



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
**DO TRIÂNGULO MINEIRO – *Campus* Paracatu**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**VICTOR HUGO DE LIMA CANUTO**

**Análise dos controles escalar e vetorial no acionamento de motores CA de  
baixa tensão**

**PARACATU, MG**  
**2022**

**VICTOR HUGO DE LIMA CANUTO**

**Análise dos controles escalar e vetorial no acionamento de motores CA de baixa tensão**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro, Campus Paracatu, como requisito parcial para conclusão do Curso Bacharelado em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Msc. Getúlio Albernaz Lobo.

Coorientador: Prof. Msc. Silas Martins Sousa.

**PARACATU, MG**

**2022**

Ficha Catalográfica elaborada pelo Setor de Referência do IFTM –  
Campus Uberaba-MG

C169a Canuto, Victor Hugo de Lima  
Análise dos controles escalar e vetorial no acionamento de motores CA  
de baixa tensão / Victor Hugo de Lima Canuto – 2022  
50 f.: il.

Orientador: Prof. Me. Getúlio Albernaz Lobo.

Coorientador: Prof. Me. Silas Martins Sousa.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -  
Instituto Federal do Triângulo Mineiro - Campus Paracatu-MG, 2022.

1. Inversor de frequência. 2. Controle escalar. 3. Controle vetorial.  
I. Lobo, Getúlio Albernaz. II. Sousa, Silas Martins. III. Título.

CDD 621.3815322

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**VICTOR HUGO DE LIMA CANUTO**

**Análise dos controles escalar e vetorial no acionamento de motores CA de baixa tensão**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro, Campus Paracatu, como exigência parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Elétrica, sob a orientação do Prof. Msc. Getúlio Albernaz Lobo e coorientação do Prof. Msc Silas Martins Sousa.

Aprovado em 02 de dezembro de 2022.



---

Prof. Msc. Getúlio Albernaz Lobo



---

Prof. Msc. Adrian Ribeiro Ferreira



---

Prof. Tiago Martins de Brito

**PARACATU, MG  
2022**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho a minha avó Teresa Maria de Lima que infelizmente não pôde ver o caminho e conquistas que alcancei.

À minha mãe Andrea Maria da Conceição de Lima que me apoiou em todas as minhas decisões e sempre me incentivando para conquistar meus objetivos.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço à minha mãe por estar sempre me dando apoio durante essa etapa da minha vida.

À minha amada namorada Ana Luiza Neves dos Santos que esteve do meu lado e dando apoio desde o início da graduação.

Aos amigos e uns em especial que estiveram presentes durante esses anos de estudo, tornando mais divertido e proveitoso a cada semestre juntos.

Aos professores Getúlio Albernaz Lobo e Silas Martins Sousa que disponibilizaram seus horários com suas famílias para tornar a execução desse trabalho possível e pelos conhecimentos compartilhados durante esse tempo.

Aos demais professores por passarem seus ensinamentos durante esses anos.

Ao IFTM - Campus Paracatu e seus servidores por proporcionarem novas experiências e conhecimentos para meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Muito obrigado a todos pelo que fizeram por mim!

## RESUMO

Os inversores de frequência são divididos em inversores de modo de controle escalar e inversores de modo de controle vetorial. Com o propósito de controlar a velocidade dos motores de indução trifásicos e controlar a energia fornecida para o motor, proporcionando uma maior economia de energia e um acionamento mais suave do motor, evitando falhas mecânicas devido aos solavancos de partidas com uma alta corrente de partida.

A proposta deste trabalho é apresentar os modos de controle presentes no inversor de frequência para melhor aproveitamento do motor de indução trifásico na indústria. Na aplicação desse sistema, deve ser levado em consideração as vantagens e os cuidados necessários para o acionamento do motor a vazio e com carga acoplada. Serão apresentados os processos utilizados para demonstrar a efetividade de cada modo de controle com seus resultados através de comparações com simulação de níveis de cargas diferentes.

Após a aquisição dos dados, foi capaz de determinar que o modo de controle vetorial possui um algoritmo responsável por compensar o torque e velocidade quando comparado com o controle escalar na relação tensão e frequência permitindo manter de maneira constante o torque aplicado para exercer uma determinada função.

**Palavras chave:** Inversor de frequência, controle escalar, controle vetorial, motor de indução.

## ABSTRACT

Frequency inverter are divided into scalar control mode drives and vector control mode drives. With the purpose of controlling the speed of three-phase induction motors and controlling the energy supplied to the motor, providing greater energy savings and a smoother motor drive, avoiding mechanical failures due to jerks of starts with a high starting current.

The purpose of this work is to present the control modes present in the frequency inverter for better use of the three-phase induction motor in the industry. In the application of this system, the advantages and care required for starting the engine at no load and with a coupled load must be taken into account. The processes used to demonstrate the effectiveness of each control mode will be presented with their results through comparisons with simulation of different load levels.

After acquiring the data, it was able to determine that the vector control mode has an algorithm responsible for compensating the torque and speed when compared to the scalar control in the voltage and frequency ratio, allowing to constantly maintain the torque applied to perform a given function.

**Keywords:** Frequency inverter, scalar control, vector control, induction motors.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1 - DIAGRAMA DE CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS.....                         | 15 |
| FIGURA 2 - MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO.....  | 16 |
| FIGURA 3 - ENROLAMENTO TRIFÁSICO. ....  | 17 |
| FIGURA 4 - DIAGRAMA DAS ETAPAS DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA. ....                          | 20 |
| FIGURA 5 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLE ESCALAR.....                                  | 22 |
| FIGURA 6 - RELAÇÃO ENTRE TORQUE EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA.....                            | 23 |
| FIGURA 7 - VETORES DE CORRENTE PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CARGA. ....                 | 25 |
| FIGURA 8 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLE VETORIAL EM MALHA ABERTA.....                 | 26 |
| FIGURA 9 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLE VETORIAL COM REALIMENTAÇÃO. ....              | 26 |
| FIGURA 10 - GERAÇÃO DO PWM PELA COMBINAÇÃO DE ONDAS.....                                | 27 |
| FIGURA 11 - SINAL DE SAÍDA DO GERADOR PWM. ....   | 27 |
| FIGURA 12 - MODULAÇÃO PWM DE SAÍDA PARA O MOTOR. ....                                   | 28 |
| FIGURA 13 – DIAGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO CIRCUITO DO SENSOR DE CORRENTE AO SISTEMA..... | 30 |
| FIGURA 14 - CÓDIGO IMPLEMENTADO NO ARDUINO.....   | 30 |
| FIGURA 15 - SENSOR DE CORRENTE SCT-013.....   | 31 |
| FIGURA 16 - TACÔMETRO DIGITAL POL-19.....   | 31 |
| FIGURA 17 - ARDUINO MEGA 2560 .....   | 32 |
| FIGURA 18 - INVERSOR DE FREQUÊNCIA CFW-300. ....  | 32 |
| FIGURA 19 - PLACA DO MOTOR UTILIZADO. ....  | 33 |
| FIGURA 20 - ESTRUTURA DESENVOLVIDA PARA SIMULAÇÃO DE CARGA. ....                        | 35 |
| FIGURA 21 - CIRCUITO UTILIZADO PARA IMPLEMENTAÇÃO DO SENSOR DE CORRENTE.....            | 36 |
| FIGURA 22 - COMPARAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE NO INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM 60Hz. ....   | 43 |
| FIGURA 23 - COMPARAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE NO MULTÍMETRO EM 60Hz. ....               | 44 |
| FIGURA 24 - COMPARAÇÃO DA MEDIÇÃO NO SENSOR DE CORRENTE EM 60Hz. ....                   | 44 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| QUADRO 1. RECURSOS PLANEJADOS PARA IMPLEMENTAR O PROJETO.. .....                                    | 33 |
| QUADRO 2. RECURSOS PLANEJADOS PARA IMPLEMENTAR O PROJETO FORNECIDOS PELO<br>IFTM E PROFESSORES..... | 34 |
| QUADRO 3 - COMPARATIVO DE PARAMETRIZAÇÃO. ....  | 37 |
| QUADRO 4. DADOS OBTIDOS PELOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO NO MODO DE CONTROLE<br>ESCALAR.....           | 37 |
| QUADRO 5. DADOS OBTIDOS PELOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO NO MODO DE CONTROLE<br>VETORIAL .....         | 38 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| GRÁFICO 1 - CURVA CONJUGADO X ROTAÇÃO. ....  | 18 |
| GRÁFICO 2 - GRÁFICO TENSÃO X FREQUÊNCIA. ....  | 21 |
| GRÁFICO 3 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS VALORES DE CORRENTE DEMONSTRADOS NOS<br>QUADROS 3 E 4..... | 38 |
| GRÁFICO 4 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS VALORES DE RPM DEMONSTRADOS NOS<br>QUADROS 3 E 4.....      | 41 |
| GRÁFICO 5 - SENSOR DE CORRENTE COM OPERAÇÃO EM 30HZ.....   | 42 |
| GRÁFICO 6 - ROTAÇÃO DO MOTOR COM OPERAÇÃO E 30HZ. ....   | 42 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

|     |   |
|-----|---|
| A   | Ampere  |
| CA  | Corrente Alternada  |
| CC  | Corrente Contínua   |
| MIT | Motor de Indução Trifásico                                |
| PWM | Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulsos)  |
| RMS | Root Mean Square (valor quadrático médio ou valor eficaz) |
| RPM | Rotações Por Minuto                                       |
| TC  | Transformador de corrente                                 |
| V/f | Tensão/frequência   |
| VVC | Voltage Vector Control (Controle Vetorial de Tensão)      |

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                     | <b>12</b> |
| 1.1      | TEMA .....                                  | 13        |
| 1.2      | PROBLEMA.....                               | 13        |
| 1.3      | OBJETIVOS .....                             | 13        |
| 1.3.1    | OBJETIVO GERAL .....                        | 13        |
| 1.3.2    | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                 | 13        |
| 1.3.3    | HIPÓTESE.....                               | 14        |
| 1.4      | JUSTIFICATIVA .....                         | 14        |
| 1.5      | DELIMITAÇÃO.....                            | 14        |
| <b>2</b> | <b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>             | <b>15</b> |
| 2.1      | MOTORES DE INDUÇÃO .....                    | 15        |
| 2.1.1    | VELOCIDADE SÍNCRONA ( $n_s$ ).....          | 17        |
| 2.1.2    | VELOCIDADE NOMINAL ( $n$ ).....             | 17        |
| 2.1.3    | ESCORREGAMENTO ( $s\%$ ) .....              | 17        |
| 2.1.4    | CONJUGADO .....                             | 18        |
| 2.2      | INVERSOR DE FREQUÊNCIA .....                | 19        |
| 2.2.1    | MODOS DE CONTROLE.....                      | 21        |
| 2.2.1.1  | CONTROLE ESCALAR.....                       | 21        |
| 2.2.1.2  | CONTROLE VETORIAL .....                     | 23        |
| 2.2.2    | MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSOS (PWM) ..... | 27        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>              | <b>29</b> |
| 3.1      | INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO .....               | 29        |
| 3.1.1    | SENSOR DE CORRENTE .....                    | 31        |
| 3.1.2    | TACÔMETRO .....                             | 31        |
| 3.2      | ARDUINO MEGA 2560.....                      | 32        |
| 3.3      | INVERSOR DE FREQUÊNCIA WEG CFW-300.....     | 32        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>         | <b>35</b> |
| 4.1      | RESULTADOS .....                            | 37        |
| 4.2      | DISCUSSÃO .....                             | 45        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO .....</b>                      | <b>46</b> |
| <b>6</b> | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                    | <b>47</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

No mundo contemporâneo, as atividades e trabalhos realizados pelas pessoas estão cada vez mais dependentes das tecnologias desenvolvidas e principalmente, da utilização da energia elétrica para esses fins. A utilização dos motores elétricos está integrada no cotidiano da população de diversas maneiras, desde aparelhos domésticos como uma lavadora de roupas até grandes áreas industriais.

O motor de indução é o mais usado de todos os tipos de motores, pois, combina as vantagens da utilização de energia elétrica - baixo custo, facilidade de transporte, limpeza, simplicidade de comando com sua construção simples e grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos (WEG, 2021, p. 6).

Com esse avanço dos processos industriais, uma das barreiras impostas foi a necessidade de controlar a velocidade do motor durante a sua operação. Uma das formas encontradas para solucionar esse problema, foi a criação do inversor de frequência variável, possibilitando ter vantagem na comparação entre eficiência energética, controle a distância e redução de custos em relação com uma partida convencional.

A ideia principal do inversor de frequência é utilizar um controlador que permite variar a tensão e frequência aplicada no motor, com objetivo de realizar uma partida de forma gradativa até sua velocidade e potência nominal, ou seja, realizar uma partida em rampa. Para o controle da velocidade do motor necessita utilizar outros parâmetros disponíveis no inversor de frequência, os modos de controle convertem a corrente através de um processador gerando alguns tipos de sinais para realizar a partida do motor, com isso evitando acionamentos bruscos e aumentando a vida útil do motor.

