

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GUSTAVO VENDRAME BARBARA

**PROPOSTA DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO UMA MÁQUINA DE  
INDUÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2018

GUSTAVO VENDRAME BARBARA

**PROPOSTA DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO UMA MÁQUINA DE  
INDUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de TCC 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Goedel  
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Elétrica**  
**Curso de Engenharia Elétrica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Gustavo Vendrame Barbara**

### **Proposta de recuperação de energia utilizando uma máquina de indução**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 08:00hs do dia 29/11/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Alessandro Goedel - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Marcelo Favoretto Castoldi - (Coorientador)

---

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Francisco de Assis Scannavino Junior - (Membro)

Dedico este trabalho a minha  
mãe Vilma e a meu pai Antonio.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, por sempre estar a meu lado, colocando em meu caminho pessoas que sempre me auxiliaram em momentos difíceis.

A minha família, em especial minha mãe Vilma Vendrame Barbara e a meu pai Antonio de Rezende Barbara, por sempre estarem ao meu lado, me apoiando e incentivando em toda a minha trajetória acadêmica.

Ao meu orientador Professor Alessandro Goedtel, pelos conselhos, sugestões, ensinamentos e, principalmente pela paciência que teve comigo durante todos esses anos de trabalho no Laboratório de Sistemas Inteligentes.

Ao Professor Marcelo Favoretto Castoldi por sua disponibilidade em ser coorientador desse trabalho.

Aos pesquisadores e mestrandos do Laboratório de Sistemas Inteligentes, Murillo Gentil, Igor Elias e Eduardo Nogueira pela amizade e conselhos durante o período de realização deste trabalho.

Aos futuros doutores Gustavo Bazan, Clayton Graciola, Jacqueline Guedes, Wylliam Gongora, Tiago Henrique e Fabiano Sene pela amizade e ensinamentos.

Ao engenheiro Yann Sulino e ao Professor Renato Kazuo por serem os primeiros a trabalharem na bancada utilizada neste projeto.

Aos engenheiros e futuros engenheiros do Laboratório de Sistemas Inteligentes Enrique, Erick, Victor Takeo, Pedro Petri, Bruno Tangerino e Tonicler pela amizade e companheirismo.

A todos os professores e amigos, pela colaboração não somente para a realização deste trabalho mas também em todo o decorrer da graduação.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica pela disponibilização da estrutura necessária a realização deste trabalho.

“Deus disse: ‘Que exista a luz!’ E a luz começou a existir” (Gênesis 1,3)

## RESUMO

BARBARA, Gustavo Vendrame. **Proposta de recuperação de energia utilizando uma máquina de indução**. 2018. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2018.

O consumo de energia elétrica crescente acarreta a necessidade cada vez maior de melhorar a eficiência de operação de máquinas e equipamento em especial no setor industrial. Observa-se que na indústria há cargas acopladas aos motores que possuem um alto momento de inércia, e a energia cinética armazenada nestas cargas não são aproveitadas quando as mesmas são desligadas. Diante dessa situação este trabalho apresenta uma proposta para o desenvolvimento de um sistema que seja capaz de realizar a recuperação da energia cinética em cargas com alto teor inercial. O funcionamento desse sistema se baseia na utilização do inversor de frequência para o controle da frequência de alimentação de uma máquina de indução trifásica. O inversor de frequência recebe os sinais de comando de um sistema microcontrolado, que também realizará o monitoramento da corrente no barramento CC do inversor de frequência para realizar a estimação da velocidade da máquina de indução trifásica. Os resultados apresentados se mostram promissores para a utilização desse sistema em um ambiente industrial, onde pode-se recuperar a energia armazenada em uma carga com alto teor inercial através da alteração da frequência de alimentação de uma máquina de indução acoplada a essa carga.

**Palavras-chave:** Máquina de indução. Recuperação de energia. Inércia.

## ABSTRACT

BARBARA, Gustavo Vendrame. **Energy recovery proposal using an induction machine**. 2018. 67 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

The increasing consumption of electrical energy brings with it the increasing need to improve the efficiency of operation of machines and equipment, especially in the industrial sector. It is observed that in the industry there are loads coupled to the motors that have a high moment of inertia, and the kinetic energy stored in these loads are not used when they are turned off. In view of this situation this work presents a proposal for the development of a system that is capable of performing the recovery of kinetic energy in high inertia loads. The operation of this system is based on the use of the frequency inverter to control the feed frequency of a three-phase induction machine. The frequency inverter receives the command signals from a microcontrolled system, which will also monitor the current in the DC bus of the frequency inverter to perform the estimation of the speed of the three-phase induction machine. The results presented are promising for the use of this system in an industrial environment, where the energy stored in a high inertia load through the feed frequency of an induction machine coupled to the load.

**Keywords:** Induction machine. Energy recovery. Inertia.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Combinações de tensão de saída. ....	22
Tabela 2: Parâmetros da carga inercial.....	28
Tabela 3: Informações de placa da máquina utilizada.....	31
Tabela 4: Resultados do ensaio a vazio.....	34
Tabela 5: Resultados do ensaio CC.....	35
Tabela 6: Resultados do ensaio de rotor bloqueado. ....	37
Tabela 7: Parâmetros do motor.....	38
Tabela 8: Características do filtro projetado. ....	40
Tabela 9: Dimensionamento dos componentes do filtro. ....	41
Tabela 10: Característica de chaveamento da chave de potência .....	46
Tabela 11: Características elétricas dinâmicas do driver de comando. ....	47
Tabela 12: Topologia da rede utilizada. ....	55
Tabela 13: Erros obtidos. ....	57

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Máquina de indução trifásica em corte. ....	9
Figura 2: Modelo de transformador de uma máquina de indução.....	10
Figura 3: Circuito equivalente por fase de uma máquina de indução. ....	11
Figura 4: Curva de conjugado de uma máquina de indução.....	12
Figura 5: Inversor de frequência com capacitor no barramento CC.....	17
Figura 6: Exemplo de modulação PWM. ....	19
Figura 7: Inversor de frequência do lado da carga. ....	20
Figura 8: Neurônio artificial. ....	24
Figura 9: Camadas de uma RNA. ....	25
Figura 10: Protótipo para simulação de cargas com alto teor inercial.....	27
Figura 11: Fluxograma de funcionamento do sistema proposto. ....	30
Figura 12: Fluxograma de treinamento da RNA. ....	30
Figura 13: Diagrama de ligação para máquina com 6 enrolamentos.....	32
Figura 14: Esquema de ligação para realização do ensaio a vazio. ....	33
Figura 15: Ensaio a vazio.....	34
Figura 16: Esquema de ligação para realização do ensaio de rotor bloqueado.....	36
Figura 17: Ensaio de rotor bloqueado. ....	37
Figura 18: Placa de condicionamento desenvolvida.....	39
Figura 19: Filtro passa-baixa com topologia MFB de 2ª ordem. ....	40
Figura 20: Esquema elétrico do filtro passa-baixa projetado.....	42
Figura 21: Esquema elétrico da fonte de alimentação.....	43
Figura 22: Placa de desenvolvimento LAUNCHXL-F28379D.....	45
Figura 23: Mapa de pinos da placa de desenvolvimento.....	45
Figura 24:Resultado para corrente de entrada de 20A e saída de 3,3V. ....	49
Figura 25: Resultado para corrente de entrada de 14A e saída 5V.....	50
Figura 26: Resposta do filtro a um sinal quadrado de 10kHz. ....	51
Figura 27: Resposta do filtro a um sinal quadrado de 100Hz. ....	51
Figura 28: Resposta do filtro a um sinal quadrado de 100kHz. ....	52
Figura 29: Resposta do filtro a um sinal senoidal de 10kHz. ....	52
Figura 30: Resposta do filtro a um sinal triangular de 10kHz.....	53
Figura 31: Sinal PWM gerado. ....	53
Figura 32: Sinais PWM complementar. ....	54

Figura 33: Tempo morto gerado.....	54
Figura 34: Sinal senoidal obtido a partir da saída PWM.....	55
Figura 35: Velocidade real e estimada para a rede utilizada.....	56
Figura 36: Histograma de erro.....	57
Figura 37: Influência da variação de frequência na velocidade do conjunto.....	59
Figura 38: Variação do torque.....	59
Figura 39: Corrente no barramento CC do inversor.....	60
Figura 40: Corrente no barramento CC para frequência de 15Hz.....	61
Figura 41: Layout da placa do filtro passa-baixa.....	67
Figura 42: Layout da fonte de alimentação.....	67

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>6</b>
1.3.1	Objetivo geral.....	6
1.3.2	Objetivos específicos.....	6
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>Máquinas de indução trifásica.....</b>	<b>8</b>
2.1.1	Circuito equivalente de uma máquina de indução.....	10
2.1.2	Curva do conjugado de uma máquina de indução.....	11
2.1.3	Gerador de indução trifásico.....	12
2.1.4	Obtenção dos parâmetros da máquina de indução.....	13
<b>2.2</b>	<b>Momento de inércia.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3</b>	<b>Inversores de frequência.....</b>	<b>17</b>
2.3.1	Modelagem do inversor do lado da carga.....	19
<b>2.4</b>	<b>Redes neurais artificiais.....</b>	<b>22</b>
2.4.1	Neurônio artificial.....	23
2.4.2	Arquiteturas de redes neurais artificiais.....	24
2.4.3	Perceptron Multicamadas (PMC).....	26
<b>2.5</b>	<b>Conclusão do capítulo.....</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Sistema utilizado.....</b>	<b>27</b>
3.1.1	Cálculo do momento de inércia do sistema.....	28
3.1.2	Operação do sistema proposto.....	29
<b>3.2</b>	<b>Obtenção dos parâmetros da máquina de indução trifásica.....</b>	<b>31</b>
3.2.1	Ensaio a vazio.....	32
3.2.2	Ensaio CC.....	35
3.2.3	Ensaio de rotor bloqueado.....	35
3.2.4	Parâmetros obtidos.....	38
<b>3.3</b>	<b>Projeto dos circuitos eletrônicos.....</b>	<b>38</b>
3.3.1	Placa de condicionamento de sinais de corrente.....	39
3.3.2	Filtro ativo passa-baixa.....	40
3.3.3	Fonte de alimentação.....	42
<b>3.4</b>	<b>Microcontrolador.....</b>	<b>43</b>

3.4.1	LAUNCHXL-F28379D.....	44
3.4.2	Cálculo do tempo morto.....	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Resposta das placas projetadas.....</b>	<b>49</b>
4.1.1	Placa de condicionamento de sinais.....	49
4.1.2	Filtro passa-baixa.....	50
<b>4.2</b>	<b>Aspectos do código desenvolvido.....</b>	<b>53</b>
<b>4.3</b>	<b>Estimação de velocidade.....</b>	<b>55</b>
<b>4.4</b>	<b>Recuperação de energia.....</b>	<b>58</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>62</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos futuros.....</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>64</b>
	<b>ANEXO A – LAYOUT DAS PLACAS PROJETADAS.....</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, observa-se que existe uma demanda crescente de energia elétrica a níveis mundiais. Segundo EPE (2014), estima-se que o aumento na demanda de energia elétrica para grandes consumidores industriais até o ano de 2050 seja de cerca de 1,9% ao ano. Observa-se que o aumento na demanda de energia elétrica não é acompanhado pelo aumento na produção de energia elétrica, dessa maneira, em um futuro próximo, haverá um desbalanço entre consumo e fornecimento de energia elétrica.

Para evitar a falta no fornecimento de energia elétrica que poderia comprometer processos importantes no país, em épocas de alta demanda e baixa nos reservatórios das usinas hidroelétricas, utiliza-se a energia proveniente de centrais termoelétricas, que além de serem mais caras para a operação, acarretando em um custo maior para o consumidor final, também são altamente poluentes, pois o princípio de geração de energia se baseia na queima de matéria prima tais como carvão, óleo e gás.

Segundo EPE (2017), no Brasil o consumo de energia elétrica no setor industrial em 2016 correspondeu a 37,6% do total de energia elétrica consumida. Pode-se afirmar que a maior parcela desse percentual é proveniente do consumo apresentado pelas máquinas elétricas presentes no setor, especialmente as máquinas de indução trifásicas.

Diante dessa situação buscam-se soluções para que não ocorra falta de energia no sistema e, para que isso ocorra, é necessário realizar esforços para que se aumente a eficiência energética. Para que isso ocorra é necessário analisar quais processos apresentam perdas de energia e o que fazer para diminuir tais perdas.

Observa-se no setor industrial que existem várias cargas acopladas a máquinas de indução que possuem como característica importante o alto momento de inércia. Segundo ROCKWELL (1998), “inércia é definida como uma resistência à aceleração ou desaceleração, além disso, também é a característica de um objeto em repouso permanecer em repouso, e um objeto em movimento permanecer em movimento”. O alto momento de inércia aliada à rotação dessas cargas a partir do acoplamento com máquinas de indução faz que as mesmas possuam energia cinética armazenada, que em situações de operação normal é desperdiçada quando se desliga a máquina de indução.

## 1.1 Justificativa

O processo de acionamento de uma carga na indústria demanda certa quantidade de energia para que se consiga acelerar tal carga até seu ponto de operação. Tal energia fica armazenada na carga na forma cinética e, a partir do momento em que a máquina é desligada, a carga tende a desacelerar por meio do atrito e da resistência do ar. No entanto, a energia cinética não é aproveitada.

Todas as cargas acionadas pelas máquinas de indução apresentam momento de inércia, que depende da geometria da carga e da massa desta. Segundo ROCKWELL (1998), no ambiente industrial são encontradas cargas que possuem momento de inércia elevado, tais como: moedores, trituradores, centrífugas, moinhos, separadores, descascadores, entre outros.

O processo de recuperação da energia cinética não é uma novidade, pois existem várias aplicações em que se realiza a utilização da energia cinética de provenientes de dispositivos com alto teor inercial. Duas dessas aplicações merecem destaque especial, o armazenamento de energia por meio de *Flywheels* e a utilização de sistemas de recuperação de energia cinética em automóveis.

As *Flywheels* armazenam energia de forma mecânica através da rotação de uma máquina elétrica acoplada a uma carga com alto teor inercial. Entre suas vantagens estão alta densidade de energia, não poluente, alta eficiência e vida útil elevada. E suas desvantagens são segurança, barulhos e vibrações (PALIZBAN; KAUHANIEMI, 2016). Pode-se citar o exemplo das plantas de armazenamento de energia por meio de *Flywheels* da empresa Beacon POWER®, que realiza serviços de armazenamento de energia e confiabilidade no sistema elétrico americano por meio de 3 plantas localizadas em grandes centros consumidores (BEACON, 2018).

A recuperação de energia cinética em automóveis utiliza a energia que seria desperdiçada em frenagens para acelerar uma massa com alto momento de inércia e quando a energia é necessária desacelera-se a massa e converte-se a energia em energia elétrica, contribuindo assim para eficiência energética dos automóveis (TERZIC et. al., 2014). Tal sistema é utilizado em automóveis de diversas montadoras (EBADI; JI, 2017) e também em carros de corrida, em especial nos carros utilizados na Fórmula 1® (RICHARDS, 2008).

A partir disso, justifica-se os estudos sobre a recuperação de energia a partir de cargas industriais com alto teor inercial, formulando estratégias para que a energia

cinética armazenada nessas cargas possa ser convertida em energia elétrica. A energia recuperada pode ser utilizada, por exemplo para auxiliar na recarga de uma bateria, ou, até mesmo devolvida para a rede elétrica através da utilização de um conversor *Back-to-Back*.

## 1.2 Objetivos

A seguir encontram-se o objetivo geral e os objetivos específicos desta proposta de trabalho de conclusão de curso. Pretende-se que ao final do trabalho de conclusão de curso os objetivos apresentados tenham sido alcançados.

### 1.2.1 Objetivo geral

Converter em energia elétrica a energia cinética armazenada em cargas com alto momento de inércia através da utilização de uma máquina de indução trifásica alimentada por meio de inversor de frequência.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Dentre as expectativas referentes ao projeto de pesquisa em questão pode-se destacar os seguintes objetivos específicos necessários para que se consiga alcançar o objetivo geral anteriormente apresentado.

- Estudar o funcionamento da máquina de indução trifásica operando como gerador;
- Determinar os parâmetros elétricos da máquina de indução trifásica utilizada no trabalho;
- Treinar e validar uma rede neural artificial para estimar a velocidade de operação da máquina de indução trifásica operando como gerador a partir dos dados de corrente do barramento CC do inversor de frequência;
- Projetar e confeccionar placas de condicionamento de sinais para medição das grandezas de corrente e tensão elétrica;



- Implementar um código em sistema embarcado para controle do inversor utilizado na alimentação da máquina de indução trifásica;
- Analisar a viabilidade de recuperação de energia a partir de cargas industriais que possuem alto teor inercial.

A partir do exposto nessa seção observa-se que ao se alcançar o objetivo final do trabalho será possível verificar a viabilidade de recuperar a energia armazenada em cargas com alto teor inercial, evitando que essa energia seja desperdiçada. Para o desenvolvimento do trabalho é necessário realizar estudos sobre temas específicos, dessa maneira, na próxima seção é apresentado uma revisão bibliográfica acerca dos principais assuntos pertinentes a esta proposta de trabalho de conclusão de curso.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Nesta seção é apresentada uma revisão dos principais itens que tem relação direta com o projeto apresentado. Desse modo, os tópicos apresentados são importantes para o entendimento e desenvolvimento do projeto.

Assim, inicialmente apresenta-se o estudo sobre as máquinas de indução trifásicas, mostrando algumas de suas características, enfatizando sua operação como gerador. Posteriormente são apresentadas algumas características do momento de inércia de uma peça, mostrando o cálculo do mesmo, bem como sua relação com a energia cinética. Após, realiza-se um enfoque nas características básicas de funcionamento de um inversor de frequência trifásico. Por fim, citam-se os principais pontos acerca das redes neurais artificiais.

### **2.1 Máquinas de indução trifásica**

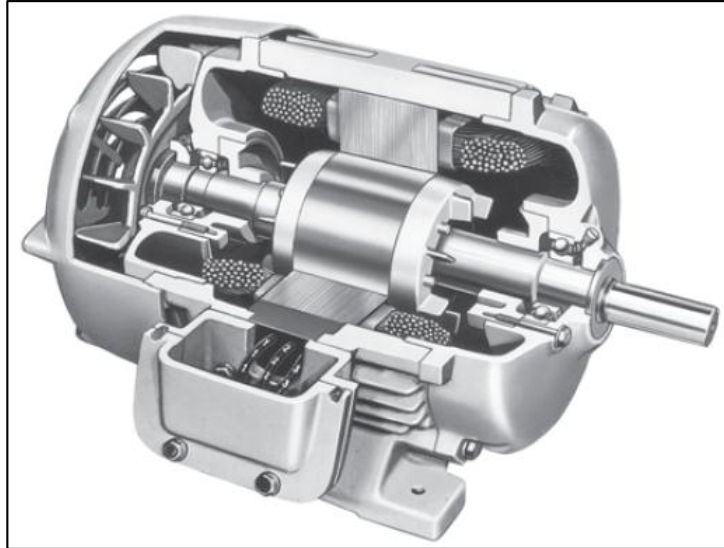
As máquinas de indução trifásicas são as máquinas elétricas mais utilizadas na indústria, especialmente quando funcionando como motor. A extrema simplicidade, robustez, baixos custos de aquisição e manutenção são os principais atrativos para a grande utilização dessas máquinas nas indústrias (FITZGERALD, 2006).

