

Pedro Pivatto Cavilha

## **BANCADA DIDÁTICA PARA ACIONAMENTO DE MOTORES**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) submetido ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Gierry Waltrich, Dr.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Cavilha, Pedro Pivatto  
Bancada didática para acionamento de motores / Pedro  
Pivatto Cavilha ; orientador, Gierri Waltrich, 2020.  
63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Motor de indução. 3.  
Inversores. 4. Acionamento de motores. I. Waltrich, Gierri  
. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia Elétrica. III. Título.

Pedro Pivatto Cavilha

## **BANCADA DIDÁTICA PARA ACIONAMENTO DE MOTORES**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora.

Florianópolis, 10 de Dezembro de 2020.

---

Prof. Jean Viane Leite, Dr.  
Coordenador do Curso

### **Banca Examinadora:**

---

Prof. Gierry Waltrich, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Samir Ahmad Mussa, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng. Caio Guilherme da Silva Moraes, M.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus queridos familiares, colegas e professores.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, a Deus, que fez com que meus objetivos fossem alcançados, durante todos os meus anos de estudos.

Aos meus pais e irmãos, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Agradeço à minha namorada Camila que sempre esteve ao meu lado durante o meu percurso acadêmico.

Aos professores, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso. Em especial ao professor Gierrri, pela orientação e condução deste trabalho, por todo suporte e dedicação essenciais para que este pudesse ser executado.

## RESUMO

Este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de uma bancada didática para acionamento de motores de indução trifásico, para que alunos de pós-graduação do Instituto de Eletrônica de Potência possam utilizar em disciplinas com ementas relacionadas ao tema. O escopo do projeto abrange desde o estudo teórico do tema, com simulações e conceitos de teoria, circuitos intermediários e finalização da bancada definitiva. São projetados tanto o hardware a ser utilizado, estrutura para o motor e conexões necessárias entre placas de acionamento, driver e motor, como o firmware a ser implementado nas placas de controle e FPGA. Para validação do sistema desenvolvido, são feitos alguns testes e experimentos, similares aos que serão feitos pelos alunos que utilizarem o sistema projetado.

**Palavras-chave:** Motor de Indução. Inversores. Acionamento de Motores.

## ABSTRACT

This project aims to develop a didactic bench for driving three-phase induction motors, so that postgraduate students from the *Instituto de Eletrônica de Potência* can use it in subjects related to the theme. The scope of the project ranges from the theoretical study of the theme, with simulations and theory concepts, intermediate circuits and finalization of the final bench. Both the hardware to be used, the structure for the motor and the necessary connections between drive boards, driver and motor are designed, as well as the firmware to be implemented in the control and FPGA boards. To validate the developed system, some tests and experiments are made, similar to those that will be made by students who use the designed system.

**Keywords:** Induction Motor. Inverters. Motor Drive.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Motor de Indução Trifásico .....	14
Figura 2 – Rotor Gaiola de Esquilo .....	15
Figura 3 – Circuito equivalente por fase .....	16
Figura 4 - Curvas de torque com diferentes valores de tensão.....	20
Figura 5 – Curvas de torque com diferentes resistências.....	21
Figura 6 - Curvas de torque com diferentes frequências e tensões.....	22
Figura 7 - sbRIO-9607.....	23
Figura 8 - sbRIO-9684.....	23
Figura 9 – Circuito projetado no Software Multisim .....	25
Figura 10 – Diagrama de blocos simulação LabView e Multisim .....	25
Figura 11 – Geração da onda portadora .....	26
Figura 12 – Onda portadora resultante.....	26
Figura 13 – Geração da onda moduladora.....	26
Figura 14 – Bloco de integração entre LabView e Multisim .....	27
Figura 15 – Correntes de fase.....	27
Figura 16 – Menu numérico.....	29
Figura 17 – Configuração de constantes .....	30
Figura 18 – Controles de constantes .....	31
Figura 19 – <i>Loop while</i> .....	31
Figura 20 – Aplicações do <i>loop while</i> .....	32
Figura 21 – Operações matemáticas .....	33
Figura 22 – Bloco condicional .....	33
Figura 23 – Menu de funções.....	34
Figura 24 – Saídas I/O.....	35
Figura 25 – Front Panel .....	36
Figura 26 – Controle proposto .....	37
Figura 27 – Formas de onda da onda moduladora .....	37
Figura 28 – Tempo morto entre sinais de gate.....	38
Figura 29 – Geração da onda portadora no FPGA, etapa inicial.....	39
Figura 30 - Geração da onda portadora no FPGA, segunda etapa.....	39
Figura 31 - Geração da onda portadora no FPGA, terceira etapa.....	40
Figura 32 - Geração da onda portadora no FPGA, etapa final.....	40

Figura 33 – Controle da constante angular.....	41
Figura 34 – Onda moduladora.....	42
Figura 35 – Onda moduladora defasada.....	43
Figura 36 – Sinais de Gate.....	43
Figura 37 – Conectores disponíveis.....	44
Figura 38 – Diagrama de blocos onda portadora.....	44
Figura 39 – Diagrama de blocos ondas moduladoras.....	45
Figura 40 – Circuito equivalente.....	46
Figura 41 – Circuito equivalente.....	48
Figura 42 – Sinal de Gate, 0 Hz.....	49
Figura 43 – Sinal de Gate, 30 Hz.....	49
Figura 44 – Sinal de Gate, 60 Hz.....	50
Figura 45 – Visão Geral do Equipamento.....	50
Figura 46 – Vista Superior Placas NI.....	51
Figura 47 – Módulo de Chaves IGBT.....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Conectores da placa sbRIO-9684 .....	24
Tabela 2 – Teste de rotor travado .....	47

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO .....	14
1.2	CIRCUITO EQUIVALENTE .....	15
1.3	PROBLEMA CENTRAL.....	16
1.4	PROPOSTA DE TRABALHO E OBJETIVOS.....	17
<b>1.4.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>17</b>
<b>1.4.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>17</b>
1.5	JUSTIFICATIVA .....	18
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>19</b>
2.1	ACIONAMENTO DE MÁQUINAS ASSÍNCRONAS .....	19
<b>2.1.1</b>	<b>Mudança no Número de Pólos.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Controle da Tensão de Alimentação .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Controle da Resistência do Rotor .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Controle de Tensão e Frequência de Alimentação.....</b>	<b>21</b>
2.2	LABVIEW NI.....	22
<b>2.2.1</b>	<b>Placas Utilizadas .....</b>	<b>22</b>
<i>2.2.1.1</i>	<i>sbRIO-9607.....</i>	<i>22</i>
<i>2.2.1.2</i>	<i>sbRIO-9684.....</i>	<i>23</i>
<b>2.2.2</b>	<b>Multisim.....</b>	<b>24</b>
2.3	ESTRUTURA DO CÓDIGO DE CONTROLE.....	28
<b>2.3.1</b>	<b>Elementos Básicos .....</b>	<b>28</b>
<i>2.3.1.1</i>	<i>Constantes.....</i>	<i>28</i>
<i>2.3.1.2</i>	<i>Loop While.....</i>	<i>31</i>
<i>2.3.1.3</i>	<i>Operações Matemáticas.....</i>	<i>32</i>
<i>2.3.1.4</i>	<i>Condiciona l if.....</i>	<i>33</i>
<i>2.3.1.5</i>	<i>Blocos do Módulo FPGA.....</i>	<i>34</i>

2.3.1.6	<i>Front Panel</i> .....	35
2.4	ACIONAMENTO DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....	36
<b>2.4.1</b>	<b>Controle Proposto</b> .....	<b>36</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Acionamento Manual</b> .....	<b>38</b>
2.4.2.1	<i>Onda Portadora</i> .....	38
2.4.2.2	<i>Onda Moduladora</i> .....	40
2.4.2.3	<i>Diagrama de Blocos Completo</i> .....	44
2.5	EXPERIMENTOS E RESULTADOS .....	45
<b>2.5.1</b>	<b>Obtenção do Circuito Equivalente do Motor</b> .....	<b>45</b>
2.5.1.1	<i>Teste de Rotor Travado</i> .....	45
2.5.1.2	<i>Teste a Vazio</i> .....	47
<b>2.5.2</b>	<b>Formas de Onda Obtidas</b> .....	<b>48</b>
2.5.2.1	<i>Sinais de Acionamento</i> .....	48
2.5.2.2	<i>Equipamento</i> .....	50
<b>3</b>	<b>Conclusão</b> .....	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Motores elétricos são elementos que convertem energia elétrica em mecânica. Podem ser também utilizados para converter energia mecânica em elétrica, sendo então denominados geradores elétricos. Ambos são máquinas elétricas, e podem ser utilizados tanto como motor como gerador. Na prática, porém, as máquinas elétricas possuem uma função determinada, gerador ou motor, com certas diferenças na fabricação do dispositivo que otimizam o seu funcionamento.

Motores elétricos são extremamente difundidos e seu uso abrange as mais variadas aplicações, desde equipamentos eletroeletrônicos usados em domicílio, como em geladeiras, aspiradores e liquidificadores, até na indústria em geral, produzindo a força motriz para movimentar máquinas de grande porte, locomotivas, esteiras, entre outros exemplos e aplicações. (CHAPMAN, 2013, p. 2).

Os primeiros estudos que posteriormente levaram ao desenvolvimento do motor elétrico tiveram início em 1820, quando o cientista dinamarquês Hans Christian Ørsted observou pela primeira vez a interação entre corrente elétrica e campo magnético. Em seu experimento, Ørsted posicionou uma bússola na proximidade de um fio condutor. Ao induzir uma corrente elétrica através do fio, ele observou que a bússola se alinhava em direção diferente em relação ao campo magnético da Terra. Com isso, foi observada pela primeira vez a existência da relação entre corrente elétrica e campo magnético.

A grande contribuição desse experimento para os motores elétricos, conforme Guarnieri, M. (2018), se dá no fato de que foi constatada que a interação entre uma corrente elétrica e um campo magnético gera um efeito mecânico. Esse efeito mecânico foi posteriormente muito estudado e aprofundado, por diversos cientistas.

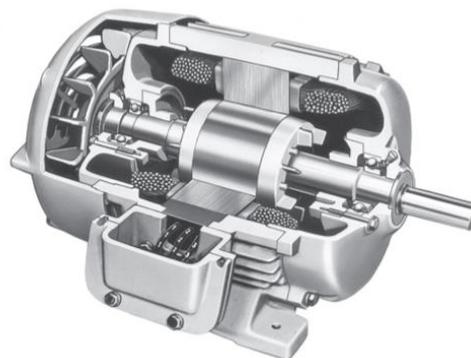
A utilização de motores elétricos de corrente alternada em larga escala teve grande impulso pelo desenvolvimento tecnológico do século 20, segundo Guarnieri, M. (2018), e essa tendência para o uso de motores elétricos continua com força. Novos motores, mais compactos e mais eficientes são constantemente inseridos no mercado, renovando seu potencial e melhorando a eficiência deste setor.

## 1.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Motores de indução são motores que funcionam com o estator ligado à uma fonte de tensão alternada, que pode ser composta de diversos números de fases. As bobinas do estator são dispostas no motor de modo que a soma dos fasores das tensões de fase da fonte de tensão cria um campo magnético girante no interior do motor, com a frequência relacionada com a frequência da rede e o número de pólos do motor. O exemplo mais comum é o motor de indução trifásico, que possui as bobinas do estator posicionadas com  $120^\circ$  entre si. O motor de indução é assim denominado pelo fato do rotor não ser alimentado com fonte de tensão externa. O campo magnético girante gerado pelo estator induz correntes no rotor. Os condutores do rotor, por serem percorridos por essas correntes geradas pelo estator, interagem com o campo magnético girante, resultando assim em um torque mecânico sobre o rotor.

Os motores de indução funcionam de modo assíncrono, o que significa que o rotor não possui a mesma velocidade angular do campo girante, mas uma mais lenta (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014, p. 309). Essa diferença de velocidade é fundamental para o funcionamento do motor, sendo que é essa diferença que induz as correntes no rotor, e conseqüentemente o torque no eixo. Em aplicações práticas essa diferença de velocidade, usualmente chamada de escorregamento, possui valores entre 2 a 10% do valor da frequência do campo girante. (PELTOLA, 2002)

Figura 1 – Motor de Indução Trifásico

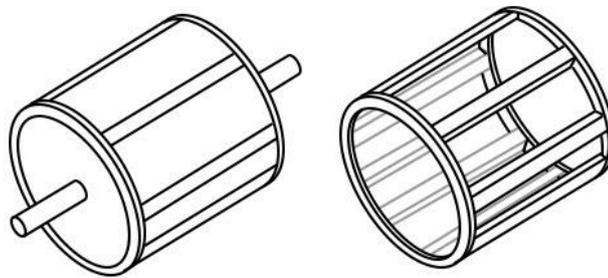


Fonte: CHAPMAN, 2013

A Figura 1 apresenta o desenho do corte de um motor de indução típico. O rotor é a parte do motor móvel encarregada de entregar a potência mecânica para realizar a atividade desejada. Existem alguns tipos de rotor que podem ser utilizados na fabricação do motor que variam em algumas características, sendo estes o rotor de ímãs permanentes, bobinado ou gaiola de esquilo.

O motor utilizado no projeto possui rotor do tipo gaiola de esquilo, que consiste em barras paralelas de material condutor arrançadas em formato cilíndrico, com as extremidades curto-circuitadas em um anel. Um exemplo desse tipo de rotor pode ser observado na Figura 2. Nas barras condutoras do rotor são induzidas as correntes pelo estator, responsáveis por gerar o torque. Esse rotor é o mais utilizado na indústria, devido à sua simplicidade e robustez.

