

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DAS ÁREAS ACADÊMICAS IV
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUSTAVO DA COSTA VERGARA

**ESTUDO DE APLICAÇÃO DE UMA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL E DE
UM CONVERSOR PARA CARROS HÍBRIDOS**

Goiânia, 2022

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Gustavo da Costa Vergara

Matrícula: 20171011060403

Título do Trabalho: ESTUDO DE APLICAÇÃO DE UMA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL E DE UM CONVERSOR PARA CARROS HÍBRIDOS

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 16/03/2023.

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

GUSTAVO DA COSTA VERGARA

**ESTUDO DE APLICAÇÃO DE UMA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL E DE
UM CONVERSOR PARA CARROS HÍBRIDOS**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado ao curso de Bacharelado em
Engenharia Elétrica do Departamento de
Áreas Acadêmicas do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
– *Campus* Goiânia como requisito parcial
para conclusão do curso de Bacharelado
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Renato Jayme Dias

GOIÂNIA

2022

V5864e Vergara, Gustavo da Costa.

Estudo da aplicação de uma máquina de relutância variável e de um conversor para carros híbridos / Gustavo da Costa Vergara. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2022.
45 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Renato Jayme Dias.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Bacharelado em Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Máquina a relutância variável. 2. Máquina a combustão interna. 3. Carros híbridos.
I. Dias, Renato Jayme (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. III. Título.

CDD 621.43



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS CÂMPUS GOIÂNIA

ATA DE REALIZAÇÃO DA SESSÃO PÚBLICA ON-LINE DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC) DO CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DAS ÁREAS ACADÊMICAS IV DO INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS, CÂMPUS GOIÂNIA.

Aos 12 dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte dois, às 16:00 horas, via webconferência, reuniu-se a banca avaliadora, convidada por meio de e-mail, composta pelos seguintes membros: **Prof. Dr. Renato Jayme Dias** (Orientador e Presidente da Banca Avaliadora), **Prof. Me. Charles dos Santos Costa** (Membro Interno da Banca Avaliadora), **Prof. Me. Camille Reátegui Silva** (Membro Externo da Banca Avaliadora) e **Prof. Me. Francisco José Pires Machado Bragança** (Membro Interno da Banca Avaliadora) para a realização da sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), intitulado ESTUDO DE APLICAÇÃO DE UMA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL E DE UM CONVERSOR PARA CARROS HÍBRIDOS, do graduando **GUSTAVO DA COSTA VERGARA (Matrícula: 20171011060403)** do **CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**, como requisito final para obtenção do título de **ENGENHEIRO DE ELETRICISTA. PARECER:** Após as arguições dos membros da banca examinadora, por decisão unânime, o trabalho foi **APROVADO COM CORREÇÕES**, a nota final atribuída foi: **7,0 (sete vírgula zero)**. O trabalho corrigido deverá ser apresentado ao Professor Orientador no prazo máximo de 30 dias a partir da data de defesa. **FECHAMENTO:** Nada mais havendo a tratar, o presidente da banca avaliadora, Professor **Renato Jayme Dias**, agradeceu a participação de todos e encerrou a sessão pública on-line de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) às 19 (dezenove) horas e 00 (zero) minutos. Eu, **Renato Jayme Dias**, Orientador e Presidente da Banca Avaliadora, lavrei a presente Ata assinada pela banca avaliadora. Goiânia, 12 de dezembro de 2022. Nada mais a constar, encerro a presente Ata.

BANCA AVALIADORA

Prof. Dr. Renato Jayme Dias	(Orientador e Presidente- IFG)
Prof. Me. Charles dos Santos Costa	(Membro Interno - IFG)
Prof. Me. Camille Reátegui Silva	(Membro Externo - IFRN)
Prof. Me. Francisco José Pires Machado Bragança	(Membro Interno - IFG)

Renato Jayme Dias
Prof. Dr. Renato Jayme Dias (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Charles dos Santos Costa
Prof. Me. Charles dos Santos Costa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Camille Reátegui Silva
Prof. Me. Camille Reátegui Silva

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte.

Francisco José Pires Machado Bragança
Prof. Me. Francisco José Pires Machado Bragança

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

RESUMO

O presente trabalho propõe o estudo da aplicação de uma Máquina a Relutância Variável (MRV) 8x6 com quatro fases em carros populares que possuem como princípio de funcionamento, Motores a Combustão Interna (MCI) quatro tempos com quatro cilindros, com o propósito de melhorar o rendimento final do carro, sincronizando as duas máquinas com um conversor *half bridge*. Para sistematizar o trabalho, foram realizados estudos bibliográficos referentes aos temas de MRV, MCI (com seus respectivos sensores de posição e de fase) e do conversor do tipo *half bridge*. Neste contexto, foram avaliadas as coincidências entre o funcionamento característico da MRV em relação ao da MCI, sugerindo possíveis soluções para o sincronismo, aproveitando os sinais de controle da MCI, e feitas propostas de alocação da MRV no carro.

Pode-se concluir que os sinais utilizados no controle do ciclo Otto, em um motor de quatro tempos de uma MCI, possuem perfis muito similares aos aplicados para o sistema de controle do disparo das bobinas em uma MRV. Sendo possível gerar essa relação, o presente trabalho aborda conceitos iniciais e estruturantes que contribuam com projetos futuros de desenvolvimento do sincronismo real entre a MRV 8x6 de quatro fases e a MCI de um veículo popular convencional (quatro tempos e quatro cilindros).

Palavras-chave: Máquina a Relutância Variável, Máquina a Combustão Interna, conversor *half bridge*, ciclo Otto.

ABSTRACT

This work proposes the study of the application of a Switched Reluctance Machine (SRM) 8x6 with four phases in economy cars that have as operating principle the Internal Combustion Machine (ICM) four strokes with four cylinders with the purpose of improving the final performance of the car synchronizing the two machines with a half bridge converter. Bibliographical studies were carried out referring to the themes of SRM, ICM (with their respective position and phase sensors) and the half bridge converter. In light of this the coincidences between the characteristic functioning of the SRM in relation to that of the ICM were evaluated suggesting possible solutions for the synchronism taking advantage of the control signals of the ICM and proposals were made for the allocation of the SRM in the car.

It can be concluded that the signals used in the control of the Otto cycle, in a 4-stroke engine of an IC, have profiles very similar to those applied to the control system of the firing of the coils in an SRM. If possible to generate this, this work will address initial and structuring concepts that contribute to future projects of development of the real synchronism between the SRM 8x6 and the ICM of a conventional economy vehicle (four strokes and four cylinders).

Keywords: Switch Reluctance Machine, Internal Combustion Machine, half bridge converter, Otto cycle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Arranjo de conversão de energia utilizado em máquinas térmicas [11].....	11
Figura 2: Os quatro tempos do ciclo Otto [11].....	13
Figura 3: Sensor de presença [11].....	15
Figura 4: Resposta de sinal senoidal do sensor de rotação da MCI [11].....	15
Figura 5: Resposta de sinal quadrado do sensor de fases da MCI [11].....	16
Figura 6: Desenho da seção transversal de uma MRV 6x4, mostrando o enrolamento da fase A [5].....	18
Figura 7: MRV 8x6 tetrafásica [4].....	19
Figura 8: Carcaça, sensor óptico (encoder) e disco serrilhado [5].....	20
Figura 9: Conversor HB tetrafásico (com quatro braços) [4].....	21
Figura 10: Encoder (modelo de sensor óptico). Fonte: ficha técnica EP50S.....	21
Figura 11: Indutância da MRV em relação ao ângulo do rotor [14].....	23
Figura 12: Curva de indutância observada em uma fase de uma MRV [5].....	26
Figura 13: Encoder e desenho em perspectiva. Fonte: ficha técnica EP50S.....	27
Figura 14: Representação gráfica da pinagem do Arduino UNO R3.....	28
Fonte: ficha técnica Arduino.....	28
Figura 15: MRV 8x6 tetrafásica [4].....	29
Figura 16: Conversor HB tetrafásico (com quatro braços) [4].....	29
Figura 17: Um “braço” do conversor HB [8].....	30
Figura 18: Detalhe em realce do circuito de disparo na fase de excitação da MRV [8].	31
Figura 19: Detalhe em realce do circuito na fase de freewheel [8].....	31
Figura 20: Detalhe em realce do circuito na fase de regeneração [8].....	32
Figura 21: Layout do conjunto de placas que compõem a fase de comando do conversor HB [4].....	33
Figura 22: Detalhamento do circuito Drive com sua alimentação e conexões com o circuito de comando [4].....	34
Figura 23: Detalhamento do circuito Drive com sua alimentação e conexões com o circuito de comando [4].....	35
Figura 24: Visão completa do conversor HB montado em bancada [4].....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: *Especificações da MRV utilizando valores médios [12].*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO.....	9
1.1. Contextualização e justificativa do estudo.....	9
1.2. Objetivos Gerais e Específicos.....	10
2. MÁQUINA A COMBUSTÃO INTERNA - MCI.....	11
2.1. Conceitos fundamentais de Motores a Combustão Interna (MCI).....	11
2.2. Sistema digital de injeção eletrônica e sensores.....	13
2.2.1. Sensor de rotação de motor.....	14
2.2.2. Sensor de fases do motor.....	15
2.3. Conclusão.....	17
3. MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL (MRV).....	18
3.1. Princípio de funcionamento, controle e características da MRV.....	18
3.2. Modelagem matemática da MRV.....	22
3.4. Conclusão.....	25
4. CONVERSOR HALF BRIDGE (HB).....	26
4.1. Introdução a conceitos e critérios de escolha do conversor HB.....	26
4.2. Princípio de funcionamento do Half Bridge (HB).....	29
4.3. O Half Bridge (HB) - Aspectos construtivos.....	33
4.4. Conclusão.....	36
5. SINCRONISMO DA MCI E A MRV.....	38
5.1. Manipulação dos sinais dos sensores do veículo a combustão.....	38
5.2. Estratégias para sincronização da MRV com o motor a combustão interna.....	39
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
7. PREVISÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	42
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

1. INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO

1.1. Contextualização e justificativa do estudo

A crescente preocupação com a sustentabilidade e a busca por fontes de energia mais limpas e eficientes impulsionam o desenvolvimento de veículos híbridos, que combinam um motor de combustão interna (MCI) com um motor elétrico [1]. A eficiência energética dos veículos híbridos depende da capacidade de sincronização e controle dos sistemas de combustão e elétrico, visando a otimização do rendimento do conjunto. Nesse sentido, a máquina a relutância variável (MRV) pode ter destaque como uma alternativa promissora para ser utilizada em conjunto com o MCI em veículos híbridos [5 e 8].

