



ESTROBOSCÓPIO DE BAIXO CUSTO PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS E TORQUE DE UMA MÁQUINA ROTATIVA

Custódio, A. G.^{*1}, Gama, H.S.¹, Pires, D.L.¹, Pereira, I.M.¹, Santos, T.C.¹, Cortês, L. R. C.² e Soares, M. G¹

¹DCET – Universidade Estadual de Santa Cruz

²FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo - No cenário atual, sendo os motores de indução trifásicos os equipamentos mais utilizados no setor industrial, faz-se necessário um estudo detalhado a fim de obter as características de desempenho de tais máquinas e determinar a sua viabilidade econômica, eficiência e aptidão em desenvolver um trabalho específico. Existem diversos tipos de procedimentos para determinar os parâmetros de uma máquina, estipulados por normas técnicas internacionais e nacionais, como por exemplo os ensaios de rotor bloqueado e rotor a vazio. O estudo em questão visa, através desses ensaios, determinar os aspectos construtivos de um motor e confeccionar um estroboscópio de baixo custo com o intuito de mensurar a sua velocidade de rotação e por fim o seu torque mecânico. Ao fim, pode-se verificar a velocidade de giro do rotor para tais parâmetros citados, calcular o seu torque e verificar o seu funcionamento.

Palavras-Chave –Estroboscopia, Máquinas elétricas, Medição de velocidade, Modelagem da máquina, Relação de custo-benefício.

Abstract – In the current scenario, since the induction motors are more demanding of the most used equipment in industry, a more detailed study is required on the performance characteristics of the induction motors and their economic viability, efficiency and workability. Probing types of procedures to determine the parameters of a machine were stipulated by international and national technical standards, such as the tests of locked rotor and the rotor to be short. The study aims to, through this procedures, to determinate the constructive aspects of a motor and make a low-cost stroboscope in order to measure its speed of rotation, and finally its mechanical torque. At the end, it is possible to verify the rotational speed of the rotor for such parameters, to calculate its torque and to verify its operation.

Keywords - Stroboscopy, Electric Machines, Speed Measurement, Machine Modeling, Cost-effective.

I. INTRODUÇÃO

A estroboscopia consiste na observação de um fenômeno rápido, iluminando-o por clarões breves de luz emitidos com uma frequência constante e conveniente ao acontecimento medido. Para a observação de um evento com repetição periódica, a certa frequência f_1 , ilumina-se o corpo em que o fenômeno ocorre com uma fonte de iluminação com capacidade de variação da frequência de acionamento, f_2 , emitindo breves clarões de luz. [1]

Quando $f_1 > f_2$ tal que $f_2 \neq 0$, o evento analisado aparenta ocorrer de maneira mais lenta do que realmente corresponde. Para $f_1 < f_2$ tal que $f_2 \neq 0$, ocorrerá, visualmente, uma alteração no sentido de giro rotativo. Finalmente, quando $f_1 = f_2$, o efeito estroboscópico irá ocorrer e será visto o efeito visual do fenômeno parado.

De acordo com [2] a conversão eletromecânica de energia ocorre quando surgem alterações no fluxo concatenado, decorrentes do movimento mecânico do rotor da máquina. Nelas, as tensões são geradas nos enrolamentos ou grupo de bobinas quando ocorre o movimento dessas dentro de um campo magnético. Assim, pela Lei de Faraday, o fluxo concatenado em uma bobina específica é alterado ciclicamente e uma tensão variável no tempo é gerada.

O fenômeno estroboscópico torna-se muito útil no estudo de máquinas elétricas, pois permite definir, no momento da sincronização, o valor da velocidade de rotação de um motor. As informações referentes aos parâmetros da máquina podem ser obtidas executando uma série de testes ou ensaios no motor de indução. Esses testes são semelhantes aos ensaios de curto-circuito e a vazio de um transformador. Os ensaios devem ser executados sob condições precisamente controladas, porque as resistências variam com a temperatura e a resistência do rotor também varia com a frequência do rotor. [3]

Nesse cenário, os objetivos que regem esse trabalho são a construção de um estroboscópio de baixo custo, a

*acgomes@uesc.br

determinação da velocidade de giro do rotor de uma máquina de indução com o uso do estroboscópio, a determinação da potência mecânica do motor, a partir do circuito equivalente e por fim, estipular a potência mecânica do mesmo. Além disso, as normas que estabelecem a sequência a ser seguida para a correta execução de cada ensaio são descritas pela Norma 112 do IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). [4]

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A plataforma de prototipagem eletrônica Arduino é um software que permite o controle e automação de projetos eletroeletrônicos através da comunicação com um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) de fácil acesso e com uma linguagem acessível a todos os níveis. Nessa conjuntura, optou-se pela utilização de um micro controlador baseado no Arduino UNO para a construção do estroboscópio. Este teve a sua estrutura principal formada por um cano PVC no qual foi acoplado em sua extremidade um Diodo Emissor de Luz (LED) de alta potência (12 V).