Uma das características que diferenciam as máquinas de indução de outros tipos de máquinas elétricas é a alimentação da mesma, tal diferença se dá pois nas máquinas de indução há alimentação em um enrolamento da máquina (DEL TORO, 1994).

Segundo Fitzgerald (2006), as máquinas de indução trifásicas possuem entre as suas partes construtivas os enrolamentos de campo, o rotor, o estator, a carcaça e os terminais de ligação. O rotor desta máquina pode ser do tipo gaiola de esquilo, onde o enrolamento do mesmo é constituído por barras conectadas entre si. Há também os rotores bobinados, onde os enrolamentos do rotor são feitos por espiras geralmente de cobre. Na maioria das aplicações prefere-se a utilização de rotores em gaiola de esquilo devido, principalmente, ao seu menor custo, enquanto os motores de indução com rotores bobinados se restringem a aplicações especiais em que se faz necessário o acesso às conexões das bobinas do rotor.

A Figura 1 mostra uma máquina de indução trifásica com rotor em gaiola de esquilo. Pode-se observar pelo corte realizado as partes construtivas do motor, tais como o estator, o rotor e o enrolamento de campo.

**Figura 1: Máquina de indução trifásica em corte.**



**Fonte: Chapman (2013).**

Segundo Chapman (2013), a máquina de indução trifásica funciona a partir da geração de um campo elétrico girante em seu estator devido à passagem de corrente nos enrolamentos de campo do mesmo. Tal campo girante fará com que surjam tensões induzidas no rotor e a partir disso, correntes que circulam pelo circuito rotórico. A velocidade do campo girante é denominada velocidade síncrona e pode ser expressa por:

$$n_s = \frac{120 * f_e}{P} \quad (1)$$

onde:

$n_s$  é a velocidade síncrona (em rpm);

$f_e$  é a frequência da rede;

P é o número de polos da máquina.

Em operações normais como motor, a máquina opera com a sua velocidade abaixo da velocidade síncrona, sendo que a diferença relativa entre a velocidade de

rotação do rotor e a velocidade síncrona normalmente é expressa pelo termo denominado “escorregamento”, expresso por:

$$s = \frac{(n_s - n_m)}{n_s} \quad (2)$$

onde:

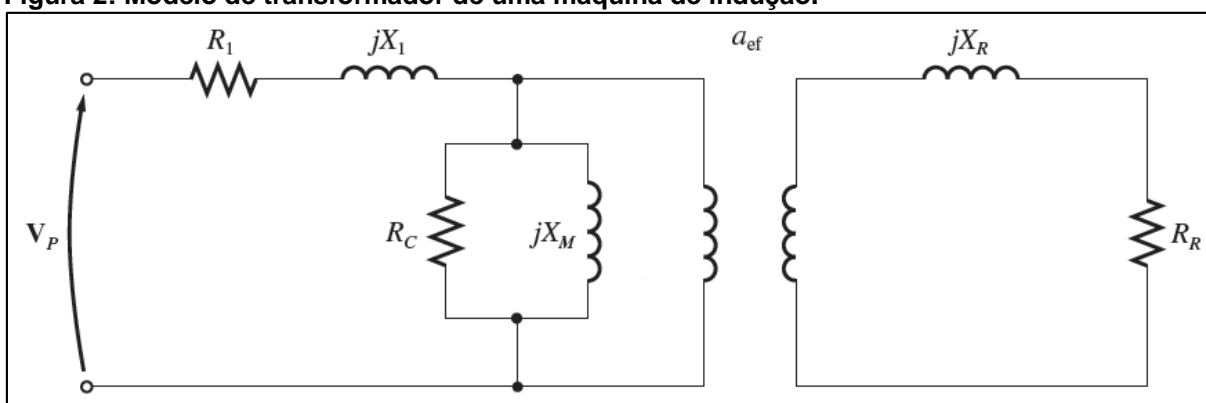
$s$  é o escorregamento;

$n_m$  é a velocidade do rotor da máquina.

### 2.1.1 Circuito equivalente de uma máquina de indução

Segundo Chapman (2013), o funcionamento da máquina de indução se baseia na indução do circuito do estator no circuito do rotor da máquina, ou seja, semelhante ao funcionamento de um transformador. Dessa maneira, o circuito equivalente de uma máquina de indução se assemelha com o circuito equivalente de um transformador (DEL TORO, 1994). Portanto, o modelo de transformador de uma máquina de indução pode ser representado como ilustra a Figura 2.

**Figura 2: Modelo de transformador de uma máquina de indução.**



Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

onde:

$V_p$  é a tensão de alimentação por fase;

$R_1$  é a resistência do estator;

$X_1$  é a reatância do estator;

$R_c$  é a resistência que modela as perdas no núcleo;

$X_M$  é a reatância de magnetização;

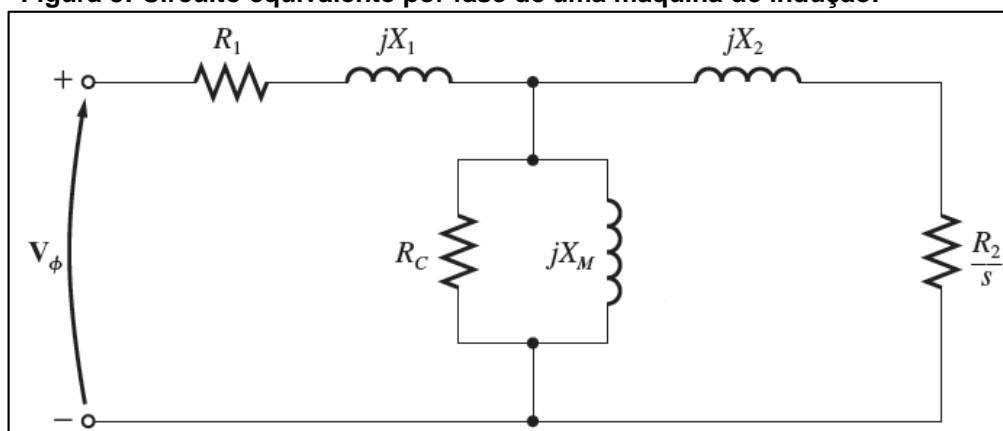
$R_R$  é a resistência do rotor;

$X_R$  é a reatância do rotor;

$a_{ef}$  é a relação de transformação entre o estator e o rotor.

No entanto, diferentemente de um transformador, para que se consiga refletir os parâmetros do rotor é necessário levar em consideração a velocidade relativa entre o rotor e o campo girante no estator. Isso ocorre pois a máquina de indução além de realizar a transformação de tensão também realiza a transformação de frequência. Dessa maneira, segundo Chapman (2013), o circuito equivalente por fase de uma máquina de indução é ilustrado na Figura 3.

**Figura 3: Circuito equivalente por fase de uma máquina de indução.**



Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

onde:

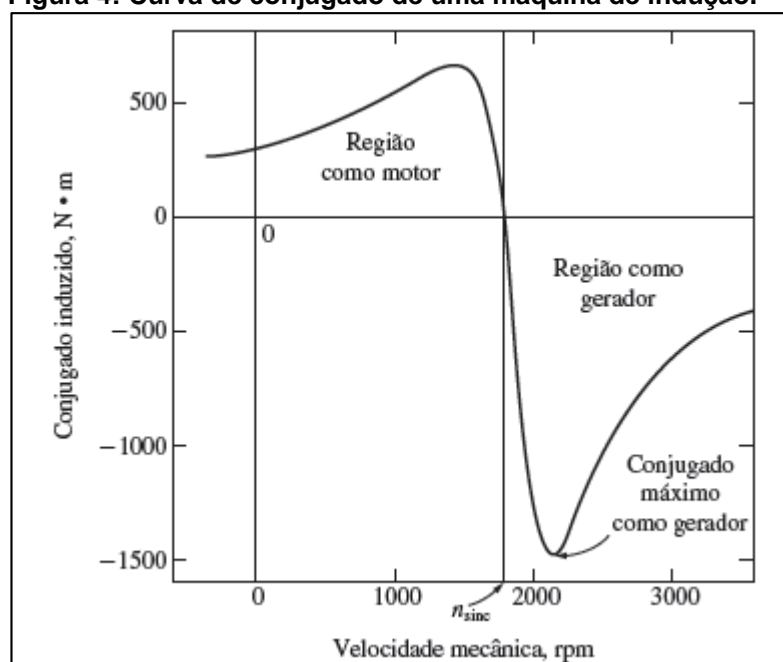
$X_2$  é reatância do rotor refletida no estator;

$R_2$  é resistência do rotor refletida no estator.

### 2.1.2 Curva do conjugado de uma máquina de indução

A máquina de indução pode trabalhar em três regiões distintas, como ilustrado na curva do motor na Figura 4 (CHAPMAN, 2013). Tais regiões são as regiões de frenagem, quando o rotor rotaciona com velocidade negativa, região como motor, quando o rotor possui velocidade entre zero e a velocidade síncrona e região como gerador, quando o rotor possui velocidade acima da velocidade síncrona.

**Figura 4: Curva de conjugado de uma máquina de indução.**



Fonte: Chapman (2013).

Em condições nominais de operação como motor a máquina de indução funciona com cerca de 5% de escorregamento, ou seja, analisando-se a Figura 4 verifica-se que a máquina opera em uma região que pode ser aproximada como uma função linear da curva característica da máquina de indução.

Considerando um comportamento linear da curva na vizinhança da velocidade síncrona pode-se controlar a máquina para que esta, mesmo operando como gerador, apresente corrente circulando em seus enrolamentos e torque próximos aos valores nominais projetados para a operação da máquina.

### 2.1.3 Gerador de indução trifásico

Segundo Chapman (2013), à medida que o conjugado aplicado ao eixo da máquina cresce, a quantidade de potência produzida pelo gerador de indução também cresce. No entanto, há um conjugado máximo possível no modo de funcionamento como gerador, conhecido como conjugado máximo como gerador.

“Como gerador, uma máquina de indução tem diversas limitações. Como lhe falta um circuito de campo separado, um gerador de indução *não pode* produzir potência

reativa. De fato, ela consome potência reativa e, portanto, uma fonte externa de potência reativa deve ser ligada permanentemente a ela para manter o campo magnético em seu estator.” (CHAPMAN, 2013).

A principal vantagem deste tipo de gerador é a simplicidade. Esta máquina não necessita de um circuito de campo separado e não precisa ser acionado continuamente com velocidade fixa. Desde que a máquina tenha velocidade superior à velocidade síncrona esta irá gerar potência ativa. “Quanto maior o conjugado aplicado ao eixo da máquina maior a potência de saída” (CHAPMAN, 2013).

Como este gerador produz apenas potência ativa é necessário que se instale bancos de capacitores em paralelo com o mesmo para que se forneça potência reativa ao sistema.

#### 2.1.4 Obtenção dos parâmetros da máquina de indução

Para que se consiga utilizar o circuito equivalente da máquina de indução trifásica é necessário determinar os parâmetros  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_M$  da máquina a qual se deseja analisar. Segundo Chapman (2013), Fitzgerald (2006) e Del Toro (1994), existem ensaios que podem ser feitos para que se conheçam os valores desses parâmetros. Tais ensaios levam em consideração as diretrizes impostas pela Norma 112 da IEEE (2018).

Os ensaios que normalmente são realizados para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente da máquina de indução são:

- Ensaio a vazio: Neste ensaio deseja-se obter a impedância equivalente da máquina quando esta opera próximo à velocidade síncrona. Como o escorregamento do rotor é muito pequeno, toda a potência consumida pelo motor nesse ensaio se dá devido às perdas mecânicas. Assim, nesse ensaio mede-se a tensão de fase ( $V_1$ ) na alimentação e a corrente de fase ( $I_{1,vz}$ ) da máquina e a partir disso obtém-se a impedância equivalente aproximada do ensaio a vazio (CHAPMAN, 2013). A equação a seguir ilustra a impedância equivalente do circuito a vazio ( $Z_{eq}$ ).

$$|Z_{eq}| = V_1 / I_{1,vz} \approx X_1 + X_M \quad (3)$$

- Ensaio CC: Neste ensaio deseja-se obter a resistência do estator, dessa maneira, pode-se fazer o uso de um multímetro e medir a resistência do enrolamento do estator. Para que o valor obtido seja mais preciso, mede-se a resistência de todos os enrolamentos e faz-se uma média dos valores obtidos;
- Ensaio de rotor bloqueado: Neste ensaio deseja-se obter a impedância equivalente de rotor bloqueado. Para isso, o ensaio é realizado com o rotor da máquina bloqueado impedindo de rotacionar, varia-se a tensão de alimentação de modo que se obtenha corrente nominal nos enrolamentos do estator, mede-se a potência de entrada, a corrente de linha e a tensão de linha (CHAPMAN, 2013). As equações a seguir ilustram, respectivamente, as expressões para o cálculo do fator de potência e da impedância equivalente do rotor bloqueado.

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{entrada}}{\sqrt{3}V_T I_L} \quad (4)$$

$$|Z_{RB}| = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_L} \quad (5)$$

$$Z_{RB} = |Z_{RB}| * \cos \theta + j * |Z_{RB}| * \sin \theta \quad (6)$$

$$|Z_{RB}| * \cos \theta = R_1 + R_2 \quad (7)$$

$$|Z_{RB}| * \sin \theta = X_1 + X_2 \quad (8)$$

onde:

$Z_{RB}$  é a impedância equivalente de rotor bloqueado;

$V_T$  é a tensão de linha;

$I_L$  é a corrente de linha de rotor bloqueado;

FP é o fator de potência;

$P_{entrada}$  é a potência de entrada da máquina.



## 2.2 Momento de inércia

O momento de inércia é uma característica mecânica de qualquer peça ou equipamento e quantifica a dificuldade de se alterar o estado de movimento desse corpo. De maneira geral, quanto maior o momento de inércia de um corpo maior a energia necessária para que se altere seu estado movimento.

Todas as cargas que são acopladas ao eixo de uma máquina de indução possuem momento de inércia. Tal momento de inércia define a velocidade com que a máquina irá acelerar e desacelerar. Assim, em linhas gerais, para que a carga seja acelerada é necessário fornecer energia à mesma, e para que a carga seja desacelerada é necessário que a carga dissipe a energia recebida no momento de sua aceleração.

Segundo Hibbeler (2005), o momento de inércia ( $I$ ) de um objeto pode ser expresso pela equação a seguir.

$$I = \int r^2 dm \quad (9)$$

onde:

$r$  é a distância ao eixo de rotação;

$m$  é a massa do elemento.

Considerando que objeto analisado seja um cilindro, tem-se que o elemento de massa do cilindro é dado por:

$$dm = \rho dV \quad (10)$$

$$dm = (\rho * 2 * \pi * r * h) dr \quad (11)$$

onde:

$\rho$  é a densidade do material que constitui o cilindro;

$V$  é o volume do cilindro.

Assim, substituindo  $dm$  na equação (9), tem-se:

$$I = \int r^2 (\rho * 2 * \pi * r * h) dr \quad (12)$$

$$I = \rho * 2 * \pi * h \int_0^R r^3 dr = \rho * \pi * R^4 * h / 2 \quad (13)$$

Sabe-se que a massa de um cilindro homogêneo de raio R é dado por:

$$m = \rho * \pi * R^2 * h \quad (14)$$

Substituindo m na equação (13), obtém que o momento de inércia de um cilindro homogêneo é dado por:

$$I = \frac{1}{2} * m * R^2 \quad (15)$$

Conhecendo-se o momento de inércia de um corpo, é possível também calcular a energia armazenada quando o mesmo está a uma dada velocidade (HIBBELER, 2011). A equação (16) ilustra a energia cinética de rotação de um corpo.

$$E = \frac{1}{2} * I * \omega^2 \quad (16)$$

onde:

E: Energia armazenada;

$\omega$ : Velocidade angular (rad/s).

A partir da análise das equações (15) e (16) é possível observar que a energia armazenada em uma carga inercial é diretamente proporcional à massa da carga e proporcional ao quadrado do raio e da velocidade. Sabe-se, no entanto, que massa e o raio são características imutáveis da carga. Dessa maneira, a energia tende a variar com o quadrado da velocidade angular do objeto.

Assim, a partir do exposto verifica-se que a energia utilizada para acelerar cargas com alto teor inercial na indústria é desperdiçada quando a máquina motora é desligada, sendo dissipada a partir do atrito entre as partes móveis e através da resistência do ar.

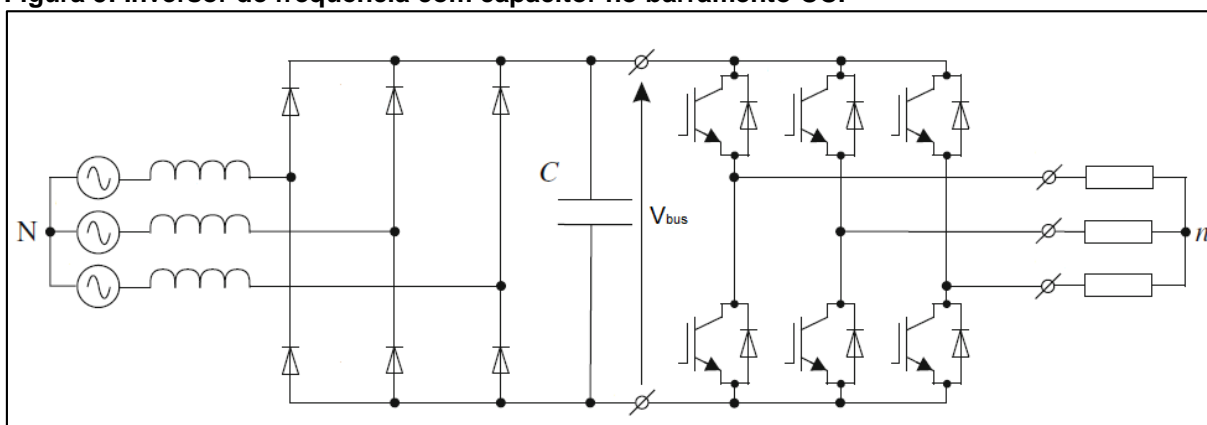
## 2.3 Inversores de frequência

Os inversores de frequência são equipamentos que são muito utilizados no setor industrial, uma vez que, atualmente, é o método preferido para controlar a velocidade das máquinas de indução (CHAPMAN, 2013). Sabe-se, conforme discutido anteriormente, que a velocidade das máquinas de indução depende de fatores como a carga a qual estão conectadas e a frequência da rede de alimentação da mesma. Assim, a utilização de um inversor de frequência ocorre justamente pela possibilidade de se alterar a frequência com que se alimenta a máquina de indução, conseguindo, desse modo, controlar a velocidade com que a mesma opera.

O funcionamento de um inversor de frequência ocorre pela utilização de dispositivos semicondutores necessários para que a tensão alternada proveniente da rede elétrica seja transformada em tensão contínua, por meio da utilização de ponte de diodos, e após esse processo, transformar a tensão contínua obtida em uma tensão alternada com frequência e amplitude controladas, processo possível através da utilização de chaves eletrônicas de potência (DOS SANTOS; SILVA, 2014).