Figura 2 – Rotor Gaiola de Esquilo



Fonte: Tesla Polyphase Induction Motors - [allaboutcircuits.com](http://allaboutcircuits.com)

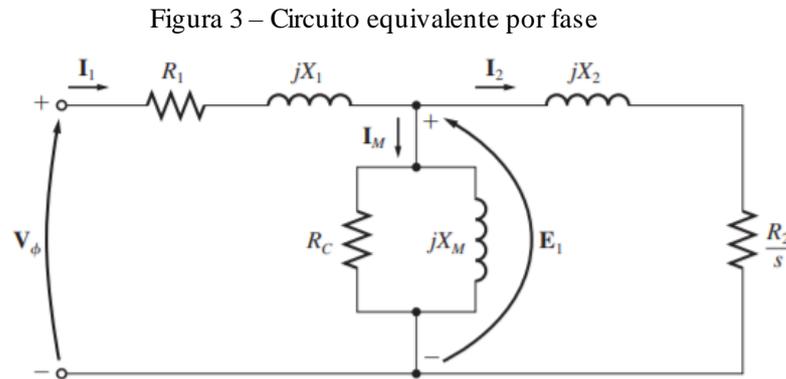
Na Figura 1 observa-se também o estator, parte estacionária do circuito do motor de indução. Em motores de indução trifásicos, no estator estão três conjuntos de bobinas, dispostas mecanicamente de forma simétrica, a uma diferença angular de 120 graus, onde cada conjunto é ligado a uma fase da rede de alimentação.

## 1.2 CIRCUITO EQUIVALENTE

O motor de indução trifásico pode ser representado por um circuito equivalente, a fim de traduzir todos os fenômenos que ocorrem internamente. Com o circuito equivalente, é possível traçar as curvas de funcionamento que determinam as principais características, bem como simular o motor em softwares de simulação, para avaliar a resposta a certa variação de carga, alimentação, método de controle ou para outro objetivo proposto.

Os valores das impedâncias do circuito equivalente variam de motor para motor, não existindo nenhum tipo de valor padrão, ou valor tabelado. Para obter os valores corretos deve-se fazer alguns testes com o motor, como o teste de rotor travado e o teste a vazio. Posteriormente, estes testes serão mais aprofundados com um exemplo prático.

Na Figura 3 pode-se ver o circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico, com a impedância do estator ( $R_1 + jX_1$ ), o eixo magnetizante ( $R_c + jX_m$ ) e a impedância do rotor ( $jX_2 + R_2/s$ ), sendo  $s$  o valor do escorregamento.



Fonte: CHAPMAN, 2013

### 1.3 PROBLEMA CENTRAL

Ao abordar o tema de maneira superficial, pode-se ter uma ideia simplista acerca do funcionamento dos motores elétricos. Isso não corresponde de forma adequada à complexidade que existe entre as variáveis do circuito, e o impacto que cada uma possui no funcionamento geral do motor.

O principal desafio enfrentado por pesquisadores da área foi encontrar meios de controlar a velocidade e o torque do motor, sem prejudicar o funcionamento e as demais características do mesmo. Conforme a tecnologia avançava, novos métodos foram sendo desenvolvidos e aplicados, melhorando cada vez mais a eficiência dos motores, bem como controles mais precisos.

O método que possibilitou a utilização de motores de indução em larga escala comercial, foi o método chamado V/f, que consiste em manter a tensão de pico sempre a uma mesma proporção em relação à frequência do motor. Nos casos em que se faz necessário um controle mais refinado do transitório do motor, é utilizado o método de controle vetorial, desenvolvido posteriormente ao método V/f. Apesar da resposta não muito precisa no transitório, grande parte das aplicações práticas de controle de motores de indução é feita utilizando este método, pela sua simplicidade e baixo custo dos equipamentos necessários para tal função.

Para ministrar disciplinas que abordam este tema, o Instituto de Eletrônica de Potência não dispõe de material prático nos laboratórios. Isso prejudica a qualidade de ensino, visto que desenvolver teorias na prática auxilia no aprendizado de determinado assunto.

## 1.4 PROPOSTA DE TRABALHO E OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo deste Trabalho de Conclusão de Curso é montar uma bancada didática para acionamento de motores elétricos, a fim de ser utilizada no ensino prático de disciplinas de pós graduação em engenharia elétrica, possibilitando aos alunos realizarem experiências práticas e aplicação dos conceitos vistos em sala de aula.

Para esse objetivo ser alcançado com êxito, o projeto pode ser dividido em outros objetivos secundários, que serão realizados sequencialmente, conforme as etapas são validadas.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos podem ser considerados objetivos secundários, pois são etapas a serem cumpridas para obter o êxito do objetivo geral.

O primeiro objetivo secundário, e de grande importância para o andamento do projeto é o aprendizado acerca das placas de acionamento a serem utilizadas para implementar os inversores, produzidas pela National Instruments. Para programar o conjunto de placas use-se o software LabView, também da National Instruments. Utilizando este software, é possível fazer uma interface amigável ao usuário, e de fácil manuseio das variáveis de interesse para o controle do motor.

Simulados os circuitos e configuradas as placas utilizadas no projeto para acionamento do circuito, o próximo objetivo é instalar o motor a ser estudado em local seguro e de fácil manuseio por parte dos alunos. Este deve ser instalado em estrutura firme, estável e que disponibilize os contatos necessários para instalação do sistema de controle.

Ao final do projeto, deverá ser elaborado material didático a ser utilizado pelos alunos como base para realização das atividades práticas. Neste material estará descrito em detalhes o funcionamento geral do software, o funcionamento e função dos blocos utilizados para programação, bem como um breve descritivo acerca do hardware de controle. Este material consiste em parte deste trabalho, e será disponibilizado aos alunos separadamente.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

O ensino em geral, mas principalmente o lecionado em cursos de graduação de engenharia, é influenciado de forma positiva pelas experiências práticas desenvolvidas pelos alunos. Durante os experimentos práticos, o aluno aplica os conhecimentos adquiridos em sala de aula, e observa as dificuldades e particularidades ao desenvolver um protótipo, ou aplicar determinada teoria em um circuito.

Com o objetivo de auxiliar o ensino sobre máquinas elétricas, este trabalho visa incorporar ao Instituto de Eletrônica de Potência uma bancada didática onde os alunos de pós graduação poderão realizar diversas experiências práticas durante as disciplinas que ali cursarem.

Motores elétricos são extremamente difundidos e seu uso abrange as mais variadas aplicações, desde equipamentos eletroeletrônicos usados em domicílio, como em geladeiras, aspiradores e liquidificadores, até na indústria em geral, produzindo a força motriz para movimentar máquinas de grande porte, locomotivas, esteiras, entre outros exemplos e aplicações. (CHAPMAN, 2013, p. 2).

No mundo todo, dezenas de bilhões de motores elétricos são produzidos todos os anos, com características das mais variadas, de miliWatt até MegaWatt. O futuro dos motores elétricos é muito promissor, segundo Guarnieri, M. (2018), tendo em vista a tendência mundial em utilizar cada vez mais veículos com tração elétrica.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 ACIONAMENTO DE MÁQUINAS ASSÍNCRONAS

O rotor de um motor de indução possui velocidade angular diferente do campo magnético girante do estator. Essa característica é chave para seu funcionamento, e por conta disso são classificados como máquinas assíncronas. Como visto na Figura 3, as propriedades elétricas do motor sofrem alteração e se equilibram conforme o escorregamento varia. A equação que define o escorregamento é dada por:

$$s = \frac{(N_s - N_r)}{N_s} \quad (01)$$

Onde  $N_s$  é igual a velocidade síncrona e  $N_r$  é a velocidade do rotor. Isso significa que o escorregamento é a diferença entre as velocidades síncrona e do rotor, proporcional em relação à velocidade síncrona. Ou seja, para velocidades síncronas maiores se faz necessário uma diferença maior entre esta e a velocidade do rotor.

Diversos métodos podem ser utilizados para variar a velocidade de rotação do rotor de um motor de indução trifásico. Entre estes métodos podem ser elencados:

- a) Mudança do número de pólos
- b) Controle da frequência de alimentação
- c) Controle da tensão de alimentação
- d) Controle da resistência do rotor
- e) Controle de tensão e frequência de alimentação
- f) Controle da corrente

#### 2.1.1 Mudança no Número de Pólos

Um método teoricamente possível para alterar a velocidade do motor de indução trifásico é a mudança no número de pólos do estator. De acordo com (02), a velocidade síncrona é inversamente proporcional ao número de pólos do estator. Isso significa que caso o motor aumente o número de pólos, a velocidade síncrona irá reduzir proporcionalmente, e como a velocidade de rotação é próxima e depende também da velocidade síncrona, esta também será reduzida.

Este método possui diversas dificuldades práticas para ser executada, e não possui uma aplicação bem definida.

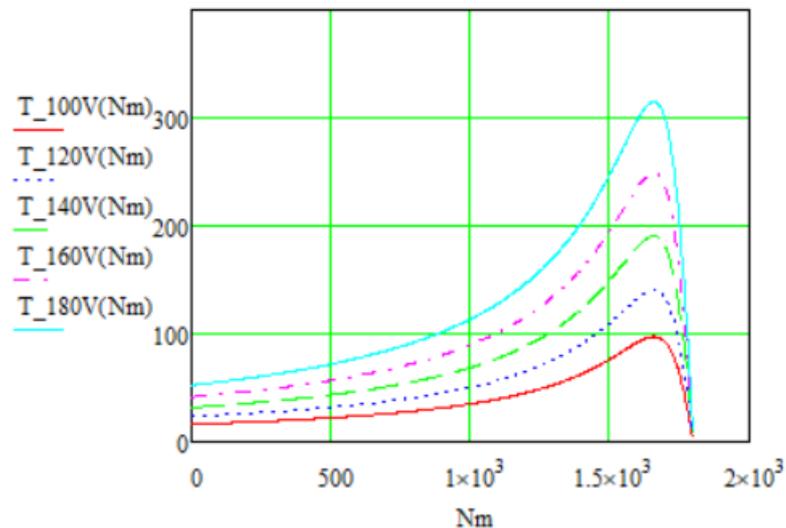
$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (02)$$

### 2.1.2 Controle da Tensão de Alimentação

Um método talvez intuitivo de controlar a velocidade de rotação do motor é alterar a tensão de alimentação do estator do motor. Essa alteração no circuito pode resultar em uma redução na velocidade de rotação do eixo, porém modifica também outras características do motor. O torque do motor é proporcional ao quadrado da tensão de alimentação, ocasionando uma redução no torque ainda mais drástica do que a redução na velocidade de rotação.

Como pode ser visto pela Figura 4, na região de operação do motor este método permite apenas uma pequena variação de velocidade, sendo necessária uma grande variação na tensão de alimentação. O gráfico representa o valor do torque do motor, em relação a velocidade de rotação, em rotações por minuto, considerando a velocidade síncrona de 1800 rotações por minuto. Cada curva representa os dados do motor para um determinado valor de tensão.

Figura 4 - Curvas de torque com diferentes valores de tensão



Fonte: Autor

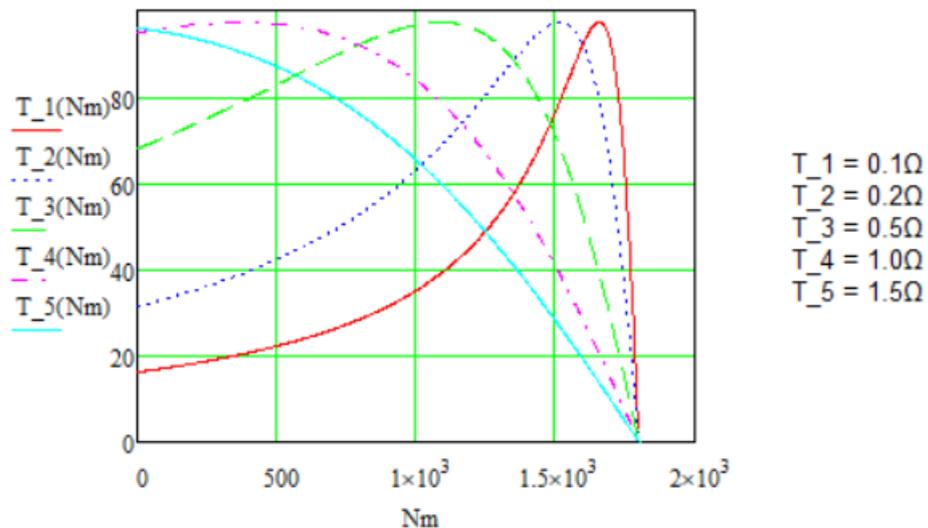
### 2.1.3 Controle da Resistência do Rotor

Este método pode ser utilizado caso o rotor disponibilize ao usuário contatos de conexão externa ao motor. Esses contatos são ligados a resistências variáveis, ou também a

conjuntos de resistências que são comutadas conforme aplicação, resultando em uma maior ou menor resistência, porém apenas números pré-definidos. A Figura 5 dispõe curvas de Torque x escorregamento, com diferentes valores de resistência do rotor, sendo que para um determinado torque, caso a resistência do rotor aumente, o escorregamento também aumenta.

Este método naturalmente não é o mais eficiente, visto que as resistências extras no rotor dissiparão mais energia (ASGHAR, 2003). Porém, como mostrado na Figura 5, este método possui alguns benefícios, sendo um destes permitir elevar o torque de partida, ao mesmo tempo em que a corrente de partida é reduzida.

Figura 5 – Curvas de torque com diferentes resistências

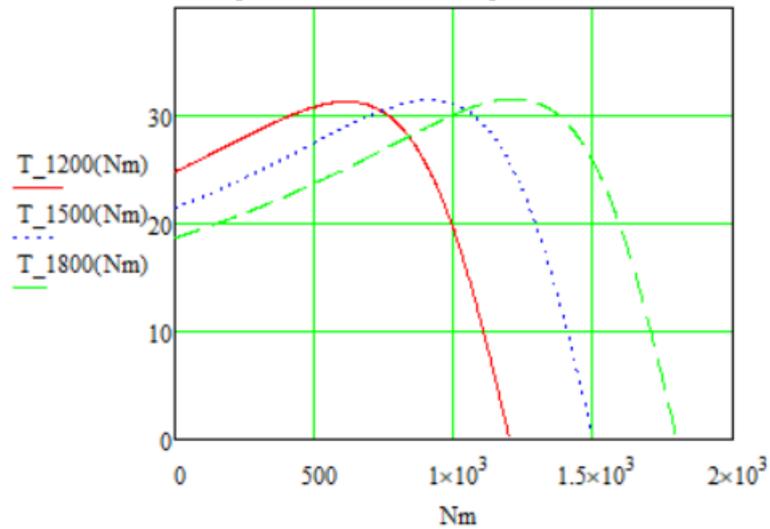


Fonte: Autor

#### 2.1.4 Controle de Tensão e Frequência de Alimentação

O método de controle da tensão de alimentação, juntamente com o controle da frequência será o método utilizado no projeto. Este método propõe a variação destes parâmetros mantendo uma relação constante entre si, garantindo que o fluxo no entreferro não varie. Com o fluxo no entreferro constante, o torque máximo permanece sempre com o mesmo valor, como pode ser observado na Figura 6. Para velocidades muito baixas, ou para realizar a partida do motor, pode-se manter um nível de tensão inicial mínimo, e a partir deste valor incrementar com a mesma proporção a tensão de alimentação e a frequência elétrica.

