



Sistemas de Engenharia -  
Automação e Instrumentação

Grupo 1

2012/2013

<Estado da Arte Controladores>

<1.0>

Elaborado por: Ricardo Almeida

## Índice

1. Introdução .....	3
2. Conversores de Potência .....	4
3. Semicondutores .....	6
3.1 MOSFET .....	6
3.2 IGBT .....	7
3.3 GTO .....	7
4. Estratégias de Controlo .....	8
4.1 Controlo de Corrente Retangular .....	9
4.2 Controlo Vetorial .....	11
4.2.1 Space Vector Modulation .....	13
4.2.2 Controlo Vetorial com Base em Sensores de Hall .....	15
4.3 Controlo Direto de Binário .....	16
5. Conclusão .....	18

## 1.Introdução

Atualmente o controlo de motores elétricos assume-se cada vez mais como uma necessidade constante para o progresso e desenvolvimento tecnológico. A necessidade de sistemas baseados em motores de propulsão mais eficientes e menos poluentes como alternativa dos sistemas baseados em motores de combustão tem originado um crescente aumento do estudo e desenvolvimento de controladores para motores elétricos.

Este documento tem como principal objetivo a escolha do tipo de controlador elétrico a utilizar no veículo elétrico *Formula Student*.

## 2. Conversores de Potência

A evolução das topologias de conversores de potência normalmente segue a evolução dos dispositivos de potência, visando atingir a densidade de energia, alta eficiência, controlabilidade e confiabilidade.

Os conversores de potência dividem-se em quatro grandes grupos, donde se destacam os conversores:

- AC-AC
- AC-DC (retificador)
- DC-AC (inversor)
- DC-DC (chopper)

Estando perante um projeto de um veículo elétrico a bateria, apenas é relevante analisar os conversores DC-DC e os conversores DC-AC, que permitam a regeneração de energia, cumprindo assim um dos requisitos do projeto.

Os conversores DC-DC surgiram na década de 60 do século passado, com tirístores a operar a baixa frequência de comutação. Agora eles podem ser operados a dezenas e centenas de quilohertz. Em aplicações de propulsão elétrica, o conversor DC-DC de dois quadrantes permite converter a tensão contínua da bateria para outra gama de tensão durante o modo de condução e durante a travagem regenerativa permite reverter o fluxo de energia.

Além disso, os conversores DC-DC de quatro quadrantes (Figura 1) são empregados para o controlo de velocidade reversível e regeneradora dos motores DC.

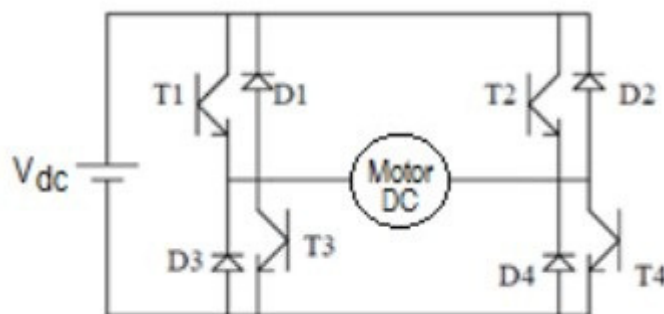


Figura 1- Conversor de potência em ponte completa

Os inversores podem ser do tipo alimentado em tensão ou do tipo de alimentado em corrente. No entanto, devido à necessidade de uma indutância grande em série, de forma a emular uma forma de corrente, os conversores de corrente alimentados raramente são utilizados para propulsão elétrica. Na verdade, os inversores alimentados com tensão são usados quase que exclusivamente, porque são muito simples e podem ter um fluxo de potência em qualquer direção. O conversor trifásico típico em ponte completa é apresentado na Figura 2

