

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

MAYRON VINICIUS LOPES DE CAMARGO

SISTEMA DE CONTROLE PARA MOTORES ELÉTRICOS

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2021

MAYRON VINICIUS LOPES DE CAMARGO

SISTEMA DE CONTROLE PARA MOTORES ELÉTRICOS

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

Orientador: Prof. Dr. Elder Oroski

CURITIBA
2021



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Curitiba

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria
Automotiva



TERMO DE APROVAÇÃO

SISTEMA DE CONTROLE PARA MOTORES ELÉTRICOS

por

MAYRON VINICIUS LOPES DE CAMARGO

Esta monografia foi apresentada em 30 de Novembro de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Elder Oroski
Orientador

Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas
Membro titular

Prof. M. Sc. Omero Francisco Bertol
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho à minha família,
pelos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Elder Oroski, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

CAMARGO, Mayron Vinicius Lopes de. **Sistema de Controle para Motores Elétricos**. 2021. 28 p. Monografia de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Como a utilização de motores elétricos em aplicações automotivas com alimentação em corrente contínua vem crescendo, o estudo deste tipo de aplicação se torna relevante. O objetivo deste trabalho é fazer a implementação de uma estratégia completa de controle e validar seus resultados. O trabalho foi implementado em Simulink e aplicou as técnicas de enfraquecimento de campo e controle de corrente para o controle do motor. Ao final do estudo, foi possível validar a implementação completa do controle de torque e rotação do mesmo.

Palavras-chave: Motores Elétricos. Flux Weakening Control. Space Vector. Modulation. SVPWM.

ABSTRACT

CAMARGO, Mayron Vinicius Lopes de. **Control System for Electrical Machines**. 2021. 28 p. Monografia de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Since the use of electrical motors powered with continues voltage sources has been growing in the automotive industry, the study of this kind of application has become relevant. The objective of this work is to implement the complete control strategy and validate its results. The work was implemented by using Simulink to apply flux weakening control and current control techniques. At the end of this work, it was possible to validate the whole system implementation for torque and speed control.

Keywords: Electrical Machines. Flux Weakening Control. Space Vector. Modulation. SVPWM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista esquemática de um gerador síncrono monofásico com um único enrolamento e dois polo	12
Figura 2 - Conversão de tensões trifásicas utilizando a transformada de Clarke.....	14
Figura 3 - Conversão de tensões trifásicas utilizando a transformada de Parke.....	14
Figura 4 - Vistas esquemáticas de geradores trifásicos, são elas: (a) dois polos; (b) quatro polos; e, (c) ligação em Y dos enrolamentos	15
Figura 5 - Vetores bases no chaveamento dos polos de uma máquina elétrica trifásica.....	16
Figura 6 - Modelo de motor de imã permanente utilizado no Simulink.....	20
Figura 7 - Lógica para a determinação dos setores baseado no ângulo medido do rotor.....	21
Figura 8 - Implementação do SVPWM utilizando MOSFETs e componentes de tensão em alfa e beta	22
Figura 9 - Modelo do controlador por enfraquecimento de campo	23
Figura 10 - Modelo do controlador de corrente em coordenadas d e q.....	23
Figura 11 - Resposta do controle por enfraquecimento de campo aos comandos de rotação e torque definidos	24
Figura 12 - Resposta final de velocidade e torque da máquina elétrica controlada utilizando fontes de tensão ideais	25
Figura 13 - Resposta final de velocidade e torque da máquina elétrica controlada utilizando fontes de tensão ideais.	25
Figura 14 - Resposta final de velocidade e torque da máquina elétrica controlada utilizando um inversor bidirecional com MOSFETs	26

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	10
1.2 PROBLEMA	10
1.3 OBJETIVOS	11
1.3.1 Objetivo Geral	11
1.3.2 Objetivos Específicos	11
1.4 JUSTIFICATIVA	11
2 MOTOR ELÉTRICO DE IMÃ PERMANENTE	12
2.1 TRANSFORMADA DE CLARKE E PARKE	13
3 INVERSOR	15
3.1 MODULAÇÃO POR ESPAÇO VETORIAL	16
4 SISTEMA DE CONTROLE	17
4.1 TIPOS DE CONTROLADORES	17
4.1.1 Controlador de Corrente	17
4.1.2 Controlador de Velocidade	18
4.1.3 Controlador por Enfraquecimento de Fluxo	18
5 METODOLOGIA CIENTÍFICA	19
5.1 MOTOR ELÉTRICO DE IMÃ PERMANENTE	19
5.2 INVERSOR.....	20
5.3 CONTROLADOR	22
6 RESULTADOS	24
7 CONCLUSÃO	27
REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a utilização de motores elétricos vem se tornando cada vez mais comum em aplicações automotivas. Como o sistema automotivo é um sistema crítico, diversas aplicações para melhorar o rendimento e aproveitamento do sistema são realizadas.

Segundo Matulka (2014), não é de hoje que os veículos elétricos são explorados na área da engenharia, pois o primeiro veículo elétrico encontrado na história foi no século XIX, começando seus estudos no início do século na Hungria, Estados Unidos e Holanda. Porém, apenas no final do mesmo século que surgiram os primeiros veículos elétricos, por volta de 1890, com a invenção de William Morrison com seu veículo de seis passageiros que chegava em uma velocidade de 14 milhas por hora.

Depois da invenção dos veículos elétricos, muitas reviravoltas se deram, sendo crescentes e decrescentes os investimentos e as perspectivas sobre sua aplicação. Por volta do século XIX, muitos pesquisadores relevantes da época acreditavam que o veículo elétrico seria a invenção do futuro com sua utilização em massa. Porém, segundo Matulka (2014), em 1908 com a produção do Model T de Henry Ford, produzido em massa, fez com que os veículos elétricos comesçassem a entrar no esquecimento. Por volta de 1912, o veículo a combustão se tornou tão barato para o consumidor, e com os valores de combustíveis baixos na época, fez com que as pesquisas e investimentos em veículos elétricos fossem esquecidas.

Com o passar das décadas e os estudos realizados, começou-se a preocupação com o meio ambiente junto com os preços de combustível cada vez mais altos. Este fenômeno fez com que o interesse por veículos livres de combustíveis fosseis se tornasse novamente um assunto de interesse. Foi então que recentemente no final do século XX, os veículos elétricos iniciaram sua nova era. A primeira ascensão se deu com o lançamento do Toyota Prius no Japão em 1997 e finalmente em 2000 para o restante do mundo (MATULKA, 2014).

Matulka (2014) relata que os recursos investidos pela Toyota para o desenvolvimento de uma fonte de energia para os veículos elétricos e com o interesse de uma nova Start-up do Vale do Silício na Califórnia nos Estados Unidos, chamada Tesla, com a promessa de entregar veículos mais luxuosos, confortáveis e com longa bateria fez com que a empresa recebesse cerca de U\$ 465 milhões de

empréstimo do Departamento de Energia Americano. Este que foi pago integralmente com nove anos de antecedência pela empresa.

Após a ascensão da empresa, muitas concorrentes já consolidadas no mercado com seus motores a combustão iniciaram seus investimentos em veículos elétricos. E hoje, pode-se contar com uma variedade imensa de modelos e tipos de veículos elétricos e cada vez mais o assunto se torna relevante na indústria automotiva.

Historicamente o uso de veículos elétricos vem crescendo, vários tipos de motores e sistemas de controle foram explorados. Neste trabalho, iremos focar em veículos alimentados por baterias e com motores elétricos de ímã permanente, visto que hoje são os mais utilizados na indústria.

