

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

FERNANDO LUIS BETZEK

**PROJETO E EXECUÇÃO DE UMA BANCADA PARA ESTUDOS COM  
GERAÇÃO ASSÍNCRONA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA  
2011

FERNANDO LUIS BETZEK

**PROJETO E EXECUÇÃO DE UMA BANCADA PARA ESTUDOS COM  
GERAÇÃO ASSÍNCRONA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial do Departamento Acadêmico de Manutenção Industrial – COMIN – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo.

Orientador: Prof. Esp. Giovano Mayer

MEDIANEIRA  
2011



## TERMO DE APROVAÇÃO

### Projeto e Execução de uma Bancada para Estudos com Geração Assíncrona

Por:

**Fernando Luis Betzek**

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 13:30 h do dia 02 de Dezembro de 2011 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo no Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Eletromecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Medianeira. O acadêmico foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Esp. Giovano Mayer  
UTFPR – *Campus* Medianeira  
(Orientador)

---

Prof. Me. Amauri Massochin  
UTFPR – *Campus* Medianeira  
(Convidado)

---

Prof. Dr. Marcos Fischborn  
UTFPR – *Campus* Medianeira  
(Convidado)

---

Prof. Esp. Giovano Mayer  
UTFPR – *Campus* Medianeira  
(Responsável pelas atividades de TCC)

**A Folha de Aprovação assinada encontra-se na coordenação do Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde, fé e força que têm me concedido para o término deste curso superior que é de grande importância em minha vida profissional.

À minha família, pelo apoio, incentivo e compreensão empregados durante o curso, assim como em todos os momentos da minha vida.

Agradeço ao professor orientador Giovano Mayer, pelo apoio, dedicação e orientação durante o desenvolvimento do projeto.

Agradeço à empresa Ninfa Indústria de Alimentos Ltda pelo espaço concedido para execução de grande parte do projeto.

À UTFPR – *Campus* Medianeira por fornecer o espaço e o material necessário.

Agradeço a todos os colegas, sejam de trabalho ou de estudo e que fazem parte da minha vida.

Agradeço a todos os professores da UTFPR – *Campus* Medianeira que de alguma maneira contribuíram para a realização do projeto.

## RESUMO

BETZEK, Fernando Luis. Projeto e Execução de uma Bancada para Estudos com Geração Assíncrona. 2011. 44f. Trabalho de Conclusão de Curso - Tecnologia em Manutenção Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2011.

O trabalho consiste no projeto e na execução de uma bancada para estudos com geração assíncrona. A bancada é composta por dois motores de indução com rotor em gaiola de esquilo acoplados eixo a eixo e apoiados em um suporte apropriado. Cada motor possui uma potência de 7,5 kW, o primeiro denominado MP é utilizado para emular via inversor de frequência uma máquina primária, como por exemplo, uma pequena turbina hidráulica ou eólica. O segundo motor é utilizado como gerador de indução (GI). Além do projeto mecânico e da sua execução, o trabalho mostra o projeto elétrico e a execução das ligações elétricas de cada motor tanto da parte de potência, quanto da parte de sinais, tais como sensores de temperatura PT100 e sensores de velocidade do tipo *encoder* TTL 5 V. Com o auxílio de uma régua de luz, foi realizado o alinhamento das máquinas e através do ensaio de vibração foi possível verificar que o conjunto apresenta uma vibração mecânica dentro das especificações impostas pela norma ISO 2372 e a bancada pode ser utilizada para o estudo de geradores assíncronos.

**Palavras-chave:** Máquina Assíncrona. Gerador de Indução. Ensaio de Vibração.

## ABSTRACT

BETZEK, Fernando Luis. Project and Execution of a Bench for Studies With Asynchronous Generation. 2011. 44f. Completion of Course Work - Electromechanical Maintenance Technology, Federal Technological University of Paraná. Medianeira, 2011.

The work consists of a project and execution of a bench for studies with asynchronous generation. The bench is composed by two induction motors with rotor in squirrel cage connected from axis to axis and sustained by an appropriate support. Each motor has a 7.5 kW power and one of them named MP will be used to emulate via frequency inverter a primary machine, such as a small hydraulic or aeolian turbine. The second motor will be used as induction generator (IG). Besides the mechanical project and its execution, the work presents the electrical project and the execution of the electrical connections of both the power and the signals of each motor, just like PT 100 temperature sensors and encoder TTL 5 V speed sensors. The alignment of the machines was carried out with the help of a light ruler, and by means of the vibration test it was possible to verify that the whole set presents a mechanical vibration which is in agreement with the specifications imposed by the rule ISO 2372 and the bench can be used for the study with asynchronous generators.

**Keywords:** Asynchronous machine. Induction generator. Vibration test.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ligação de um gerador de indução operando de forma isolada .....	11
Figura 2 - Curva característica de torque x escorregamento da máquina de indução .....	12
Figura 3 - Curva de saturação do gerador de indução .....	13
Figura 4 - Curva de magnetização, reatância capacitiva e processo de auto-excitação .....	14
Figura 5 - Circuito interno de um inversor de frequência .....	15
Figura 6 - Projeto mecânico inicial. ....	19
Figura 7 - Projeto Mecânico da estrutura. ....	20
Figura 8 - Projeto da tela de proteção. ....	20
Figura 9 - Peças cortadas e usinadas. ....	21
Figura 10 - Vista superior da base de sustentação. ....	22
Figura 11 - Vista inferior da bancada. ....	23
Figura 12 - Fuso para movimentação das máquinas. ....	23
Figura 13 - Proteção das partes giratórias. ....	24
Figura 14 - Rodas fixadas na base.....	24
Figura 15 - Montagem inicial. ....	25
Figura 16 - Peças pintadas.....	26
Figura 17 - Alinhamento utilizando régua de luz. ....	26
Figura 18 - Perspectiva Cavalera da chapa de montagem e da proteção.....	27
Figura 19 - Projeto da proteção de acrílico. ....	28
Figura 20 - Projeto da chapa de montagem. ....	28
Figura 21 - Chapa de montagem.....	29
Figura 22 - Ligações das bobinas e dos PT100 na caixa de ligação.....	29
Figura 23 - Detalhe do <i>Speral Tube</i> utilizado para acabamento. ....	30
Figura 24 - Bancada finalizada.....	30
Figura 25 - Montagem dos fusíveis e do inversor de frequência.....	31
Figura 26 - Pontos de medição da vibração .....	33
Figura 27 - Pontos de medição da vibração nas máquinas.....	34
Figura 28 - Valores médios das vibrações da MP em função da variação da frequência.....	35
Figura 29 - Valores médios das vibrações do GI em função da variação da frequência.....	36
Figura 30 - Valores médios das vibrações da MP em função da variação da frequência.....	37
Figura 31 - Valores médios das vibrações do GI em função da variação da frequência.....	38
Figura 32 - Primeira medição no ponto axial dianteiro da MP. ....	38
Figura 33 - Segunda medição no ponto axial dianteiro da MP. ....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características técnicas do inversor de frequência .....	15
Tabela 2 - Relação das medidas e materiais utilizados .....	17
Tabela 3 - Dados técnicos dos motores .....	18
Tabela 4 - Limites de vibração em motores (mm/s) .....	32
Tabela 5 - Velocidades das vibrações do primeiro ensaio da MP em mm/s .....	34
Tabela 6 - Velocidades das vibrações do primeiro ensaio do gerador em mm/s .....	35
Tabela 7 - Velocidades das vibrações do segundo ensaio da MP em mm/s .....	36
Tabela 8 - Velocidades das vibrações do segundo ensaio do gerador em mm/s.....	37

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Ampéres
CV	Cavalo-vapor
GI	Gerador de indução
GIAE	Gerador de indução auto-excitado
Hz	Hertz
kg	Quilogramas
kW	Quilowatts
mm	Milímetros
mm <sup>2</sup>	Milímetros quadrado
mm/s	Milímetros por segundo
MP	Máquina primária
pol.	Polegada
rpm	Rotações por minuto
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
V	Volts
°C	Graus Celsius

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	11
2.1 GERADOR DE INDUÇÃO .....	11
2.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA .....	14
<b>3 AQUISIÇÃO DO MATERIAL</b> .....	17
<b>4 PROJETO E EXECUÇÃO</b> .....	19
4.1 PROJETO E EXECUÇÃO MECÂNICA .....	19
4.2 PROJETO E EXECUÇÃO ELÉTRICA.....	27
<b>5 ENSAIO DE VIBRAÇÃO</b> .....	32
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	40
REFERÊNCIAS.....	41
<b>APÊNDICE A – CONFIGURAÇÕES BÁSICAS DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA ATV312HU75M3</b> .....	43
<b>ANEXO A – Detalhes e medidas dos motores</b> .....	44

## 1 INTRODUÇÃO

O gerador de indução é muito aplicado em sistemas alternativos de geração de energia como, por exemplo, em pequenas centrais hidráulicas ou eólicas. Além de robusto, o gerador de indução (GI) caracteriza-se pelo baixo custo, simples manutenção e facilidade de substituição do gerador.

O projeto consiste inicialmente no dimensionamento e na execução de uma base para apoiar dois motores de indução com rotor em gaiola de esquilo com uma potência de 7,5 kW (10 CV) cada, tensão em 220, 380, 440 ou 760 V. Segundo o projeto, os motores foram ligados mecanicamente eixo a eixo, sendo que um deles será utilizado para emular uma máquina primária (MP) e o segundo será utilizado como gerador de indução (GI). A estrutura que suporta tais máquinas possui rasgos que servem para fazer o alinhamento e evitar que vibrações mecânicas ocorram, o que pode causar sérios danos aos equipamentos.