Figura 6 - Curvas de torque com diferentes frequências e tensões



Fonte: Autor

## 2.2 LABVIEW NI

### 2.2.1 Placas Utilizadas

Para realizar o acionamento do motor utilizado no projeto, são necessários equipamentos para acionar o inversor. No inversor é processada a alta potência, enquanto recebe do circuito de comando os sinais de comando dos gates. Para gerar esses comandos, foi utilizado o conjunto de placas da National Instruments sbRIO-9607, sbRIO-9684 e sbRIO-9687.

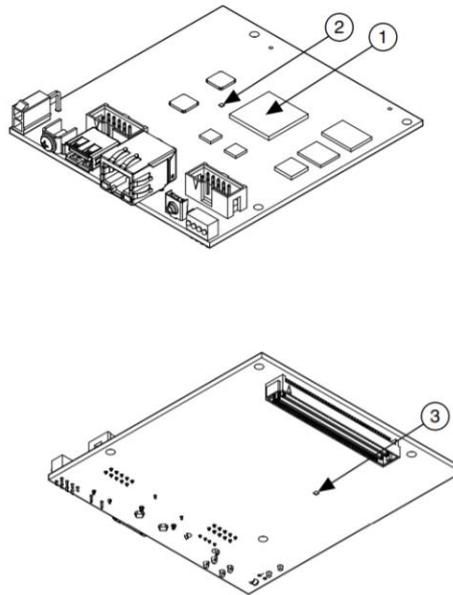
#### 2.2.1.1 sbRIO-9607

O conjunto que controla o inversor funciona comandado principalmente por um FPGA, que rodando a 40 MHz realiza todo o processamento. O software utilizado para programação do FPGA foi o LabView, bem como os módulos necessários para a aplicação desejada, como o módulo FPGA, Real-Time e o módulo de co-simulação utilizado para que o software Multisim pudesse ser usado em conjunto com o LabView nas fases iniciais do projeto.

O LabView utiliza programação em blocos, de modo a facilitar o uso daqueles que não usufruem de grande experiência em programação, e tendo como foco o raciocínio prático e a resolução de forma rápida dos problemas apresentados. Na Figura 7 pode-se ver o desenho representativo do sbRIO-9607, com o FPGA indicado pelo número 1. No projeto, foi utilizada

a comunicação via cabo ethernet, que disponibiliza a conexão entre notebook e FPGA. Na parte inferior do sbRIO-9607 pode-se ver a conexão onde é encaixado o sbRIO-9684.

Figura 7 - sbRIO-9607

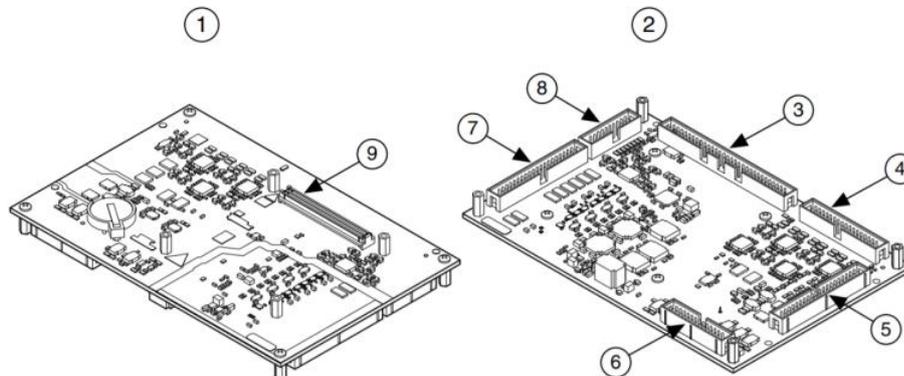


Fonte: NI – Manual do Usuário sbRIO-9607

### 2.2.1.2 sbRIO-9684

O sbRIO-9684, ou General Purpose Inverter Controller RIO Mezzanine Card, é outra placa na National Instruments, e disponibiliza ao usuário diversas portas de entrada ou saída, analógicas ou digitais. Essas portas podem ser programadas conforme o manual disponibilizado pela National Instruments. Na Figura 8 pode-se ver a placa na perspectiva inferior (1), ou superior (2), bem como o conector que vai ligado ao sbRIO-9607 (9) e as portas de entrada e saída (3 até 8).

Figura 8 - sbRIO-9684



Fonte: NI – Manual do Usuário sbRIO-9684

As portas disponíveis no sbRIO-9684 estão dispostas conforme apresentado na Tabela 1, e estão localizadas na placa da Figura 8 na seguinte ordem: 7, 8, 4, 5, 6 e 3.

Tabela 1 – Conectores da placa sbRIO-9684

Connector	Description	Recommended Mating Connector
Simultaneous AI	40-position header	On-Shore Technology, Inc. (SH2-40G-PT)
Scanned AI, AO	20-position header	On-Shore Technology, Inc. (SH2-20G-PT)
Sourcing DI	34-position header	On-Shore Technology, Inc. (SH2-34G-PT)
Sinking DO, Relay Control DO	40-position header	On-Shore Technology, Inc. (SH2-40G-PT)
Half-Bridge DO	26-position header	On-Shore Technology, Inc. (SH2-26G-PT)
LVTTL DIO	60-position header	On-Shore Technology, Inc. (SH2-60G-PT)

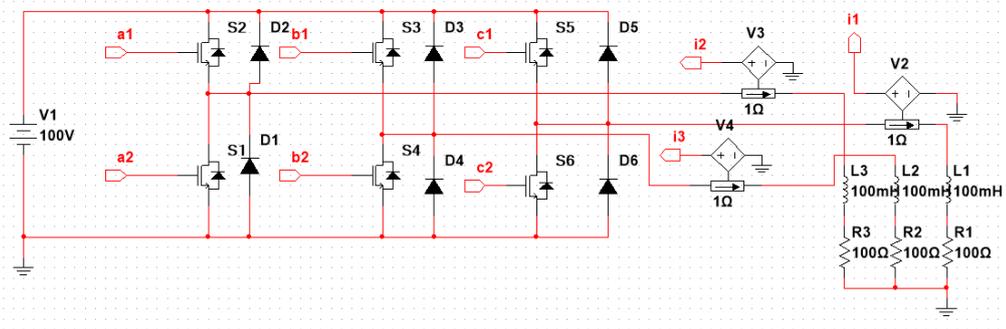
Fonte: NI – Manual do Usuário sbRIO-9684

### 2.2.2 Multisim

Durante o período inicial do projeto, o foco esteve em estudos das técnicas a serem utilizadas no projeto, incluindo leitura da literatura e simulações dos circuitos. Para as simulações iniciais, o software Multisim foi usado para simular um circuito real, enquanto a lógica é processada pelo software LabView. A integração entre estes dois softwares é possível utilizando o plug-in de expansão do LabView e o módulo Control Design and Simulation. Pode-se então adicionar um bloco na programação do LabView que importa o circuito feito no Multisim, com suas respectivas entradas e saídas.

O primeiro exemplo aplicado com esse método foi o inversor trifásico aplicado a uma carga trifásica genérica de 100  $\Omega$  e 100 mH. O circuito é composto por uma fonte de tensão contínua de 100 V, chaves que irão comutar a uma frequência de 20 kHz, a carga e medidores de corrente ( $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$ ), para ser exibido no LabView o resultado da simulação. Os sinais nos gates dos MOSFETs são recebidos pelos conectores a1, a2, b1, b2, c1 e c2, como pode ser visto no circuito na Figura 9.

Figura 9 – Circuito projetado no Software Multisim

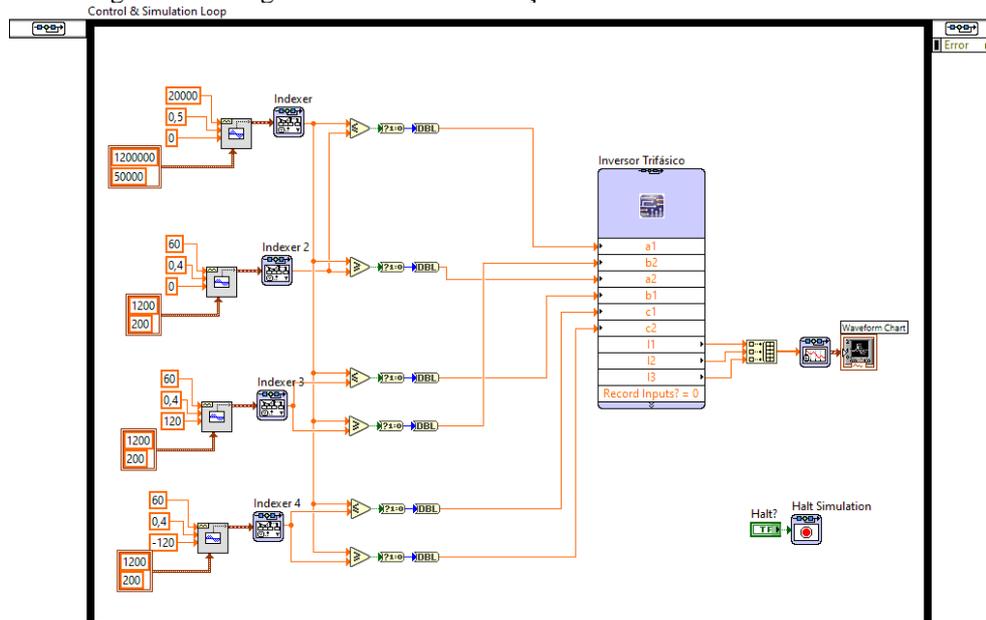


Fonte: Autor

A integração entre os dois softwares ocorre no ambiente LabView, sendo criada a lógica do circuito inversor. O diagrama em blocos resultante pode ser observado na Figura 10. Nota-se no diagrama os elementos do circuito lógico na parte esquerda da figura, e o bloco do sistema de potência importado do software Multisim na direita, indicado pelo nome “Inversor Trifásico”.

Esta não é a forma mais adequada de realizar o controle de um sistema de potência real, pois o módulo Control and Simulation, através do loop de simulação, permite gerar apenas um número finito de pontos, impossibilitando o controle por tempo indeterminado do sistema. Outro ponto a ser levado em consideração é a complexidade deste módulo para realizar a adequação entre passo de simulação, número de amostras, frequência de amostragem, frequência do sinal e tempo de simulação.

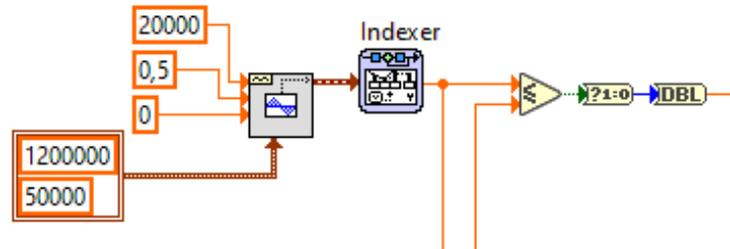
Figura 10 – Diagrama de blocos simulação LabView e Multisim



Fonte: Autor

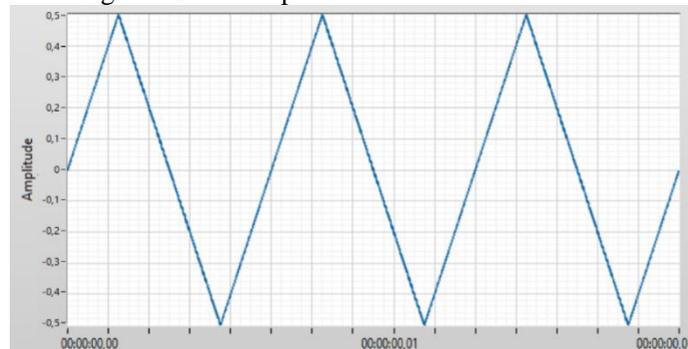
A Figura 11 mostra em destaque o bloco gerador da onda portadora. A forma de onda utilizada é do tipo triangular, e na mesma Figura pode ser observada a configuração do bloco. A onda possui amplitude de 0,5 V, frequência de 20 kHz e offset de 0 V, oscilando entre -0,5 e 0,5 V. A Figura 12 mostra a forma de onda resultante na saída do bloco.

Figura 11 – Geração da onda portadora



Fonte: Autor

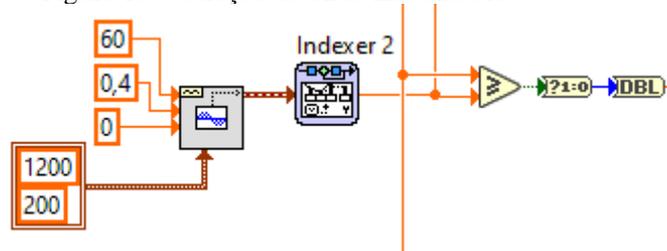
Figura 12 – Onda portadora resultante



Fonte: Autor

O bloco que tem a função de gerar a forma de onda senoidal está apresentado na Figura 13, com os blocos de constantes realizando a configuração do bloco. Esta onda possui frequência de 60 Hz, amplitude de 0,4 V e offset de 0 V.