Com o intuito de definir a magnitude da frequência em análise é preciso variar o seu valor numérico através do giro de um potenciômetro dentro de um intervalo pré-estabelecido. Este estará acoplado à porta analógica da placa de controle a qual irá verificar o valor desejado para o piscar do LED e esta mandará um pulso elétrico a um transistor (modelo 2N3904) que se encontra em série com uma fonte de 12 V e com o LED, funcionando como chave. Todos os componentes auxiliares ao controle estão fixados em uma placa de fenolite produzidas com base nos circuitos impressos.

Para a execução dos testes laboratoriais foi utilizado um motor de indução trifásico de 1,5 HP da WEG, além de um modulo de autotransformador e uma bancada didática – BDMW da WEG para a ligação trifásica.

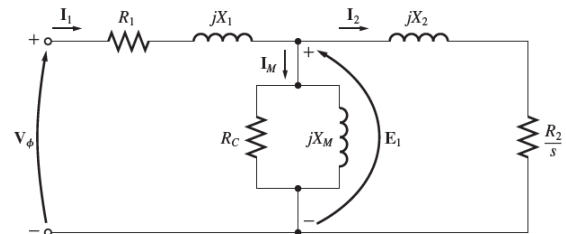
O funcionamento do micro controlador baseado em Arduino UNO é descrito no conjunto de instruções gravadas no mesmo. Tal algoritmo possibilita a interpretação da resistência lida no potenciômetro, para um dado número de rotações por minuto, como a frequência em que o LED de alta potência deve acender.

Primeiramente a função “map” faz a conversão entre os valores analógicos lidos no potenciômetro, de 0 a 1023, e a faixa de velocidade que o LED deve ser acionado, de 100 a 3600 rotações por minuto. A partir disso, o LED é aceso e apagado com simples comandos “HIGH” e “LOW”, enquanto o tempo em que permanece em cada estado varia de acordo com o número de rotações por minuto, que é proveniente do potenciômetro, o código completo é apresentado no ANEXO I.

Para além do software utilizado, para que se possa determinar o torque do motor de teste em laboratório, é necessária a caracterização do circuito equivalente deste, Figura 1, a partir dos ensaios de rotor bloqueado e a vazio. Na técnica de ensaio a vazio, o estator do motor é alimentado com tensões trifásicas, sem a contribuição do rotor, a fim de

se estabelecer preceitos relacionados ao estator e ao ramo magnetizante. Portanto, o primeiro ensaio fornece informações em relação a corrente de excitação e as perdas a vazio. Com esses dados obtêm-se a resistência dos enrolamentos do estator (R_1) e sua reatância (X_1), assim como a reatância do ramo magnetizante (X_m). A resistência do núcleo da máquina é desprezada.

Figura 1: Circuito equivalente do motor de indução trifásico.



O ensaio de rotor bloqueado acontece sem o rotor, sendo este instalado de maneira que a força sobre ele o direcione para baixo, bloqueando seu movimento. O objetivo deste procedimento é medir os termos do estator e do rotor, sem contribuição do ramo magnetizante. Após as medições deste ensaio, juntamente com os dados de ensaio a vazio, obtêm-se a resistência dos enrolamentos do rotor (R_2) e sua reatância (X_2).

III. RESULTADOS

A. Ensaios

No primeiro ensaio, a vazio, utilizou-se ligação em delta na máquina a partir da ligação das tensões trifásicas aos terminais do estator, e mediu-se através de um alicate amperímetro os parâmetros correspondentes a correntes e tensões de linha. Os resultados estão contidos nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1: Correntes de linha do ensaio a vazio.

Fase	Correntes [A]
U	2,77
V	2,85
W	2,86

Tabela 2: Tensões de linha do ensaio a vazio.

