programada o forno será ativado. Após ter alcançado a temperatura de fusão e toda a amostra estiver em seu estado líquido, o forno será desligado e o módulo de potência será desconectado do forno, e o registrador interno (*data-logger*) será ligado para a aquisição de dados. Rapidamente a centrífuga será ligada e a velocidade do motor será ajustada pelo inversor de frequência, a centrífuga permanecerá em funcionamento até que toda a amostra se solidifique novamente. Após todo esse processo a amostra será retirada do forno, e já estará pronta para ser analisada.



Figura 10 – Centrífuga completa
FONTE: Produção do autor

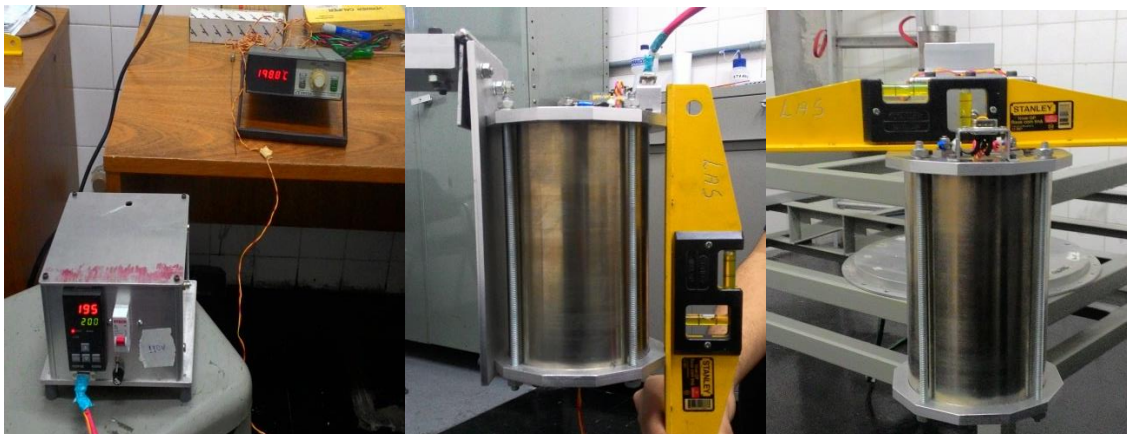


Figura 11 – Preparação da posição do forno, e do setup de temperatura.
FONTE: Produção do autor

O perfil térmico do forno é influenciado pela sua posição devido a convecção do ar no interior, logo foi analisado um perfil com o forno totalmente em pé na vertical, e totalmente deitado na horizontal, os respectivos gráficos a seguir indicam a temperatura em graus Celsius (°C) em função do comprimento em centímetros da câmara onde será colocada a amostra.