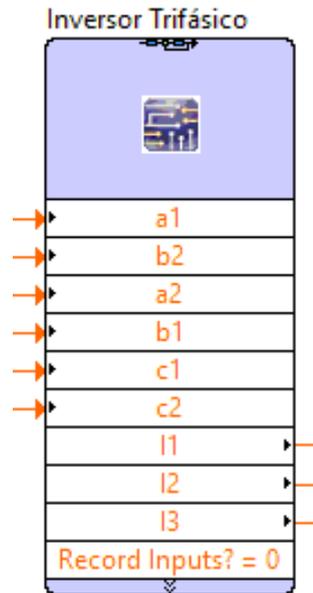
Figura 13 – Geração da onda moduladora



Fonte: Autor

O bloco final deste circuito inicial é o bloco de integração entre o LabView e o Multisim. Nota-se na Figura 14 a relação direta com o circuito de potência projetado na Figura 9, que emula o circuito físico real.

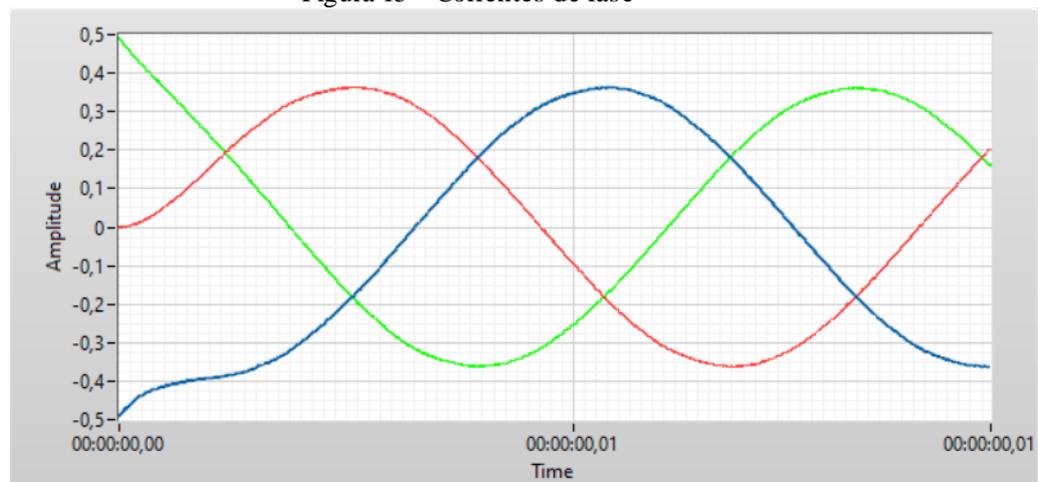
Figura 14 – Bloco de integração entre LabView e Multisim



Fonte: Autor

O resultado obtido através dessa simulação está disposto na Figura 15, contendo o regime transitório do sistema e o regime permanente. O valor de pico da corrente obtida está em torno de 0,35 A.

Figura 15 – Correntes de fase



Fonte: Autor

## 2.3 ESTRUTURA DO CÓDIGO DE CONTROLE

Sendo validada a estrutura de controle por meio de simulação e integração com o Multisim, pode-se desenvolver uma nova estrutura de controle no software LabView, porém sem utilizar o módulo Control and Simulation. A estrutura de controle no modo padrão é robusta e tem as ferramentas necessárias para fazer o controle do inversor trifásico. A principal diferença é que o desenvolvimento das funções e blocos utilizados é de forma mais discreta, e não tão integrada em um único bloco.

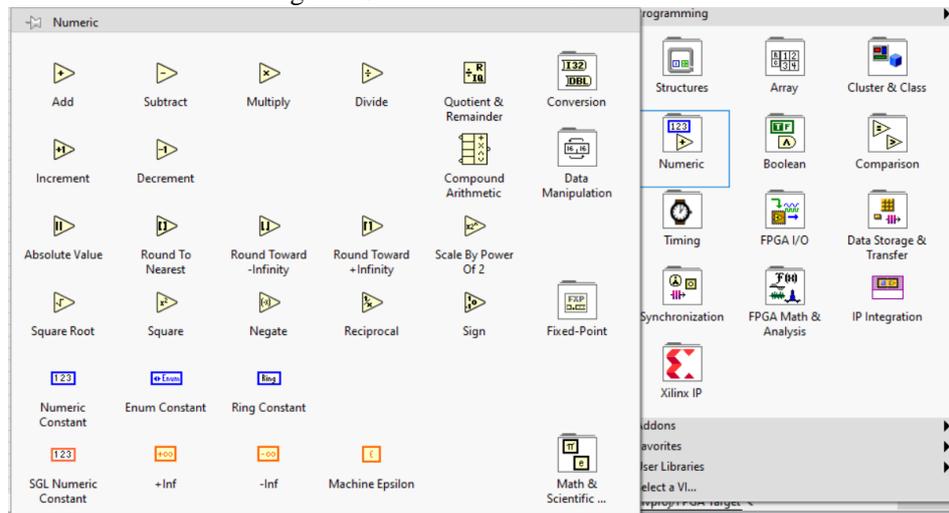
### 2.3.1 Elementos Básicos

Para o melhor entendimento dos circuitos de controle projetados, faz-se necessário uma breve explanação acerca das ferramentas utilizadas. Nos próximos tópicos serão então abordados os elementos básicos de programação que compõem o circuito de controle, considerando sua importância no funcionamento do mesmo. O LabView utiliza programação gráfica, mas os blocos mais básicos tem funções semelhantes às funções de programação em linguagem C por exemplo.

#### 2.3.1.1 Constantes

As constantes são o elemento mais primitivo da estrutura do LabView. Possuem em geral um comportamento passivo, tendo seu valor alterado por outros blocos. Para adicionar uma constante, basta seguir o caminho indicado pela Figura 16. Deve-se clicar com o botão direito na janela de edição, selecionar a aba de opções numéricas *Numeric*, e ali escolher entre as opções disponíveis. As constantes de cor azul representam as constantes com números inteiros, enquanto as constantes de cor laranja representam as que possuem números decimais.

Figura 16 – Menu numérico

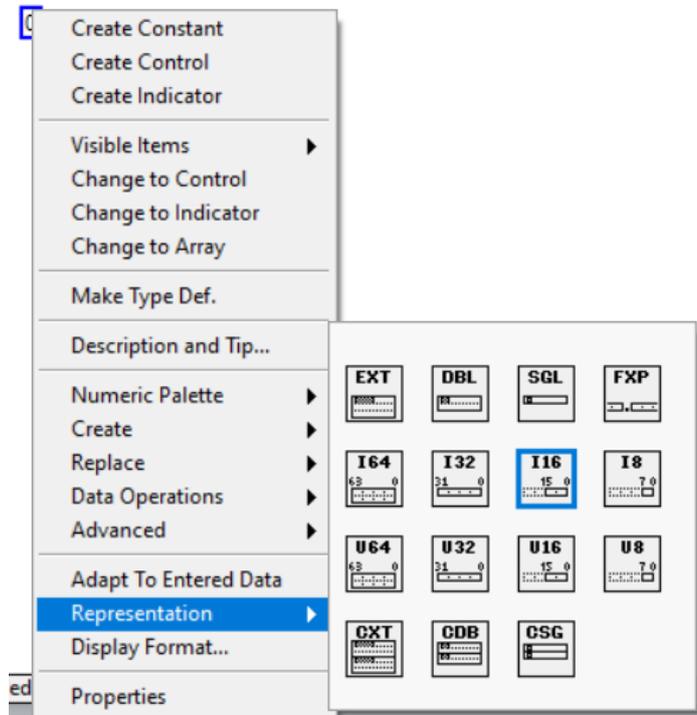


Fonte: Autor

Após adicionada ao código, a estrutura de memória a ser utilizada pela constante pode ser configurada de acordo com a necessidade do usuário. Para acessar as opções apresentadas na Figura 17, clica-se com o botão direito do mouse sobre o bloco da constante, e na aba *Representation* estão apresentadas ao usuário as opções de tamanho da constante.

O padrão para as variáveis azuis é um inteiro de 16 bits, com bit indicativo do sinal, por exemplo, e algumas outras opções seriam converter essa constante para 8, 32 ou 64 bits, retirar o bit de sinal e manter apenas valores positivos, ou até mesmo converter para uma constante laranja, com casas decimais. No caso das constantes laranjas, os tipos disponíveis são *single*, *double* ou *extended*, sendo possível também constantes com números complexos nestas opções.

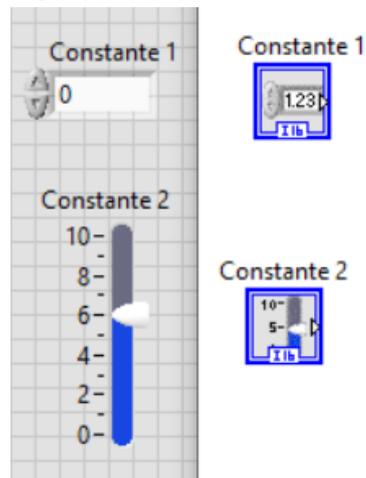
Figura 17 – Configuração de constantes



Fonte: Autor

Outra funcionalidade do âmbito das constantes utilizada no projeto envolve a janela *Front Panel* do LabView. É possível adicionar nessa janela controles para estas constantes, que possibilitam ao usuário modificar as constantes em tempo real, alterando o funcionamento do diagrama de blocos. Alguns exemplos de utilização direta no projeto são a utilização destas constantes controláveis para observar e validar o funcionamento de regime transitório do motor, ou o controle da frequência elétrica. A Figura 18 mostra dois exemplos destes controles, sendo a parte esquerda referente ao painel frontal, enquanto a parte direita diz respeito ao diagrama de blocos. A Constante 1 pode ser alterada pelos botões, aumentando ou diminuindo o valor da constante em um valor unitário a cada clique, ou digitando o valor desejado. A Constante 2 é alterada conforme o usuário movimentar a barra para cima ou para baixo, de acordo com a escala configurada.

Figura 18 – Controles de constantes



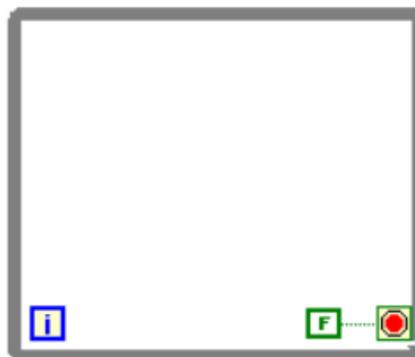
Fonte: Autor

### 2.3.1.2 Loop While

O loop *while* é um bloco central para o funcionamento do diagrama de blocos. Os blocos inseridos fora de um loop *while* executam apenas uma vez, no início da execução do programa. São usados geralmente para iniciar valores em constantes.

Os blocos que estão dentro de um loop *while* são executados repetidamente, desde que o sinal na entrada do botão vermelho, no canto inferior direito do loop na Figura 19, não seja verdadeiro. Esse sinal pode ser uma constante booleana, uma chave no *front panel* ou até mesmo o resultado de uma operação lógica, que em determinada situação deseja encerrar o funcionamento do loop.

Figura 19 – Loop while



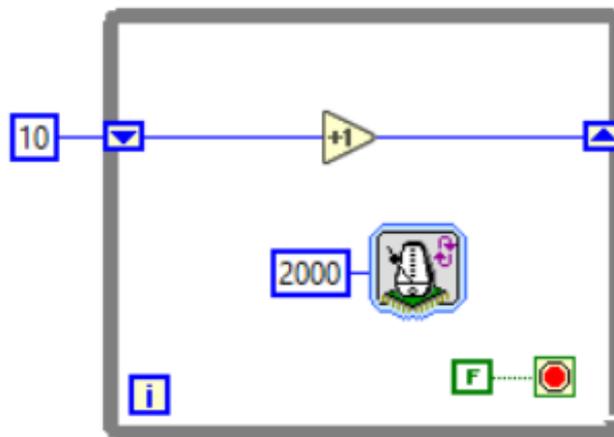
Fonte: Autor

Outras funcionalidades relacionadas ao loop *while* estão presentes na Figura 20. A primeira a ser comentada são os registradores adicionados nas bordas do loop. A constante

adicionada fora do loop inicializa o valor em 10, e a cada execução essa constante é incrementada em 1. O valor resultante dessa soma é inserido de volta no registrador da direita.

Os registradores sempre funcionam em par, sendo o registrador da esquerda o valor inicial da atual execução, passando por toda a lógica no interior do loop e finalizando no registrador da direita. Na próxima execução do loop, o valor do registrador da direita é carregado no da esquerda, e assim repetidamente. Para adicionar um registrador, basta conectar a constante na borda do loop, e no lugar da conexão aparece o registrador.

Figura 20 – Aplicações do *loop while*



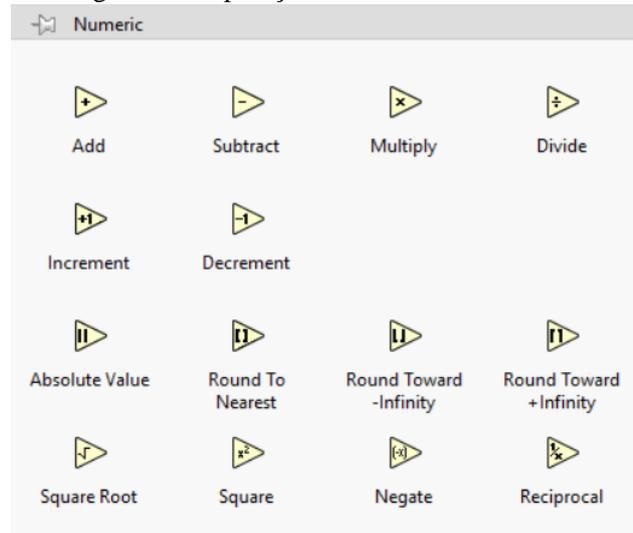
Fonte: Autor

O outro bloco deste loop é um sincronizador de *loops*. Este funciona de modo que permita apenas uma execução do *loop* no qual ele está dentro durante o número especificado de ciclos de *clock*. Neste exemplo, apenas uma execução total do loop acontecerá a cada 2000 ciclos de *clock*. Considerando que o processador do FPGA roda a uma frequência de 40 MHz, este loop irá executar a uma frequência de 20 kHz.

