

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS EMBARCADOS PARA A  
INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

FABRIZIO JOSÉ MARÍA ARDISSONE ABENTE

**SIMULAÇÃO DE UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA  
ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS EM UM  
SISTEMA DE AR CONDICIONADO PARA ÔNIBUS HÍBRIDOS  
ELÉTRICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2016

FABRIZIO JOSÉ MARÍA ARDISSONE ABENTE

**SIMULAÇÃO DE UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA  
ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS EM UM  
SISTEMA DE AR CONDICIONADO PARA ÔNIBUS HÍBRIDOS  
ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização, apresentado ao Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Luiz Fernando Copetti

CURITIBA

2016

## TERMO DE APROVAÇÃO

FABRIZIO JOSÉ MARÍA ARDISSONE ABENTE

### **SIMULAÇÃO DE UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS EM UM SISTEMA DE AR CONDICIONADO PARA ÔNIBUS HÍBRIDOS ELÉTRICOS**

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado no dia 03 de fevereiro de 2016, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas  
Coordenador de Curso  
Departamento Acadêmico de Eletrônica

BANCA EXAMINADORA

---

Luiz Fernando Copetti  
Orientador - UTFPR

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

A meus pais, por terem me inculcado desde cedo a vontade de aprender sempre e me incentivado a me dedicar a aquilo que gosto.

A Zilda, por estar sempre ao meu lado e me dado força nos momentos de fraqueza.

Aos meus filhos e enteados, aos mais velhos e ao mais novo, por terem me acompanhado na jornada da vida e me dado muitas alegrias.

A Deus, por tudo permitir.

## AGRADECIMENTOS

Aos colegas de turma pelo companheirismo e compartilhamento de conhecimento e materiais didáticos.

Aos professores e funcionários do Curso de Especialização em CESEB do Departamento de Eletrônica da UTFPR.

Ao Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas, coordenador do curso, por sua dedicação à turma, sua atenção às questões acadêmicas e incentivo para a conclusão deste trabalho.

Ao prof. Luiz Fernando Copetti por sua atenção, ensinamentos e disponibilidade para a orientação deste trabalho.

Numa só semente de trigo há mais vida do que num monte de feno.  
Khalil Gibran

## RESUMO

ARDISSONE ABENTE, Fabrizio José María, Simulação de um inversor de frequência para acionamento de motores de indução trifásicos em um sistema de ar condicionado para ônibus híbridos elétricos. 2016. 42f. Monografia (Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Os ônibus elétricos híbridos são uma realidade como meio de transporte no modal terrestre coletivo urbano. O acionamento do compressor de ar condicionado para veículos elétricos deve depender de o motor estar girando ou não e sua bateria de alta capacidade pode ceder energia para um motor próprio para este fim. Para que este sistema funcione de maneira eficiente, este trabalho se propôs a definir a lógica e a forma de funcionamento do inversor, modelar e simular o inversor, transferir o modelo gerado para a linguagem VHDL e finalmente, verificar a correta transferência do mesmo. Para tanto, foram realizadas intensas pesquisas bibliográficas de suporte teórico e desenvolvido e testado um modelo de funcionamento de inversor, utilizando o software Matlab Simulink Módulo HDL Coder e realizada a transferência deste modelo para um FPGA e testado o seu funcionamento; As simulações, as modelagens, as transferências de linguagens computacionais e os testes executados obtiveram sucesso em programar, de maneira eficiente e segura, o uso do inversor para obter energia para o acionamento do compressor de ar condicionado para veículo híbrido elétrico.

**Palavras chave:** Motores de indução trifásicos. Ar Condicionado em Ônibus. Inversores. Mat Lab Simulink VHDL. FPGA.

## **ABSTRACT**

ARDISSONE Abente, Fabrizio José María, simulation of a frequency inverter for driving three-phase induction motors in an air conditioning system for hybrid electric buses. 2016. 42f. Monograph (Specialization in Embedded Systems for Automotive, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2016.

Hybrid buses are a reality for transportation of public in urban land. The air conditioning compressor drive should be independent of the diesel engine being or not running. For this system to work efficiently, this study proposes to set the logic and mode of operation of the inverter, model it and simulate it, transfer the model generated to a FPGA using automatic code generation and finally, check the good transfer of this model. For this purpose, there were intense bibliographic research and a model of the operation of the inverter was done and simulated using Matlab Simulink HDL Coder module software and the transfer of this model to an FPGA was performed; The simulations, the modeling, the transfer of the auto generated code and the tests performed were successful in using this technique to develop an inverter to drive the air conditioning compressor for hybrid electric vehicle.

### **Keywords:**

Threephase Induction motors. Air conditioning in Bus. Inverters. Mat Lab Simulink VHDL . FPGA.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Ônibus Volvo Híbrido Fonte: (VOLVO DO BRASIL, 2016).....   | 12 |
| Figura 2: Componentes de um sistema de ar condicionado para ônibus Fonte: (GUCHEN, 2016) .....                | 16 |
| Figura 3: REVO-E unidade do teto para ônibus híbridos/elétricos Fonte: (SPHEROS GMBH, 2016) .....             | 17 |
| Figura 4: Motor de indução trifásico Fonte: (PORTAL ELETRICISTA, 2016).....                                   | 19 |
| Figura 5: Conjugado e escorregamento dos motores assíncronos Fonte: (HENRIQUE, [s.d.]) .....                  | 20 |
| Figura 6: Blocos de um inversor de frequência variável Fonte: O autor.....                                    | 20 |
| Figura 7: Modelo esquemático do funcionamento do inversor.....  | 21 |
| Figura 8: A técnica PWM (modulação por largura de pulso) Fonte: (DIXIT; TRIPATHI; CHOLA, 2013).....           | 21 |
| Figura 9: A técnica SPWM Fonte: (UNIVERSIT; KENNEL, 2013a) .....  | 22 |
| Figura 10: O método da 3ª harmônica Fonte: (UNIVERSIT; KENNEL, 2013a).....                                    | 22 |
| Figura 11: As diferentes combinações dos interruptores Fonte: (SARAVANAN; NANDAKUMAR; VEERABALAJI, 2012)..... | 23 |
| Figura 12: Vetores de tensão existentes em um inversor de 3 fases Fonte: (UNIVERSIT; KENNEL, 2013b) .....     | 23 |
| Figura 13: O atraso na ligação Fonte: (UNIVERSIT; KENNEL, 2013b) .....  | 24 |
| Figura 14: Controle V/Hz Fonte: (AKIN; GARG, 2013) .....  | 25 |
| Figura 15: Diagrama de blocos do controle vetorial Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 1998) .....                     | 26 |
| Figura 16: Inversor Kostal INVEOR Fonte: (KOSTAL INDUSTRIE ELEKTRIK GMBH, 2007) .....                         | 26 |
| Figura 17: Dados do motor utilizado no modelo Fonte: Autor.....   | 29 |
| Figura 18: Partes do controle do inversor Fonte: O autor .....  | 30 |
| Figura 19: Controle de chaveamento Fonte: O autor .....   | 30 |
| Figura 20: Geração do sinal PWM Fonte: O autor .....  | 31 |
| Figura 21: O oscilador controlado numericamente Fonte: O autor .....  | 32 |
| Figura 22: Sinais da onda senoidal com 3ª harmônica Fonte: O autor.....                                       | 33 |
| Figura 23: Finalização da geração do código e gravação do FPGA Fonte: O autor .....                           | 34 |
| Figura 24: Declaração das entradas e saídas no FPGA Fonte: O autor.....                                       | 34 |
| Figura 25: Ligação do motor com compressor acoplado Fonte: O autor .....                                      | 35 |
| Figura 26: Ligação do motor com várias cargas Fonte: O autor .....  | 36 |
| Figura 27: Correntes no estator em regime permanente Fonte: O autor .....                                     | 36 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 28: Atraso no chaveamento dos IGBTs Fonte: O autor.....     | 37 |
| Figura 29: Exemplos de sinal gerado pelo FPGA Fonte: O autor ..... | 37 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Valores médios de quilometragem por litro para veículos do ciclo Diesel<br>Fonte: ((MMA), 2013)..... | 11 |
| Tabela 2: Dados de performance da unidade REVO-E Fonte: (SPHEROS GMBH,<br>[s.d.].....                          | 18 |
| Tabela 3: Características do inversor INVEOR M Fonte: (KOSTAL INDUSTRIE<br>ELEKTRIK GMBH, 2015).....           | 27 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS**

AC – Corrente alternada

DC – Corrente contínua

DDS – Síntese digital direta

fem – Força eletro motriz

FPGA – Matriz de portas programável em campo

GHG – Gases de efeito estufa

HDL – Linguagem de descrição de dispositivos

HIL – Dispositivo na malha

IGBT – Transístor bipolar de porta isolada

NCO – Oscilador controlado numericamente

Nm – Newton \* metro

PWM – modulação por largura de pulso

SPWM - modulação por largura de pulso senoidal

SVPWM - modulação por largura de pulso de vetores espaciais

TEP – Tonelada equivalente de petróleo

VHDL – Linguagem de descrição de hardware VHSIC

## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                    | <b>11</b> |
| 1.1      | TEMA12   |           |
| 1.2      | DELIMITAÇÃO DO ESTUDO.....                                 | 13        |
| 1.3      | PROBLEMA .....   | 13        |
| 1.4      | Objetivos.....   | 14        |
| 1.4.1    | Objetivo Geral.....  | 14        |
| 1.4.2    | Objetivos Específicos .....                                | 14        |
| 1.5      | JUSTIFICATIVA.....   | 14        |
| 1.6      | ESTRUTURA DO TRABALHO .....                                | 15        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLOGIA .....</b>           | <b>16</b> |
| 2.1      | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....                                 | 16        |
| 2.1.1    | OS SISTEMAS DE AR CONDICIONADO PARA ÔNIBUS .....           | 16        |
| 2.1.2    | O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSÍNCRONO.....               | 18        |
| 2.1.3    | O INVERSOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL .....                    | 20        |
| 2.1.4    | Os FPGAs.....  | 27        |
| 2.2      | METODOLOGIA .....  | 28        |
| 2.2.1    | O modelo geral .....                                       | 28        |
| 2.2.2    | O controle do inversor .....                               | 29        |
| 2.2.3    | A geração do código HDL .....                              | 33        |
| <b>3</b> | <b>ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b> | <b>35</b> |
| 3.1      | ANALISE DOS RESULTADOS .....                               | 35        |
| 3.2      | CONSIDERAÇÕES FINAIS.....                                  | 37        |
| <b>4</b> | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                   | <b>39</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo de combustíveis fósseis por veículos de transporte pesado é elevado e no Brasil, representaram no ano de 2014 o equivalente a  $37.768 \times 10^3$  tep (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME); EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2015). Qualquer redução no valor deste consumo faz que os resultados sejam significativos, não somente na economia financeira, mas também na redução das emissões de gases, tanto de efeito estufa quanto de outros gases poluentes.