De forma geral, a utilização do termo motor elétrico para a denominação é de certa forma incorreta, pois na indústria o motor também é utilizado como um gerador. Logo, a correta denominação dessa aplicação é máquina elétrico, pois transforma energia em trabalho e trabalho em energia. Porém, neste trabalho iremos explorar só os aspectos de transformar energia elétrica em trabalho, por isso a denominação de motor elétrico para o trabalho. Um motor elétrico com ímã permanente é uma máquina elétrica que trabalha em corrente alternada, que possui um ímã permanente fixada a seu rotor. Ao longo do trabalho, os diferentes aspectos relevantes deste tipo de máquina serão descritos com mais detalhes.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O caso de estudo será realizado sobre um sistema de controle de um motor elétrico de ímã permanente trifásico, sendo ele alimentado por uma fonte em corrente contínua. Esse trabalho visa explorar os aspectos de controle envolvidos na aplicação de motores elétricos em sistemas automotivos e a caracterização dos sistemas envolvidos para a conversão de corrente contínua em torque no motor.

1.2 PROBLEMA

Para a utilização de uma alimentação em corrente contínua para se controlar um motor trifásico com seu torque e rotação desejado são necessárias a aplicação de algumas técnicas. Ao se concatenar estas técnicas, produzimos um sistema

completo do motor. Como o modelamento e calibração das mesmas envolvem algumas técnicas complexas, o trabalho visa explorar alguns aspectos do mesmo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Aplicar o controle por enfraquecimento de campo em cascata com o controle de corrente em motores elétricos para aplicações automotivas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Explorar as lógicas de chaveamento dos dispositivos eletrônicos que comandam o motor;
- Explorar a técnica de controle por rotação e torque utilizando o controle por enfraquecimento de campo;
- Implementar um controlador proporcional integral para o controle de corrente do motor;
- Simular o comportamento do inversor para o controle de corrente;
- Explorar o funcionamento completo do sistema de controle;
- Validar os resultados do controle aplicado ao sistema.

1.4 JUSTIFICATIVA

Com o passar dos anos, a utilização de motores elétricos vem crescendo na indústria automotiva, sendo eles aplicados em veículos de passeio, médio e alto porte, faz com que o estudo desta área se torne necessário para a indústria.

Como o sistema automotivo comumente utiliza motores que são alimentados em corrente alternada, se faz necessário o estudo de como controlar seu torque e corrente, pois sua alimentação será primariamente vinda de corrente contínua. Desta forma, o sistema apresentara os conceitos de como controlar esse sistema em corrente continua ganham relevância.

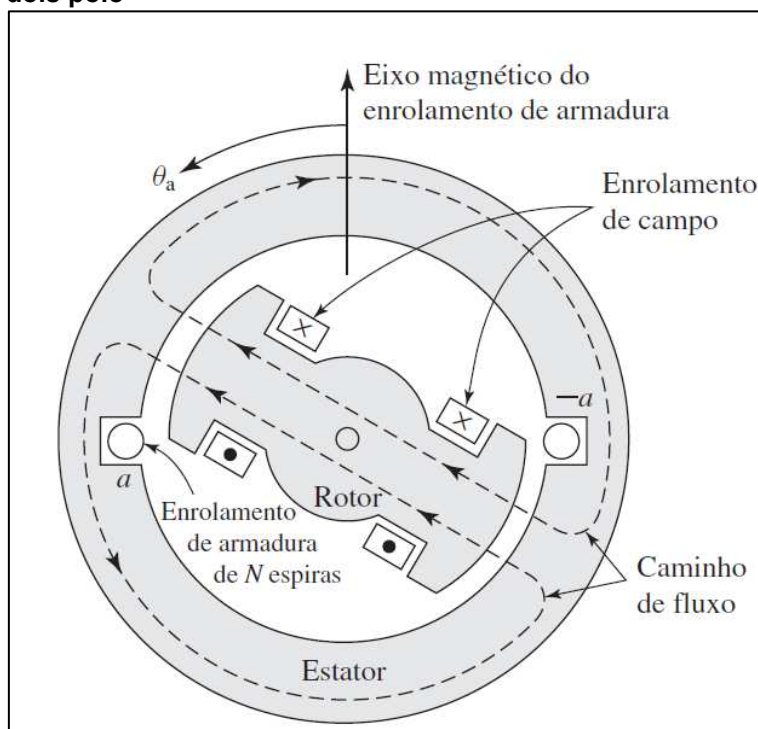
2 MOTOR ELÉTRICO DE IMÃ PERMANENTE

O motor elétrico de ímã permanente pode ser classificado como uma máquina elétrica síncrona polifásica onde seu rotor é constituído de um núcleo com um ímã permanente com saliências e seu estator é constituído pelo enrolamento, onde o objetivo é o alinhamento das linhas de campo magnético entre o rotor e estator. Variando estas linhas pode-se variar a posição angular do rotor e fazer com que o motor rotacione.

Apesar deste tipo de máquina ser conhecido a muito tempo e ser muito vantajosa do ponto de aproveitamento de energia, somente recentemente seu uso cresceu na engenharia automotiva devido sua complexidade de controle e outras questões de custo econômico. Com os avanços nas técnicas de modelamento e controle, sua aplicabilidade vem crescendo dia após dia.

Para se entender melhor sobre um motor síncrono de ímã permanente é mais simples se basear primeiramente em uma máquina síncrona CA. A Figura 1, mostra a construção básica de um gerador síncrono monofásico com um único enrolamento. Nesta máquina pode-se identificar os componentes da máquina e seus fluxos de campo magnético.

Figura 1 - Vista esquemática de um gerador síncrono monofásico com um único enrolamento e dois polo



Fonte: Umans (2014).

Usualmente, o enrolamento de campo se encontra no rotor e o enrolamento de armadura no estator. No caso de um motor de imã permanente o enrolamento do rotor que tem como função a geração de campo magnético na parte girante é substituído por um imã permanente. O enrolamento da armadura, neste exemplo, localizada no estator é representado por um único enrolamento denotado como a e $-a$ representando o sentido do enrolamento e da corrente que flui por ele.

Para geração de movimento, o objetivo é que se produza um campo girante no estator que fará com que o rotor rotacione. O posicionamento para a geração mais eficiente de campo magnético é a 90° do campo do imã permanente, desta forma teremos o maior aproveitamento de torque. O tipo mais comum desta máquina aplicado atualmente é o motor com três fases defasadas 120° uma da outra.

2.1 TRANSFORMADA DE CLARKE E PARKE

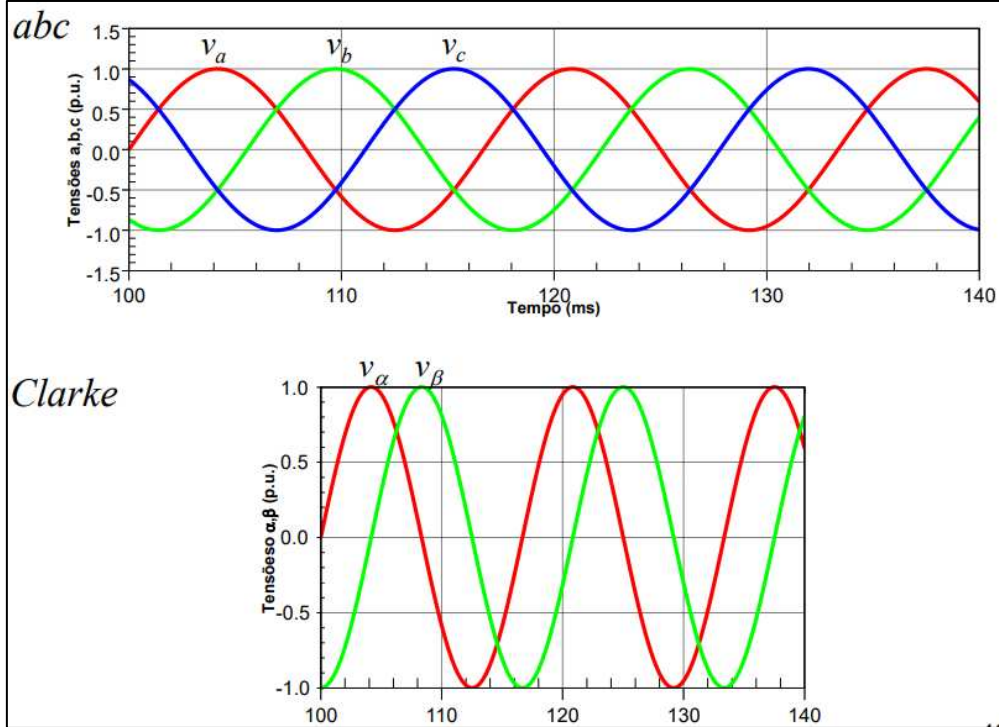
É muito comum em sistemas de potência utilizarmos transformadas para simplificar os cálculos e as análises dos sistemas. Para o caso de sistemas trifásico as transformadas mais comuns utilizadas são as transformadas de Clarke e Parke, onde o objetivo é fazer com que um sistema trifásico seja representado por um sistema com apenas duas componentes ao invés de três. Como para cada fase temos 120° de defasagem, a ideia é ter apenas duas componentes resultantes defasadas 90° uma da outra.