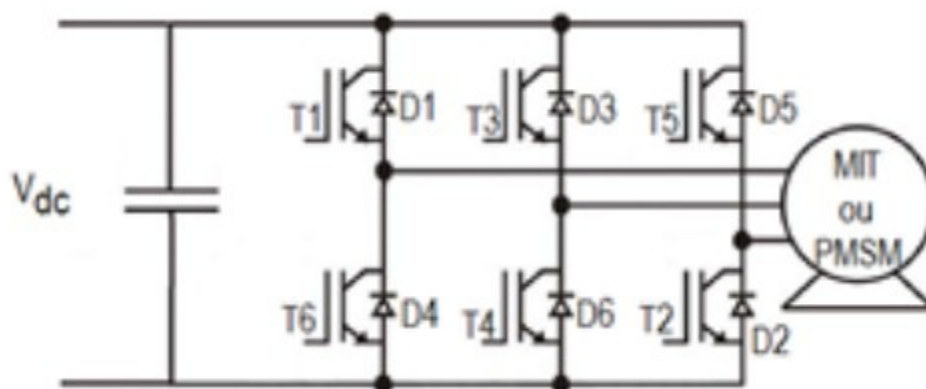


Figura 2 - Conversor de potência em ponte trifásica - inversor

Este conversor é alimentado por um barramento DC, que no caso deste projeto vão ser as baterias, em ponte completa trifásica com IGBT's, que permite controlar a amplitude e a frequência das tensões de alimentação a aplicar a o motor. O método de funcionamento é muito idêntico ao conversor DC-DC em ponte completa, apenas é acoplado mais um braço à ponte, ou seja, mais dois transístores a comutar.

É de notar que se em encontram-se sempre três transístores ligados ao mesmo tempo, um de cada ramo do braço da ponte. Os transístores do mesmo braço operam complementarmente.

## 3.Semicondutores

Conforme o tipo de aplicação existem várias hipóteses para a escolha dos semicondutores do inversor. O interruptor ideal tem as seguintes características:

- Enquanto está ligado a queda de tensão nos seus terminais é 0 V;
- Enquanto está desligado a corrente que passa é 0 A;
- Comuta de um estado para o outro instantaneamente e enquanto comuta uma das grandezas, a tensão ou corrente, é sempre zero, de modo a que as perdas de comutação sejam sempre nulas.

Na realidade é impossível implementar um interruptor ideal, por isso, consoante a aplicação desejada é necessário encontrar um compromisso entre as principais características do semicondutor. Atualmente, os sistemas de acionamento e movimentação mais recentes utilizam maioritariamente os seguintes semicondutores:

### 3.1 MOSFET

O MOSFET é um semicondutor controlado em tensão. É utilizado em aplicações que necessitem de uma elevada frequência de comutação (>200 kHz), baixa tensão (<250 V) e baixas e médias potências (<5 kW). Suportam variações de carga bruscas e funcionam bem com *duty-cycles* longos. O seu circuito de comando, em relação aos BJT's e tirístores é mais simples e eficiente. A maior desvantagem dos MOSFET's é a sua elevada resistência  $R_{ON}$ . São dos semicondutores mais baratos do mercado.

## 3.2 IGBT

Tal como o MOSFET, o IGBT é um semiconductor controlado em tensão, mas com a vantagem de ter uma resistência  $R_{ON}$  mais baixa. É utilizado em aplicações que necessitem frequências de comutação médias (<20 kHz), alta tensão (>1000 V), médias e altas potências (>5 kW). Suportam pequenas variações bruscas de carga e operam melhor com *duty-cycles* mais baixos.

São mais caros que os MOSFET's e, apesar de terem menos perdas de condução, comutam a frequências mais baixas e têm mais perdas durante o  $t_{OFF}$ .

## 3.3 GTO

O GTO é um semiconductor controlado em corrente. Durante muitos anos foi utilizado em sistemas que exigiam elevadas potências e alta tensão. Comuta a frequências muito baixas e necessita de um circuito de comando muito mais complexo que o IGBT ou o MOSFET. Além do aumento da complexidade reduzir a fiabilidade do sistema, a eficiência também é menor, devido às perdas geradas pelas elevadas correntes de comando. Atualmente os GTO's estão a ser gradualmente substituídos por IGBT's.



## 4. Estratégias de Controlo

Em termos gerais, os métodos de controlo dos motores síncronos com ímanes permanentes, alimentados em tensão com a corrente controlada são classificados em relação ao tipo de forma de onda da corrente e ao tipo de sensor utilizado na medida da posição do rotor.