### 2.3.1.3 Operações Matemáticas

No menu de funções da Figura 21, destaca-se nesta seção as funções de operações matemáticas. Nesta aba estão as operações mais simples. O valor de entrada é sempre conectado no lado esquerdo do bloco, enquanto o resultado da operação é disponibilizado na direita do bloco. Algumas operações mais avançadas foram utilizadas, mas por pertencerem ao módulo FPGA, serão abordadas mais detalhadamente adiante.

Figura 21 – Operações matemáticas



Fonte: Autor

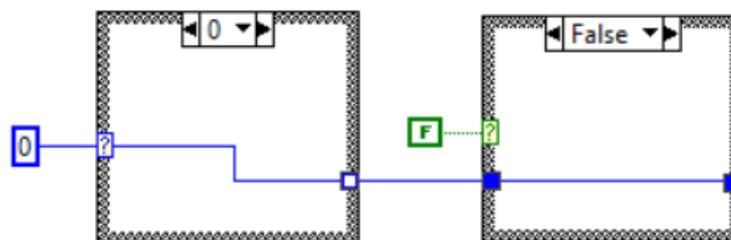
#### 2.3.1.4 Condicional if

O bloco utilizado para realizar a lógica condicional é chamado de *Case Structure*. O seu funcionamento se adapta de acordo com o tipo de constante conectada à entrada seletora, identificada com um sinal de interrogação, como pode ser observado na Figura 22. Nesta Figura estão presentes os dois modos de operação deste bloco.

Quando conectada uma constante do tipo inteiro, o bloco se comporta de modo semelhante à função *switch* da linguagem de programação C. Para cada valor inteiro, pode-se implementar uma lógica no interior do bloco, que apenas irá ser executada quando o valor correspondente for selecionado pela constante.

O outro modo de operação é semelhante à função *if*, e o bloco possui apenas dois casos, a depender da constante booleana conectada, *True* ou *False*.

Figura 22 – Bloco condicional

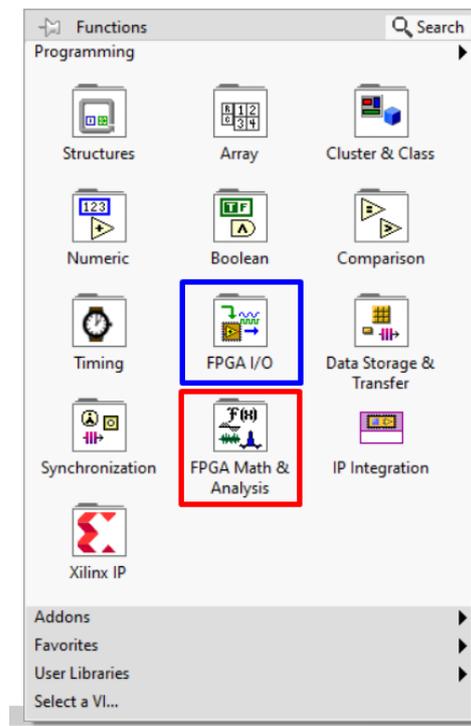


Fonte: Autor

### 2.3.1.5 Blocos do Módulo FPGA

Ao adicionar o Módulo FPGA, o software LabView permite criar projetos para serem executados diretamente no FPGA, porém os blocos de funções são um pouco diferentes. Além dos blocos básicos, os blocos exclusivos deste módulo utilizados foram os blocos de I/O e de função seno. O retângulo azul da Figura 23 é o menu que contém os blocos de I/O, e o retângulo vermelho é o menu das operações matemáticas mais sofisticadas do Módulo FPGA.

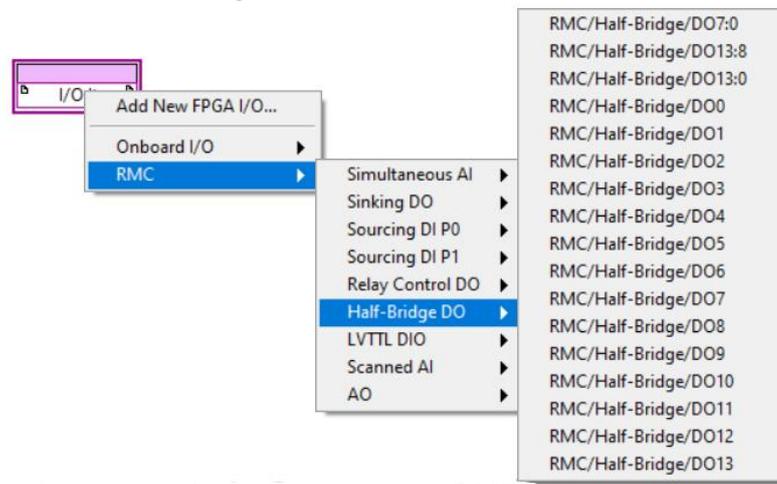
Figura 23 – Menu de funções



Fonte: Autor

O bloco de I/O permite ao usuário externalizar constantes do diagrama de blocos, a fim de serem utilizadas em circuitos externos ao FPGA. A biblioteca do LabView importa automaticamente todas as portas de I/O das placas conectadas, e o usuário precisa apenas selecionar a saída desejada, seja essa de entrada ou saída, analógica ou digital por exemplo. Algumas opções disponibilizadas pelas placas utilizadas no projeto estão na Figura 24.

Figura 24 – Saídas I/O



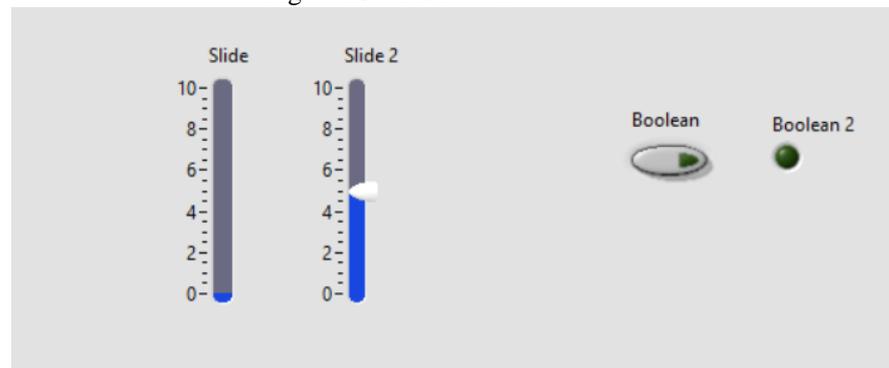
Fonte: Autor

### 2.3.1.6 Front Panel

Um dos diferenciais do software LabView em comparação com os outros softwares é o *Front Panel*. Ao abrir o arquivo do projeto sendo desenvolvido, duas janelas são disponibilizadas ao usuário. A primeira é a janela na qual é desenvolvida a lógica central do projeto, com as operações matemáticas, condicionais e loops em geral. A segunda janela é chamada de *Front Panel*, ou Painel Frontal, e recebe esse nome por funcionar de forma semelhante a uma IHM, possibilitando acesso do usuário a certas partes do código, ou funcionando apenas como um *display* para acompanhamento das grandezas sendo processadas no projeto, como por exemplo um gráfico com a tensão de saída de determinado circuito elétrico.

A Figura 25 mostra um exemplo de *front panel*, com um indicador e um controle de constante numérica, e um botão e um indicador booleano, considerando o indicador apagado como falso, e aceso como verdadeiro. Pode-se ter no *front panel* outros indicadores, como gráficos, outros tipo de botões, chaves, até mesmo elementos decorativos para organizar os indicadores, a fim de ficarem melhor distribuídos.

Figura 25 – Front Panel



## 2.4 ACIONAMENTO DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O objetivo principal do projeto desenvolvido é a aplicação de métodos de controle de velocidade e torque em motores de indução trifásico. Esta seção descreve o funcionamento do inversor trifásico, implementado em diagrama de blocos.

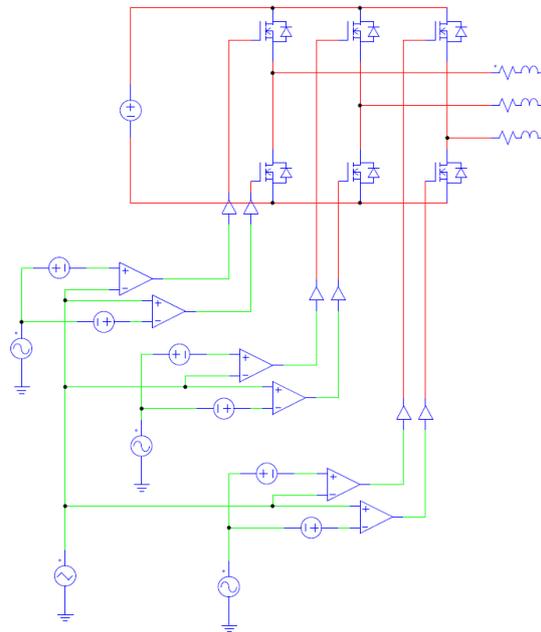
Duas abordagens principais foram tomadas, sendo desenvolvido um código com controle manual do usuário sobre a velocidade do motor, e outro código automático, que disponibiliza ao usuário botões de liga e desliga no *Front Panel*.

### 2.4.1 Controle Proposto

O diagrama de blocos que compõe o controle do motor de indução trifásico é apresentado na Figura 26. A parte do circuito em verde foi projetada em ambiente LabView, enquanto a parte em vermelho representa conexões de potência, feitas fisicamente na prática.

Nota-se na Figura a presença de níveis de tensão sendo somados a onda moduladora. Isto possui o objetivo de deslocar os valores de pico das ondas a fim de que a transição nas chaves aconteça com uma margem de  $3 \mu\text{s}$ , conforme valor obtido do *datasheet* do módulo de chaves IGBT, tempo necessário para garantir que não aconteça curto circuito.

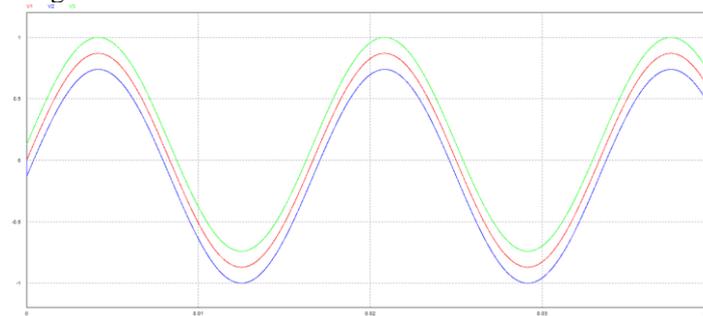
Figura 26 – Controle proposto



Fonte: Autor

Para as senoides serem deslocadas de forma correta, o degrau de tensão adicionado foi de 0,13 V, em relação à onda portadora de 1 V. Isso faz com que a onda moduladora precise ter o seu valor de pico reduzido para 0,87 V, de modo que ao somar 0,13 V o valor da senoide não ultrapasse 1 V. O resultado deste deslocamento está representado na Figura 27, que mostra as ondas moduladoras presentes nas chaves superior e inferior de um mesmo ramo, sendo V1 (linha vermelha) a onda moduladora original, V2 (linha azul) a moduladora da chave superior e V3 (linha verde) a moduladora da chave inferior.

Figura 27 – Formas de onda da onda moduladora

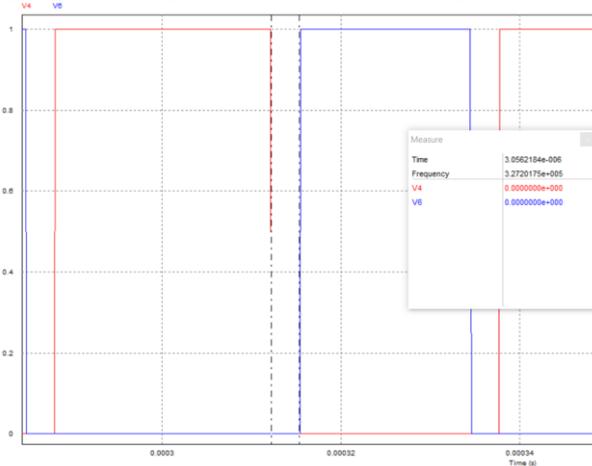


Fonte: Autor

O resultado destes deslocamentos das ondas moduladoras está disposto na Figura 28, sendo medido na imagem o tempo morto gerado nos sinais de acionamento das chaves, ou seja, este intervalo entre o fechamento da chave inferior e a abertura da chave superior, por

exemplo. Observa-se que o resultado foi conforme o desejado, de 3 us. A simulação não representa com total fidelidade o transitório de fechamento da chave, e esta Figura pode não explicitar de forma completa a real necessidade de gerar este tempo morto.

Figura 28 – Tempo morto entre sinais de gate



Fonte: Autor

## 2.4.2 Acionamento Manual

### 2.4.2.1 Onda Portadora

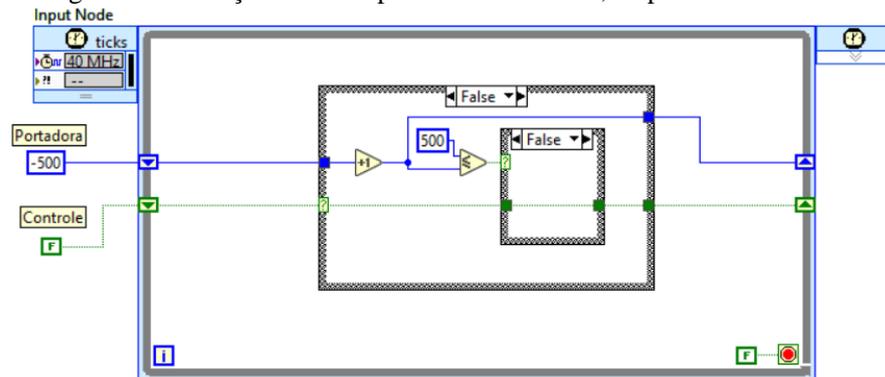
A onda triangular, que tem a função de portadora, é gerada a partir do *Timed Loop*, função exclusiva para FPGA. A onda triangular desejada tem frequência de 20 kHz, e deve oscilar de -1 até 1, valor este relativo. Deve-se considerar o valor de pico desta onda triangular como o valor unitário base, e as ondas senoidais serão proporcionais a este valor. Como o FPGA possui uma frequência de funcionamento igual a 40 MHz, a onda triangular precisa ser dividida em 2000 pontos, resultando então em uma onda que oscila entre -500 e 500.