Além da montagem mecânica, foi realizado o ensaio de vibrações mecânicas, que é um método indispensável na detecção prematura de anomalias de operação em virtude de problemas, tais como falta de balanceamento das partes rotativas, desalinhamento de juntas e rolamentos, excentricidade e folgas. O ensaio de vibração foi realizado com o Medidor de Vibração Digital da Instrutherm, modelo MV-690.

Para o acesso aos terminais de potência do motor e aos terminais dos sensores de temperatura e velocidade, foi projetada uma chapa de montagem para cada máquina.

Após a montagem da estrutura dos motores, que também conta com um suporte provisório que acondiciona o inversor de frequência, foram estudados e ajustados seus parâmetros para realizar as funções requeridas. O inversor utilizado é o da Schneider Electric (ATV312HU75M3), que possui uma entrada analógica e que será futuramente utilizada para o controle da velocidade com o auxílio dos sinais provenientes do *encoder* (sensor de velocidade presente em cada máquina). O inversor foi usado para o acionamento e controle da velocidade da máquina primária (MP) sendo ajustado manualmente e de forma gradual até que atingisse a rotação de 1900 rpm. Tal metodologia foi utilizada para a realização dos ensaios de vibração.

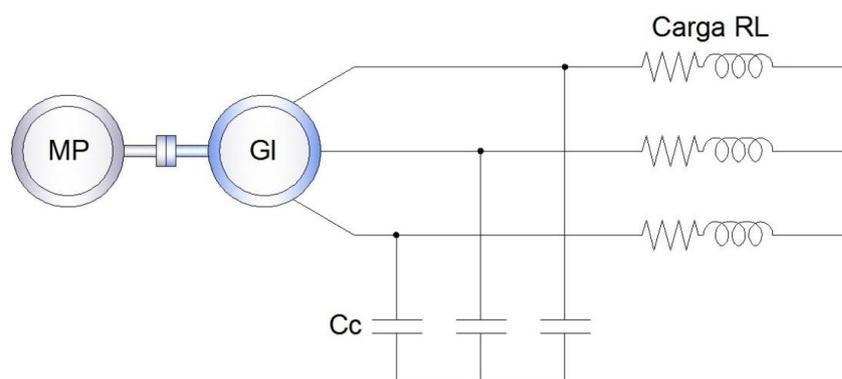
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os itens abaixo mencionam as principais características do GI e do inversor de frequência.

### 2.1 GERADOR DE INDUÇÃO

Segundo TRAPP, Jordan Gustavo (2008, p. 1), por apresentar características bastante satisfatórias, o GI é muito aplicado em sistemas alternativos de geração de energia devido ao seu baixo custo, facilidade de substituição do gerador, disponibilidade, manutenção reduzida, robustez e bom comportamento dinâmico.

Segundo MAYER, Giovano, (2010, p. 47), o gerador de indução quando conectado a uma rede de distribuição consome reativos necessário para iniciar o processo de auto-excitação, mas em operação isolada necessita de capacitores ligados em paralelo aos terminais do estator da máquina para iniciar este processo. A figura 1 mostra a ligação de um gerador de indução operando de forma isolada com carga RL e os capacitores de auto-excitação  $C_c$ .



**Figura 1 - Ligação de um gerador de indução operando de forma isolada**  
 Fonte: MAYER, G. (2010, p. 47).

A máquina, quando trabalhando como motor apresenta um escorregamento positivo, logo o torque também é positivo como pode ser verificado na sua curva característica no gráfico da figura 2. No lado esquerdo do eixo y, o escorregamento

é negativo, logo o torque também é negativo e o motor, tendo capacitores ligados em paralelo (para sua auto-excitação), passa a funcionar como gerador.

A equação 1 mostra a diferença entre as velocidades dos eixos de estator e rotor (escorregamento):

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}, \quad (1)$$

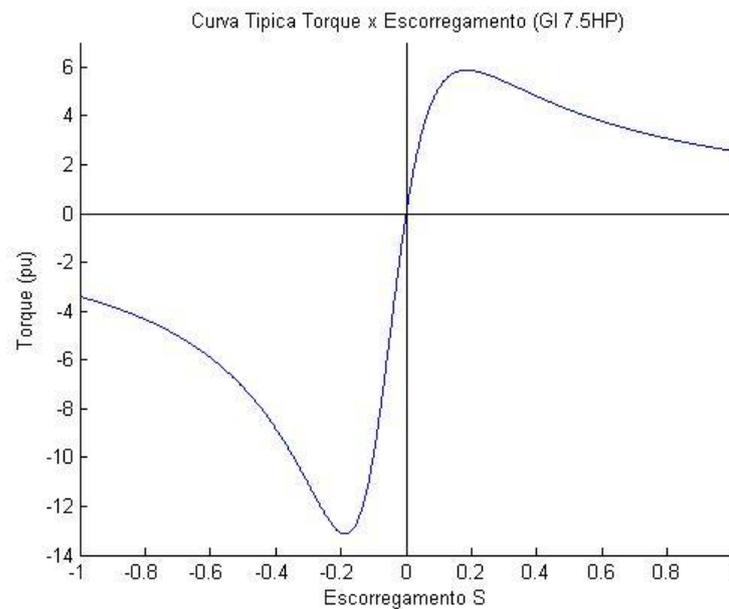
Onde:

$s$  = Escorregamento

$\omega_s$  = Velocidade síncrona do campo eletromagnético [rad/s]

$\omega_r$  = Velocidade do rotor [rad/s]

O gráfico da figura 2 mostra a curva característica de uma máquina assíncrona.

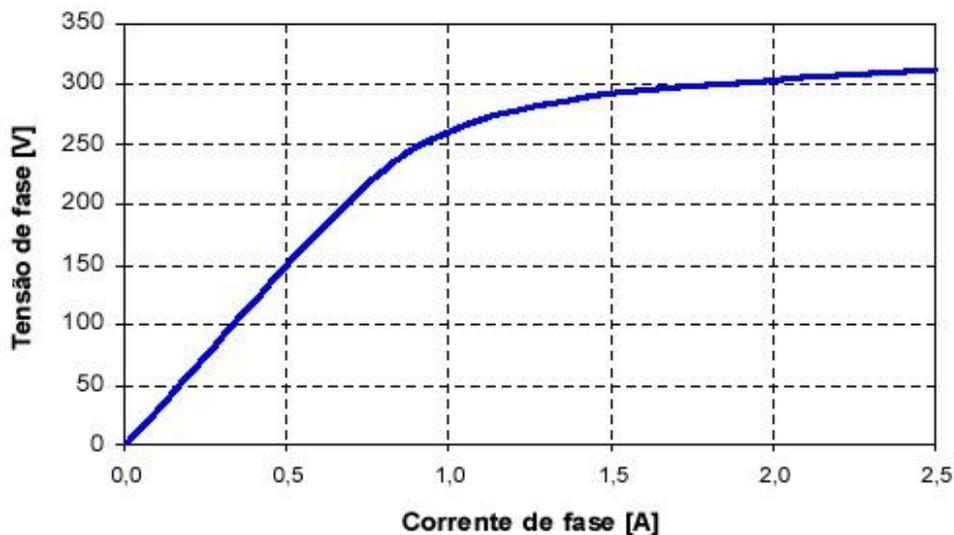


**Figura 2 - Curva característica de torque x escorregamento da máquina de indução**  
 Fonte: MAYER, G. (2010, p. 47).

Segundo TRAPP, Jordan Gustavo (2008, p. 1), quando ligado à rede o Gerador de Indução Auto-Excitado (GIAE) mesmo com velocidade variável, é capaz de gerar tensões trifásicas com frequência constante, além de exercer a capacidade de auto-proteção.

Para TRAPP, Jordan Gustavo (2008, p. 1) e ROCHA, Marcello Soares (2005, p. 1), para compensar os reativos de cargas indutivas conectadas nos terminais do GI, é necessário o uso de mecanismos de controle para regulação de tensão e frequência, uma vez que, acionado com velocidade variável ou atuando isolado da rede elétrica com a carga, a frequência é variável e a regulação de tensão é insatisfatória.

“Como a impedância do ramo de magnetização varia com a frequência, tem-se uma curva de saturação para cada frequência de operação do GI.” (JORDAN GUSTAVO TRAPP, 2008, p. 18). O gráfico da figura 3 mostra uma curva de saturação de um motor de indução trifásico de 380 V e 2,3 A ligado em estrela, 60 Hz e 1 kW de potência.



**Figura 3 - Curva de saturação do gerador de indução**  
 Fonte: TRAPP, J. G, (2008, p. 18).

Segundo TRAPP, Jordan Gustavo (2008) a reatância de um capacitor é representada no gráfico por uma reta linear. Quando um capacitor é conectado nos terminais do GI, a reta que representa a reatância capacitiva cruza com a curva de

magnetização em um determinado ponto, determinando o momento em que o GI passará a gerar energia elétrica.

O processo de auto-excitação ocorre quando é conectado um capacitor de valor adequado nos terminais do gerador, que ao ser acionado com uma rotação adequada, aplica sua tensão residual ao capacitor. Num processo de ressonância, o capacitor devolve essa tensão ao GI. Como o GI continua com uma tensão residual devido à ação da máquina primária, a tensão nos seus terminais sofre um acréscimo pela soma de duas tensões em fase, iniciando a auto-excitação. No próximo ciclo, o gerador aplica uma tensão ainda maior ao capacitor e este devolve esta tensão ao gerador, no mesmo processo de ressonância. A tensão aumenta até atingir o ponto de operação definido pelo ponto de encontro da curva de saturação com a reta da reatância do capacitor. (JORDAN GUSTAVO TRAPP, 2008, p. 18).