Segundo Szczesniak (2013) existem vários tipos de inversores de frequência, o mais comum e que será exemplificado neste trabalho é o inversor de frequência com armazenamento de energia no barramento de corrente contínua por meio de capacitores; ou seja, o barramento de corrente contínua do inversor funciona uma fonte de corrente contínua. A Figura 5 ilustra um inversor de frequência com capacitor no barramento de corrente contínua.

**Figura 5: Inversor de frequência com capacitor no barramento CC.**



Fonte: Adaptado de Szczesniak (2013).

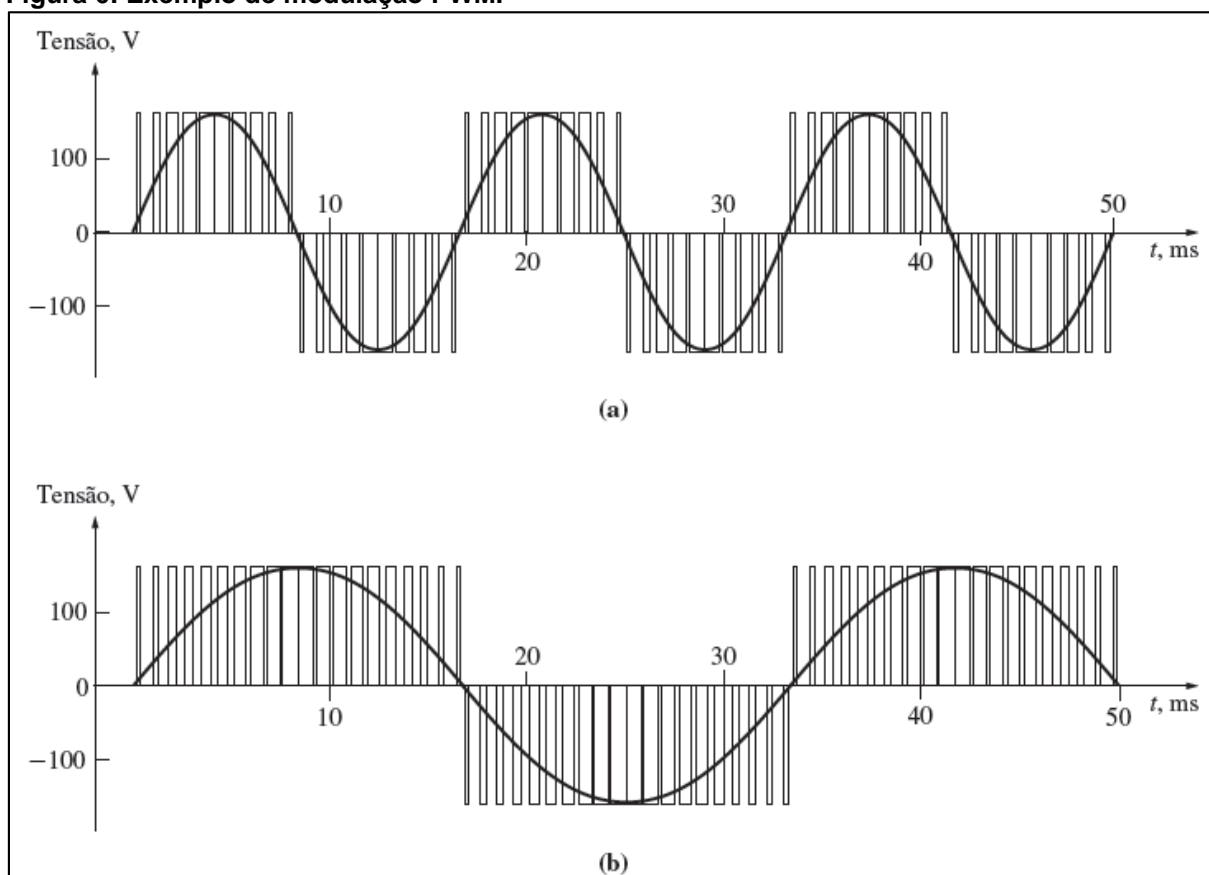
Pode-se observar pela Figura 5 que as chaves de potência utilizadas ficam presentes entre o barramento de corrente contínua e a carga a ser alimentada. Tais chaves devem possuir duas características fundamentais (BARBI, 2006):

- Suportar correntes elevadas: Uma vez que a carga a corrente exigida pela carga circula através das chaves de potência;
- Suportar altas frequências de chaveamento: As chaves devem suportar frequências de chaveamento desde da ordem de milhares de chaveamentos por segundo, no caso de aplicações comuns, até milhões de chaveamento por segundo, no caso de aplicações mais específicas.

O comando para que a chave de potência comute é realizado por meio de dispositivos microcontrolados, onde, a partir de códigos escritos pelo usuário e transmitidos à memória desses dispositivos faz-se o controle do estado das chaves de potência.

A técnica que normalmente é utilizada para controle do chaveamento é chamada de modulação por largura de pulso (PWM – *Power Width Modulation*) (CHAPMAN, 2013). Tal técnica é utilizada se propõe a alterar o *duty cycle* do chaveamento de modo a se obter, a partir da utilização de filtros uma onda senoidal de frequência e amplitude definida pelo usuário, possuindo baixo conteúdo harmônico. A Figura 6 ilustra a modulação PWM.

**Figura 6: Exemplo de modulação PWM.**

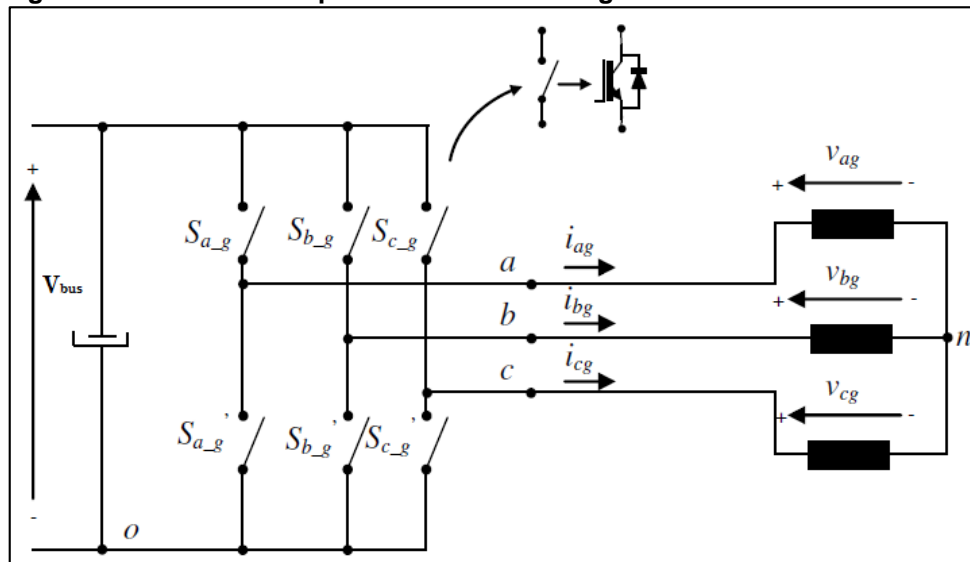


Fonte: Chapman (2013).

### 2.3.1 Modelagem do inversor do lado da carga

Esta seção tem por objetivo realizar a modelagem do inversor do lado da carga, ou seja, do lado das chaves de potência (Abad et. al, 2011). Na modelagem, para facilitar os cálculos, considerar-se-á que as chaves são ideais. A Figura 7 ilustra o inversor no lado da carga. É importante observar que as chaves complementares nunca devem ser acionadas ao mesmo tempo pois isso ocasionaria um curto circuito, danificando o inversor de frequência.

Figura 7: Inversor de frequência do lado da carga.



Fonte: Adaptado de Abad et. al (2011).

Considerando que as tensões de saída do inversor sejam balanceadas e equilibradas tem-se que:

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \quad (17)$$

onde:

$v_{an}$  é a tensão entre os nós 'a' e 'n';

$v_{bn}$  é a tensão entre os nós 'b' e 'n';

$v_{cn}$  é a tensão entre os nós 'c' e 'n'.

Pela análise do circuito da Figura 7 sabe-se que:

$$v_{jn} = v_{jo} - v_{no}, \quad j = a, b, c \quad (18)$$

onde:

$v_{jn}$  é a tensão entre o nó 'j' ('a', 'b' ou 'c') e o nó 'n';

$v_{jo}$  é a tensão entre o nó 'j' ('a', 'b' ou 'c') e o nó 'o';

$v_{no}$  é a tensão entre o nó 'n' e o nó 'o'.

Substituindo (18) em (17) tem-se:

$$v_{no} = \frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad (19)$$

Substituindo (18) em (19) tem-se:

$$v_{an} = \frac{2}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}(v_{bo} + v_{co}) \quad (20)$$

$$v_{bn} = \frac{2}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}(v_{ao} + v_{co}) \quad (21)$$

$$v_{cn} = \frac{2}{3}v_{co} - \frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo}) \quad (22)$$

Substituindo  $v_{ao}$ ,  $v_{bo}$  e  $v_{co}$  pelo estado das chaves superiores tem-se:

$$v_{an} = \frac{V_{bus}}{3}(2S_{a_g} - S_{b_g} - S_{c_g}) \quad (23)$$

$$v_{bn} = \frac{V_{bus}}{3}(2S_{b_g} - S_{a_g} - S_{c_g}) \quad (24)$$

$$v_{cn} = \frac{V_{bus}}{3}(2S_{c_g} - S_{a_g} - S_{b_g}) \quad (25)$$

onde:

$V_{bus}$  é a tensão no barramento CC do inversor;

$S_{a_g}$  é o estado da chave no braço 'a';

$S_{b_g}$  é o estado da chave no braço 'b';

$S_{c_g}$  é o estado da chave no braço 'c'.

A partir das equações (23)-(25) pode-se construir a tabela que apresenta as diferentes combinações de tensão de saída de acordo com o estado das chaves.

Tabela 1: Combinações de tensão de saída.

$S_{a_g}$	$S_{b_g}$	$S_{c_g}$	$v_{ao}$	$v_{bo}$	$v_{co}$	$v_{an}$	$v_{bn}$	$v_{cn}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	$V_{bus}$	$-\frac{V_{bus}}{3}$	$-\frac{V_{bus}}{3}$	$2\frac{V_{bus}}{3}$
0	1	0	0	$V_{bus}$	0	$-\frac{V_{bus}}{3}$	$2\frac{V_{bus}}{3}$	$-\frac{V_{bus}}{3}$
0	1	1	0	$V_{bus}$	$V_{bus}$	$-2\frac{V_{bus}}{3}$	$\frac{V_{bus}}{3}$	$\frac{V_{bus}}{3}$
1	0	0	$V_{bus}$	0	0	$2\frac{V_{bus}}{3}$	$-\frac{V_{bus}}{3}$	$-\frac{V_{bus}}{3}$
1	0	1	$V_{bus}$	0	$V_{bus}$	$\frac{V_{bus}}{3}$	$-2\frac{V_{bus}}{3}$	$\frac{V_{bus}}{3}$
1	1	0	$V_{bus}$	$V_{bus}$	0	$\frac{V_{bus}}{3}$	$\frac{V_{bus}}{3}$	$-2\frac{V_{bus}}{3}$
1	1	1	$V_{bus}$	$V_{bus}$	$V_{bus}$	0	0	0

Fonte: Abad et. al (2011).

A partir do que foi apresentado nesta seção observa-se que a combinação dos chaveamentos das chaves de potência não apresenta tensão de saída variável, dessa maneira, para que se consiga apresentar uma tensão senoidal é necessário alterar continuamente o tempo em que uma chave permanece ligada, conforme apresentado na modulação PWM.

Para o caso específico da obtenção de potência por meio de carga inercial sabe-se que a carga irá desacelerar gradualmente, desse modo, é necessário alterar a frequência da onda senoidal resultante de acordo com a velocidade em que a carga inercial se encontra, assim, é necessário se conhecer a velocidade dessa para que se possa alterar a frequência. Por não ser possível utilizar um sensor de velocidade, é necessário utilizar a medição de velocidade de maneira indireta através da utilização de uma rede neural artificial.

## 2.4 Redes neurais artificiais

Segundo Silva et. al (2010) as Redes Neurais Artificiais (RNA) são modelos computacionais baseadas no sistema nervoso dos indivíduos, sendo que a inspiração para sua criação advém da tradução dos neurônios biológicos e suas funções para um modelo matemático. As redes neurais artificiais têm a capacidade de aquisição e



manutenção do conhecimento, onde através de aprendizado por repetição de exemplos possuem a competência de generalizar soluções. Estas podem ser definidas como um conjunto de unidades de processamento, os quais são interligados por um grande número de interconexões chamadas de sinapses artificiais, equivalente ao encontrado em neurônios biológicos.

As RNA possuem algumas características que a tornam uma excelente solução para a resolução de problemas, sendo estas características definidas a seguir:

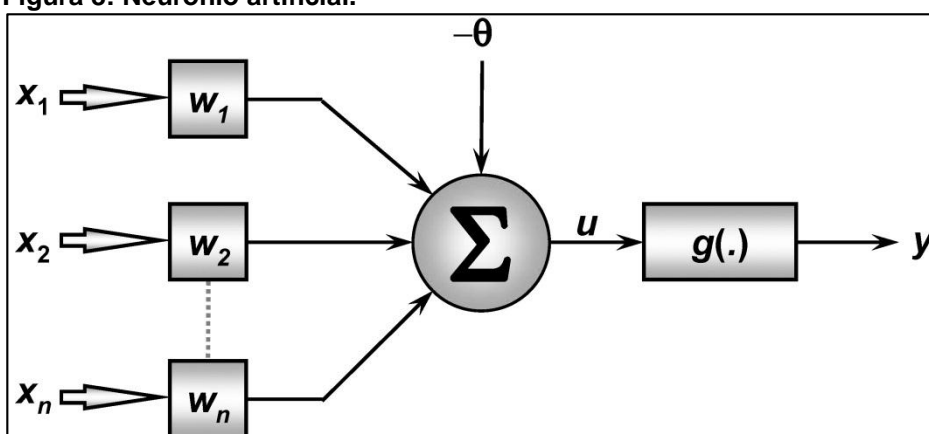
- Adaptação por experiência: consiste no ajuste interno dos parâmetros realizada pela rede a partir da apresentação sucessiva de exemplos relacionados ao problema a ser estudado;
- Capacidade de generalização consiste na propriedade que a rede possui, onde, após o processo de treinamento, essa pode estimar soluções que não eram desconhecidas a partir dos conhecimentos adquiridos na etapa de treinamento.

Segundo Silva et. al (2010), as redes neurais são aplicadas a uma diversa gama de problemas, sendo que é possível destacar algumas destas aplicações, tais como: problemas envolvendo mapeamento funcional entre variáveis de um sistema para mapeamento de processos complexos, controle de processos, reconhecimento e classificação de padrões, agrupamento de dados, previsão (séries temporais, mercado, climática, entre outras), otimização de sistemas e recuperação de padrões a partir de dados imprecisos ou incertos.

#### 2.4.1 Neurônio artificial

Os neurônios artificiais recebem os sinais de entrada  $\{x_i\}$ , a partir disso, o sinal é ponderado a partir do conjunto de pesos sinápticos  $\{w_i\}$ , ou seja, os sinais de entrada são multiplicados pelos pesos sinápticos. Após a ponderação dos sinais de entrada ocorre a soma dos sinais ponderados e a subtração do limiar de ativação, obtendo-se um potencial de ativação. Por fim, o resultado produzido é aplicado a uma função de ativação, que limita o valor de saída do neurônio, produzindo, assim, a saída do neurônio (SILVA et. al., 2010). A Figura 8 ilustra um neurônio artificial.

Figura 8: Neurônio artificial.



Fonte: Silva et. al. (2010).

A representação matemática da saída  $\{y\}$  apresentada pelo neurônio artificial é apresentada na equação (26).

$$y = g\left(\left(\sum_{i=1}^n x_i * w_i\right) - \theta\right) \quad (26)$$

Como pode ser observada na Figura 8 e na Equação 26 a função de ativação desempenha um papel muito importante no valor de saída apresentado pelo neurônio, pois esta delimita a faixa de valores que a saída possa apresentar. Existem vários tipos de funções de ativação e o uso de cada tipo está atrelado ao tipo de rede neural implementada, além das características dos dados de entrada e de saída do problema a ser apresentado à rede neural.

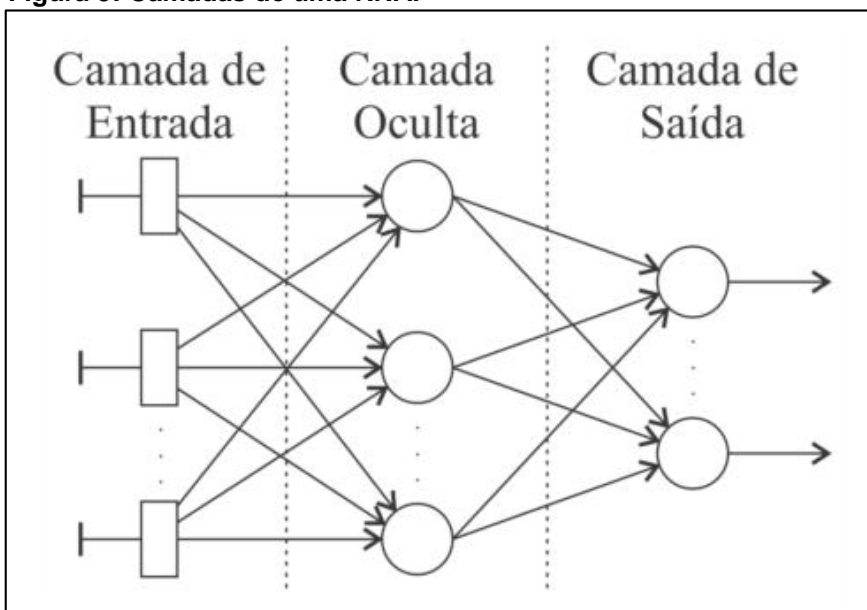
#### 2.4.2 Arquiteturas de redes neurais artificiais

Segundo Silva et. al. (2010), “a arquitetura de uma rede neural artificial define a forma como os seus neurônios estão arranjados uns em relação aos outros”. Um rede neural artificial pode ser dividida em três camadas, sendo elas:

- Camada de entrada: Camada responsável pelo recebimento das informações;
- Camada intermediária ou escondida: Camada responsável por extrair as características do conjunto de dados apresentado na camada de entrada;

- Camada de saída: Camada responsável pela apresentação dos resultados obtidos pela rede neural.

**Figura 9: Camadas de uma RNA.**



Fonte: Santos (2012).

Dentre as arquiteturas de redes neurais artificiais mais utilizadas pode-se citar as redes *feedforward* de camada simples, redes *feedforward* de camadas múltiplas, redes recorrentes e as redes reticuladas (SILVA, et. al., 2010). Neste trabalho pretende-se utilizar uma rede *feedforward* de camada múltipla.

As arquiteturas *feedforward* de camadas múltiplas possuem além das camadas de entrada e saída, ao menos uma camada intermediária, sendo empregada na solução dos mais variados tipos de problemas. Segundo Santos (2012) tal arquitetura possui a capacidade para realizar a generalização de resultados “de um domínio delimitado pelos dados de entrada e saída apresentados durante o processo de treinamento”.