Os ônibus urbanos são os veículos que tem o maior consumo de combustível específico dentre os veículos de ciclo diesel, como mostra a Tabela 1. Naturalmente o interesse em buscar alternativas para redução do consumo destes veículos seja mais acentuada que para os demais. O uso de eletricidade para realizar a tração do veículo é uma das melhores alternativas para redução do consumo de combustível fóssil.

| <b>Categoria</b>      | <b>Consumo específico de diesel (<math>L_{\text{diesel}}/100\text{km}</math>)</b> | <b>Quilometragem por litro de diesel (<math>\text{km}/L_{\text{diesel}}</math>)</b> |
|-----------------------|---|---|
| Caminhões semileves   | 11,0  | 9,1   |
| Caminhões leves       | 18,0  | 5,6   |
| Caminhões médios      | 18,0  | 5,6   |
| Caminhões semipesados | 28,0  | 3,4   |
| Caminhões pesados     | 29,0  | 3,4   |
| Ônibus urbanos        | 43,5  | 2,3   |
| Micro-ônibus          | 26,0  | 3,8   |
| Ônibus rodoviários    | 33,0  | 3,0   |

**Tabela 1: Valores médios de quilometragem por litro para veículos do ciclo Diesel**

**Fonte:** ((MMA), 2013)

Um exemplo de veículo tipo ônibus elétrico urbano é o Volvo Hibribus (Figura 1). O seu fabricante informa redução de consumo de diesel de até 35% e de acordo com relato de cliente, a média de consumo é de  $3,75\text{km}/\text{l}$  - (VOLVO DO BRASIL, 2014) – o que representa uma redução de quase 40% quando considerada a média de consumo dos ônibus urbanos do Brasil (Tabela 1).



Figura 1 - Ônibus Volvo Híbrido

Fonte: (VOLVO DO BRASIL, 2016)

## 1.1 TEMA

Além das considerações e preocupações acerca do consumo de combustível, os ônibus urbanos e rodoviários requerem eficientes sistemas de ar condicionado para melhor conforto dos passageiros transportados. Alguns municípios com o Rio de Janeiro, por exemplo, inclui nas licitações de aquisição de ônibus o ar condicionado como um item acessório obrigatório (PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO, 2014)

Os sistemas de ar condicionado em ônibus movidos a motores diesel são acionados pelo motor térmico, já nos veículos híbridos elétricos o motor térmico permanece geralmente desligado quando o ônibus está parado, logo, o acionamento do compressor do sistema de ar condicionado deixa de ser possível nesta hora. Isto afeta muito a eficiência do sistema de ar condicionado para estes modelos, já que os ônibus urbanos permanecem parados por tempo considerável, seja em pontos de ônibus, em semáforos, ou em engarrafamentos, etc e conseqüentemente impedidos de acionar o sistema de ar condicionado.

Assim, torna-se necessário procurar uma alternativa para o acionamento do compressor de ar condicionado para veículos elétricos independente de o motor estar girando ou não. Uma vez que estes veículos possuem uma bateria de capacidade vultosa, ela pode ser utilizada para atender a demanda deste acessório. O acionamento do compressor pode ser realizado por meio de um motor elétrico próprio que irá retirar energia da bateria.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Os motores utilizados para veículos elétricos são os de indução trifásica com bateria que proporciona corrente contínua, caso haja demanda de outros tipos de corrente, como no caso do ar condicionado, por exemplo, torna-se necessário o uso de um inversor de corrente do tipo DC/AC, que possibilite alimentar o motor que irá acionar o compressor do ar condicionado.

O perfeito funcionamento destes inversores é uma etapa fundamental para que seja possível o uso da energia da bateria de maneira segura e otimizada, atendendo plenamente as demandas do veículo. Uma das formas de prever o funcionamento do inversor pode se dar através de ferramentas de simulação como o Matlab Simulink®. O Matlab® é um ambiente de programação para desenvolvimento de algoritmos, análise de dados e visualização numérica. O Simulink® é um ambiente gráfico para simulação e design Model-Based de sistemas dinâmicos e integrados de vários domínios.

Matlab Simulink® são utilizados em indústrias automotivas, entre outras, como ferramentas fundamentais de investigação e desenvolvimento de modelagens do funcionamento de sistemas e a simulação de seu funcionamento em. O software Matlab Simulink já foi usado para simulações com inversores por (SARAVANAN; NANDAKUMAR; VEERABALAJI, 2012), (TRAN, 2012), (AFFONSO, 2007)

## 1.3 PROBLEMA

Uma problemática, após testar a lógica de funcionamento dos modelos através do Simulink, está em transferir modelos testados e aprovados nos simuladores para uma linguagem de programação ou descrição de hardware que possa ser utilizada nas unidades de controle a bordo dos veículos. Esta transferência de informações entre diferentes formas de programação são possíveis por meio de módulos do Matlab tipo HDL Coder, que traduzem o modelo do Matlab Simulink para a linguagem HDL e também programam o FPGA para a realização de protótipos para testes físicos.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo Geral**

Este trabalho objetiva criar e simular um modelo, por meio do software Matlab Simulink®, do funcionamento principal de um inversor, o qual possa atender a demanda de energia para acionamento de um compressor de ar condicionado em ônibus elétricos tipo hibribus, e transferir o modelo criado para um FPGA por meio da ferramenta HDL Coder, isto é, traduzir automaticamente o modelo do Matlab para um FPGA.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

Definir as características do motor do compressor de ar condicionado, a ser acionado pelo inversor de bateria;

Definir a lógica e a forma de funcionamento do inversor;

Modelar e simular o conversor de frequência variável (VFD) no software Matlab Simulink utilizando os blocos suportados pelo módulo HDL Coder;

Transferir o modelo gerado em linguagem do Matlab para a linguagem FPGA, por meio da ferramenta HDL Coder;

Verificar a correta programação do FPGA.

## **1.5 JUSTIFICATIVA**

Vista a contribuição que os veículos elétricos trazem à redução no consumo de combustíveis fósseis e as melhorias ambientais resultantes do controle de emissões atmosféricas danosas e a necessidade deste tipo de veículo atender à demanda de energia para todos os acessórios necessários para o conforto do seu usuário como o ar condicionado por exemplo, se faz necessário otimizar a energia disponível pela bateria do veículo.

Poder simular e programar e transferir o mesmo que foi simulado é fundamental para garantir que não haja erros no sistema em operação e que ele responda corretamente aos comandos executados.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho terá a estrutura abaixo apresentada.

**Capítulo 1 - Introdução:** será apresentado o tema, as delimitações da pesquisa, o problema, os objetivos da pesquisa, a justificativa e a estrutura geral do trabalho.

**Capítulo 2 – Fundamentação teórica e Metodologia:** tendo como base, neste capítulo serão descritos o embasamento teórico, os procedimentos metodológicos para a execução do objetivo do trabalho.

**Capítulo 3 – Análise dos Resultados e Considerações finais:** Serão apresentados os resultados obtidos nas simulações e será retomada a questão objetiva inicial apontada e como foi atingida, por meio do trabalho realizado. Além disto, serão sugeridos abordagens e ensaios científicos que possam aperfeiçoar as problemáticas discutidas a partir do estudo realizado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLOGIA

### 2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para começar a análise acerca das possibilidades de simular o funcionamento de uma modelagem de programação de inversores, para acionamento de motores para sistemas de ar condicionado, é necessário compreender os fundamentos de funcionamento destes sistemas, seus componentes e suas características, bem como do software usado para os fins da simulação. Estes assuntos serão discutidos neste capítulo, bem como, será apresentada a metodologia utilizada para testar a simulação do funcionamento prático do inversor, com base na transferência da programação inicialmente desenvolvida em software para este fim.

#### 2.1.1 OS SISTEMAS DE AR CONDICIONADO PARA ÔNIBUS

Os principais componentes de um sistema de ar condicionado para ônibus estão mostrados na Figura 2.



Figura 2: Componentes de um sistema de ar condicionado para ônibus  
Fonte: (GUCHEN, 2016)

O ar é esfriado fazendo que o ar quente passe através do evaporador onde um fluido refrigerante se expande e passa da fase líquida para a gasosa extraíndo o calor do ar. Na sequência este gás é enviado para o compressor, onde será comprimido e voltará para a fase líquida. A seguir o gás deve então passar por um condensador, que retira o calor e condensa o fluido que fica pronto para passar pela válvula de expansão e então voltar novamente ao evaporador, recomeçando assim todo o ciclo. O compressor precisa de um motor que o faça girar, para assim poder realizar o seu trabalho.

Nos sistemas de ar condicionado para ônibus híbridos/elétricos todos os sistemas mostrados, exceto o painel de controle, concentram-se numa só unidade que é montada no teto, contribuindo também com a facilidade de instalação e otimização do espaço utilizado, entretanto, alguns clientes mencionam que esta localização do assessorio torna exigente a engenharia de segurança para efetuar a manutenção, por ser considerado trabalho em altura.

Um exemplo desta unidade pode ser visto na Figura 3 e os dados de desempenho desta unidade podem ser vistos na Tabela 3. Fazendo a conversão de unidades para a mais utilizada no Brasil temos que a capacidade de resfriamento do modelo menor (25 kW) é de 85300 BTU/h.