Assim, considerando o tipo de forma de onda encontra-se descrito na literatura:

- Controlo de corrente retangular;
- Controlo de corrente sinusoidal.

No caso dos motores controlados com corrente sinusoidal encontram-se descritos na literatura as seguintes metodologias de controlo:

- Controlo por orientação de campo;
- Controlo direto de binário.

Qualquer uma destas metodologias pode ser classificada como controlo vetorial sem transdutores (*sensorless vector control*).



## 4.1 Controlo de Corrente Retangular

O método de controlo retangular ou *six-step-control* é especialmente vocacionado para o controlo de motores *Brushless* DC de ímanes permanentes devido à forma trapezoidal das forças contra eletromotrizes deste tipo de motores, como é possível observar na Figura 3.

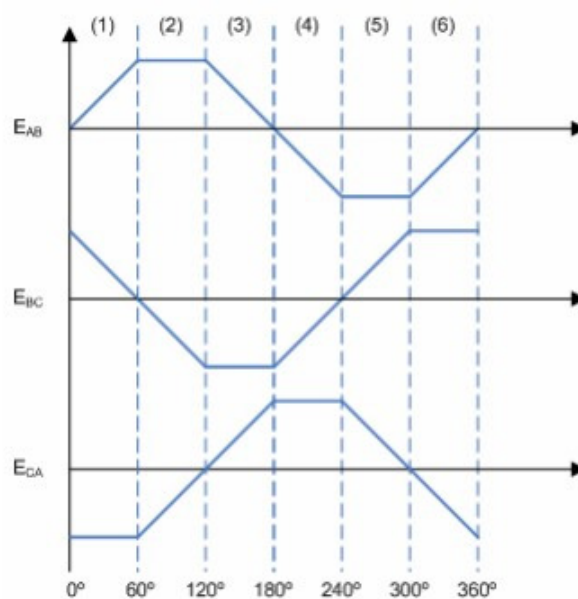


Figura 3- Forma de onda trapezoidal das forças contra eletromotrizes nos motores *Brushless* DC

Através da aplicação de uma sequência apropriada na alimentação das fases do estator é criado e mantido um campo girante no mesmo. O avanço entre o campo girante e o rotor tem que ser controlado de modo a produzir o binário pretendido.

A correta alimentação dos enrolamentos do estator apenas é conseguida quando a posição do rotor é conhecida. Habitualmente são utilizados três sensores de Hall acoplados no estator que produzem seis sinais digitais de acordo com a posição. Assim, é verificada uma alteração do valor dos sensores de Hall de 60 em 60 graus elétricos, tal como é ilustrado na Figura 4

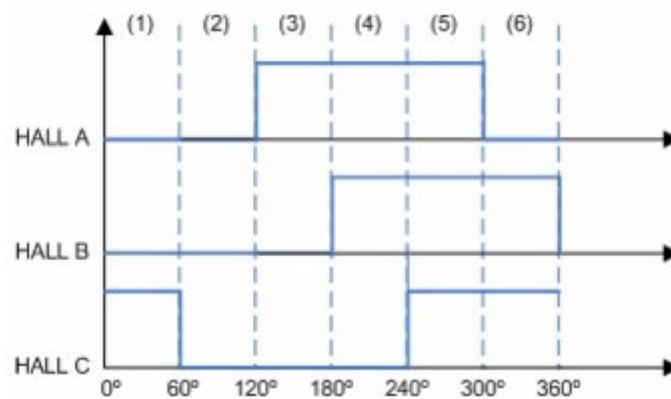


Figura 4 - Sinais obtidos através dos sensores de Hall

Na Figura 5 é apresentado o esquema de ligação entre o inversor e o motor. Os semicondutores são controlados de forma a existirem instantaneamente duas fases em condução e uma em não condução.