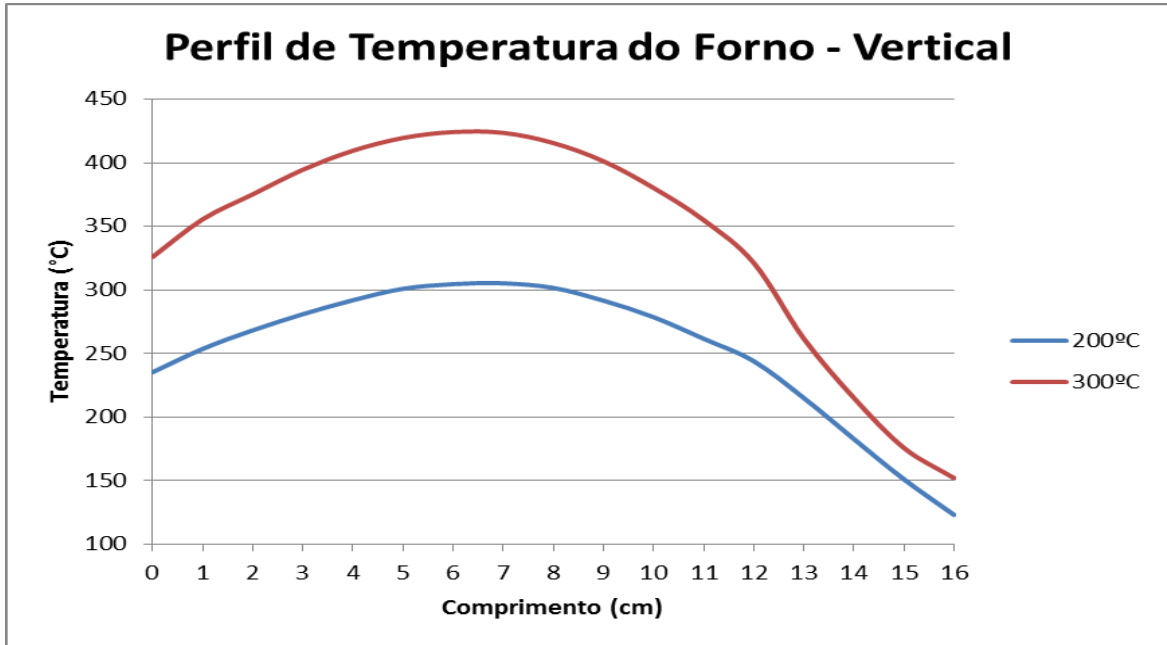


Figura 12 – Perfil térmico do forno na vertical
FONTE: Produção do autor

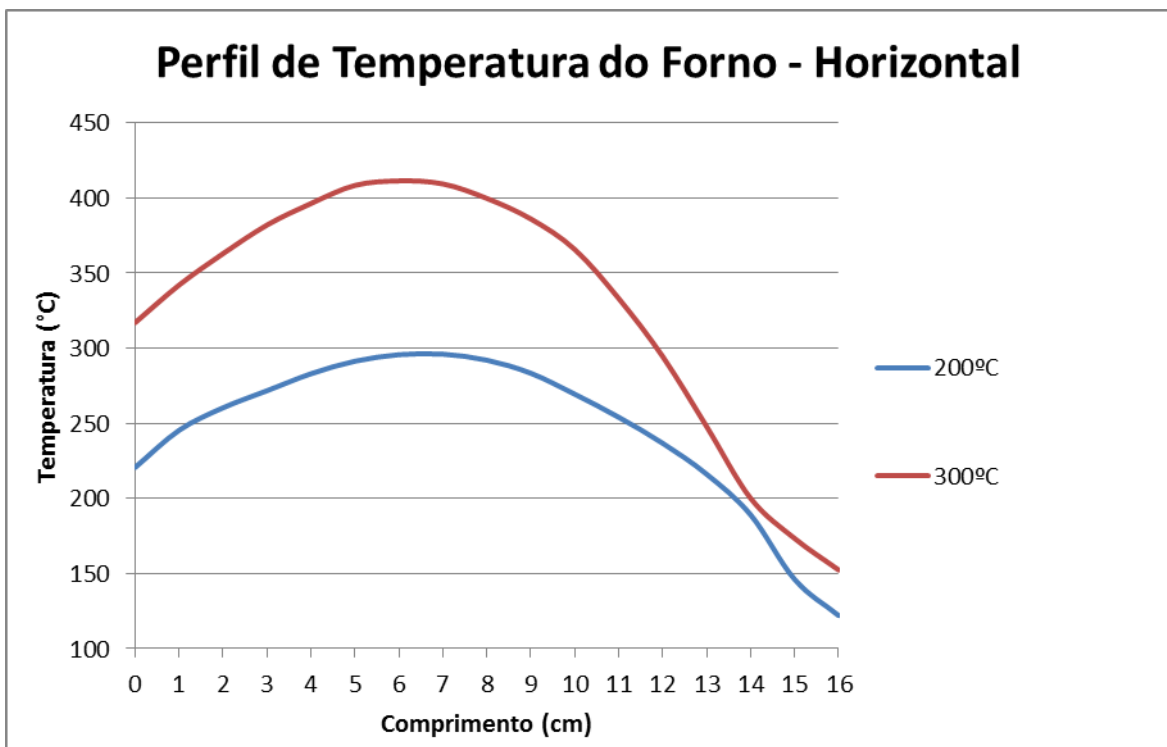


Figura 13 – Perfil térmico do forno na horizontal
FONTE: Produção do autor

6. CONCLUSÃO

Através de um projeto detalhado e de métodos convencionais de fabricação foi possível fabricar um módulo controlador de temperatura para o experimento de solidificação de materiais em macrogravidade da centrífuga do LAS/CTE/INPE.