**Figura 3: REVO-E unidade do teto para ônibus híbridos/elétricos**  
Fonte: (SPHEROS GMBH, 2016)

## REVO®-E

|  |               | Single unit       | Articulated / double<br>(Master & Slave unit)           |
|--|---------------|-------------------|---|
| Cooling capacity                             |               | 25 kW             | 31 kW   |
| Heating capacity                             |               | 40 kW             | 80 kW   |
| Air volume                                   |               | 6960 m³/h         | 13920 m³/h  |
| Current consumption (24 V DC)                | Maximum (1)   | 85 A              | 140 A   |
|  | Nominal (2)   | 55 A              | 90 A  |
|  | Regulated (3) | 11 A              | 17 A  |
| Current consumption (600 V DC)               | Maximum (4)   | 22 A              | 22 A  |
|  | Regulated (5) | 9 A               | 11 A  |
| Weight                                       |               | 258 kg            | 258 kg + 118 kg   |
| Dimensions<br>(length x wide x height in mm) |               | 2800 x 2091 x 406 | Master unit: 2800x2091x406<br>Slave unit: 2600x2077x210 |

(1) all 100%

(2) condenser 80%/evaporator 70%

(3) temperature of passenger compartment at setpoint

(4) compressor speed at 50 Hz

(5) temperature passenger compartment at setpoint 25°C and ambient 35°C

**Tabela 2: Dados de performance da unidade REVO-E**

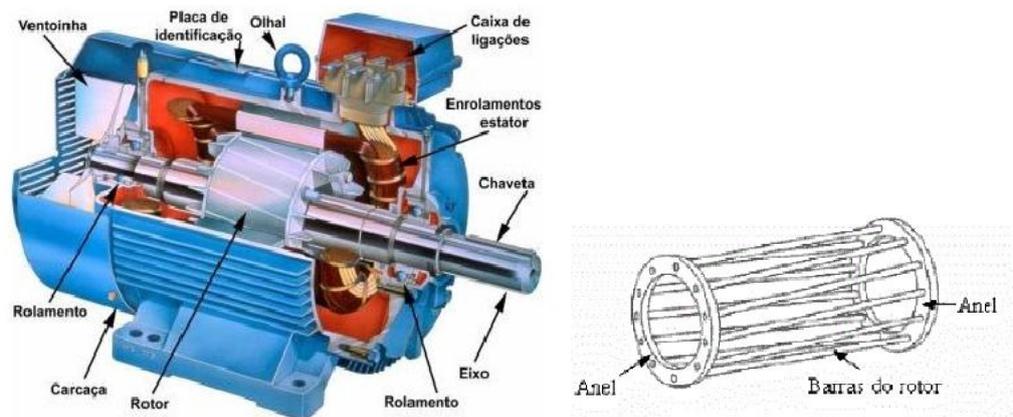
Fonte: (SPHEROS GMBH, [s.d.])

**2.1.2 O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSÍNCRONO**

Estes motores tem o nome derivado da forma em que o campo magnético que os faz funcionar é criado. Este tipo de motor possui uma forma de construção bem simples, o que os faz robustos e serem os preferidos por vários segmentos industriais. O princípio de funcionamento deste tipo de motor é o seguinte:

O estator está ligado à fonte de alimentação CA. O rotor não está ligado eletricamente a nenhuma fonte de alimentação. Quando o enrolamento do estator é energizado através de uma alimentação trifásica, cria-se um campo magnético girante. À medida que o campo varre os condutores do rotor, é induzida uma fem nesses condutores ocasionando o aparecimento de uma corrente elétrica nos condutores. Os condutores do rotor,

percorridos por corrente elétrica, interagem com o campo magnético girante do estator, para produzir um torque eletromagnético que atua sobre os condutores do rotor, fazendo-o girar.



**Figura 4: Motor de indução trifásico**  
**Fonte:** (PORTAL ELETRICISTA, 2016)

De acordo com a Lei de Lenz, qualquer corrente induzida tende a se opor às variações do campo que a produziu. No caso de um motor de indução, a variação é a rotação do campo do estator, e a força exercida sobre o rotor pela reação entre o rotor e o campo do estator é tal que tenta cancelar o movimento contínuo do campo do estator. Esta é a razão pela qual o rotor acompanha o campo do estator tão próximo quanto permitam o seu peso e a sua carga. O motor de indução tem corrente no rotor por indução, e é semelhante a um transformador com secundário girante. (HENRIQUE, [s.d.]

A velocidade síncrona do motor é dada pela seguinte fórmula:

$$n_s = \frac{120 f}{2p}$$

Sendo  $f$  a frequência da corrente de alimentação e  $p$  o número de pares de polos magnéticos. Como informado no princípio de funcionamento, a velocidade destes motores é sempre inferior à velocidade síncrona, esta diferença de

velocidade é chamada de escorregamento. O valor do escorregamento depende do conjugado (torque) acionado, próximo da velocidade síncrona temos que, quanto menor o conjugado, maior a velocidade. Isto pode ser observado na Figura 5.

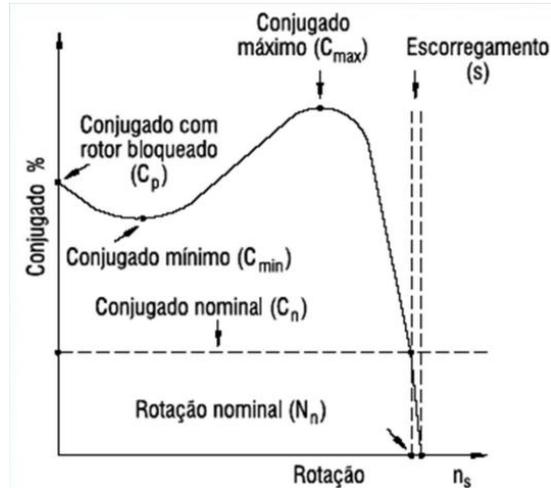


Figura 5: Conjugado e escorregamento dos motores assíncronos

Fonte: (HENRIQUE, [s.d.])

Já a potência é dada pela seguinte fórmula:

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I \times \cos \alpha$$

### 2.1.3 O INVERSOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL

O papel do inversor é fornecer ao motor de indução uma alimentação com frequência variável de forma a que a sua velocidade possa ser modificada.

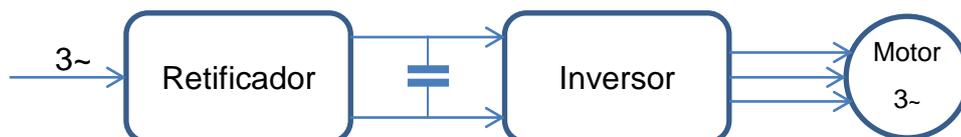
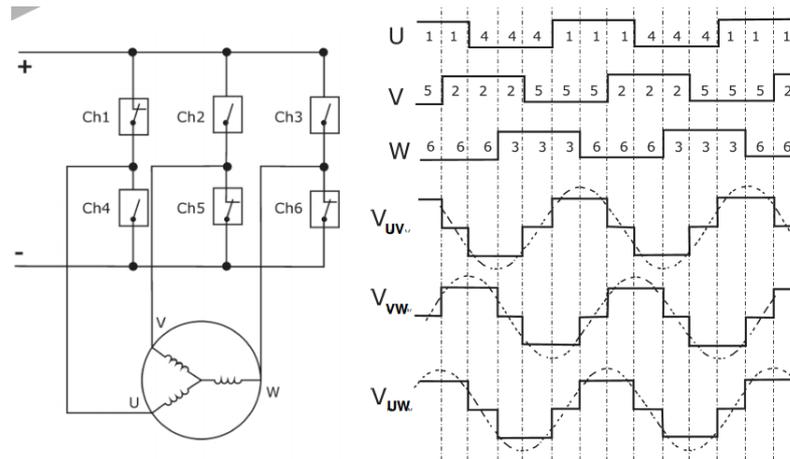


Figura 6: Blocos de um inversor de frequência variável

Fonte: O autor.

O inversor converte a corrente DC em corrente AC para acionamento do motor. A corrente DC é gerada normalmente por meio de retificação da alimentação da rede elétrica. Esta etapa não existe quando a fonte de corrente já é DC, como é o caso dos ônibus híbridos/elétricos.

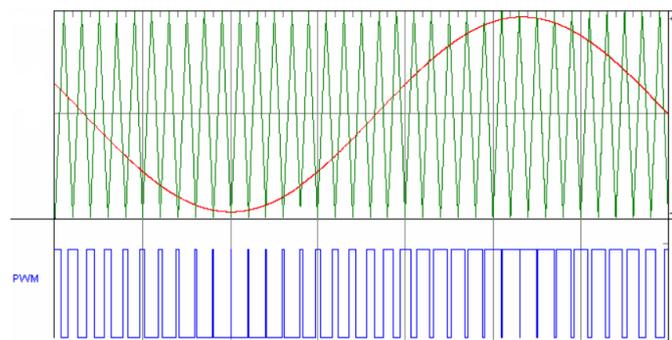
O funcionamento do inversor se baseia no chaveamento alternado de várias chaves que quando realizado na sequência correta, produz na saída uma tensão que varia entre os valores  $-V_{in}$  e  $+V_{in}$ . Este esquema pode ser visto na Figura 7.



**Figura 7: Modelo esquemático do funcionamento do inversor**

Neste tipo de acionamento, a corrente de saída está longe de ser de forma senoidal o que ocasiona perdas e outros problemas tanto no circuito quanto no motor a ser acionado. Para evitar estes problemas é utilizada a técnica de modulação por largura de pulso (PWM pelas suas siglas em inglês) a qual permite, junto com o motor acionado, atuar como filtro e obter correntes muito próximas de senoidais perfeitas.

Nesta técnica o acionamento dos interruptores é realizado em uma frequência muito mais alta que a fundamental, mas o tempo de acionamento varia conforme o interesse em se criar uma tensão elevada ou não. Este sinal pode ser observado na linha azul da Figura 8. Este sinal, quando filtrado pelo enrolamento do motor, reproduzirá uma corrente que segue a senoidal (linha em vermelho – Figura 8).



**Figura 8: A técnica PWM (modulação por largura de pulso)**

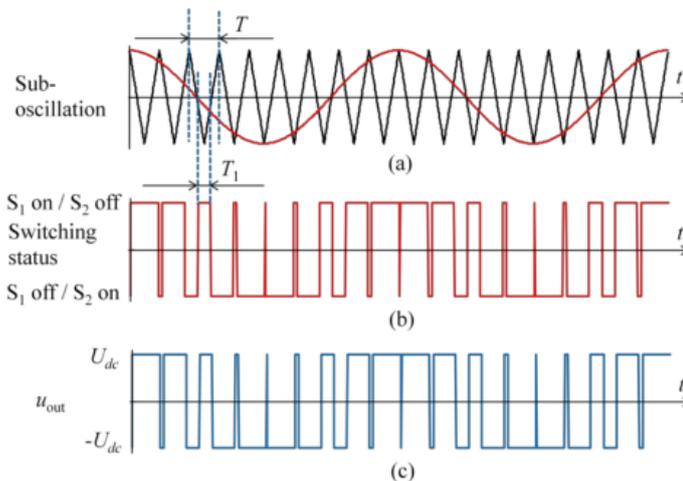
Fonte: (DIXIT; TRIPATHI; CHOLA, 2013)

Várias técnicas existem para criar este sinal de acionamento dos interruptores, dentre estes podemos citar:

### 2.1.3.1 O SPWM

Neste o sinal é ligado ou desligado conforme a comparação de um sinal triangular com o valor da forma de onda que quer ser reproduzido.

Na Figura 9 podemos que o resultado da comparação dos níveis das curvas pretas e vermelhas do gráfico a) resulta na curva do gráfico b) que serve para o acionamento dos interruptores.