Os modos de controle que serão estudados neste trabalho possuem certas diferenças, entre elas, o controle escalar é utilizado em um acionamento com o objetivo de operar com as amplitudes escalares nas grandezas de tensão, corrente e fluxo em regime permanente ou escalar quadrático em que o fluxo no entreferro é proporcional com a frequência de saída até a diminuição do campo magnético resultando no torque com uma função quadrada na velocidade síncrona. Enquanto que, o controle vetorial é utilizado em acionamentos que exigem uma precisão maior no controle, operando as grandezas instantâneas por vetores, onde o motor é acionado como um motor CC, ocorrendo a regulação de forma independente

para o fluxo e torque, permitindo alcançar uma precisão e rapidez no controle do motor.

## 1.1 TEMA

Estudo mostrando a influência do controle escalar (V/f) e o controle vetorial (VVC) do inversor de frequência utilizados em MITs de baixa tensão em seus acionamentos com o motor em vazio e com cargas.

## 1.2 PROBLEMA

Para cada modo de controle, deve ser considerado o tipo de carga conectada na ponta do eixo do motor. A aplicação do modo de controle apropriado, sendo, a partir da análise dos acionamentos possibilitando tracionar uma carga com grande massa específica sem gerar danos no equipamento ou anomalias na rede elétrica. Portanto, qual modo de controle possui a maior eficiência energética para a situação apresentada?

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 OBJETIVO GERAL

Compreender a importância da utilização dos modos de controles encontrados em inversores de frequência para atingir o melhor aproveitamento e rendimento desejado do motor para uma determinada atividade que necessite o tracionamento de grandes cargas, exemplos, correias transportadoras e elevadores.

### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este projeto tem os seguintes objetivos específicos:

- Entender o comportamento das partidas de motores utilizando os modos de controle escalar e vetorial;

- Demonstrar as respostas obtidas através de instrumentos de medição e a ação do motor em duas situações: com o eixo livre e uma grande carga.

### 1.3.3 HIPÓTESE

Os inversores de frequência possuem diversos parâmetros que permitem realizar partidas de motores com diferentes características. Para isso, deve escolher um dos modos de controle conforme a carga conectada ao motor, sendo que o controle escalar permite um acionamento com uma aceleração e frenagem, enquanto, vetorial necessita de mais dados do motor. Deve ser estudado qual desses modos de controle possui a melhor resposta desejada com menores perdas energéticas para movimentar a carga.

### 1.4 JUSTIFICATIVA

O projeto tem como foco demonstrar certos pontos na partida de motores com inversor de frequência, onde durante a pesquisa será possível analisar as particularidades de cada modo de controle. Visando demonstrar a forma mais apropriada para uma partida de motor com grande carga conectada, evitando causar algum tipo de alteração na rede ou anormalidades nos equipamentos.

### 1.5 DELIMITAÇÃO

O projeto se limita em analisar os dois modos de controle durante a partida com carga simulada, para registrar o comportamento dos acionamentos e realizar comparações com os resultados obtidos por meio prático, sendo possível averiguar qual se adequa para o propósito desta pesquisa.

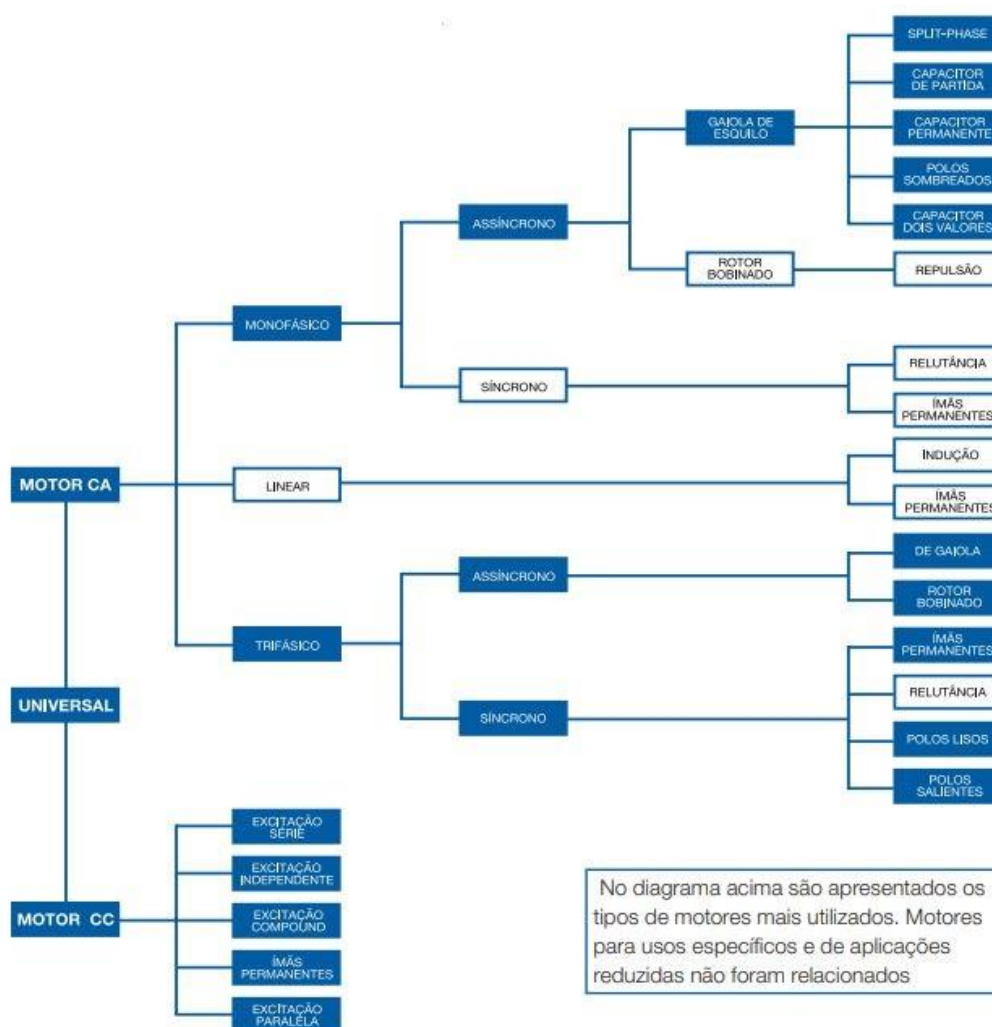


## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 MOTORES DE INDUÇÃO

O motor elétrico é um equipamento crucial nos dias atuais. Este transforma a energia elétrica em energia mecânica para cumprir uma determinada ação. Os motores de indução trifásicos por serem os mais utilizados nas indústrias por proporcionar uma economia devido a simplicidade de construção e permitindo partidas com cargas maiores quando comparados com os motores CC. Possuindo um alto rendimento para médias e grandes cargas, mantendo um fator de potência considerável para um menor consumo de energia reativa em relação com a energia ativa.

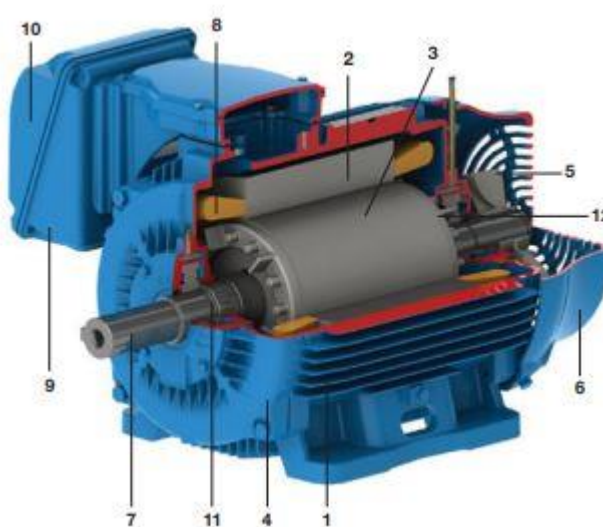
**Figura 1** - Diagrama de classificação dos motores elétricos.



Fonte: WEG.

Os motores de indução são compostos principalmente por um rotor e estator, onde, o estator é a parte fixa do motor, responsável por receber a energia elétrica da fonte e criar o fluxo magnético em suas bobinas para rotacionar o eixo do motor, enquanto o rotor é a estrutura que, por meio do fluxo magnético induzido, gira no seu eixo e é capaz de manter uma determinada velocidade com uma carga conectada. A Figura 2 mostra as partes do motor de indução.

**Figura 2** - Motor elétrico trifásico.



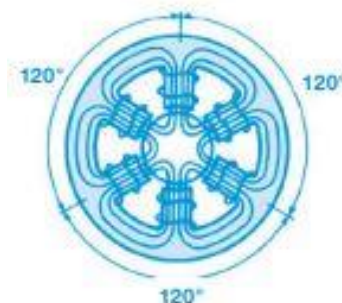
**Fonte:** WEG.

- Estator - Carcaça (1), núcleo de chapas (2), enrolamento trifásico (8).
- Rotor - Núcleo de chapas (3), eixo (7), barras e anéis de curto-circuito (12).
- Outras partes do motor de indução trifásico - Tampa (4), ventilador (5), tampa defletora (6), caixa de ligação (9), terminais (10), rolamentos (11).

O princípio de funcionamento do MIT é através da formação do campo girante. “Quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica, é criado um campo magnético orientado conforme o eixo da bobina e de valor proporcional à corrente” (WEG, 2021). O enrolamento trifásico é formado por três conjuntos de bobinas monofásicas, conforme a Figura 3, sendo montadas em  $120^\circ$  defasadas, fisicamente, umas das outras permitindo fechamentos em Y ou  $\Delta$ . Quando alimentadas por correntes trifásicas defasadas, eletricamente, de  $120^\circ$ , essas correntes criam campos magnéticos que induzem correntes no rotor. Essa corrente, por sua vez, também irá gerar um outro campo magnético, com

polaridade oposta àquela que a produziu. É justamente a interação entre esses dois campos magnéticos que fará com que haja torque, movimento relativo entre o estator e o rotor.

**Figura 3** - Enrolamento trifásico.



**Fonte:** WEG.

### 2.1.1 VELOCIDADE SÍNCRONA ( $n_s$ )

Definido através da velocidade de rotação do campo girante juntamente com a frequência dependendo do número de polos do motor.

$$n_s = \frac{120 * f}{p} \text{ (RPM)} \quad (1)$$

### 2.1.2 VELOCIDADE NOMINAL ( $n$ )

A velocidade nominal, dada em RPM, é também conhecida como a velocidade na ponta do eixo do rotor, pois representa a velocidade real em que o motor está acionando uma carga. Ela é uma relação entre os valores nominais da potência e frequência, escorregamento e também da velocidade síncrona, expresso a seguir:

$$n = n_s * \left(1 - \frac{s\%}{100}\right) \quad (2)$$

### 2.1.3 ESCORREGAMENTO ( $s\%$ )

No motor de indução, assíncrono, a velocidade do campo girante é sempre maior do que a velocidade do rotor, em funcionamento normal. Essa diferença de velocidade,

percentual, é conhecida como escorregamento. É justamente o escorregamento que faz com que haja corrente induzida e torque no eixo. Os motores síncronos, diferentemente dos assíncronos, possuem velocidades iguais do rotor e do campo girante do estator.

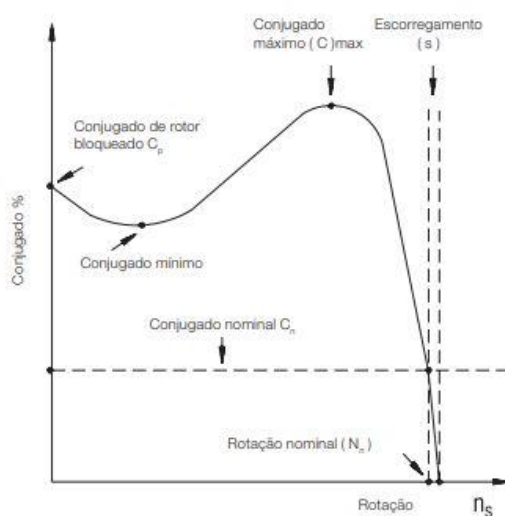
$$s(\%) = \frac{n_s - n}{n_s} * 100 \quad (3)$$

#### 2.1.4 CONJUGADO

“O conjugado (também chamado torque ou momento) é a medida do esforço necessário para girar um eixo” (WEG, 2021). O conjugado do motor está relacionado com o escorregamento do motor, sendo a diferença entre as rotações síncronas e assíncronas. O escorregamento é responsável por uma dinâmica muito importante no motor, pois quando o conjugado de carga aumenta, faz com que a diferença entre as velocidades síncronas e assíncronas aumentem, isso faz com que o valor do escorregamento aumente, e um valor de corrente maior será demandado, para que aumente o conjugado motor e entregue o torque adicional demandado pela carga.

O Gráfico 1 apresenta a curva de conjugado x rotação identificando momentos específicos do conjugado. Caracterizando à medida que a carga aumenta, a rotação do motor diminui gradativamente, até o ponto que o conjugado atinge seu máximo. Se o conjugado da carga aumentar mais, a rotação do motor cai bruscamente, podendo travar o rotor.