Para começar com a transformadas, precisamos primeiro entender a transformada de Clarke. Basicamente, é uma combinação onde o resultado desejado é a decomposição dos fatores de tensão trifásicos em três dimensões, chamadas α , β e γ , onde $\{\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{R}\}$. Onde, o nosso interesse é apenas em α e β defasadas 90° uma da outra. Logo, ao final ao invés de termos o sistema a, b, c convencional, teremos um sistema em α e β . A Figura 2, mostra o resultado da transformação.

Agora utilizando como base as tensões em α e β , a transformada de Parke faz a inserção de uma componente variante no tempo, que possui velocidade angular igual à frequência do sistema. Basicamente, a suposição é que agora estes fatores, após serem transformados utilizando a transformada de Clarke, rotacionem em velocidade angular ω . Ao final tem-se duas componentes de tensão em

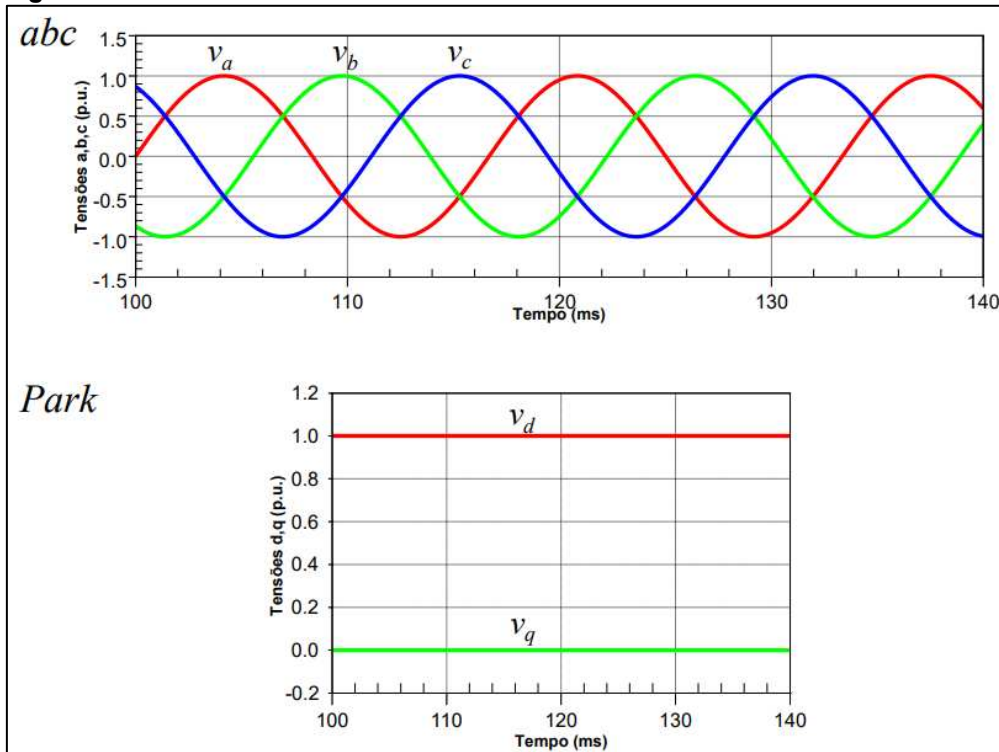
coordenadas d e q , onde $\{d, q \in \mathbb{R}\}$. Para um sistema de frequência constante, esses componentes serão também constantes, como apresentado na Figura 3.

Figura 2 - Conversão de tensões trifásicas utilizando a transformada de Clarke



Fonte: Lima (2016, slide 10).

Figura 3 - Conversão de tensões trifásicas utilizando a transformada de Parke



Fonte: Lima (2016, slide 21).

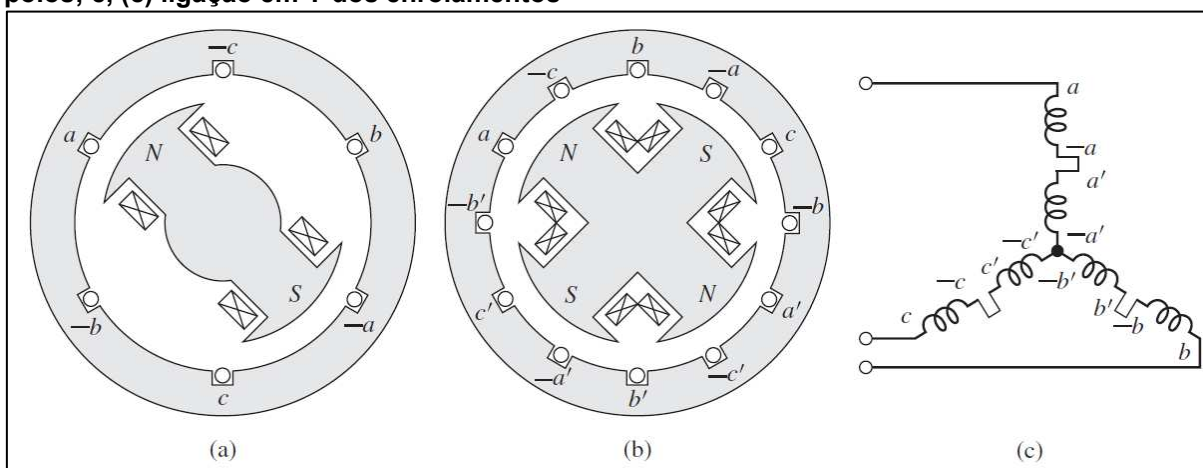
3 INVERSOR

Como apresentado anteriormente, a máquina quando operando como motor, necessita de uma corrente variante no tempo em cada um de seus enrolamentos do estator para produzir um campo girante fazendo com que o rotor o acompanhe. Desta forma, sabendo que as aplicações de veículos elétricos possuem tensões contínuas, devemos entender como fazer o chaveamento e controle desta tensão para obter o campo desejado e fazer com que o rotor se movimente da forma adequada. Para fazer tal controle, usualmente são utilizados MOSFETs ou IGBTs para o chaveamento e definição de corrente em cada um dos enrolamentos, fazendo com que estes componentes operem como chaves.

Partindo do pressuposto que a posição do rotor é conhecida, deve-se então rotacionar o campo gerado no estator para obtermos o mesmo comportamento no rotor. Para este feito, várias técnicas são utilizadas atualmente, porém a mais comum é a de modulação em espaço vetorial, que será explorada posteriormente.

Primeiramente, para se entender a técnica é necessário entender o circuito equivalente de uma máquina trifásica (Figura 4), que neste caso será representada como uma ligação em Y onde cada um de seus enrolamentos é representado como um indutor.

