

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

GUSTAVO LUIZ FERREIRA

**ENSAIOS EM UMA MÁQUINA DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL APLICADA AO
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

Niterói

2018

GUSTAVO LUIZ FERREIRA

**ENSAIOS EM UMA MÁQUINA DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL APLICADA AO
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Orientadores: Guilherme Gonçalves Sotelo
Janaína Gonçalves de Oliveira

Niterói

2018

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE

F383e Ferreira, Gustavo Luiz
ENSAIOS EM UMA MÁQUINA DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL APLICADA AO
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA / Gustavo Luiz Ferreira ; Guilherme
Gonçalves Sotelo, orientador ; Janaína Gonçalves de
Oliveira, coorientadora. Niterói, 2018.
98 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2018.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2018.m.03410685782>

1. Armazenamento de energia. 2. Motor alternativo. 3. Máquina
elétrica. 4. Controlador elétrico. 5. Produção
intelectual. I. Título II. Sotelo, Guilherme Gonçalves,
orientador. III. Oliveira, Janaína Gonçalves de,
coorientadora. IV. Universidade Federal Fluminense. Escola de
Engenharia.

CDD -

GUSTAVO LUIZ FERREIRA

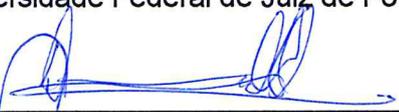
ENSAIOS EM UMA MÁQUINA DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL APLICADA AO
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.
Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Guilherme Gonçalves Sotelo - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF


Prof. Dr.ª Janaína Gonçalves de Oliveira - Coorientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF


Prof. Dr. Daniel Henrique Nogueira Dias
Universidade Federal Fluminense - UFF


Prof. Dr. Luís Guilherme Barbosa Rolim
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Niterói
(junho/2018)

Dedico este trabalho a minha família, e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal Fluminense (UFF) pela oportunidade do mestrado oferecida pelo departamento de Engenharia de Telecomunicações e ao departamento de Engenharia Elétrica com o intuito de desenvolver pessoas mais capacitadas para o mercado, que cada dia se torna mais exigente.

Da universidade, um agradecimento especial ao meu orientador Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo que me incentivou e confiou no meu trabalho desde o começo, fazendo acreditar que seria possível.

Um agradecimento especial à minha coorientadora Profa. Janaina Gonçalves de Oliveira da Universidade Federal de Juiz de Fora pelo incentivo e que, mesmo distante, apresentou-se sempre disposta a me orientar e contribuir para o sucesso do trabalho.

Ao professor Prof. Eric Sanches que sempre me auxiliou e acreditou que meu trabalho seria possível auxiliando também em vários aspectos da vida acadêmica.

Aos amigos, pela motivação e apoio em momentos de dificuldade. Em especial ao Fernando Silva e ao Fabricio Martins, pela presteza, boa vontade e auxílio técnico nas tarefas de laboratório.

Aos meus pais, João Alexandrino Ferreira (in memoriam) e Graciema de Oliveira Ferreira pelos ensinamentos, pelo sacrifício e por proporcionar um lar no qual eu pude me dedicar aos estudos.

A minha esposa Elaine pelo incentivo, elogios e suporte nos momentos mais difíceis.

RESUMO

Atualmente os sistemas de armazenamento de energia apresentam-se cada vez mais necessários face às novas tecnologias de geração. Sistemas como aerogeradores e painéis solares são exemplos destes sistemas e neste contexto destacam-se também os sistemas distribuídos de energia. Como uma solução para o armazenamento de energia surge os sistemas armazenadores de energia cinética, baseados em um volante girando em alta rotação. Este trabalho apresenta os ensaios de carga e descarga de um armazenador cinético de energia acionado por uma máquina de relutância variável (MRV). Os ensaios são realizados com a máquina conectada a um elo de corrente contínua e um controlador eletrônico que realiza a transferência de energia entre o elo de corrente contínua e a máquina elétrica. Um protótipo foi desenvolvido para o acionamento da máquina de relutância e são apresentados os circuitos eletrônicos para o chaveamento das fases da MRV com controle de corrente. Também são apresentadas técnicas de *software* embarcado no controlador eletrônico para executar as estratégias de controle de acionamento da máquina de relutância no modo motor e gerador em alta velocidade. Nos resultados são apresentados os detalhes das correntes nos enrolamentos da máquina operando em ambos os modos de operação. Pode-se verificar o comportamento do controlador proporcional e integral utilizado no controle de velocidade da máquina no modo motor que foi sintonizado a partir de simulações apresentados em um outro trabalho de dissertação. São apresentados gráficos comparativos da potência gerada para diversas correntes de excitação dos enrolamentos quando a MRV opera em modo gerador em malha aberta sem controle da potência gerada. Por fim é apresentado um gráfico de balanço da energia armazenada em relação à energia consumida por uma carga conectada ao barramento.

Palavras chaves: Armazenador de energia cinética, máquina de relutância variável, controle por histerese.

ABSTRACT

Today, energy storage systems are increasingly needed in the face of new generation technologies. Systems such as wind turbines and solar panels are examples of these systems and in this context, we can also highlight distributed energy systems. As a solution for energy storage comes the kinetic energy storage systems, based on a high-revolving steering wheel or flywheel. This work presents the loading and unloading tests of a kinetic energy storage device driven by a switched reluctance machine (SRM). The tests are performed with the machine connected to a direct current link and an electronic controller that performs the transfer of energy between the direct current link and the electric machine. A prototype was developed for the activation of the reluctance machine and the electronic circuits for the switching of the SRM phases with current control. Also, are presented techniques used in the embedded electronics that execute the strategies to control the reluctance machine as motor or generator modes under high-speed. The results show the details of the currents in the machine windings operating in both modes of operation. It is possible to verify the behavior of the proportional and integral controller used in the speed control of the machine in the motor mode that was tuned from the simulations presented in another dissertation work. Comparative graphs of the power generated for several winding excitation currents are presented when the MRV operates in open loop generator mode without control of the generated power. Finally, a balance graph of stored energy is presented in relation to the energy consumed by a load connected to the bus.

Keywords: Kinetic energy storage, variable reluctance machine, hysteresis control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Bateria de fluxo	19
Figura 2.2 - Bateria de íons de lítio, adaptado de [14].	19
Figura 2.3 – Esquema de um supercapacitor.	20
Figura 2.4 - Armazenamento de energia em supercondutores, adaptado de [16].	21
Figura 2.5 - Sistema de energia por bombeamento hidráulico, adaptado de [14].	22
Figura 2.6 - Armazenamento de energia por ar comprimido, adaptado de [17].	23
Figura 2.7 - Sistema armazenador de energia cinética, adaptado de [18].	24
Figura 2.8 - Composição básica de um SAEC, adaptado de [13].	25
Figura 2.9 - Ilustração do funcionamento como motor e gerador, adaptado de [2].	26
Figura 2.10 – <i>Flywheel</i> da <i>Powerthru</i> , adaptado de [19].	29
Figura 2.11 – KERS da empresa <i>Flybrid Systems LLP</i> , adaptado de [20].	29
Figura 2.12 – Dispositivo SAEC para veículos híbridos, adaptado de [20].	30
Figura 2.13 – Usina de 20 MW [21].	30
Figura 2.14 - Corte vertical de uma máquina de relutância variável, adaptado de [24].	31
Figura 2.15 - Perfil de indutância de uma fase.	32
Figura 2.16 - Perfil de corrente das três fases de uma MRV 6/4, adaptado de [30].	34
Figura 2.17 - Perfil de torque de uma MRV 6/4 , adaptado de [30].	34
Figura 3.1 - Esquema ambiente de ensaios.	37
Figura 3.2 – Foto do protótipo utilizado nos ensaios.	38
Figura 3.3 - MRV montada na base de ensaios	39
Figura 3.4 - Rotor e estator da MRV	39
Figura 3.5 -Detalhes do rotor da MRV.	40
Figura 3.6 - Modelo no <i>Solidworks</i> do rotor da MRV e volante de inércia	41
Figura 3.7 - Placa controladora da MRV e conversão de potência.	42
Figura 3.8 - Diagrama em blocos do <i>driver</i> desenvolvido para a MRV.	43
Figura 3.9 – Detalhe do módulo microcontrolador PSOC 5.	44
Figura 3.10 – Diagrama em blocos simplificado do PSOC 5	46
Figura 3.11 - Tela do ambiente de desenvolvimento PSOC Creator.	47
Figura 3.12 – Meia ponte H com chaves IGBT e diodos de <i>freewheel</i>	48