Por volta do ano de 1838, houve aparições de diversas máquinas de conversão eletromecânica, dentre elas a Máquina a Relutância Variável (MRV) destacando-se por apresentar alto rendimento frente ao baixo custo de fabricação [2]. Na época, a MRV possuía limitações de implementação, pois seu sistema de acionamento requer requinte em tecnologia de eletrônica de potência, inexistente naquela época. Com o passar do tempo, e com a evolução significativa dos elementos semicondutores, os estudos para a aplicação da MRV voltaram a ser significativos, sendo que atualmente é uma máquina amplamente difundida no meio científico para aplicações que necessitem de variação de velocidade [5].

A estratégia para concepção da MRV consiste na fabricação de estruturas laminares com dupla saliência, característica marcante desta máquina a aparição de comportamento eletromagnético não linear, ondulação de torque, controle complexo e a necessidade de comutação eletrônica em diferentes taxas de frequência [5 e 8].

Com bobinas posicionadas apenas no estator da MRV, o conversor possui a função de realizar o chaveamento para a energização das bobinas em um determinado ponto ótimo. A depender do método desejado do funcionamento da MRV, gerador ou motor, o conversor irá determinar o ângulo de disparo para o chaveamento e energização das bobinas [4]. Este princípio de funcionamento sempre irá depender de variáveis de posição dos polos do estator em relação ao rotor.

A sincronização da MRV com o MCI é um desafio, pois requer a manipulação dos sinais dos sensores da MCI. A falta de sincronismo pode causar perdas de

energia, aumentando o consumo de combustível e prejudicando o rendimento do veículo. Portanto, é necessário estudar estratégias de controle e sincronização dos sistemas para garantir o funcionamento eficiente do veículo híbrido.

O presente estudo propõe uma análise sistemática e científica da aplicação da MRV em um veículo com um MCI quarto tempo e quatro cilindros, utilizando um conversor do tipo half bridge para partir a MRV em sincronismo com a MCI. Serão apresentados os principais sensores e as estratégias empregadas para a manipulação de suas variáveis, visando viabilizar futuramente a sincronização dos sistemas do veículo e promover a otimização do rendimento do mesmo.

O estudo contribuirá para o avanço no conhecimento sobre a aplicação da MRV em veículos híbridos e oferecerá uma alternativa possivelmente viável para a utilização dos sensores de fase e de rotação da MCI, utilizando como característica de sincronismo com a MRV o ciclo Otto. Além disso, a pesquisa também pode oferecer subsídios para o desenvolvimento de novas tecnologias e estratégias de controle para a aplicação da MRV em veículos híbridos, colaborando para a redução do impacto ambiental dos transportes.

1.2. Objetivos Gerais e Específicos

O objetivo geral deste estudo é avaliar a viabilidade da aplicação da Máquina a Relutância Variável (MRV) 8x6 com quatro fases em um veículo com um Motor de Combustão Interna (MCI) quatro tempos e quatro cilindros, utilizando um conversor do tipo *Half Bridge (HB)* para partir a MRV em sincronismo com a MCI.

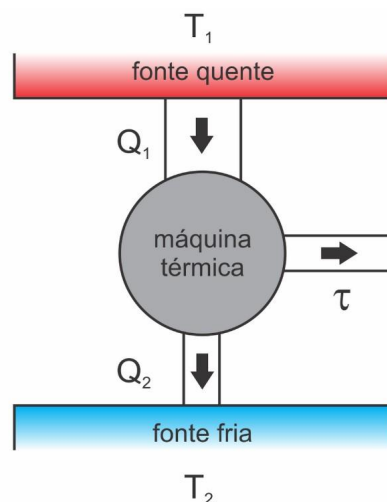
Para atingir esse objetivo geral, os seguintes objetivos específicos serão alcançados: realizar uma revisão bibliográfica sobre as principais características e aplicações da MRV em veículos híbridos; analisar o funcionamento do MCI e seus principais parâmetros de operação; aplicar conceitos já projetados do circuito de acionamento do conversor *HB* para partir a MRV em sincronismo com o MCI; analisar os principais sensores de fase e de rotação do MCI e avaliar sua utilização para sincronização com a MRV; propor formas de simulações do desempenho do sistema proposto. Ao alcançar esses objetivos, espera-se contribuir para o avanço nos estudos de aplicação da MRV em veículos híbridos, fornecendo uma alternativa viável para otimizar o desempenho e a eficiência energética em veículos populares.

2. MÁQUINA A COMBUSTÃO INTERNA - MCI

2.1. Conceitos fundamentais de Motores a Combustão Interna (MCI)

Os motores a combustão interna - MCI são máquinas térmicas que utilizam como princípio de seu funcionamento a transformação de calor em trabalho [9]. Para gerar calor as máquinas térmicas podem ser baseadas em diversos tipos de fonte de energia: explosão de combustíveis, eletricidade, unidades nucleares, etc. [9].

Observando o funcionamento de uma máquina térmica, é possível delimitar um ciclo com duas fontes, o primeiro utiliza o princípio de fonte quente e o segundo de fonte fria. Em cada ciclo, a máquina retira uma quantidade de calor Q_1 da fonte quente, sendo parcialmente convertida em trabalho τ , e destina para a fonte fria a quantidade de calor Q_2 que não foi convertida [11]. Estes ciclos podem ser observados na figura abaixo:



Segunda lei da termodinâmica

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\tau}{Q_1}$$

$$\tau = Q_1 - Q_2$$

$$P = \frac{\tau}{\Delta t}$$

Onde:

η - rendimento

Q_1, Q_2 - calor da fonte quente e fria

P - potência

Δt - intervalo de tempo

Figura 1: Arranjo de conversão de energia utilizado em máquinas térmicas [11].

Os motores a combustão interna são amplamente utilizados em veículos automotores devido à sua alta eficiência e potência em relação a outros tipos de motores [9]. Basicamente, um motor a combustão interna é uma máquina térmica que converte a energia química do combustível em energia mecânica, através da queima do combustível dentro do cilindro do motor [9].

Existem diferentes tipos de motores a combustão interna, sendo os mais comuns os motores a gasolina e a diesel. Os motores a gasolina são usados em veículos de passeio, enquanto os motores a diesel são usados em veículos

comerciais, caminhões e ônibus. Ambos os tipos de motores têm características distintas, como a forma de ignição e a proporção ar-combustível [9].

As especificações técnicas do motor a combustão interna são determinantes para o seu desempenho e eficiência. Dentre as especificações mais relevantes, destacam-se a potência, o torque, a rotação máxima e o consumo de combustível. A potência é a quantidade de energia produzida pelo motor, sendo medida em cavalos-vapor (CV) ou quilowatts (kW). O torque, por sua vez, é a força que o motor consegue gerar, sendo medido em Newton-metro (Nm). A rotação máxima é a velocidade máxima que o motor consegue atingir, sendo medida em rotações por minuto (RPM). O consumo de combustível é a quantidade de combustível que o motor consome para produzir uma determinada quantidade de energia, sendo medido em litros por 100 quilômetros (L/100 km) [9].

A MCI proposta para este trabalho possui um motor de 4 tempos, composto com 4 pistões que geram uma capacidade de 1.000 cilindradas de potência (motores de 1.000 cilindradas admitem 1 litro da mistura ar combustível em um pistão). Neste sistema é possível verificar quatro estágios bem definidos, sendo eles: admissão, compressão, expansão e exaustão. Este ciclo é denominado de **ciclo Otto** [9]. Especificamente para cada etapa do ciclo Otto, serão utilizadas as seguintes definições:

Admissão: nesta fase o pistão realiza admissão da mistura ar combustível na câmara de explosão do pistão. Isso faz com que o pistão realize o trabalho entre dois pontos, denominados de PMS - Ponto Máximo Superior e PMI - Ponto Máximo Inferior. Neste curso o eixo da MCI realiza um deslocamento angular de 180° [9].

Compressão: fase em que ocorre a compressão do volume da mistura ar combustível, admitido na fase anterior. O pistão realiza o deslocamento do PMI até o PMS (realizando um deslocamento angular de 180° no eixo da MCI) - este movimento somente é possível em virtude da interligação que existe entre os demais pistões que se interconectam por um eixo denominado virabrequim - em resposta do movimento realizado por outro pistão na fase de expansão, fase que será explicada a seguir [9].

Expansão: nesta fase a câmara de explosão encontra-se com a mistura ar combustível sob alta pressão. Agora, o controle da MCI envia um comando que energiza a vela de ignição e produz uma faísca internamente à câmara de explosão. O pistão conectado à câmara é impulsionado do PMS até o PMI, realizando um

deslocamento angular de 180° no eixo da MCI [9].

Exaustão: como resultado da fase anterior, são gerados gases internamente na câmara de explosão. Nesta fase a MCI encaminha o comando para uma válvula se abrir e consequentemente os gases são expulsos da câmara, gerando um novo deslocamento de 180° no eixo da MCI, agora do PMI ao PMS [9].

Encontra-se ilustrado abaixo o que acontece em cada um dos cilindros da MCI no decorrer das fases do ciclo Otto.

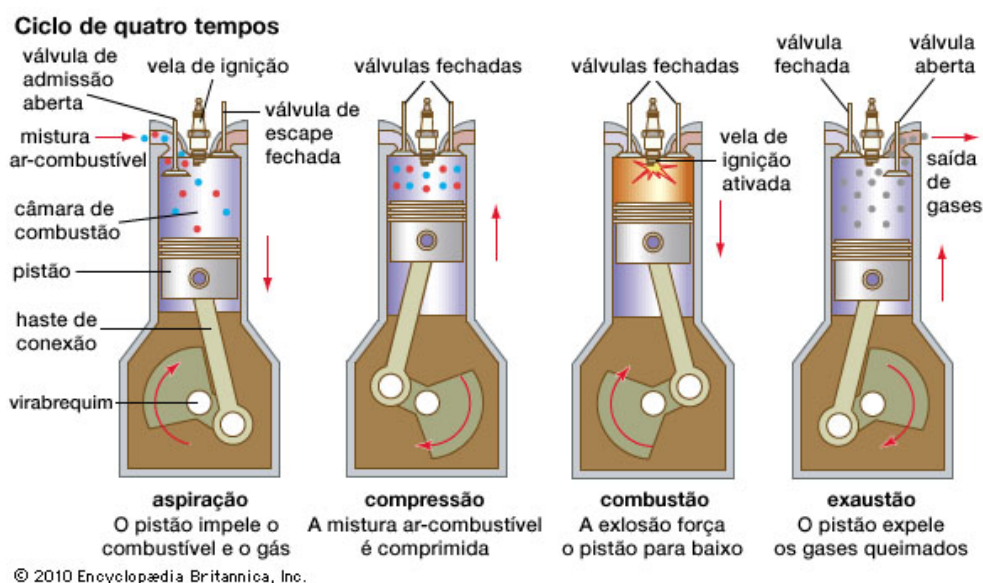


Figura 2: Os quatro tempos do ciclo Otto [11].

Para viabilizar os estudos iniciais de sincronismo entre a MCI e a MRV serão apresentados nas próximas seções deste capítulo os sensores que poderão ser utilizados como instrumentos de aferição de posição do eixo das máquinas.