Figura 4 - Vistas esquemáticas de geradores trifásicos, são elas: (a) dois polos; (b) quatro polos; e, (c) ligação em Y dos enrolamentos

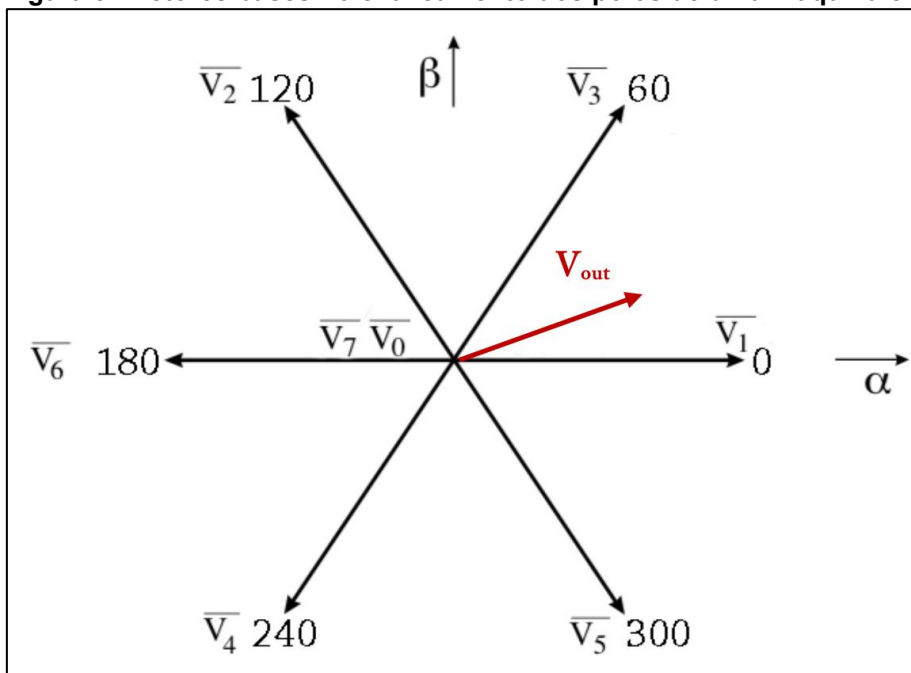


Fonte: Umans (2014).

3.1 MODULAÇÃO POR ESPAÇO VETORIAL

Para a definição de como fazer o acionamento de cada uma das fases da máquina elétrica, após todos os pontos desejados já definidos, normalmente aplicamos a técnica de *SVPWM*. O objetivo da técnica é fazer que com a correta aplicação do *PWM* em cada uma das fases resulte em uma tensão média definida para a geração das tensões desejadas. Sabendo que cada uma das posições de chave possuem tensões equivalentes definidas como na Figura 5, pode-se então chavear estas componentes para obter a tensão de saída desejada. Logo, a saída do *SVPWM* é a ordem de chaveamento e status de cada uma destas chaves para a dada entrada desejada.

Figura 5 - Vetores bases no chaveamento dos polos de uma máquina elétrica trifásica



Fonte: Collins (2019).

4 SISTEMA DE CONTROLE

A função principal do sistema de controle é fazer com que tenhamos sempre um máximo torque no rotor. Para isto devemos sempre estar observando as componentes de corrente I_d e I_q , maximizando uma e minimizando a outra. Desta forma, devemos sempre utilizar estas medidas para a tomada de decisão do controlador. Com as medições de corrente em cada uma das fases e a aplicação da transformada de Clarke e Park mudamos as coordenadas de referências das correntes. Aplicamos então o controle nesta corrente, e com suas saídas fazemos a transformada inversa para podermos ter as correntes nas diferentes fases. Estas saídas de corrente são então enviadas ao controlador de tensão que por sua vez retornará a saída de tensão para o inversor.

4.1 TIPOS DE CONTROLADORES

Nesta seção serão explorados os tipos diferentes de controle que podem ser aplicados ao sistema, visto que o conceito básico de todos eles é o mesmo, que é se determinar as correntes equivalentes em cada um dos enrolamentos, dependendo da finalidade e após isto a definição dos níveis de tensão em cada uma das fases. Para a definição destes controladores vamos partir da ideia que todas as fontes de tensão conectadas aos enrolamentos são ideais e iremos apenas definir suas amplitudes. Usualmente, os controladores aplicados neste sistema são proporcionais integrais, visto que devido ao aparecimento de harmônicas nos sinais a parte derivativa do controlador é removida, pois a mesma tente a maximizar componentes em alta frequência.

4.1.1 Controlador de Corrente

Para o controlador de corrente, normalmente se aplica um controlador proporcional integral, como dito anteriormente, onde seus parâmetros de entrada são as correntes direta e de quadratura desejadas (I_d e I_q), e a saída são as tensões direta e de quadratura (V_d e V_q). Após essa etapa, as tensões são então convertidas pelas transformadas inversas de Parke e Clarke para então se obter as tensões em cada uma das fases.

4.1.2 Controlador de Velocidade

Para o controle de velocidade, utilizamos como referência a velocidade desejada do motor em rotações por minuto e então utilizamos um controlador proporcional integral também. Neste caso, esse é um loop de controle mais lento quando comparado com o loop de corrente. A saída deste controlador será a nossa referência de corrente que então é aplicada ao controlador de corrente descrito anteriormente. Para este tipo de controle, normalmente fazemos a corrente de quadratura máxima para a velocidade e utilizou-se uma referência nula de corrente direta. Desta forma, garantiu-se sempre um vetor de 90° de campo magnético induzido, otimizando assim o torque.

4.1.3 Controlador por Enfraquecimento de Fluxo

O controle de enfraquecimento de fluxo é a técnica mais utilizada atualmente, pois ao elevarmos a rotação da máquina para valores mais elevados o acoplamento magnético começa a se tornar mais forte e algumas limitações da máquina começam a ficar mais evidentes. Tentando contornar este problema, este tipo de controle utiliza como referência tabelas do componente com os valores de corrente de quadratura e direta mais adequados para determinadas rotações e torque. Logo, este controlador substitui o controlador de velocidade e faz a utilização das referências de torque e velocidade para então estimar os valores de corrente de quadratura e direta que serão então aplicadas ao controlador de corrente. Porém, para a utilização deste controlador, precisamos ter uma boa estimativa de torque exigido pela máquina, mas este tópico não será abordado neste trabalho. Outro fator importante é que devemos ter bem definidas as curvas de corrente, torque e rotação da máquina a ser controlada.

5 METODOLOGIA CIENTÍFICA

Para o desenvolvimento deste projeto foi utilizado como base os modelos fornecidos pela *Math Works* com o funcionamento e valores de referência de um sistema de controle para motores elétricos. Junto com isso e com algumas técnicas demonstradas em vídeo, associou-se os modelos para um modelo completo de controle. O modelo final foi desenvolvido em Simulink com alguns blocos específicos das bibliotecas do *Simscape* da própria ferramenta. Estes blocos são representações de sistemas físicos e foram utilizados para se modelar as fontes de tensão utilizadas e a própria máquina elétrica.

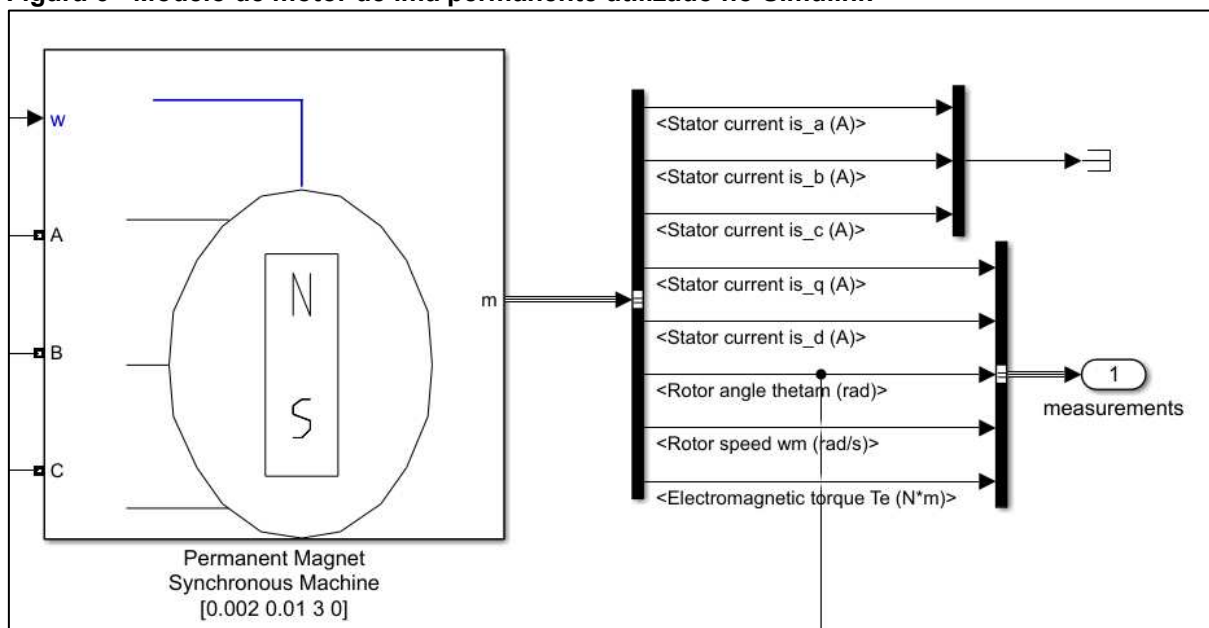
Começando pelos controles mais simples e utilizando os modelos de referência retirados da biblioteca da *MathWorks*, pode-se dividir o controle em algumas etapas sendo elas as definidas anteriormente na fundamentação teórica. Iniciando-se pela máquina elétrica, inversor e por fim os controladores.