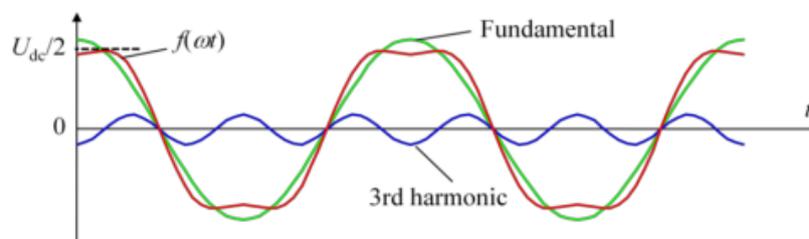


**Figura 9: A técnica SPWM**

Fonte: (UNIVERSIT; KENNEL, 2013a)

### 2.1.3.2 O PWM com terceira harmônica

Esta técnica resulta da utilização de uma onda senoidal adicionada da sua terceira harmônica, ilustrada na Figura 10. Esta combinação permite um maior aproveitamento da tensão DC quando comparado com a técnica SPWM.

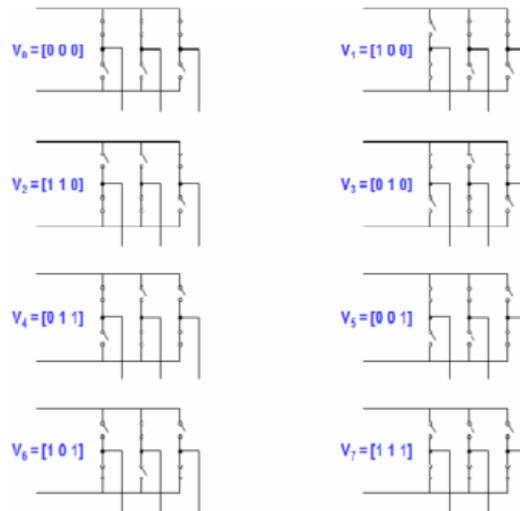


**Figura 10: O método da 3ª harmônica**

Fonte: (UNIVERSIT; KENNEL, 2013a)

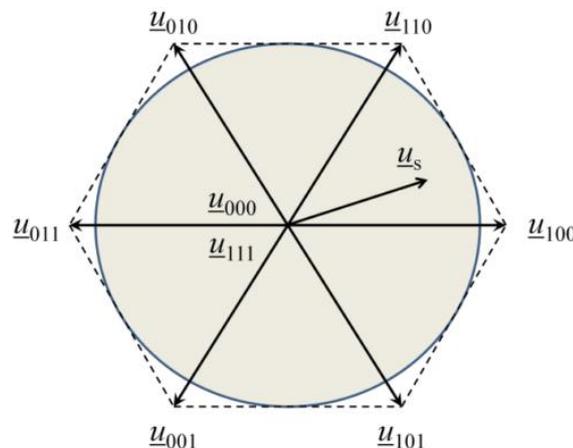
### 2.1.3.3 O método SVPWM

Neste método a combinação dos estados das três meias pontes resulta em oito combinações diferentes, como pode ser visto na Figura 11.



**Figura 11: As diferentes combinações dos interruptores**  
**Fonte:** (SARAVANAN; NANDAKUMAR; VEERABALAJI, 2012)

Em duas destas combinações, todos ligados ou todos desligados, resultam em tensões nulas, restando seis vetores úteis para o acionamento dos interruptores. Estas combinações podem também ser mostradas conforme ilustrado na Figura 12. O hexágono é o limite do espaço vetorial e o círculo representa a máxima trajetória de um sinal senoidal tradicional (MICHAEL; KUMAR; REDDY, 2010)



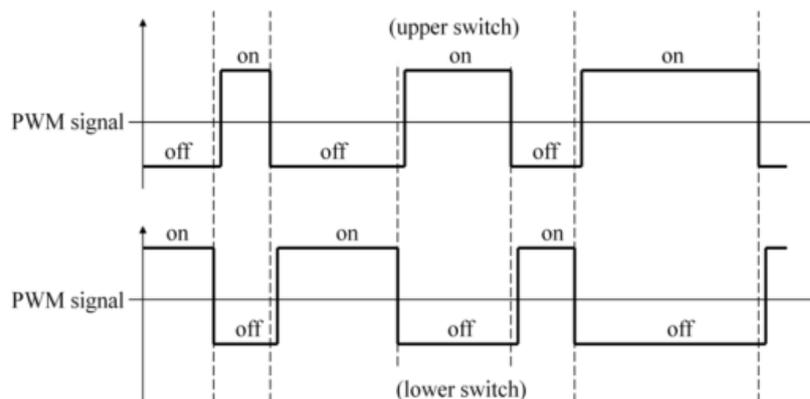
**Figura 12: Vetores de tensão existentes em um inversor de 3 fases**  
**Fonte:** (UNIVERSIT; KENNEL, 2013b)

Se precisarmos aplicar uma tensão como a indicada no vetor  $u_s$ , devemos utilizar uma combinação dos estados de saída  $u_{100}$  e  $u_{110}$  e de  $u_{000}$  ou  $u_{111}$ . Podemos combinar estes vetores aplicando cada um deles por um instante de tempo proporcional ao ângulo e magnitude do vetor  $u_s$ . A técnica SVPWM descreve a forma em que fazer esta combinação e a definição dos tempos necessários para reconstruir o vetor  $u_s$ .

Esta técnica permite obter um índice de modulação superior às anteriores, podendo inclusive ser superior a 1. Isto permite maior utilização da tensão do barramento, mas resulta em saída não senoidal, sendo utilizada somente durante fases transitórias. (UNIVERSIT; KENNEL, 2013b)

#### 2.1.3.4 O atraso na ligação

Os dois interruptores do mesmo braço não podem ficar ligados simultaneamente, isto resultaria em um curto circuito. Como os interruptores utilizados não são perfeitos, ainda circula corrente por um breve tempo após o desligamento, desta forma devemos esperar uma quantidade de tempo após o desligamento de um interruptor, para então ligar o outro interruptor, pertencente ao mesmo braço. O esquema deste atraso é ilustrado na Figura 13.



**Figura 13: O atraso na ligação**  
 Fonte: (UNIVERSIT; KENNEL, 2013b)

#### 2.1.3.5 Tipos de controle

##### Controle escalar

É o tipo mais simples, é utilizado devido à sua facilidade de instalação e operação já que não requer conhecer muitos dados do motor para fazer o controle funcionar. Pode ser realizado em malha aberta ou fechada, sendo que no primeiro caso não requer nenhum tipo de instrumentação.

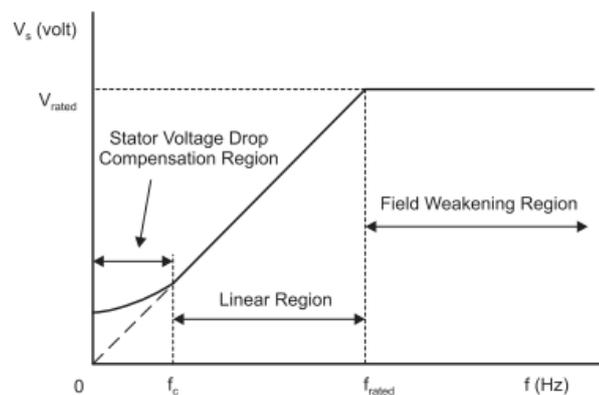
Entretanto, este tipo possui algumas limitações, como por exemplo, não permite o funcionamento em rotações próximas de zero, o torque de partida é limitado a 150% do torque nominal e, não existe garantia de que o motor esteja realmente girando. Além disso, a resposta às mudanças de rotação não é tão rápida quanto nos métodos vetoriais

O método de controle se baseia em realizar o acionamento mantendo um valor de  $V/f$  constante. Isto é realizado de forma a que o fluxo magnético no entreferro sempre seja mantido constante, ou pelo menos, em regime permanente.

Quando a velocidade aumenta, a tensão deve ser aumentada proporcionalmente, entretanto, ao se alcançar a tensão nominal do motor a velocidade não deve continuar aumentando, para assim, evitar danos ao isolamento do enrolamento.

Já em baixas rotações, próximas a zero, um valor de tensão deve ser aplicado de qualquer forma para vencer a resistência do estator que nestas baixas frequências não pode ser negligenciada.

A Figura 14 demonstra a curva utilizada por este método de funcionamento.



**Figura 14: Controle V/Hz**  
**Fonte: (AKIN; GARG, 2013)**

### Controle vetorial

Consiste em controlar as correntes do estator representadas por um vetor. Este controle é baseado nas projeções que transformas um sistema trifásico dependente do tempo e velocidade em um sistema de coordenadas retangulares fixo (d, q). Estas projeções transformam o controle do motor trifásico em um sistema similar ao controle de um motor DC. Como o controle vetorial é simplesmente



| INVEOR M  | Size A  |   |      |     |     | Size B                              |     |     | Size C                              |      | Size D                               |      |      |      |
|---|---|---|------|-----|-----|-------------------------------------|-----|-----|-------------------------------------|------|--------------------------------------|------|------|------|
| Recommended motor rating* [kW]<br>(4-pole asynchronous motor) | 0.37  | 0.55  | 0.75 | 1.1 | 1.5 | 2.2                                 | 3.0 | 4.0 | 5.5                                 | 7.5  | 11.0                                 | 15.0 | 18.5 | 22.0 |
| Supply voltage/supply frequency                               | 3 x 200 VAC - 10% ... 480 VAC + 10%, 50/60 Hz ± 6%  |   |      |     |     |                                     |     |     |                                     |      |                                      |      |      |      |
| Line current [A]  | -   | 1.4   | 1.9  | 2.6 | 3.3 | 4.6                                 | 6.2 | 7.9 | 10.8                                | 14.8 | 23.2                                 | 28.2 | 33.2 | 39.8 |
| Rated output current [A]<br>at 400 V/8 kHz                    | -   | 1.7   | 2.3  | 3.1 | 4.0 | 5.6                                 | 7.5 | 9.5 | 13.0                                | 17.8 | 28.0                                 | 34.0 | 40.0 | 48.0 |
| Output voltage  | 3 AC, 0 V to supply voltage   |   |      |     |     |                                     |     |     |                                     |      |                                      |      |      |      |
| Output frequency  | 0 to 400 Hz   |   |      |     |     |                                     |     |     |                                     |      |                                      |      |      |      |
| Max. overload for 60 sec [%]                                  | 150   |   |      |     |     |                                     |     |     |                                     |      |                                      |      |      | 130  |
| Switching frequency<br>of power stage [kHz]                   | 4, 8, 16 (factory setting: 8)   |   |      |     |     |                                     |     |     |                                     |      |                                      |      |      |      |
| Min. brake resistance [Ω]                                     | -   | 100   |      |     |     | 50                                  |     |     |                                     | 30   |                                      |      |      |      |
| Protective functions  | Undervoltage, overvoltage, Pt limitation, short circuits, motor temperature, inverter temperature, stall protection and detection |   |      |     |     |                                     |     |     |                                     |      |                                      |      |      |      |
| Process control   | PID controller, freely configurable   |   |      |     |     |                                     |     |     |                                     |      |                                      |      |      |      |
| Dimensions (L x W x H)<br>[mm] / [inch]                       | 233 x 153 x 120<br>9.2 x 6.0 x 4.7  |   |      |     |     | 270 x 189 x 140<br>10.6 x 7.4 x 5.5 |     |     | 307 x 223 x 181<br>12.1 x 8.8 x 7.1 |      | 414 x 294 x 232<br>16.3 x 11.6 x 9.1 |      |      |      |
| Weight incl. adaptor plate [kg] / [lbs]                       | 3.9 / 8.6   |   |      |     |     | 5.0 / 11.0                          |     |     | 8.7 / 19.2                          |      | 21.0 / 46.3                          |      |      |      |
| Ambient temperature   | -   | -25 °C / -13 °F (without condensing) to 50 °C / 122 °F (without derating) |      |     |     |                                     |     |     |                                     |      |                                      |      |      |      |
| Protection class  | IP65  |   |      |     |     |                                     |     |     |                                     | IP55 |                                      |      |      |      |
| EMC   | -   | fulfils the requirements of DIN EN 61800-3, class C2                      |      |     |     |                                     |     |     |                                     |      |                                      |      |      |      |
| Certificates and conformity                                   | CE, cULus   |   |      |     |     |                                     |     |     |                                     |      |                                      |      |      |      |