**Gráfico 1** - Curva conjugado x rotação.



**Fonte:** WEG.

O conjugado de rotor bloqueado ( $C_p$ ) é o conjugado mínimo gerado pelo motor para sair da inércia, para produzir movimento. Conjugado nominal ( $C_n$ ) é o conjugado necessário para mover a carga na velocidade nominal. "O conjugado mínimo ( $C_{min}$ ) é o menor conjugado gerado pelo motor desde a partida até a velocidade do conjugado máximo. "Conjugado máximo ( $C_{max}$ ) é o maior conjugado gerado pelo motor sob tensão e frequência nominal, sem queda brusca de velocidade" (WEG, 2021).

$$C_n = \frac{P}{2\pi * n} (N.m) \quad (4)$$

$$C_p(\%) = \frac{C_p * 100}{C_n} \quad (5)$$

Onde:

$C_n$  = Conjugado Nominal

$C_p$  = Conjugado de partida

$C_p(\%)$  = Conjugado de partida (em porcentagem)

$n$  = Velocidade Nominal

$P$  = Potência (Kw)

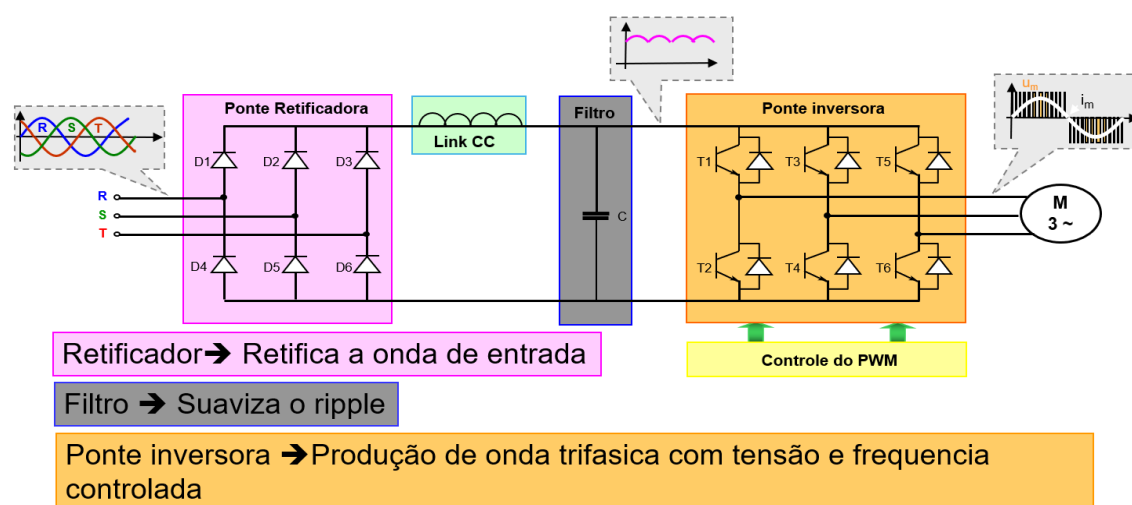
## 2.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Os processos industriais que necessitavam de controle de velocidade de motores elétricos, usavam, em sua maioria, motores de corrente contínua (CC), devido a facilidade de variar sua velocidade. Porém, esse tipo de motor possui alto custo de manutenção. Sendo assim, o inversor de frequência se mostrou uma solução para variar a velocidade de motores de indução trifásicos.

“O inversor tipo fonte de tensão é capaz de converter uma tensão de CC de entrada em uma tensão de CA de saída, sendo a tensão de entrada proveniente de um circuito retificador (conversor CA/CC), de uma bateria ou de um conversor CC/CC” (ARAÚJO, 2011, p. 14).

O inversor de frequência possui circuitos eletrônicos que permitiu melhorar de forma significativa as partidas dos MITs. Uma parte desses circuitos permite o comando de abertura e fechamento de chaves semicondutoras de potência, sendo capaz de aumentar ou diminuir o nível de tensão e corrente, possibilitando a conversão da tensão alternada em contínua ou uma tensão contínua em alternada modulando a amplitude desejada. O inversor pode operar com a tensão, controlando a tensão de saída como uma fonte de tensão. Operando com a corrente, o inversor controla a saída como uma fonte de corrente.

**Figura 4** - Diagrama das etapas do inversor de frequência.



**Fonte:** SCHNEIDER ELECTRIC.

Conforme a Figura 4, o circuito retificador é composto por semicondutores que permitem a passagem de corrente em um sentido. A tensão alternada que passa pelo diodo é convertida em tensão contínua pulsante de onda completa. O sinal retificado (link CC) passa por um circuito de filtro, composto por capacitores, transformando em um sinal próximo do constante. O circuito inversor, composto por transistores, é controlado eletronicamente para operar em certa sequência para modular o sinal em uma onda de saída parecida com a senoidal de acordo com a frequência programada no equipamento pelo operador.

“A velocidade de rotação de um motor está relacionada à sua frequência e número de polos. Considerando o número de polos fixos ao se variar a frequência, varia-se proporcionalmente a velocidade de rotação deste motor” (CHEREM, 2016). Os modos de controle são as estratégias utilizadas para controlar o chaveamento dos transistores permitindo o acionamento do motor com determinado torque e velocidade. A seguir serão apresentados esses modos de controle.

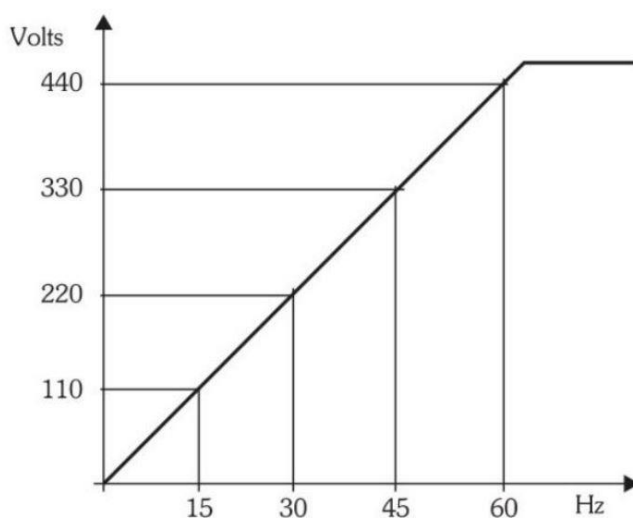
## 2.2.1 MODOS DE CONTROLE

### 2.2.1.1 CONTROLE ESCALAR

O Controle escalar utiliza a relação entre  $V/f$  para entregar uma tensão variável ao motor, por meio de uma variação da frequência, demonstrado no Gráfico 2. “O Controle escalar é relativamente simples de implementar, mas o acoplamento inerente origina resposta lenta e o sistema pode tornar-se instável devido aos efeitos do sistema de alta ordem (quinta ordem)” (ONOFRE; RIBEIRO; MELO, 2018). Dessa forma, a relação entre a tensão e a frequência que alimenta o motor tem que ser constante para manter o torque máximo.

A vantagem do controle  $V/f$  é a sua simplicidade e a necessidade de poucos ajustes. A colocação em funcionamento é rápida e simples, em geral, necessita de pouca ou nenhuma modificação. Além disso, nos casos em que a aplicação permite o ajuste da curva  $V/f$ , resulta em economia de energia (WEG, 2021, p. 9-1).

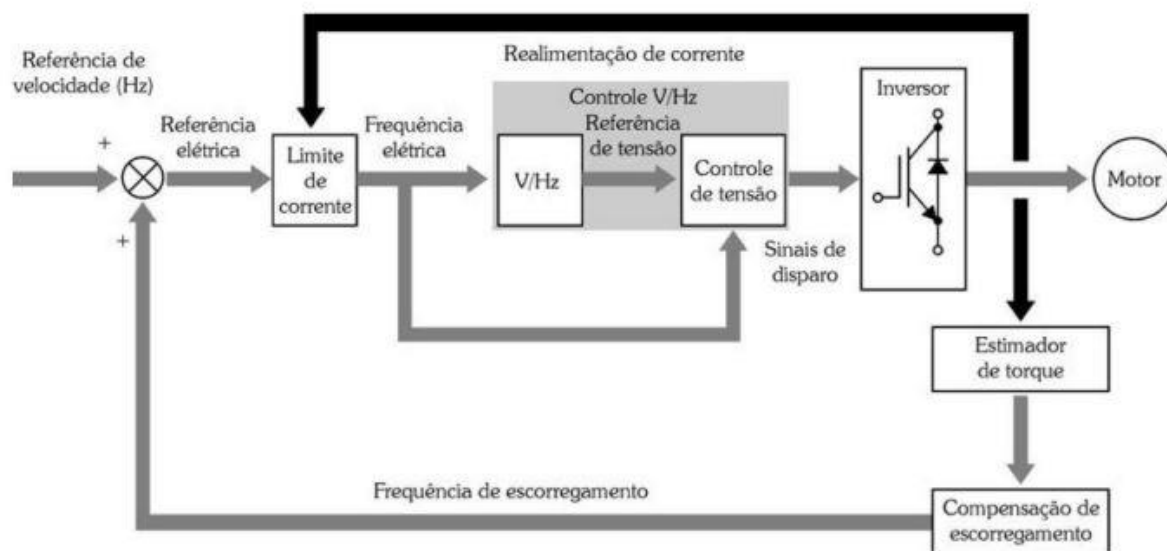
**Gráfico 2** - Gráfico tensão x frequência.



**Fonte:** FRANCHI.

O controle escalar se limita no controle da velocidade do motor, sem ter o controle do torque. Aplicado em MIT com rotor gaiola de esquilo, por apresentar um custo menor que o modo de controle vetorial. O inversor controla a velocidade do motor, de acordo com a figura 5.

**Figura 5** - Diagrama de blocos do controle escalar.



**Fonte:** FRANCHI.

O bloco Limite de corrente monitora a corrente do motor e altera a frequência quando a corrente ultrapassa um valor definido. O bloco V/Hz converte a corrente em um sinal de razão V/f para o bloco de Controle de tensão, os valores da tensão e frequência são retirados da placa de dados do motor. O bloco Controle de tensão opera através do ângulo dos sinais de disparo, garantindo a operação estável do motor. O bloco Compensação de escorregamento serve para melhorar o controle da velocidade.

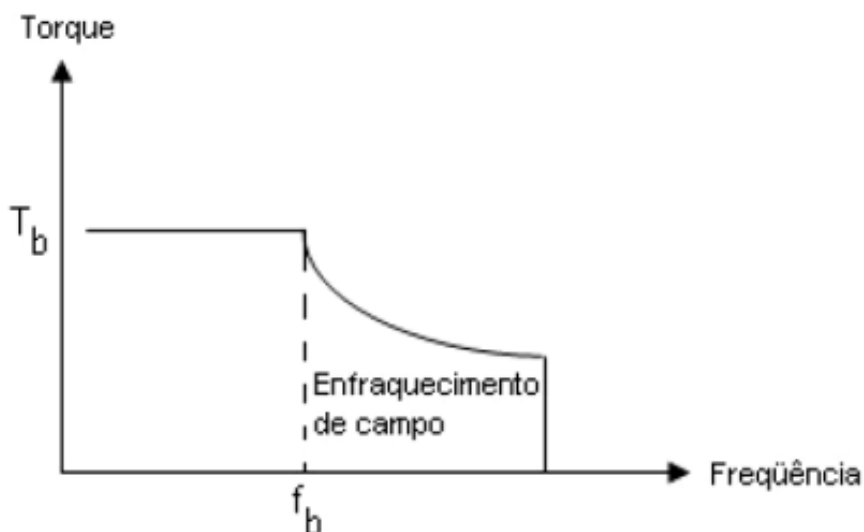
O ajuste da curva V/f torna-se necessário quando se deseja uma aproximação quadrática para economia de energia em bombas centrífugas e ventiladores, ou ainda em aplicações especiais: quando um transformador é usado entre o inversor e o motor ou o inversor é usado como uma fonte de alimentação (WEG, 2021, p. 9-5).

A economia de energia está relacionada diretamente na tensão de saída do inversor, em que a relação do fluxo no motor é alterada para reduzir as perdas de eficiência e aumentando seu rendimento, permitindo reduzir o ruído produzido e seu consumo energético.

“Controle V/f quadrático, no qual o fluxo no entreferro do motor é proporcional à frequência de saída até o ponto de enfraquecimento de campo” (WEG, 2009). Resultando uma capacidade de torque como uma função quadrática de velocidade.



**Figura 6** - Relação entre torque em função da frequência.



Fonte: RANIEL.

Conforme a Figura 6, o torque se mantém constante até a frequência nominal, passando desse valor, o motor perde torque de forma gradativa. “Como a potência é igual ao torque multiplicado pela rotação, a potência útil do motor cresce linearmente até a frequência nominal e permanece constante” (RANIEL, 2011).

A vantagem é a economia de energia no acionamento de cargas com torque resistente variável, devido as perdas do motor. Isto é, o controle escalar não é ideal para casos em que, além do controle de velocidade, seja necessário o controle de torque. Para estes casos o modo de controle indicado é o controle vetorial.

#### 2.2.1.2 CONTROLE VETORIAL

“O Controle Vetorial foi inventado no início dos anos 70, a demonstração de que o motor de indução poderia ser controlado como um motor CC de excitação separada, trouxe o verdadeiro nascimento do controle de alta performance de acionamentos CA” (ONOFRE; RIBEIRO; MELO, 2018). O motor deve fornecer um controle preciso para operar nessas condições. Os acionamentos em CC são teoricamente partidas ideais por causa da proporção entre o fluxo, a corrente e o torque.