Entre as redes que apresentam arquitetura *feedforward* de camadas múltiplas pode-se citar a rede *Perceptron* multicamadas, utilizada para a estimação de velocidade de motores de indução em diversos trabalhos tais como em Goedel (2007), Santos (2012), Santos et. al. (2014) e Graciola et. al. (2016), pois demonstra desempenho superior para a estimação de velocidade de motores de indução (GRACIOLA, et. al., 2013).

### 2.4.3 *Perceptron* Multicamadas (PMC)

Na rede PMC a organização dos neurônios é feita em camadas, onde, sua principal característica é a presença de uma ou mais camadas intermediárias, “responsáveis pela extração e armazenamento de conhecimentos associados a alguma aplicação específica” (GOEDEL, 2007).

Ainda segundo Goedel (2007), o fluxo de informações das para a saída possui uma direção única definida, ou seja, existem apenas ligações entre a saída de um neurônio de uma camada inferior na entrada dos neurônios da próxima camada, não havendo conexão entre os neurônios da mesma camada.

As redes PMC vêm apresentando sucesso na resolução dos mais variados problemas quando treinada de maneira supervisionada com a utilização do algoritmo *backpropagation* (HAYKIN, 2009). No treinamento supervisionado cada conjunto de amostras de treinamento possui sua respectiva saída associada. Desse modo, cada saída produzida pela rede é comparada à saída desejada e, caso os valores não estejam dentro dos padrões aceitáveis é realizado o ajuste dos pesos sinápticos e limiares dos neurônios. (SILVA et. al., 2010).

## 2.5 Conclusão do capítulo

A partir do exposto neste capítulo, observa-se que a utilização de máquinas de indução trifásicas operando como gerador não é algo comum, devido às suas limitações com relação à velocidade de rotação para que a mesma opere como tal. No entanto, em ambientes industriais essas máquinas são muito utilizadas operando como motor, e em muitas vezes, acionam cargas que tem como característica possuir um alto momento de inércia.

Conforme apresentado, uma carga que possui um alto momento de inércia, rotacionando em seu eixo, apresenta energia armazenada na forma de energia cinética, e quando a máquina de indução é desligada, essa energia é desperdiçada.

Diante dessa situação, pode-se utilizar técnicas para que se consiga aproveitar essa energia, e uma dessas maneiras é utilização da máquina de indução alimentada por inversor de frequência de modo a fazer com que a máquina opere como gerador, alterando a frequência de alimentação de acordo com a velocidade da máquina obtida por meio de uma rede neural artificial.

### 3 METODOLOGIA

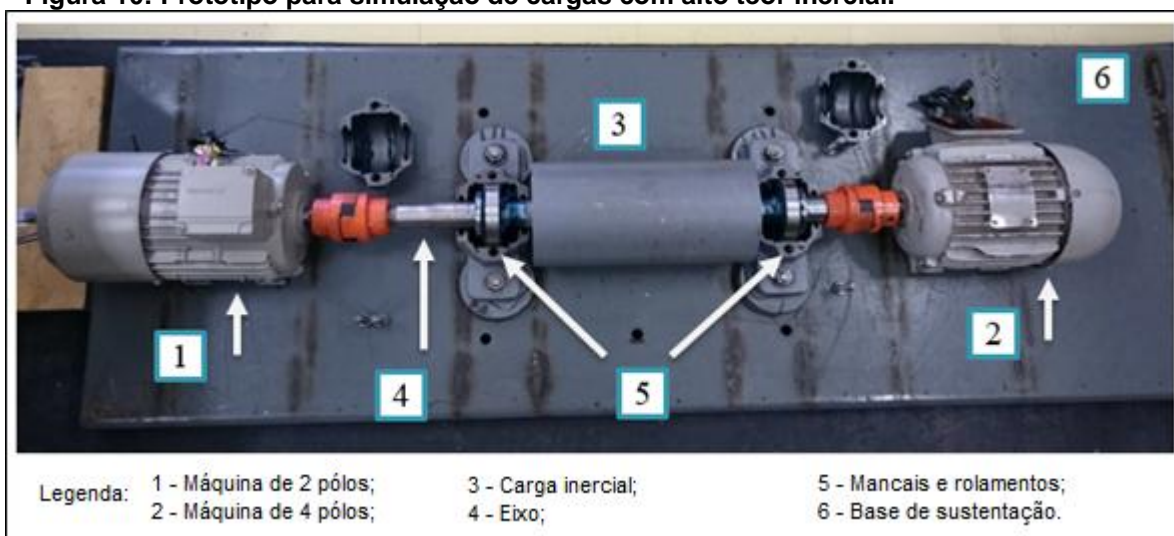
Nesta seção será apresentada a metodologia para a realização deste trabalho.

#### 3.1 Sistema utilizado

A partir do exposto nas seções anteriores, este trabalho possui como proposta o desenvolvimento de um sistema capaz de recuperar a energia cinética armazenada em cargas inerciais a partir da alteração da frequência de alimentação da máquina de indução e consequentemente fazendo com que esta opere como gerador até o momento em que a carga não esteja mais em movimento.

Para a obtenção dos resultados foi utilizado o protótipo proposto e construído por Sulino (2016) e utilizado no trabalho realizado por Miyamoto (2017). A Figura 10 ilustra o protótipo.

**Figura 10: Protótipo para simulação de cargas com alto teor inercial.**



Fonte: Adaptado de Sulino (2016).

Este sistema proposto apresenta duas máquinas acopladas à carga inercial, uma máquina de 2 polos e uma máquina de 4 polos, no entanto, neste trabalho será utilizada apenas a máquina de 4 polos.

### 3.1.1 Cálculo do momento de inércia do sistema

O cálculo do momento de inércia do sistema é muito importante para determinar a energia armazenada e que pode ser recuperada a partir da utilização da máquina de indução trifásica operando como gerador.

O momento de inércia do sistema pode ser obtido pela soma dos momentos de inércia de cada equipamento presente neste. Assim, a soma do momento de inércia do sistema é dados por:

$$I_T = I_{M2p} + I_{M4p} + I_c \quad (27)$$

onde:

$I_T$ : Momento de inércia total do sistema;

$I_{M2p}$ : Momento de inércia da máquina de 2 polos;

$I_{M4p}$ : Momento de inércia da máquina de 4 polos;

$I_c$ : Momento de inércia da carga inercial.

Os momentos de inércia das máquinas de 2 e 4 polos são descritos em Miyamoto (2017) e são respectivamente  $1,00 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$  e  $0,52 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ .

O valor do momento de inércia da carga inercial pode ser obtido a partir da utilização da equação (15) em conjunto com a equação (14). Os parâmetros da carga inercial são ilustrados na Tabela 2.

**Tabela 2: Parâmetros da carga inercial.**

<b>Massa (kg)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Diâmetro (m)</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>
27	0,25	0,165	5610

Fonte: Miyamoto (2017).

A partir dos valores apresentados na tabela é possível calcular o momento de inércia da carga inercial como segue.

$$I_c = \frac{1}{2} * 5610 * \pi * 0,0825^4 * 0,25 = 0,10205 \text{ kg.m}^2$$

Deste modo, o momento de inercia total do sistema é igual a **0,1030 kg.m<sup>2</sup>**.

A energia armazenada pelo conjunto, considerando que este possua velocidade angular de cerca de 188,49 rad/s (velocidade síncrona do motor de 4 polos) pode ser calculado pela equação (16).

$$E = \frac{1}{2} * 0,1030 * 188,49^2 = \mathbf{1829,82 J}$$

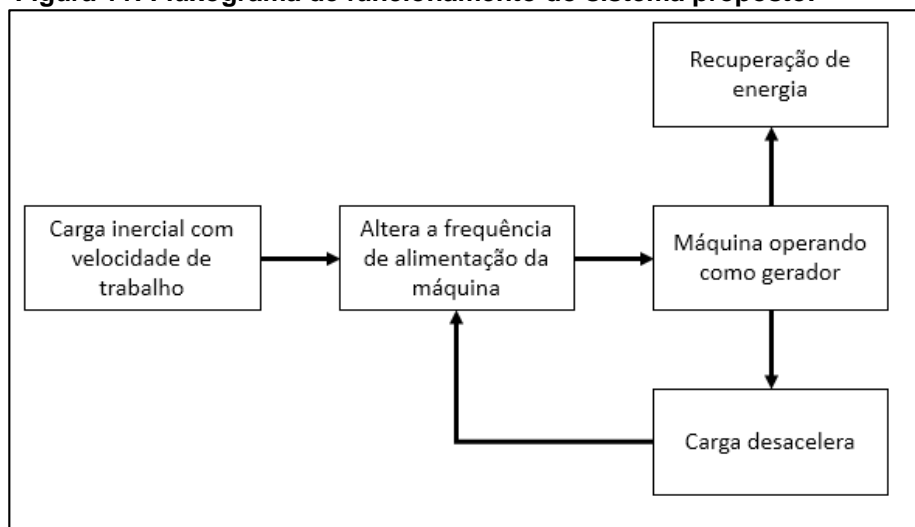
### 3.1.2 Operação do sistema proposto

Inicialmente, a máquina acoplada à carga inercial opera como motor, a partir do momento em que o processo é finalizado, altera-se a frequência de alimentação da máquina para que a mesma opere como gerador. Operando como gerador, o conjunto máquina/carga tende a desacelerar mais rapidamente devido ao torque eletromagnético imposto ser contrário ao movimento da mesma. Assim, a alteração da frequência de alimentação da máquina deve ser alterada de acordo com a velocidade em que a mesma se encontra. Salienta-se que a energia recuperada será utilizada para alimentar uma carga conectada ao barramento CC do inversor.

Para que se consiga obter a velocidade de operação da máquina será utilizado uma rede neural artificial que utiliza como variáveis de entrada a corrente presente no barramento CC do inversor que alimenta a máquina e a frequência de alimentação da mesma.

O fluxograma da Figura 11 ilustra o funcionamento do sistema proposto.

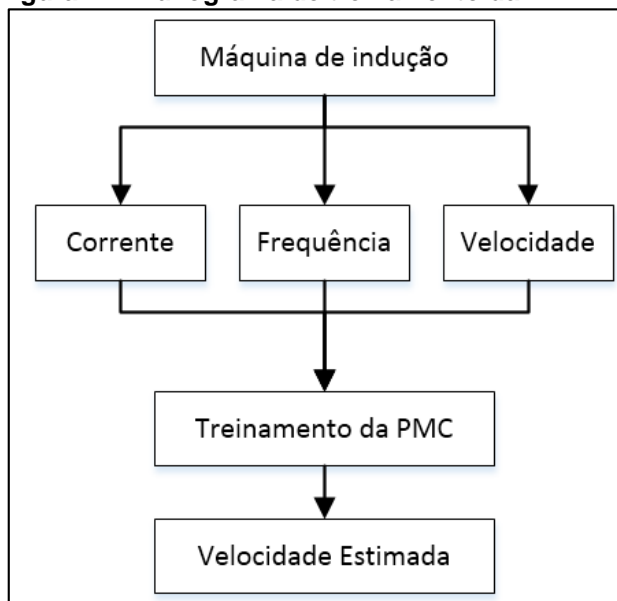
**Figura 11: Fluxograma de funcionamento do sistema proposto.**



Fonte: Autoria própria.

A velocidade do conjunto deve ser estimada pois não se possui equipamentos adequados para a medição direta da mesma. Desse modo se faz o uso de redes neurais artificiais para estimar a velocidade a partir de dados de frequência, velocidade e corrente elétrica. O fluxograma da Figura 12 ilustra o funcionamento da etapa de treinamento da RNA.

**Figura 12: Fluxograma de treinamento da RNA.**



Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 12, observa-se que um dos parâmetros de entrada é a própria velocidade da máquina, ou seja, a última velocidade estimada é uma variável de entrada para estimar a próxima velocidade estimada, tal rede é conhecida como



rede recorrente, uma vez que a própria saída estimada é utilizada para a estimação do valor da próxima saída.

### 3.2 Obtenção dos parâmetros da máquina de indução trifásica

Para que os resultados de simulação do sistema proposto sejam condizentes com o que se espera observar em uma aplicação real de operação de uma máquina de indução trifásica na indústria é necessário conhecer os parâmetros do circuito equivalente da máquina de indução trifásica utilizada. Para isso, realizou-se ensaios no motor de acordo com o exposto na seção 2.1.4.

A máquina utilizada neste trabalho neste trabalho é uma máquina da marca WEG, de 4 polos e 1CV. A Tabela 3 apresenta informações adicionais acerca da máquina utilizada.

**Tabela 3: Informações de placa da máquina utilizada.**

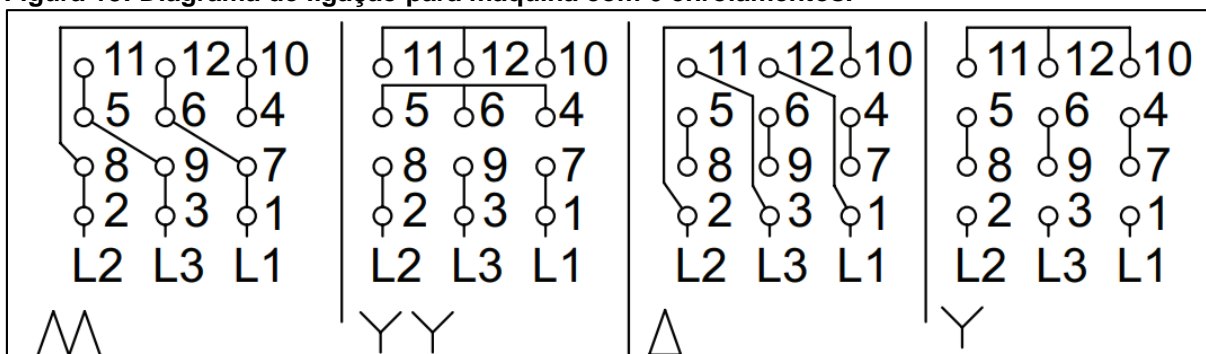
<b>Motor WEG – 1CV – 4 Polos</b>	
Tipo de rotor	Gaiola de esquilo
Número de polos	4
Número de fases	3
Potência nominal	1 CV
Frequência nominal	60 Hz
Ip/In	6,1
Rotação nominal	1730 rpm
Categoria	N
Número de enrolamentos no estator	6
Corrente nominal	3,6 A ( $\Delta\Delta$ ); 2,08 A (YY); 1,80 A ( $\Delta$ )
Tensão nominal	220 V ( $\Delta\Delta$ ); 380 V (YY); 440 V ( $\Delta$ )
Rendimento	70%
Momento de inércia	$1,00 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$

**Fonte: Autoria própria.**

Observa-se pela Tabela 3 que a máquina utilizada possui 6 enrolamentos no estator, dessa maneira, de modo a facilitar a entendimento, a Figura 13 ilustra as

conexões possíveis para essa máquina, bem como a numeração de cada enrolamento.

**Figura 13: Diagrama de ligação para máquina com 6 enrolamentos.**



Fonte: WEG (2018).

A partir análise da Figura 13 é possível observar que para motores com 6 enrolamentos (12 terminais), existe 4 maneiras distintas de ligação elétrica do mesmo. A quarta ligação, é utilizada em sua maioria das vezes apenas para partida do motor e não para sua operação. Os enrolamentos do motor podem ser discriminados como segue:

- Enrolamento 1: Terminais 1 e 4;
- Enrolamento 2: Terminais 2 e 5;
- Enrolamento 3: Terminais 3 e 6;
- Enrolamento 4: Terminais 7 e 10;
- Enrolamento 5: Terminais 8 e 11;
- Enrolamento 6: Terminais 9 e 12.

Os ensaios realizados para a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente da máquina de indução trifásica foram:

- Ensaio a vazio;
- Ensaio CC;
- Ensaio de rotor bloqueado.

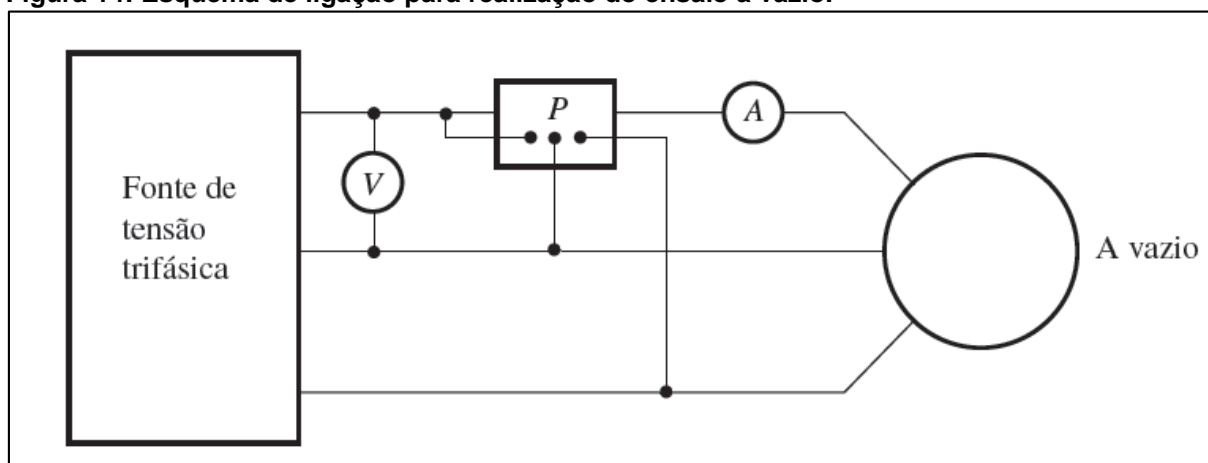
### 3.2.1 Ensaio a vazio

Neste ensaio, conforme descrito na seção 2.1.4 deste trabalho, obtém-se a impedância equivalente da máquina quando esta opera sem carga, ou seja, sua

velocidade é próxima da velocidade síncrona da máquina, sendo assim, toda a potência consumida pela máquina se dá devido às perdas mecânicas.

A Figura 14 ilustra o esquema de ligação utilizado para a realização do ensaio a vazio da máquina de indução trifásica.