Figura 3.13 - Circuito do Driver IGBT.....	50
Figura 3.14 - Circuito RECARGA C_BOOT.....	51
Figura 3.15 - Modulo sensor de corrente.....	53
Figura 3.16 - Circuito de condicionamento do sensor de corrente.....	54
Figura 3.17 – Encoder rotativo incremental utilizado.....	54
Figura 3.18 - Fases dos pulsos em quadratura gerados pelo encoder.....	55
Figura 3.19 – Componente <i>Quadrature Decoder</i>	56
Figura 3.20 - Chaves de acionamento da fonte de tensão CC e da carga resistiva.....	57
Figura 3.21 - Diagrama de controle MRV modo motor.....	58
Figura 3.22 - Circuito contador de tempo de uma volta da MRV.....	59
Figura 3.23 - Vetores de acionamento da fase de acordo com a posição.....	61
Figura 3.24 - Controlador de corrente por histerese.....	62
Figura 3.25 - Controle da MRV em modo gerador.....	64
Figura 3.26 - Controlador completo da MRV.....	65
Figura 3.27 – Exemplo dos ângulos de acionamento das fases nos modos motor e gerador	66
Figura 4.1 - Esquema elétrico para os ensaios do sistema armazenador de energia.....	67
Figura 4.2 - Osciloscópio série THS3000 [35].....	68
Figura 4.3 – Controlador PI: degraus de velocidade vs. corrente de referência.....	69
Figura 4.4 - Corrente nas fases em pulso único, $\omega_{MRV} = 3507$ rpm.....	70
Figura 4.5 - Corrente nas fases A B e C em regime permanente para correntes de referência I_{ref} 1,1 e 1,87 A.....	72
Figura 4.6 – Tempo de geração por corrente de excitação, 5, 6 e 7 A e carga de 280 e 185 Ω	74
Figura 4.7 - Modo gerador R_L 280 Ω para correntes de excitação 5, 6 e 7 A.....	77
Figura 4.8 - Potência consumida vs corrente de excitação de 5, 6 e 7 A.....	78
Figura 4.9 – Comparativo de curvas de potência geradas pela MRV para correntes de 5, 6 e 7 A e cargas de 280 e 185 Ω	80
Figura 4.10 -Corrente nas fases com MRV no modo gerador para correntes de excitação I_{REF} de 5, 6 e 7 A.....	83
Figura 4.11 - Detalhe da tensão e corrente em uma fase no modo gerador.....	84

Figura 4.12- Balanço da energia gerada e consumida no ensaio da <i>flywheel</i>	86
Figura 7.1 - Chaves de potência IGBT	92
Figura 7.2 – IR2110 Acionador das chaves de potência.....	93
Figura 7.3 - Diodos de potência de retorno da corrente dos enrolamentos (<i>freewheel</i>).....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros do rotor obtidos pelo modelo do Solidworks.....	41
Tabela 3.2 – Parâmetros de operação do protótipo.....	42
Tabela 3.3 - Condição do capacitor de <i>bootstrap</i> C_BOOT.	52
Tabela 3.4 – Saída do circuito comparador por histerese.....	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	HISTÓRICO	12
1.2	MOTIVAÇÃO	14
1.3	OBJETIVOS	15
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
2	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	17
2.1	DISPOSITIVOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	18
2.2	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA CINÉTICA (SAEC)	24
2.3	PESQUISAS ATUAIS E NOVOS <i>FLYWHEELS</i>	28
2.4	MÁQUINA DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL	30
3	DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO DE <i>FLYWHEEL</i> DESENVOLVIDO	36
3.1	MÁQUINA DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL - MRV	38
3.2	CONTROLADOR E CONVERSOR ELETRÔNICO DE POTÊNCIA	42
3.2.1	MÓDULO FONTES DE ALIMENTAÇÃO	43
3.2.2	MÓDULO CPU	43
3.2.3	MÓDULO PONTE H IGBT	47
3.2.4	MÓDULO DRIVER IGBT	48
3.3	MÓDULOS DOS SENSORES DE CORRENTE	52
3.4	<i>ENCODER</i> INCREMENTAL DE ROTAÇÃO	54
3.5	PLACA CONTROLADORA DO ELO CC E ACIONAMENTO DA CARGA	56
3.6	BANCO DE CAPACITORES	57
3.7	CARGA RESISTIVA	58
3.8	FONTE DE ALIMENTAÇÃO	58
3.9	ESTRATÉGIA DE CONTROLE DA MRV - MOTOR	58
3.10	ESTRATÉGIA DE CONTROLE DA MRV - GERADOR	63
4	RESULTADOS DOS ENSAIOS EXECUTADOS NA MRV	67
4.1	MRV NO MODO MOTOR	68
4.2	MRV NO MODO GERADOR	72
5	CONCLUSÕES	87
5.1	TRABALHOS FUTUROS	88
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
7	ANEXOS	92
7.1	COMPONENTES ELETRÔNICOS MAIS RELEVANTES	92
7.2	ESQUEMAS DOS CIRCUITOS DO CONTROLADOR	94

1 INTRODUÇÃO

Atualmente existe um esforço no Brasil para um uso mais eficiente da energia elétrica, bem como para uma melhoria na qualidade da sua distribuição. No entanto, com as limitações orçamentárias existentes, são buscadas alternativas aceitáveis para o fornecimento da energia elétrica. Diferentes soluções podem ser encontradas para a implementação prática dessas alternativas, utilizando vários tipos de equipamentos, como por exemplo, os que empregam algum tipo de dispositivo de armazenamento de energia, como baterias ou volantes de inércia [1].

Um volante de inércia é um dispositivo de armazenamento de energia que absorve energia mecânica servindo como um reservatório energético. Quando a oferta de energia gerada é superior à demanda, principalmente quando gerada por fontes renováveis, o excesso de energia pode ser armazenado no volante de inércia. Esta energia pode ser utilizada quando houver redução na geração ou elevação da potência consumida, para que a demanda seja atendida [2].

Um Sistema Armazenador de Energia Cinética (SAEC), ou simplesmente *flywheel*, consiste de um volante de inércia acoplado mecanicamente a um motor/gerador elétrico, controlado por circuitos eletrônicos que permitem a conversão bidirecional de potência. O acionamento elétrico tem como função converter a energia elétrica em mecânica (funcionamento como motor), por meio da aceleração do eixo da máquina, e transformar a energia cinética armazenada no volante de inércia em elétrica (funcionamento como gerador), quando necessário, por meio da desaceleração do eixo da máquina [3].