Para o presente estudo, as especificações técnicas do motor a combustão interna serão obtidas a partir de literatura especializada e de dados fornecidos pelo fabricante. Serão analisados os parâmetros de desempenho e consumo de combustível do motor, bem como sua capacidade de se integrar com a máquina a relutância variável (MRV) e o conversor Half Bridge.

2.2. Sistema digital de injeção eletrônica e sensores

A MCI conta com um sistema de controle digital denominado de UCM (Unidade de Controle do Motor) para promover a injeção eletrônica de combustível na câmara de explosão dos cilindros. Como apresentado anteriormente, a produção

de trabalho na MCI é concebida por intermédio de um arranjo de quatro cilindros trabalhando em coordenação e sincronismo nas diferentes fases do ciclo Otto [11]. O método de sistema digital de controle utiliza de sinais elétricos padronizados fornecidos por sensores, posicionados de forma estratégica na MCI.

O estudo deste trabalho aponta que os sensores desempenham um papel crucial na sincronização entre a Máquina a Relutância Variável (MRV) e o Motor de Combustão Interna (MCI) em um veículo híbrido. Por suas características intrínsecas, eles fornecem informações sobre a posição do virabrequim e do eixo de cames da MCI [9], permitindo assim que sejam dispostas informações cruciais para o conversor *HB* realizar o controle do momento de acionamento da MRV.

2.2.1. Sensor de rotação de motor

Para ser possível realizar o sincronismo no sistema de combustão na MCI, no próprio ciclo otto, a UCM recebe e processa as informações em formato de sinais elétricos [11]. Estes sinais são gerados em ciclos pelo sensor de rotação do motor — conforme ocorre o movimento angular do rotor — que possui a função de capturar informações relativas à posição do rotor da MCI, lendo variações de um disco serrilhado (análogo ao funcionamento do sensor de posição da MRV) e possibilitando a interpretação de velocidade de rotação da MCI pela UCM [11]. O sensor de rotação tem princípio de funcionamento indutivo, necessitando ser posicionado próximo ao disco serrilhado para capturar as variações do disco precisamente [11]. Outra característica deste sensor é a produção de ondas senoidais como resposta das variações do disco serrilhado [11]. Seguem ilustrações com os detalhes do posicionamento do sensor e o gráfico associado à coleta de informações do mesmo.

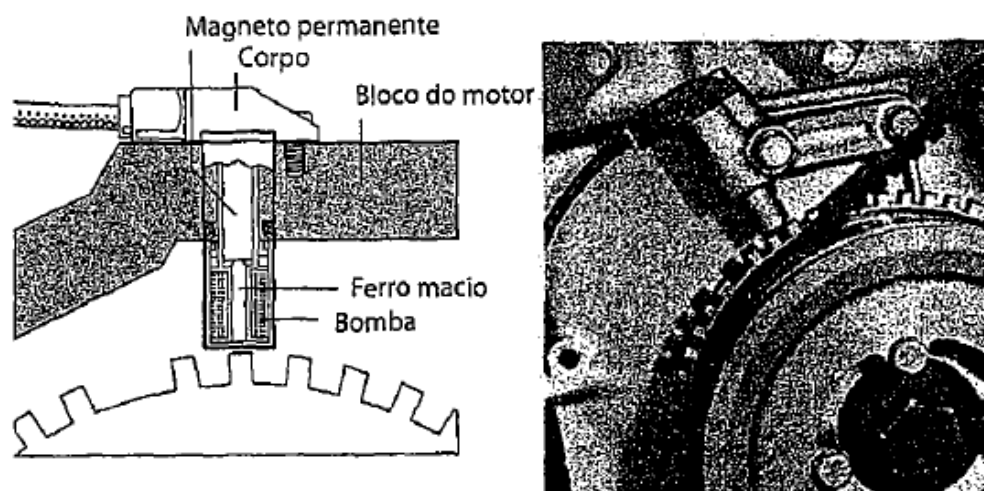


Figura 3: Sensor de presença [11].

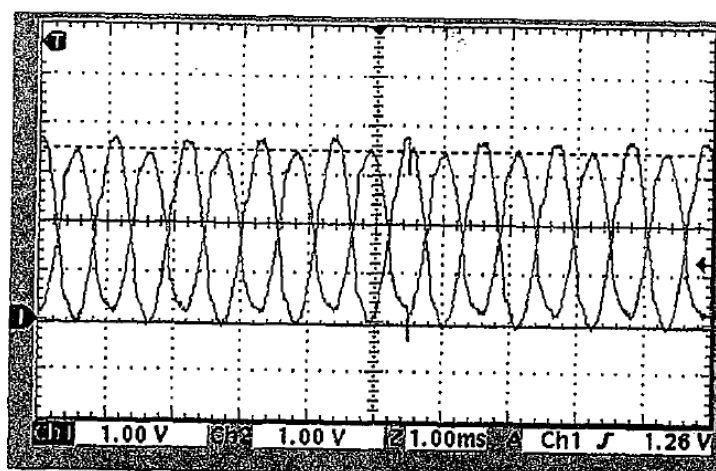


Figura 4: Resposta de sinal senoidal do sensor de rotação da MCI [11].

2.2.2. Sensor de fases do motor

O sensor de fase, é posicionado no cabeçote da MCI, e possui a função de identificar o momento exato em que a UCM deve encaminhar o disparo do sinal de ignição para as velas do motor [11]. Estes sensores são do tipo “efeito Hall”, e realizando a comparação dele ao sensor de rotação indutivo, ele não necessita estar tão próximo ao disco serrilhado para capturar a informação de rotação [11]. Como produto final geram uma onda quadrada, conforme ilustração a seguir.

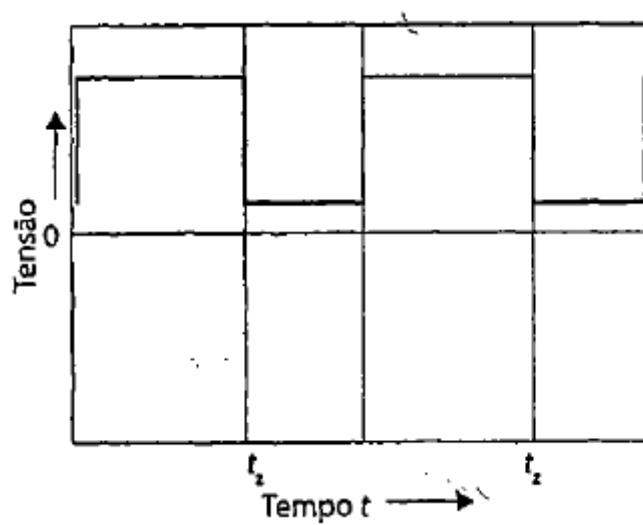


Figura 5: Resposta de sinal quadrado do sensor de fases da MCI [11].

2.3. Conclusão

Este capítulo apresentou os princípios básicos de funcionamento de uma MCI de 4 tempo e 4 cilindros, explorando os conceitos de troca de calor, ciclo otto, e sistema de sinais e controle da MCI.

O próximo capítulo será dedicado a apresentação da MRV.

3. MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL (MRV)

3.1. Princípio de funcionamento, controle e características da MRV

A MRV é uma máquina elétrica de conversão de energia que utiliza a relutância variável como princípio de funcionamento [5 e 8]. Ela é composta por um estator com polos salientes e um rotor sem bobinas [5]. Dessa forma, a MRV apresenta baixo custo de produção e manutenção, além de ser altamente confiável e robusta, o que a torna uma alternativa atraente para aplicação em veículos híbridos.

A MRV pode ser controlada para atingir diferentes velocidades e torques, permitindo sua aplicação em diversas situações, desde aplicações industriais até a utilização em veículos híbridos [8]. Além disso, a MRV possui alta eficiência energética, o que possivelmente vai contribuir para a redução do consumo de combustível e das emissões de gases poluentes.

Na MRV o fluxo magnético é gerado pelos polos do estator e o torque é produzido pela interação entre o fluxo magnético variável e as saliências do rotor [5 e 8]. A MRV possui baixo custo de manutenção mecânica, contando com ausência de bobinas no rotor, e por este motivo torna-se dispensável o uso de escovas (elementos que permitiriam a energização das bobinas no rotor) peças naturalmente concebidas com alto nível de desgaste [5 e 8]. Abaixo segue a ilustração de uma MRV 6x4 (6 saliências no estator e 4 saliências no rotor):

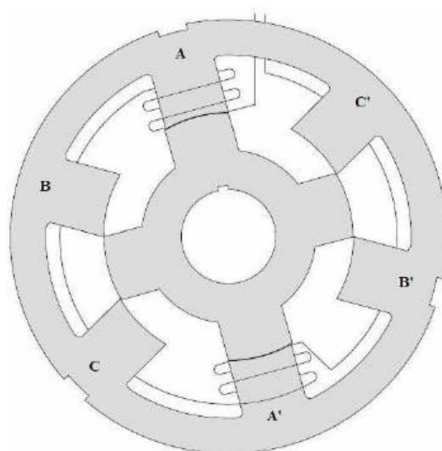


Figura 6: Desenho da seção transversal de uma MRV 6x4, mostrando o enrolamento da fase A [5].

É possível observar na figura 6 um recorte transversal que visa a apresentação do arranjo físico das bobinas, sendo elas alocadas em pares de extremidades opostas nas saliências do estator [5]. Este arranjo detalha a bobina da fase A que se repete analogamente para as demais fases B e C da MRV, concluindo assim que este modelo apresenta três fases distintas em sua composição.

Como característica fundamental para escolha e a aplicação da MRV no presente trabalho, foram observadas suas funções de velocidade, alto conjugado de partida [8], bem como a versatilidade em termos de construção de diversos tipos de topologias, elemento que possui potencial para facilitar o arranjo de sincronismo entre a MRV e a Máquina de Combustão Interna - MCI. Este trabalho aborda a utilização de uma MRV 8x6 tetrafásica escolhida “oportunamente” por possuir semelhanças de disparo com a MCI (um motor de quatro tempos que será apresentado no Capítulo 2). Foram observadas as características e comportamento do MCI 4 tempos, que se assemelham com a MRV 8x6 tetrafásica.

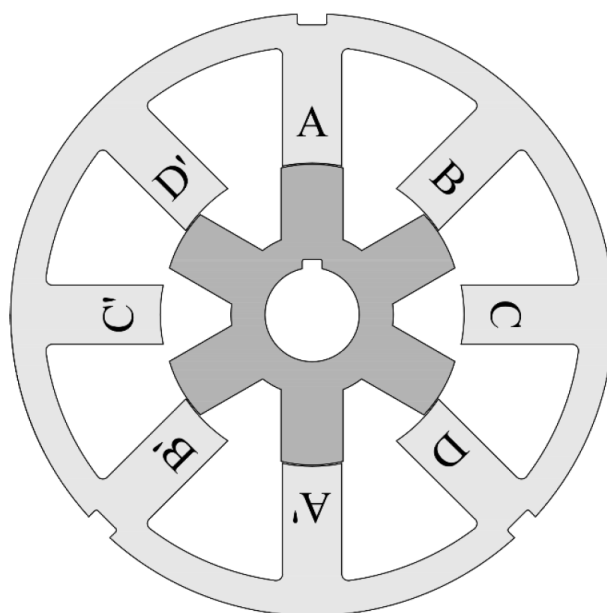


Figura 7: MRV 8x6 tetrafásica [4].