**Figura 14: Esquema de ligação para realização do ensaio a vazio.**



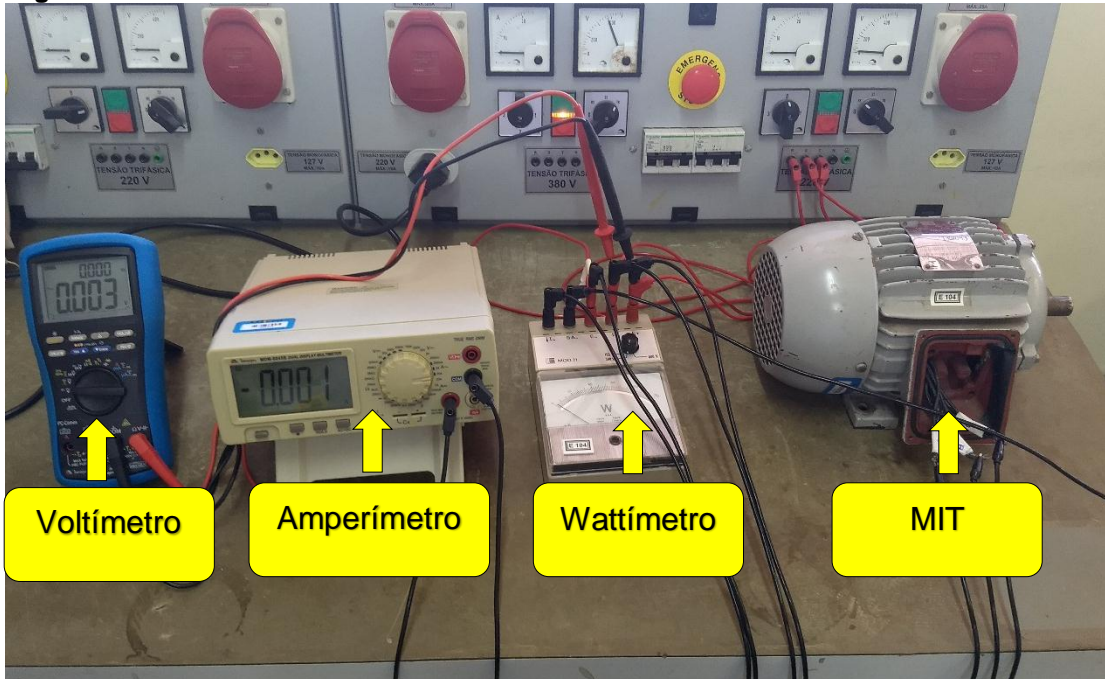
Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

Analisando-se a Figura 14 observa-se que foi medido apenas uma das correntes e uma das tensões presentes na máquina de indução trifásica, uma vez que o circuito é equilibrado e balanceado.

A ligação utilizada para a realização do ensaio foi a ligação delta-delta ( $\Delta\Delta$ ), uma vez que a tensão disponível para a alimentação da máquina era 220V.

A Figura 15 apresenta uma imagem do ensaio realizado, ilustrando a máquina e os instrumentos utilizados para a realização das medições do ensaio.

**Figura 15: Ensaio a vazio.**



Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos no ensaio a vazio são ilustrados na Tabela 3.

**Tabela 4: Resultados do ensaio a vazio.**

**Ensaio a vazio**

Tensão de linha	221,8V
Corrente	3,33A
Potência de entrada	320W

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados obtidos no ensaio e apresentados na Tabela 3 e utilizando-se da equação (3) é possível obter a impedância aproximada do ensaio a vazio que é igual à soma das reatâncias do estator e de magnetização.

$$|Z_{eq}| = \frac{221,8}{(3,33/\sqrt{3})} = 115,37 \Omega = X_1 + X_M$$

### 3.2.2 Ensaio CC

Neste ensaio, conforme descrito na seção 2.1.4 deste trabalho, obtém-se a resistência do estator de cada enrolamento. Para isso, se fez o uso de um multímetro.

Para esse ensaio foram medidas as resistências de estator de todos os 6 enrolamentos. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5: Resultados do ensaio CC.**

<b>Enrolamento</b>	<b>Resistência (<math>\Omega</math>)</b>
1-4	17,8
2-5	17,8
3-6	18,1
7-10	17,7
8-11	17,8
9-12	18,0

**Fonte: Autoria própria.**

Observa-se que cada enrolamento possui um valor de resistência, no entanto, tais valores estão muito próximos um do outro, o que já era de se esperar, haja vista que os parâmetros de cada fase da máquina de indução trifásica deve ser igual ou muito parecida uma da outra.

Uma boa maneira de definir a resistência do estator é calculando uma média das resistências de cada enrolamento, dessa maneira, a resistência média de cada enrolamento é **17,87 $\Omega$** .

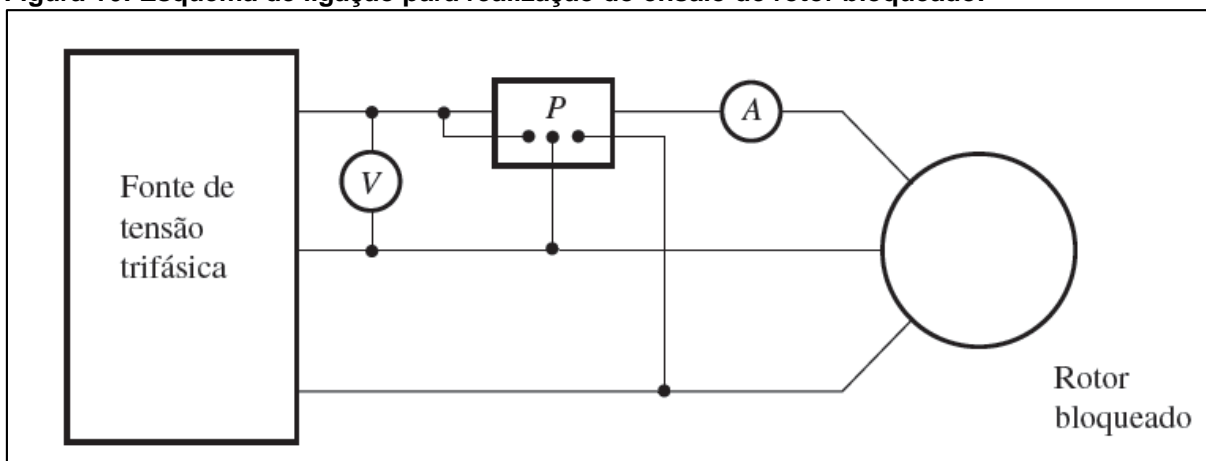
Na ligação delta-delta cada enrolamento do estator está ligado em paralelo com outro enrolamento, assim, para determinar o circuito equivalente por fase do motor, a resistência de estator possui valor de **8,93 $\Omega$** .

### 3.2.3 Ensaio de rotor bloqueado

Neste ensaio, conforme descrito na seção 2.1.4 deste trabalho, obtém-se a impedância equivalente da máquina quando o rotor da mesma está bloqueado, ou seja, a velocidade em que máquina se encontra é igual a zero, conseqüentemente, o escorregamento da mesma é igual a 1.

A Figura 16 ilustra o esquema de ligação utilizado para a realização do ensaio de rotor bloqueado da máquina de indução trifásica.

**Figura 16: Esquema de ligação para realização do ensaio de rotor bloqueado.**



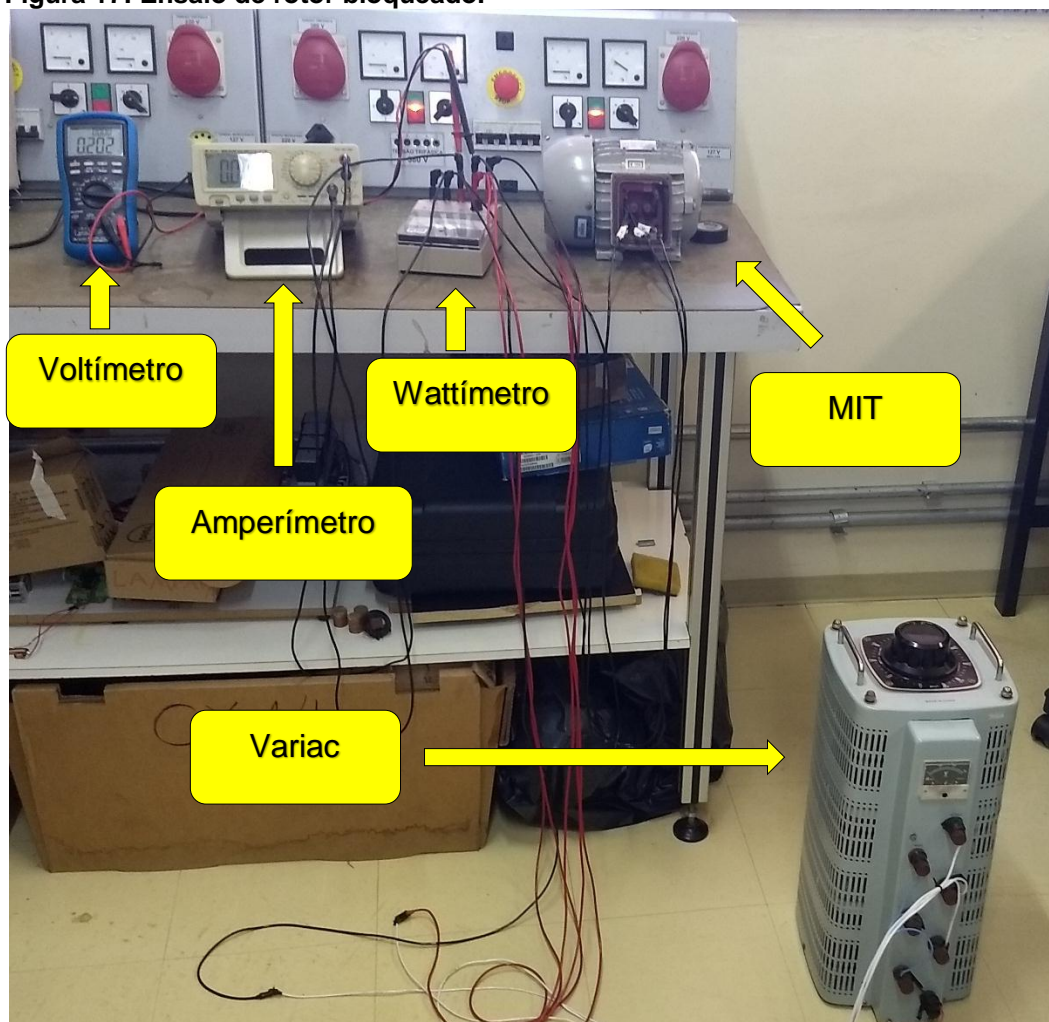
Fonte: Autoria própria.

Para a realização do ensaio, utilizou-se um variador de tensão (Variac), de modo a controlar a tensão aplicada aos terminais do motor para que se conseguisse o valor de corrente nominal nos enrolamentos do estator.

A ligação utilizada para a realização do ensaio, a exemplo do ensaio a vazio, foi a ligação delta-delta ( $\Delta\Delta$ ), uma vez que a tensão disponível para a alimentação da máquina era 220V.

A Figura 17 apresenta uma imagem do ensaio realizado, ilustrando a máquina e os instrumentos utilizados para a realização das medições do ensaio.

Figura 17: Ensaio de rotor bloqueado.



Fonte: Aatoria própria.

Os resultados obtidos no ensaio a vazio são ilustrados na Tabela 6.

**Tabela 6: Resultados do ensaio de rotor bloqueado.**  
**Ensaio de rotor bloqueado**

Tensão de linha	39,66V
Corrente	3,747A
Potência de entrada	210W

Fonte: Aatoria própria.

A partir dos resultados obtidos no ensaio e apresentados na Tabela 5 e pela utilização das equações (4)-(8) é possível obter o fator de potência e a impedância equivalente do rotor bloqueado.

$$FP = \cos \theta = \frac{210}{\sqrt{3} * 39,66 * 3,747} = 0,8158$$

$$|Z_{RB}| = \frac{(39,66 * \sqrt{3})}{3,747} = 18,33 \Omega$$

$$Z_{RB} = 18,33 * 0,8156 + j * 18,33 * 0,5783$$

$$18,33 * 0,8156 = \mathbf{14,95\Omega} = R_1 + R_2$$

$$18,33 * 0,5783 = \mathbf{10,6\Omega} = X_1 + X_2$$

### 3.2.4 Parâmetros obtidos

A partir da realização dos ensaios na máquina de indução foi possível obter os parâmetros da mesma, tais parâmetros estão disponíveis na Tabela 7.

**Tabela 7: Parâmetros do motor.**

<b>Parâmetros do motor</b>	
Resistência do estator	8,93 $\Omega$
Resistência do rotor	6,02 $\Omega$
Indutância do estator	14,06 mH
Indutância do rotor	14,06 mH
Indutância de magnetização	291,95 mH

**Fonte: Autoria própria.**

Com os parâmetros da máquina obtidos é possível obter resultados computacionais mais fiéis ao que se encontraria em aplicações reais com a máquina de indução.

### 3.3 Projeto dos circuitos eletrônicos

Nesta seção são apresentadas as placas projetadas para o condicionamento de sinais necessários ao bom funcionamento do projeto e aquisição de dados.



### 3.3.1 Placa de condicionamento de sinais de corrente

A placa de condicionamento de sinais de corrente é utilizada para o condicionamento das correntes que circulam pela máquina de indução trifásica.

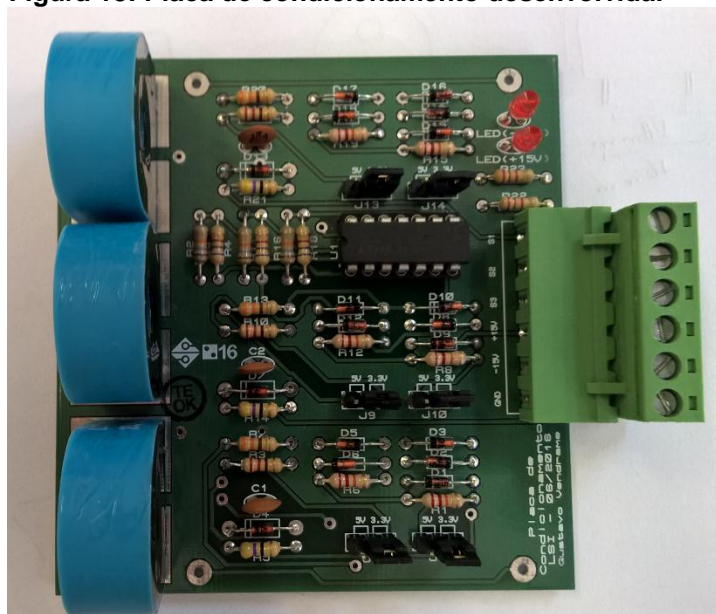
O projeto da placa de condicionamento tem como principais características os seguintes aspectos:

- Entrada trifásica;
- Corrente de entrada alternada com pica máximo de 20A;
- Dois níveis de tensão de saída:
  - 0V a 5V;
  - 0V a 3.3V;
- Alimentação +15V e -15V.

Vale ressaltar que as características apresentadas pela placa de condicionamento podem facilmente ser alteradas, especialmente a corrente máxima de pico.

A placa foi projetada para possuir a menor dimensão possível, possuindo dimensão de 79mm X 83mm. As trilhas estão presentes tanto na parte superior quando na inferior da placa, contribuindo para uma placa com menores dimensões. A placa confeccionada e com os componentes soldados é mostrada na Figura 18.

**Figura 18: Placa de condicionamento desenvolvida.**



**Fonte: Autoria própria.**

### 3.3.2 Filtro ativo passa-baixa

A utilização desta placa se dá devido à necessidade de filtragem dos sinais de corrente presente no barramento CC do inversor de frequência, uma vez que a corrente presente nesse apresenta vários pulsos de acordo com o chaveamento das chaves de potências presentes no inversor de frequência.

Desse modo, a fim de se obter a corrente média presente no barramento CC do inversor foi projetado dois filtros passa-baixa de segunda ordem em cascata, obtendo-se assim, um filtro passa-baixa de quarta ordem. As características do filtro projetado são apresentadas na tabela 8.

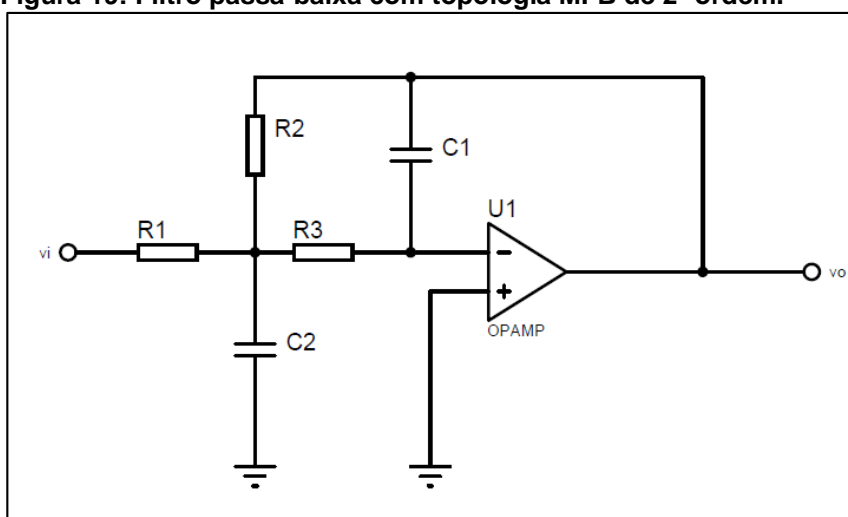
**Tabela 8: Características do filtro projetado.**

<b>Características do filtro</b>	
Tipo de filtro	Butterworth
Ordem	2 X 2ª ordem -> 4 ordem
Frequência de corte	10Hz
Ganho	1
Topologia	MFB
Tensão de alimentação	+15V e -15V

Fonte: Autoria própria.

O esquema da topologia utilizada pode ser observada na Figura 19.

**Figura 19: Filtro passa-baixa com topologia MFB de 2ª ordem.**



Fonte: Autoria própria.

Para o dimensionamento dos resistores e capacitores necessários foi utilizado as equações de (28) a (32) presentes em (PERTENCE JR, 2015).

$$K = -\frac{R_2}{R_1} \quad (28)$$

$$R_2 = \frac{2(K + 1)}{2 * \pi * f_c \left[ aC_2 + \sqrt{a^2C_2^2 - 4bC_1C_2(K + 1)} \right]} \quad (29)$$

$$C_2 \approx \frac{10 \times 10^{-6}}{f_c} \quad (30)$$

$$C_1 \leq \frac{a^2C_2}{4b(K + 1)} \quad (31)$$

$$R_3 = \frac{1}{bC_1C_2\omega_c^2R_2} \quad (32)$$

onde:

K: Ganho do filtro;

$f_c$ : Frequência de corte do filtro;

a e b: fatores de correção.

Os valores para o dimensionamento dos componentes do filtro a partir das equações (28)-(32) são mostradas na Tabela 9.

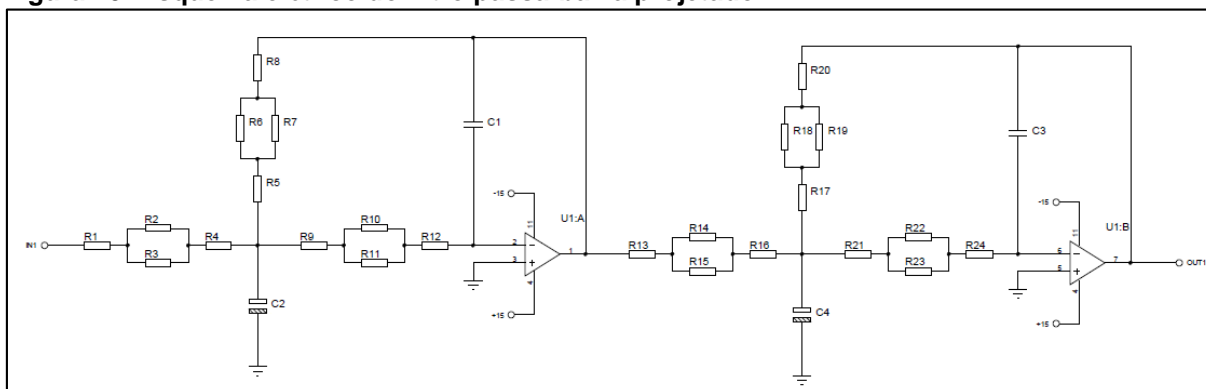
**Tabela 9: Dimensionamento dos componentes do filtro.  
Projeto do filtro ( $f_c = 10$  Hz e  $K = 1$ )**

R <sub>1</sub>	25,37 kΩ
R <sub>2</sub>	25,37 kΩ
R <sub>3</sub>	99,85 kΩ
C <sub>1</sub>	100 nF
C <sub>2</sub>	1 μF

Fonte: Autoria própria.