Através da realização do projeto em ambiente CAD e usando processos de usinagem, e eletroeletrônicos, foi possível desenvolver um módulo de controle térmico que será usado no forno de indução da centrífuga que poderá realizar os mais diversos estudos de solidificação de materiais em macrogravidade.

Com a conclusão dessa etapa do projeto a nova centrífuga se encontra em pleno funcionamento, sendo possível realizar dois tipos de ensaios: simulação das rotações e condições do VSB-30 em solo; e solidificação de materiais em alta gravidade.

7. REFERÊNCIAS

- AN, C. Y.; RUSSO, L. C.; RIBEIRO, M. F.; BANDEIRA, I. N. A Low Cost Centrifuge for Materials Processing in High Gravity. In: Centrifugal Materials Processing. New York: Plenum Press, 1997.
- AZEVEDO, A. F. M. Método dos Elementos Finitos. 1º Edição. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2003.
- DHINDAW, B. K. Solidification under microgravity. *Sadhana*, v. 26, p. 59-69, 2001.
- DOMELLEN, D. J. V. Traduzido por SILVA, M. E. S.; SANTOS, B. V. Disponível em: http://www.geografia.fflch.usp.br/graduacao/apoio/Apoio/Apoio_Emerson/flg0253/2014/aula7/Leitura_complementar_Forca_de_Coriolis.pdf. Acesso em: 06/07/2015.
- IAE – Instituto de Aeronáutica e Espaço. VSB -30. Disponível em: <http://www.iae.cta.br/site/page/view/pt.vsb30.html>. Acesso em: 13/07/2015.
- FAVIER, J. J.; HUNT, J. D.; SAHM, P. R. Metals and alloys. In: WALTER, H. U. (Ed.). *Fluid sciences and materials science in space: a european perspective*. Berlin, Germany: Springer, 1987. cap. XIV, p. 477-516.
- FREITAS, F. E. Utilização de uma centrífuga de baixo custo para estudo da influência da alta gravidade na solidificação da liga eutética PbSn. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso), Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2011.
- FRIEDRICH, J.; MÜLLER, G. Convection in crystal growth under high gravity on a centrifuge. In: Centrifugal Materials Processing. New York: Plenum Press, 1997.
- HAMACHER, H.; FITTON, B.; KINGDON, J. The environment of earth-orbiting systems. In: WALTER, H. U. (Ed.). *Fluid sciences and materials science in space: A european perspective*. Berlin, Germany: Springer, 1987. cap. I, p. 1-50.
- HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. 7ª edição. São Paulo. Person Prentice Hall, 2009.
- HURLE, D. T. J.; MIULLER, G.; NITSCHKE, R. Crystal growth from the melt. In: WALTER, H. U. (Ed.). *Fluid sciences and materials science in space: A european perspective*. Berlin, Germany: Springer, 1987. cap. X, p. 313-354.
- REGEL, L.L.; WILCOX, W.R. Centrifugal Materials Processing. New York: Plenum Press, 1997.
- REGEL, L.L.; WILCOX, W.R. Materials Processing in High Gravity. New York: Plenum Press, 1994.
- TENÓRIO, P. I. Desenvolvimento de uma centrífuga para solidificação de ligas eutéticas em macrogravidade. Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica – INPE, São José dos Campos, 2015.
- TOLEDO, R. C. Estudo da solidificação da liga metálica eutética BiInSn em ambiente de microgravidade utilizando tubo de queda livre, "drop tube". 115 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) - INPE, São José dos Campos, 2009.
- TOLEDO, R. C. Estudo da solidificação de ligas metálicas eutéticas em ambiente de microgravidade. 217 p. Tese (Tese de Doutorado), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.
- XAVIER, R. Sistemas Articulados de Planos. Disponível em: http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano1/mec1/aulas_praticas/elementos_apoio/Sistemas%20articulados%20planos.pdf. Acesso em: 13/07/2015