No presente estudo, foi utilizada uma MRV 8x6 tetrafásica (tema explorado no trabalho de conclusão de curso [12]), ou seja, com 8 polos no estator e 6 saliências no rotor, alimentada por um conversor do tipo Half Bridge com quatro fases de disparo. A tabela 1 apresenta valores médios das especificações da MRV utilizada no estudo.

Especificação	Valor
Tensão nominal	230 V
Potência nominal	10 kW
Frequência nominal	60 Hz
Corrente nominal	28 A
Velocidade nominal	3000 rpm
Número de fases	4
Número de polos do estator	8
Número de saliências do rotor	6
Massa aproximada	15 kg

Tabela 1: Especificações da MRV utilizando valores médios [12].

Para viabilizar o funcionamento da MRV, é necessário conhecer o posicionamento instantâneo dos polos do rotor em relação à posição das bobinas do estator [5, 8]. Este procedimento garantirá que as bobinas sejam energizadas e desenergizadas nos pontos ótimos, garantindo a máxima eficiência da MRV [5, 8].

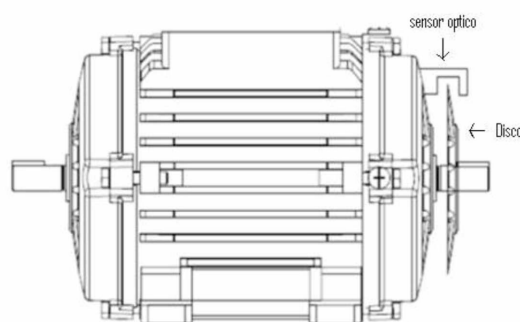


Figura 8: Carcaça, sensor óptico (encoder) e disco serrilhado [5].

Como estratégia para garantir que este procedimento seja realizado com precisão, é instalado no eixo da MRV um disco serrilhado (contendo um número conhecido de saliências) e afixado na parte externa ao rotor um sensor óptico, com a propósitos de monitorar o ciclo de repetições deste disco [5].

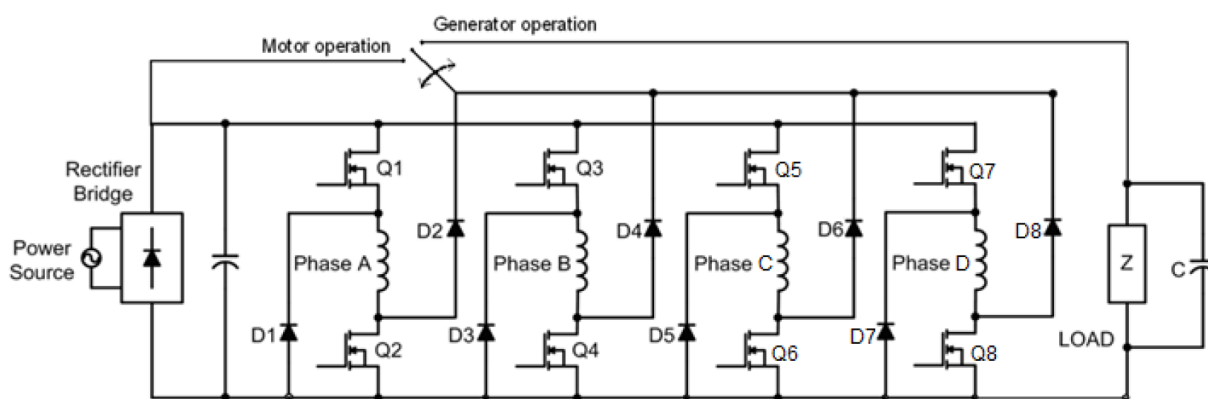


Figura 9: Conversor HB tetrafásico (com quatro braços) [4].

Conforme o rotor realiza deslocamento angular, o sensor óptico captura estes sinais e os encaminha em formato de pulsos elétricos para um microcontrolador [4]. Utilizando estratégias de manipulação digital deste sinal é possível assim determinar com precisão a posição do rotor em relação às bobinas do estador [5, 8]. A MRV 8x6 tetrafásica apresentada neste trabalho utiliza o conversor *HB* ilustrado acima para comandá-la. Este conversor será apresentado em um capítulo dedicado ao seu detalhamento.



Figura 10: Encoder (modelo de sensor óptico). Fonte: ficha técnica EP50S.

O sensor óptico pode ser substituído por outro elemento de instrumentação que capture de forma direta ou indireta a posição do rotor [5], a exemplo o encoder da figura acima.

A MRV é uma máquina elétrica com grande potencial de aplicação em sistemas híbridos de propulsão de veículos, devido às suas características de alto torque e baixo custo [5]. No entanto, para que ela possa ser utilizada em conjunto com um motor a combustão interna, é necessário garantir a sincronização entre as duas máquinas, de modo a obter um funcionamento adequado do sistema. O capítulo 5 tratará desse assunto de forma mais detalhada.

3.2. Modelagem matemática da MRV

Apresentada as características fundamentais da MRV, será apresentado o perfil de comportamento eletromagnético e mecânico da MRV 8x6. Estes conceitos poderão ser aplicados a outras topologias de MRV.

Como o foco deste trabalho é apresentar a MRV operando em sua função motor, é necessário apresentar o comportamento esperado do conjugado.

Para simplificar inicialmente a apresentação desta modelagem, serão desprezados os valores de indutância mútua. A tensão nos terminais da fase da máquina pode ser descrita pela queda de tensão na resistência da bobina e a tensão induzida devido à variação do fluxo concatenado no tempo [7 e 13]:

$$v = R \cdot i + \frac{\partial \lambda}{\partial t}$$

Na equação, i é a corrente, R é a resistência da fase calculada e λ é o fluxo concatenado da bobina [7 e 13].

Existe uma proporcionalidade entre o fluxo e a corrente, apresentado da seguinte forma:

$$\lambda = L \cdot i$$

Na MRV, os valores de indutância estão diretamente relacionados à posição do rotor e da corrente aplicada, sendo $L(i, \theta)$. Se relacionarmos as equações anteriormente apresentadas podemos descrever que:

$$v = R \cdot i + L \frac{\partial i}{\partial t} + i \frac{\partial L}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

A equação anterior pode ser reescrita em função da velocidade angular:

$$v = R \cdot i + L \frac{\partial i}{\partial t} + i \cdot \omega \frac{\partial L}{\partial \theta}$$

Na equação anterior O primeiro termo se refere à queda de tensão na resistência da fase, o segundo termo se refere à queda de natureza indutiva, já o terceiro se refere a uma força contra eletromotriz, FCEM, induzida [13].

Por fim, analisando os parâmetros e saída da MRV, a energia elétrica gera um conjugado eletromagnético que será convertido em um conjugado mecânico, considerando a inércia do sistema e o atrito na estrutura [13]:

$$T_{elm} = T_{mec} + D.\omega + J \frac{d\omega}{dt}$$

Onde D representa o coeficiente de atrito viscoso e J representa o momento de inércia do sistema.

O torque eletromagnético T_{elm} é dado por:

$$T_{elm} = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta}$$

A equação 3.6 mostra que o sentido do torque é determinado pelo sinal do sentido de variação da indutância ($\frac{\partial L}{\partial \theta}$), mas não é influenciado pela corrente, cujo parâmetro se encontra elevado ao quadrado. Essa característica pode ser considerada uma vantagem, pois possibilita a aplicação de uma corrente fluindo em apenas um sentido, diminuindo assim a complexidade dos circuitos de controle [15].

Na figura abaixo podemos observar o comportamento da indutância numa MRV em relação ao posicionamento do rotor, desprezando os efeitos do espalhamento do fluxo e saturação dos materiais [14].

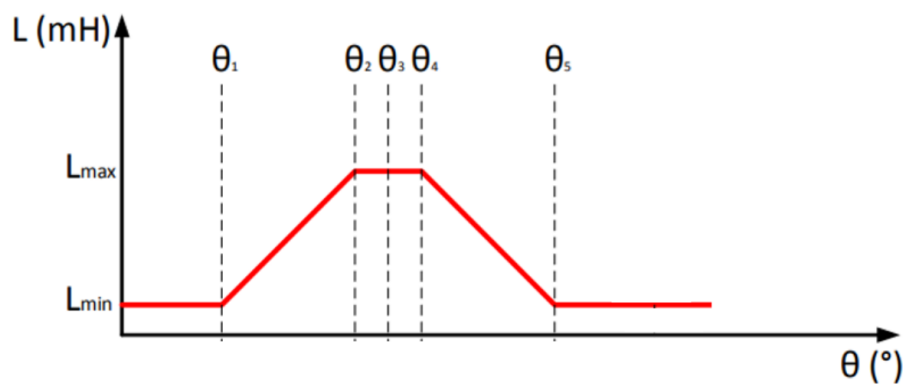


Figura 11: Indutância da MRV em relação ao ângulo do rotor [14].

Entre 0 e θ_1 – posição de completo desalinhamento entre o polo do rotor e do estator. O valor da indutância é mínimo e não há contribuição para o torque do motor.

Na posição θ_1 – ponto inicial da sobreposição do polo do rotor com o estator. Como estamos considerando a máquina atuando como motor, é o ponto em que a fase é energizada.

Entre θ_1 e θ_2 – posição em que se inicia a sobreposição dos polos do rotor e estator. A corrente aplicada provoca um torque positivo na máquina até que a sobreposição seja completa em θ_2 .

Na Posição θ_2 – posição de completo alinhamento dos polos em que a fase deve ser desenergizada.

Entre θ_2 e θ_4 – posição de completo alinhamento entre os polos do rotor e estator. O valor da indutância é máximo e constante, portanto, não há produção de torque, até que a outra fase seja energizada;

Entre θ_4 e θ_5 – posição em que o rotor e estator se desalinham até atingirem a posição de equilíbrio instável, na qual estão completamente desalinhados. A indutância decresce e a relutância aumenta devido à geometria da máquina. Com a energização da fase nesta posição, será produzido um torque negativo, fazendo a MRV operar como gerador, porém, esta etapa não será abordada neste trabalho. **Fonte: [13], página 25 e 26.**

Na análise prática, o comportamento da indutância em MRVs podem ser interpretados exatamente como ilustrado no gráfico anterior, devido à saturação magnética dos materiais que causam uma curvatura próxima aos pontos de alinhamento do rotor e estator, gerando um conjugado negativo [16].