A partir das características apresentadas e do dimensionamento dos componentes foi possível o desenvolvimento de uma placa de circuito impresso do filtro em questão. A Figura 20 apresenta o esquema elétrico do filtro passa baixa projetado, na Figura 41 do anexo A é apresentado o layout da placa em questão.

**Figura 20: Esquema elétrico do filtro passa-baixa projetado**



Fonte: Autoria própria.

A placa de filtro foi confeccionada utilizando o método de transferência térmica.

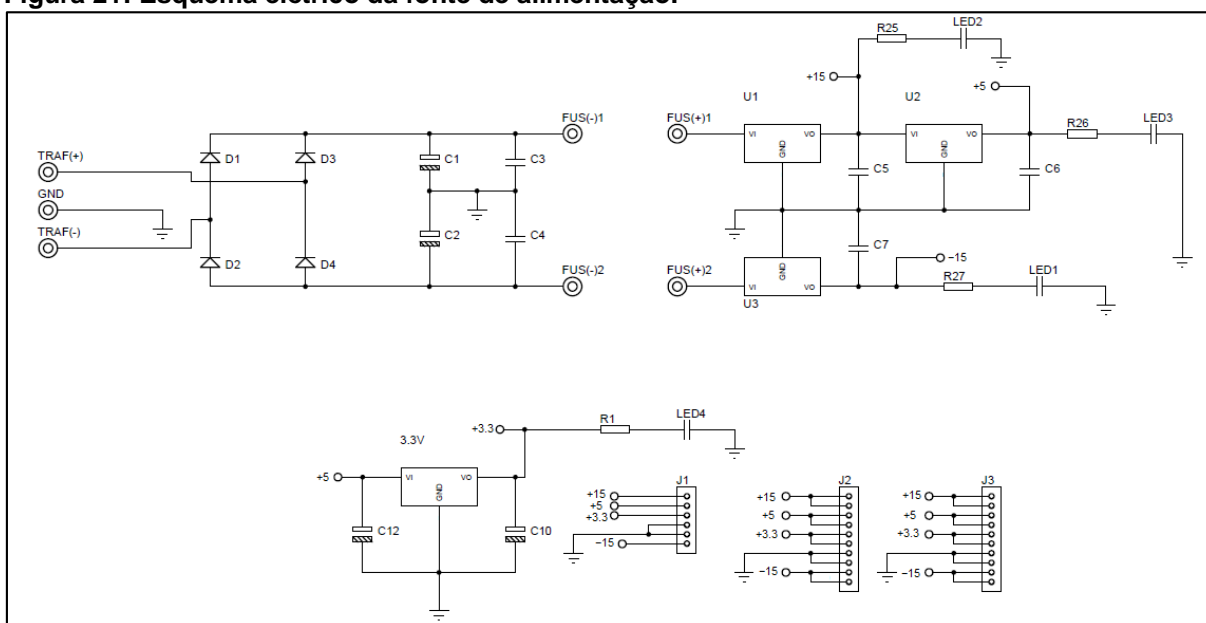
### 3.3.3 Fonte de alimentação

Para realizar a alimentação das placas de condicionamento de sinais e de filtro foi necessário a confecção de uma fonte de alimentação (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1984). As características da fonte projetada são as seguintes:

- Tensão de entrada: 15Vac;
- Tensão de saída: +15V; +5V; +3,3V; -15V.

A Figura 21 ilustra o esquema elétrico da fonte de alimentação, na Figura 42 é apresentado o layout da fonte.

**Figura 21: Esquema elétrico da fonte de alimentação.**



Fonte: Autoria própria.

A exemplo da placa de filtro, a confecção da fonte de alimentação também foi realizada utilizando o método da transferência térmica.

### 3.4 Microcontrolador

Para o controle do inversor foi necessário a escolha de um microcontrolador que apresentasse ao menos as seguintes características:

- 3 saídas PWM independentes com 3 saídas complementares: Necessária para o controle dos 3 braços do inversor de frequência (6 chaves);
- Possibilidade de inserir tempo morto entre a saída principal e a saída complementar: Necessário pois as chaves de potência possuem um certo *delay* entre o comando para que desliguem e seu efetivo desligamento;
- Frequência de PWM mínima de 10 kHz: Frequência definida para o chaveamento das chaves de potência;
- Controle do duty-cycle das saídas PWM: Necessário para que se consiga obter uma saída senoidal;

- Frequência de operação de no mínimo 100 MHz: Frequência necessária para que a execução das instruções ocorra rapidamente;
- 2 conversores AD com resolução mínima de 12 bits: Conversores necessários para aquisição dos dados de tensão e corrente no barramento CC;
- Operação em 5V ou 3,3V: Faixa de tensão que os outros dispositivos do sistema proposto operam;
- Facilidade de compra.

A partir das características apresentadas e ainda, levando em consideração que não haveria tempo hábil para o projeto de um hardware dedicado para a utilização com o microcontrolador, optou-se por adquirir uma placa de desenvolvimento pronta.

Assim, optou-se por utilizar a placa de desenvolvimento “LAUNCHXL-F28379D” da Texas Instruments© (TI, 2018a).

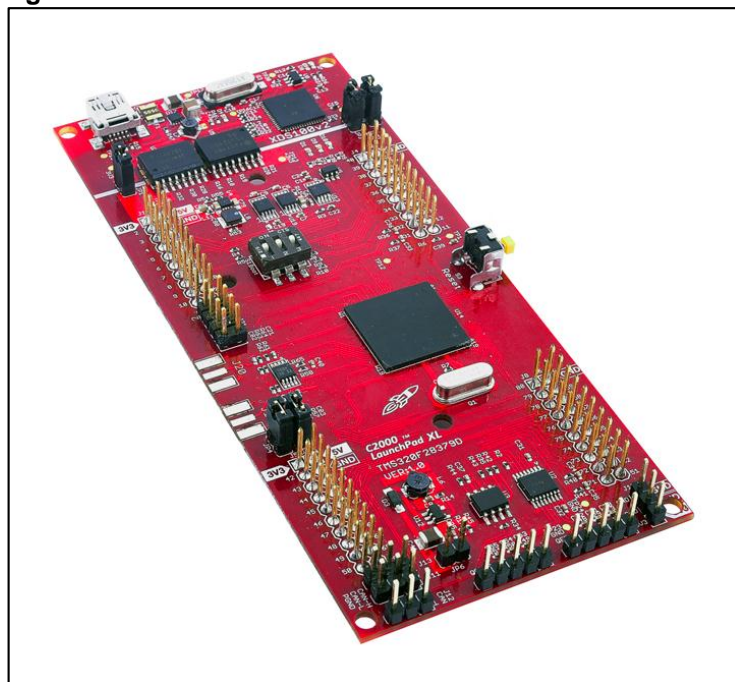
#### 3.4.1 LAUNCHXL-F28379D

Esta placa de desenvolvimento vem equipada com o microcontrolador TMS320F28379D, que atende as características mínimas necessárias definidas para a utilização no projeto (TI, 2018b). Suas principais características são:

- Possui dois CPUs de 32 bits;
- Operação em 200 MHz;
- Memória Flash de 1MB;
- Memória RAM de 204KB;
- Operação em 3,3V;
- 4 conversores AD;
- Conversor AD de 12 ou 16 bits;
- 24 saídas PWM, com 16 saídas sendo de alta resolução;
- Possibilita a criação de tempo morto em todas as saídas PWM;
- Comunicação com o computador por meio de porta USB;
- Possibilidade de aquisição por meio da loja da própria fabricante.

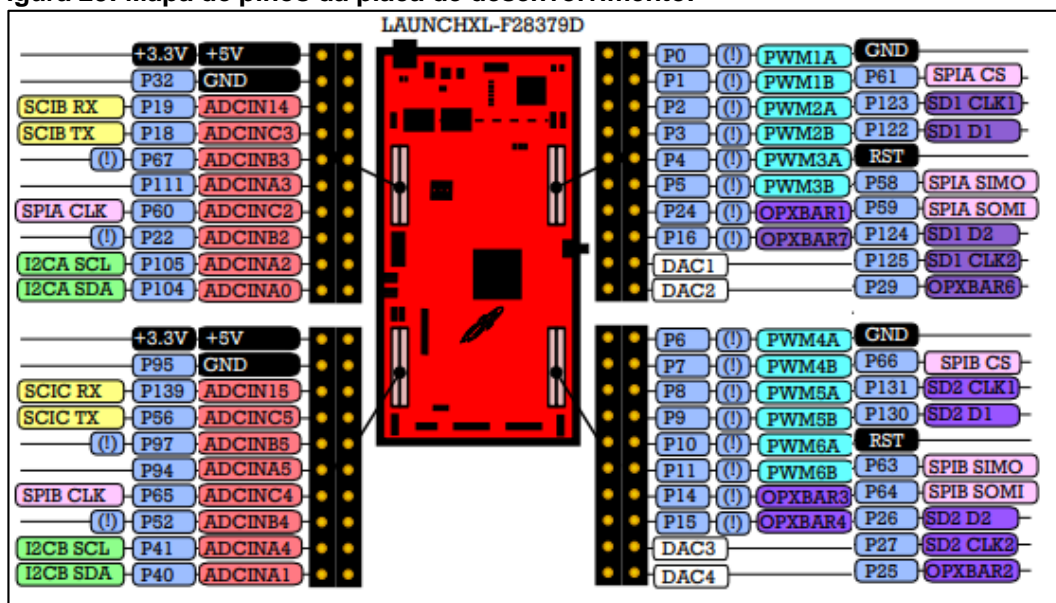
A placa de desenvolvimento utilizado é apresentado na Figura 22 enquanto o mapa de pinos da Placa é apresentado na Figura 23.

Figura 22: Placa de desenvolvimento LAUNCHXL-F28379D.



Fonte: TI (2018a).

Figura 23: Mapa de pinos da placa de desenvolvimento.



Fonte: Adaptado de TI (2014).

Analisando-se a Figura 23 observa-se que a Placa de desenvolvimento utilizada se assemelha a outras placas de desenvolvimento populares, possuindo barra de pinos e comunicação com o computador via USB.

Observa-se que nem todos os pinos disponíveis no microcontrolador estão disponíveis na Placa de desenvolvimento, no entanto, os pinos necessários para o controle do inversor estão disponíveis na barra de pinos da Placa de desenvolvimento.

### 3.4.2 Cálculo do tempo morto

O tempo morto é um intervalo de tempo em que ambas as chaves de um braço do inversor ficam desligadas. Sua utilidade se dá no fato de prevenir que ambas as chaves nunca fiquem ligadas, evitando, assim, um curto circuito entre as chaves.

Sabe-se que as chaves de potência possuem um tempo de resposta para realizarem o comando de ligar e desligar. Além disso, o tempo de resposta para desligar é maior que o tempo de resposta para ligar. Desse modo, caso se envie simultaneamente um comando de ligar uma chave do braço e outro comando de desligar a outra chave do braço, por um momento, as duas chaves estarão conduzindo, ocasionando um curto circuito naquele braço do inversor, inutilizando as duas chaves de potência daquele braço.

Para que se evite tal fato, o tempo morto deve ser configurado de modo a respeitar, no mínimo, a diferença entre o tempo mínimo de resposta para a chave ligar e o tempo máximo de resposta para a chave desligar (INFINEON, 2007). Tais tempos podem ser conhecidos a partir da leitura dos *datasheets* das chaves de potência e dos drivers que a comandam.

No caso deste trabalho, a chave de potência utilizada no inversor é o IGBT IRGB15B60KD da International Rectifier e o driver de comando é o IR2112 também da International Rectifier. A Tabela 10 mostra as características de chaveamento da chave de potência (IR, 2004) e a Tabela 11 mostra as características elétricas dinâmicas do driver de comando (IR, 2005).

**Tabela 10: Característica de chaveamento da chave de potência**

<b>Parâmetro</b>	<b>Típico (ns)</b>	<b>Máximo (ns)</b>
Atraso de ativação	34	44
Tempo de subida	16	22
Atraso de desativação	184	200
Tempo de descida	20	26

**Fonte: Adaptado de IR (2004).**



**Tabela 11: Características elétricas dinâmicas do driver de comando.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Típico (ns)</b>	<b>Máximo (ns)</b>
Atraso de propagação de ativação	125	180
Tempo de subida	80	130
Atraso de propagação de desativação	105	160
Tempo de descida	40	65

**Fonte: Adaptado de IR (2005).**

Infineon (2007) define uma metodologia que pode ser usada para o cálculo do tempo do morto, esta metodologia é expressa por meio da equação (33).

$$t_{morto} = [(t_{D\_OFF\_MAX} - t_{D\_ON\_MIN}) + (t_{PDD\_MAX} - t_{PDD\_MIN})] \times MS \quad (33)$$

onde:

$t_{morto}$ : é o tempo morto;

$t_{D\_OFF\_MAX}$ : é o atraso de desativação máximo da chave;

$t_{D\_ON\_MIN}$ : é o atraso de ativação mínimo da chave;

$t_{PDD\_MAX}$ : é o atraso de propagação máximo do driver;

$t_{PDD\_MIN}$ : é o atraso de propagação mínimo do driver

$MS$ : Margem de segurança.

A partir dos dados presentes nas Tabelas 10 e 11 e equação (33), o tempo morto que foi programado no microcontrolador, considerando uma margem de segurança de 2 vezes, foi de:

$$t_{morto} = [(200 - 34) + (160 - 125)] \times 2 \text{ [ns]}$$

$$t_{morto} = 402\text{ns}$$

Portanto, espera-se que o sinal para ativação de uma chave seja enviado pelo microcontrolador 402ns depois de ser enviado o sinal de desativação da outra chave

do braço do inversor, garantindo, assim, que as duas chaves nunca irão estar ativas ao mesmo tempo.

## 4 RESULTADOS OBTIDOS

A seguir apresentados os resultados obtidos a partir das placas projetadas, da execução do código desenvolvido, da recuperação de energia da carga inercial utilizando o software Simulink© como ferramenta de simulação e da rede neural como estimador de velocidade.

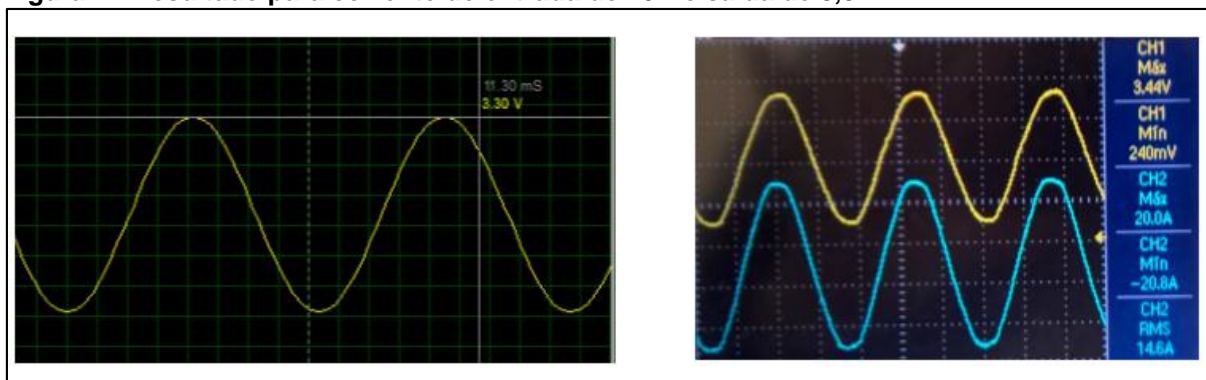
### 4.1 Resposta das placas projetadas

Após a realização do dimensionamento dos componentes que compõem as placas, o desenho de seus layouts e a confecção das mesmas foram realizados testes para comprovar seu funcionamento.

#### 4.1.1 Placa de condicionamento de sinais

Na Figura 24 encontram-se os resultados de simulação e práticos para a corrente de 20A e tensão de saída de 3.3V.

**Figura 24:Resultado para corrente de entrada de 20A e saída de 3,3V.**

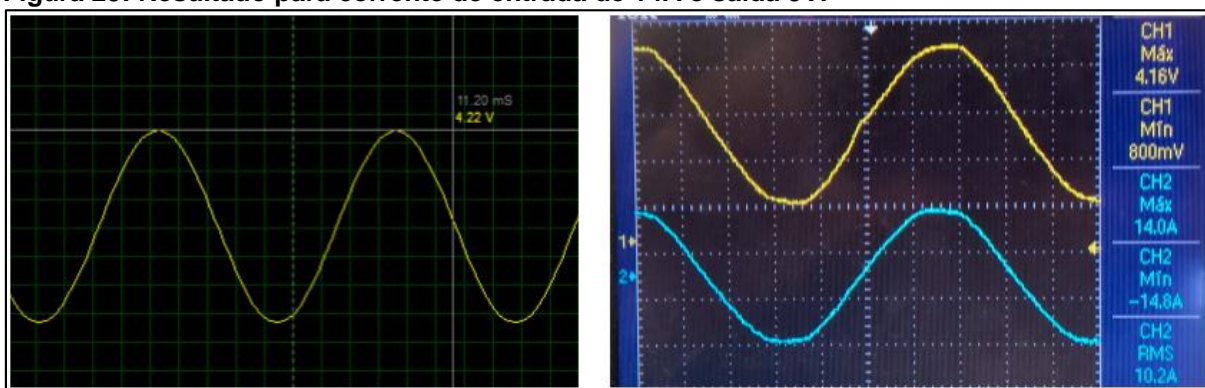


Fonte: Autoria própria.

Observa-se que foi obtido um bom resultado para a corrente de entrada de 20A e tensão de saída de 3.3V. A forma de onda de tensão aparenta ser compatível com a forma de onda da corrente de entrada. Observa-se que a tensão máxima no teste prático foi acima da tensão de 3.3V, isso ocorreu devido aos erros relacionados aos valores dos resistores.

Na Figura 25 encontram-se os resultados de simulação e práticos para a corrente de 14A e tensão de saída de 5V.

**Figura 25: Resultado para corrente de entrada de 14A e saída 5V.**



Fonte: Autoria própria.

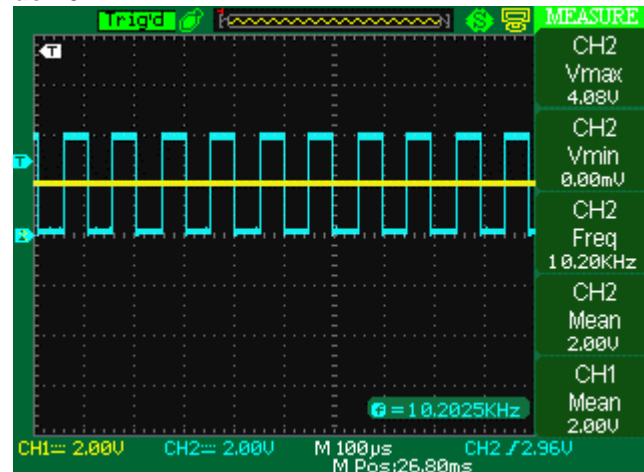
Para a saída de 5V, observa-se que para correntes de até 12A de pico o comportamento do circuito é como o esperado. No entanto a partir de 14A a forma de onda de saída apresenta uma distorção na forma de onda da tensão de saída, indicando saturação, para que isso não ocorra formulou-se uma estratégia e espera-se que nas próximas placas confeccionadas tal saturação não ocorra. A exemplo da tensão de saída de 3.3V, o erro nos valores dos resistores contribuem para um pequeno erro no sinal de saída.