Fases	Tensões [V]
U-V	224,3
V-W	224,7
W-U	223,5

Também, mediu-se as potências de entrada ativa, reativa e aparente para cada linha, bem como o fator de potência, também utilizando o mesmo equipamento, como representado pela tabela 3. Neste ensaio a potência está sendo fornecida apenas para suprir as perdas do cobre nos

enrolamentos. Já no ensaio com rotor bloqueado, estabeleceu-se o objetivo de interromper manualmente o rotor da máquina.

Tabela 3: Potências e Fator de Potência no ensaio a vazio

Fases	Potência Ativa [W]	Potência Reativa [VA]	Potência Aparente [VAR]	FP
U-V	269,0	565,0	620,0	0,42
V-W	260,0	600,0	655,5	0,39
W-U	288,0	577,6	645,0	0,44

Já no ensaio com rotor bloqueado, estabeleceu-se o objetivo de interromper manualmente o rotor da máquina. Para isto, ligou-se a máquina em estrela, haja vista que neste tipo de ligação a corrente requerida é menor. Ainda, com o objetivo de diminuir ainda mais a corrente, ligou-se a tensão a partir dos terminais de um autotrafo, com estratégia de diminuir a tensão fornecida pela rede.

Nesse cenário, optou-se pela tensão de 35% da nominal (tensão entre 100% e 65% do autotrafo), de modo que a corrente medida com o rotor bloqueado foi de 2,53 A, sendo a nominal de 2,56 A. Após isso, mediu-se através de um alicate amperímetro os parâmetros correspondentes a tensões e correntes de fase. Os resultados estão contidos nas tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4: Tensões de fase do ensaio de rotor bloqueado.

Fase	Correntes [A]
U	2,77
V	2,85
W	2,86

Tabela 5: Correntes de fase do ensaio de rotor bloqueado.

Fase	Correntes [A]
U-V	224,3
V-W	224,7
W-U	223,5

Por fim, mediu-se também os parâmetros correspondes a potências úteis de entrada e o fator de potência (FP) para cada fase, como mostra a tabela 6.

Tabela 6: Potência ativa e FP no ensaio com rotor bloqueado.

Fases	Potência Ativa (W)	FP
U-V	67,8	0,60
V-W	65,1	0,68
W-U	78,8	0,73

B. Equacionamento para a determinação do circuito equivalente

Após a realização dos ensaios, pode-se utilizar as medidas encontradas para, através de equações relacionadas com a modelagem do motor de indução trifásico encontradas em [2], identificar os valores correspondentes aos parâmetros da máquina. Estabeleceu-se um padrão da utilização de uma média dos valores conhecidos encontrados para correntes, tensões e potências, já que as equações levam em conta as três fases do motor.

Primeiramente, os valores correspondentes às resistências de cobre do estator da máquina (R_1) foram encontrados a partir da utilização de um ohmímetro e estão representados na tabela 7.

Tabela 7: Resistências das bobinas do estator.

Bobinas	Resistência [Ω]
R	6
S	6
T	6

Feito isso, a partir dos valores encontrados no primeiro ensaio, pode-se definir grandezas como potência de perdas rotacionais, potência aparente de entrada a vazio, potência reativa de entrada a vazio e reatância a vazio, a partir das Equações 1,2,3 e 4, respectivamente. Vale ressaltar que este último parâmetro está relacionado com o ramo de reatâncias considerado o rotor como um circuito aberto.

$$P_{rot} = P_{vaz} - n.R_1.I_{1vaz}^2 \quad (1)$$

$$S_{vaz} = 3(I_{1vaz}^2.V_{1vaz}) \quad (2)$$

$$Q_{vaz} = \sqrt{S_{vaz}^2 - P_{vaz}^2} \quad (3)$$

$$X_{vaz} = \frac{Q_{vaz}}{n.I_{1vaz}^2} = X_1 + X_m \quad (4)$$

Onde:

- P_{rot} - Potência de perdas rotacionais.
- P_{vaz} - Potência útil a vazio.
- n - Velocidade mecânica do rotor.
- R_1 - Resistência equivalente do estator.
- I_{1vaz}^2 - Corrente a vazio.
- S_{vaz} - Potência aparente a vazio.
- V_{1vaz} - Tensão do estator a vazio.
- Q_{vaz} - Potência aparente a vazio.
- X_{vaz} - Reatância a vazio.
- X_1 - Reatância equivalente do estator.
- X_m - Reatância de magnetização.