O diagrama de blocos da onda portadora pode ser visto na Figura 29, dentro do *Timed Loop*. A lógica projetada consiste basicamente no controle de duas constantes, uma inteira que representa a onda portadora em si, e uma booleana utilizada para o controle da geração da onda. Outros elementos utilizados foram operações de soma e subtração, comparação entre constantes e dois blocos condicionais.

A Figura 29 mostra o caso inicial, com a Portadora iniciando em -500 e a constante de controle iniciando em Falso. Neste caso, a Portadora será incrementada até ter seu valor

igual a 500, o valor de pico estabelecido. Nesta etapa, a constante de Controle permanece em Falso.

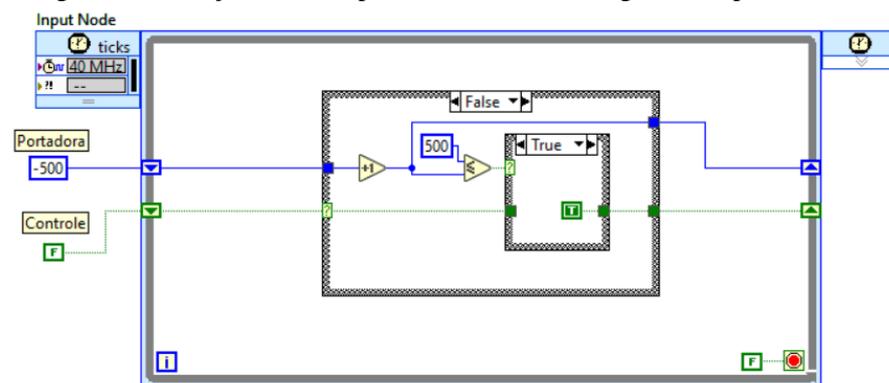
Figura 29 – Geração da onda portadora no FPGA, etapa inicial



Fonte: Autor

Para realizar a transição desta etapa para a próxima, o comparador sinaliza para o bloco condicional que a portadora chegou ao seu valor de pico. Este, então troca o valor da saída para Verdadeiro, como pode ser visto na Figura 30. Este valor será carregado na próxima execução do *loop*, e irá mudar o funcionamento do bloco condicional maior.

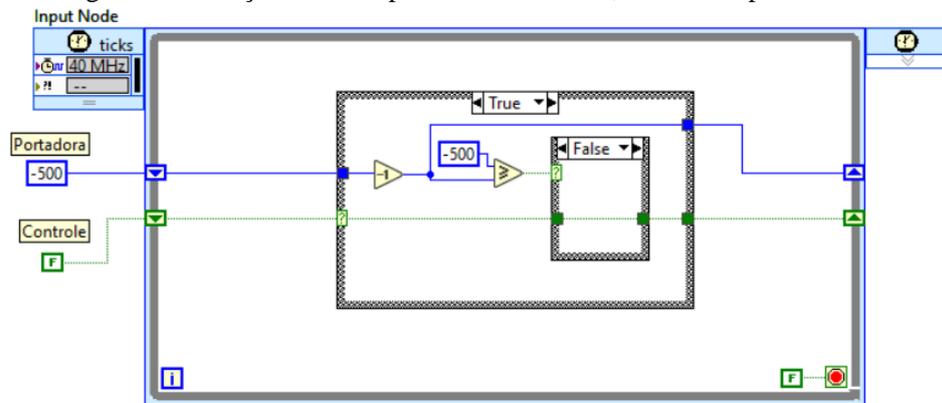
Figura 30 - Geração da onda portadora no FPGA, segunda etapa



Fonte: Autor

A terceira etapa de funcionamento da geração da onda portadora está na Figura 31 e consiste na segunda metade da onda triangular, e é caracterizada pela constante de controle em Verdadeiro. Após passar pelo pico positivo, a Portadora inicia um processo de decrescimento gradual, de 500 até -500. O bloco condicional menor permanece selecionado em Falso, até a onda chegar no seu pico negativo.

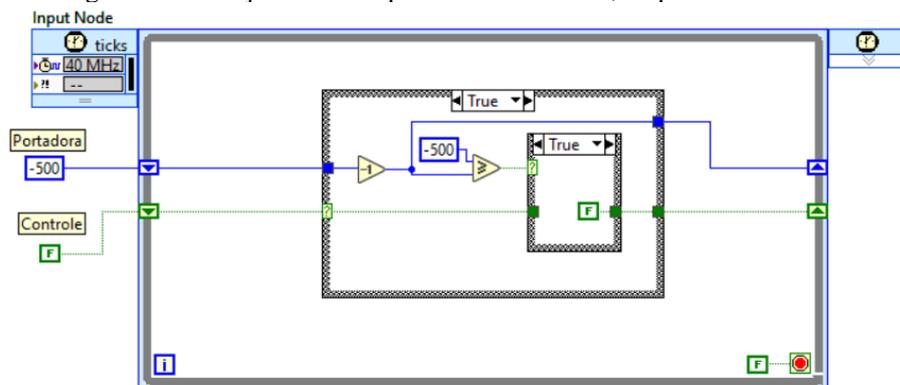
Figura 31 - Geração da onda portadora no FPGA, terceira etapa



Fonte: Autor

A quarta etapa da geração da onda é definida pela finalização do processo e reinicialização das constantes, para a repetição do processo. Como observado na Figura 32, quando a portadora chega ao valor de -500, o sinal de entrada do bloco condicional menor é alterado para Verdadeiro, retornando assim a constante de controle para Falso. Ao final do *loop*, esse valor será carregado no registrador, e reinicializado o processo automaticamente, gerando assim a onda portadora triangular, com uma frequência igual a 20 kHz, valor médio igual a 0 e valor de pico igual a 500.

Figura 32 - Geração da onda portadora no FPGA, etapa final



Fonte: Autor

#### 2.4.2.2 Onda Moduladora

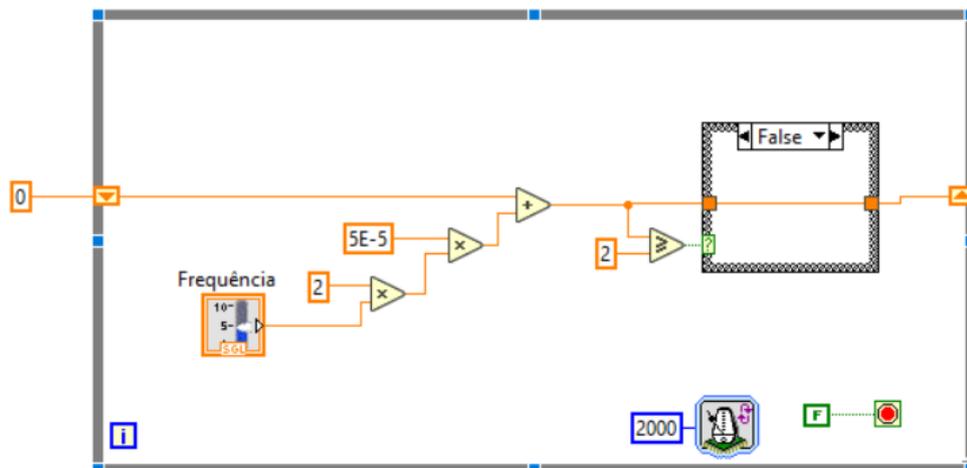
Para gerar a onda moduladora, foi utilizado um *Loop While*, por conta da limitação do *Timed Loop*, que não permite manipular números com casas decimais, impossibilitando operações de seno e cosseno por exemplo. O primeiro passo para gerar a onda moduladora é gerar a constante de controle equivalente a variação angular da senoide. Para isso, construiu-

se a lógica da Figura 33, que é executada a uma frequência de 20 kHz, graças ao sincronizador de *loops*, que limita a execução do *loop* a uma vez a cada 2000 ciclos de *clock*.

A constante “Frequência” determina a frequência da senoide, e pode ser controlada pelo usuário através do *front panel*, denominada como *f* em (03). A constante multiplicando a constante “Frequência” foi encontrada de acordo com a Equação 03, sendo *F* o valor da frequência da onda portadora, ou seja, 20 kHz. Este valor de 20 kHz não aparece na Figura 32, pois está implícito na frequência que o *loop* se repete. O sinal gerado por este sistema pode ser chamado de constante angular.

$$(2f) \left( \frac{1}{F} \right) F = 2f \quad (03)$$

Figura 33 – Controle da constante angular



Fonte: Autor

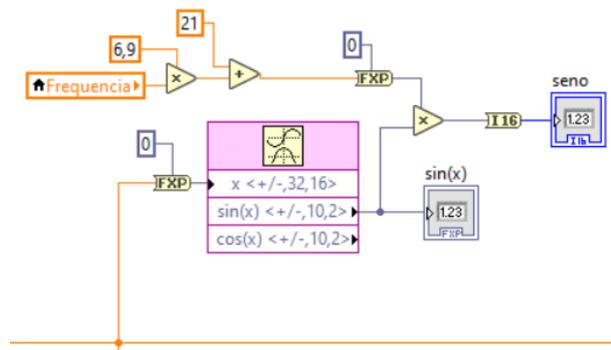
A Equação 03 e a Figura 32 não apresentam a constante pi porque a função do módulo FPGA, Figura 33, que computa a função seno já tem incluso no cálculo o valor de pi. Por exemplo, para representar um círculo completo na entrada da função, deve-se inserir uma constante igual a 2 apenas, e não  $2*\pi$ . O diagrama de blocos da Figura 33 soma a constante de modo que em 1 segundo a constante chegaria em 120. No entanto, deseja-se uma senoide de 60 Hz, e para isso foi adicionado um comparador que quando o valor da constante de variação angular atinge 2, aciona o bloco seletor para que este reinicie a contagem da constante para 0.

O valor máximo é o número 2, porque considerando a multiplicação por pi interna do bloco que calcula o seno, é equivalente a  $2*\pi$ , um círculo completo.

Gerada a constante angular da onda moduladora, o diagrama de blocos que gera a onda moduladora é disposto na Figura 34, e possui como variável de entrada a variação angular criada pelo sistema da Figura 32. A variável local “Frequência” é a mesma da Figura 32, e não é fixa em 60 Hz ou alterada automaticamente para possibilitar o controle pelo usuário. O valor da frequência é relacionado com a amplitude do sinal, conforme comentado anteriormente.

De acordo com o controle proposto na Figura 25, em que foi utilizada uma onda moduladora com valor de pico de 0,87 V para uma onda portadora de 1 V, para uma onda portadora com valor de pico de 500 deve-se ter uma onda moduladora com valor de pico igual a 435. Deseja-se ter um valor mínimo de tensão, para garantir o torque de partida em frequências muito baixas. Este valor, de 5%, é igual a 21. A partir deste valor, referente a frequência igual a zero, deseja-se ter uma rampa linear até chegar ao valor da frequência de 60 Hz e o valor de pico da senoide em 435. Para isso, multiplica-se o valor da frequência por 6,9, obtendo-se então em 60 Hz o valor de pico da senoide de 414. Este valor, somado com 21 chega ao valor de pico inicialmente desejado.

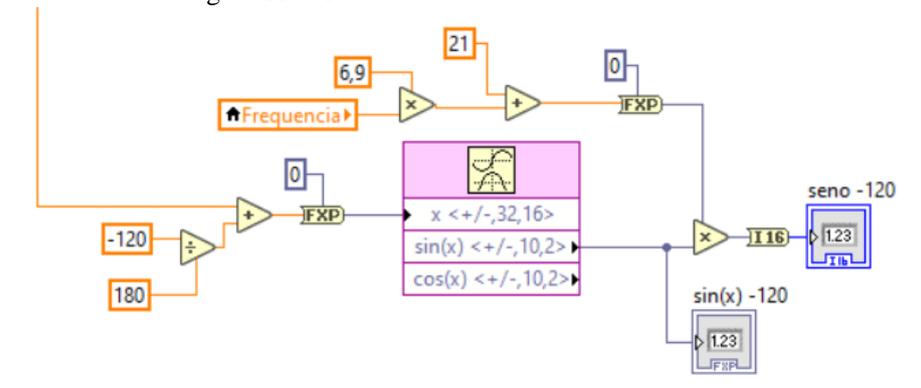
Figura 34 – Onda moduladora



Fonte: Autor

As demais ondas moduladoras são geradas similarmente a Figura 35, adicionando ou subtraindo o equivalente a 120 graus, criando assim a defasagem desejada. As demais funcionalidades do bloco são configuradas da mesma forma.

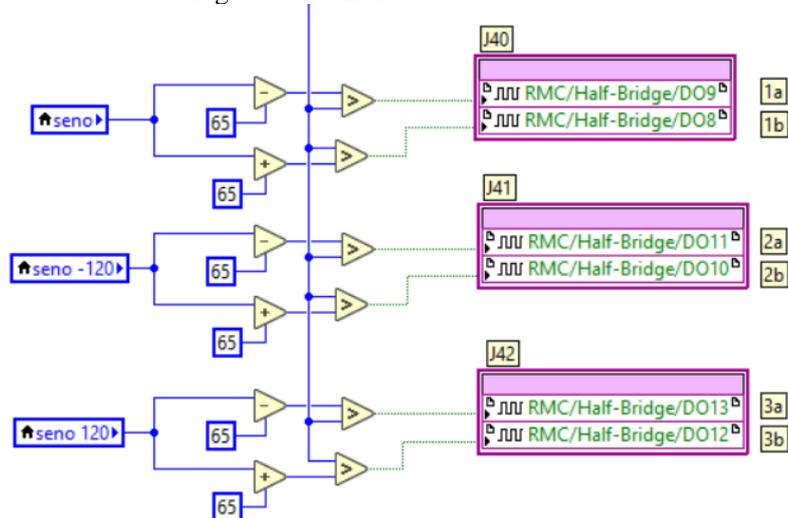
Figura 35 – Onda moduladora defasada



Fonte: Autor

Os sinais das ondas portadora e moduladoras são então comparados, conforme Figura 36, de modo a gerar os sinais de gate das chaves do inversor. As constantes de valor 65 foram obtidas na prática, sendo testados diferentes valores até chegar ao valor correto, que somadas e subtraídas tem a função de gerar o deslocamento na onda moduladora, criando o tempo morto de 3  $\mu$ s entre o fechamento de uma chave, e a abertura da chave complementar. Por fim, os sinais gerados são externalizados por meio dos blocos de I/O, que representam os conectores da placa. No manual da placa sbRIO-9687, página 9, pode ser encontrada a tabela da Figura 37 que mostra os conectores disponíveis que poderiam ter sido escolhidos para esta aplicação. Para o projeto, os conectores utilizados foram J40, J41 e J42.