Os volantes de inércia foram usados há muito tempo como dispositivos mecânicos de armazenamento de energia. A primeira forma de um volante de inércia foi a roda de oleiro que usava energia armazenada para auxiliar na formação de vasos de barro [4].

Os modernos SAEC compreendem uma máquina elétrica ligada a uma massa rotativa. A energia elétrica é convertida em energia cinética no rotor de rotação rápida em ambiente de atrito mínimo. Se for necessária uma reserva de curto prazo, isto é, no caso de perda da alimentação da rede ou afundamentos de tensão, a inércia mantém a rotação do rotor e a energia cinética é convertida em energia

elétrica. O tempo de geração mais ou longo ou máxima potência gerada são parâmetros que devem ser levados em conta no momento de se projetar a máquina para acionar o sistema. Para minimizar o atrito mecânico, rolamentos magnéticos podem ser utilizados, enquanto que para eliminar o atrito do ar, cria-se vácuo dentro da máquina [5]. Pode ser vantajoso que uma mesma máquina elétrica seja usada não só para acelerar o volante, quando absorve energia da rede funcionando como motor, como também para retornar a energia à rede, quando a máquina deve funcionar como gerador.

As máquinas elétricas mais utilizadas nos SAEC são: a máquina de indução, a máquina síncrona de ímã permanente e a máquina de relutância variável (MRV) [6].

As aplicações do SAEC abrangem desde o nível da rede elétrica (grande escala, como parques eólicos remotos) até o nível do usuário (pequena escala, como indústrias e centro de processamento de dados). Em diversas aplicações é mais vantajoso usar vários SAEC em oposição a grandes máquinas. As aplicações mais comuns são: a qualidade de energia, como a regulação rápida de frequência e tensão, aplicações de potência pulsada para fins militares (catapulta para lançamento de aeronaves em navios aeródromos), controle da orientação de veículos na área aeroespacial, fonte de alimentação ininterrupta, nivelamento de carga, veículos elétricos e híbridos (por exemplo, ônibus urbano visando o aumento da eficiência do combustível), e aplicações de armazenamento de energia [7].

A tecnologia de SAECs evoluiu muito nos últimos anos nas aplicações de alta velocidade com a construção dos volantes de inércia em fibra de carbono e a tendência de redução de custos dos componentes da eletrônica de potência, dos sensores de posição (para rolamentos magnéticos) e dos microprocessadores [8].

1.1 HISTÓRICO

Os volantes foram usados há muito tempo como dispositivos mecânicos de armazenamento de energia, sendo a primeira forma conhecida a roda de oleiro utilizada na fabricação de vasos de barro, consistindo de um disco feito de madeira, pedra ou argila. Ela repousava sobre um pivô fixo e podia ser girada em torno de seu centro. A energia armazenada nesse volante de oleiro era cerca de 500J [9].

A palavra *flywheel* apareceu durante o início da revolução industrial. Neste período, houve dois desenvolvimentos importantes: o uso de volantes em máquinas a vapor e o uso generalizado de ferro. Os volantes de ferro têm maior integridade do material do que os volantes constituídos por madeira, pedra ou argila, podendo ser construídos em uma única peça e acomodar mais massa e momento de inércia no mesmo volume. Esses volantes foram usados principalmente para suavizar os impulsos de torque nas máquinas a vapor [9].

Nos anos que se seguiram à revolução industrial, a tendência era principalmente aumentar a massa para maior armazenamento de energia, em vez de aumentar a velocidade. Grandes volantes feitos de aço fundido mais pesados, foram construídos para os maiores motores [9].

O perfil de estresse constante para turbinas a vapor foi muito útil no projeto de volantes de alta velocidade. Nesse período foi demonstrado que uma massa rotativa suportada por um eixo armazena energia mecanicamente. O volante de inércia começou a suavizar o torque de mudança periódica e ajudar a superar o ponto morto na sequência de movimento do pistão.

Em 1889, a marinha dos EUA fez uma encomenda de 50 torpedos desenhados por John A. Howell. O torpedo Howell foi impulsionado por um volante de inércia de 60 kg girando a 10.000 rpm antes do lançamento por uma turbina a vapor montada no tubo, permitindo ao torpedo atingir uma velocidade de 12,8 m/s e atingir seu alvo a uma distância de 360 m [5].

No entanto, com o advento do pequeno motor de combustão interna em meados do século 19, a tendência deslocou-se para volantes de alta velocidade com baixa inércia para aplicações automotivas. Nesses motores o volante de inércia tem um papel semelhante aos motores das máquinas a vapor ao transferir os movimentos dos pistões através da cambota para a transmissão. A necessidade de maior quantidade de energia armazenável em pequenas velocidades angulares fez com que os diâmetros crescessem. Conseqüentemente, acidentes graves ocorreram quando as forças centrífugas excederam a resistência mecânica do aço forjado [5].

Em 1931, Anatoliy Ufimtsev construiu a primeira estação de energia eólica equipada com tampão de volante em Kursk, na Rússia, fornecendo eletricidade para sua oficina e para famílias vizinhas [5].

Antes da introdução de fontes de alimentação ininterruptas baseadas em bateria, os volantes de aço acoplados a grupos de motores/geradores eram a única opção para obter backup de energia elétrica para cargas críticas.

A segunda parte do século 20 viu avanços no campo dos materiais compósitos de alta resistência. Os volantes compostos podiam funcionar a velocidades mais elevadas e armazenar mais energia para uma determinada massa do que um volante de aço convencional. O conceito de SAEC para veículos elétricos e backup de energia foi proposto neste período. Além disso, foi feita uma distinção entre os volantes que são utilizados para suavizar os impulsos de torque e os volantes que armazenam energia para aplicações de backup.

Mais recentemente, a capacidade de um volante para fornecer alta potência em um curto espaço de tempo tem sido usada em aplicações como prensas mecânicas, bombas de lubrificação ou refrigeração, locomotivas de minas, soldagem por fricção inercial e iniciadores inerciais.

1.2 MOTIVAÇÃO

A demanda por energia elétrica vem crescendo ano após ano devido ao desenvolvimento da humanidade, aumentando assim, a necessidade de novas fontes de energia. Acrescenta-se a este fato, a imposição de que as novas fontes de energia sejam fontes renováveis e menos poluentes. Observa-se, porém, que algumas destas soluções para geração de energia, apresentam capacidade variável ao longo do tempo, como por exemplo, os aerogeradores e os painéis solares. Neste contexto, aumenta-se a necessidade de formas de armazenamento de energia para posterior utilização, seja nos momentos de maior oferta ou nos momentos de baixa demanda.

Atualmente são discutidas maneiras de armazenar energia de uma forma rápida, eficaz, e que não seja prejudicial ao ambiente. Por exemplo, os acumuladores químicos são bastante eficazes, porém a razão densidade de energia por unidade de massa está longe dos objetivos pretendidos, além disso, estes acumuladores são bastante nocivos ao meio ambiente devido às substâncias que os compõem (chumbo, mercúrio, zinco, cádmio, etc.).

Sistemas de armazenamento de energia representam um importante papel no mundo atual. Dentre os meios de armazenamento de energia mais populares e antigos utilizados em sistemas elétricos pode-se citar SAEC denominado de *flywheel* ou bateria mecânica.