3.3. Análise dos sinais da MCI para sincronização da MRV

A sincronização adequada da MRV com o motor a combustão interna é uma etapa crítica para a operação eficiente e confiável do veículo híbrido. Várias estratégias de sincronismo foram consideradas, sendo feitos estudos de literatura buscando a melhor projeção para o problema, desde o uso de sensores de posição do virabrequim até o uso de sinais de injeção de combustível e ignição para estimar o ciclo do motor.

Uma das opções é fazer o uso de sensores de posição do virabrequim, que medem a posição angular do virabrequim e fornecem informações sobre a posição do pistão no ciclo de combustão [9]. Esses sensores podem ser usados para

determinar o momento da ignição e da injeção de combustível, bem como para sincronizar a MRV com o ciclo do motor [9].

Outra estratégia é o uso de sensores de fase da árvore de cames para determinar a posição dos pistões e sincronizar a MRV com o ciclo do motor [9]. Esses sensores conseguem fornecer informações sobre o tempo de abertura e fechamento das válvulas, permitindo uma sincronização precisa da MRV com o ciclo do motor. Os sinais gerados por estes sensores podem ser usados para estimar a posição do pistão no ciclo de combustão e sincronizar a MRV com o ciclo do motor. No entanto, a precisão desses métodos depende da precisão da injeção de combustível e do sistema de ignição, bem como do tempo de resposta dos sensores [9].

É importante notar que a estratégia de sincronização escolhida deve conseguir lidar com as variações nas condições de operação do motor, como mudanças na carga e na velocidade. Além disso, a estratégia deve conseguir lidar com possíveis falhas nos sensores, garantindo a operação segura e confiável do veículo híbrido.

3.4. Conclusão

Ao analisar o perfil dos sinais coletados pelos sensores de fase e de posição da MCI, é possível estabelecer uma correlação com os sinais do sensor de posição da MRV. Neste sentido, e utilizando este critério para a aproximação das topologias das máquinas, este trabalho apresenta uma proposta de estudo do controle para uma MRV 8x6, utilizando-se dos dois sensores encontrados na MCI por haver similaridade de funções.

4. CONVERSOR HALF BRIDGE (HB)

4.1. Introdução a conceitos e critérios de escolha do conversor HB

Este capítulo é dedicado a explorar os principais conceitos do conversor *Half Bridge*, visando evidenciar a sua escolha como uma possível solução para partir uma MRV em sincronismo com uma MCI.

Os conversores *Half Bridge* são amplamente aplicados na indústria como acionamento de motores elétricos (sendo comumente empregados em sistemas de controle de velocidade) devido às suas características de alta eficiência e capacidade de manipular a tensão da carga de tal forma que chegue ao ponto ótimo de energização das bobinas do motor [2, 3 e 4].

Antes de apresentar as características do conversor HB, e para ser possível explicar o critério de escolha deste equipamento como elemento de disparo da MVR 8x6, é necessário detalhar algumas características da MRV.

As indutâncias próprias e mútuas, em uma MRV, são intensamente variáveis, dada a sua topologia com polos salientes [4 e 8]. Assim sendo, a indutância varia conforme a posição angular do rotor e da corrente elétrica [5].

A indutância pode ser escrita como a relação do fluxo concatenado pela corrente instantânea:

$$L = \frac{\lambda [Wb]}{i [A]} [H]$$

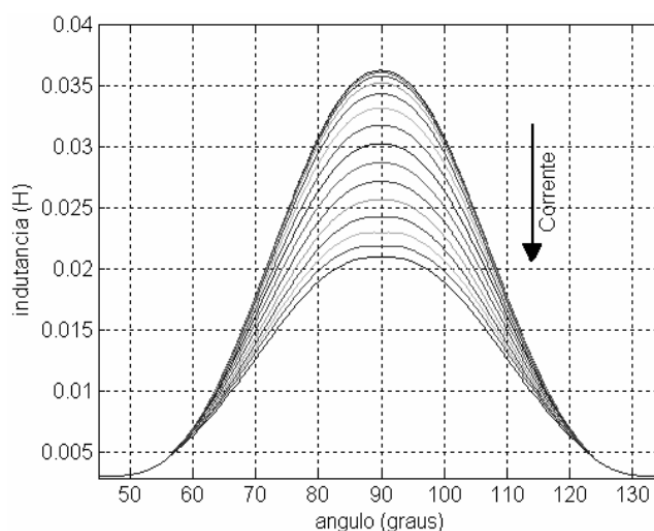


Figura 12: Curva de indutância observada em uma fase de uma MRV [5].

A MRV, como já apresentada no capítulo anterior, apresenta comportamentos de motor e gerador. Para acessarmos o modo de operação da MRV como motor, é imprescindível que a excitação (energização) de suas respectivas bobinas, sejam realizadas durante o período em que a variação de indutância se apresenta positiva [5].

$$T_{\text{emg}} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(i,\theta)}{d\theta} \geq 0$$

Em caráter análogo, quando o conjugado (T_{emg}) for menor ou igual a zero, a variação de indutância será negativa, sendo este o momento da energização da bobina para acionamento da MRV como gerador [5].

$$T_{\text{emg}} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(i,\theta)}{d\theta} \leq 0$$

Então é possível afirmar que a variação de sentido do conjugado em uma Máquina de Relutância Variável (MRV) está diretamente relacionada à derivada da indutância em relação à posição angular do rotor [4]. Portanto, é fundamental conhecer a posição angular do rotor para realizar o chaveamento correto no conversor HB, garantindo a eficiência e rendimento da máquina.

A MRV opera como motor ou gerador depende do chaveamento em seu conversor. O momento ideal para chavear influencia a eficiência e o rendimento da máquina, já que define os pulsos no perfil de indutância de cada fase. Para saber a posição angular do rotor em relação à fase, podem ser implantados sensores ópticos ou *encoder* no rotor da máquina.

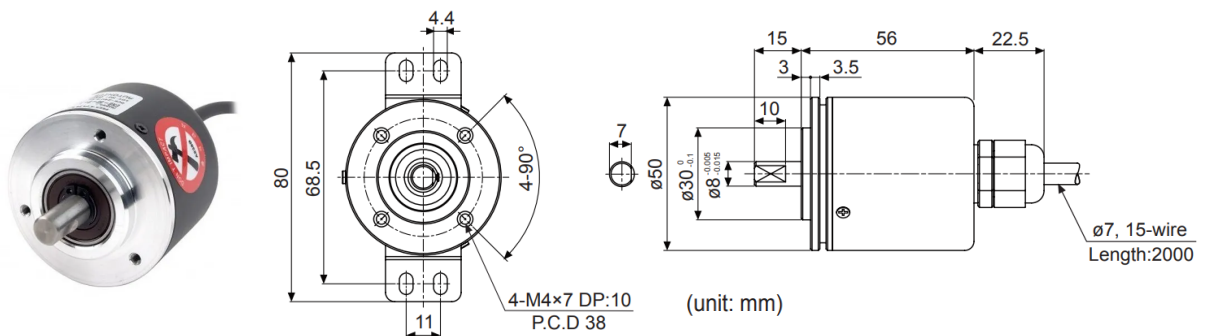


Figura 13: Encoder e desenho em perspectiva. Fonte: ficha técnica EP50S.

O encoder é um transdutor rotativo que codifica movimento ou posição angular em sinais digitais. Estes sinais serão enviados para tratamento em um microprocessador (Arduino), que decodifica o sinal do transdutor e gera o sinal de comando para o chaveamento das fases da MRV [4].

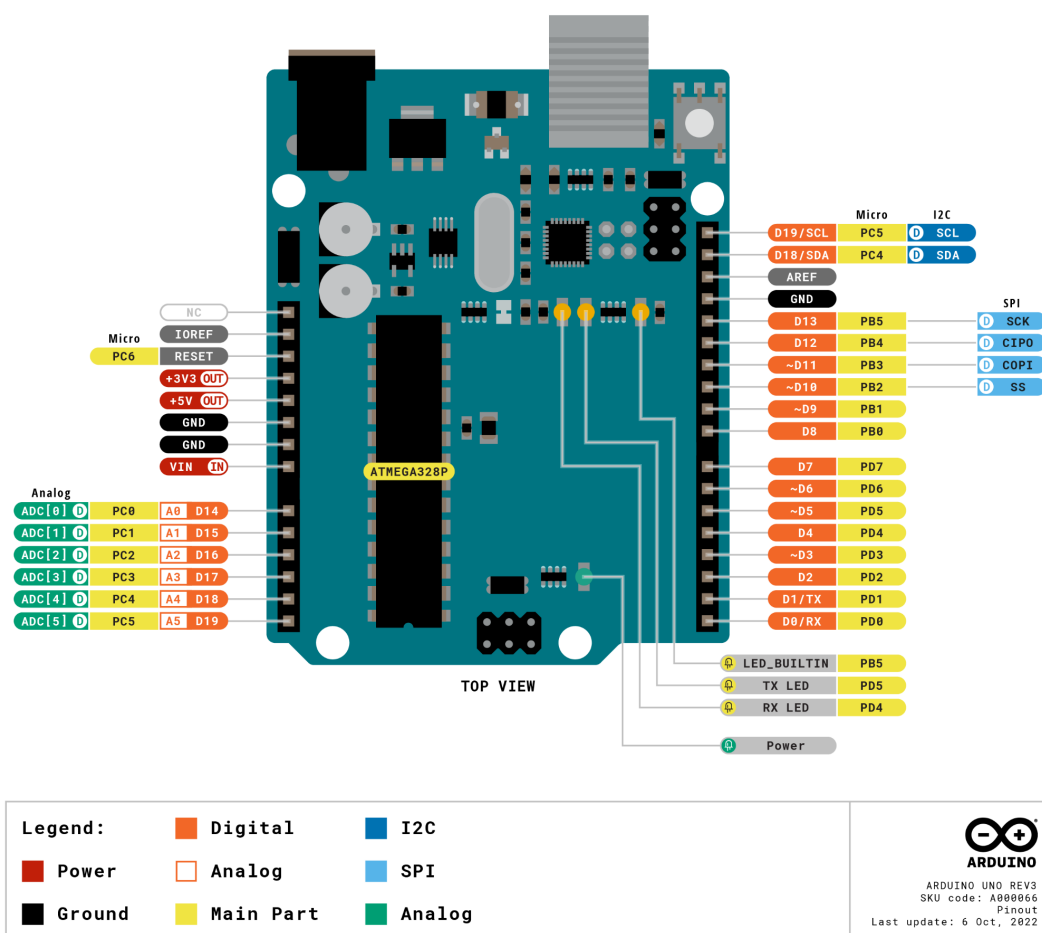


Figura 14: Representação gráfica da pinagem do Arduino UNO R3.
Fonte: ficha técnica Arduino.