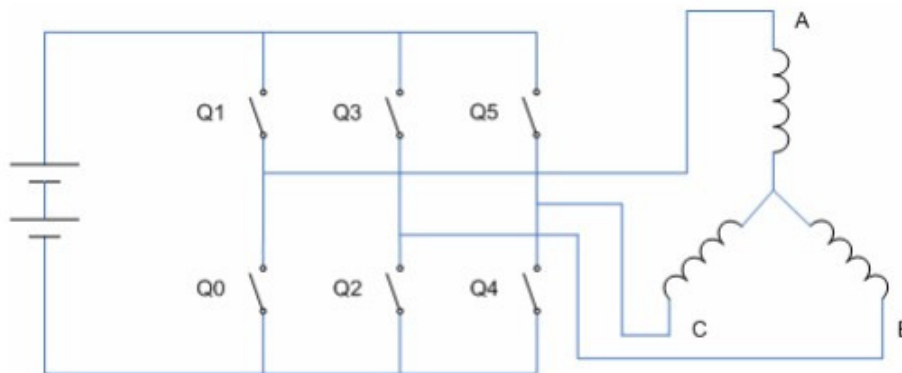


Figura 5 - Esquema de ligação entre o inversor de tensão e os enrolamentos do motor

O controlo de motores *Brushless C* através do método de controlo de corrente retangular apresenta as seguintes vantagens:

- Apenas é necessário o conhecimento da posição instantânea do rotor em determinados instantes;
- O controlo da corrente, e de binário, é realizado através do controlo da corrente apenas numa das fases em cada instante;
- É independente dos parâmetros do motor;
- O binário é praticamente constante, excetuando nos instantes em que há uma comutação da alimentação das fases;
- Necessita de poucos recursos de *hardware*.



Este tipo de controlo pode também ser aplicado a motores síncronos de ímanes permanentes, contudo o binário produzido, não apresenta uma forma aproximadamente constante mas sim porções de sinusoides.

Este fenómeno deve-se à combinação de um controlo de corrente retangular aplicado a um motor com forças contra eletromotrizes sinusoidais. É importante notar que aplicando um controlo sinusoidal a um PMSM o binário produzido é constante. A utilização de um controlador de corrente retangular nestes motores também produz um binário com uma amplitude inferior.

## 4.2 Controlo Vetorial

O controlo por orientação de campo, ou controlo vetorial, é aplicado em máquinas elétricas AC para que o seu controlo se torne equivalente às máquinas DC de excitação separada. Este método de controlo foi inicialmente aplicado a motores de indução e posteriormente aplicado a motores síncronos de ímanes permanentes.

Para implementação do controlo por orientação de campo é necessário adquirir uma informação absoluta da posição do rotor, a qual usualmente é obtida através de sensores de elevada resolução tais como *encoders* ou *resolvers*. Estes tipos de sensores para além de serem bastante dispendiosos podem desalinhar-se durante o funcionamento do motor, conduzindo à aquisição de uma posição errada do rotor.

Perante isto, emerge a necessidade de encontrar soluções que permitam contornar os problemas destes sensores e reduzir o custo e dimensão total do sistema controlador mais motor eléctrico. Uma das soluções possíveis é a utilização de métodos de controlo sem qualquer sensorização da posição do rotor o que conduz à implementação de algoritmos complexos de estimação da posição e da velocidade.



Nos motores síncronos de ímanes permanentes à medida que o rotor roda, existe um ângulo entre o fluxo magnético do estator e o fluxo magnético do rotor. Se estes dois campos magnéticos não estiverem desfasados de  $90^\circ$ , as forças contra eletromotrizes e as correntes vão estar também desfasadas e o binário produzido não vai ser máximo. Através da deteção da posição do rotor é possível utilizar um método de controlo que imponha um desfasamento de  $90^\circ$  entre os dois campos magnéticos.

O controlo vetorial necessita da posição do rotor em todos os instantes para garantir a produção máxima de binário com um menor número de ondulações. Este método de controlo utiliza as transformadas de Clarke e de Park para converter um sistema de três eixos dependente do tempo (coordenadas a, b, c) num sistema de dois eixos independente do tempo e que roda em sincronismo com o fluxo do rotor (coordenadas d, q).

Através das projeções anteriormente apresentadas é possível obter uma estrutura de controlo similar ao motor DC de excitação separada, sendo possível controlar independentemente o binário e o fluxo de magnetização produzidos uma vez que estes são diretamente proporcionais a  $I_q$  e  $I_d$ , respetivamente.