O modo de controle vetorial é utilizado em atividades complexas em que mede as

correntes aplicadas no sistema, separando as componentes vetoriais em correntes diretas e em quadratura, transformando os valores obtidos em seu referencial síncrono. O controle do motor é obtido com as correntes desejadas e comparando-as com os valores reais. A corrente direta é referente ao fluxo do motor, enquanto a corrente em quadratura é referente ao torque.

Como estas correntes são representadas por vetores que giram na velocidade síncrona, quando vistas de um referencial estacionário, faz-se uma transformação de referencial, de forma a transformá-las para o referencial síncrono. No referencial síncrono estes vetores se transformam em valores CC proporcionais à amplitude dos respectivos vetores. Isto simplifica consideravelmente o circuito de controle. (WEG, 2021, p.109)

As vantagens desse modo de controle, além de proporcionar uma alta precisão de regulação de velocidade, permite uma alta performance dinâmica do motor, é que ele permite operar os motores em baixa velocidade com torque suave e sem oscilação, mesmo com uma carga conectado no eixo, para aplicação de tração ou posicionamento, o controle do torque é linear.

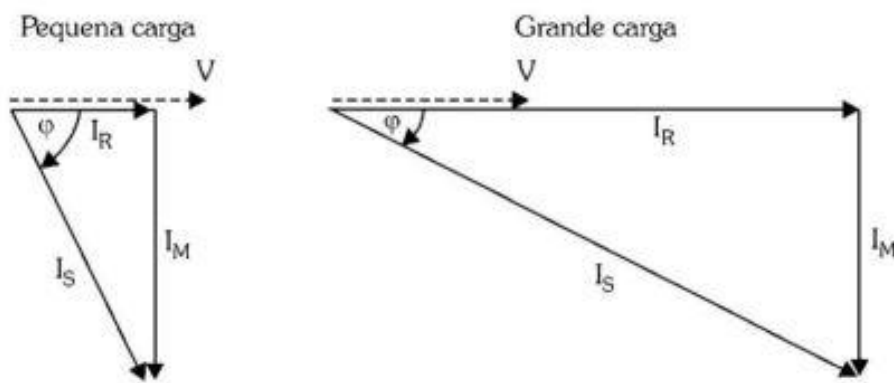
Devido ao fato de possuir muitas variáveis para ser levado em consideração, possibilitando um simples acionamento ou até aplicações específicas de partida necessitando de todos os parâmetros para um controle mais preciso e completo, exigindo mais energia de processamento do inversor de frequência.

Quando o motor parte em vazio, a corrente no estator é formada através da corrente magnetizante. O torque compensa as perdas por atrito e ventilação do motor e o escorregamento é próximo de zero.

Em condições de partir com pequena carga, a corrente do estator é a soma vetorial da corrente magnetizante com um aumento da corrente de torque, o escorregamento continua com um valor baixo nessa situação.

Para condições que possuem uma grande carga acoplada no motor, a corrente do estator é a soma vetorial da corrente magnetizante com um grande aumento do torque para movimentar a carga. O fator de potência aumenta, alcançando o fator de potência de carga nominal. A Figura 7 expressa as condições citadas anteriormente em somas vetoriais.

**Figura 7** - Vetores de corrente para diferentes condições de carga.



**Fonte:** FRANCHI.

Onde:

$I_S$  = Corrente do estator;

$I_M$  = Corrente magnetizante;

$I_R$  = Corrente de torque;

$V$  = Tensão;

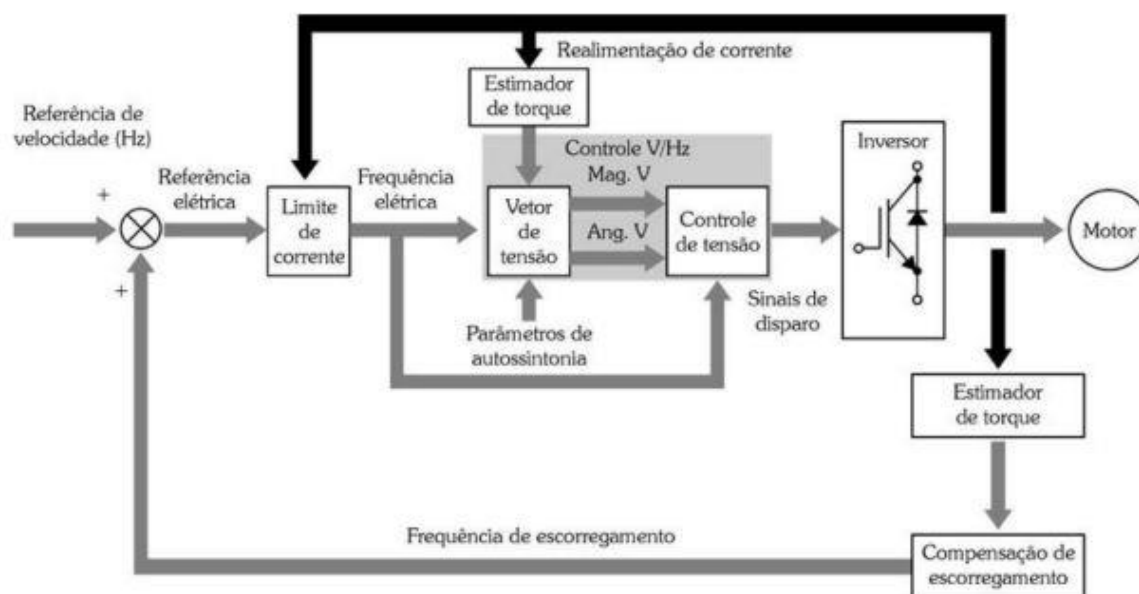
$\varphi$  = Ângulo do fator de potência.

O controle vetorial de malha aberta possui algumas limitações de torque em baixas rotações, aconselhado para a utilização em velocidades mais altas. Conhecido por controle *sensorless* (sem sensor), parecido com o controle escalar, opera como um dispositivo de controle de frequência para manter a velocidade do motor próxima da desejada.

Em comparação ao controle escalar, utiliza a análise da magnitude e ângulo entre tensão e corrente para melhorar o controle de velocidade. O ângulo da tensão define a quantidade de corrente que vai para o motor através do bloco Estimador de torque.

Conforme a Figura 8, o bloco Estimador de torque é responsável por determinar a porcentagem da corrente em fase com a tensão, utilizado para estimar o escorregamento para melhorar o controle de velocidade na carga.

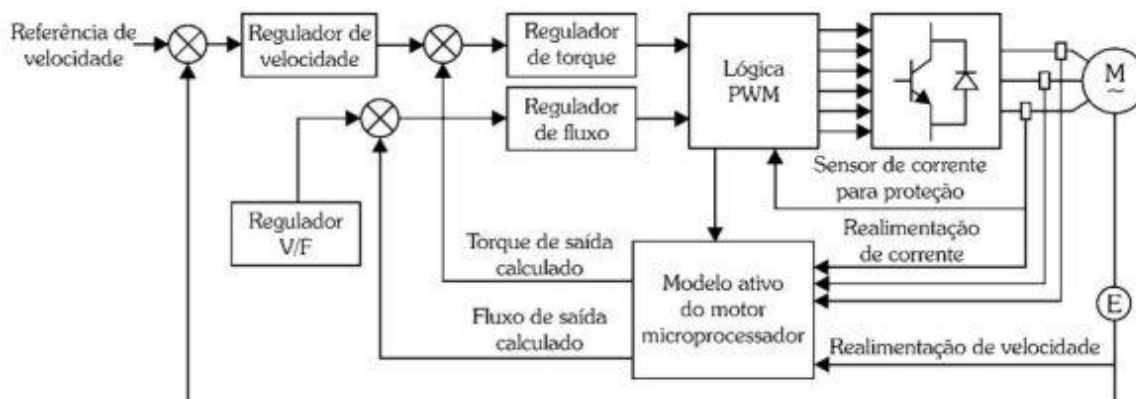
**Figura 8** - Diagrama de blocos do controle vetorial em malha aberta.



Fonte: FRANCHI.

Sistemas com realimentação são utilizados com *encoders* (transdutor) e sensores de corrente. A Figura 9 demonstra que o comando Referência de velocidade é fornecido pelo operador, sendo enviado para um circuito comparador que fornece o sinal de controle para o bloco Regulador de velocidade, possibilitando acelerar ou desacelerar o motor. A malha de controle de velocidade permite controlar a frequência de saída sendo proporcional com a velocidade, enquanto a malha de torque é responsável por controlar a corrente de entrada no motor proporcional ao torque. O bloco Regulador V/f é uma malha de controle para o fluxo de corrente de forma separada do sistema de realimentação.

**Figura 9** - Diagrama de blocos do controle vetorial com realimentação.



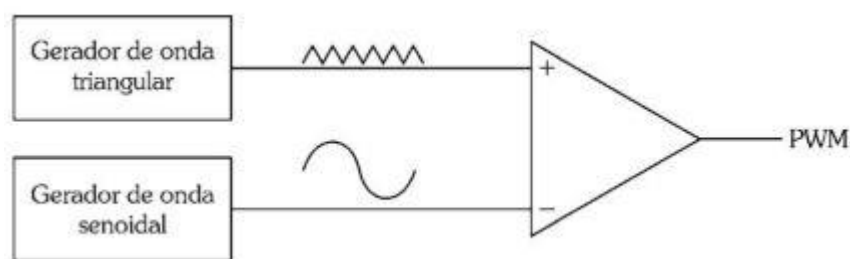
Fonte: FRANCHI.

### 2.2.2 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSOS (PWM)

Essa é uma forma mais precisa de controlar os circuitos analógicos com microcontrolador de saídas digitais. A modulação utiliza transistores de potência para gerar ondas de tensão na saída do inversor de frequência. Essas ondas são sempre quadradas, para obter uma onda senoidal, os transistores operam chaveando modulando a largura de pulso.

As funções do PWM são efetivas para combinação de uma onda triangular e uma senoidal para gerar a onda de saída quadrada através da utilização de microprocessadores. A Figura 10 ilustra a combinação das ondas triangular e senoidal.

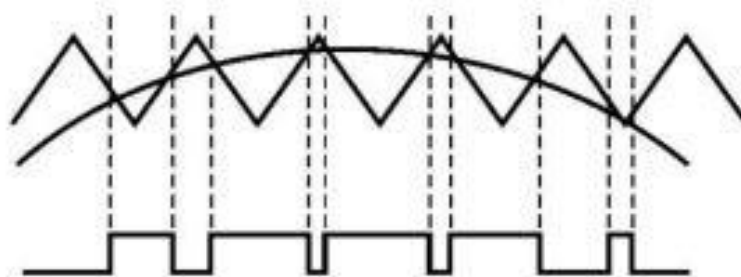
**Figura 10** - Geração do PWM pela combinação de ondas.



**Fonte:** FRANCHI.

A onda triangular apresentada na Figura 11 representa a frequência de chaveamento e a onda senoidal gera um sinal responsável em determinar a largura de cada pulso, resultando na tensão RMS na saída do inversor de frequência.

**Figura 11** - Sinal de saída do gerador PWM.

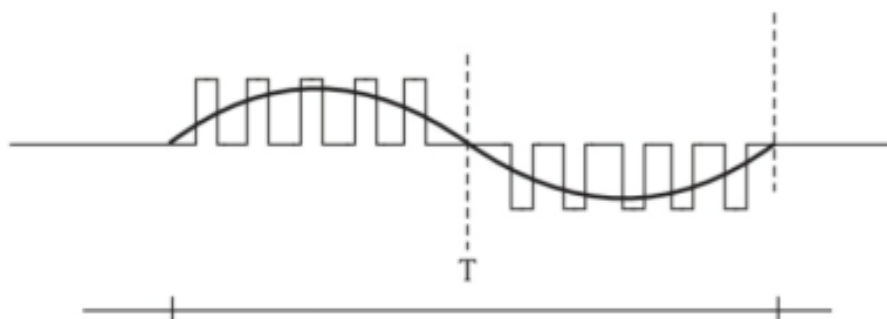


**Fonte:** FRANCHI.

A Figura 12 mostra a modulação do sinal de tensão em forma de senoide, a tensão gerada na saída do inversor varia de acordo com a modulação PWM fornecendo um sinal de corrente senoidal para o motor. O funcionamento dessa modulação se deve através da

transformação da tensão CC em tensão CA, permitindo o acionamento do MIT podendo variar sua velocidade com maior facilidade.

**Figura 12** - Modulação PWM de saída para o motor.



**Fonte:** FRANCHI.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Durante a fase inicial deste trabalho de conclusão de curso, teve por meio de pesquisas bibliográficas, sobre a utilização dos inversores de frequência para condicionar os sinais de tensão e corrente de saída para controlar o torque e velocidade do motor durante sua operação.