O gráfico da figura 4 mostra o cruzamento entre a curva de magnetização da máquina e a reatância capacitiva e o momento em que o GI passa a funcionar como gerador.

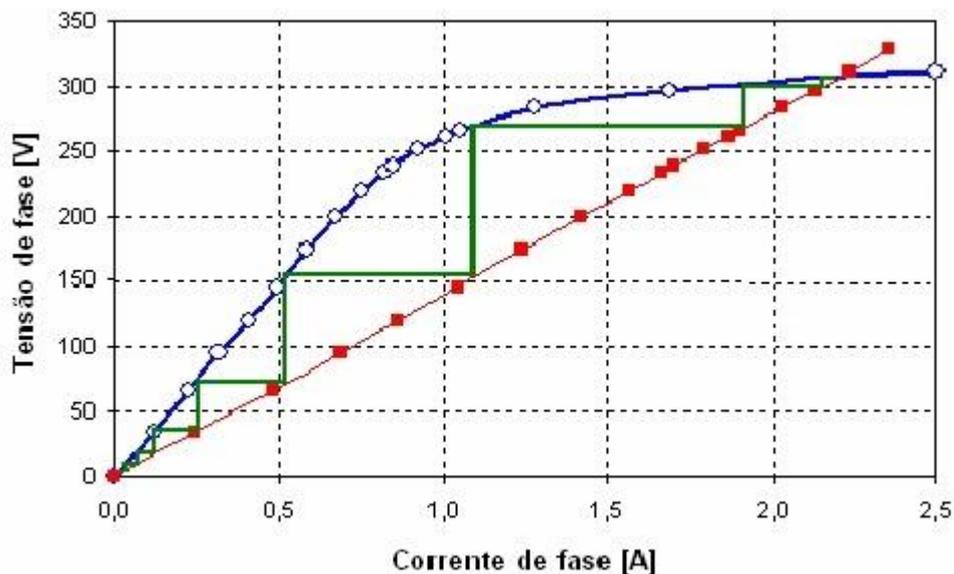


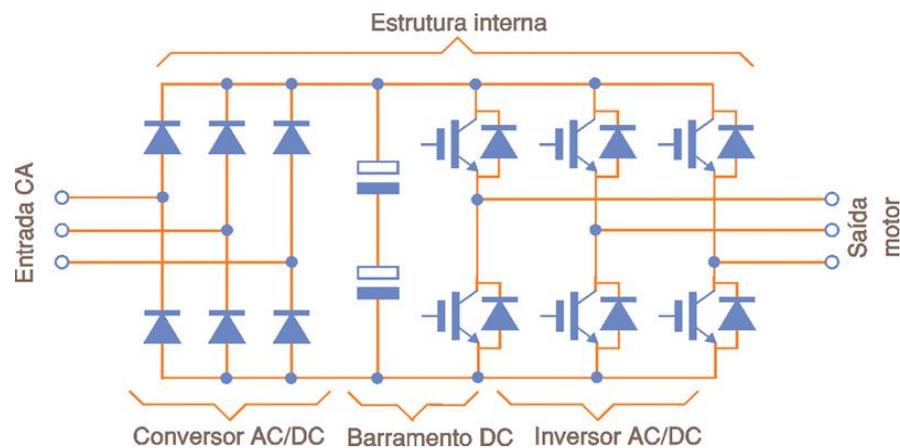
Figura 4 - Curva de magnetização, reatância capacitiva e processo de auto-excitação  
Fonte: TRAPP, J. G, (2008, p. 18).

## 2.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Inversores de frequência são dispositivos eletrônicos que convertem a tensão da rede alternada (CA) em tensão contínua (CC) e por fim convertendo novamente esta última em uma tensão (CA) de amplitude e frequência variáveis. Tem como

principal finalidade controlar a velocidade de motores de indução. Dentre as várias vantagens do uso do inversor, destacam-se: controle de torque, controle da rotação dos motores, substituição dos sistemas de variação de velocidades mecânicos e atuam como dispositivo de proteção. (FRANCHI, Clairton Moro, 2007, p. 198).

Os inversores são divididos em três seções, sendo a primeira de retificação de entrada, a segunda para o tipo de controle do circuito intermediário e a terceira para a saída. Os tiristores retificadores situados no circuito de entrada do inversor, retificam a tensão trifásica da rede de entrada CA. A tensão DC resultante é filtrada pelo capacitor sendo novamente convertida em trifásica AC na seção inversora. Os transistores chaveiam várias vezes por ciclo, gerando pulsos com largura variável senoidalmente. (FRANCHI, Clairton Moro, 2007). A figura 5 mostra o desenho simplificado do circuito interno de um inversor.



**Figura 5 - Circuito interno de um inversor de frequência**  
 Fonte: <http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/203>.

A tabela 1 mostra as características técnicas do inversor utilizado no ensaio de vibração mecânica.

Tabela 1 - Características técnicas do inversor de frequência  
 (continua)

Corrente	33 A
Potência motor (CV)	7,5 kW (10 CV)

(conclusão)

---

---

Temperatura de operação	-10 °C a 50 °C
Tensão de entrada	208/240 Vac
Fase de entrada	3 Fases
Fase de saída	3 Fases
Frequência	000-500 Hz

---

Fonte: <http://elcodis.com/parts/5441120/ATV312HU75M3.html>

### 3 AQUISIÇÃO DO MATERIAL

A tabela 2 mostra a relação dos materiais utilizados na execução do projeto bem como suas dimensões e quantidades.

Tabela 2 - Relação das medidas e materiais utilizados

(continua)

Peças	Quant.	Diâm.	Larg.	Espes.	Alt.	Comp.
Viga tipo "U"	-----	-----	66 mm	6 mm	80 mm	3000 mm
Barra chata	-----	-----	1" pol.	3/8" pol.	-----	2000 mm
Barra chata	-----	-----	2" pol.	3/8" pol.	-----	1000 mm
Barra chata	-----	-----	3" pol.	1/2" pol.	-----	2000 mm
Barra roscada	-----	22 mm	-----	-----	-----	1000 mm
Barra roscada	-----	1/4" pol.	-----	-----	-----	700 mm
Chapa de aço	2	-----	220 mm	3 mm	145 mm	-----
Chapa de aço	2	-----	135 mm	2 mm	135 mm	-----
Tela perfurada	1	-----	135 mm	2 mm	515 mm	-----
Acoplamento	1	94 mm	-----	-----	-----	-----
Motor 10cv	2	-----	-----	-----	-----	-----
Olhal	3	12 mm	-----	-----	-----	-----
Prensa cabo	4	3/4" pol.	-----	-----	-----	-----
Prensa cabo	4	1" pol.	-----	-----	-----	-----
Bornes de Ligação	12	-----	-----	-----	-----	-----
Cabo flexível	-----	2,5 mm <sup>2</sup>	-----	-----	-----	20000 mm
Cabo flexível	-----	1 mm <sup>2</sup>	-----	-----	-----	10000 mm
<i>Speral Tube</i>	-----	-----	-----	-----	-----	3500 mm
Rodízios Giratórios	2	3" pol.	-----	-----	100 mm	-----
Rodízios Fixos	2	3" pol.	-----	-----	100 mm	-----
Anel elástico	4	13	-----	-----	-----	-----
Bucha de bronze	2	35	-----	-----	-----	-----

Tabela 2 - Relação das medidas e materiais utilizados

(conclusão)

Peças	Quant.	Diâm.	Larg.	Espes.	Alt.	Comp.
Chapa acrílico	2	-----	220 mm	5 mm	130 mm	-----
Inversor de frequência	1	-----	-----	-----	-----	-----
Fusíveis	3	-----	-----	-----	-----	-----
Parafusos	36	-----	-----	-----	-----	-----
Arruelas	32	-----	-----	-----	-----	-----
Porcas	24	-----	-----	-----	-----	-----

A tabela 3 mostra os dados técnicos das máquinas utilizadas.

Tabela 3 - Dados técnicos dos motores

Tensão (V)	Frequência (Hz)	Corrente (A)	Potência (kW/CV)	Fator de potência (cos $\phi$ )	Rotações por minuto (rpm)	Rendimento (%)	Corrente de partida (Ip)
220	60	24,4	7,5/10	0,84	1770	89,5	8,5
380	60	14,1	7,5/10	0,84	1770	89,5	8,5
440	60	12,2	7,5/10	0,84	1770	89,5	8,5

## 4 PROJETO E EXECUÇÃO

Com a fundamentação da idéia inicial e a definição dos materiais a serem utilizados no trabalho, começou-se a etapa de projetos e dimensionamento. Nesta etapa, foi definido o leiaute da bancada, chapas de montagem e proteções a serem feitas.

### 4.1 PROJETO E EXECUÇÃO MECÂNICA

A figura 6 mostra o projeto mecânico inicial para a estrutura da base da bancada.



Figura 6 - Projeto mecânico inicial.

O projeto inicial sofreu pequenas alterações no painel de ligação tanto da parte de potência, quanto de sinal (sensores de temperatura e *encoder*). Tal alteração foi realizada, pois com a configuração da figura 6 as ligações da potência e dos sinais não ficariam funcionais.

As figuras 7 e 8 mostram o projeto mecânico executado.