Ao final do trabalho será desenvolvido um modelo em Simulink com as definições e métodos utilizados para o controle junto com seus resultados de simulação. O modelo será uma integração de todas as partes envolvidas no sistema, demonstrando seu funcionamento completo.

5.1 MOTOR ELÉTRICO DE IMÃ PERMANENTE

Como referência para o motor elétrico utilizou-se o modelo em Simulink da biblioteca do *Simscape* que contém o comportamento elétrico do motor nos retornando como saída alguns valores básicos utilizados posteriormente no controle. Onde, basicamente as entradas são as tensões trifásicas e as saídas as medidas de corrente, velocidade e ângulo do rotor. Se observar o modelo existe mais uma entrada denominada ω que é definida como a velocidade angular do motor, porém essa é uma variável que pode ser substituída no modelo por uma resistência mecânica no mesmo. Esta configuração é feita no próprio modelo do motor. Para as implementações do modelo foram utilizados como referência uma velocidade imposta no motor ao invés de um torque. Na Figura 6 é apresentado o modelo de motor utilizado em Simulink, junto com suas medições de saída.

Figura 6 - Modelo de motor de imã permanente utilizado no Simulink

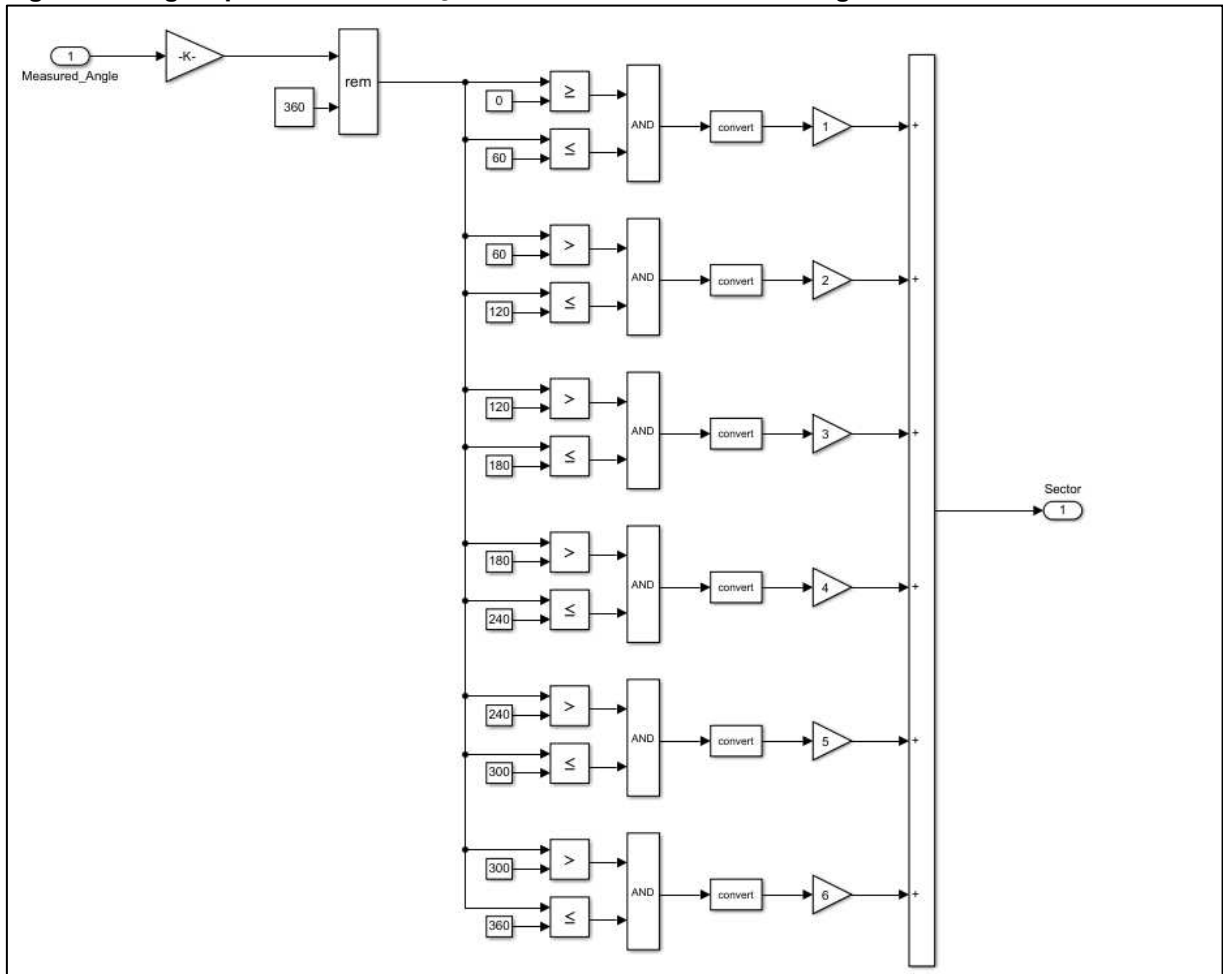


Fonte: Autoria própria.

5.2 INVERSOR

Para os inícios da modelagem foram utilizadas fontes de tensão defasadas 120° e ideais, porém na implementação final foram definidos os componentes de um inversor, onde primeiramente foi definida a lógica para se determinar o setor do rotor, simulando assim os sensores de posição e de quadrante que são inseridos fisicamente. No nosso caso, não será utilizado esse seletor pois o próprio modelo nos retorna o ângulo do rotor, porém a implementação é demonstrada aqui como exemplo. Nela, o ângulo medido do rotor, fornecido pelo modelo, é comparado com alguns valores de referência que definem os quadrantes de operação. Se a posição angular do motor, por exemplo, estiver entre 0° e 60° , isto significa que o rotor se encontra no primeiro quadrante. Na Figura 7 é demonstrada a lógica implementada para a determinação dos quadrantes do motor.