APÊNDICE A

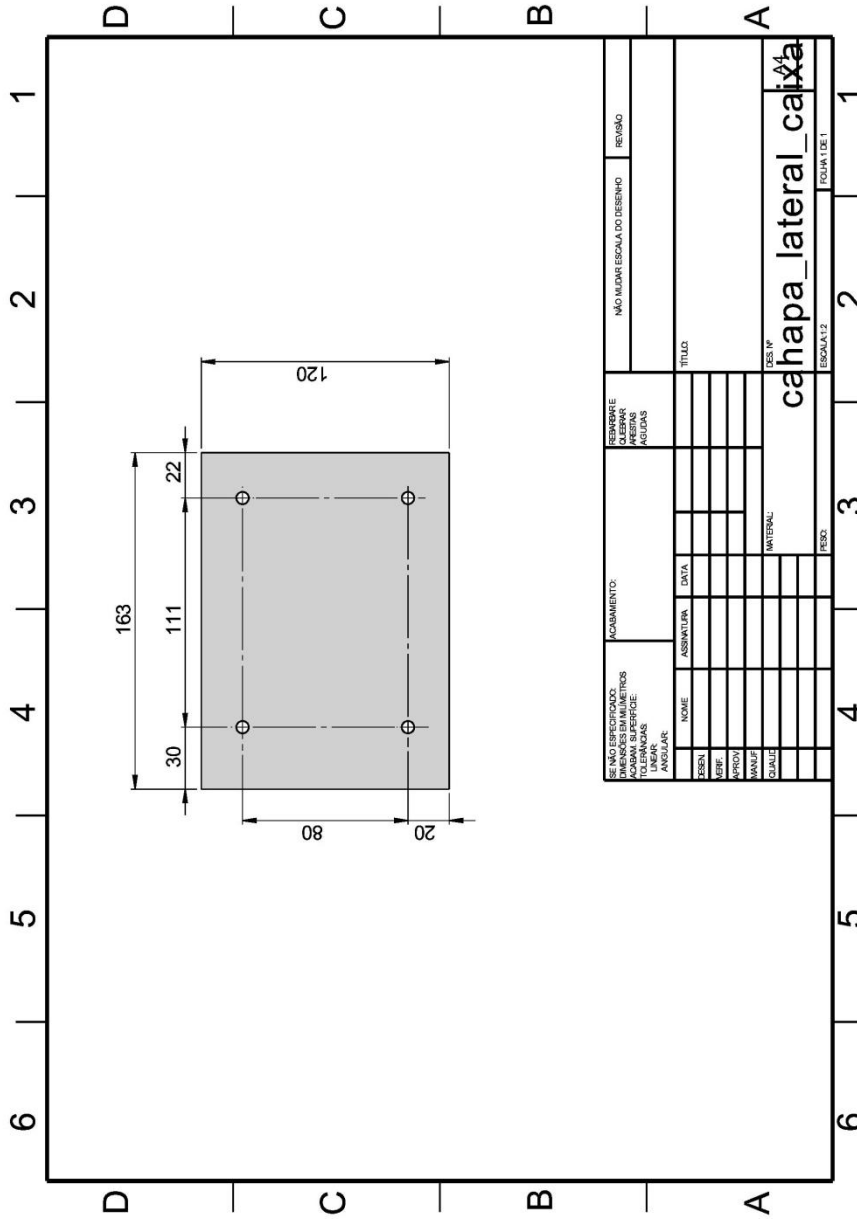


Figura 14 – Desenho técnico 2D da chapa lateral de fixação do relé de estado sólido
 FONTE: Produção do autor