Após o desenvolvimento da parte experimental, a construção do circuito de acionamento e estrutura de frenagem para simular diversas cargas, utilizando os conhecimentos obtidos através de pesquisas. A realização desse ensaio, possuiu as seguintes etapas:

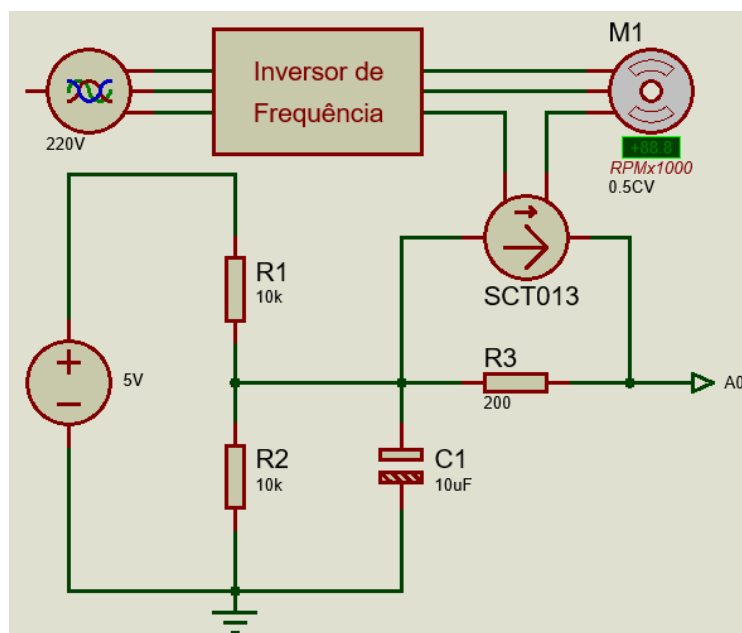
- Montagem do acionamento de acordo com o diagrama de ligação;
- Teste de acionamento e resposta do motor;
- Parametrização para modo de controle escalar;
- Após coleta de dados, parametrização para modo de controle vetorial;
- Após coleta de dados, realização de estudo de caso em relação aos valores obtidos em cada modo de controle.

#### 3.1 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Para coletar os valores de corrente e rotação do motor para análise, foi utilizado para realizar essa coleta sem interferir no circuito de acionamento do motor, o sensor não invasivo de corrente SCT-013 (Figura 15) e o tacômetro digital POL-19 (Figura 16). O microprocessador Arduino Mega 2560 (Figura 17), sendo utilizado para receber os dados do SCT-013.

Onde o sensor de corrente foi montado em uma *protoboard* com circuito divisor de tensão (Figura 13) e utiliza a biblioteca EmonLib para calcular a corrente através do sinal obtido do sensor, enquanto o tacômetro foi utilizado próximo do eixo do motor para coletar a rotação de acordo com a frequência e carga utilizada no acionamento do motor.

**Figura 13** – Diagrama de implementação do circuito do sensor de corrente ao sistema.



**Fonte:** Autor.

A Figura 14 demonstra o código que foi trabalhado para obter os valores de corrente do sensor.

**Figura 14** - Código implementado no Arduino.

```

1  #include "EmonLib.h"
2
3  EnergyMonitor SCT;
4
5  int pinSCT = A0; //Pino de entrada dos dados do sensor
6
7  void setup()
8  {
9      SCT.current(pinSCT, 18.1818); //Pino de entrada e valor de calibração do sensor
10
11     Serial.begin(9600);
12 }
13
14 void loop()
15 {
16     double Irms = SCT.calcIrms(1480); //Calcula corrente RMS
17
18     Serial.print("Corrente -> ");
19     Serial.print(Irms); //Imprime o valor obtido do calculo da corrente RMS
20     Serial.println("A");
21     delay(500);
22 }
23

```

**Fonte:** Autor.



### 3.1.1 SENSOR DE CORRENTE

Utilizando o sensor de corrente SCT013 da YHDC, permite a leitura de 50mA a 100A. O sensor funciona através de um transformador de corrente com uma fácil abertura do seu núcleo de ferrite para inserir o cabo que será realizada a medição. De maneira que não é necessário abrir o circuito para medição.

**Figura 15** - Sensor de corrente SCT-013.



Fonte: YHDC.

### 3.1.2 TACÔMETRO

Foi utilizado o tacômetro digital duplo (ótico e contato) POL-19 da Politerm, permite fazer a medição da quantidade de rotações por minuto do motor. O instrumento funciona detectando fenômenos repetitivos, sendo utilizado um adesivo refletivo colado no eixo do motor, registrando essas repetições para aferir a velocidade linear do eixo.

**Figura 16** - Tacômetro digital POL-19.

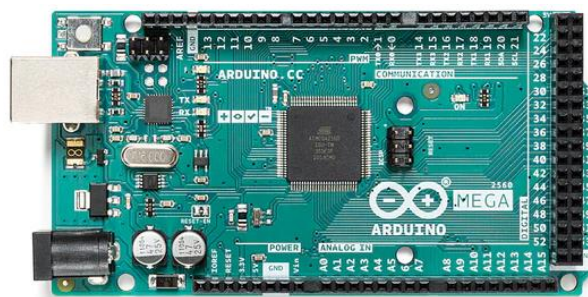


Fonte: POLITERM.

### 3.2 ARDUINO MEGA 2560

Para registrar os valores gerados através do sensor de corrente estão sendo recebidos na entrada analógica A0, responsável em converter o sinal analógico do sensor em um sinal digital.

**Figura 17** - Arduino Mega 2560



**Fonte:** ARDUINO.

**Disponível em:** <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>

### 3.3 INVERSOR DE FREQUÊNCIA WEG CFW-300

Utilizado para estar realizando a partida eletrônica do motor de forma proporcional ao parâmetro de controle programado para o acionamento de acordo com a frequência injetada pelo usuário. A Figura 18 mostra o inversor de frequência utilizado no projeto.

**Figura 18** - Inversor de frequência CFW-300.



**Fonte:** WEG.

O CFW-300 foi parametrizado para controlar nos modos escalar e vetorial a partida do MIT WEG W22 com fechamento em triângulo( $\Delta$ ) e com as seguintes especificações conforme a Figura 19.

**Figura 19** - Placa do motor utilizado.



**Fonte:** Autor.

**Quadro 1.** Recursos planejados para implementar o projeto. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

| Descrição  | Unidade | Quantidade | Valor        |                   |
|--|---------|------------|--------------|-------------------|
|  |         |            | Unitário     | Total             |
| Cabo de aço 1/16" revestido em PVC 3m            | Metro   | 1          | R\$ 23,99    | R\$ 23,99         |
| Balança digital tipo gancho 50Kg                 | Unidade | 1          | R\$ 19,60    | R\$ 19,60         |
| Dobradiça para porta 1mm aço carbono polido      | Unidade | 1          | R\$ 9,00     | R\$ 9,00          |
| Cabo de madeira de pinus 100x2,2cm               | Unidade | 1          | R\$ 0,00     | R\$ 0,00          |
| Sarrafo de MDF 475x65x35mm                       | Unidade | 1          | R\$ 0,00     | R\$ 0,00          |
| Sarrafo de MDF 430x60x20mm                       | Unidade | 3          | R\$ 0,00     | R\$ 0,00          |
| Sarrafo de MDF 920x60x20mm                       | Unidade | 2          | R\$ 0,00     | R\$ 0,00          |
| Placa de MDP 132x51x1,5cm                        | Unidade | 2          | R\$ 0,00     | R\$ 0,00          |
| Piso pastilhado preto PVC 500x500x25mm           | Unidade | 1          | R\$34,00     | R\$34,00          |
| Placa de borracha 100x100x25mm dureza 70 Shore A | Unidade | 1          | R\$ 27,83    | R\$ 27,83         |
|  |         |            | <b>TOTAL</b> | <b>R\$ 114,42</b> |

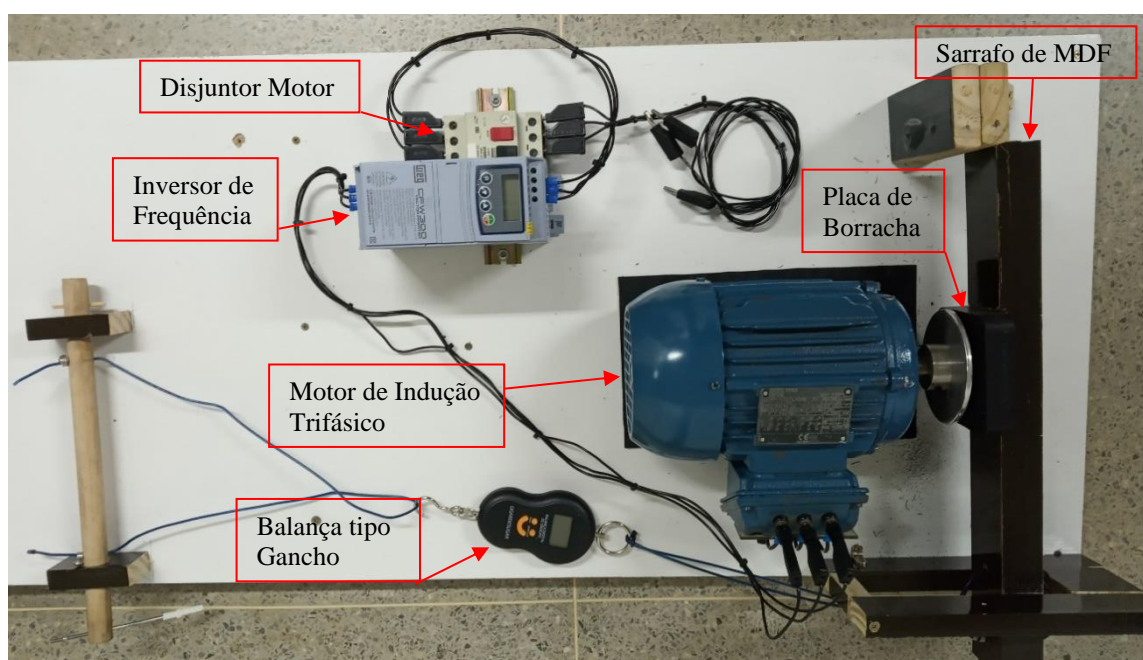
**Quadro 2.** Recursos planejados para implementar o projeto fornecidos pelo IFTM e professores. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

| <b>Descrição</b>                             | <b>Unidade</b> | <b>Quantidade</b> |
|--|----------------|-------------------|
| Motor WEG W22 0,5 CV 6P 80 3F 220/380 V 60Hz | Unidade        | 1                 |
| Inversor de Frequência WEG CFW300            | Unidade        | 1                 |
| Cabos 2,5mm                                  | Metro          | 10                |
| Disjuntor Motor                              | Unidade        | 1                 |
| Arduino Mega 2560                            | Unidade        | 1                 |
| Sensor de Corrente YHDC SCT-013              | Unidade        | 1                 |
| Tacômetro Digital Politem POL-19             | Unidade        | 1                 |
| Multímetro Digital Agilent U1233A            | Unidade        | 1                 |
| Resistência 100Ω                             | Unidade        | 2                 |
| Resistência 10kΩ                             | Unidade        | 2                 |
| Capacitor 10μF                               | Unidade        | 1                 |

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para realizar a execução dos testes, foi montada uma estrutura (Figuras 20 e 21) com os materiais descritos nos Quadros 1 e 2, em que fixou o inversor de frequência, o motor e um sarrafo de MDF para simulação de carga no eixo do motor. Foi utilizado o laboratório do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro – Campus Paracatu para fazer os testes e a coleta de dados.

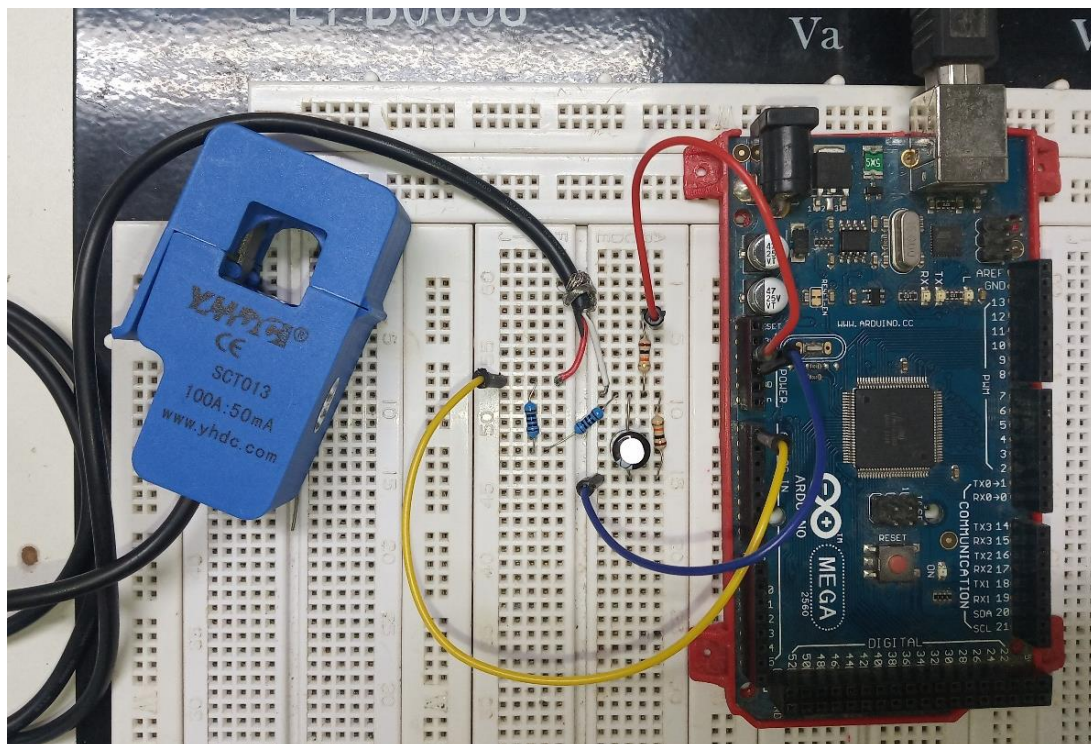
**Figura 20** - Estrutura desenvolvida para simulação de carga.