Na Figura 6 é apresentado o diagrama de blocos deste controlador. O sinal de referência  $I_q$  é definido de acordo com a amplitude do binário que o motor deve produzir. A referência de corrente ( $I_d$ ) relativa ao fluxo de magnetização é mantida nula para obter o nível ótimo de binário

No diagrama de blocos da Figura 6 é apresentado o caso mais simples do controlo por orientação de campo em que a posição do rotor é adquirida por um *encoder*. Neste caso também é pressuposto que o conversor eletrónico de potência é ideal, ou seja que as tensões geradas pelo controlador são diretamente aplicadas ao motor.

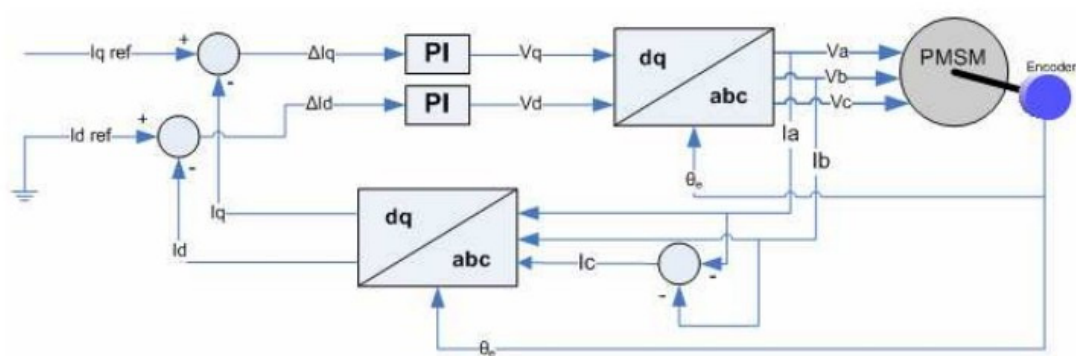


Figura 6 - Diagrama de blocos do controlo vetorial com *encoder*

#### 4.2.1 Space Vector Modulation

A técnica *Space Vector Modulation* (SVM) tornou-se a mais popular e importante técnica de PWM para comandar inversores trifásicos de tensão aplicados no controlo de motores de Indução AC, motores *Brushless* DC, motores de Relutância e motores Síncronos de Ímanes Permanentes. É uma técnica que permite aplicação de níveis de tensão mais elevados ao motor e menor distorção harmónica.

Esta técnica baseia-se na representação vetorial do inversor e realiza a transformação de tensões no plano  $\alpha$ - $\beta$  diretamente em sinais de PWM. As principais vantagens inerentes a este método são: a tensão de saída é 15% maior do que nos métodos de modulação usuais permitindo um uso mais eficiente da fonte de tensão DC, maior eficiência e o número de comutações dos semicondutores é cerca de 30% menor do que utilizando o método convencional *Sinusoidal Pulse Width Modulation*.

A transformada inversa de Park permite converter as componentes do vetor de tensão do referencial rotacional do estator ( $V_d$  e  $V_q$ ) em componentes no referencial estacionário do estator ( $V_\alpha$  e  $V_\beta$ ). Através dos oito estados diferentes do inversor, é possível criar oito vetores (sendo dois deles vetores nulos), chamados *switching state vectors* (SSVs), que dividem o plano  $\alpha$ - $\beta$  em seis sectores. Assim, é possível representar qualquer vetor através da soma dos *switching state vectors* adjacentes.

A técnica SVM consiste basicamente em três etapas:

- Identificação do sector onde se encontra o vetor  $V_S$ ;
- Decomposição do vetor  $V_S$  nos *switching state vectors* adjacentes;
- Cálculo do PWM em função do *duty cycle*.