O volante está provando ser uma forma viável de armazenamento de energia possuindo alta eficiência, grande vida útil, operação em grande faixa de temperatura, livre de efeitos poluentes e maior potência e densidade de energia [10].

O uso de SAEC como uma possível solução tecnológica para problemas da qualidade de energia elétrica em diversos ambientes ou sistemas tem motivado muitas pesquisas em universidades, incluindo o trabalho aqui apresentado. Mais especificamente, o uso de dispositivos SAEC baseados em máquinas de relutância tem ganhado atenção nos últimos anos [1] [3] [11] [12], dados os altos preços dos ímãs envolvidos na construção de máquinas síncronas. Ainda assim, desafios referentes ao controle e acionamento de máquinas de relutância se mantêm em discussão, aumentando a relevância de trabalhos que venham a contribuir nessa área.

1.3 OBJETIVOS

Nesta dissertação foram estudados os conceitos do SAEC com a utilização de uma máquina de relutância variável, bem como uma estratégia de controle dessa máquina, e projetado um hardware e software para implementar um SAEC que alimentasse resistências elétricas, provando os conceitos de tal sistema.

Pode-se assim listar os objetivos desta dissertação:

- Estudar a Máquina de Relutância Variável, analisando as interações eletromagnéticas e mecânicas na geração do conjugado;
- Desenvolver e implementar um hardware/software para o controle da MRV;
- Executar experimentos que demonstrem o conceito de armazenamento de energia cinética no volante de inércia e a geração de energia elétrica a partir da energia cinética armazenada no volante.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este manuscrito está organizado da seguinte forma:

O presente capítulo apresenta a motivação desta pesquisa, histórico dos SAECs e os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos gerais e a revisão bibliográfica dos sistemas de armazenamento cinético de energia e uma breve descrição das principais características da Máquina de Relutância Variável (MRV) utilizada para acionar o volante de inércia.

O Capítulo 3 apresenta o projeto dos circuitos elétricos e eletrônicos desenvolvidos, bem como o software elaborado, para o controle da MRV utilizada.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos experimentos realizados para comprovação do armazenamento de energia e a sua transformação em energia elétrica.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões e algumas propostas de trabalhos futuros.

As referências bibliográficas utilizadas na elaboração desta dissertação são apresentadas após este último capítulo.

2 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Os sistemas de armazenamento de energia podem ser usados para equilibrar o fornecimento e a demanda de energia elétrica. O processo envolve a conversão e armazenamento de energia elétrica de uma fonte disponível em outra forma de energia, que pode ser convertida de volta em energia elétrica quando necessário.

As formas de conversão de armazenamento de energia podem ser químicas, mecânicas, térmicas ou magnéticas. Esses sistemas possibilitam que a eletricidade seja produzida quando necessária e armazenada quando a geração exceder a demanda. O armazenamento é benéfico quando há uma baixa demanda, baixo custo de geração, ou quando as fontes de energia disponíveis são intermitentes. Ao mesmo tempo, a energia armazenada pode ser consumida em momentos de alta demanda, alto custo de geração, ou quando nenhuma geração alternativa está disponível [7].

Os sistemas de armazenamento de energia cinética, também conhecidos como *flywheels*, são considerados uma das tecnologias de armazenamento de grande potencial para aplicações de alta densidade de potência (potência por unidade de massa ou volume), no caso de *flywheels* de alta velocidade ($\omega > 10.000$ rpm). Estes dispositivos podem competir diretamente com as baterias químicas, sendo por este motivo denominadas baterias mecânicas por alguns autores [13]. Apesar dos relativos custos elevados para fabricação, a vantagem da longa vida útil dos volantes, tornou-o uma boa opção para aplicações de qualidade de energia. Além disso, existem muitos outros recursos que tornam estes sistemas uma solução promissora para futuras necessidades de energia. Essas características incluem operação livre de poluição com uma quantidade máxima de energia armazenada, que é principalmente afetada pelo peso e forma do rotor e pela alta eficiência do processo de armazenamento, incluindo a eficiência da conversão de energia [13].

Com avanços em tecnologia de materiais, dos rolamentos e da eletrônica de potência, a tecnologia dos SAEC para armazenamento de energia se desenvolveu significativamente, tendo como principais atributos a alta eficiência energética e a alta potência e densidade de energia, competindo com outras tecnologias de armazenamento em aplicações de energia elétrica, bem como em transporte, área militar, serviços e satélites espaciais. Com capacidades de armazenamento de até

500 MJ e faixas de energia de kW para GW, eles são utilizados em uma variedade de importantes aplicações de armazenamento de energia [7].

Os SAEC utilizam máquinas elétricas atuando como motor e como gerador, sendo que uma dessas máquinas pode ser a máquina relutância variável, utilizada nesta pesquisa [12].

Neste contexto, o presente capítulo apresentará os alguns dos principais dispositivos de armazenamento de energia e os aspectos mais relevantes dos SAEC. Também será feita uma revisão de algumas propriedades da MRV.

2.1 DISPOSITIVOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Algumas tecnologias estudadas atualmente para armazenamento de energia são descritas a seguir [14].

- A) Baterias de Fluxo: semelhante às baterias de chumbo-ácido, porém o eletrólito é armazenado num recipiente externo e circula através da pilha de células da bateria. Apresenta como vantagem a grande capacidade de armazenamento de energia elétrica. A única limitação é o tamanho do reservatório de armazenamento de eletrólitos. Tem a desvantagem de apresentar um número limitado de ciclos de uso. Depois de um período de três a cinco anos o sistema tem que ser substituído. A Figura 2.1 apresenta uma ilustração dessa bateria.
- B) Baterias Avançadas: incluem as de íons de lítio (apresentada na Figura 2.2), íon-polímero, hidreto metálico de níquel e sódio-enxofre. Esse tipo de bateria ocupa menos espaço que as baterias de chumbo-ácido, entretanto são muito caras para aplicações em larga escalas.