As bobinas em uma MRV são acionadas de forma independente, o que significa que cada bobina está sempre em série com pelo menos uma chave do conversor *HB*. Outra característica da MRV é que não há acoplamento magnético entre as fases, sendo sempre necessário cautela com caminho do campo magnético armazenado nas fases durante a comutação das chaves. Isso pode aumentar a tensão nas bobinas, provocar falhas no chaveamento e gerar conjugado negativo. O comportamento desse campo magnético depende, entre outros fatores, da topologia do conversor utilizado [4].

4.2. Princípio de funcionamento do *Half Bridge* (HB)

Conforme dito anteriormente, o conversor *HB* proposto neste trabalho irá partir e manter em funcionamento uma MRV 8x6 tetrafásica, conforme ilustração abaixo.

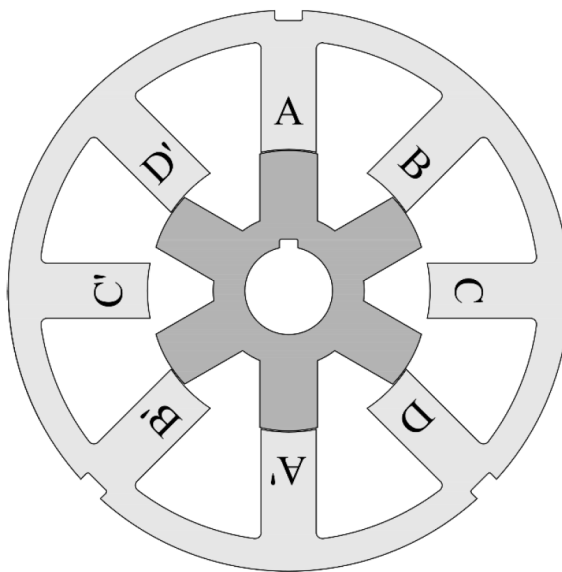


Figura 15: MRV 8x6 tetrafásica [4].

O circuito do conversor *HB*, acompanha a proposta da MRV 8x6, contendo em sua construção quatro “braços” que serão detalhados neste capítulo.

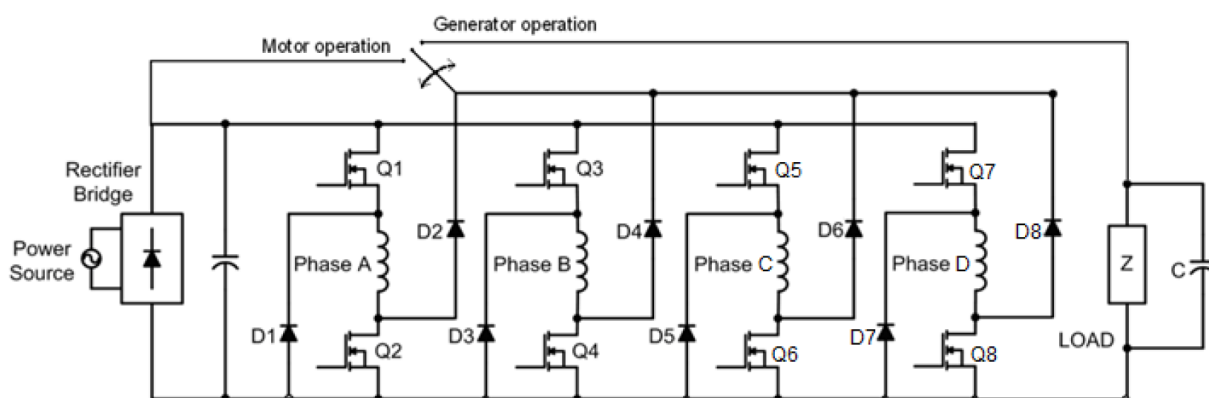


Figura 16: Conversor HB tetrafásico (com quatro braços) [4].

Por um critério didático, este tópico é apresentado com a forma mais singular do comportamento do conversor *HB*. Sendo assim, segue aos próximos parágrafos a explicação de um “braço” do conversor *HB*, que representa uma das quatro fases do conversor utilizado neste trabalho.

Para analisar de forma sistemática o princípio de funcionamento do conversor *Half Bridge*, dispõe-se abaixo uma ilustração de representação do circuito de disparo de uma bobina da MRV, também chamado de um braço do conversor HB [4 e 8]. Neste circuito são utilizadas duas chaves estáticas - c1 e C1, podendo ser utilizado Transistores Mosfets (*Metal-Oxide-semiconductor Field Effect Transistor*) ou IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor* ou Transistor Bipolar de Porta Isolada em português) e dois diodos - d1 e D1 de potência [4].

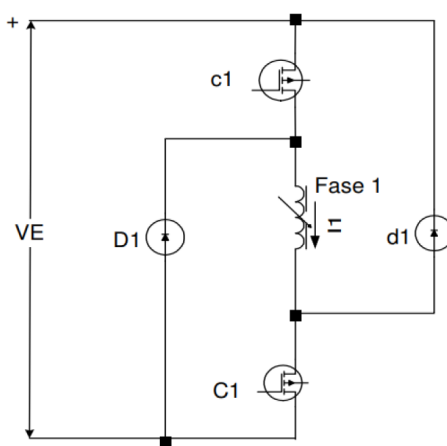


Figura 17: Um “braço” do conversor HB [8].

Para ser possível analisar seu funcionamento, é necessário entender que o conversor *Half Bridge* (HB) opera nas seguintes etapas:

1^a. Fase - Excitação: destinado ao momento de aplicação de tensão na bobina, esta etapa tem início bem definido e influenciará diretamente no rendimento da MRV.

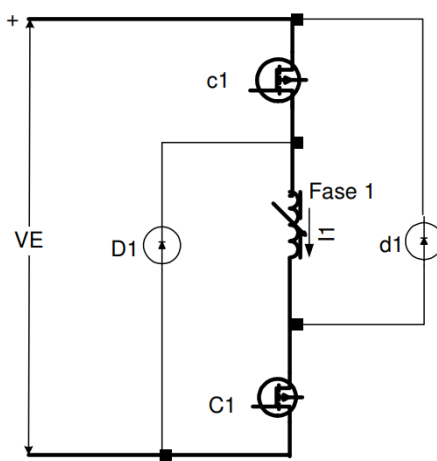


Figura 18: Detalhe em realce do circuito de disparo na fase de excitação da MRV [8].

Na etapa de **excitação**, o conversor *Half Bridge* (HB) é disparado com a informação de posição do polo da MVR, capturada graças a presença de um encoder, mencionado anteriormente. Lembre-se, o encoder é um sensor magnético de presença, que informa ao conversor a posição do rotor. Quando o rotor estiver na posição previamente definida na memória do microprocessador, as chaves c1 e C1 serão fechadas simultaneamente, submetendo a bobina da MRV a tensão da fonte CC (Ve). Neste momento fluirá a corrente (I_1) da fase analisada [4, 7, 8].

2ª. Fase - *Freewheel*: fase que desmagnetiza a bobina e limita a corrente da MRV.

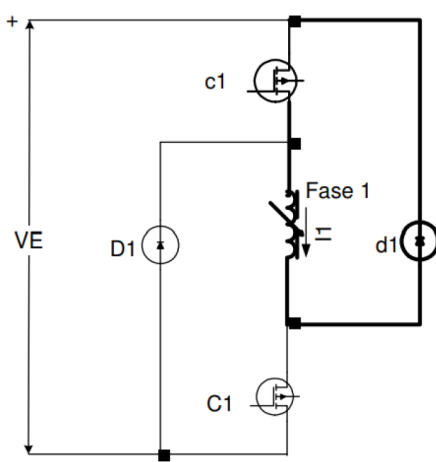


Figura 19: Detalhe em realce do circuito na fase de freewheel [8].

Após a fase de excitação alcançar o valor de referência, estabelecido no

microcontrolador (Arduíno) as chaves c1 e C1 são abertas, e continua a fluir corrente na bobina desta fase em razão da polarização direta do diodo d1 possibilitando a desmagnetização parcial acumulada nesta fase.

3ª. Fase - Regeneração: etapa em que a bobina “descarrega” a energia armazenada em seu campo magnético (por efeito de histerese).

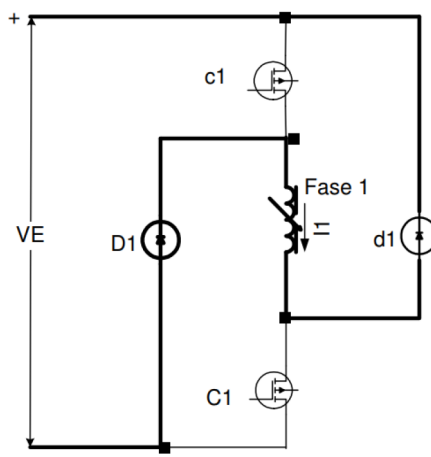


Figura 20: Detalhe em realce do circuito na fase de regeneração [8].

Nesta fase as chaves c1 e C1 são abertas, bloqueando a passagem de corrente fornecida pela fonte (Ve) na Fase 1 [4]. A energia armazenada na bobina por efeito de histerese polariza diretamente os diodos D1 e d1 e continua a fluir corrente na bobina. O estágio de regeneração é importante para o bom desempenho do MR, pois a energia gasta na excitação das fases é alta quando comparada a energia utilizada para a conversão de energia [4].

4ª. Fase - Desativação: curto período em que pode ser observada a indutância negativa na bobina. Neste instante, ao término da etapa de regeneração, a corrente (I_1) é anulada.

Os conversores Half Bridge são particularmente adequados para a operação de motores elétricos devido à sua capacidade de fornecer tensão CA em uma frequência controlada e a capacidade de variar a tensão CA conforme a necessidade do sistema [4, 7 e 8]. Eles são comumente usados em aplicações de veículos elétricos e híbridos, onde a necessidade de controle de velocidade e gerenciamento de energia é crítica para a operação do sistema [7].

4.3. O Half Bridge (HB) - Aspectos construtivos

Todo o conteúdo apresentado nesta seção está baseado no trabalho de conclusão de curso referência [4], sendo recomendada a leitura do texto original para compreensão plena dos conceitos que serão explorados neste trabalho. Na sequência serão apresentadas as principais etapas percorridas para a construção do conversor HB.

Para melhor entendimento, o trabalho foi dividido em duas partes: a primeira está dedicada a detalhar a interface de comando, integrada com o circuito de acoplamento, elo que conexão entre a interface de comando e a segunda parte do conversor, o circuito de potência com as IGBTs utilizados para gerar os “pulsos” na MRV.

A seguir é possível visualizar na figura 21 a apresentação do *layout* do circuito de comando com o detalhamento das placas do microprocessador (Arduíno), a placa de captura dos sinais do encoder da MRV e o circuito e o circuito *drive* de acoplamento.

As placas do contendo os microprocessadores (Arduíno) são responsáveis por realizar o processamento lógico dos sinais que recebem do encoder e transmitir comando para o circuito de potência de forma coordenada e sincronizada [4]. O tratamento do sinal analógico do encoder é realizado em algumas fases de programação e podem ser encontrados os maiores detalhes no trabalho [4].