APÊNDICE B

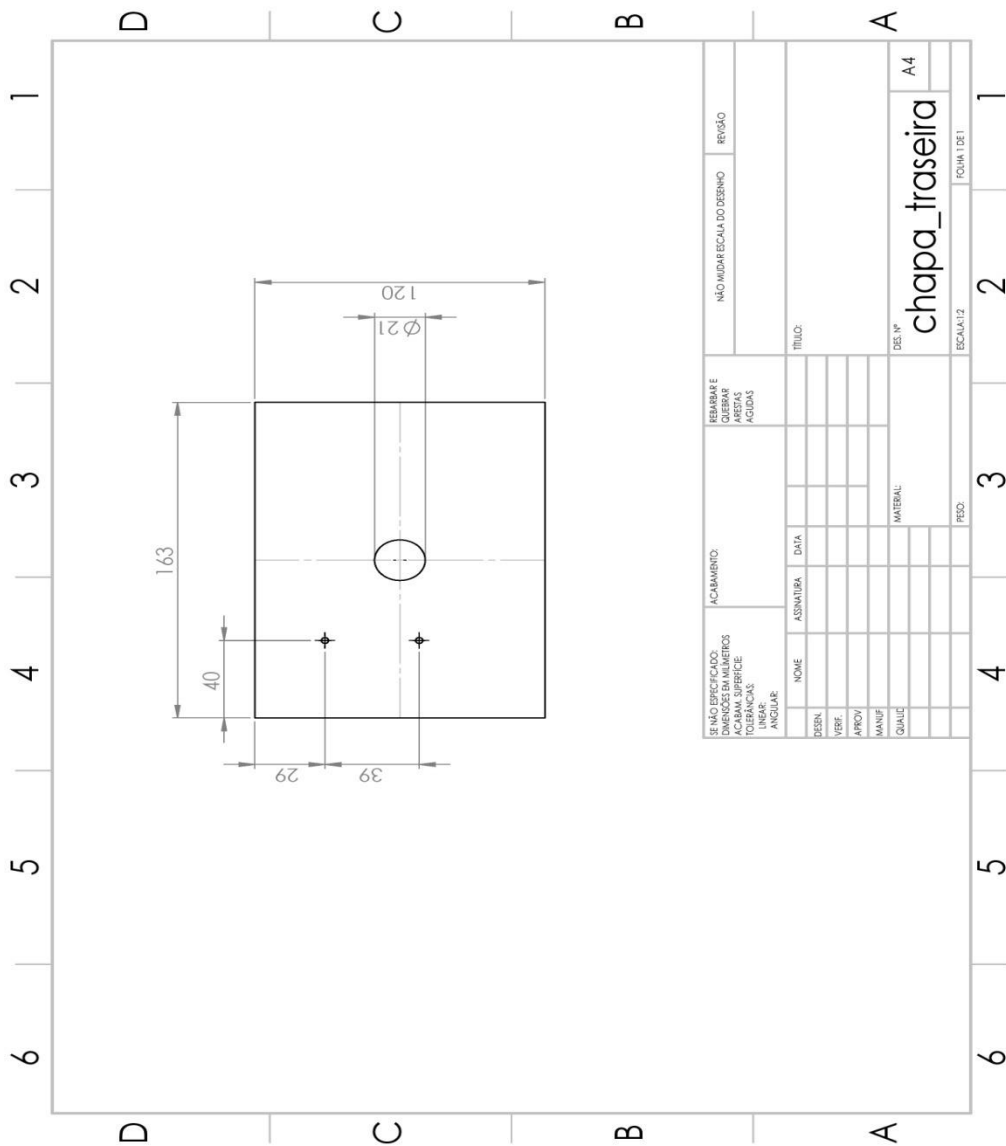


Figura 15 – Desenho técnico da chapa traseira para a fixação do conector da tomada.
 FONTE: Produção do autor