**Tabela 3: Características do inversor INVEOR M**  
**Fonte:** (KOSTAL INDUSTRIE ELEKTRIK GMBH, 2015)

### 2.1.4 Os FPGAs

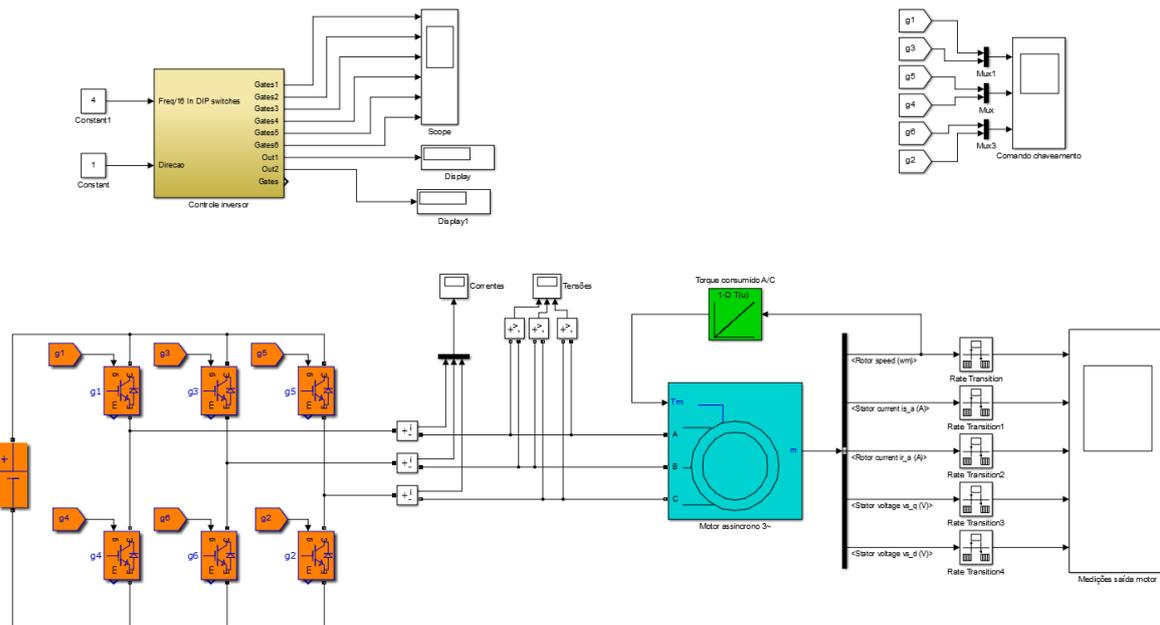
Um FPGA é um dispositivo semicondutor que é largamente utilizado para o processamento de informações digitais. Foi criado pela Xilinx Inc., e teve o seu lançamento no ano de 1985 como um dispositivo que poderia ser programado de acordo com as aplicações do usuário. O FPGA é composto basicamente por três tipos de componentes: blocos de entrada e saída, blocos lógicos configuráveis e chaves de interconexão. Os blocos lógicos são dispostos de forma bidimensional, as chaves de interconexão são dispostas em formas de trilhas verticais e horizontais entre as linhas e as colunas dos blocos lógicos. (<http://www.xilinx.com/>, 31.01.2015)

A diferença dos microprocessadores para um FPGA é a que, no primeiro o programa diz o que ele deve fazer, nos FPGAs o usuário programa o que ele deve “ser”. Os FPGAs podem ser programados para realizar qualquer função digital, além disso, podem operar com maior velocidade que um microprocessador.

## 2.2 METODOLOGIA

### 2.2.1 O modelo geral

Para o desenvolvimento do inversor foi criado um modelo no Simulink do inversor e do motor acionado de forma a verificar a performance do sistema em certas situações.



#### 2.2.1.1 O controle do inversor (parte que será implementada no FPGA)

##### Entradas

- A velocidade de rotação desejada. Neste caso foi reduzida a opção de velocidades de forma a poder implementar o controle através de 4 interruptores presentes no kit de desenvolvimento do FPGA.
- A direção da rotação (horária/anti-horária).

##### Saídas

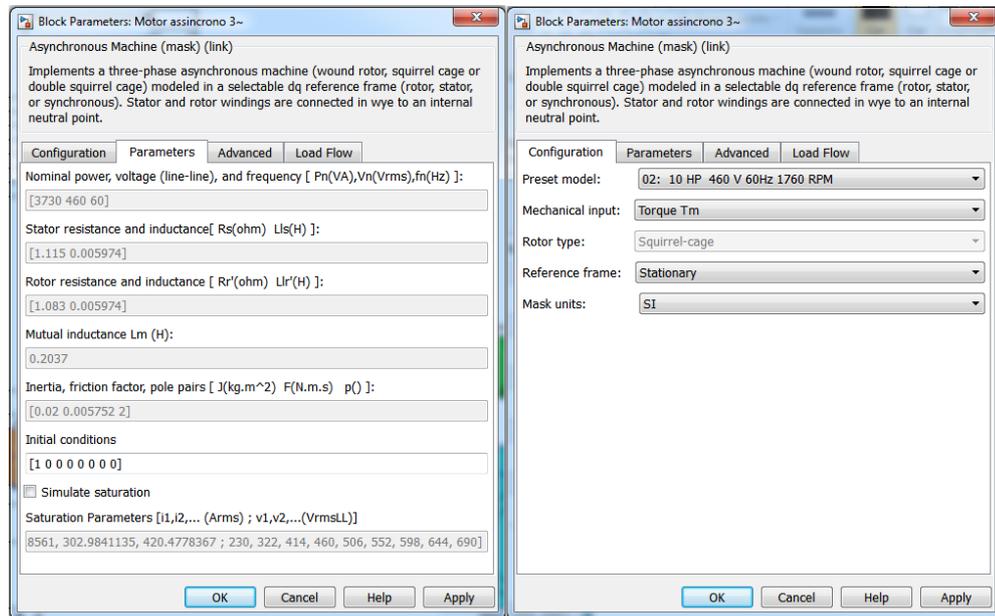
- O comando das chaves de acionamento, que são valores do tipo booleano indicando o acionamento ou não dos IGBTs. Estes comandos são roteados através de labels de forma a deixar o diagrama mais fácil de ser lido.

#### 2.2.1.2 As chaves de acionamento

Foram utilizados blocos prontos do Matlab representando IGBTs. Neste bloco também foi utilizada uma fonte de tensão ideal representando a bateria.

### 2.2.1.3 O motor trifásico

Os dados do motor escolhido estão representados na Figura 17.



**Figura 17: Dados do motor utilizado no modelo**

Fonte: Autor

Na saída deste motor temos vários parâmetros como a velocidade de rotação do mesmo e valores de tensões e correntes tanto do estator como do rotor.

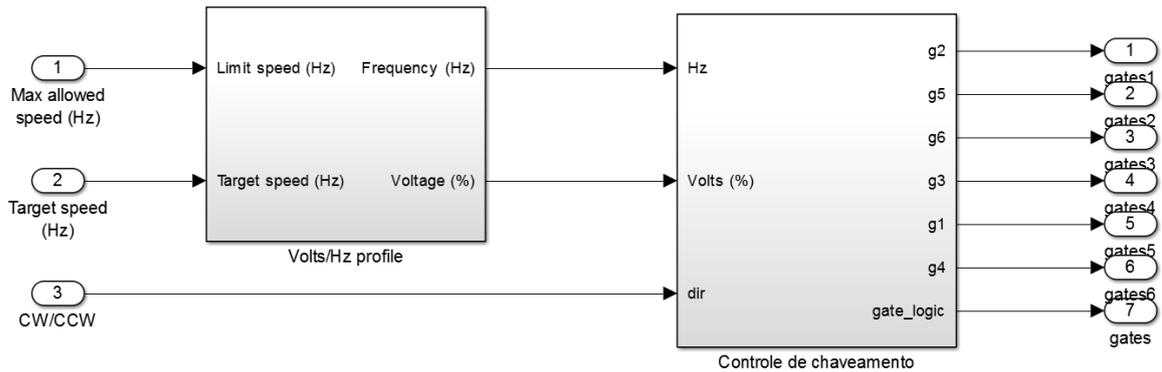
#### 2.2.1.4 A carga representada pelo compressor de A/C

O compressor de A/C apresenta um torque resistente dependente da velocidade de rotação. Para este modelo foi criada uma curva linear de variação entre 0 Nm e 60 Nm.

### 2.2.2 O controle do inversor

Foi escolhido para este trabalho utilizar a estratégia de controle escalar já que o tipo de acionamento não requer de muitos dados do motor. Algumas desvantagens deste tipo de controle não são relevantes para o tipo de aplicação pretendida, por exemplo, as boas características dinâmicas e o controle preciso com rotação próxima de zero. O sistema de ar condicionado permanece boa parte do tempo em rotações constantes requerendo alguns ajustes mas que não precisam ser instantâneos.