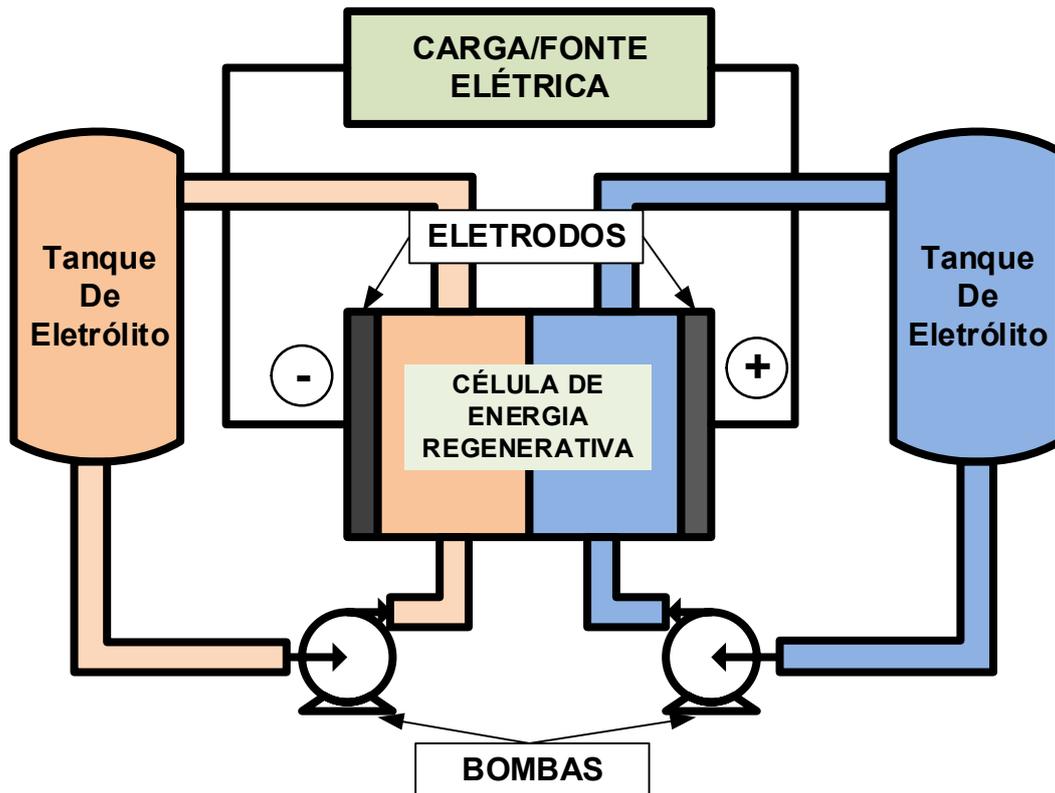


Figura 2.1 - Bateria de fluxo

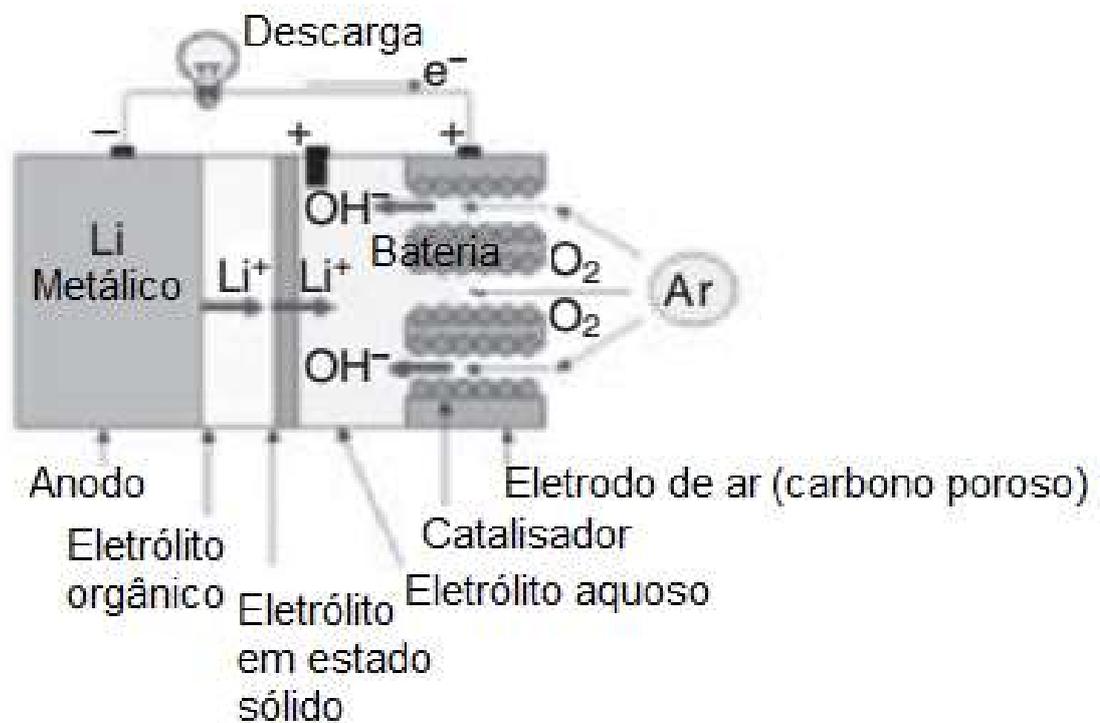


Figura 2.2 - Bateria de íons de lítio, adaptado de [14].

C) Capacitor eletroquímico ou supercapacitor: é um dispositivo eletrônico capaz de armazenar energia elétrica, com as características dos capacitores e baterias eletroquímicas, porém sem reação química [15]. A Figura 2.3 ilustra um modelo de supercapacitor. Possuem um ciclo de vida extenso, baixa impedância, carregamento rápido. Como a descarga da tensão é linear não é possível a utilização no espectro completo de energia. Apresenta ainda, baixa densidade energia, células com baixa tensão e elevada auto descarga [14].

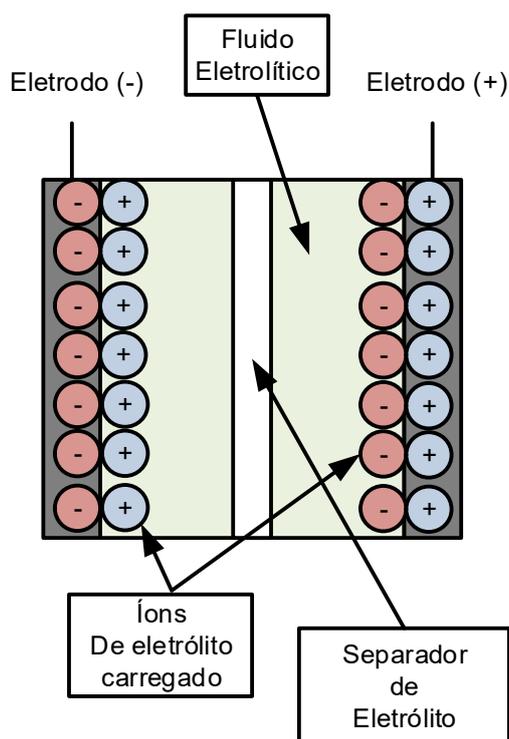


Figura 2.3 – Esquema de um supercapacitor.

D) Armazenamento de Energia no Campo Magnético de Supercondutores: o fluxo de corrente contínua em uma bobina de material supercondutor resfriado à temperatura criogênica cria um campo magnético onde a energia é armazenada. Esta forma de armazenamento, exposta na Figura 2.4, permite que a energia esteja disponível quase que instantaneamente. Apresenta vantagens de alta potência de saída por um breve período, de não ter perdas de energia e de não possuir partes móveis. As

desvantagens estão na reduzida capacidade de armazenamento energético e nas dificuldades inerentes a criogenia.

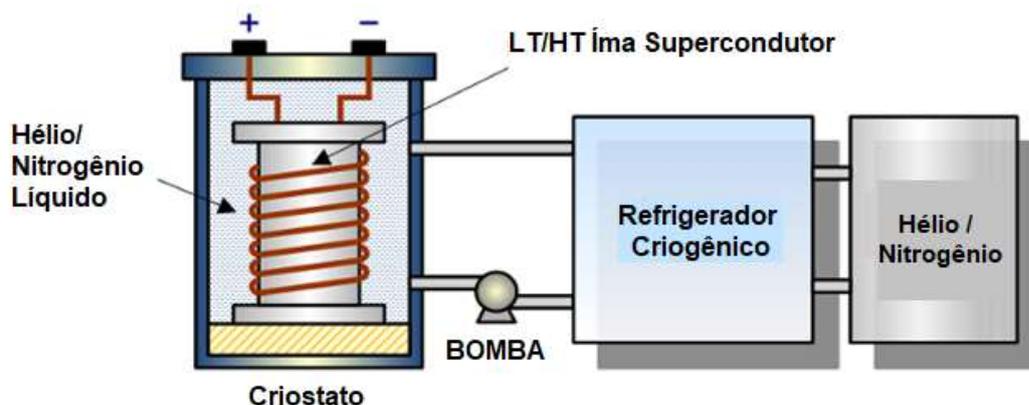


Figura 2.4 - Armazenamento de energia em supercondutores, adaptado de [16].