De forma parecida, para o segundo ensaio, pode-se definir grandezas como potência aparente de rotor bloqueado, potência trifásica reativa de rotor bloqueado, reatância e resistência de rotor bloqueado; dados pelas Equações 5,6,7 e

8 respectivamente. Ao encontrar o último parâmetro citado, pode-se aplicar a Equação 09 para definir “ R_2 ”.

$$S_{bl} = n \cdot V_{bl1} \cdot I_{bl1} \quad (5)$$

$$Q_{bl} = \sqrt{S_{bl}^2 - P_{bl}^2} \quad (6)$$

$$X_{bl} = \frac{Q_{bl}}{n \cdot I_{bl1}^2} = X_1 + X_2 \quad (7)$$

$$R_{bl} = \frac{P_{bl}}{n \cdot I_{bl1}^2} \quad (8)$$

$$R_2 = (R_{bl} - R_1) \cdot \left(\frac{X_2}{X_2 + X_m} \right)^2 \quad (9)$$

Onde:

- S_{bl} - Potência aparente de rotor bloqueado.
- n - Velocidade mecânica do rotor
- V_{bl1} - Tensão no estator de rotor bloqueado.
- I_{bl1} - Corrente de rotor bloqueado.
- Q_{bl} - Potência reativa de rotor bloqueado.
- P_{bl} - Potência útil de rotor bloqueado.
- X_{bl} - Reatância de rotor bloqueado.
- X_1 - Reatância equivalente do estator.
- X_2 - Reatância equivalente do rotor.
- R_{bl} - Reatância de rotor bloqueado.
- R_1 - Resistência equivalente do estator.
- R_2 - Resistência equivalente do rotor.
- X_m - Reatância de magnetização.

A partir desse momento é possível estabelecer uma relação entre os ensaios realizados, através de um sistema de equações, para que se possam definir os valores das incógnitas restantes. Primeiramente, para se determinar e relação entre “ X_1 ” e “ X_2 ” é necessário saber a classificação do motor. Neste caso, o motor é da classe N, definido por [4].

Para este caso, define-se uma constante $k=0,68$ e três outros parâmetros “a”, “b” e “c”. Por fim, é possível encontrar duas raízes que relacionam esses termos, sendo elas dadas pelas Equações 10 e 11. A raiz que apresenta valor menor que o parâmetro “ X_{vz} ” é o valor corresponde a “ X_2 ”, e $X_1 = k \cdot X_2$.

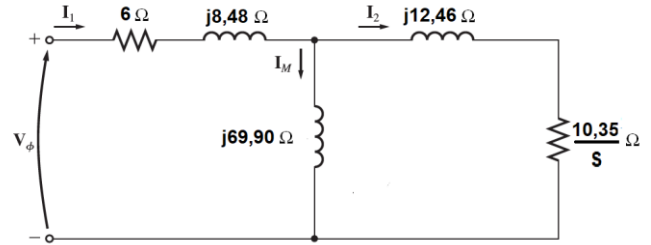
$$a = k^2; \quad b = X_{bl} \cdot (1 - k) - X_{vz} \cdot (1 + k); \quad c = X_{vz} \cdot X_{bl}.$$

$$r_1 = \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \right) \quad (10)$$

$$r_2 = \left(\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \right) \quad (11)$$

Assim, é possível representar a figura 2 correspondente ao circuito equivalente do motor de indução com os valores numéricos encontrados a partir do sistema de equações gerado.

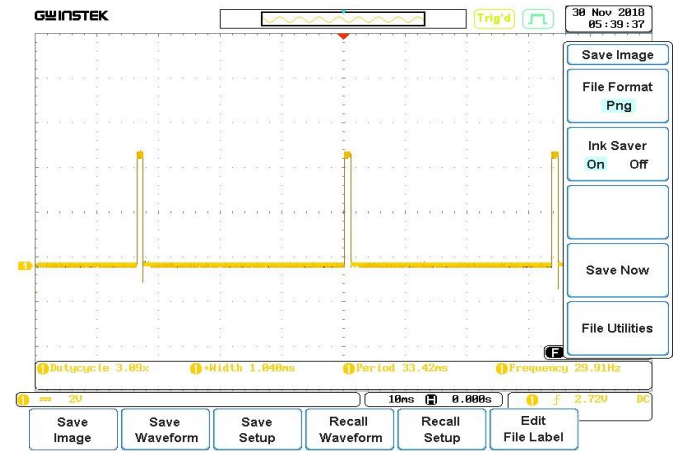
Figura 2: Representação final do circuito equivalente