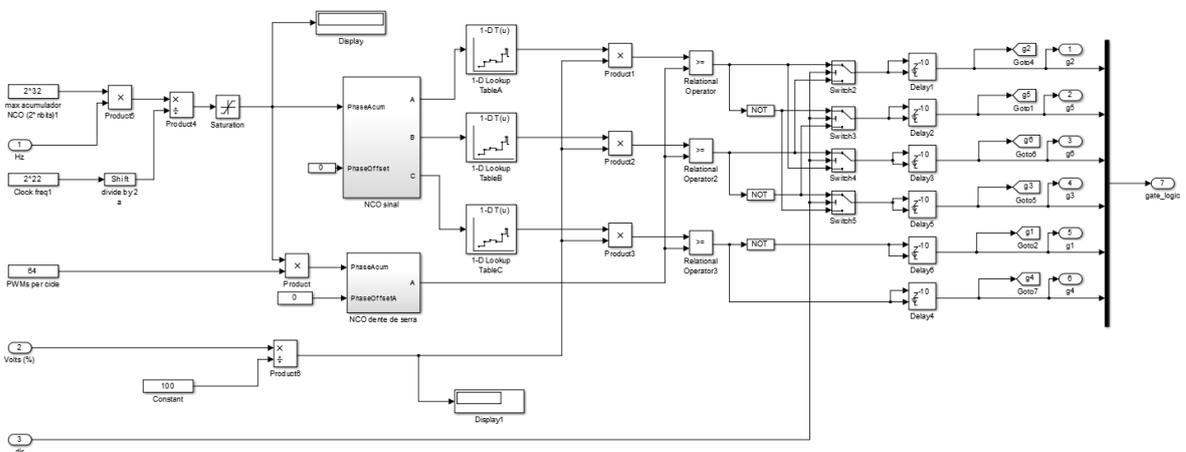
As partes deste sistema (Figura 18) são o controle V/Hz, encarregado de manter o fluxo magnético máximo ao variar as condições de funcionamento, e o controle do chaveamento.



**Figura 18: Partes do controle do inversor**  
**Fonte: O autor**

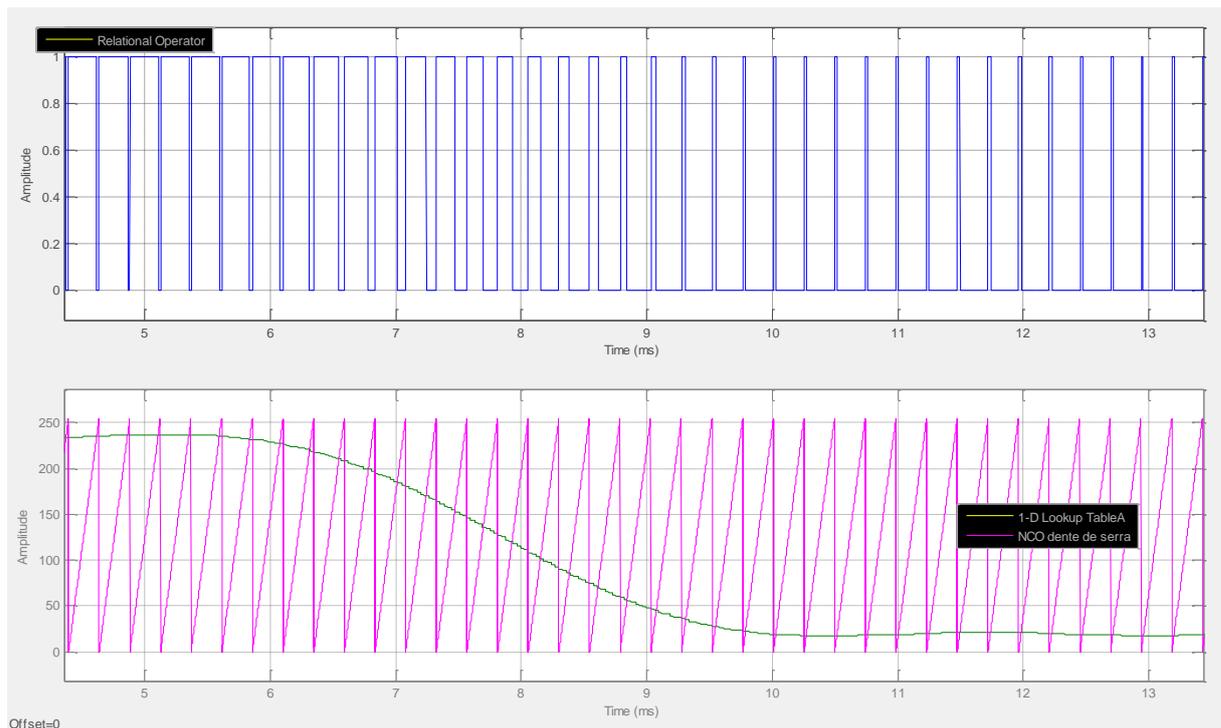
O controle V/Hz implementa uma curva de ajuste da tensão conforme a frequência implementando limites superiores e inferiores para ambos. Foram adotados como limite inferior da frequência o valor de 5 Hz e o superior de 400 Hz. A saída deste módulo é a própria frequência de entrada limitada nestes valores e também o valor da tensão a ser aplicada, em percentual, dependente da frequência solicitada.

O controle de chaveamento do inversor é o responsável por acionar os IGBTs na sequência e velocidade correta, para este inversor escolhimos o acionamento por meio de uma onda senoidal somada à 3ª harmônica de forma a maximizar o aproveitamento da tensão do barramento disponível quando comparado com uma onda senoidal pura. Ele é composto de várias partes como visto na Figura 19, veremos estas a seguir.



**Figura 19: Controle de chaveamento**  
**Fonte: O autor**

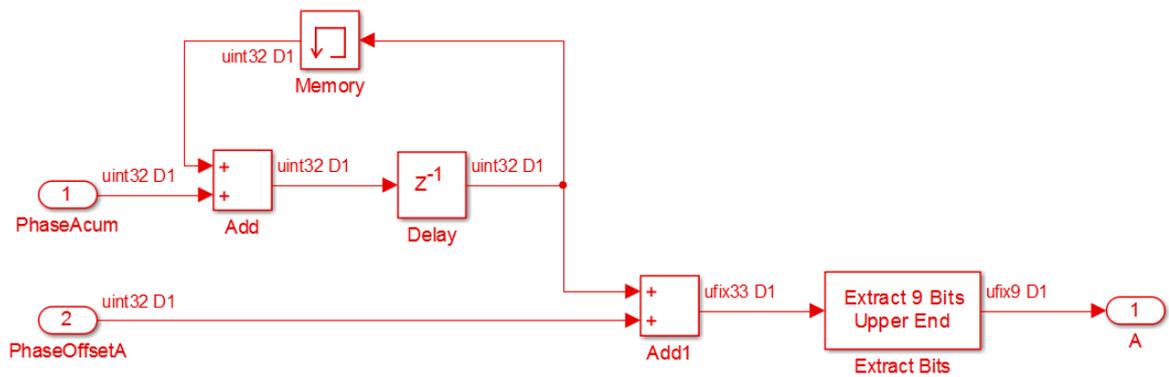
O objetivo deste módulo é gerar um sinal PWM que corresponda à forma de onda desejada na frequência e amplitude comandada pela estratégia V/Hz. Para isto utilizamos um acionamento PWM gerado através da comparação da onda desejada com uma onda triangular de frequência superior, quanto maior o nível de tensão que queremos criar maior é o tempo em que o sinal PWM permanece em nível alto. Estes sinais podem ser vistos na Figura 20.



**Figura 20: Geração do sinal PWM**

**Fonte: O autor**

É necessário criar dois sinais para implementar esta técnica o sinal da onda senoidal com a 3ª harmônica e o sinal de dente de serra, para ambos foi utilizado um NCO gerando um sinal de dente de serra. Este tipo de oscilador trabalha com a técnica DDS. O diagrama do modelo implementado pode ser visto na Figura 21.



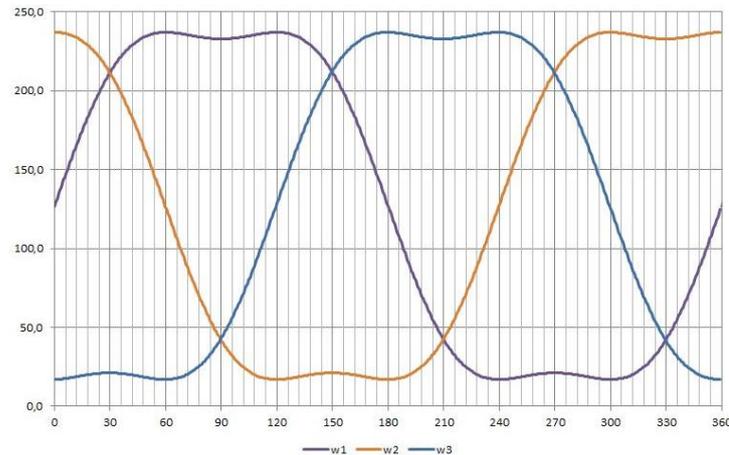
**Figura 21: O oscilador controlado numericamente**

Fonte: O autor

Esta técnica permite criar sinais com resolução de frequência bem alta e formas de onda arbitrárias quando associadas a uma tabela de valores. Para o nosso modelo utilizamos uma tabela de valores para gerar as ondas senoidais com a 3ª harmônica.

O princípio desta técnica funciona com um acumulador de fase, visto na entrada 1 da Figura 21. A cada ciclo do relógio este é somado com o valor anterior e cresce indefinidamente até atingir o valor máximo que o tipo de dado escolhido possa receber quando volta a zero e começa de novo. No modelo foram escolhidos inteiros sem sinais de 32 bits para o mesmo. A medida que o acumulador é somado a cada pulso do relógio ele recebe um offset permitindo também a mudança de fase. Deste valor são extraídos os bits mais significativos, conforme necessidade de resolução da forma de onda, e os mesmos são utilizados como índices ou valores de fase para entrar em uma tabela e extrair o valor da amplitude desejada do sinal.

As tabelas com os valores de amplitudes da onda senoidal com 3ª harmônica foram gerados com uma planilha eletrônica e transferidos aos blocos do Simulink, estes valores podem ser observados na Figura 22



**Figura 22: Sinais da onda senoidal com 3ª harmônica**  
**Fonte: O autor**

Após a geração dos três sinais PWM são gerados pela negação destes mesmos sinais os outros três que servem para acionar o interruptor inferior da meia ponte. Entretanto deve-se tomar o cuidado de evitar que ambos interruptores da meia ponte fiquem acionados ao mesmo tempo, e como os IGBTs demoram um certo tempo para cortar a circulação de corrente, um atraso deve ser implementado na ligação dos mesmos. Este atraso é realizado por meio de blocos de atraso com reset.