E) Bombeamento Hidráulico: consiste no bombeamento de água a partir de um reservatório num plano inferior para um situado em um plano superior, permitindo em seguida que a água escoe para baixo passando por turbinas hidráulicas, produzindo eletricidade, conforme ilustrado na Figura 2.5. É uma tecnologia prontamente disponível e amplamente utilizada em aplicações de alta potência. Tem como pontos positivos ainda, menor custo de energia, regulação frequência na rede e capacidade de reserva. Suas dificuldades são relativas a grande quantidade de tempo gasto com regulações ambientais e o fato de apenas pode ser implementada em áreas com montes.



Figura 2.5 - Sistema de energia por bombeamento hidráulico, adaptado de [14].

F) Compressão de Ar: utilizam a eletricidade gerada durante o horário fora do pico para comprimir o ar e armazená-lo em câmaras subterrâneas hermeticamente fechadas, conforme apresentado na Figura 2.6. Quando o ar é liberado, ele se expande através de uma turbina de combustão gerando eletricidade. Apresenta economia de recursos através da utilização do ar comprimido aquecido de baixo custo para movimentar as turbinas e gerar eletricidade. Possui como desvantagem a baixa eficiência devido ao gasto adicional de energia para reaquecimento do ar necessário para ativar as turbinas. Para cada kWh da energia usado para comprimir o ar, apenas metade é gerada no processo reverso.

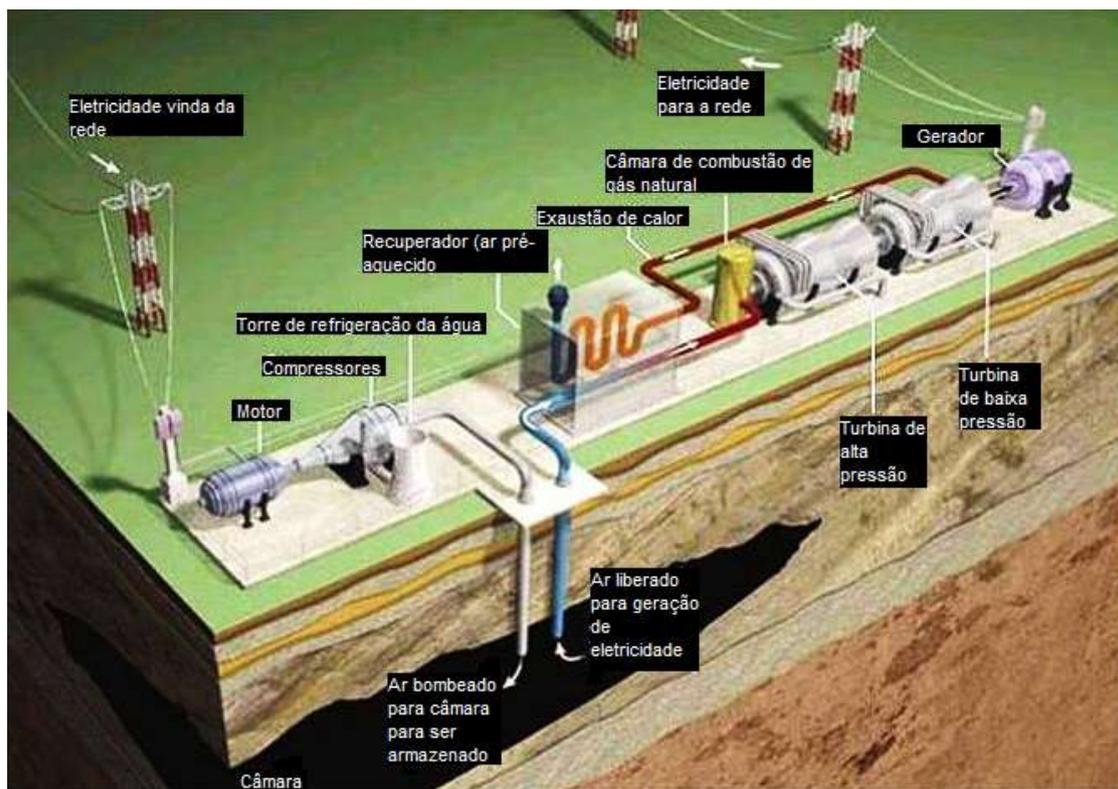


Figura 2.6 - Armazenamento de energia por ar comprimido, adaptado de [17].

G) Armazenador de Energia Cinética (*flywheel*): emprega um cilindro que gira a uma velocidade muito alta, acumulando energia cinética, posteriormente utilizada na geração de eletricidade, como ilustrado na Figura 2.7. Apresenta como vantagens a carga e a descarga rápidas, ser pouco afetado por flutuações de temperatura, ocupar relativamente pouco espaço, possuir longo tempo de vida útil e baixas exigências de manutenção em relação a outras tecnologias como as baterias.

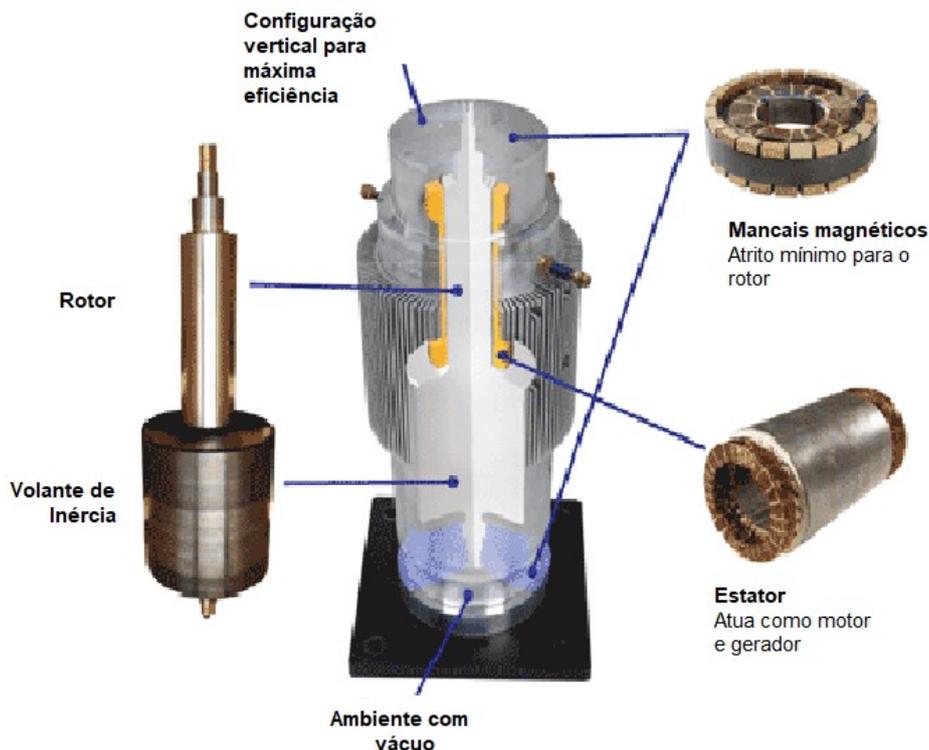


Figura 2.7 - Sistema armazenador de energia cinética, adaptado de [18].