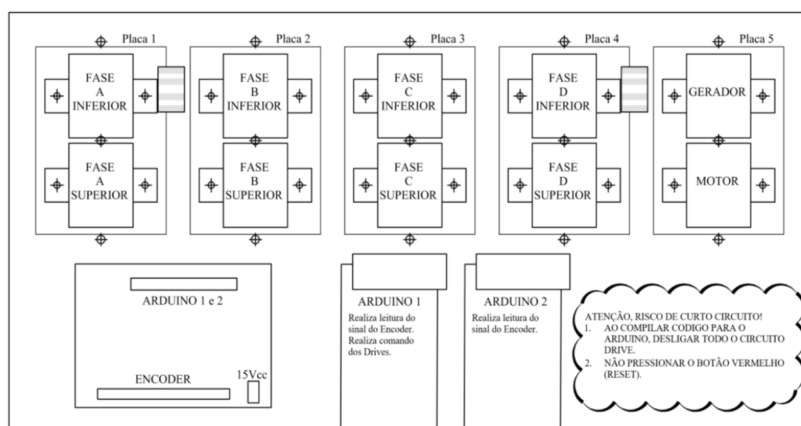


Figura 21: Layout do conjunto de placas que compõem a fase de comando do conversor HB [4].

Na extremidade inferior esquerda é possível observar a placa receptora do sinal do encoder. Ao lado direito desta placa estão posicionados as duas placas de Arduino, que contém a programação capaz de realizar o processamento do sinal. Na parte superior existem 5 placas dedicadas a realizar o acoplamento entre o circuito de comando e o circuito de potência, denominadas de *drives* [4]. O drive apresentado faz o acoplamento entre as interfases de forma óptica, utilizando o dispositivo (HCPL-4503) abaixo detalhado.

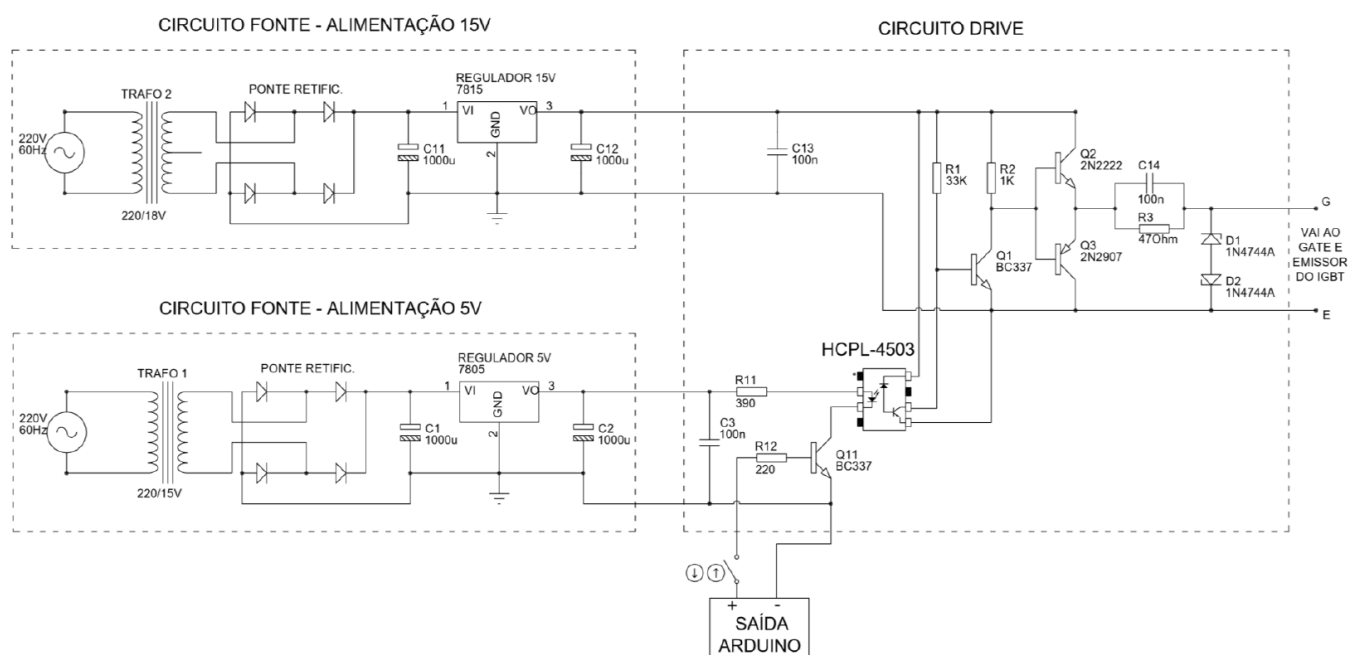


Figura 22: Detalhamento do circuito Drive com sua alimentação e conexões com o circuito de comando [4].

Este circuito é necessário para viabilizar a divisão entre o circuito de comando (que trabalha com tensões de 3,3 Vcc ou 5 Vcc) do circuito *drive* que vai sensibilizar o gate dos IGBTs com a tensão de aproximadamente 15 Vcc.

Segue abaixo apresentação do layout contendo a segunda parte do conversor HB apresentando o circuito de potência.

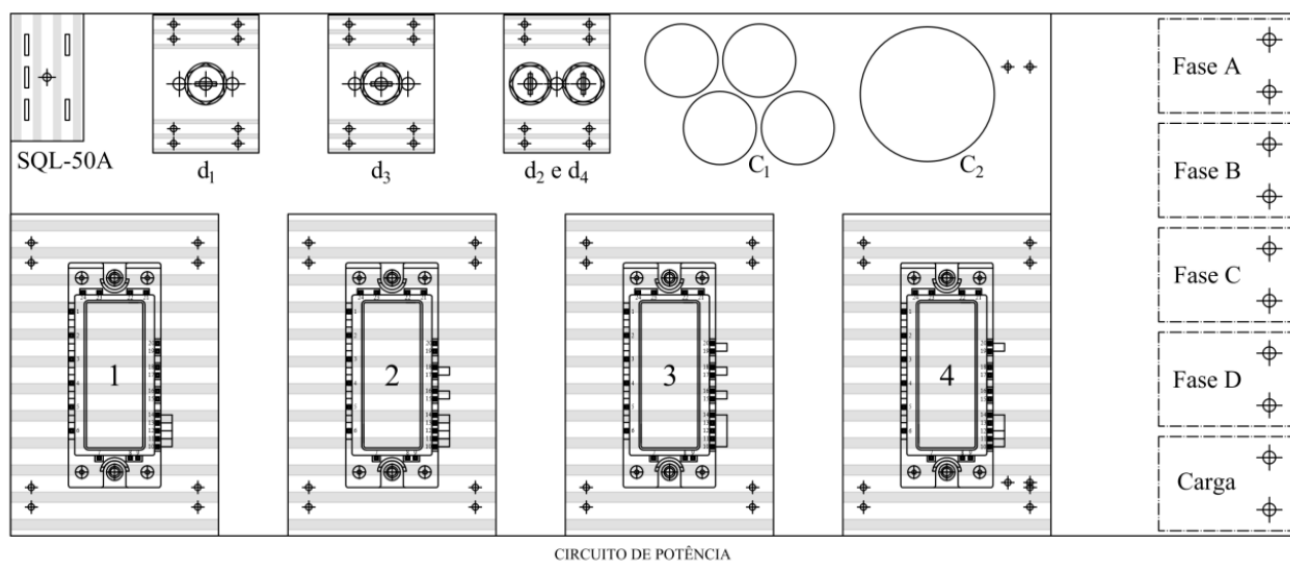


Figura 23: Detalhamento do circuito Drive com sua alimentação e conexões com o circuito de comando [4].

Na figura acima é possível identificar os seguintes elementos: na extremidade direita superior o conversor/retificador CA/CC SQL-50A; na sequência da esquerda para a direita estão fixados os diodos d_1 , d_3 , d_2 e d_4 (utilizados no circuito como chaves polarizadas a necessidade da topologia); em seguida estão fixados os capacitores C_1 e C_{11} de 1000uF (reguladores de tensão), C_2 e C_{12} de 1000uF (aplicados para redução de *ripple*) e o C_{13} de 100uF (aplicado como filtro de frequências indesejadas); do canto inferior esquerdo em sentido para a direita estão as chaves IGBTs 1 à 4; na extremidade à direita estão dispostas as saídas de disparos para as fases da MRV de A à D; e no canto inferior direito encontra-se a conexão para a Carga.

Abaixo é possível ter uma visão macro do conversor HB proposto com todas as suas partes montadas.

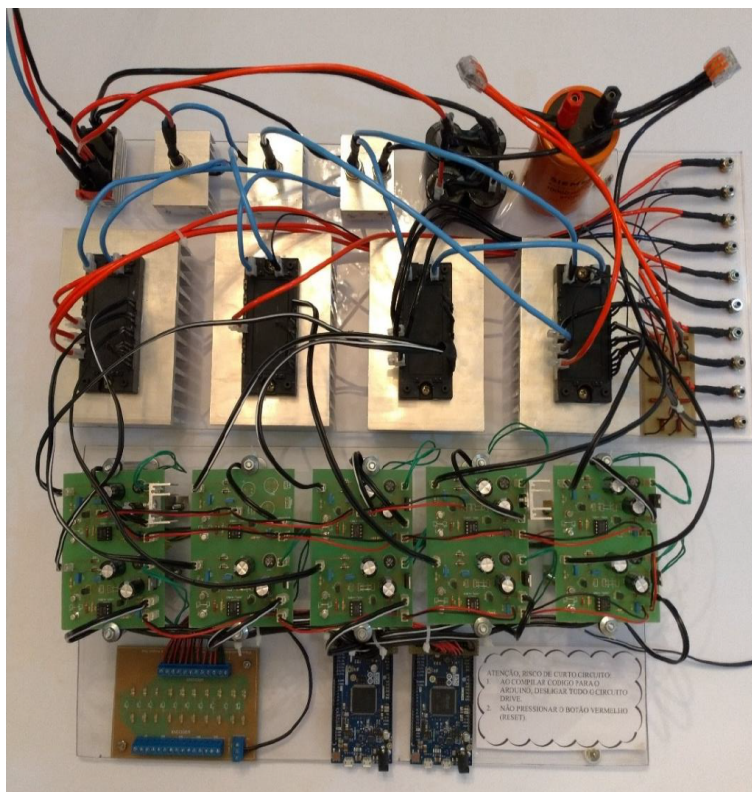


Figura 24: Visão completa do conversor HB montado em bancada [4].

É importante reforçar que o presente trabalho faz referência ao conversor já proposto em pesquisas sobre aplicações da MRV como motor e gerador, não sendo objeto deste trabalho a especificação completa do conversor. A especificação completa do conversor *HB*, bem como a lista de materiais e componentes utilizados, pode ser encontrada no trabalho [4].