Figura 36 – Sinais de Gate



Fonte: Autor

Figura 37 – Conectores disponíveis

**Table 4.** Signal Assignments, GPIC to SKiiP 3 GB (Single-Phase Inverter)

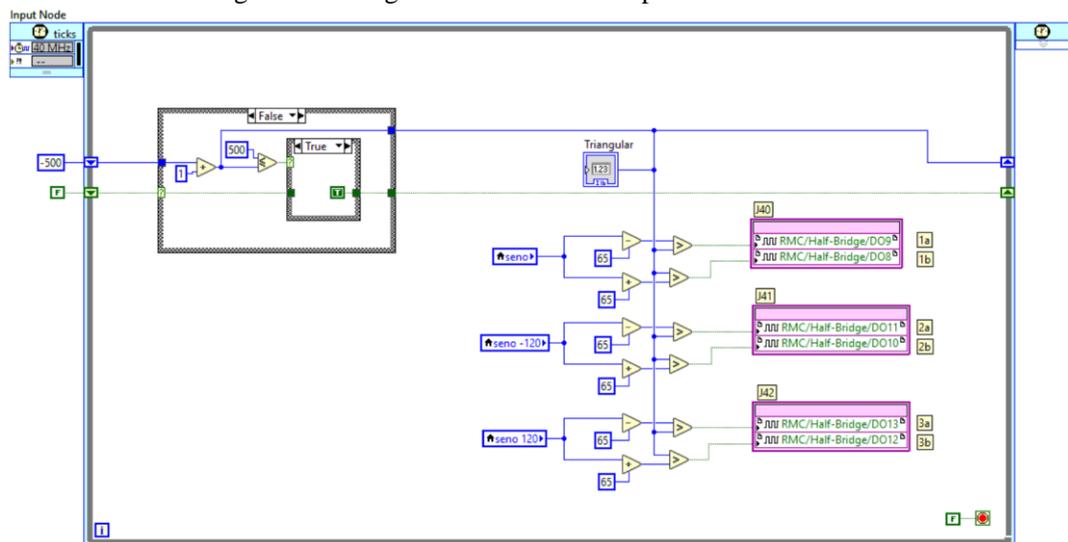
Signal	Inv. 0 (J36)	Inv. 1 (J37)	Inv. 2 (J38)	Inv. 3 (J39)	Inv. 4 (J40)	Inv. 5 (J41)	Inv. 6 (J42)
High Side IGBT	DO1	DO3	DO5	DO7	DO9	DO11	DO13
Low Side IGBT	DO0	DO2	DO4	DO6	DO8	DO10	DO12

Fonte: NI – Manual do Usuário sbRIO-9687

### 2.4.2.3 Diagrama de Blocos Completo

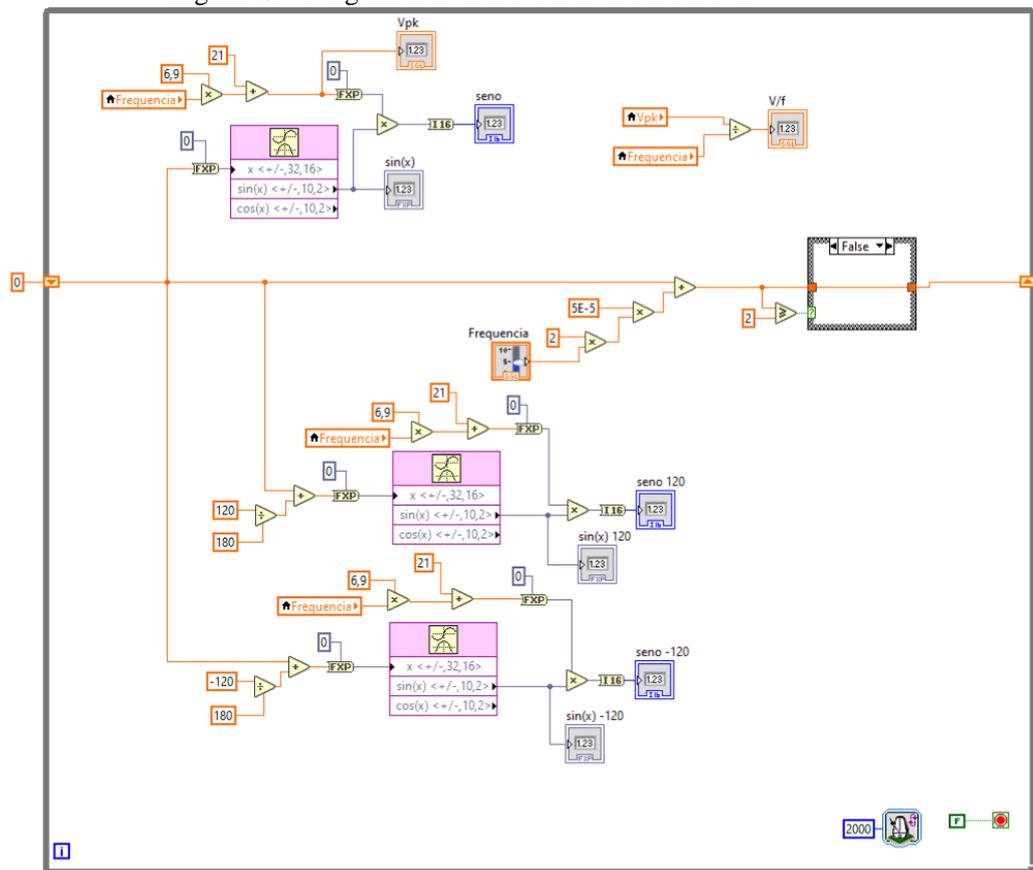
Vistas as partes isoladas do diagrama de blocos, a Figura 38 apresenta o diagrama completo da parte de geração da onda portadora, e a comparação da mesma com a onda moduladora e respectivas saídas na placa de potência. A Figura 39, por sua vez, contém o diagrama de blocos da geração das ondas moduladoras, senoidais e defasadas entre si por 120 graus.

Figura 38 – Diagrama de blocos onda portadora



Fonte: Autor

Figura 39 – Diagrama de blocos ondas moduladoras



Fonte: Autor

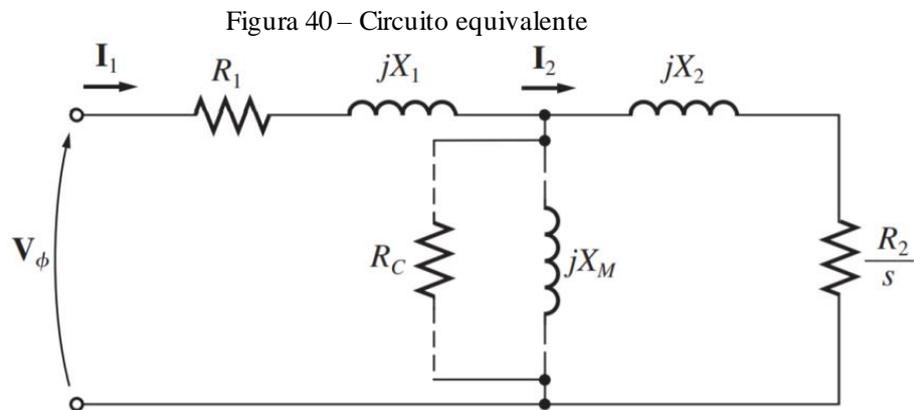
## 2.5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

### 2.5.1 Obtenção do Circuito Equivalente do Motor

Para o estudo do motor de indução trifásico a ser utilizado no projeto, deve-se determinar os parâmetros do circuito equivalente do dado motor. Para obter os parâmetros com precisão, apenas dois ensaios são suficientes. São estes o teste a vazio e o teste com rotor travado. No teste a vazio, é possível obter informações acerca da corrente de excitação e das perdas rotacionais (SEN, 1999), enquanto que o teste de rotor travado disponibiliza informações sobre as indutâncias do motor. O teste de rotor travado deve ser feito em condições de corrente e frequência similares a de operação normal do motor. (SEN, 1999)

#### 2.5.1.1 Teste de Rotor Travado

Este teste é feito com o rotor do motor parado, e é muito semelhante ao teste de curto-circuito realizado em transformadores. O teste consiste em alimentar o motor com tensão alternada, ajustada para que a corrente esteja em valores próximos ao nominal do motor. O escorregamento neste ensaio é igual a 1, visto que o rotor está parado. Como consequência disso, a resistência do rotor é apenas  $R_2$ , um valor baixo de resistência, e a maior parte da corrente percorrerá este ramo ao invés de  $R_c$  ou  $jX_m$ . Por isso, pode-se fazer uma aproximação satisfatória, desprezando  $R_c$  e  $jX_m$  neste teste, como pode ser visto na Figura 40.



Fonte: CHAPMAN, 2013

Porém, um problema que deve ser levado em consideração é a frequência de funcionamento do motor nestas condições. Em funcionamento normal, o escorregamento é muito mais baixo, próximo a 3%. Neste caso a frequência elétrica no rotor é algo em torno de 2 Hz. Isso é um grande problema, porque pode afetar a medição da resistência do rotor, comprometendo também o cálculo dos demais elementos do circuito equivalente. A solução aplicada para este problema foi a utilização de um inversor funcionando na frequência de 15 Hz, ou seja, 25% do valor nominal, um valor mais próximo do que realmente acontece em condições normais de uso do motor. Os valores obtidos neste teste estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Teste de rotor travado

<b>TESTE DE ROTOR TRAVADO</b>	
Frequência	15 Hz
$\theta$	81°
$V_{in}$ (Linha)	3,6 V
$I_{in}$ (Fase)	1,65 A
$P_{in}$	1,6 W

Fonte: Autor

Conforme a Tabela 2, pode-se calcular o valor da resistência total do circuito, do ponto de vista da fonte de alimentação. Chega-se a um valor de resistência igual a 0,1975 ohms, sendo este valor a soma de  $R_1 + R_2$ . Assume-se um valor igual para  $R_1$  e  $R_2$ , resultando então no valor para estas resistências de 0,1 ohms.

Tendo obtido os valores de tensão e corrente de entrada, o valor da impedância do circuito pode ser facilmente calculado através de (04). Tendo o valor da impedância total do circuito, pode-se utilizar (05) para descobrir a reatância dos enrolamentos do estator e do rotor, sendo estas consideradas iguais.

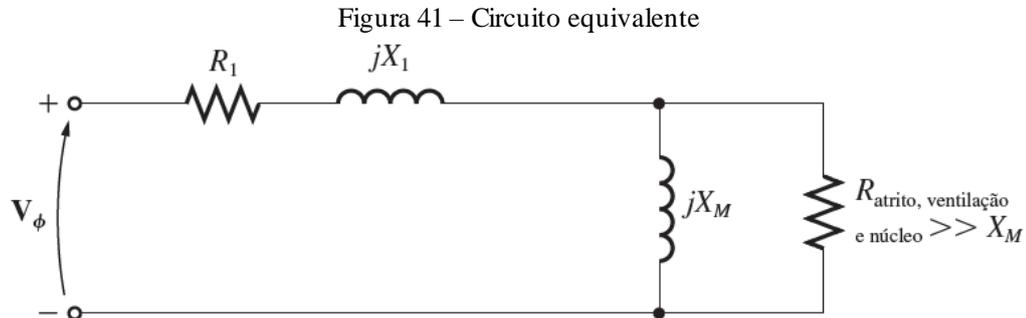
$$|Z| = \frac{V}{\sqrt{3}I} = \frac{3,6}{2,86} = 1,26 \Omega \quad (04)$$

$$jX_1 + jX_2 = \left( \frac{f_{nominal}}{f_{ensaio}} \right) |Z| \sin(\theta) = \frac{60}{15} 1,26 \sin(81^\circ) = 5 \Omega \quad (05)$$

#### 2.5.1.2 Teste a Vazio

O teste a vazio é feito ligando o motor com tensão nominal em suas bobinas, porém sem carga conectada ao seu eixo. O objetivo deste teste é obter informações sobre os componentes magnetizantes do circuito, que serão utilizadas em conjunto com o teste de rotor travado para determinar os componentes do circuito equivalente do motor. Esse teste foi feito utilizando a frequência de utilização do motor, ou seja, 60 Hz. A tensão de saída foi sendo incrementada, até a tensão de linha nos terminais do motor atingir a tensão nominal, de 380 V

com as bobinas conectadas em estrela. As medidas são tomadas nestas condições, obtendo-se assim o valor eficaz da tensão e da corrente de linha, respectivamente 380 V e 1,04 A.



Fonte: CHAPMAN, 2013

A Figura 41 mostra o circuito equivalente do motor de indução trifásico nas condições do teste a vazio. Segundo Fitzgerald e Kingsley (2014, p. 333), a potência realizada pelo motor nestas condições é majoritariamente reativa, podendo-se considerar fator de potência zero. Isso implica que a impedância calculada através dos valores de tensão e corrente obtidos no ensaio é formada por  $jX_1$  e  $jX_M$ . Tem-se então que a soma destes valores é igual a 211,53 ohms.