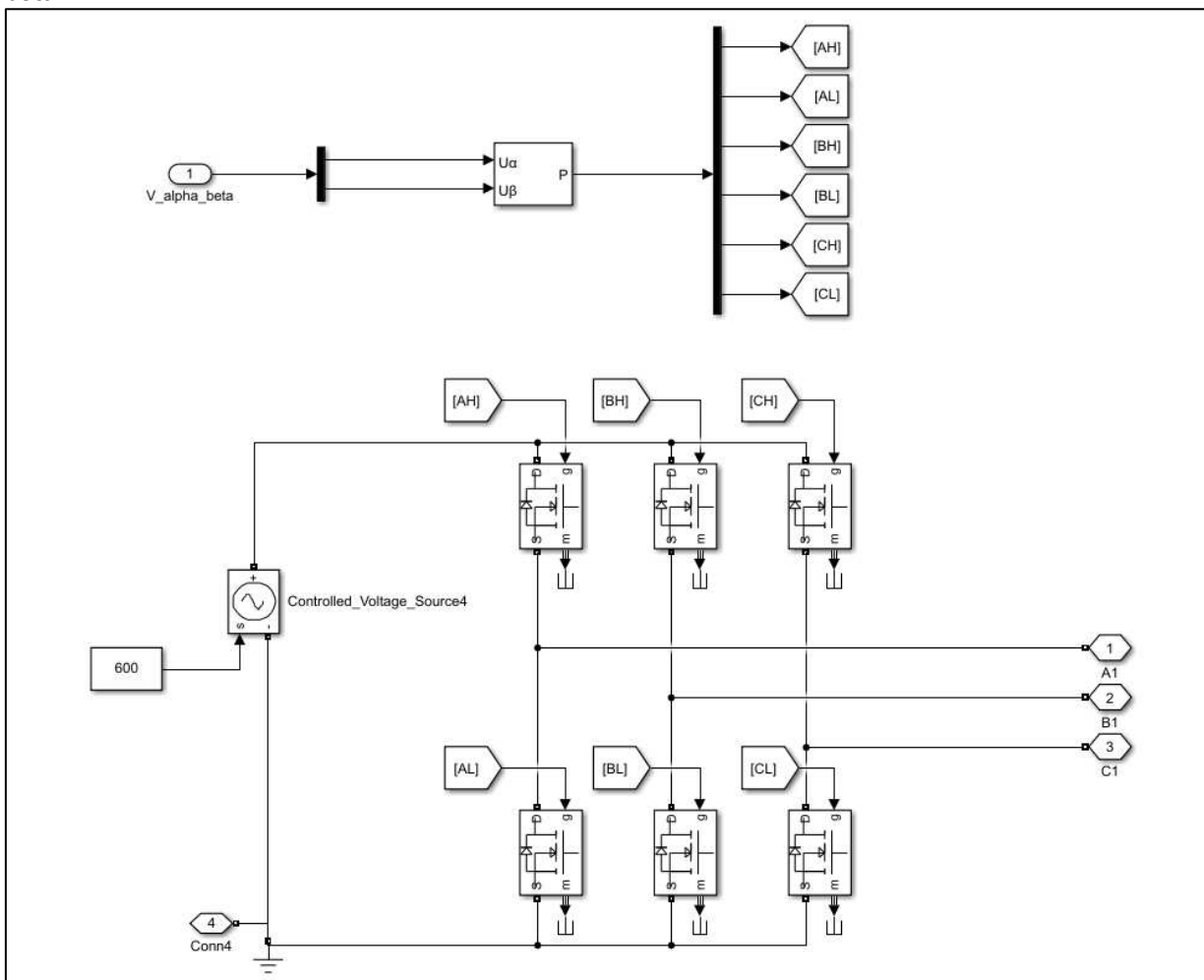
Figura 7 - Lógica para a determinação dos setores baseado no ângulo medido do rotor



Fonte: Autoria própria.

Para o inversor em si, foi utilizado um retificador bidirecional, que para cada fase possui duas entradas. Estas entradas são os componentes que fazem o chaveamento para o *low side* e *high side*. A partir dos valores definidos de tensão em α e β , que para este tipo de implementação se mostrou mais vantajoso, foi utilizado o próprio bloco de Simulink para o cálculo de cada uma das razões cíclicas para a aplicação do chaveamento em cada um dos *MOSFETs*. Para cada fase (a , b e c) obteve-se um valor para o *low side* e outro para o *high side*. E finalmente, a partir de uma alimentação DC fixa em 600 V, obtém as formas de onda de tensão que irão alimentar as entradas do motor denominadas A_1 , B_1 e C_1 no modelo. Na Figura 8 é demonstrada a implementação do SVPWM em Simulink utilizando *MOSFETs*.

Figura 8 - Implementação do SVPWM utilizando MOSFETs e componentes de tensão em alfa e beta

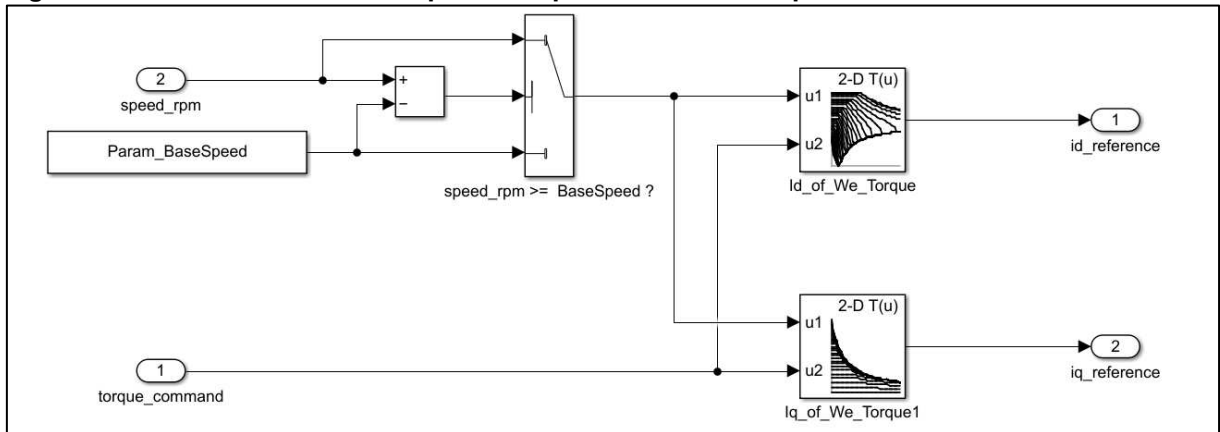


Fonte: Autoria própria.

5.3 CONTROLADOR

Como visto anteriormente, existem algumas formas diferentes de se implementar o controlador para a máquina elétrica, porém neste caso será utilizado apenas o que se mostra mais eficiente e é mais comumente utilizado na indústria, que é o controle por enfraquecimento de campo. Nele, precisa-se das referências da máquina elétricas e as entradas de torque e rotação da mesma para determinar os valores de corrente I_d e I_q que serão depois utilizadas no controle de corrente. Neste modelo, primeiramente faz-se a verificação se a rotação desejada é maior que a mínima possível para a máquina, e a partir disso aplica-se estes valores em uma tabela de referência para determinar os valores desejados de corrente. A implementação do modelo do controlador em Simulink é apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Modelo do controlador por enfraquecimento de campo

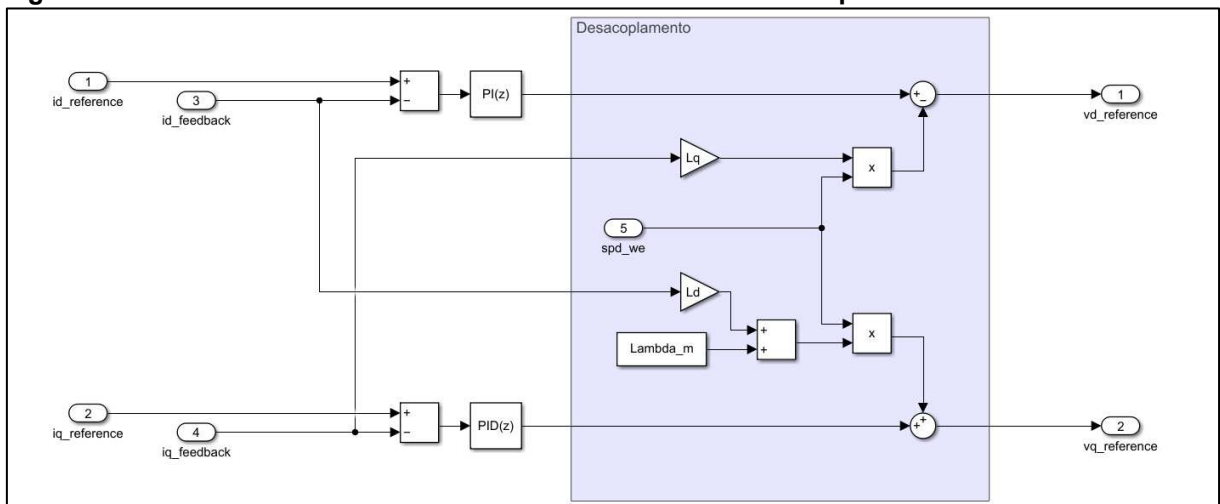


Fonte: Autoria própria.