#### 4.1.2 Filtro passa-baixa

Para a realização dos testes com o filtro passa-baixa utilizou-se com o auxílio de um gerador de sinal, sinais de várias frequências, de modo que o objetivo era o de verificar se o filtro apresentaria boa resposta para uma alta gama de frequências.

A Figura 26 ilustra a resposta do filtro diante da aplicação de um sinal quadrado de 10 kHz.

**Figura 26: Resposta do filtro a um sinal quadrado de 10kHz.**

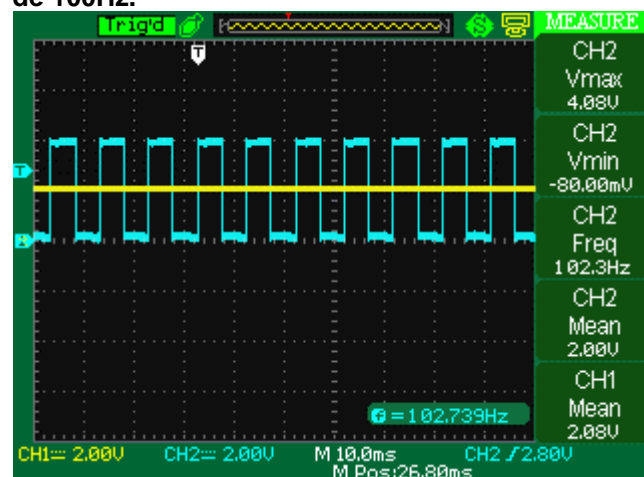


Fonte: Autoria própria.

Analisando-se a Figura 26, observa-se que o filtro apresentou uma ótima resposta quando aplicado um sinal de 10kHz, que é a frequência de trabalho configurada para o sinal PWM que controla as chaves do inversor.

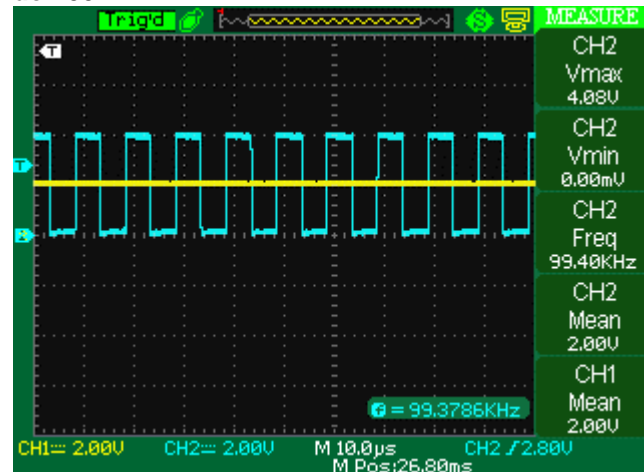
Para garantir que o filtro possui resposta adequada em uma ampla faixa de frequência as Figuras 27 e 28 ilustram a resposta do filtro diante da aplicação de um sinal de 100Hz e 100kHz respectivamente.

**Figura 27: Resposta do filtro a um sinal quadrado de 100Hz.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 28: Resposta do filtro a um sinal quadrado de 100kHz.**

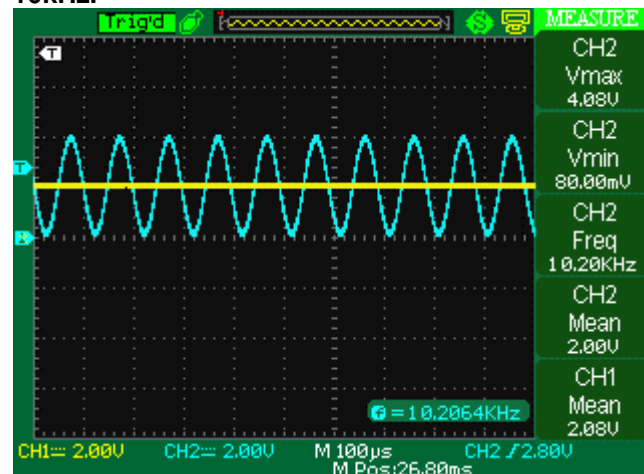


Fonte: Aatoria própria.

A partir do apresentado nas Figuras 27 e 28 observa-se que o filtro apresentou boa resposta para uma ampla faixa de frequência, sendo que até mesmo para frequências próximas da frequência de corte sua resposta é satisfatória.

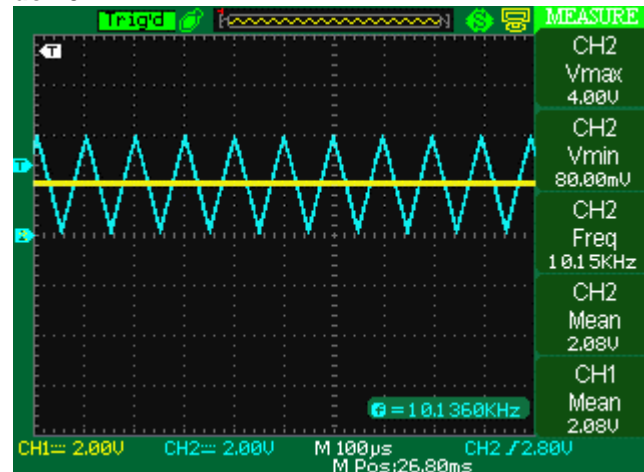
Por fim, para confirmar o bom funcionamento do filtro, as Figuras 29 e 30 apresentam a resposta em do filtro diante da aplicação de um sinal quadrado e outro triangular, ambos com 10kHz.

**Figura 29: Resposta do filtro a um sinal senoidal de 10kHz.**



Fonte: Aatoria própria.

Figura 30: Resposta do filtro a um sinal triangular de 10kHz.



Fonte: Aatoria própria.

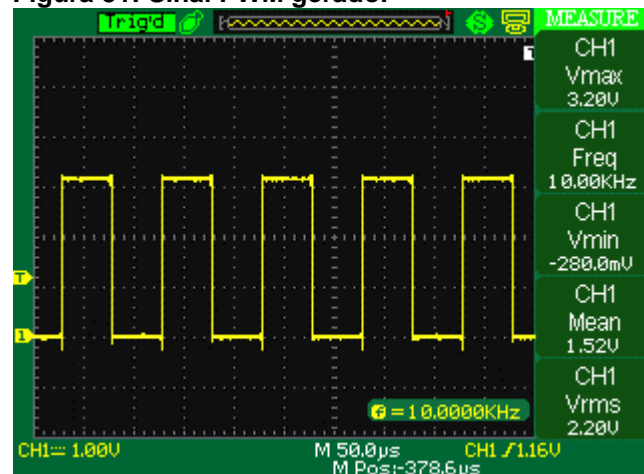
Diante dos resultados apresentados observa-se que o filtro projetado possui boa confiabilidade e pode ser utilizado para filtrar o sinal de corrente adquirido por um sensor de corrente no barramento CC.

#### 4.2 Aspectos do código desenvolvido

O código do microcontrolador foi desenvolvido utilizando a plataforma do *Code Composer Studios* disponibilizado pela própria fabricante da placa de desenvolvimento utilizada.

De modo a confirmar o bom funcionamento do código foram realizados alguns testes para ilustrar os sinais PWM gerados pelo microcontrolador. Na Figura 31 é ilustrado a frequência do sinal PWM gerado.

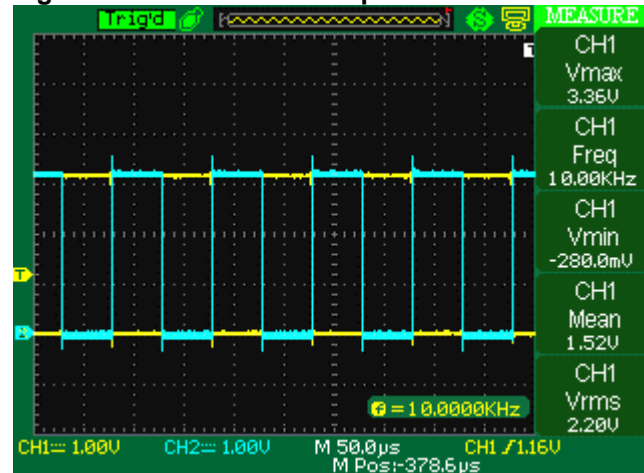
Figura 31: Sinal PWM gerado.



Fonte: Aatoria própria.

A partir da análise da Figura 31 observa-se que o sinal PWM gerado possui frequência de 10kHz conforme definido em projeto. Na Figura 32 é ilustrado o sinal PWM principal e seu complementar gerado pelo microcontrolador.

**Figura 32: Sinais PWM complementar.**

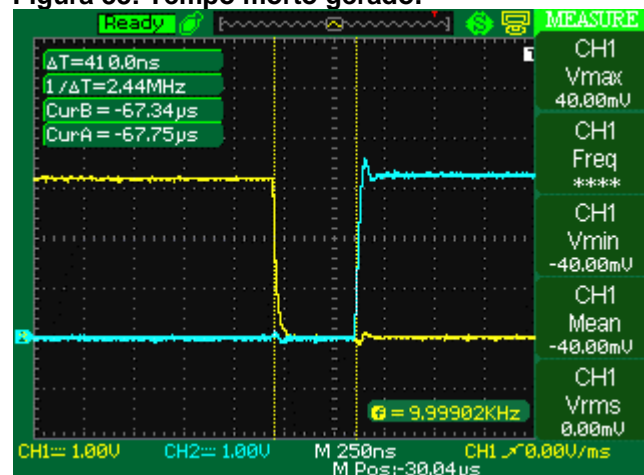


Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o comportamento do sinal PWM gerado é o necessário para o comando das chaves de potência de cada braço do inversor, onde, apenas um dos sinais possui nível alto, ou seja, quando o sinal principal está em nível alto, o complementar está em nível baixo, e quando o sinal principal está em nível baixo, o complementar está em nível alto.

A Figura 33 ilustra o tempo morto adicionado ao código visando evitar que as duas chaves de um mesmo braço estejam em condução ao mesmo tempo, causando assim, um curto-circuito no inversor.

**Figura 33: Tempo morto gerado.**



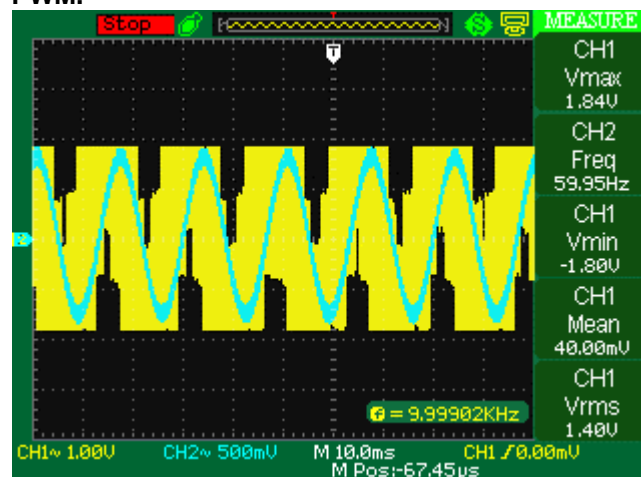
Fonte: Autoria própria.



Observa-se que o tempo morto apresentado foi de 410ns, que é o valor mais próximo de tempo morto acima do valor projetado no item 3.4.2.

Por fim, a Figura 34 ilustra o sinal PWM gerado utilizando modulação senoidal para a geração de uma onda senoidal com frequência de 60Hz.

**Figura 34: Sinal senoidal obtido a partir da saída PWM.**



Fonte: Autoria própria.

### 4.3 Estimação de velocidade

Nesta seção do trabalho serão apresentados os resultados obtidos a partir da estimação da velocidade da máquina de indução operando como gerador.

A partir da realização de diversos testes com várias topologias de rede candidatas à resolução do problema e visando a aplicação futura em hardwares de baixo custo, com capacidade de processamento limitada chegou-se à topologia da rede descrita na Tabela 12.

**Tabela 12: Topologia da rede utilizada.**

**PMC de saídas recorrentes às entradas**

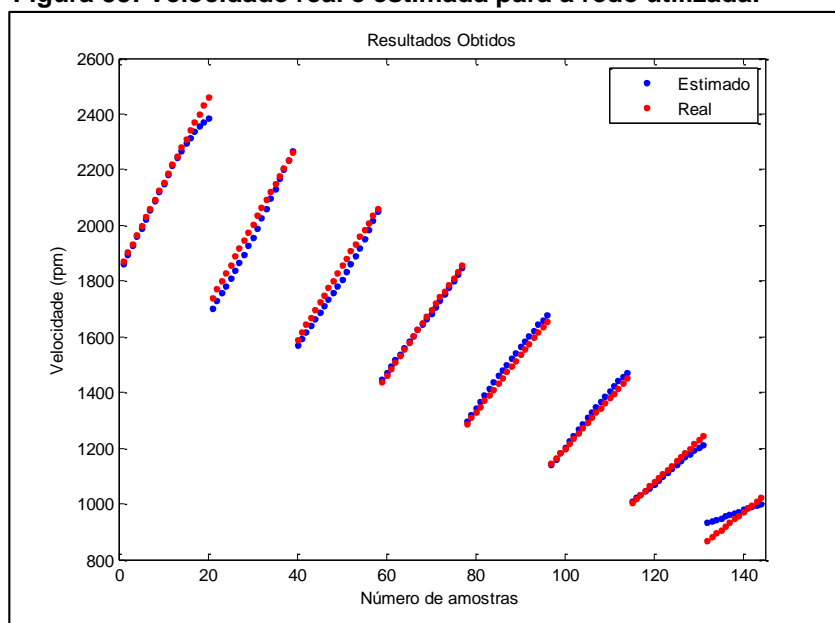
Nº de camadas intermediárias	1 camada
Nº de neurônios na camada intermediária	6 neurônios
Nº de entradas atrasadas	1 entrada
Erro	1e-6

Fonte: Autoria própria.

Utilizando a topologia de rede apresentada na Tabela 12 procedeu-se aos procedimentos de treinamento e teste da eficácia da rede neural projetada para a estimação da velocidade de uma máquina de indução trifásica operando com gerador alimentada por inversor de frequência.

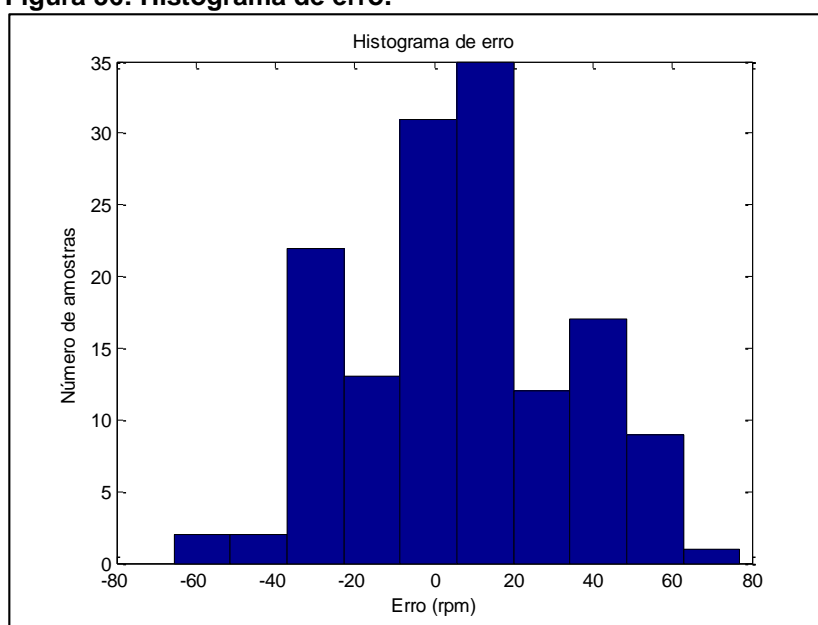
A Figura 35 ilustra os resultados encontrados pela rede para a velocidade estimada da máquina de indução trifásica.

**Figura 35: Velocidade real e estimada para a rede utilizada.**



Fonte: Autoria própria.

Para uma melhor análise dos resultados encontrados a Figura 36 representa o histograma de erro apresentado pela rede.

**Figura 36: Histograma de erro.**

Fonte: Autoria própria.

Para uma análise mais apurada dos erros ilustrados na Figura 36, encontram-se, na Tabela 13, os dados de erro relativo médio, erro absoluto médio, erro máximo e erro mínimo.

**Tabela 13: Erros obtidos.**

<b>Erros obtidos</b>	
Erro relativo médio	1,4070 %
Erro absoluto médio	21,5796 rpm
Erro mínimo	0,0285 rpm
Erro máximo	77,0034 rpm

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 12 deste documento pode-se verificar que o número de neurônios utilizados para a topologia final da rede foi pequeno, uma vez que este número de neurônios apresentou uma generalização adequada para o problema proposto. Além disso, pode-se verificar também que utilizou-se apenas uma camada escondida, tal fato se deve à possibilidade de aplicação futura da rede em um hardware de baixo custo, sendo que para diminuir a quantidade de processamento exigida para a operação da rede teve-se como parâmetro de projeto apenas uma camada neural intermediária.

Os conjuntos de treinamento e teste foram obtidos a partir de simulações, sendo que foram utilizadas 1163 amostras para o conjunto de treinamento e 144 amostras para o conjunto de teste.

Analisando-se a Figura 35, o histograma de erro apresentado na Figura 36 e os valores de erro apresentados na Tabela 13 pode-se observar que a maioria das amostras usadas na validação da rede tiveram seus valores de velocidade estimada muito próximos de seus respectivos valores reais de velocidade.

Observa pelo histograma da Figura 36 que o erro relativo observado de -60 rpm até 80 rpm, o que pode, em alguns casos de operação, em que se necessita de uma precisão grande na velocidade, problemas de funcionamento da máquina de indução trifásica operando como gerador.