APÊNDICE C

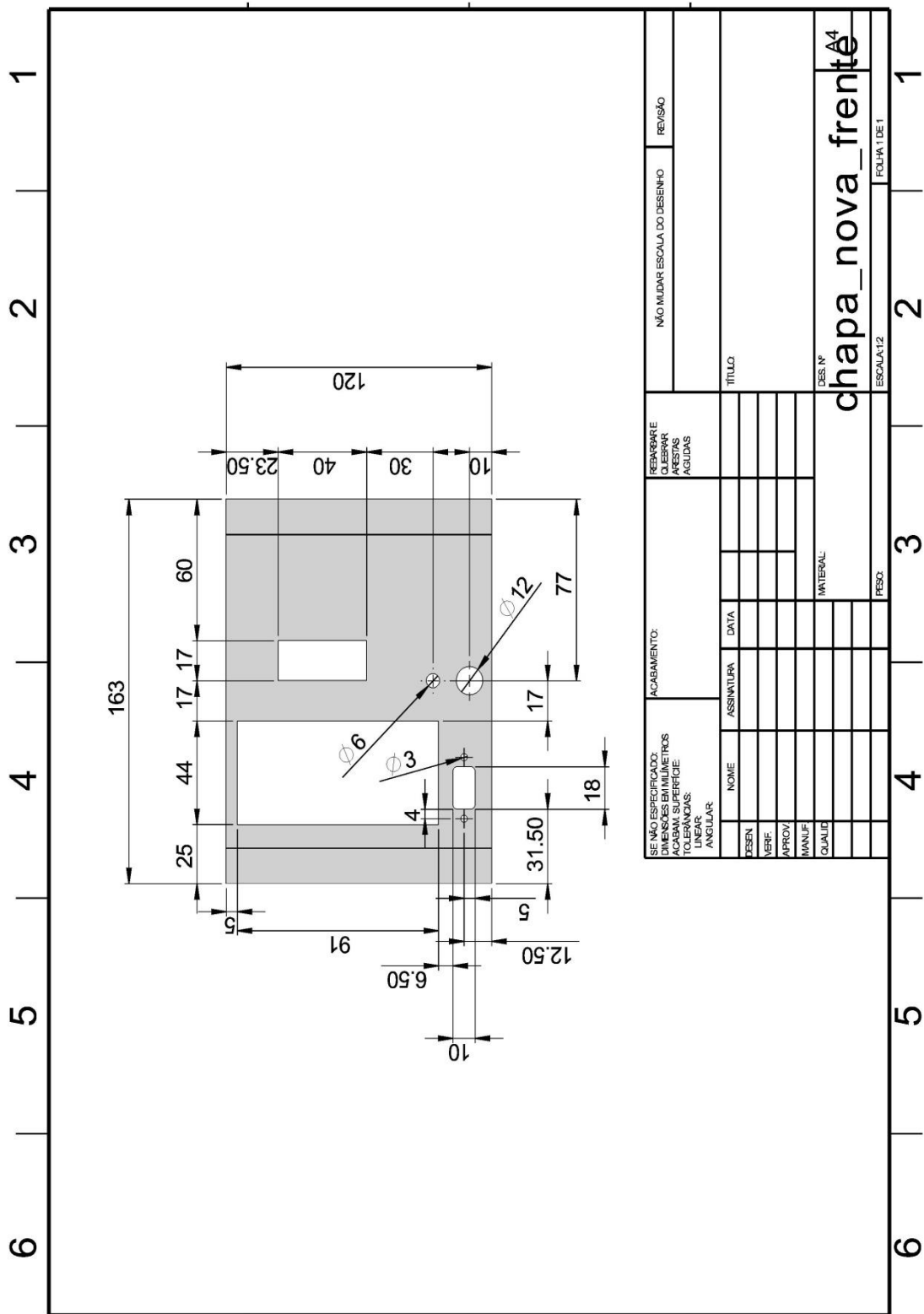


Figura 16 – Desenho técnico 2D da chapa frontal para a fixação do controlador, conector DB-9, fusível, chave de alavanca, e disjuntor.