**Fonte:** Autor.



**Figura 21** - Circuito utilizado para implementação do sensor de corrente.



Fonte: Autor.

Para os testes, foram utilizados dois meios de medição de corrente para validar os valores obtidos do sensor de corrente, o multímetro digital Agilent U1233A com precisão de 1% e três dígitos significativos após a virgula para o valor de fundo de escala em 6A.

O parâmetro P003 do inversor de frequência foi utilizado como outro meio de medição de corrente para comparação dos valores obtidos, devido a saturação do transformador de corrente interno do equipamento ser de 6,4A (valor programado no parâmetro P135). A coleta de dados do sensor de corrente utilizou uma taxa de 1480 amostras analisadas e sendo processada pelo microcontrolador com os valores sendo atualizados a cada 0,5 segundo e enviados para um computador para visualização do usuário.

O Quadro 3 mostra a comparação entre os parâmetros utilizados para a utilização dos modos de controle escalar e vetorial. Demonstrando a diferença na complexidade na parametrização em relação aos dados necessários para o acionamento do motor em cada modo de controle.

**Quadro 3** - Comparativo de parametrização. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

| Escalar                         | Vetorial                        |
|---------------------------------|---------------------------------|
| P135 – Corrente máxima de saída | P135 – Corrente máxima de saída |
| P296 – Tensão nominal da rede   | P296 – Tensão nominal da rede   |
|                                 | P399 – Rendimento nominal*      |
|                                 | P400 – Tensão nominal*          |
|                                 | P401 – Corrente nominal*        |
|                                 | P402 – Rotação do motor*        |
|                                 | P403 – Frequência nominal*      |
|                                 | P404 – Potencia nominal*        |
|                                 | P407 – Fator de potência*       |
|                                 | P408 – Autoajuste               |

\*Dados de placa do motor

#### 4.1 RESULTADOS

Os resultados obtidos dos acionamentos referentes aos modos de controle escalar e vetorial, estão representados respectivamente nos Quadros 4 e 5. Os valores obtidos através do sensor de corrente foram próximos aos valores medidos pelo inversor de frequência e com o multímetro, validando o código implementado para medição de corrente com o sensor.

**Quadro 4.** Dados obtidos pelos instrumentos de medição no modo de controle escalar. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

| Carga (Kg) | Escalar                 |        |          |                          |                         |        |          |                                |                         |        |          |                                |
|------------|-------------------------|--------|----------|--------------------------|-------------------------|--------|----------|--------------------------------|-------------------------|--------|----------|--------------------------------|
|            | 30Hz                    |        |          |                          | 45Hz                    |        |          |                                | 60Hz                    |        |          |                                |
|            | Medição de corrente (A) |        |          | Medição de rotação (RPM) | Medição de corrente (A) |        |          | Medição de rotação (RPM)       | Medição de corrente (A) |        |          | Medição de rotação (RPM)       |
|            | Multímetro (TrueRMS)    | Sensor | Inversor |                          | Multímetro (TrueRMS)    | Sensor | Inversor |                                | Multímetro (TrueRMS)    | Sensor | Inversor |                                |
| 0          | 2,08                    | 2,05   | 2,2      | 600                      | 2,22                    | 2,23   | 2,3      | 901                            | 2,27                    | 2,28   | 2,2      | 1200                           |
| 1          | 1,98                    | 1,87   | 2,1      | 559                      | 2,09                    | 2,08   | 2,2      | 870                            | 2,14                    | 2,17   | 2,1      | 1188                           |
| 2          | 2,03                    | 1,98   | 2,2      | 538                      | 2,13                    | 2,1    | 2,2      | 849                            | 2,18                    | 2,19   | 2,1      | 1170                           |
| 3          | 2,55                    | 2,47   | 2,6      | 454                      | 2,26                    | 2,22   | 2,4      | 832                            | 2,4                     | 2,45   | 2,4      | 1132                           |
| 5          | 4                       | 4,6    | 4,3      | Rotor bloqueado          | 5,2                     | 5,2    | 5,6      | Valor muito baixo para medição | 6,06*                   | 8,12   | 6,3**    | Valor muito baixo para medição |
| 8          | 4                       | 4,7    | 4,3      | Rotor bloqueado          | 5,5                     | 5,6    | 5,5      | Valor muito baixo para medição | 6,06*                   | 8,36   | 6,4**    | Valor muito baixo para medição |

\*Valor limitado devido ao valor do fundo de escala do instrumento.

\*\*Valor limitado devido a saturação do TC do inversor de frequência.

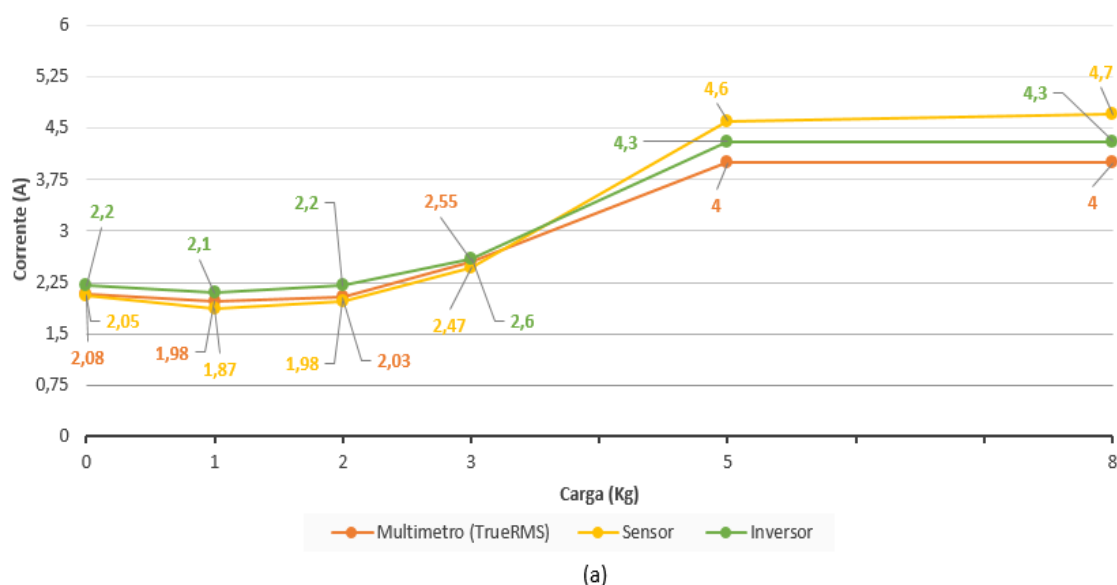
**Quadro 5.** Dados obtidos pelos instrumentos de medição no modo de controle vetorial. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

| Carga (Kg) | Vetorial                |        |          |                          |                         |        |          |                          |                         |        |          |                          |
|------------|-------------------------|--------|----------|--------------------------|-------------------------|--------|----------|--------------------------|-------------------------|--------|----------|--------------------------|
|            | 30Hz                    |        |          |                          | 45Hz                    |        |          |                          | 60Hz                    |        |          |                          |
|            | Medição de corrente (A) |        |          | Medição de rotação (RPM) | Medição de corrente (A) |        |          | Medição de rotação (RPM) | Medição de corrente (A) |        |          | Medição de rotação (RPM) |
|            | Multímetro (TrueRMS)    | Sensor | Inversor |                          | Multímetro (TrueRMS)    | Sensor | Inversor |                          | Multímetro (TrueRMS)    | Sensor | Inversor |                          |
| 0          | 1,87                    | 1,86   | 1,9      | 610                      | 1,91                    | 1,92   | 2        | 901                      | 1,94                    | 1,96   | 2        | 1200                     |
| 1          | 2                       | 1,99   | 2,1      | 632                      | 1,9                     | 1,95   | 2        | 907                      | 1,92                    | 1,9    | 2        | 1190                     |
| 2          | 2,1                     | 2,09   | 2,2      | 635                      | 2,14                    | 2,12   | 2,2      | 920                      | 2                       | 2,07   | 2,1      | 1197                     |
| 3          | 2,4                     | 2,36   | 2,5      | 648                      | 2,25                    | 2,29   | 2,4      | 928                      | 2,1                     | 2,14   | 2,2      | 1200                     |
| 5          | 3,2                     | 3,35   | 3,4      | 587                      | 2,9                     | 3,02   | 3        | 910                      | 2,8                     | 2,97   | 2,9      | 1200                     |
| 8          | 5,9                     | 6,2    | 6        | 20                       | 5,9                     | 6,3    | 6,4      | 22                       | 6                       | 6,4    | 6,4      | 52                       |

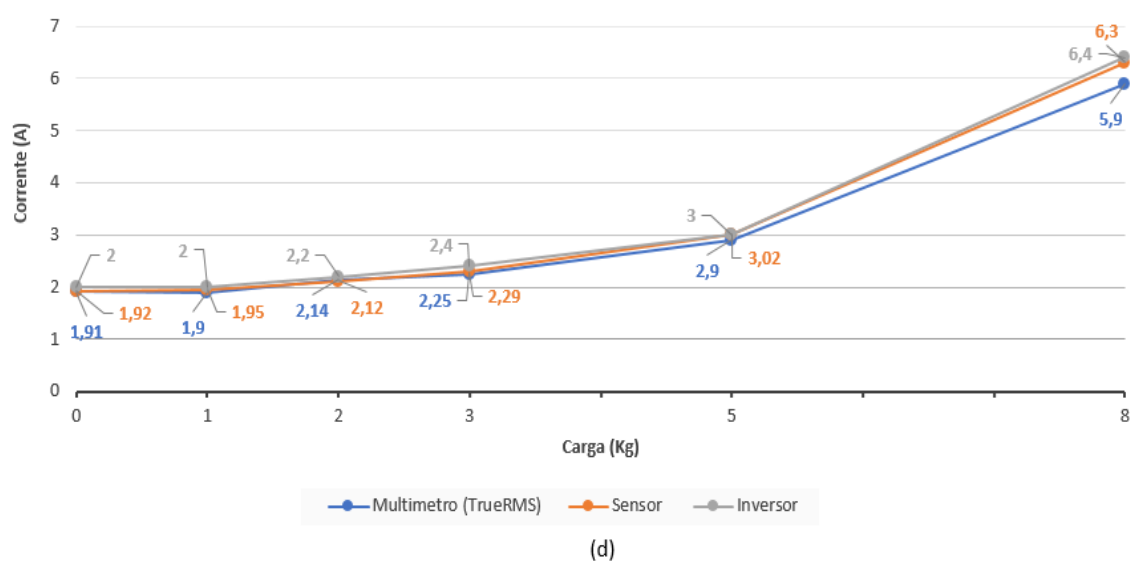
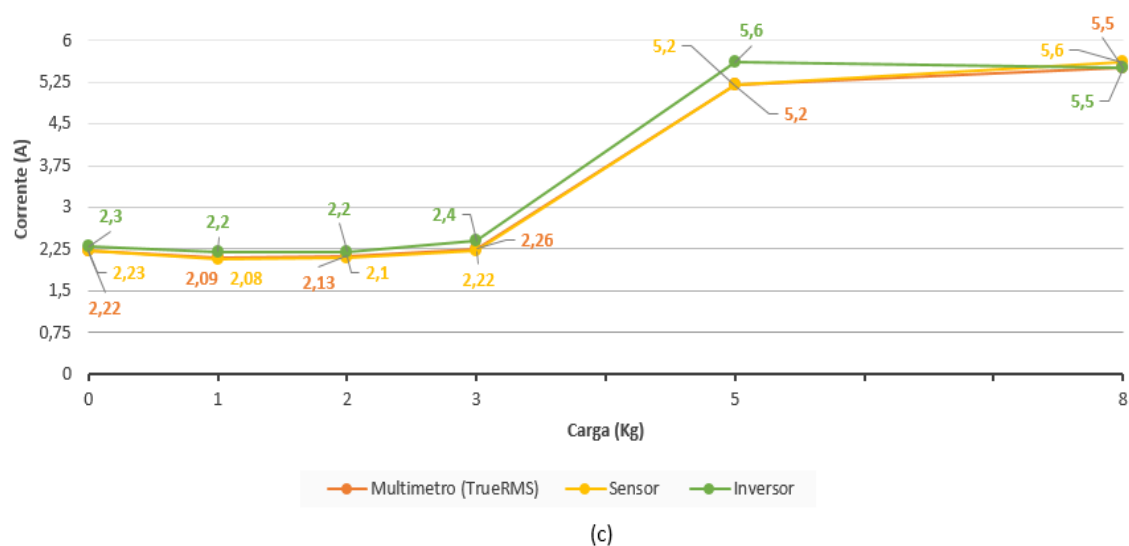
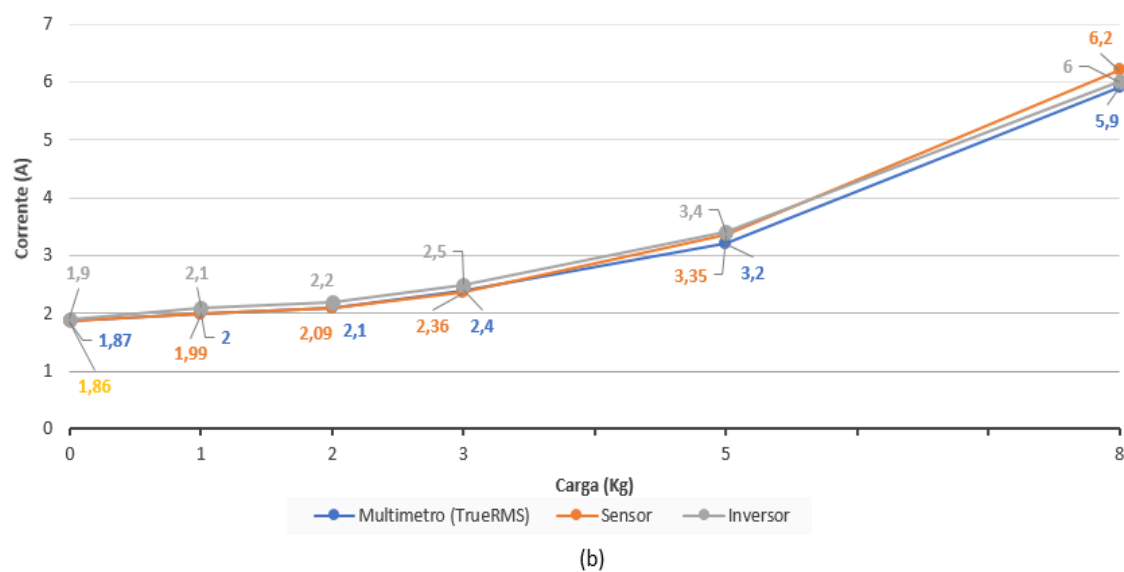
Na sequência serão apresentados os gráficos com base nos dados apresentados nos Quadros 4 e 5.