C. Determinação do Torque da Máquina

Através do uso do estroboscópio para que se meça a velocidade de giro da máquina e do circuito equivalente para que se possa encontrar a potência mecânica fornecida, faz-se possível obter o valor do torque do motor operando a vazio, neste caso. Com o uso de um aparelho osciloscópio capturou-se o formato de onda referente aos pulsos lidos pelo Arduino, que medem continuamente a saída de frequência associada a leitura do estroboscópio, neste caso, de 29,91hz, como mostra a figura 3.

Figura 3: Pulsos equivalentes a uma rotação de 1795 rpm de uma máquina.



A partir de uma análise dimensional pode-se utilizar as Equações 12 e 13 para se calcular a velocidade de giro e o escorregamento, respectivamente. Já a potência mecânica é dada pela Equação 14, sendo o parâmetro “ I_{rotor} ” calculado a partir do valor medido de corrente a vazio, através de um divisor de corrente entre os ramos magnetizante e do rotor.

$$W_r = f \times 6 \quad (12)$$

$$s = \frac{w - w_r}{w} \quad (13)$$

$$P_{mec} = n_{fases} \times I_{rotor}^2 \times R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (14)$$

Onde:

- w_r - Velocidade de giro do rotor.
- f - Frequência da rede.
- s - Escorregamento.
- w - Velocidade relacionada à frequência da rede

Por fim, torque da máquina é dado pela Equação 15. Encontrou-se $T = 0,368N/m$.

$$T = \frac{1}{w_s} \left[\frac{n_{fases} \times V_{1eq}^2 \times \frac{R_2}{s}}{R_{1eq} + \left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_{1eq} + X_2)^2} \right] \quad (15)$$

Onde:

- T - Torque mecânico.
- R_{1eq} - Resistência equivalente do estator.
- X_{1eq} - Reatância equivalente do estator.
- V_{1eq} - Tensão equivalente vista pelo estator.

Os parâmetros de impedância equivalente do estator e tensão equivalente do estator são definidos através das Equações 16 e 17, as quais já apresentam parâmetros conhecidos de equações anteriores.

$$V_{1eq} = V_{vaz} \times \left(\frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \right) \quad (16)$$

$$Z_{1eq} = \frac{jX_m (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (17)$$

IV. DISCUSSÕES

A verificação do desempenho, determinação de torque, depende da avaliação das características elétricas de uma máquina de indução. Desse modo, necessitou-se da realização dos ensaios, já citados, para obtenção do circuito equivalente final da máquina e sucessivamente a potência mecânica e o torque da máquina.

Os ensaios a vazio e com o rotor bloqueado, permitem a montagem do circuito equivalente da máquina de indução. O ensaio a vazio teve o objetivo de determinar as perdas rotacionais do motor assim como informações sobre sua corrente de magnetização. O ensaio tem como carga as perdas por atrito e a ventilação do motor, assim o

escorregamento do motor é muito pequeno. Nessas condições, a potência consumida pelo motor está suprindo as perdas Joule no estator, as perdas no ferro e as perdas rotacionais. As correntes, tensões e potências obtidas a partir desse ensaio foram comparadas nas questões teóricas abordadas em [3] e [6].

Já o ensaio com o rotor bloqueado é realizado para determinar a impedância de dispersão. A literatura afirma que para a realização desse é necessário uma tensão reduzida que dever ser de 20% a 40% da tensão nominal, que foi respeitada [3]. O baixo valor da tensão é justificado, pois como o rotor está travado, a velocidade do fluxo magnético vista do rotor é igual à velocidade deste vista do estator, portanto, as forças eletromotrices efetivas do rotor e estator são iguais, ou seja, escorregamento igual a 1, o que caracteriza uma impedância de entrada muito baixa.