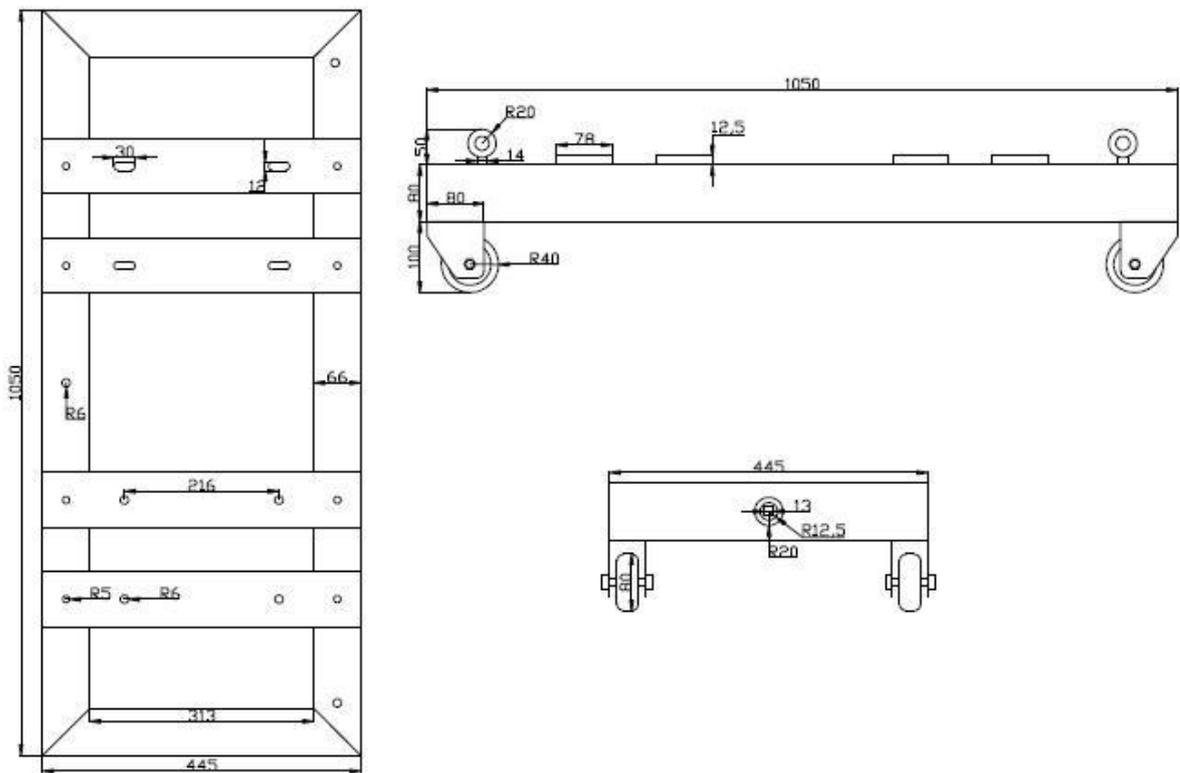


Figura 7 - Projeto Mecânico da estrutura.

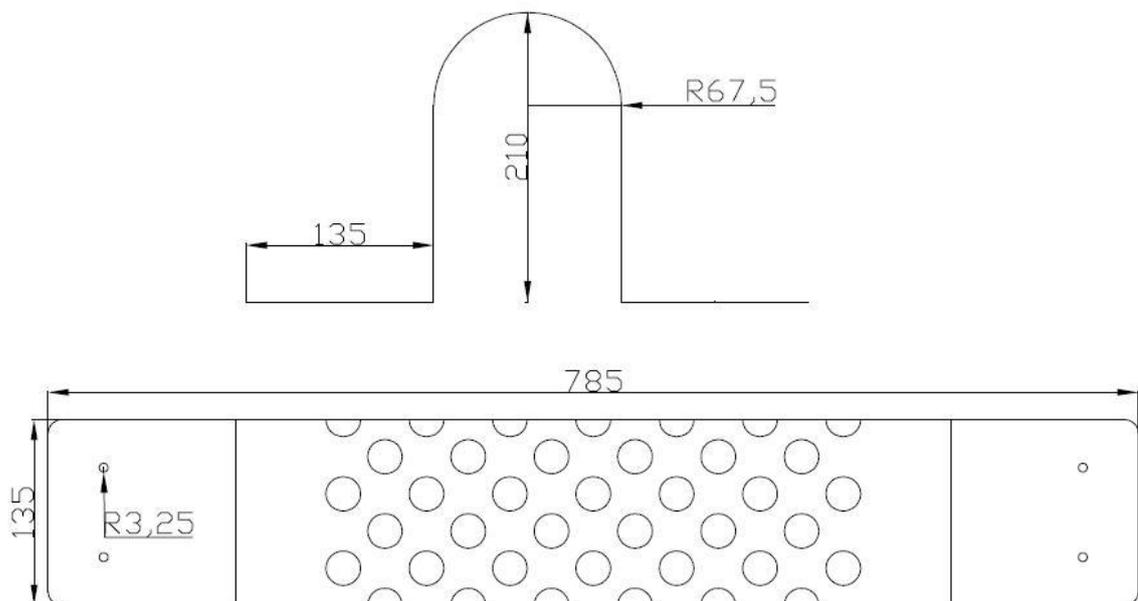


Figura 8 - Projeto da tela de proteção.

Com o projeto mecânico finalizado e o material necessário já adquirido, iniciou-se então o processo de confecção da base, que foi construída com estrutura

reforçada para evitar possíveis vibrações mecânicas originadas da máquina primária e do gerador.

A confecção inicial das peças teve início com o corte dos materiais com o auxílio de uma policorte. Inicialmente foram cortadas duas peças de 1050 mm de comprimento do tipo viga “U” de 80x66x6 mm, com um ângulo de 45° nas suas extremidades e logo após, outras duas peças de 445 mm de comprimento também com 45° em suas extremidades.

Posteriormente as peças cortadas foram usinadas com o auxílio de uma máquina fresadora. Os rasgos nas vigas foram abertos peça a peça antes de serem soldadas. Com os detalhes do projeto e as medidas detalhadas dos motores a serem utilizados conforme mostra o Anexo A, foram definidas as localizações exatas dos lugares a serem fresados, resultando em quatro rasgos de 10x30 mm em cada viga. Essas peças referem-se à figura 7 do projeto e podem ser verificadas na figura 9.



**Figura 9 - Peças cortadas e usinadas.**

Terminada a etapa de usinagem, as extremidades das peças foram escareadas com a ajuda de uma lixadeira angular elétrica. Logo após as mesmas foram fixadas em uma superfície, esquadrejadas e soldadas, formando o quadro estrutural da base.

Para fazer a base de sustentação dos motores, foi utilizado uma barra chata de 3"x1/2". A mesma foi cortada em quatro partes iguais de 437 mm e como um dos motores foi definida fixo no projeto, duas destas peças foram apenas furadas (furos de 12 mm) para acoplar o motor que faz o papel da MP. As outras duas peças que compõem a base de sustentação do GI foram fresadas e abertos dois rasgos de 12x35 mm para o posterior alinhamento desta máquina. Nas extremidades de todas as peças de sustentação, foram feitos furos de 10 mm de diâmetro utilizados para fixação na base. A figura 10 mostra a base soldada e as quatro peças de sustentação das máquinas.



**Figura 10 - Vista superior da base de sustentação.**

As bases de sustentação foram ainda reforçadas com barras chatas de 1"x3/8" que foram cortadas em seis partes de 312 mm. Tais peças foram utilizadas também, além de servirem como reforço, para auxiliar no alinhamento dos dois motores.

Duas peças com 312 mm de comprimento foram cortadas da barra chata de 2"x3/8", furadas no centro e soldado uma bucha com rosca de 22 mm de diâmetro. Tais barras foram soldadas nas duas bases laterais, a fim de mover o conjunto horizontalmente para frente e para trás através de uma barra roscada de 22 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento, usinada no torno mecânico e fresadas nas pontas ficando com 13x13 mm. Para evitar o contato entre a parte posterior da

bancada e a barra roscada, foram confeccionadas duas buchas de bronze que podem ser verificadas nas figuras 11 e 12.

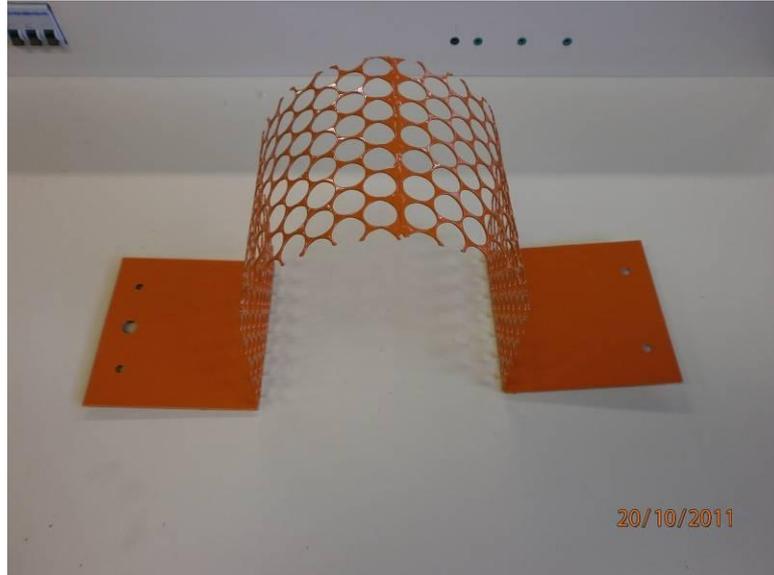


**Figura 11 - Vista inferior da bancada.**



**Figura 12 - Fuso para movimentação das máquinas.**

Para proteção das partes giratórias que são os eixos da máquina primária e do gerador unidos por um acoplamento de 94 mm de diâmetro, optou-se em fazer uma proteção com tela perfurada de 135x515x2 mm possibilitando a visualização da rotação das máquinas. A figura 13 mostra a execução da tela de proteção que se refere à figura 8 do projeto.