FONTE: Produção do autor

APÊNDICE D

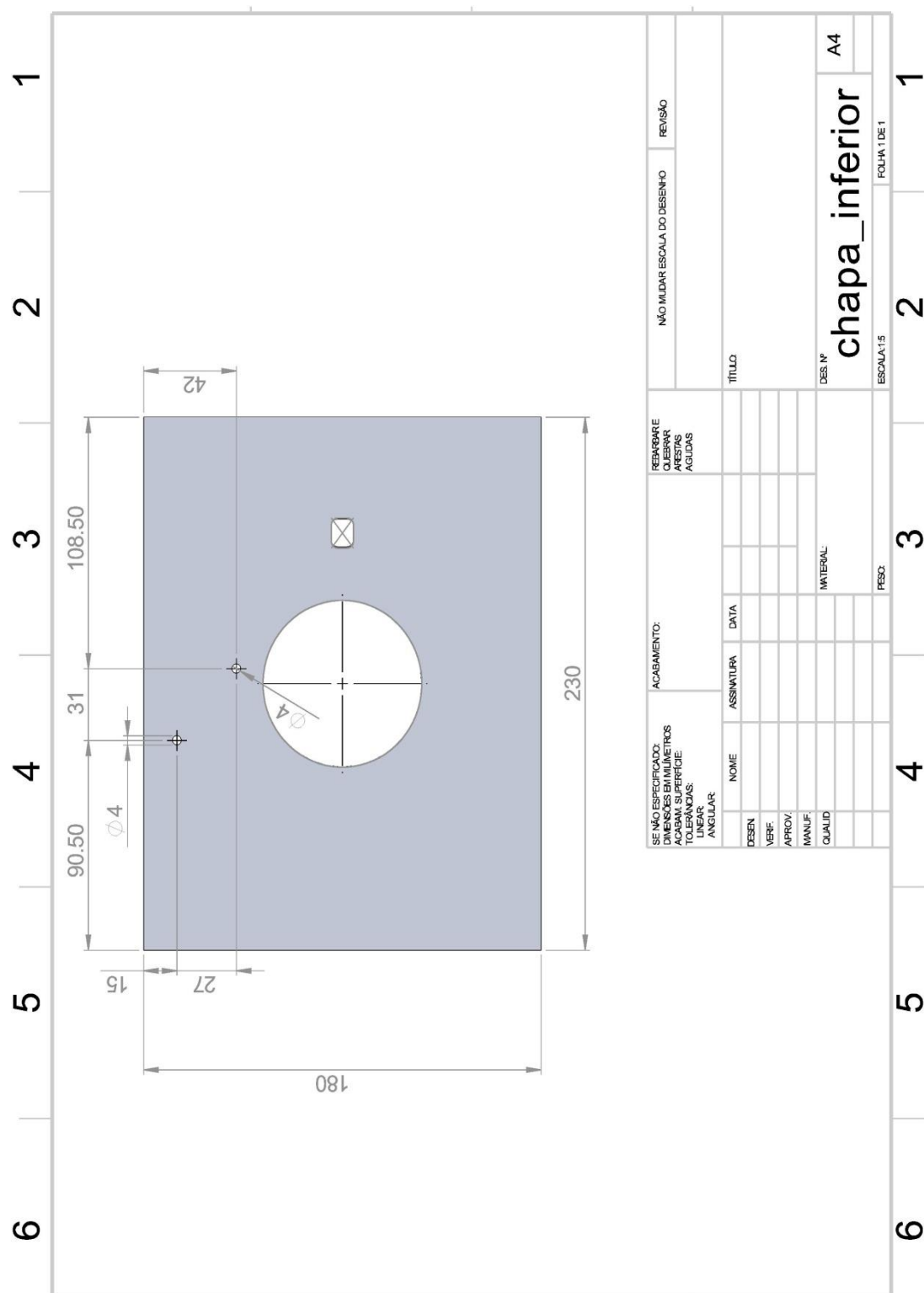


Figura 17 – Desenho técnico 2D da chapa inferior para a fixação do fusível DIAZED
 FONTE: Produção do autor