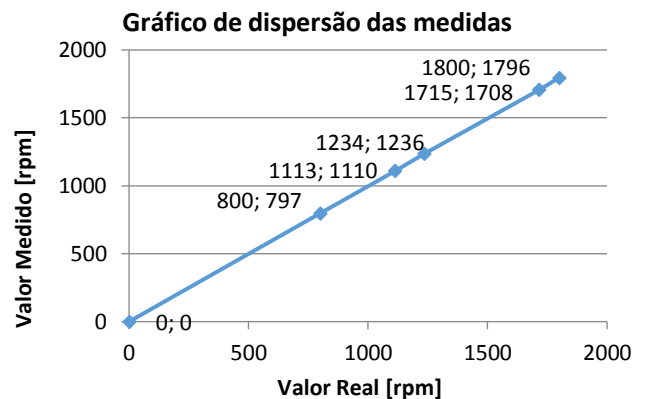
Retendo o motor parado, as perdas por atrito e ventilação são nulas, assim como as perdas no ramo magnetizante. Logo a potência de entrada estará suprindo as perdas Joule nos enrolamentos do estator e do rotor. Dessa forma o circuito equivalente estrará em serie permitindo determinar a impedância de dispersão.

Para estabelecer a velocidade de giro do rotor da máquina de indução o estroboscópio se fez necessário, e a partir disso fez-se a confecção do mesmo. Esse, apesar de ser dotado de erros diversos, apresenta uma boa precisão de leitura visto que o seu erro relativo sempre esteve abaixo de 0,5% em uma faixa de operação de 100Hz a 3600 Hz. A Tabela 8 mostra as velocidades reais e as medidas com os receptivos erros de cada medição, já da Figura 4 podemos observar que a curva real é praticamente a mesma da curva do protótipo, portanto, validando o modelo do experimento.

Tabela 8: Aferições realizadas com o osciloscópio

Velocidade Real [rpm]	Velocidade Medida [rpm]	Erro Relativo [%]
0	0	0,00
800	797	0,37
1113	1110	0,27
1234	1236	0,16
1715	1708	0,41
1800	1796	0,22

Figura 4: Dispersão entre valores reais e medidos



V. CONCLUSÃO

Após toda a análise criteriosa realizada embasada em uma metodologia, foi possível, com os ensaios na máquina, equacionamentos adotados e da construção do estroboscópio, determinar o torque do motor analisado. Os resultados desse estudo permitiram concluir que os ensaios foram realizados a rigor já que a resposta final é condizente com o esperado para o motor operando abaixo da sua faixa de operação nominal.

Além disso, a confecção do estroboscópio foi precisa, visto que os erros relativos entre velocidade real e velocidade medida pelo aparelho foram pequenos (menores que 0,5%), bem como a dispersão entre os mesmos. Portanto, a construção deste protótipo, feito com baixo custo e alta eficiência se mostrou extremamente proficiente, se comparamos com o desempenho de outros instrumentos que poderiam também suprir os objetivos deste trabalho, como torquímetro e tacômetro.

A maior vantagem da elaboração do estroboscópio para se medir a velocidade do rotor de uma máquina é a facilidade na programação do micro controlador e seu custo. Em suma, trata-se de uma construção não robusta e simples, que pode ser aproveitada, para fins didáticos, por exemplo, em detrimento de equipamentos mais complexos e com maior valor de mercado.

REFERÊNCIAS

- [1] GUEDES, Manuel. Laboratório de Máquinas Eléctricas – Estroboscopia. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal. 2002
- [2] A.E.Fitzgerad. Maquinas Elétricas. 6ªed. São Paulo: Mcgraw-Hill,2006
- [3] CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de Máquinas Eléctricas. 5. Ed. Porto Alegre: Mcgraw-Hill,2013
- [4] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Standard 112-1996, IEEE, Nova York, 1996.
- [5] Norma NBR 5383-1 2002
- [6] DEL TORO, Vincent. Fundamentos De Máquinas Elétricas. Rio De Janeiro: Prentice Hall Do Brasil: Ltc, 1994. 550 P

VI. ANEXO I

// CÓDIGO ESTROBOSCÓPIO

```
int led = 5;
int pot = A0;
float rpm;

void setup() {
  serial.begin(9600);
  pinMode(led,OUTPUT);
}
```

```
}

void loop() {
  rpm = map(analogRead(pot),0,1023,100,3600);
  Serial.println(rpm);
  digitalWrite(led,HIGH);
  delay(2500/rpm);
  digitalWrite(led,LOW);
  delay(57500/rpm);
}
```