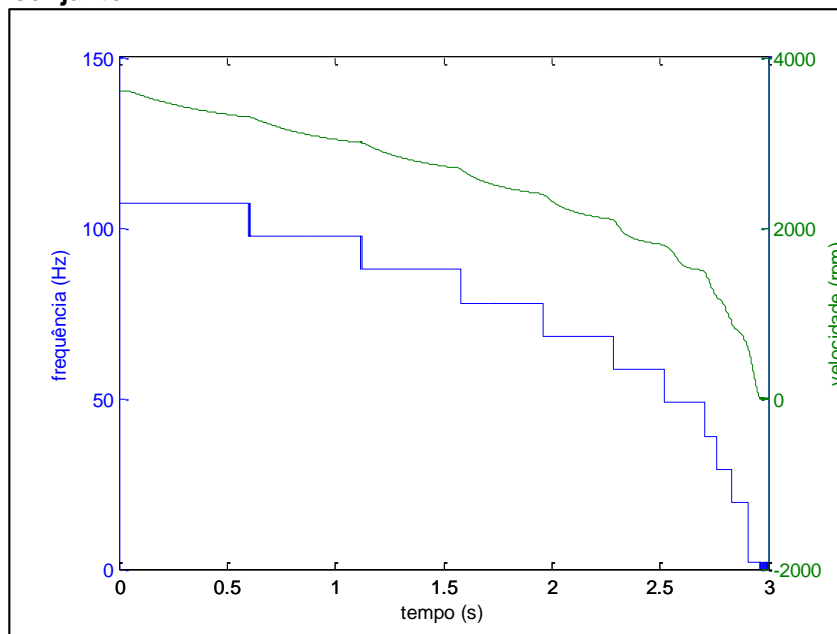
Por fim, a partir da análise dos dados da Tabela 13 observa-se que o maior erro encontrado foi de 77,0034 rpm, o que, como exposto anteriormente pode representar um erro muito alto em certas condições de operação. O erro relativo médio foi de 1,4070%, enquanto o erro absoluto médio foi de 21,5796 rpm, que podem ser considerados valores adequados para operações que não requerem alto grau de precisão na velocidade da máquina. Dessa maneira, para garantir que o conjunto máquina de indução/carga inercial sempre esteja gerando potência optou-se por inserir um monitoramento do sentido da corrente no inversor.

#### **4.4 Recuperação de energia**

A partir do descrito anteriormente e do sistema proposto na seção 3.1 foram realizadas algumas simulações de modo a se comprovar a viabilidade de se recuperar a energia presente em cargas de alto teor inercial.

A Figura 37 apresenta a variação de frequência e como a variação de frequência influencia a variação de velocidade do conjunto máquina de indução/carga inercial.

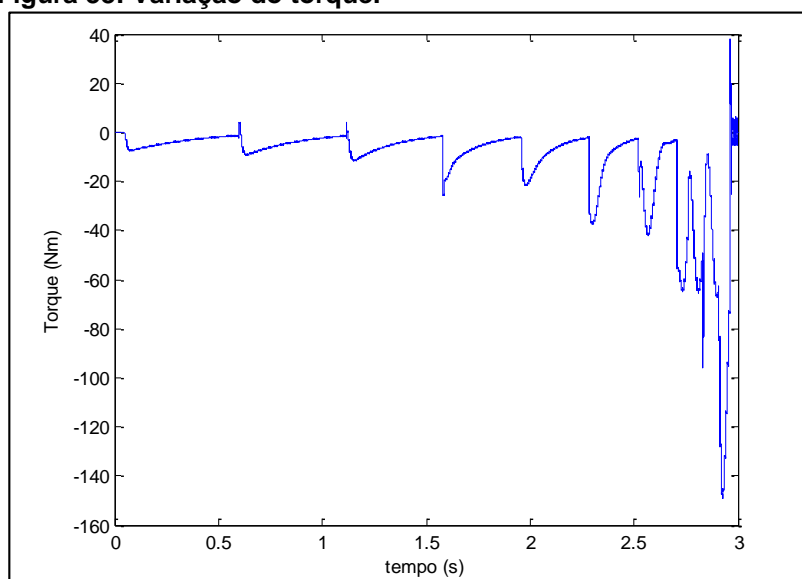
**Figura 37: Influência da variação de frequência na velocidade do conjunto.**



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que a diminuição da frequência de alimentação da máquina de indução contribui para uma diminuição da velocidade de operação da mesma, uma vez que na operação como gerador existe um torque contrário que desacelera o conjunto. A Figura 38 ilustra a variação de torque da máquina.

**Figura 38: Variação do torque.**



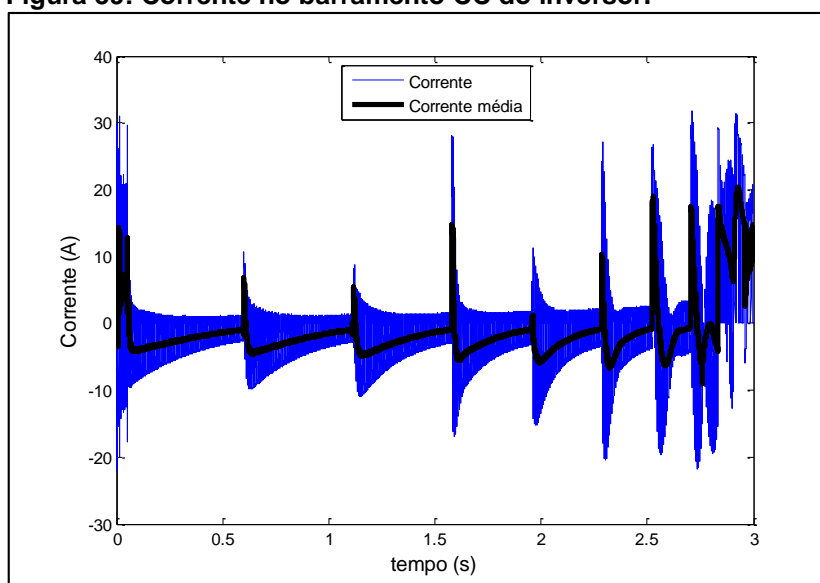
Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 38, verifica-se que o torque na maioria do tempo é negativo, ou seja, a máquina está operando como gerador e como existe uma força

contrária ao movimento da carga inercial existe uma desaceleração da mesma. Tal desaceleração é mais evidente no período final da simulação onde se comparando a Figura 37 com a Figura 38 observa-se que o torque contrário é maior contribuindo para uma desaceleração mais brusca da carga inercial.

Para que se consiga verificar a devolução de energia para o barramento CC do inversor na Figura 39 é ilustrado a corrente no barramento CC.

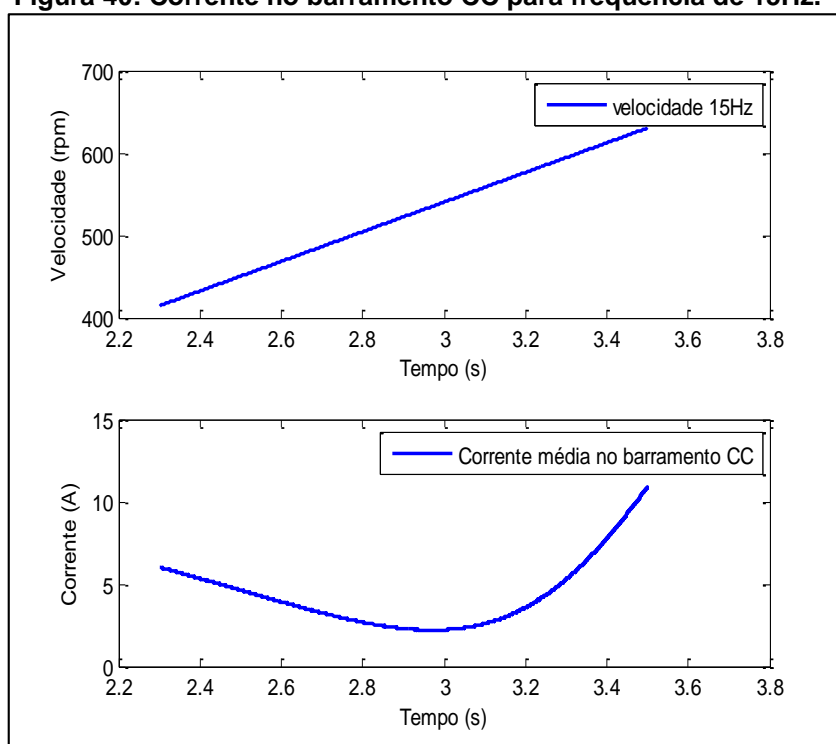
**Figura 39: Corrente no barramento CC do inversor.**



**Fonte: Autoria própria.**

A partir da Figura 39 observa-se que a corrente presente no barramento CC do inversor varia de acordo com o chaveamento das chaves de potência. Para que se conseguisse visualizar a corrente média utilizou-se um filtro passa baixa com frequência de corte igual a 10Hz.

Observa-se a partir da análise da Figura 39 que a partir de 2,7s; que representa uma frequência de operação abaixo de 20Hz, não houve recuperação de energia, ou seja, mesmo acima da velocidade síncrona a máquina consumia potência da rede elétrica. Para uma melhor análise desse problema, a Figura 40 ilustra a corrente no barramento CC do inversor para uma frequência de alimentação de 15Hz e velocidade de operação da máquina no entorno de 450 Hz, que é a velocidade síncrona da máquina de 4 polos para alimentada na frequência de 15 Hz.

**Figura 40: Corrente no barramento CC para frequência de 15Hz.**

Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que em nenhum momento a corrente é negativa, ou seja, em nenhum momento a máquina opera como gerador, sempre consumindo potência da rede elétrica. Tal fato se dá, pois as perdas presentes na máquina de indução superam a potência gerada no eixo da máquina.

Dessa maneira, para frequência de alimentação baixa, as perdas são maiores que a potência gerada, acarretando em um consumo de potência.

Para frequências de operação maiores observa-se que a corrente possui fluxo do inversor para a fonte, comprovando que houve geração de potência elétrica.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposta uma forma para a realização da recuperação da energia cinética de cargas industriais a partir da utilização da própria máquina de indução ao qual a mesma está acoplada, utilizando-se apenas um inversor de frequência para alterar o ponto de operação da máquina de motor pra gerador no momento em que o conjunto máquina-carga inercial for desligado.

Observa-se que existem várias cargas na indústria que possuem um alto momento de inércia e que quando tais cargas são desligadas, a energia cinética armazenada é desperdiçada. Para que se consiga recuperar a energia dessas cargas se faz necessário o controle da máquina que está acoplada a essa.

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica acerca dos principais temas a serem abordados no trabalho, após, foram realizados os projetos de circuitos eletrônicos necessários para o funcionamento do projeto. Por fim, foram obtidos resultados a partir de testes realizados.

Ao realizar os testes práticos com o inversor verificou-se alguns problemas que não poderiam ser sanados em um curto intervalo de tempo, dessa maneira, optou-se por apresentar os resultados de recuperação de energia a partir de simulações.

A alteração da frequência de alimentação da máquina a partir de um inversor de frequência proporciona o funcionamento da máquina como gerador em praticamente todo processo de desaceleração do conjunto máquina-carga, evitando que a energia armazenada seja desperdiçada.

Observou-se também que para frequências de alimentação baixas, a máquina sempre irá consumir potência, uma vez que as perdas superam a potência gerada a partir da carga inercial.

### 5.1 Trabalhos futuros

Para a continuidade da pesquisa na área de recuperação de energia pode-se sugerir alguns trabalhos futuros:

- Realização de ensaios práticos para a verificar o comportamento da recuperação de energia em ambientes reais;
- Melhora da rede neural artificial utilizada para a estimativa de velocidade da máquina quando operando como gerador;



- Utilização de sistema microcontrolado de baixo custo;
- Integração do sistema de recuperação de energia com rede elétrica a partir de um conversor *Back-to-Back* ou similar;
- Aplicação de controle vetorial para o comando das chaves de potência.

## REFERÊNCIAS

ABAD, Gonzalo et al. Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation. John Wiley & Sons, 2011.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência**. 2006.

BEACON. **Operating plants**. Disponível em: <<http://beaconpower.com/operating-plants/>>. Acesso em 07 maio 2018.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. Prentice-Hall do Brasil, 1984.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. AMGH Editora, 2013.

DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Prentice-Hall do Brasil, 1994.

DOS SANTOS, Euzeli; DA SILVA, Edison R. **Advanced Power Electronics Converters: PWM Converters Processing AC Voltages**. John Wiley & Sons, 2014.

EBADI, Abdollah; JI, Jinchun. Investigation & comparison of the integration of flywheel energy storage in hybrid electric and electric vehicles using bond graphs. In: **Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017 20th International Conference on**. IEEE, 2017. p. 1-6.

EPE. **Demanda de energia: 2050**. Nota técnica DEA 13/14. Rio de Janeiro, ago. 2014.

EPE. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2017**: Ano base 2016 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2017.

FITZGERALD, ARTHUR E.; KINGSLEY JR, CHARLES; UMANS, STEPHEN. D. **Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência**. Tradução de Anatólio Laschuk. 2006.

GOEDEL, Alessandro. Estimador neural de velocidade para motores de indução trifásicos. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GRACIOLA, Clayton Luiz et al. Comparativo entre as redes PMC e RBF para estimar velocidade em motores de indução trifásicos. SBAI, 2013.

GRACIOLA, Clayton Luiz et al. Neural speed estimator for line-connected induction motor embedded in a digital processor. **Applied Soft Computing**, v. 40, p. 616-623, 2016.

HAYKIN, Simon S., et al. Neural networks and learning machines. Vol. 3. Upper Saddle River, NJ, USA:: Pearson, 2009.

HIBBELER, Russel C. **Estática: mecânica para engenharia**. Pearson Education do Brasil, 2005.

HIBBELER, Russell C. **Dinâmica: mecânica para engenharia**. Pearson Education do Brasil, 2011.

IEEE. **IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**. Fev, 2018.

INFINEON. **AN2007-04**. Application note, V1.0, 2007.

IR. **IRGB15B60KD**. International Rectifier, 2004.

\_\_. **IR2112(-1-2)(S)PbF**. International Rectifier, 2005.

MIYAMOTO, Renato Kazuo. CONEXÃO À REDE ELÉTRICA DE UM GERADOR DE INDUÇÃO COM ROTOR EM GAIOLA DE ESQUILO ACOPLADO A UM VOLANTE INERCIAL. 112f. Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

PALIZBAN, Omid; KAUHANIEMI, Kimmo. Energy storage systems in modern grids—Matrix of technologies and applications. **Journal of Energy Storage**, v. 6, p. 248-259, 2016.

PERTENCE JR, Antonio. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos-8**. Bookman Editora, 2015.

RICHARDS, Guy. **It's green for go**. Engineering & Technology. Nov. 2008.

ROCKWELL. **Starting High Inertia Loads: A Comparison of Starting Options**. Estados Unidos, abr. 1998.

SANTOS, Tiago Henrique dos. ESTIMADOR NEURAL DE VELOCIDADE APLICADO A UM DRIVER DE CONTROLE ESCALAR DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO. 2012. 117 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2012.

SANTOS, Tiago Henrique dos et al. Scalar control of an induction motor using a neural sensorless technique. **Electric power systems research**, v. 108, p. 322-330, 2014.

SILVA, I. N. da, D. H. Spatti, e R. A. Flauzino. (2010). **Redes Neurais Artificiais: para engenharia e ciências aplicadas**. São Paulo: Artliber, 2010.

SULINO, Yann Reis Dias. **Acionamento de cargas com alto teor inercial**. 2016. 79 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica: Ênfase em Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

SZCZESNIAK, Paweł. **Three-Phase AC–AC Power Converters Based on Matrix Converter Topology**. Springer, 2013.

TERZIC, Mladen V.; MIHIC, Dragan S.; VUKOSAVIC, Slobodan N. Design of high-speed, low-inertia induction machines with drag-cup rotor. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 29, n. 1, p. 169-177, 2014.

TI. **TMS320F28379D Launchpad Quick Start Guide (Rev. A)**. Texas Instruments, 2014.

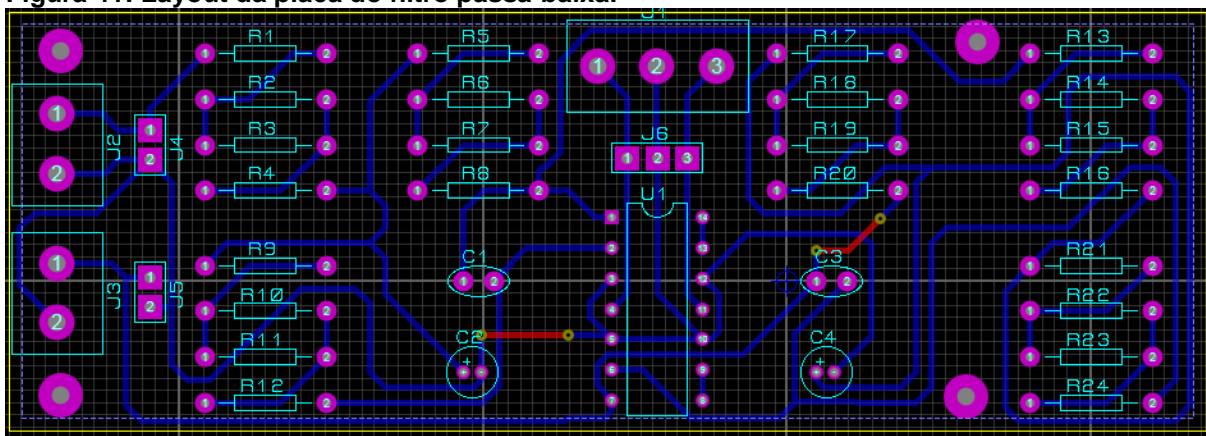
\_\_. **C2000 Delfino MCUs F28379D Launchpad Development Kit**. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/launchxl-f28379d>>. Acesso em 15 out. 2018a.

\_\_. **TMS320F2837xD Dual-Core Delfino™ Microcontrollers**. Texas Instruments, 2018b.

## ANEXO A – LAYOUT DAS PLACAS PROJETADAS

A Figura 41 ilustra o layout final da placa do filtro passa baixa desenvolvido a partir do software ARES©.

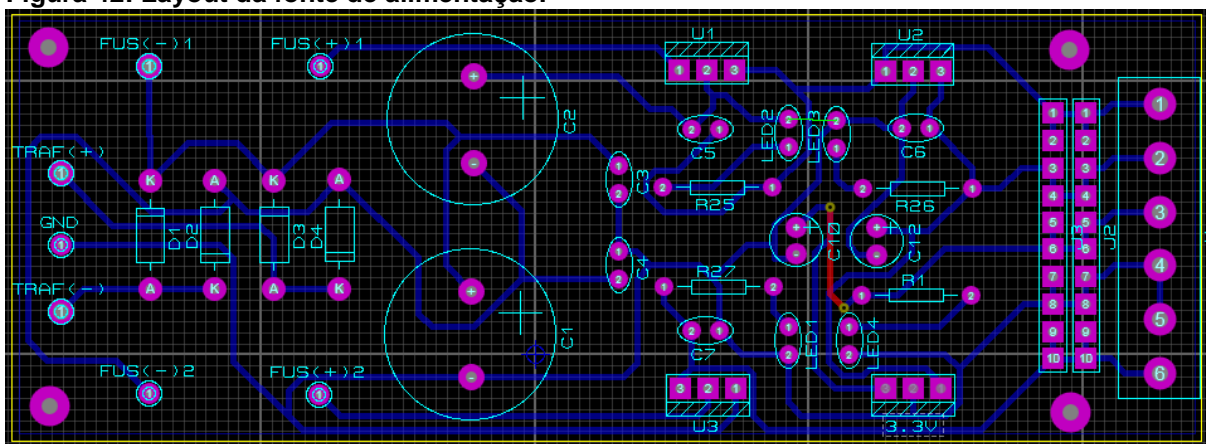
Figura 41: Layout da placa do filtro passa-baixa.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 42 ilustra o layout final da fonte de alimentação projetada.

Figura 42: Layout da fonte de alimentação.



Fonte: Autoria própria.