APÊNDICE E

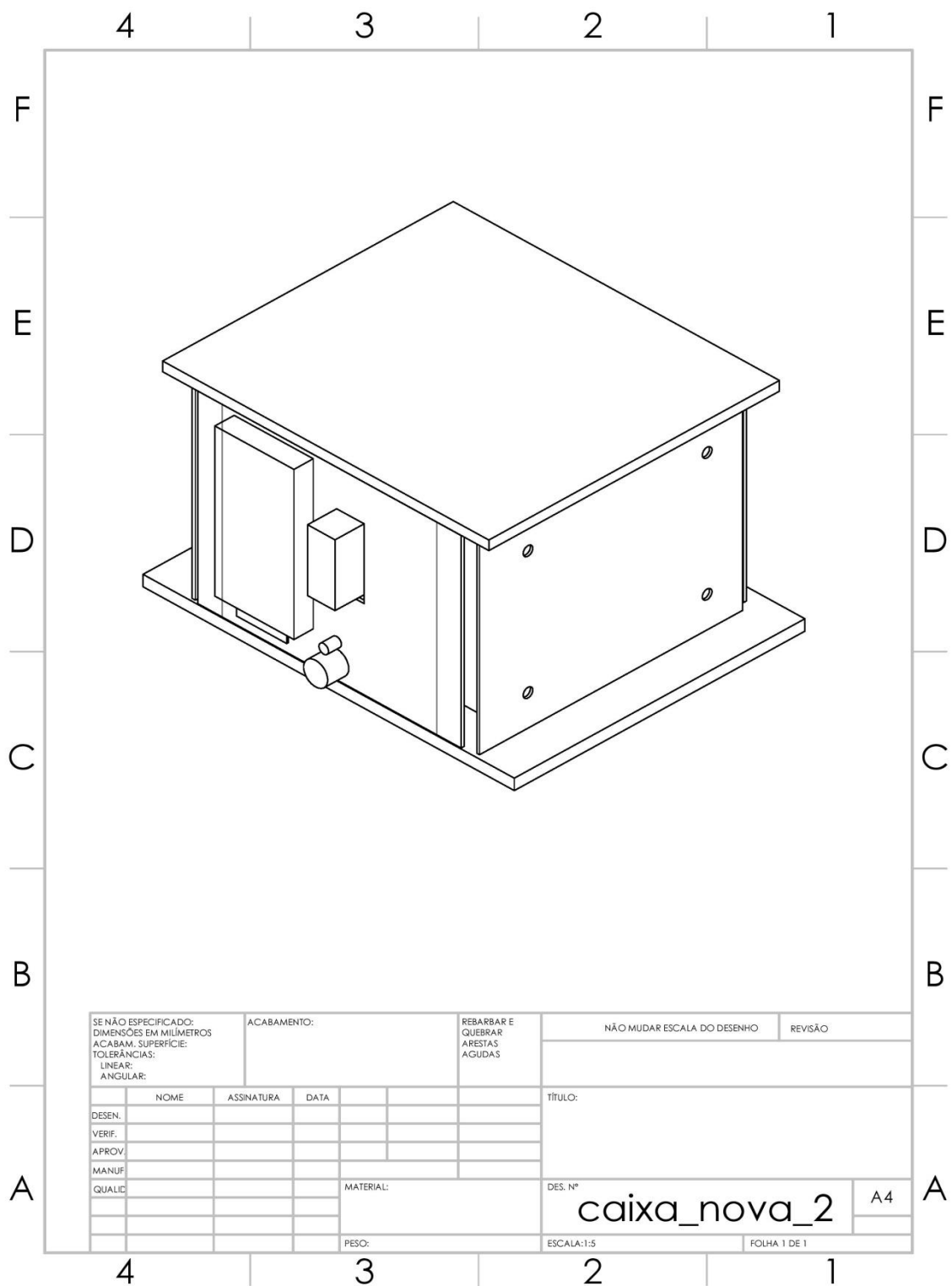


Figura 18 – Desenho técnico do módulo de potência completo.
FONTE: Produção do autor

APÊNDICE F

Especificações Técnicas

Icn	3 kA
Corrente Nominal	16
Tensão Máx. de Serviço "c.a"	440V
Tensão de Trabalho	230/400
Frequência	50/60HZ
Temperatura Ambiente	Limites: -20°C, +50°C
Curva de Disparo	B
Manobras Mecânicas	≥ 20.000
Manobras Elétricas	≥ 4.000
Grau de Proteção	IP 20
Secção de Condutores	1 a 25mm ²
Posição de Montagem	Sem restrição
Fixação	Encaixe perfil DIN 35mm

Figura 19 – Especificações técnicas do disjuntor B16 da Steck.