A última parte desta lógica é encarregada de reordenar a sequência do chaveamento para permitir que o motor gire no sentido horário ou anti-horário.

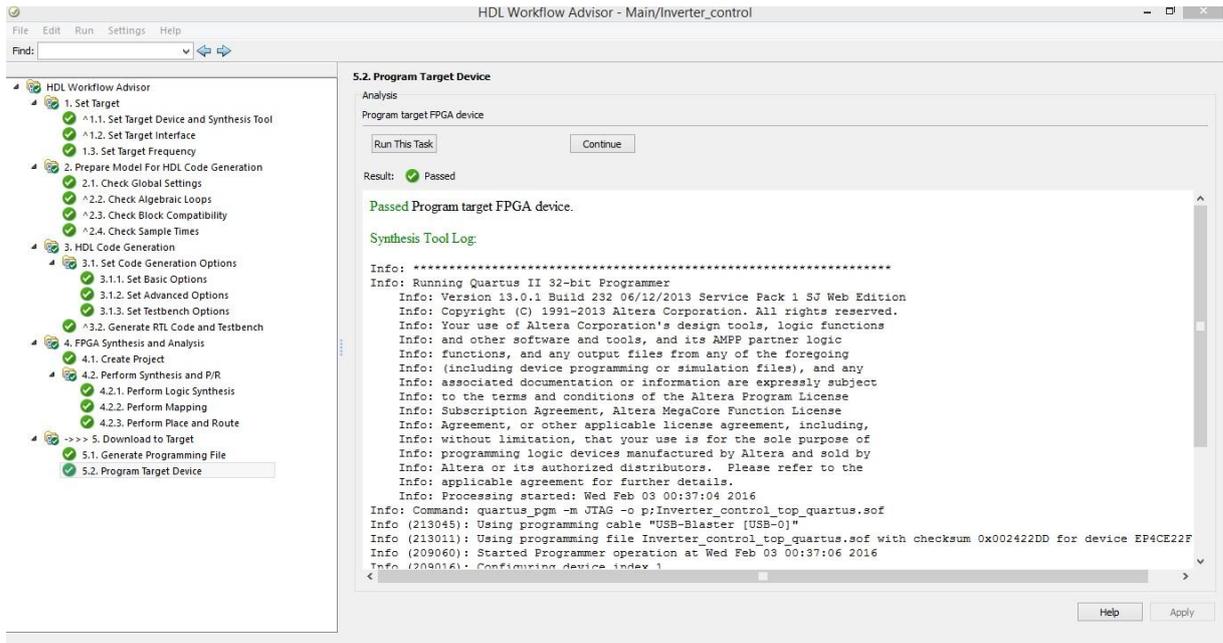
### 2.2.3 A geração do código HDL

Uma das ferramentas disponíveis no Simulink é a ferramenta HDL coder. Ela permite a geração de código HDL tanto em linguagem VHDL ou Verilog a partir do modelo.

Entretanto para o uso desta ferramenta há algumas restrições como os blocos que podem ser utilizados e mesmo dentro deste conjunto de blocos algumas restrições sobre as opções possíveis dos mesmos.

Neste trabalho visamos realizar a geração automática do código HDL e a gravação em uma placa de desenvolvimento Altera DE0-Nano.

O trabalho consiste em lançar a ferramenta e seguir passo a passo até a gravação no FPGA do nosso modelo (Figura 23).



**Figura 23: Finalização da geração do código e gravação do FPGA**  
**Fonte: O autor**

A especificação da interface com o mundo externo é realizada em uma das etapas, nesta, previamente a ter configurado a o modelo de FPGA e as ferramentas do fabricante para a síntese do código são especificadas a correspondência das entradas e saídas do modelo com a da placa. Esta tela pode ser vista na Figura 24.

**1.2. Set Target Interface**

Analysis (^Triggers Update Diagram)

Set target interface for HDL code generation

Input Parameters

Target platform interface table

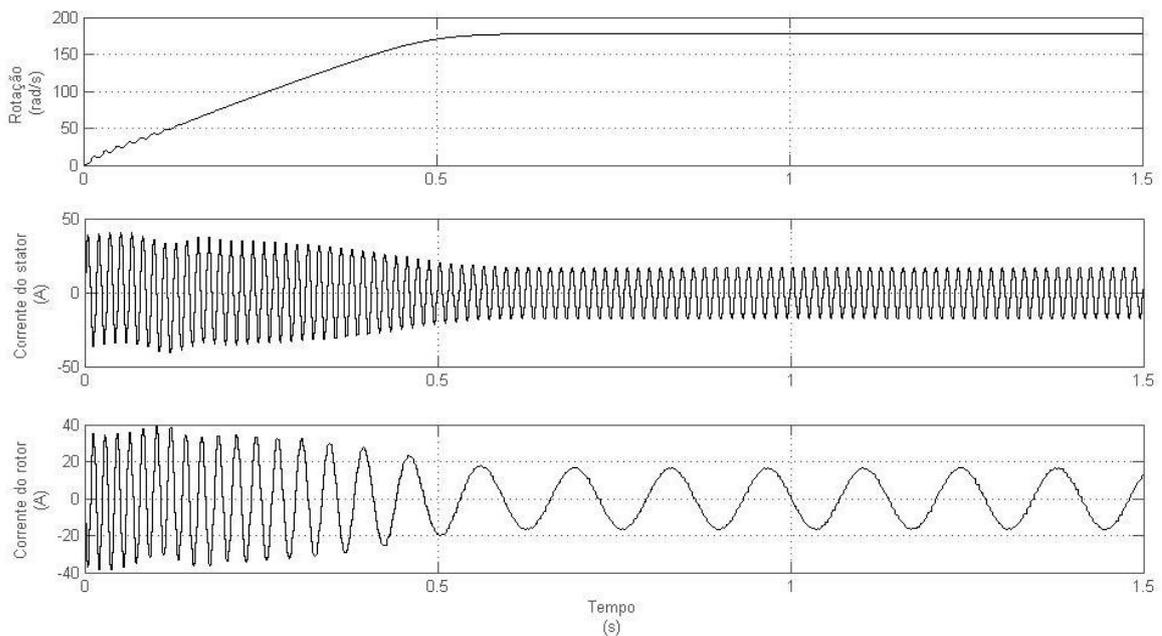
| Port Name                          | Port Type | Data Type   | Target Platform Interfaces             | Bit Range / Address / FPGA Pin |
|------------------------------------|-----------|-------------|--|--------------------------------|
| FreqIn (=Freq//16)<br>DIP switches | Inport    | ufix4       | JP2IN_NIBBLE (JP2-GPIO1 1,3,5,7) [0:3] | [0:3]                          |
| KEY0                               | Inport    | boolean     | KEY0 (General purpose I/O pins)        | [0]                            |
| Gates1                             | Output    | boolean     | Specify FPGA Pin {'LSB',..., 'MSB'}    | {'D3'}                         |
| Gates2                             | Output    | boolean     | Specify FPGA Pin {'LSB',..., 'MSB'}    | {'A3'}                         |
| Gates3                             | Output    | boolean     | Specify FPGA Pin {'LSB',..., 'MSB'}    | {'B5'}                         |
| Gates4                             | Output    | boolean     | Specify FPGA Pin {'LSB',..., 'MSB'}    | {'D5'}                         |
| Gates5                             | Output    | boolean     | No Interface Specified                 |                                |
| Gates6                             | Output    | boolean     | No Interface Specified                 |                                |
| Out1                               | Output    | uint8       | No Interface Specified                 |                                |
| Out2                               | Output    | ufix4       | No Interface Specified                 |                                |
| Gates                              | Output    | boolean (6) | No Interface Specified                 |                                |

**Figura 24: Declaração das entradas e saídas no FPGA**  
**Fonte: O autor**

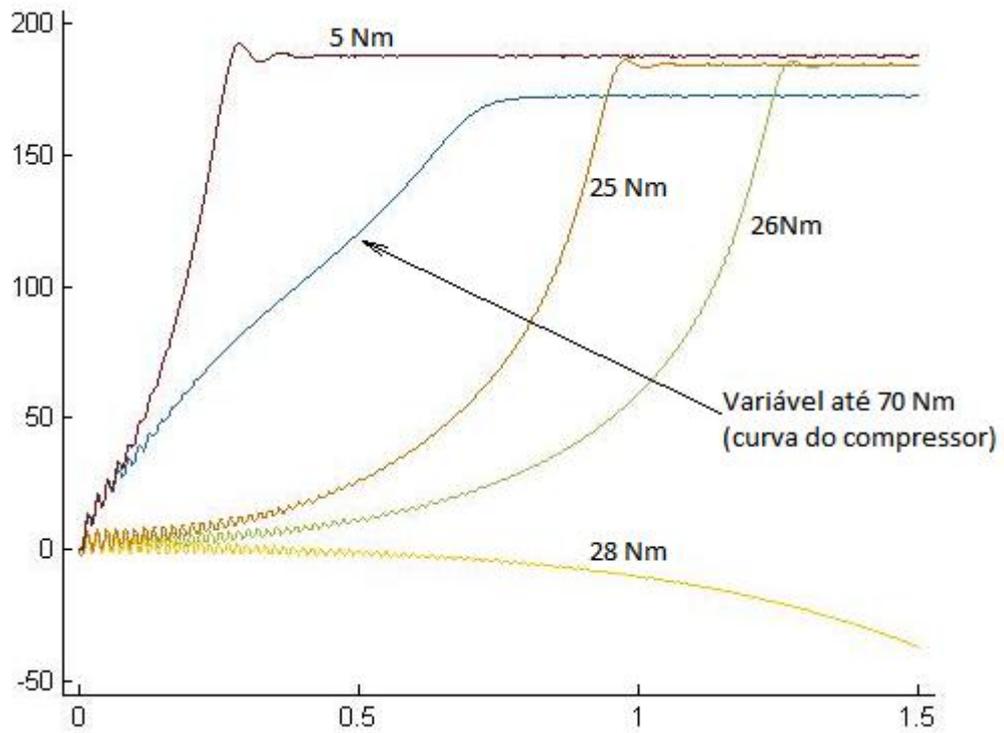
Outra restrição é que todos os valores de ponto flutuante devem ser convertidos em valores de ponto fixo ou inteiros, pois o FPGA utilizado não possui nativamente a possibilidade de trabalhar com números de ponto flutuante. Uma ferramenta que auxilia nesta transição é a Fixed Point Advisor, que revisa o modelo pelos tipos de dados a converter e sugere representações adequadas conforme valores máximos e mínimos informados pelo usuário e resultados de simulações realizadas. Esta ferramenta foi utilizada para converter parte dos modelos para números inteiros.