**Figura 13 - Proteção das partes giratórias.**

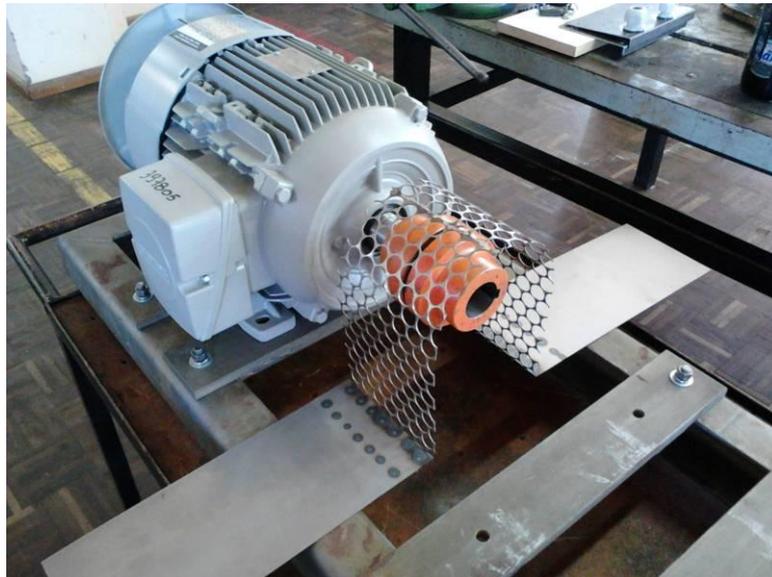
Por se tratar de uma bancada para estudos, a mobilidade da mesma é constante e para isso foram utilizadas quatro rodas presas diretamente no quadro da base, sendo duas rodas fixas e duas giratórias. As rodas possuem dimensão de 3" pol. com capacidade de carga de 38 kg cada, dimensionadas para suportar o peso total do conjunto que é de aproximadamente 140 kg. A figura 14 mostra as rodas fixas na base.



**Figura 14 - Rodas fixadas na base.**

Para uma possível elevação de todo o conjunto foram colocados três olhais de 12 mm de diâmetro com capacidade de elevação de 340 kg cada.

Com o término da execução de toda a base, a mesma foi montada para a verificação de como ficariam os acoplamentos entre as bases dos motores e a base projetada e o acoplamento dos eixos das máquinas. A figura 15 mostra a montagem inicial das máquinas sobre a bancada.



**Figura 15 - Montagem inicial.**

Uma vez que as montagens mecânicas ficaram de acordo com o projeto, a bancada foi desmontada e as peças passaram por um processo de limpeza e pintura eletrostática a pó. A figura 16 mostra as peças pintadas.

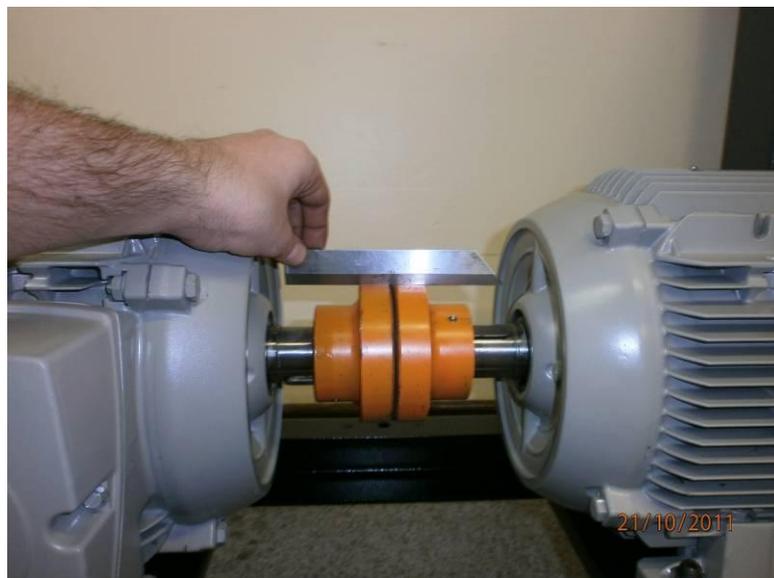
Com a bancada pintada e a tinta totalmente curada, iniciou-se a etapa de montagem do projeto. Neste processo surgiram alguns contra-tempos, tais como o enforcamento das partes móveis como as travessas da base do motor e alguns parafusos que não passavam pelos furos, tudo devido a tinta recebida, porém tais problemas foram resolvidos com facilidade.

Os dois motores foram acomodados nas respectivas bases e presos com parafusos de 12 mm e seus eixos foram unidos com acoplamento de 94 mm de diâmetro.



**Figura 16 - Peças pintadas.**

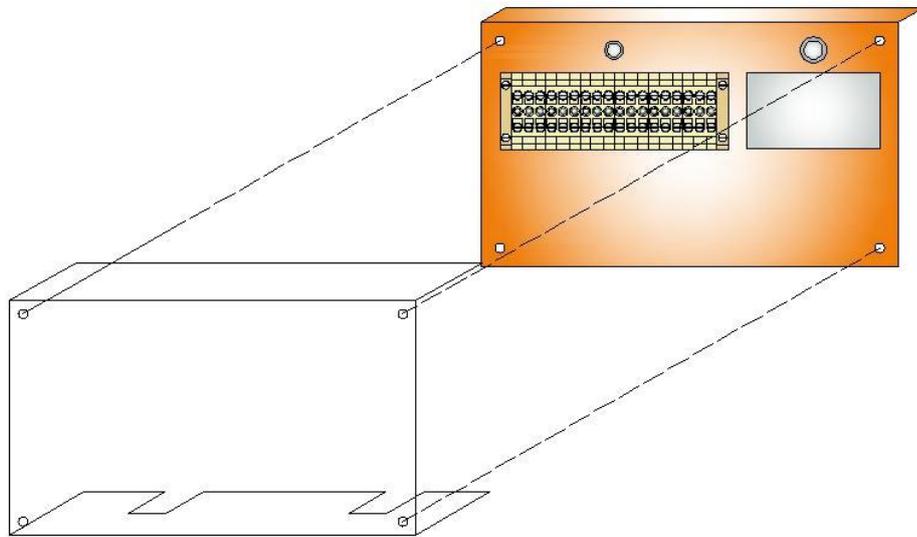
Em seguida foi realizado o alinhamento das máquinas com o auxílio de uma régua de luz como mostra a figura 17. Depois de alinhadas, a conexão dos eixos foi protegida com a placa de proteção de acoplamento (figura 13).



**Figura 17 - Alinhamento utilizando régua de luz.**

## 4.2 PROJETO E EXECUÇÃO ELÉTRICA

Para que fosse possível um melhor acesso aos terminais das máquinas, tanto dos terminais de potência, quanto aos terminais dos sensores PT100 e dos *encoders*, foi projetada uma chapa de montagem (diferente da concepção inicial do projeto visto na figura 6). A figura 18 mostra a chapa de montagem e uma tampa de acrílico utilizada para evitar o contato acidental dos bornes de ligação.



**Figura 18 - Perspectiva Cavalera da chapa de montagem e da proteção.**

As figuras 19 e 20 mostram os detalhes do projeto da chapa de montagem e da tampa de acrílico.

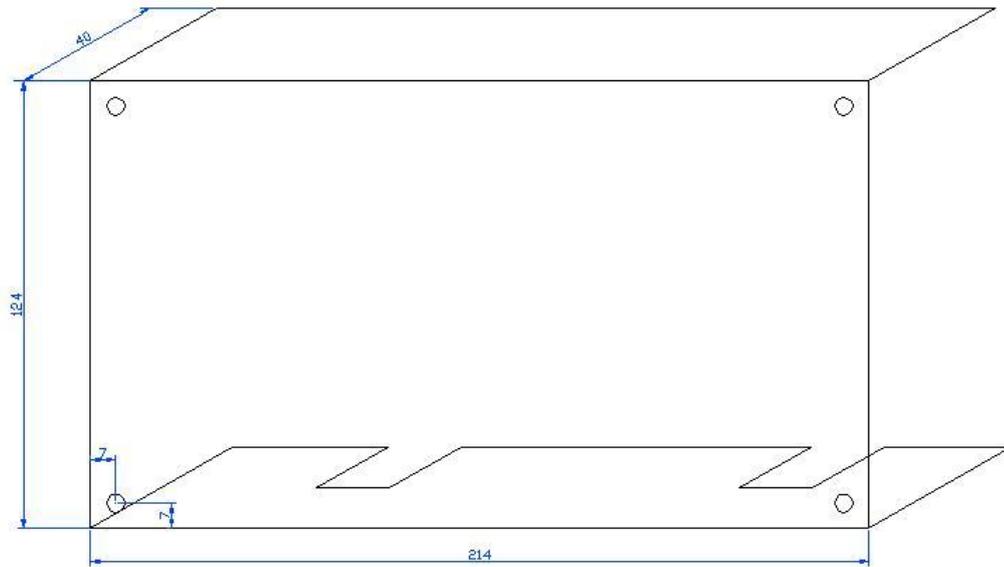


Figura 19 - Projeto da proteção de acrílico.