Após encontrados os valores de corrente desejados, deve-se aplicar o controle de tensão para determinar as tensões em cada uma das fases para gerar as correntes nos enrolamentos. Como se está trabalhando em I_d e I_q , utiliza-se o controlador nas mesmas coordenadas, pois desta forma precisa-se de apenas 2 controladores, ao invés de 3 quando utilizando as coordenadas a , b e c .

Após o controlador PI, existe no modelo uma parcela denominada desacoplamento, essa parcela é de certa forma um controlador *feed forward* que é utilizado para reduzir o esforço do controlador, pois o comportamento dinâmico da tensão em função da corrente e que com o aumento da rotação do motor as indutâncias do acoplamento começam a surtir um efeito cada vez mais forte nestes valores. A implementação em Simulink do controlador PI junto com o desacoplamento pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Modelo do controlador de corrente em coordenadas d e q

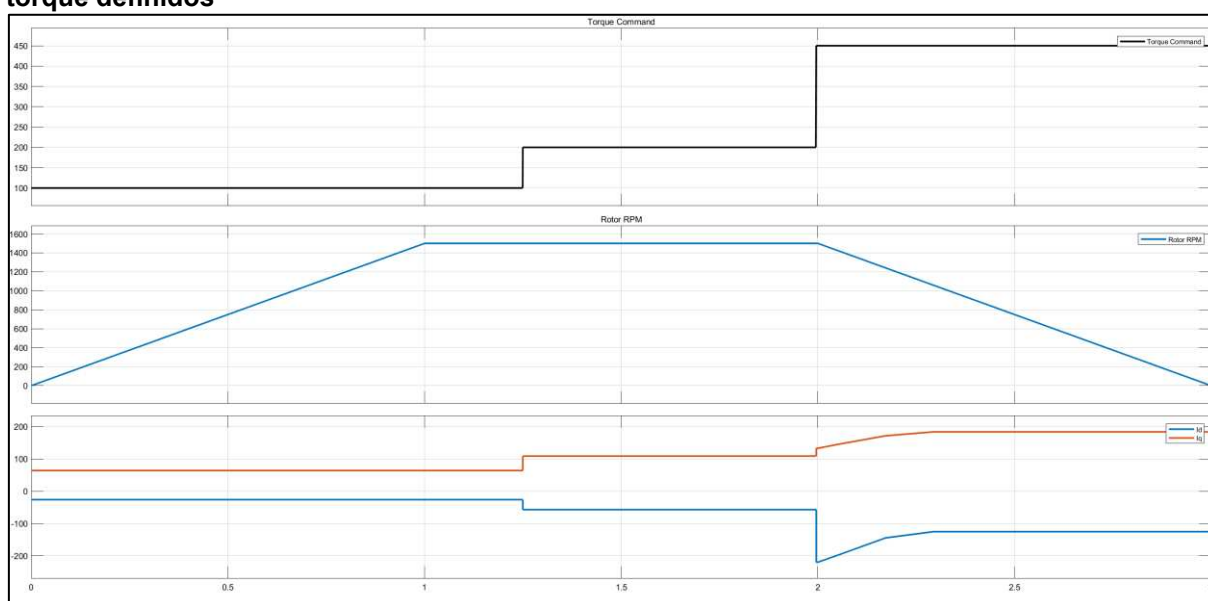


Fonte: Autoria própria.

6 RESULTADOS

Os resultados do controlador de corrente, onde as entradas são os valores de referência de torque e rotação do rotor, são mostrados na Figura 11. Como este controlador utiliza apenas uma tabela de referência, seu comportamento é muito simples. O retorno dos valores de correntes I_d e I_q podem ser visualizadas na terceira divisão na parte inferior novamente na Figura 11.

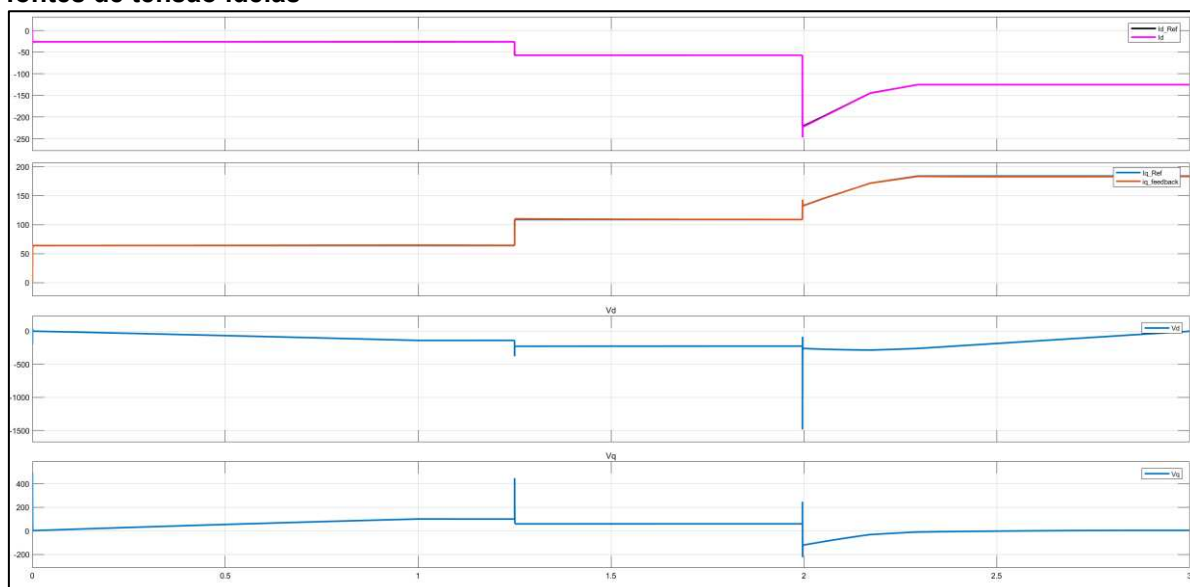
Figura 11 - Resposta do controle por enfraquecimento de campo aos comandos de rotação e torque definidos



Fonte: Autoria própria.

Após definido os valores de referência para I_d e I_q , foram aplicados aos controladores de corrente para se determinar as tensões V_d e V_q . Na Figura 12 é possível notar o comportamento do controle de I_d na primeira divisão, sendo mostrado em preto a referência para I_d fornecida pelo controlador de enfraquecimento de campo e em magenta o valor medido de I_d no motor. Na segunda divisão são demonstrados os valores para I_q , sendo em azul a referência produzida pelo controlador anterior e em laranja os valores medidos na máquina. E por fim, nas duas últimas divisões é possível notar os valores resultantes para as tensões V_d e V_q para que se atinjam as correntes I_d e I_q de referência.