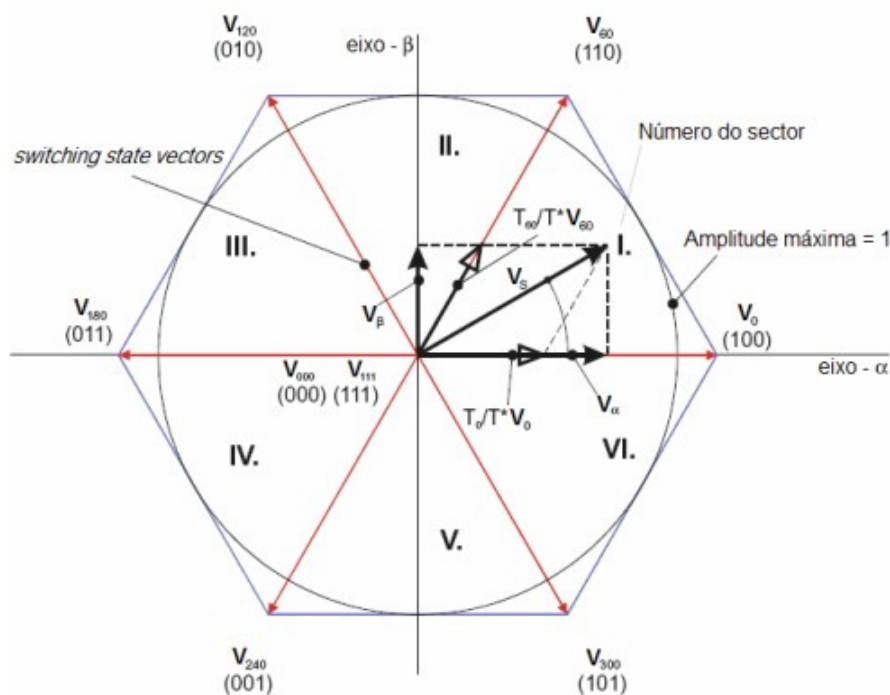


Figura 7 - Representação vetorial de um inversor de três braços



#### 4.2.2 Controlo Vetorial com Base em Sensores de Hall

Numa implementação real para utilizar o controlo por orientação de campo é necessário utilizar sensores de alta resolução, como já foi referido anteriormente. Uma solução que permite reduzir os custos do controlador é a utilização de sensores de Hall que são integrados no motor. Estes sensores são de baixo custo e a maioria dos fabricantes de motores elétricos disponibiliza os seus produtos com estes sensores integrados.

Quando os polos magnéticos dos ímanes permanentes do rotor passam perto dos sensores de Hall, estes fornecem um sinal lógico “1” ou “0”, indicando a passagem dos polos Norte ou Sul. Uma vez que usualmente são utilizados três sensores de Hall, é possível obter resolução elétrica de 60 graus.

A implementação do controlador por orientação de campo exige o conhecimento da posição instantânea do rotor para calcular as projeções dos vetores das correntes e das tensões em diferentes referenciais. Através da mudança de estado de três sensores de Hall é possível determinar com exatidão a posição instantânea do rotor de 60 em 60 graus elétricos. Estas mudanças dos sensores permitem dividir o plano da posição do rotor em seis posições diferentes. Assim, é necessário fazer uma estimação da posição do rotor enquanto este se encontra no interior de um sector. O erro de estimação pode ser eliminado cada vez que existe uma mudança de sector.

No arranque do motor o erro máximo possível é de 30 graus elétricos uma vez que através dos sensores de Hall é possível determinar o sector onde o rotor se encontra no arranque. Isto permite impedir que o motor arranque em sentido contrário.

Na Figura 8 é apresentado o diagrama de blocos do controlador por orientação de campo de motores síncronos de ímanes permanentes com base em sensores de Hall.