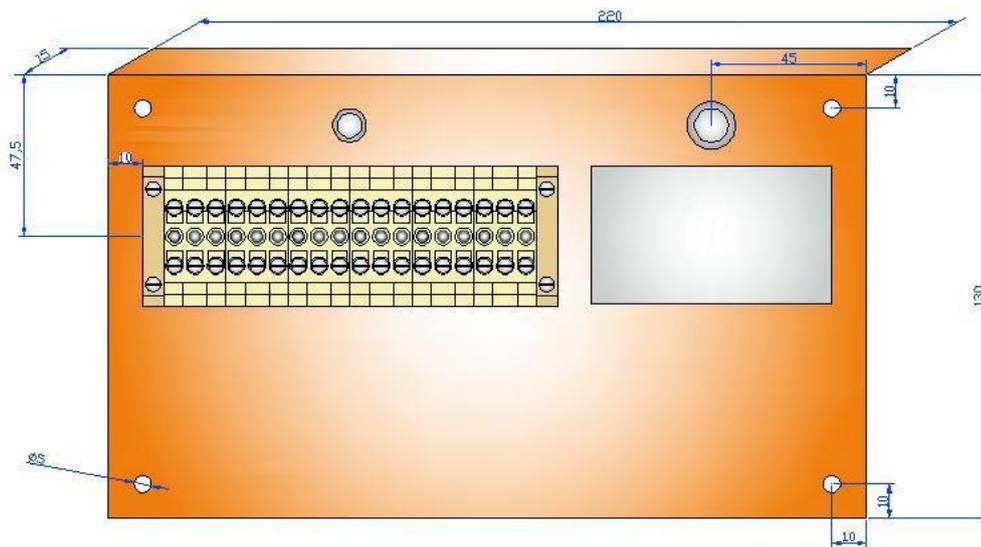


Figura 20 - Projeto da chapa de montagem.

A execução da chapa de montagem foi realizada com duas chapas de 220x145x3 mm, as quais foram dobradas uma borda de 15 mm para reforço, ficando a face com 220 mm de largura por 130 mm de altura. Foram executados dois furos, um de 22 mm e outro de 27 mm, os quais foram preenchidos com prensa cabos de 3/4" pol. e 1" pol. respectivamente. Na mesma chapa, foi fixado uma régua com seis bornes do tipo SAK de 2,5 mm<sup>2</sup> para ligação dos sinais do *encoder* e dos PT100 e um bloco de ligação para alimentação das máquinas.

A figura 21 mostra as chapas de montagem executadas.



Figura 21 - Chapa de montagem.

Para fazer a ligação das bobinas e dos PT100 dos motores até o quadro de bornes, foram utilizados cabos flexíveis de 2,5 mm<sup>2</sup> e 1 mm<sup>2</sup>. Ambos acomodados separadamente em tubo espiral. A figura 22 mostra o processo de ligações das bobinas e dos sinais dos PT100 dentro da caixa de ligação de uma das máquinas.



Figura 22 - Ligações das bobinas e dos PT100 na caixa de ligação.

O detalhe mostrado na figura 23 refere-se à utilização de *spiral tube* para dar acabamento elétrico no chicote das ligações de potência e sinal.



Figura 23 - Detalhe do *Seral Tube* utilizado para acabamento.



Figura 24 - Bancada finalizada.

O inversor de frequência e os fusíveis de proteção foram montados de forma provisória para realização do ensaio de vibração. Tal montagem pode ser vista na figura 25.



**Figura 25 - Montagem dos fusíveis e do inversor de frequência.**

Para a proteção do inversor, foram utilizados fusíveis ultra rápidos do tipo *Sitor*, com corrente nominal de 63 A (aproximadamente 2,5 vezes a corrente nominal). O circuito de alimentação do inversor e de ligação da MP foi montado com condutores flexíveis de 10 mm<sup>2</sup>, com capacidade de corrente de 50 A.

## 5 ENSAIO DE VIBRAÇÃO

O ensaio para vibrações mecânicas é um método indispensável na detecção prematura de anomalias de operação em virtude de problemas, tais como desbalanceamento das partes rotativas, desalinhamento de juntas, rolamentos e polias, excentricidade, interferência, erosão localizada, abrasão, ressonância e folgas, sendo destas, 80% dos problemas de vibração em máquinas originadas do desbalanceamento, seguido pelo desalinhamento. (ABENDE)

O ensaio de vibração proporciona uma grande confiabilidade na operação de instalações e na possibilidade de intervenção de uma máquina antes do agravamento de algum problema para substituição de peças desgastadas ou alinhamento.

Toda máquina rotativa (motor, bomba, ventilador, etc.) apresenta um determinado nível de vibração quando está em operação. Para determinar se um equipamento está dentro dos limites de vibração, deve-se fazer as medições e comparar o valor medido com os valores definidos em norma. A Norma ISO 2372 propõe limites de severidade de vibração classificando os equipamentos de acordo com suas características. Tais limites podem ser verificados na tabela 4.

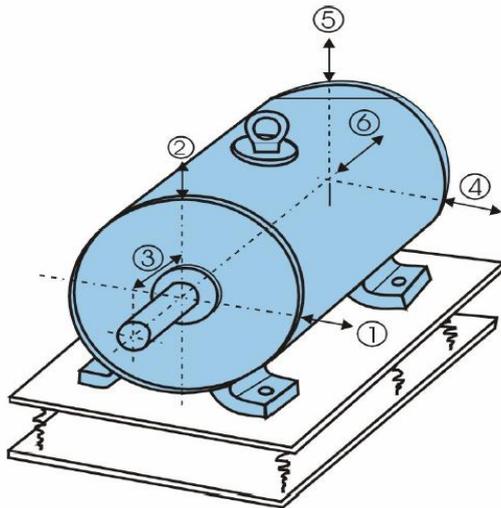
Tabela 4 - Limites de vibração em motores (mm/s)

Nível	Até 15 kW	15 a 75 kW	Acima de 75 kW (Base Rígida)	Acima de 75 kW (Base Flexível).
Bom	0 a 0,71	0 a 1,12	0 a 1,8	0 a 2,80
Normal	0,71 a 1,80	1,13 a 2,80	1,81 a 4,5	2,81 a 7,10
Tolerável	1,81 a 4,5	2,81 a 7,1	4,51 a 11,2	7,11 a 18,0
Não Permissível	> 4,5	> 7,1	> 11,2	> 18,0

Fonte: <http://www.gpro.ind.br/imagens/produtos/Linha20Vib.pdf>.

Para investigar a ocorrência de vibração em um motor elétrico, é fundamental que o mesmo seja observado no local instalado e desacoplado para ter certeza que a anomalia realmente provém do motor. Com o avanço tecnológico faz-se necessário o uso de novas técnicas e procedimentos para o acompanhamento e

análise das vibrações das máquinas. Contudo, com o auxílio de um medidor de vibrações que registre valores em milímetros por segundo (mm/s), pode ser feita a leitura do nível de vibração em seis pontos diferentes da carcaça do motor, conforme mostra a figura 26. Deve-se considerar o maior valor encontrado. (WEG S. A.)



- Ponto 1: horizontal dianteira
- Ponto 2: vertical dianteira
- Ponto 3: axial dianteira
- Ponto 4: horizontal traseira
- Ponto 5: vertical traseira
- Ponto 6: axial traseira

**Figura 26 - Pontos de medição da vibração**

Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAavZIAK/tecnicas-inspecao-testes>.

O ensaio de vibração mecânica nas máquinas do projeto foi realizado com o medidor de vibração digital da Instrutherm, modelo MV-690 a fim de determinar se tal anomalia estaria dentro do limite definido em norma. Os ensaios foram realizados com diferentes valores de frequência e nos pontos de medição mostrados na figura 27.



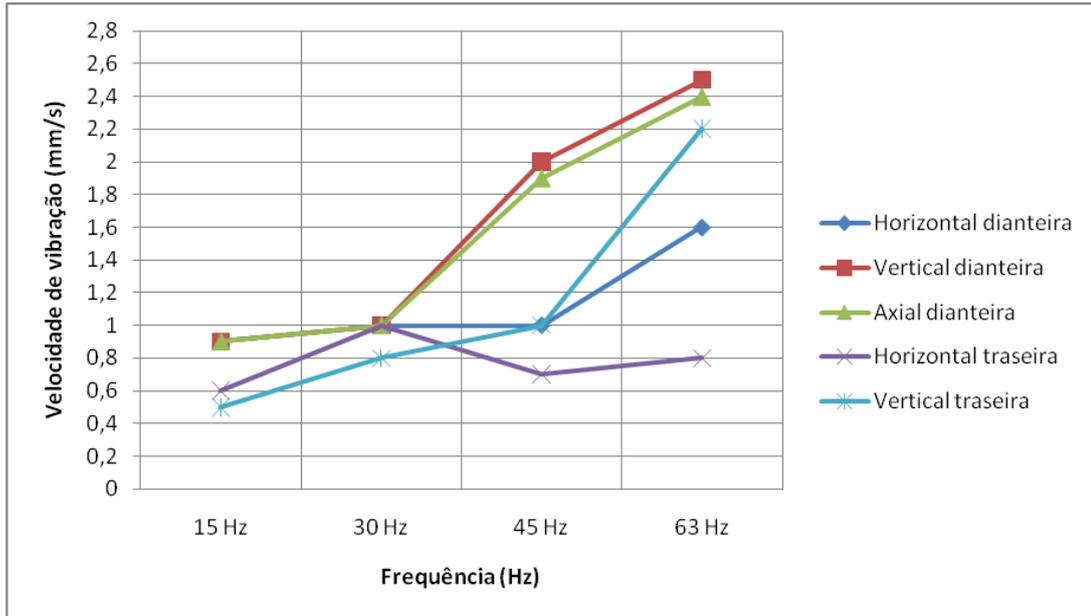
Figura 27 - Pontos de medição da vibração nas máquinas.