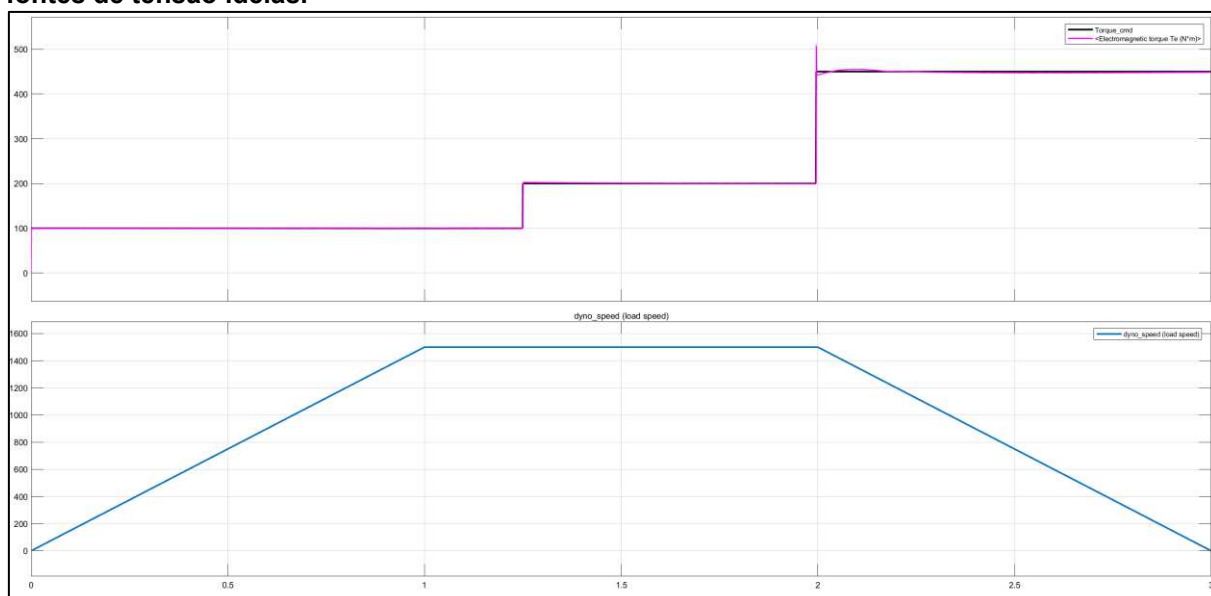
Figura 12 - Resposta final de velocidade e torque da máquina elétrica controlada utilizando fontes de tensão ideais



Fonte: Autoria própria.

Aplicando as técnicas de controle descritas anteriormente, mas utilizando fontes ideais de tensão, sem nenhum inversor, pode-se ver os resultados na Figura 13. Onde, na primeira divisão é possível ver os valores de referência de torque em preto e os valores do motor em magenta. Na segunda divisão, tem-se em azul os valores de rotação angular impostos ao motor. Assim, pode-se notar que o controle consegue atingir os valores de referência fornecidos, com apenas um pequeno *overshoot* nos valores mais altos de torque.

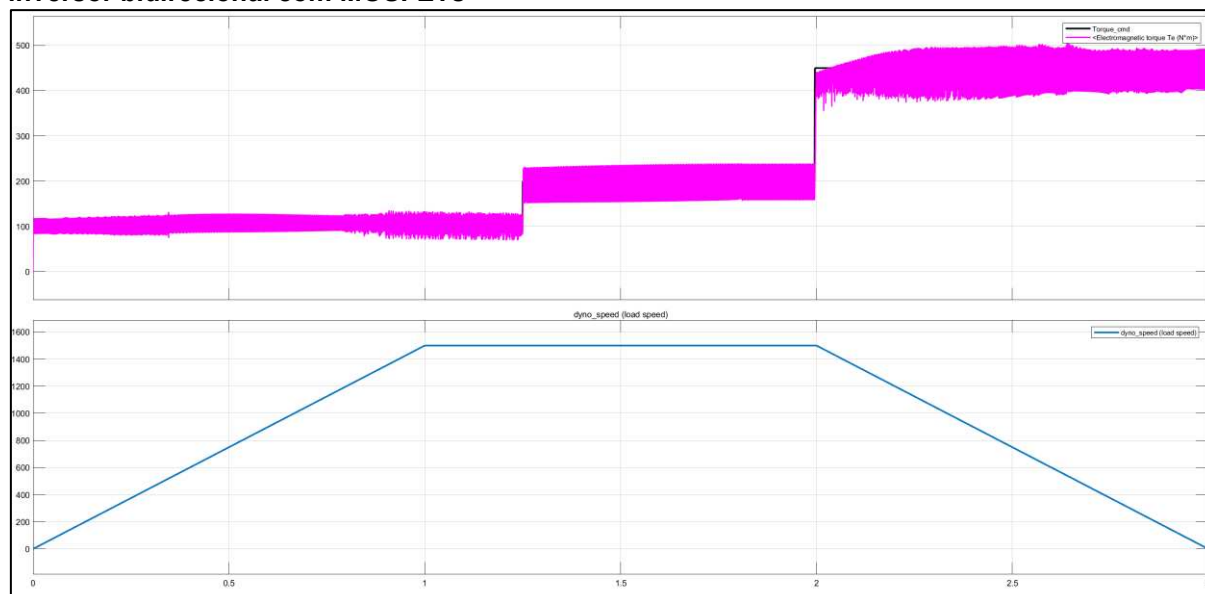
Figura 13 - Resposta final de velocidade e torque da máquina elétrica controlada utilizando fontes de tensão ideais.



Fonte: Autoria própria.

Ao se aplicar todas as partes descritas anteriormente à um só modelo, obteve-se então o modelo completo de controle do motor elétrico. E para validar os resultados, foi utilizado uma velocidade imposta ao motor e diferentes valores de torque foram aplicados para esse perfil de rotação. Os resultados são mostrados na Figura 14.

Figura 14 - Resposta final de velocidade e torque da máquina elétrica controlada utilizando um inversor bidirecional com MOSFETs



Fonte: Autoria própria.

A primeira divisão do gráfico mostra em preto os *setpoints* de torque e em magenta o torque produzido pela máquina. Para a calibração dos controladores proporcionais integrais o inversor foi inicialmente removido e fontes de tensão ideais foram utilizados para refletir bem o comportamento e a estabilidade do controle. Após definido os valores dos controladores o inversor foi então inserido e o comportamento é o demonstrado na imagem. A segunda parte do gráfico mostra a velocidade imposta no motor.

Pode-se notar, novamente na Figura 14, que o controle faz com que o motor atinja os valores de referência de torque impostos, porém apresenta uma certa variação que é proveniente do chaveamento do inversor. Ao analisar esta variação, pode-se concluir que o valor médio é equivalente ao *set point* de torque imposto. Este tipo de comportamento foi observado ao se inserir componentes eletrônicos reais ao modelo, como *MOSFET* e fontes de tensão, fazendo com que os comportamentos elétricos destes componentes inserissem esta variação no sistema.

7 CONCLUSÃO

Das diversas técnicas estudadas, o mais complexo é o agrupamento de todas elas e a extração do comportamento da máquina para aplicação do controle por enfraquecimento de fluxo. Ao se agrupar as diferentes técnicas de controle junto com as respostas dos inversores e dos componentes, mais interferências e ruídos o sistema apresentou. Porém, como o objetivo do trabalho era o estudo e simulação destas técnicas, o objetivo foi cumprido e o estudo foi concluído. Conseguiu-se obter um controle que acompanhe os valores de referência fornecidos ao final e também a utilização de componentes reais nas simulações, ao invés de simplificações de suas implementações.

Para posteriores estudos, seria interessante o detalhamento das técnicas que foram simplificadas por modelos Simulink. No caso da máquina elétrica a utilização de um modelo com variação de torque e carga mecânica seria mais adequado, pois retrataria melhor o comportamento real. No caso da implementação do SVPWM, este poderia ser mais estendido, com a implementação completa de sua lógica interna. Desta forma, o comportamento seria mais próximo ainda da realidade. Outro ponto, seria a estimativa de torque da máquina, já que este é obtido diretamente do modelo o que na realidade não é possível de ser obtido. Já as demais transformadas, implementações e calibrações foram desenvolvidas no decorrer deste trabalho e foram bem-sucedidas, pois cada uma delas conseguiu fornecer os valores necessários e esperados.

REFERÊNCIAS

COLLINS, Danielle. **What is Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM)?** Copyright© Motion Control Tips. Publicado em: 14 mar. 2019. Disponível em: <<https://www.motioncontroltips.com/what-is-space-vector-pulse-width-modulation-svpwm/>>. Acesso em: 13 nov. 2021.

LIMA, Kleber. **Transformada de Clarke e Parke**. Departamento de Engenharia elétrica da Universidade Federal do Ceará. Publicado em: 09 mai. 2016. Disponível em: <<http://www.coe.ufrj.br/~kleber/Transformadas.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2021.

MATULKA, Rebecca. **The History of the Electric Car**. U.S. Department of Energy. Publicado em: 15 set. 2014. Disponível em: <<https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>>. Acesso em: 02 out. 2021.

UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.