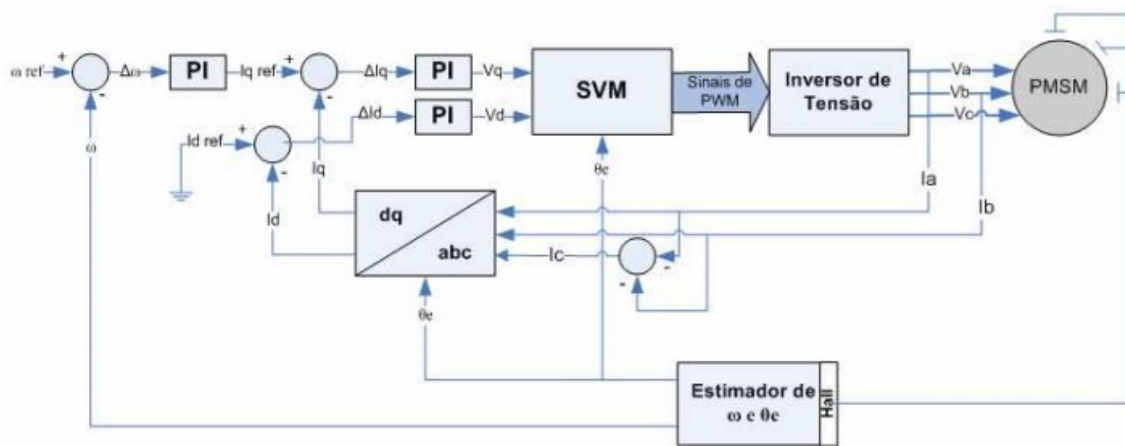


Figura 8 - Diagrama de blocos do controlador vetorial com estimação da posição e velocidade do rotor através de sensores de Hall

Como é possível observar na figura anterior, o bloco “Estimador de  $\omega$  e  $\theta_e$ ” determina a velocidade e a posição instantânea do rotor. A estimação da velocidade é utilizada para determinar o erro de velocidade que é aplicado a um controlador PI que gera a referência da corrente  $I_q$ . A estimação da posição do rotor é utilizada para calcular a projeção das correntes  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  no referencial d-q e a projeção de  $V_q$  e  $V_d$  no referencial  $\alpha$ - $\beta$  realizada no interior do bloco SVM.

### 4.3 Controlo Direto de Binário

O controlo direto de binário, ou *Direct Torque Control* (DTC), consiste na seleção direta da configuração do conversor com vista a controlar simultaneamente o fluxo e o binário usando regras qualitativas par tal. Tanto o Binário como o Fluxo são controlados através de histerese para que o vetor de fluxo no referencial alfa beta represente um círculo permitindo dessa forma uma absorção sinusoidal da corrente. O seguimento de referências é feito praticamente sem *overshoot* e *undershoot*, contudo não se iguala à performance do FOC. Devido ao tipo de regulação (Histerese) o espectro do binário é composto por vários harmónicos com amplitudes significativas cujas frequências parecem imprevisíveis e variáveis consoante a velocidade. Para velocidades baixas, torna-se até audível o ruído característico da comutação



dos semicondutores o que leva a ressonâncias possíveis de afetar os sistemas mecânicos envolventes, e incompatibilidades eletromagnéticas com outros sistemas. O *ripple* de binário é geralmente mais elevado e a temperatura dos semicondutores menos previsível quando comparado com técnicas baseadas em PWM.



## 5. Conclusão

O método de controlo retangular permite controlar motores Brushless DC e PMSM sem a necessidade de conhecer a posição instantânea do rotor. Neste método apenas é necessário conhecer os instantes em que se deve comutar as fases alimentadas para garantir a correta rotação do motor e para conseguir uma maximização do binário produzido. Este conhecimento pode ser facilmente obtido através dos sinais gerados por sensores de Hall que usualmente estão embutidos no estator. Através deste método é possível também controlar motores prescindindo do conhecimento da maioria dos seus parâmetros.

O método de controlo por orientação de campo permite obter menor ondulação de binário relativamente ao método de controlo de corrente retangular uma vez que no motor são injetadas correntes sinusoidais em vez de correntes retangulares. O facto de as correntes serem sinusoidais possibilita obter um binário mais elevado. O controlo vetorial também permite controlar independentemente a corrente de fluxo e a corrente de binário obtendo-se um maior domínio sobre o motor.

A técnica SVM permite aplicar as tensões geradas pelos controladores de corrente ao motor, através de um inversor de tensão. Com a representação vetorial do inversor, este método consegue fornecer níveis de tensão mais elevados e menor distorção harmónica que os métodos convencionais, rentabilizando este processo. Sendo portanto este o método de controlo que permite retirar a máxima performance do conjunto máquina eléctrica e controlador. A utilização do controlo vetorial evita a saturação do circuito magnético, o que faz diminuir as correntes de magnetização e por sua vez as perdas.