4.4. Conclusão

A escolha do conversor *HB* como solução para acionamento da MRV em paralelo com a MCI é construída a partir do conceito de similaridade entre o comando das presentes máquinas, podendo assim ser feito um paralelo de funcionamento entre elas e possivelmente aplicação de solução como uma futura solução de interface de comunicação.

Serão apresentados como composição de trabalhos futuros a aplicação real

de um conversor *HB* como instrumento para disparar a MRV em sincronismo com uma MCI, vislumbrando tornar a proposta deste trabalho em um objeto científico mais palpável.

5. SINCRONISMO DA MCI E A MRV

5.1. Manipulação dos sinais dos sensores do veículo a combustão

Os veículos a combustão interna possuem diversos sensores que fornecem informações sobre o funcionamento do motor e do sistema de transmissão. Estes sensores são essenciais para o correto funcionamento do veículo e podem ser utilizados de forma estratégica para melhorar o desempenho do sistema híbrido, que envolve a combinação de uma máquina térmica e uma máquina elétrica.

Sendo fundamental para o entendimento deste trabalho, se faz necessário realizar a manipulação dos sinais dos sensores do motor, que fornecem informações importantes sobre a posição do virabrequim, a rotação do motor, a posição do pistão e a abertura das válvulas.

A manipulação desses sinais pode ser feita por meio de um microcontrolador, que recebe os sinais dos sensores e realiza a interpretação dos dados, gerando informações precisas sobre o ciclo do motor [4]. Essas informações são utilizadas para controlar a máquina a relutância variável por meio do conversor *HB*, garantindo que a MRV seja ligada e desligada em sincronismo com o motor a combustão interna.

Para a realização da manipulação dos sinais dos sensores, é necessário entender o funcionamento de cada um deles, e como eles podem ser utilizados para gerar informações úteis sobre o ciclo do motor.

Dentre os principais sensores presentes em um veículo a combustão, destacam-se: sensor de temperatura do motor, sensor de rotação do motor, sensor de posição do pedal do acelerador, sensor de posição do virabrequim, sensor de posição da borboleta do acelerador, entre outros [9]. Estes sensores fornecem informações sobre a temperatura do motor, a velocidade de rotação do motor, a posição do pedal do acelerador, a posição do virabrequim, a posição da borboleta do acelerador, entre outras variáveis importantes para o funcionamento do veículo.

O principal objetivo da sincronização é garantir que as máquinas trabalhem em conjunto, de forma eficiente e com mínimo desperdício de energia. Para isso, é necessário que as variáveis fornecidas pelos sensores sejam tratadas e processadas de forma adequada.

Existem diversas estratégias de manipulação dos sinais dos sensores, que podem ser utilizadas para garantir a sincronização das máquinas. Uma das principais estratégias é a utilização de técnicas de controle de feedback, que permitem monitorar as variáveis do sistema e ajustar os comandos enviados para as máquinas conforme as variações observadas [9].

Além disso, é possível utilizar algoritmos de processamento de sinais para filtrar e ajustar os sinais dos sensores, eliminando ruídos e melhorando a precisão das leituras [3]. Estas técnicas de processamento de sinais podem ser utilizadas em conjunto com técnicas de controle de feedback para melhorar o desempenho do sistema híbrido.

A manipulação dos sinais dos sensores do veículo a combustão é essencial para garantir a sincronização das máquinas a relutância variável e a máquina térmica em um sistema híbrido. A utilização de técnicas de controle de feedback e de processamento de sinais pode melhorar o desempenho do sistema, garantindo um funcionamento eficiente e com mínimo desperdício de energia.

5.2. Estratégias para sincronização da MRV com o motor a combustão interna

A sincronização adequada da MRV com o motor a combustão interna é uma etapa crítica para a operação eficiente e confiável do veículo híbrido. Várias estratégias de sincronização têm sido propostas na literatura, desde o uso de sensores de posição do virabrequim até o uso de sinais de injeção de combustível e ignição para estimar o ciclo do motor.

Uma das estratégias mais comuns é o uso de sensores de posição do virabrequim, que medem a posição angular do virabrequim e fornecem informações sobre a posição do pistão no ciclo de combustão. Esses sensores podem ser usados para determinar o momento da ignição e da injeção de combustível, bem como para sincronizar a MRV com o ciclo do motor.

Outra estratégia é o uso de sensores de fase da árvore de cames para determinar a posição dos pistões e sincronizar a MRV com o ciclo do motor. Esses sensores conseguem fornecer informações sobre o tempo de abertura e fechamento das válvulas, permitindo uma sincronização precisa da MRV com o ciclo do motor.

Além disso, as estratégias baseadas em sinais de injeção de combustível e ignição têm sido amplamente estudadas. Estes sinais podem ser usados para

estimar a posição do pistão no ciclo de combustão e sincronizar a MRV com o ciclo do motor. No entanto, a precisão desses métodos depende da precisão da injeção de combustível e do sistema de ignição, bem como do tempo de resposta dos sensores.

É importante notar que a estratégia de sincronização escolhida deve poder lidar com as variações nas condições de operação do motor, como mudanças na carga e na velocidade. Além disso, a estratégia deve conseguir lidar com possíveis falhas nos sensores, garantindo a operação segura e confiável do veículo híbrido.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo representa uma contribuição importante para a área de motores híbridos propondo a aplicação de uma MRV 8x6 com quatro fases, em um veículo com um MCI quarto tempo e quatro cilindros, utilizando um conversor do tipo *half bridge* para partir a MRV em sincronismo com a MCI. Como entrega significativa para o avanço nos estudos de aplicação da MRV em veículos híbridos, o presente trabalho apresenta como uma alternativa viável a utilização dos sensores de fase e de rotação da MCI, utilizando como característica de sincronismo com a MRV o ciclo Otto. Ademais, como sugestão de posicionamento da MRV no veículo, e para fins de estudos de amostragem científica iniciais, o presente trabalho indica a inserção desta máquina no lugar do compressor do sistema de ar condicionado. Para o presente experimento é necessário realizar a desativação do sistema de ar condicionado, bem como promover a perfeita relação de transformação das polias que interconectam o eixo diferencial do carro a MRV.

Para trabalhos futuros, os pesquisadores deverão considerar que a aplicação prática da solução de sincronismo de uma MRV a um veículo com uma MCI, se dará para carros populares, que já se encontram em condições de uso diversas, sendo esta variável de suma importância para viabilizar o sincronismo.

7. PREVISÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Seguem as propostas para trabalhos futuros com aplicação direta ou indireta para veículos híbridos:

- Estudo dos sinais digitais de centrais de controle de veículos a combustão interna.
- Implementação dos sinais dos sensores da MCI para disparo das bobinas de uma MRV.
- Estudo de alternativas de posicionamento de uma MRV em um veículo a combustão interna.
- Diferença entre os modos operacionais da MRV analisando: sincronismo total, parcial ou com regeneração em veículos híbridos.
- Recodificação de centrais de controle de veículos a combustão interna.
- Investigação de novas estratégias de sincronização do motor a combustão interna e da MRV em veículos híbridos.
- Desenvolvimento de novas técnicas de controle para maximizar a eficiência energética em veículos híbridos com MRV.
- Investigação da viabilidade técnica e econômica do uso de MRVs em sistemas de tração de veículos elétricos.
- Desenvolvimento de um protótipo de veículo híbrido com MRV e avaliação do seu desempenho em relação a veículos convencionais.
- Análise de outras topologias de conversores eletrônicos para aplicações em veículos híbridos e elétricos.
- Investigação da influência de diferentes tipos de sensores na sincronização do motor a combustão interna e da MRV.
- Desenvolvimento de novos algoritmos de controle para a sincronização do motor a combustão interna e da MRV em veículos híbridos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CASTRO, B. H. R.; FERREIRA, T. T. **Veículos Elétricos: Aspectos básicos, Perspectivas e Oportunidades**. BNDES Setorial, n. 32, p. 267-310, Rio de Janeiro, 2010.
- [2] MILLER, T.J.E. **Electronic Control of Switched Reluctance Machines**. Oxford: Newnes. 2001. xiv. 272 p.
- [3] ABDELFADEL, R., SZÁMEL, L. **Drives and Control Techniques**. State of the Art Of Switched Reluctance Motor Twent Conference (MEPCON), 2018.
- [4] GUIMARÃES, R. N.; PEREIRA, D. G. **Projeto e Construção de Conversor para Máquinas a Relutância Variável 6x4, 6x6, 8x6 e 12x8**. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Elétrica – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2019.
- [5] DIAS, Renato J., “**Inovações no Projeto de Geradores a Relutância Variável com Estudo das Influências da Saturação Magnética e das Indutâncias Mútuas**” Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais. Abril, 2017.
- [6] KRISHNAN, R. **Switched Reluctance Motor Drives: Modeling. Simulation. Analysis. Design and Applications**. Boca Raton: CRC Press. 2001. (Industrial Electronic Series).
- [7] FELIPE, Letícia Abdias. **Desenvolvimento de um controle de corrente para a Máquina a Relutância Variável 6X4 operando como motor**. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Itumbiara, Goiás. Dezembro, 2019.
- [8] SILVEIRA, A. V. F. **Modelagem, Construção, Testes e Análise de Desempenho de um Gerador a Relutância Chaveado**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. Abril, 2008.
- [9] BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna: volume 1**. Franco Brunetti. – São Paulo: Blucher, 2012.
- [10] BRAGA, Newton C. **Eletrônica Automotiva: 1ª edição**. Newton C. Braga – São Paulo – Brasil, 2013.
- [11] HALLIDAY, D.; WALKER, J.; RESNICK R. **Fundamentos de Física - Volume 1 Mecânica**. 8.ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- [12] ASSUNÇÃO JÚNIOR, José Maurício Beira de. **Projeto construtivo de máquina a relutância variável para carro híbrido**. Trabalho de Conclusão de

Curso – Bacharelado em Engenharia Elétrica – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2022.

[13] SOUZA, **Danielle Bernardes de. Uso do FEMM para simulação das curvas de indutância de uma máquina a relutância variável aplicada a um carro híbrido.** Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Elétrica – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2022.

[14] FILHO, M. J. de M.; GOMES, L. C.; ANDRADE, D. A. de; JUNIOR, J. A. dos S.; SOUZA, W. G. de; OLIVEIRA, C. A. **Proposta de Plataforma para Estudo de Motor a Relutância Variável 8/6.** XIV CEEL, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

[15] SCHIMID, V. A. **Análise da Dinâmica das Linhas de Fluxo Magnético, Torque e Indutância de Motor de Relutância Chaveado 6/4 Utilizando o Método dos Elementos Finitos.** E-Locução, Extrema, v. 1, n. 18, p. 430-444. Disponível em: <https://periodicos.faex.edu.br/index.php/e-Locucacao/article/view/294>. Acesso em: 20 nov. 2022.

[16] CARVALHO, C. F.; SIGNORELLI, M, H. A. **Princípio de Funcionamento e Acionamento do Motor a Relutância Variável.** XVI CEEL, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.