2.2 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA CINÉTICA (SAEC)

Um SAEC é um sistema de armazenamento de energia do tipo eletromecânico no qual a energia é armazenada na forma de energia cinética em uma massa rotativa, denominada volante de inércia.

O volante tem a forma de um cilindro ou disco giratório e possui uma energia cinética rotacional, usando esta energia cinética para transformá-la em energia elétrica quando necessário. A quantidade de energia armazenada no volante depende da velocidade angular e da distribuição de massa ao longo da sua geometria que pode ser traduzido pelo seu momento de inércia. Destes fatores, o mais importante para o armazenamento de energia é sua velocidade angular, pois a energia cinética é proporcional ao quadrado da velocidade enquanto é apenas linearmente proporcional ao momento de inércia. Os SAECs podem responder rapidamente, tanto na carga como na descarga da energia armazenada no volante de inércia [13].

A Figura 2.8 mostra o arranjo básico de um SAEC. Na figura não estão representados os dispositivos eletrônicos de potência necessários para controlar a potência de saída e a velocidade do volante em resposta às condições exigidas [13](ALJOHANI, 2014).

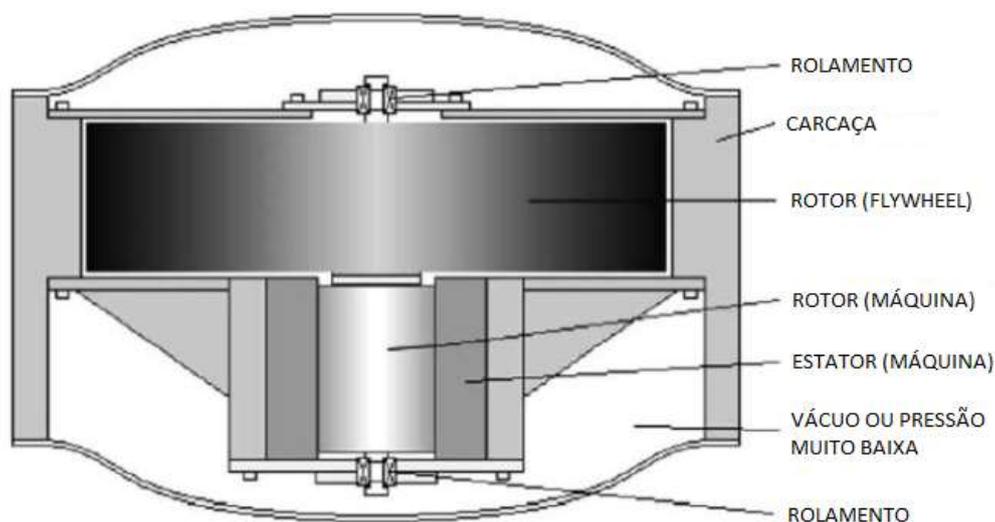


Figura 2.8 - Composição básica de um SAEC, adaptado de [13].

Um volante armazena energia em uma massa rotativa. Dependendo da inércia e da velocidade da massa rotativa, uma determinada quantidade de energia cinética é armazenada como energia rotacional. O volante é colocado dentro de uma contenção de vácuo para mitigar as perdas de fricção que possa ser causada pelo atrito viscoso com o ar. Também deve ser observada a questão dos tipos de mancais utilizados, uma vez que grande parte das perdas ocorre por atrito nos rolamentos. A energia cinética é transferida para dentro ou para fora do volante conectado a uma máquina elétrica que funciona como motor ou gerador [13]. No modo motor, a energia elétrica fornecida ao enrolamento do estator é convertida em torque e aplicada ao rotor, fazendo com que ele gire mais rápido e assim ganhe energia cinética, conforme ilustrado entre os pontos “B” e “C” da Figura 2.9. Enquanto que no modo gerador, a energia cinética armazenada no rotor fornece um torque que é convertido em energia elétrica na quantidade necessária, conforme ilustrado entre os pontos “A” e “B” ou “C” e “D” da Figura 2.9.

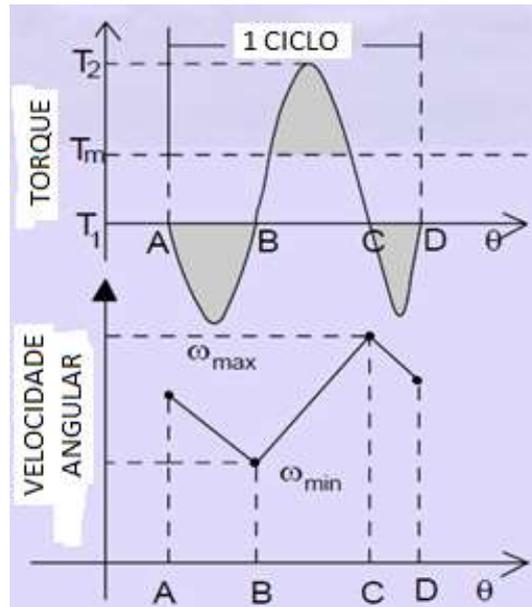


Figura 2.9 - Ilustração do funcionamento como motor e gerador, adaptado de [2].

O volante pode ser composto de vários materiais, incluindo aqueles com rotores de volante de aço e rotores de resina/vidro ou resina/fibra de carbono.

Os mancais de podem apresentar o maior ponto de dissipação de energia nos armazenadores cinéticos devido ao atrito. Esta condição se agrava quando estas máquinas operam em altas velocidades, visto que o atrito é proporcional à velocidade. Algumas das soluções que podem ser utilizadas para minimizar este problema são:

- Mancais de rolamento esférico metálicos;
- Mancais de rolamento esférico cerâmico;
- Mancais fluidodinâmicos e fluidostáticos;
- Mancais eletromagnéticos: ativo, ímã permanente, eletrodinâmicos e magnéticos supercondutores.

A inércia do volante (geometria e massa), necessária para o projeto do *flywheel*, depende diretamente do nível aceitável de mudanças na velocidade. A mudança na velocidade do eixo durante um ciclo é chamada de flutuação de velocidade $\Delta\omega$ sendo igual a variação entre a velocidade angular máxima ($\omega_{m\acute{a}x}$) e a mínima ($\omega_{m\acute{i}n}$):

$$\Delta\omega = \omega_{m\acute{a}x} - \omega_{m\acute{i}n} \quad (2.1)$$

Pode-se normalizar isso para um coeficiente C_f , adimensional, dividindo a variação da velocidade angular pela velocidade angular média ou nominal do eixo ($\omega_{méd}$):

$$C_f = \frac{\omega_{máx} - \omega_{mín}}{\omega_{méd}} \quad (2.2)$$

Esse coeficiente é um parâmetro de projeto a ser escolhido pelo projetista. Quanto menor o valor escolhido, maior o volante deve ser e maior o custo e o peso a serem adicionados ao sistema. No entanto, quanto menor esse valor mais suave a operação do dispositivo [2].

A energia cinética E_c em um sistema rotativo é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} I_m \omega^2 \quad (2.3)$$

onde I_m é o momento de inércia do volante.