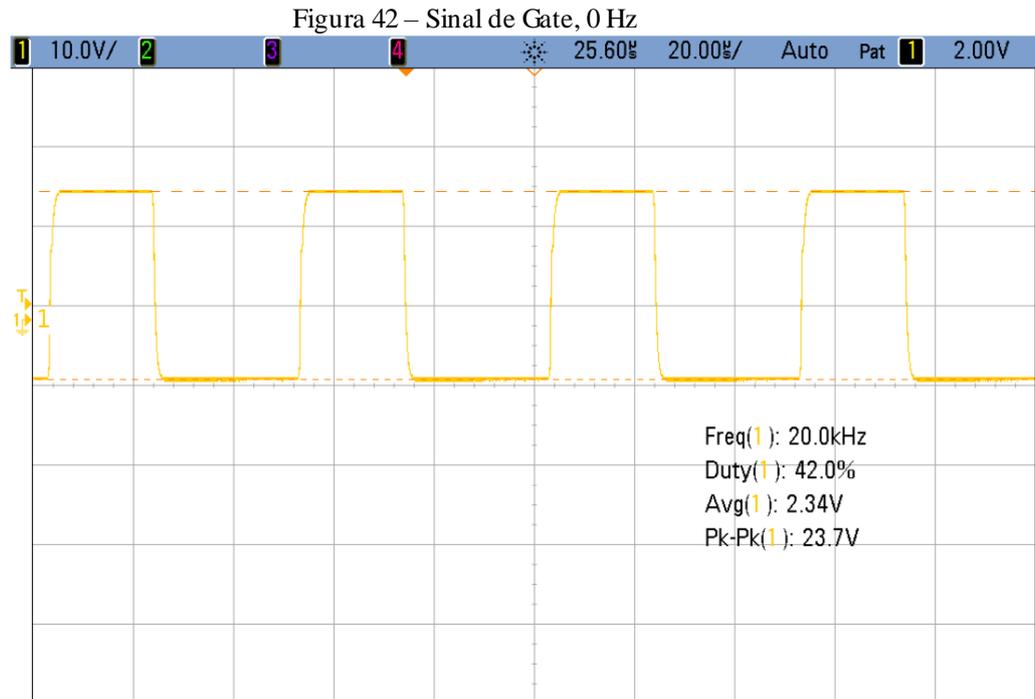
Utilizando os valores coletados no teste de rotor travado, calcula-se que a impedância de magnetização é igual a 209,0 ohms.

## 2.5.2 Formas de Onda Obtidas

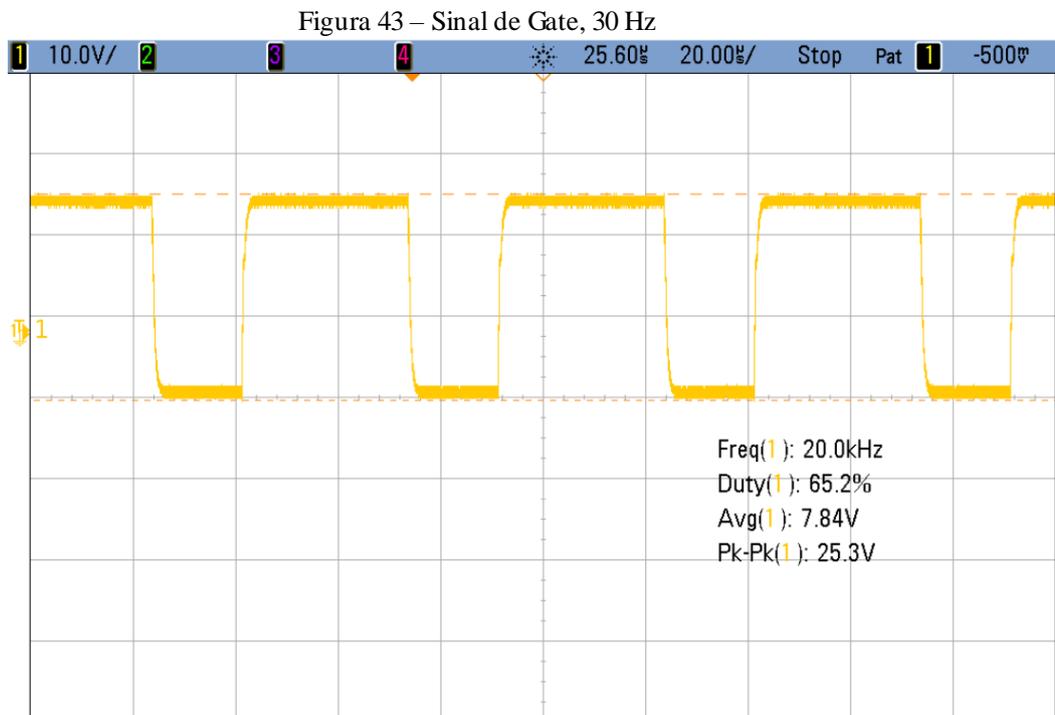
### 2.5.2.1 Sinais de Acionamento

A fim de validar o projeto desenvolvido, alguns sinais foram obtidos através de osciloscópio com o sistema funcionando e o motor sendo acionado. As tensões de gate foram registradas com as seguintes frequências: 0, 30 e 60 Hz, observando todo o espectro de funcionamento do motor, respectivamente Figura 42, Figura 43 e Figura 44. Estas imagens foram obtidas na escala de tempo da onda portadora, durante o valor de pico da onda moduladora. A medida que a frequência aumenta, o valor de pico da onda moduladora também aumenta, mantendo a relação entre tensão e frequência igual. Nota-se na Figura 42 o nível médio de tensão presente, apesar de ser um valor pequeno, mas que permite um torque de partida suficiente ao incrementar a frequência em rampa com baixa inclinação. Nota-se

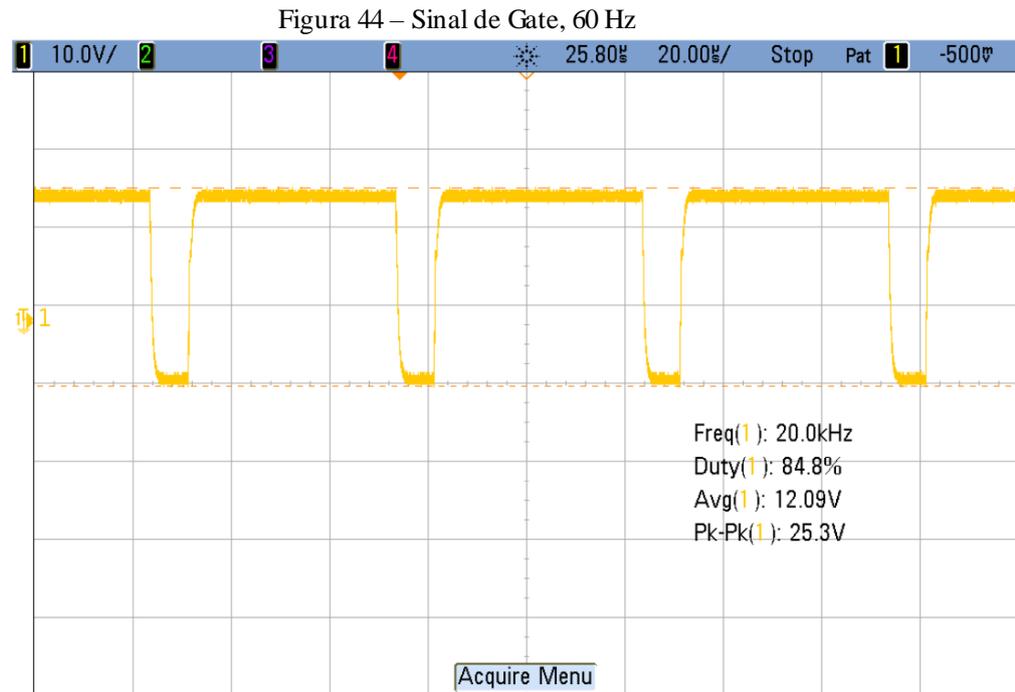
também na Figura 44, que apesar de estar funcionando em frequência nominal, a razão cíclica não está em 100%. Isto se deve ao fato de que a onda moduladora possui um valor de pico inferior à onda portadora, o equivalente a 87% da mesma.



Fonte: Autor



Fonte: Autor

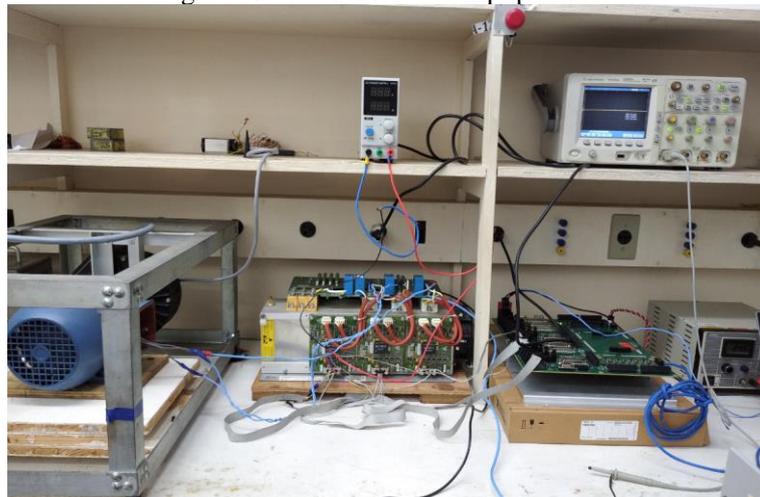


Fonte: Autor

### 2.5.2.2 Equipamento

O equipamento montado no projeto pode ser visto nas seguintes figuras, sendo a Figura 45 a visão geral das conexões e equipamentos utilizados, como fontes de tensão, placas NI, módulo IGBT, motor e osciloscópio utilizado. A Figura 46 apresenta a visão superior das placas de controle utilizadas, os cabos *flat* conectados e cabos de alimentação. A Figura 47 mostra em destaque o módulo de chaves IGBT utilizado para acionamento do motor, bem como suas conexões de sinal e potência.

Figura 45 – Visão Geral do Equipamento



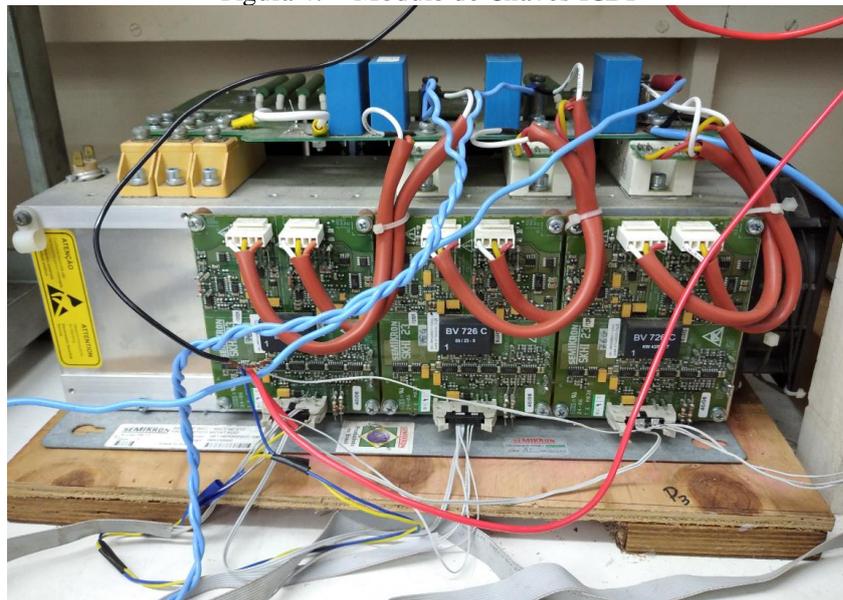
Fonte: Autor

Figura 46 – Vista Superior Placas NI



Fonte: Autor

Figura 47 – Módulo de Chaves IGBT



Fonte: Autor



### 3 CONCLUSÃO

Conforme o objetivo proposto, observou-se que o projeto pode ser conduzido conforme etapas dos objetivos específicos, auxiliado pelo cronograma desenvolvido no planejamento. Os diversos estudos, simulações e aplicações envolvendo tanto inversores quanto motores de indução trifásicos tiveram resultado conforme esperado, e puderam assim também validar o funcionamento do equipamento desenvolvido para o laboratório.

O controle de velocidade e torque do motor desenvolvido foi o controle  $V/f$ , ou controle escalar. Porém, a bancada desenvolvida permite aos alunos aplicarem técnicas de controle mais avançadas, como por exemplo o controle vetorial. O descritivo de todas as funções e blocos do software utilizado auxiliam no rápido aprendizado da interface LabView, e possibilita aos alunos ainda aprimorarem o sistema proposto.

Este trabalho pode ser continuado com atividades futuras, aprimorando as conexões, tornando-as mais seguras. Pode-se também projetar controles para outros tipos de motores, como motor de corrente contínua, e outros modelos de controle, como o controle vetorial.



## REFERÊNCIAS

GUARNIERI, Massimo. **Revolving and Evolving: Early dc Machines**. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2018.

GUARNIERI, Massimo. **The Development of ac Rotary Machines**. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2018.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5 ed. Porto Alegre: McGrawHill, 2013.

FITZGERALD, Arthur E.; KINGSLEY, Charles. **Máquinas elétricas**. 7. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2014.

KUPHALDT, Tony R. **Tesla Polyphase Induction Motors**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-13/tesla-polyphase-induction-motors/>. Acesso em: 08 out 2020.

ASGHAR, M. S. J. Speed control of wound rotor induction motors by AC regulator based optimum voltage control. **Power Electronics and Drive Systems**, 2003.

NATIONAL INSTRUMENTS. **USER MANUAL NI sbRIO-9607**, 2020. Disponível em: <https://www.ni.com/pdf/manuals/375463b.pdf>. Acesso em: 08 out 2020.

NATIONAL INSTRUMENTS. **USER MANUAL AND SPECIFICATIONS NI sbRIO-9684**, 2020. Disponível em <https://www.ni.com/pdf/manuals/378017c.pdf>. Acesso em: 08 out 2020.

NATIONAL INSTRUMENTS. **USER MANUAL NI sbRIO-9687**, 2020. Disponível em <https://www.ni.com/pdf/manuals/377239b.pdf>. Acesso em: 08 out 2020.

SEN, P. C. **Principles of Electric Machines & Power Electronics**. 3 ed, Wiley, 1999.

PELTOLA, M. **AC induction motor slip**, 2002. Disponível em: <https://www.plantservices.com/articles/2002/48/?page=1> . Acesso em 15 dez 2020.