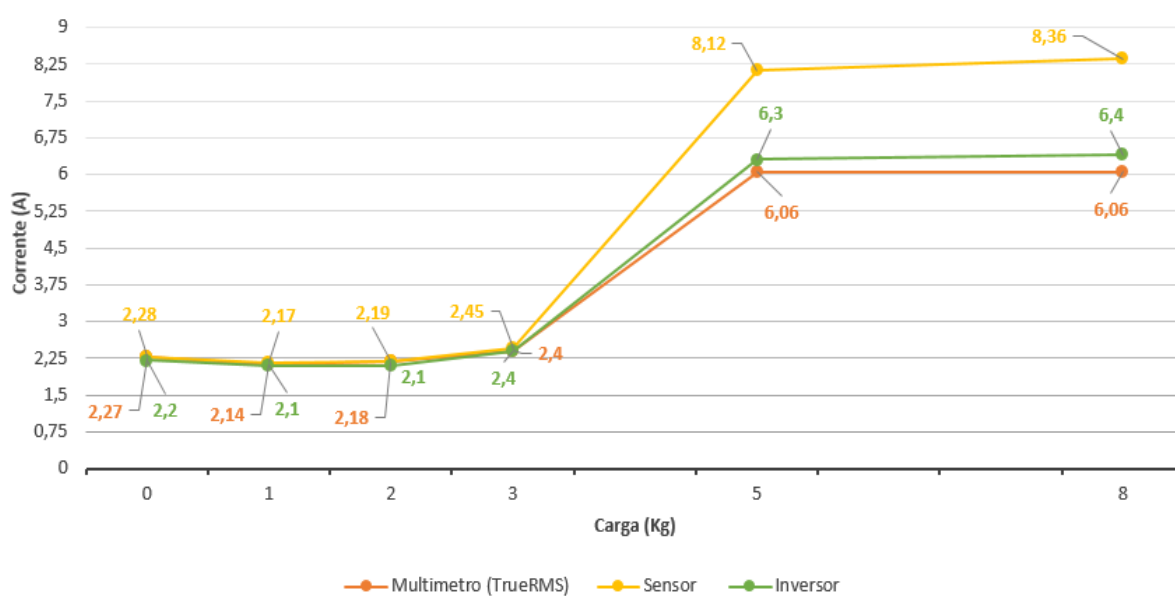
Os Gráficos 3 (a) e (b) apresentam os valores coletados dos instrumentos de medição conforme o aumento de carga no instante de partida do motor operando respectivamente no modo de controle escalar e vetorial em 30Hz. Os Gráficos 3 (c) e (d) apresentam os valores coletados respectivamente no modo de controle escalar e vetorial operando em 45Hz. Os Gráficos 3 (e) e (f) apresentam os valores coletados respectivamente no modo de controle escalar e vetorial, operando em 60Hz.

**Gráfico 3** – Representação gráfica dos valores de corrente demonstrados nos quadros 3 e 4.

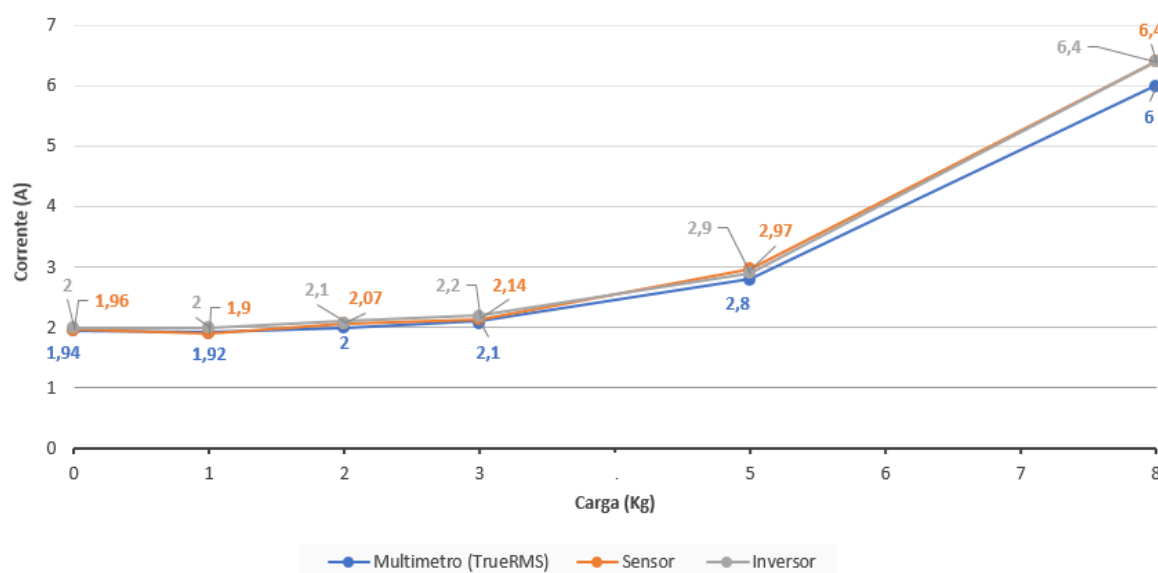








(e)

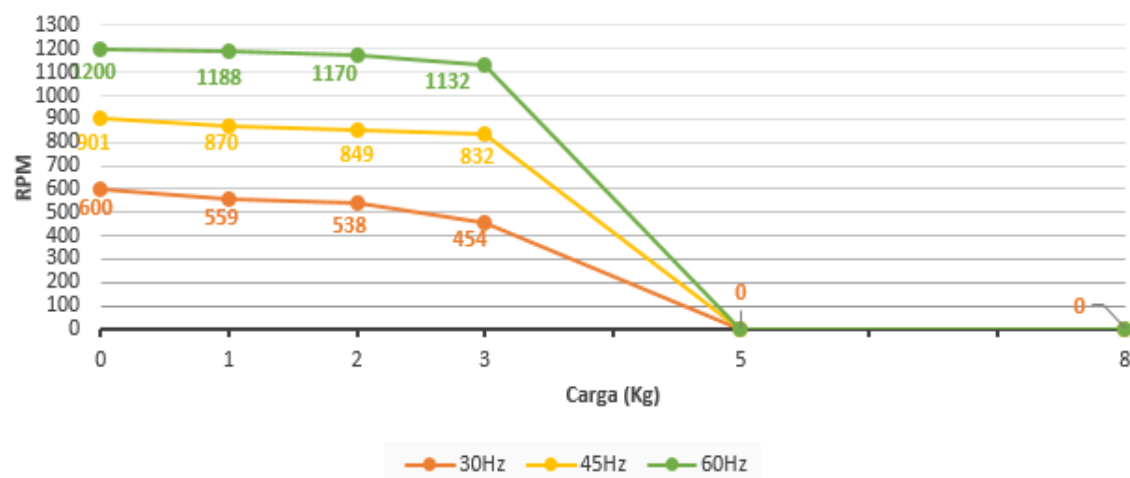


(f)

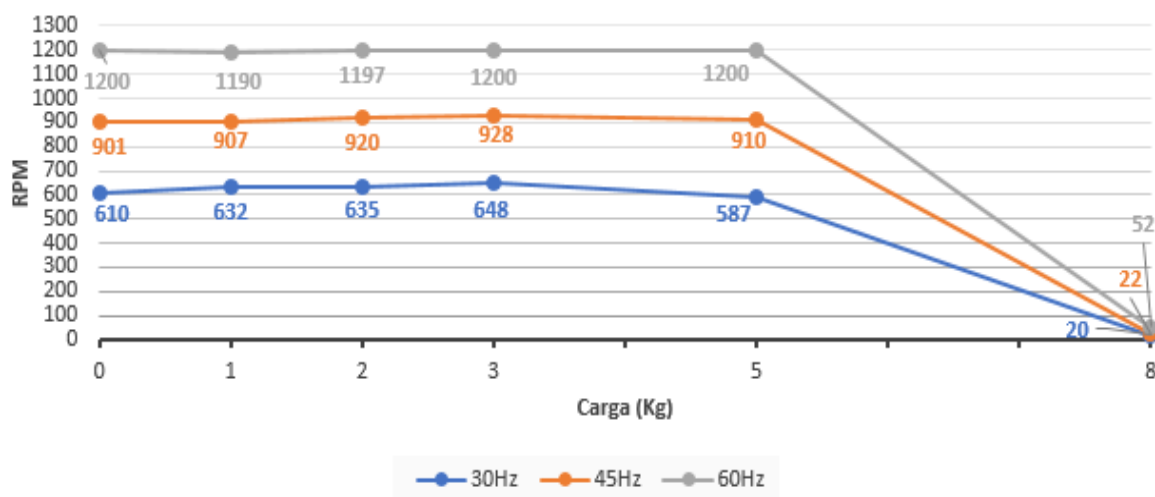
Fonte: Autor.

Os Gráficos 4 (a) e (b) apresentam os valores obtidos através do tacômetro diante o aumento de carga no instante de partida do motor operando respectivamente no modo de controle escalar e vetorial.

**Gráfico 4** - Representação gráfica dos valores de RPM demonstrados nos quadros 3 e 4.



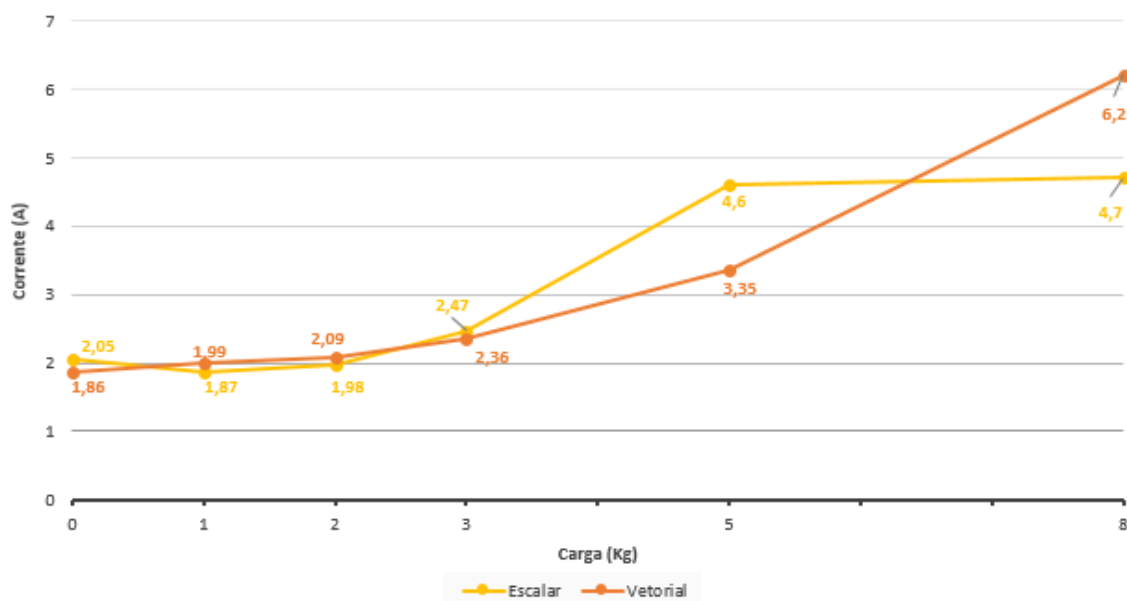
(a)