Os resultados encontrados na primeira medição para o ensaio da máquina primária podem ser verificados na tabela 5.

Tabela 5 - Velocidades das vibrações do primeiro ensaio da MP em mm/s

Pontos de medição	15 Hz	30 Hz	45 Hz	63 Hz
Horizontal dianteira	0,9	1,0	1,0	1,6
Vertical dianteira	0,9	1,0	2,0	2,5
Axial dianteira	0,9	1,0	1,9	2,4
Horizontal traseira	0,6	1,0	0,7	0,8
Vertical traseira	0,5	0,8	1,0	2,2

O gráfico da figura 28 mostra a variação da vibração em função do aumento da velocidade da máquina primária.



**Figura 28 - Valores médios das vibrações da MP em função da variação da frequência.**

Os resultados encontrados na primeira medição para o ensaio do gerador de indução podem ser verificados na tabela 6.

**Tabela 6 - Velocidades das vibrações do primeiro ensaio do gerador em mm/s**

Pontos de medição	15 Hz	30 Hz	45 Hz	63 Hz
Horizontal dianteira	0,8	1,0	1,1	1,8
Vertical dianteira	0,8	0,9	1,9	2,4
Axial dianteira	0,8	1,1	1,7	2,2
Horizontal traseira	0,7	0,9	0,7	0,8
Vertical traseira	0,6	0,9	1,0	2,0

O gráfico da figura 29 mostra a variação da vibração do gerador em função do aumento da velocidade do gerador de indução.

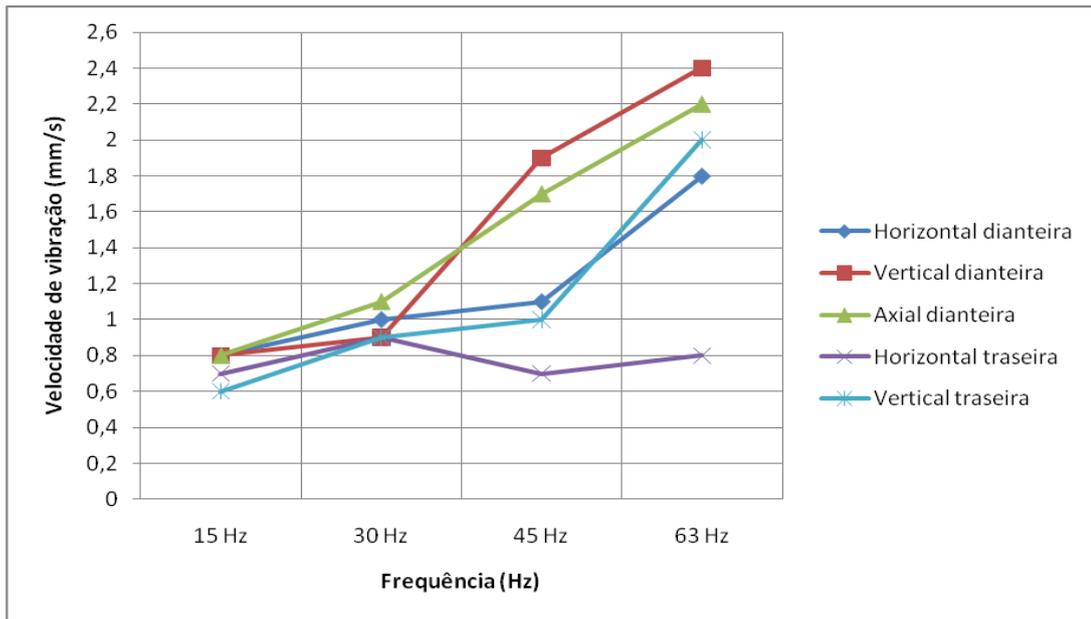


Figura 29 - Valores médios das vibrações do GI em função da variação da frequência.

Os resultados da primeira medição foram insatisfatórios, com alguns valores de vibração acima do normal. As máquinas foram então realinhadas e o ensaio foi repetido novamente.

Os resultados encontrados no segundo ensaio de vibração da máquina primária podem ser verificados na tabela 7.

Tabela 7 - Velocidades das vibrações do segundo ensaio da MP em mm/s

Pontos de medição	15 Hz	30 Hz	45 Hz	63 Hz
Horizontal dianteira	0,8	0,9	0,9	0,9
Vertical dianteira	0,8	0,8	1,0	1,1
Axial dianteira	0,6	0,8	1,0	1,1
Horizontal traseira	0,5	0,7	0,8	1,2
Vertical traseira	0,5	0,6	0,8	0,6

O gráfico da figura 30 mostra a variação da vibração em função do aumento da velocidade da máquina primária.

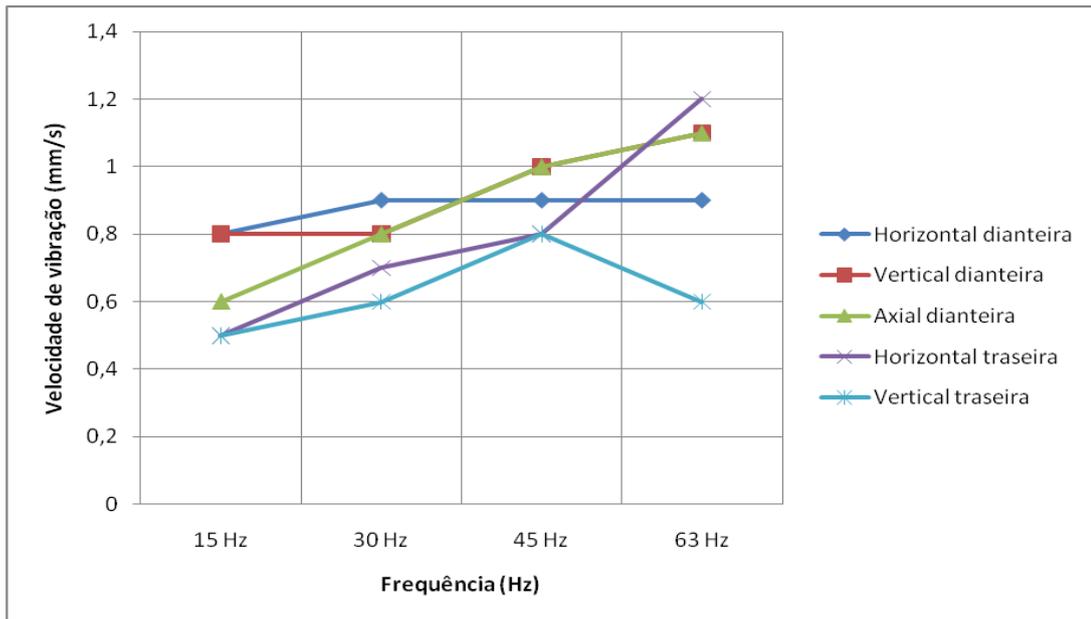


Figura 30 - Valores médios das vibrações da MP em função da variação da frequência.

Os resultados encontrados na segunda medição para o ensaio do gerador de indução podem ser verificados na tabela 8.

Tabela 8 - Velocidades das vibrações do segundo ensaio do gerador em mm/s

Pontos de medição	15 Hz	30 Hz	45 Hz	63 Hz
Horizontal dianteira	0,7	0,7	0,7	1,0
Vertical dianteira	0,6	0,6	1,0	0,9
Axial dianteira	0,6	0,7	1,0	1,1
Horizontal traseira	0,5	0,6	0,8	0,7
Vertical traseira	0,1	0,7	1,0	1,4

O gráfico da figura 31 mostra a variação da vibração do gerador em função do aumento da velocidade do gerador de indução.

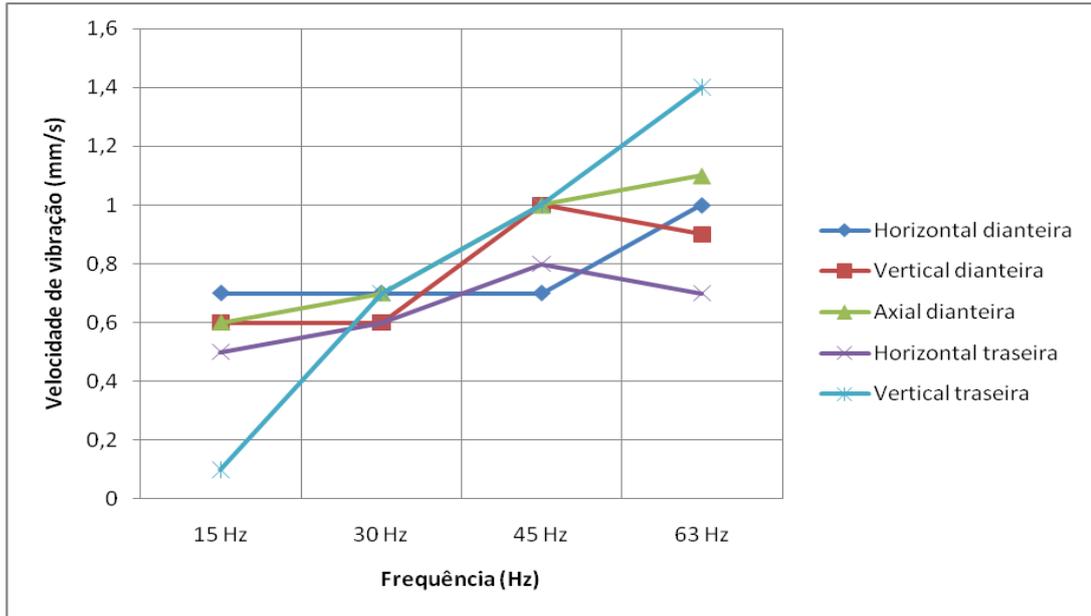


Figura 31 - Valores médios das vibrações do GI em função da variação da frequência.