### 3 ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

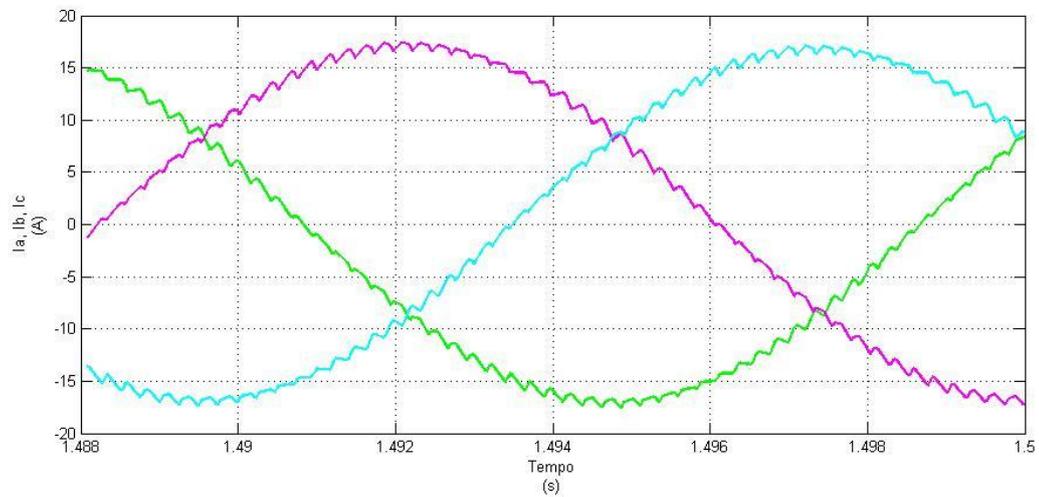
#### 3.1 ANALISE DOS RESULTADOS



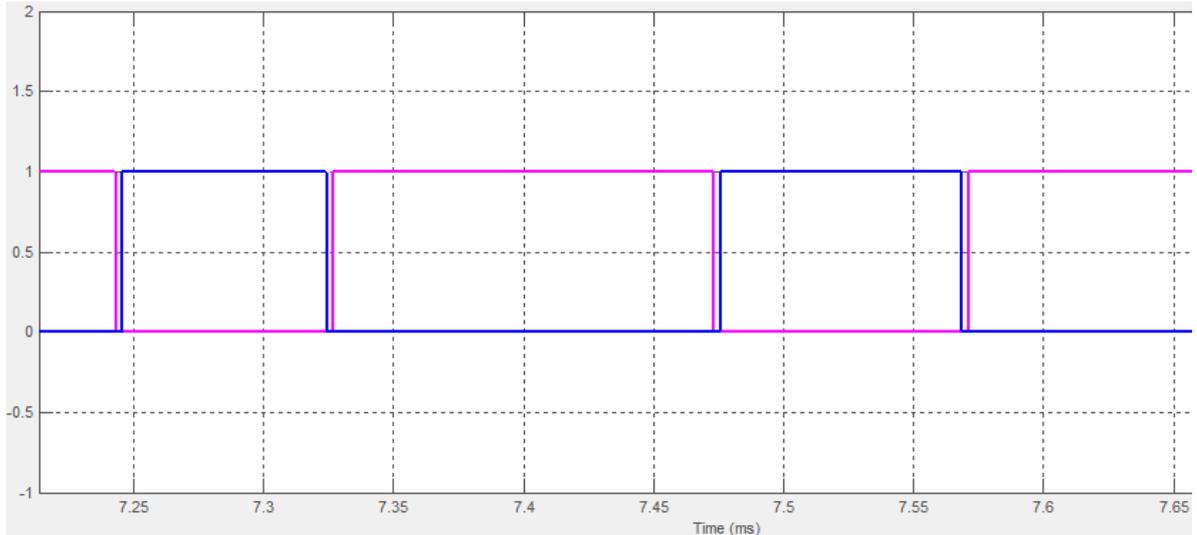
**Figura 25: Ligação do motor com compressor acoplado**  
**Fonte: O autor**



**Figura 26: Ligação do motor com várias cargas**  
**Fonte: O autor**

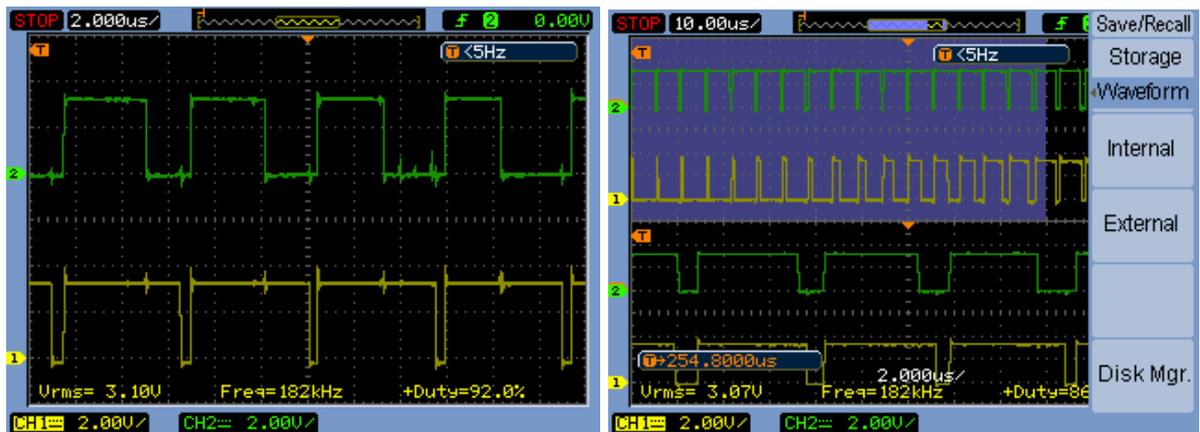


**Figura 27: Correntes no estator em regime permanente**  
**Fonte: O autor**



**Figura 28: Atraso no chaveamento dos IGBTs**

Fonte: O autor



**Figura 29: Exemplos de sinal gerado pelo FPGA**

Fonte: O autor

## 3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de FPGAs traz flexibilidade para implementar quaisquer tipos de circuitos digitais e modifica-los posteriormente. Entretanto, utiliza-los em conjunto com o Matlab/Simulink e o HDL coder como única ferramenta de geração de código faz que haja maior dificuldade na modelagem devido à restrição dos blocos de funções que podem ser utilizados. Esta limitação é maior que a existente na ferramenta Embedded Coder que gera código para microprocessadores. Para contornar esta dificuldade é necessário o uso de ferramentas conjuntas ou

adicionais como as fornecidas pelos fabricantes de FPGAs ou de outros geradores e simuladores de código HDL.

A depuração da implementação física realizada no FPGA é dificultada quando não existem módulos HIL que permitem que o FPGA interaja diretamente no modelo do Matlab Simulink.

Há uma grande vantagem em se utilizar a geração de código automática a partir do modelo, o tempo total de desenvolvimento é reduzido e a segurança de implementar aquilo que foi modelado é maior.

A implementação de um inversor para a aplicação pretendida mostrou-se possível de ser realizada de forma eficiente com as ferramentas utilizadas.

## 4 REFERÊNCIAS

(MMA), M. DO M. A. **INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR VEÍCULOS AUTOMOTORES RODOVIÁRIOS**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?dw=71043>>.

AFFONSO, A. A. Estudo, Modelagem E Simulação De Um Inversor De Comutação Suave Para Aplicação Em Filtros Ativos De Potência Monofásicos. p. 1–240, 2007.

AKIN, B.; GARG, N. **Scalar ( V / f ) Control of 3-Phase Induction Motors**. [s.l: s.n.].

DIXIT, S.; TRIPATHI, A.; CHOLA, V. 800VA Pure Sine Wave Inverter ' s Reference Design. n. June, p. 1–33, 2013.

GUCHEN. **Bus air-conditioning working principle**. Disponível em: <<http://www.guchen.com/industry-news/how-does-bus-ariconditioning-work.html>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

HENRIQUE, H. **Máquinas e Automação Elétrica** Mossoró Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - Rio Grande do Norte, campus Mossoró, , [s.d.]. Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-e-acionamentos-eletricos/aula-de-motores-trifasicos-de-ca>>

KOSTAL INDUSTRIE ELEKTRIK GMBH. **INVEOR Data Sheet**, 2007.

KOSTAL INDUSTRIE ELEKTRIK GMBH. **INVEOR Drive Controller Operating manual**, 2015.

MICHAEL, P.; KUMAR, K.; REDDY, K. Implementation of SVPWM in FPGA through MATLAB/SIMULNK environment. **International Journal of Engineering Science and Technology**, v. 2, n. 9, p. 4585–4594, 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME); EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional**. [s.l: s.n.].

PORTAL ELETRICISTA. **ESTUDANDO O FUNCIONAMENTO DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**. Disponível em: <<http://www.portaleletricista.com.br/motores-de-inducao/>>.

PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. **Rio de Janeiro/RJ - DECRETO Nº 38.328 DE 21 DE FEVEREIRO DE 2014**D.O.M/RJ - 24/02/2014 - Página 3, , 2014.

SARAVANAN, M.; NANDAKUMAR, R.; VEERABALAJI, G. Effectual SVPWM

Techniques and Implementation of FPGA Based Induction Motor Drive. **International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems (IJRES)**, v. 1, n. 1, p. 11–18, 2012.

SPHEROS GMBH. **REVO-E folder**, [s.d.].

SPHEROS GMBH. **REVO®-E**. Disponível em:  
<<http://www.spheros.com.br/Produtos/Ar-Condicionado/Onibus/REVO-E.html>>.  
Acesso em: 20 jan. 2016.

TEXAS INSTRUMENTS. **Field Orientated Control of 3-PhaseControl**, 1998.

TRAN, P. H. Matlab / Simulink Implementation and Analysis of Three Pulse-Width-Modulation ( Pwm ). n. May, 2012.

UNIVERSIT, T.; KENNEL, R. Power Electronics Exercise : 07 - Pulse Width Modulation Methods. v. 49, n. 0, 2013a.

UNIVERSIT, T.; KENNEL, R. Power Electronics Exercise : 08 - Space Vector Modulation. v. 49, n. 0, p. 1–10, 2013b.

VOLVO DO BRASIL. **Ônibus HÍBRIDO**, 2014. Disponível em:  
<<http://www.volvobuses.com/bus/brazil/pt-br/linha-produtos/urbanos/volvo-hibrido/Documents/folheto-onibus-hibrido-2014.pdf>>

VOLVO DO BRASIL. **Volvo híbrido**. Disponível em:  
<<http://www.volvobuses.com/bus/brazil/pt-br/linha-produtos/urbanos/volvo-hibrido/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 20 jan. 2016.