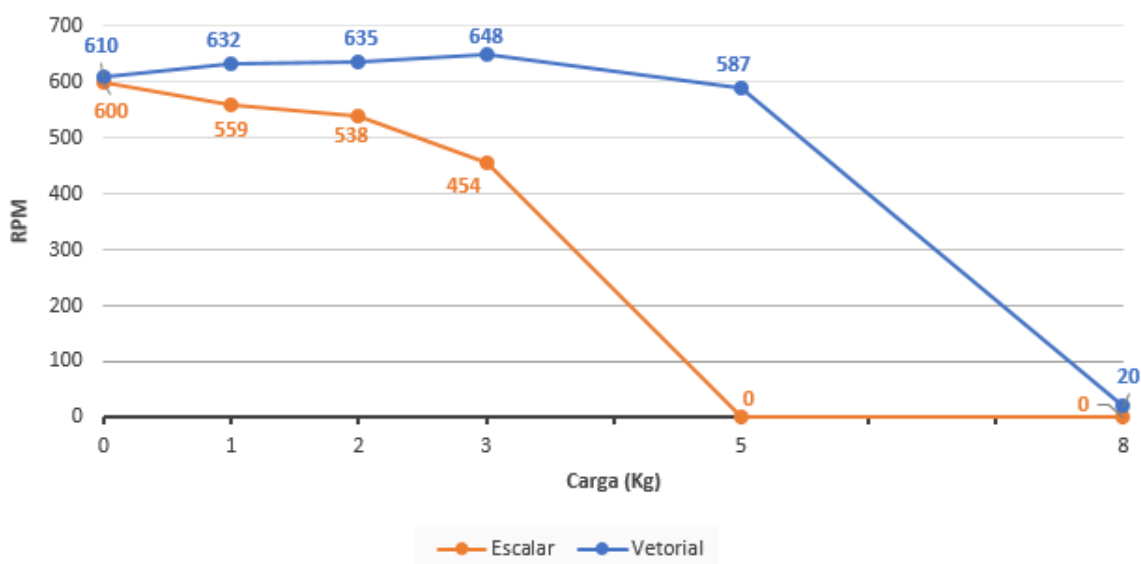
(b)

**Fonte:** Autor.

Para análise de comparação dos dados, foi escolhido os valores obtidos com o acionamento em 30Hz. Analisando os resultados obtidos durante os testes, foi possível observar no Gráfico 5 que a corrente consumida em ambos os modos de controle com uma carga de até 3Kg na ponta do eixo apresentou valores muito próximos. Porém, os valores de rotação do motor apresentado no Gráfico 6, demonstram uma queda significativa da RPM do motor no modo de controle escalar.

**Gráfico 5 - Sensor de corrente com operação em 30Hz.**

Fonte: Autor.

**Gráfico 6 - Rotação do motor com operação e 30Hz.**

Fonte: Autor.

A partir do valor de carga em 5Kg, a corrente no modo de controle escalar teve um aumento expressivo de 2,13A em relação a medição anterior, mas não teve torque o suficiente para tirar o eixo do motor da inércia. Como último teste, realizou-se o acionamento com uma carga de 8Kg. Apesar do eixo do motor continuar bloqueado por causa da sobrecarga, o valor da corrente não apresentou alteração significativa.

Enquanto no modo de controle vetorial, com uma carga de 5Kg, ocorreu um aumento de corrente para manter a rotação do motor próxima da nominal para essa faixa de frequência, para a carga de 8Kg, a corrente apresentou um aumento significativo para conseguir tirar o motor da inércia alcançando o valor de 20 RPM, chegando próximo ao valor de saturação do TC do inversor tendendo a falha de sobrecarga no eixo do motor.

Nas Figuras 22, 23 e 24 (a) apresentam valores no modo de controle escalar, enquanto as Figuras 22, 23 e 24 (b) apresentam os valores do modo de controle vetorial. Comparando os valores obtidos respectivamente em 60Hz com partida do motor a vazio.

**Figura 22** - Comparação da medição de corrente no inversor de frequência em 60Hz.



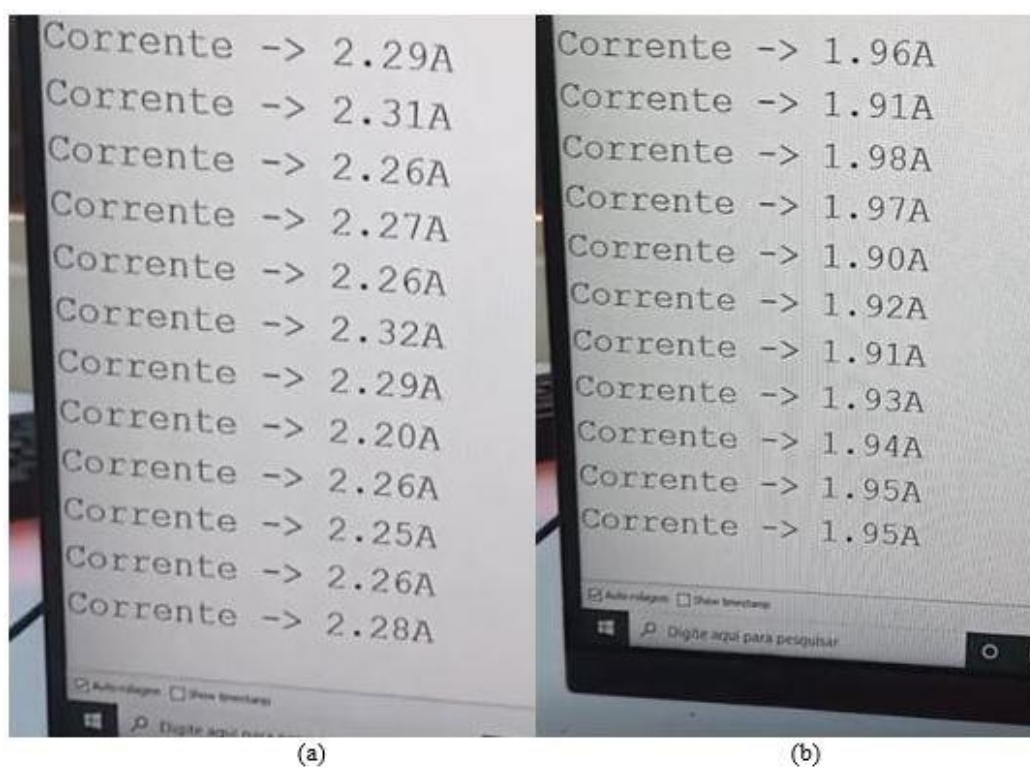
**Fonte:** Autor.

**Figura 23** - Comparação da medição de corrente no multímetro em 60Hz.



Fonte: Autor.

**Figura 24** - Comparação da medição no sensor de corrente em 60Hz.



Fonte: Autor.

Analisando os valores apresentados nas Figuras 22, 23 e 24, foi possível observar que o motor operando com o eixo livre, o modo de controle vetorial consegue controlar melhor o torque através de um algoritmo que estima a velocidade a corrente de saída, realizando medições de tensão e corrente para alcançar o valor inserido no parâmetro de rotação nominal do motor (P402). Permitindo que o motor mantenha sua rotação mais alta que a nominal para a faixa de frequência estipulada quando comparado com o modo de controle escalar, porém com valores de correntes menores proporcionando uma economia de energia sem perder o torque.

## 4.2 DISCUSSÃO

Após a realização de testes e coleta de dados sobre cada resposta dos modos de controle, será apresentada uma discussão sobre os resultados obtidos.

Com os valores de corrente, o sensor de corrente utilizado (SCT-013) demonstrou uma eficiência de 96% e relação aos valores obtidos do multímetro, a faixa de medição da corrente foi suficiente para realizar os testes. A utilização do Arduino Mega 2560 para registrar os valores obtidos pelo sensor, permitiu a coleta de 1480 amostras registradas através do código (Figura 14), obtidos pelo sensor de corrente para cada aquisição de dados do sistema.

Através desses valores obtidos com o sensor de corrente aplicado no microcontrolador, foi possível plotar gráficos para realizar as comparações e analisar como que os modos de controle operam o motor para controlar seu acionamento para uma determinada atividade, proporcionando uma partida ideal mantendo o torque para uma carga sem ter solavancos como uma partida direta por exemplo.

## 5 CONCLUSÃO

O trabalho alcançou seu objetivo de apresentar uma base de pesquisa teórica e através do experimento prático para análise de comparação com instrumentos de medição para aferir os resultados encontrados.

Foi demonstrada a eficiência do modo controle vetorial diante o modo de controle escalar. Com base a pesquisa e o experimento, pode demonstrar que o modo de controle escalar deve ser utilizado em atividades em que o controle a velocidade está condicionado a relação  $V/f$  possibilitando um acionamento mais rápido, poucas parametrizações necessárias para estar pronto para operação e com pequenas cargas durante o processo. Enquanto o modo de controle vetorial, utiliza diversos parâmetros específicos para estar inserindo os dados do motor que será acionado e permite a utilização de software de controle alternando entre a relação  $V/f$  para manter o torque alto e se adaptando de acordo com a carga na ponta do eixo.

Pelo o que foi desenvolvido para os testes, o inversor de frequência permitiu uma fácil parametrização para realizar os acionamentos, comparação dos valores de corrente demonstrado pelo equipamento em relação ao multímetro e o sensor de corrente e testes de sobrecarga do eixo do motor para estar analisando a resposta do inversor de frequência para essa condição.

Diante as situações apresentadas, foi possível analisar o comportamento do inversor de frequência em cada modo de controle, concluindo que em situações que exigem um tracionamento de grandes cargas, o controle vetorial consegue compensar de forma eficiente as oscilações no valor do conjugado do motor, quando ocorre uma variação repentina da carga, proporcionando uma maior precisão no controle da velocidade com mudanças suaves na velocidade, aumentando o desempenho dinâmico durante a operação.

Como sugestão para trabalhos futuros, a análise dos valores de RPM obtidos no modo vetorial. Explicando o motivo da velocidade ser superior ao valor nominal para as determinadas frequências de operação.



## 6 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Amanda Guerra de, 2011, Controle vetorial de um motor de indução trifásico aplicado em sistemas de posicionamento. Dissertação de mestrado, UFPB, João Pessoa.

CHEREM, Lucas Braga, 2016, Avaliação do uso de inversor de frequência em estação elevatória de água. Dissertação de mestrado, Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins, Palmas.

FRANCHI, Claiton Moro. Acionamentos Elétricos. 4. Ed. São Paulo: Editora Érica, 2008

FRANCHI, Claiton Moro. Inversores de Frequência: Teoria e Aplicações. 2. ed. 8ª reimpressão São Paulo: Editora Érica, 2013.

ONOFRE, Dr. João; RIBEIRO, Dr. Jean Marcos de Souza; MELO, Dr. Guilherme de Azevedo e. Controle e Acionamentos Eletrônicos de Máquinas de Corrente Alternada. São Paulo, SP. UNESP. 24 mai. 2018. Apresentação de Power Point. 21 slides. color. Disponível em: [https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lepnovo/caemca-aula\\_01-2018-1sem.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lepnovo/caemca-aula_01-2018-1sem.pdf). Acesso em: 18 de Agosto de 2022.

PEDRA, Camilo. O que é um inversor de frequência? Como é o seu funcionamento? Blog da Schneider Electric, 2020. Disponível em: <https://blog.se.com/br/automacao-industrial/2020/10/22/o-que-e-um-inversor-de-frequencia-e-como-escolher-a-melhor-opcao/> Acesso em: 11 de Dezembro de 2022.

PETRUZELLA, Frank D. Motores elétricos e Acionamentos. Porto Alegre: AMGH, 2013.

POLITERM. Tacômetro digital duplo (ótico e contato) modelo Pol-19. Disponível em: <https://www.politerm.com.br/produto/tacometro-digital-duplo-otico-e-contato-modelo-pol-19/2305836>. Acessado em: 16 de Novembro de 2022.

RANIEL, Thiago, 2011, Desenvolvimento e implementação de um sistema de controle de posição e velocidade de uma esteira transportadora usando inversor de frequência e microcontrolador. Dissertação de mestrado, UNESP, Ilha Solteira.

WEG. Guia de Especificação – Motores Elétricos. Rev 24. 01/2021. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acessado em: 22 de Agosto de 2022.

WEG. Inversor de Frequência – CFW-08. 02/2009. Disponível em: <https://meloaut.com.br/wp-content/uploads/2021/02/Manual-do-Usuario-CFW08.pdf>. Acesso em: 01 de Setembro de 2022.

WEG. Inversor de Frequência – CFW-300. 06/2016. Disponível em: <https://meloaut.com.br/wp-content/uploads/2021/02/Manual-de-Programacao-CFW300.pdf> Acesso em: 01 de Setembro de 2022.

WEG. Inversor de Frequência – CFW-500. 07/2021. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hd7/h49/WEG-CFW500-user-manual-10001278006-en.pdf>. Acesso em: 01 de Setembro de 2022.

YHDC. Split core current transformer. Disponível em: <https://en.yhdc.com/comp/file/download.do?id=941>. Acesso em: 01 de Outubro de 2022.