Embora os resultados tenham sido bastante satisfatórios após o realinhamento da MP e do GI, não foi possível efetuar as medições no ponto axial traseiro pelo fato de não possuir um lugar adequado para a fixação do transdutor devido ao *encoder* que as máquinas possuem na parte posterior, sendo então, realizado as leituras apenas nos outros cinco pontos principais.

A figura 32 mostra a primeira leitura do ponto axial dianteiro da MP e a figura 33 mostram a leitura do mesmo ponto após o realinhamento das máquinas.



Figura 32 - Primeira medição no ponto axial dianteiro da MP.



Figura 33 - Segunda medição no ponto axial dianteiro da MP.

## 6 CONCLUSÕES

O Gerador de Indução é muito aplicado em sistemas alternativos de geração de energia onde o baixo custo, baixo índice de manutenção, disponibilidade e facilidade de substituição do gerador, são características bastante apreciadas, porém, os custos elevados dos bancos de capacitores ainda limitam o uso isolado do gerador de indução a pequenas unidades geradoras.

Sob o ponto de vista dos ensaios de vibração, embora os eixos que acoplam os *encoders* das máquinas estarem levemente tortos (providos de fábrica), os resultados foram satisfatórios, havendo a necessidade de novos ajustes mecânicos. Os níveis de vibração após o realinhamento dos motores permaneceram normais conforme determinado em norma nas quatro frequências medidas, ficando a MP com vibração máxima de 1,2 mm/s e o gerador com 1,4 mm/s, o que garante vibrações satisfatórias para toda a variação de velocidade da máquina primária.

Por ter um custo até 40% menor em relação ao gerador síncrono e maior facilidade de manutenção, este experimento poderá ser utilizado para pesquisas nos laboratórios de Máquinas elétricas e automação, podendo ser ligado futuramente em paralelo com a rede da concessionária para fins acadêmicos de pesquisa. Também poderá ser automatizada com o desenvolvimento de um sistema supervisor para o monitoramento e controle da máquina primária e do gerador.

## REFERÊNCIAS

ABENDE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. **Análise de Vibrações.** Disponível em: <[http://www.abende.org.br/info\\_end\\_oquesao\\_analise.php?w=1280&h=1024](http://www.abende.org.br/info_end_oquesao_analise.php?w=1280&h=1024)>.

Acesso em: 06 de novembro de 2011.

BASSET et. al (1935) E WAGNER (1939). **Geradores de Indução.** Disponível em: <<http://periodicos.unitau.br/ojs-2.2/index.php/exatas/article/viewFile/351/482>>.

Acesso em: 01 de novembro de 2011.

EBAH! **Técnicas de Inspeção e Testes.** Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAvZIAK/tecnicas-inspecao-testes>>. Acesso em: 14 de Novembro de 2011.

FRANCHI, Clairton M. **Acionamentos Elétricos – Inversor de Frequência.** 1 ed. São Paulo: Érica Ltda, 2007.

G PRO. **Norma ISO 2372** Disponível em: <<http://www.gpro.ind.br/imagens/produtos/Linha20Vib.pdf>>. Acesso em: 15 de Novembro de 2011.

MARRA, Enes G. **Sistemas de Geração Baseados em Gerador de Indução Operando Com Tensão Regulada e Frequência Constante.** Goiânia.

MAYER, Giovano. **Características Operativas dos Geradores de Indução Com Rotor em gaiola de esquilo.** Foz do Iguaçu, 2010.

MECATRÔNICA ATUAL - **Inversores** – Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/203>>. Acesso em: 13 de Novembro de 2011.

ROCHA, Marcello S. **Comportamento Dinâmico de Gerador de Indução com Dupla Alimentação em Sistema de Geração Eólica**. Rio de Janeiro, 2005.

SIEMENS LTDA. **Motores Trifásicos de Baixa Tensão**: catálogo. Rio de Janeiro, 2010. 19 p.

TRAPP, Jordan G. **Gerador de Indução Isolado Com Tensão e Frequência Reguladas Por Conversor Matricial Esparso**. Santa Maria, 2008.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **Normas Para Elaboração de Trabalhos Acadêmicos**. Disponível em: <<http://www.utfpr.edu.br/medianeira/biblioteca-e-producao-academica/normas-para-elaboracao-de-trabalhos-academicos/normas-para-elaboracao-de-trabalhos-academicos/?searchterm=normas>>. Acesso em: 05 de novembro de 2011.

WEG S. A. **Instalação e Manutenção de Motores Elétricos**. Disponível em: <[www.joinville.ifsc.edu.br](http://www.joinville.ifsc.edu.br) >. Acesso em: 04 de novembro de 2011.

## APÊNDICE A – CONFIGURAÇÕES BÁSICAS DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA ATV312HU75M3

1º Fazer as ligações físicas e energizar o inversor.

2º Ativar a configuração local.

- Na tela inicial (rdy) pressionar o botão MODE por 3 segundos, aparecerá LOC (local), pressionar ESC para voltar à tela inicial (rdy).

3º Configurar os parâmetros do motor.

- Pressionar o botão Jog Dial e girar até encontrar o menu CONTROLE DO MOTOR (drC-) e pressionar o Jog Dial;
- Ajustar tensão nominal do motor (UnS) em 220V;
- Ajustar frequência nominal do motor (FrS) em 60Hz;
- Ajustar corrente nominal do motor (nCr) em 24,4A;
- Ajustar velocidade nominal do motor (nSP) a 1770 rpm;
- Ajustar  $\cos \varphi$  do motor (COS) em 0,84;
- Pressionar ESC até aparecer rdy (tela inicial)

4º Configurar a velocidade máxima.

- Pressionar o botão Jog Dial e girar até encontrar o menu CONFIGURAÇÕES (SEt-) e pressionar o Jog Dial;
- Girar o Jog Dial até encontrar HSP (velocidade máxima) e ajustar em 63 Hz;
- Pressionar ESC até aparecer rdy (tela inicial)

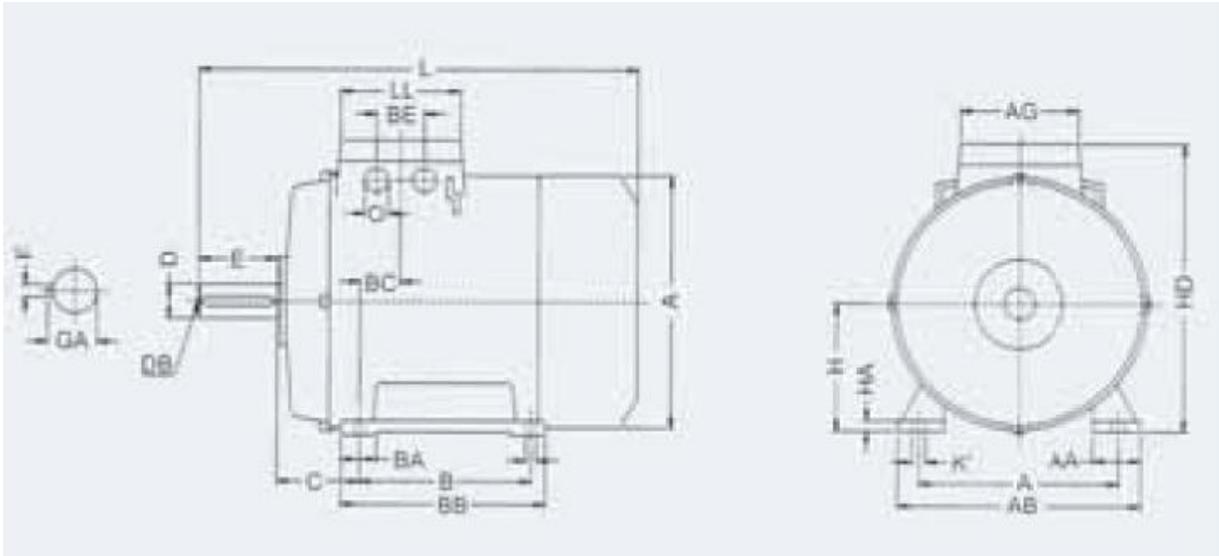
5º Pressionar ESC por 2 segundos.

6º Pressionar RUN para partir o motor.

7º Girar o Jog Dial (+/-) para ajustar a velocidade.

8º Pressionar STOP para parar o motor.

## ANEXO A – Detalhes e medidas dos motores (Siemens)



Linha	Pólos	Carcça ABNT	A	AA	AB	AC*	AG	AS	B	B'	BA	BA'	BB	BC	
1LE1 130S	2-4-6-8	132S	216	53	256	262	155	70,5	140		38	76	218	26,5	
BE	C	D	DB	E	F	GA	H	HA	HB	HD	K	K'	L	LL	O
48	89	38k6	M12	80	10h9	41	132	15	291,5	334	12	16	465	130	M32x1,5