Conseqüentemente, a variação de energia cinética $E_{\Delta c}$ de um sistema pode ser dada por:

$$E_{\Delta c} = E_{c2} - E_{c1} \quad (2.4)$$

$$E_k = \frac{1}{2} I_m (\omega_{máx}^2 - \omega_{mín}^2) \quad (2.5)$$

A velocidade angular média é dada pela equação:

$$\omega_{méd} = \frac{\omega_{máx} + \omega_{mín}}{2} \quad (2.6)$$

Utilizando as equações 2.2 e 2.6 na equação 2.5 resulta em:

$$E_{\Delta c} = \frac{1}{2} I_m (2 \omega_{méd})(C_f \omega_{méd}) = I_m C_f \omega_{méd}^2 \quad (2.7)$$

Assim, o momento de inércia da massa (I_m) necessário sistema para obter o coeficiente de flutuação da velocidade selecionada é determinado pela equação:

$$I_m = \frac{E_{\Delta c}}{C_f \omega_{méd}^2} \quad (2.8)$$

A equação acima pode ser usada para obter a inércia apropriada do volante correspondendo à mudança de energia conhecida E_{Ac} por um valor específico do coeficiente de flutuação da velocidade C_f .

Um dos principais componentes de um SAEC é a máquina elétrica utilizada na conversão da energia. As máquinas elétricas mais utilizadas nos SAEC são: a máquina de indução, a máquina síncrona de ímã permanente e a máquina de relutância variável. Para aproveitar algumas vantagens dessas duas últimas máquinas, ultimamente tem sido desenvolvido máquinas (híbridas) síncronas de relutância de ímã permanente [7].

Uma comparação entre estas máquinas para utilização em SAEC é feita no artigo de Amiryar e Pullen [7]. Embora a máquina síncrona de ímãs permanentes seja a mais utilizada; nos SAEC de alta velocidade, as tensões mecânicas e magnéticas impostas à máquina elétrica são muito altas, fazendo com que a MRV seja apontada como um bom candidato para este tipo de aplicação [7].

2.3 PESQUISAS ATUAIS E NOVOS *FLYWHEELS*

Várias pesquisas de *flywheels* estão sendo desenvolvidas ao redor do mundo, sendo que algumas destas já são soluções comerciais.

Um exemplo de *flywheel* comercial é o da empresa americana *Powerthru* [19], mostrado na Figura 2.10. Segundo dados do fabricante o *flywheel* opera com uma máquina de relutância variável síncrona. É capaz de prover 10 a 25 segundos de energia elétrica quando usado em um barramento de corrente contínua de 500 V. Cada unidade ocupa uma área aproximada de 0,5 m² levando ao armazenamento de 680 kW / m².

Em aplicações automobilísticas temos o sistema *Kinetic Energy Recovery System* (KERS), ou sistema de recuperação de energia cinética da empresa inglesa *Flybrid Systems LLP* [20], mostrado na Figura 2.11. Esse sistema é utilizado em carros de Fórmula 1. Este *flywheel* é acionado de forma mecânica para o armazenamento de energia podendo o rotor atingir a velocidade de 60.000 rpm. A energia armazenada da unidade, com uma massa de 25Kg, é de 400 kJ com capacidade de geração de 60 kW.

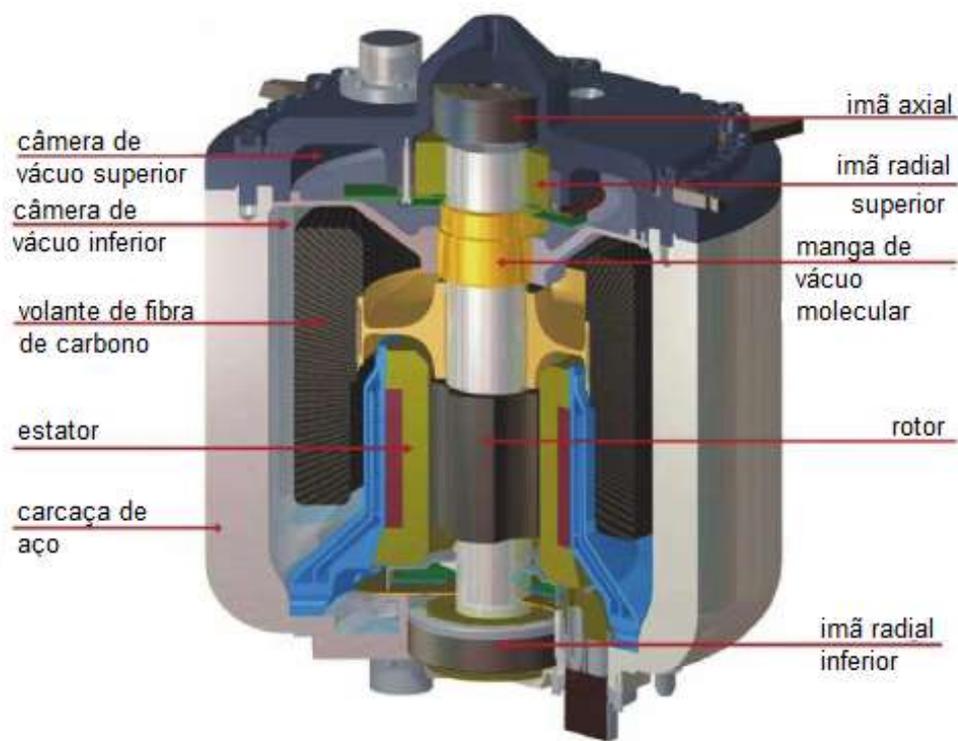


Figura 2.10 – *Flywheel* da *Powerthru*, adaptado de [19].



Figura 2.11 – KERS da empresa *Flybrid Systems LLP*, adaptado de [20].

A conversão de energia eletromecânica é frequentemente necessária para veículos híbridos. Na Figura 2.12 é mostrada uma unidade de um *flywheel* para um automóvel híbrido de alto desempenho [20].



Figura 2.12 – Dispositivo SAEC para veículos híbridos, adaptado de [20].

Outro exemplo em maior escala são as usinas de armazenamento de energia, como a mostrada na Figura 2.13, situada na cidade de Stephentown no estado de Nova York [21][22]. Fabricado pela empresa Beacon Power, o parque conta com 200 *flywheels* com capacidade de geração de 20 MW.



Figura 2.13 – Usina de 20 MW [21].

2.4 MÁQUINA DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL

Os motores elétricos mais comuns são os de indução, que utilizam o princípio da indução eletromagnética para que ocorra uma força eletromecânica por meio da interação entre fluxos magnéticos induzido no rotor e o fluxo do estator.

A recente evolução nos sistemas de acionamento das máquinas elétricas, apresentando significativos avanços em termos de potência convertida, precisão, eficiência e redução de custo, fez com que máquinas que necessitem de um conversor eletrônico ficassem mais atrativas. Neste contexto destacam-se as máquinas de relutância variável [23].

Diferente da maioria das máquinas rotativas, a MRV usa outro princípio de funcionamento: uma barra de ferro imerso em um campo magnético se alinha na posição de relutância mínima, ou seja, a MRV é uma máquina elétrica na qual o conjugado é produzido pela tendência de sua parte móvel (rotor) ir para uma posição de menor relutância [23] [24] [25].

A máquina de relutância variável possui uma construção bem particular quando comparada aos outros tipos de máquinas elétricas [24]. As bobinas que geram os fluxos magnéticos na MRV são colocadas nos polos do estator, não possuindo bobinas ou polos magnéticos no rotor. O estator e o rotor têm núcleos de ferro com polos salientes. As bobinas ao longo dos polos do estator são diametralmente conectadas, formando as fases. Cada circuito de fase do estator possui uma indutância variável com a posição dos polos do rotor em relação aos polos do estator [26].

A Figura 2.14 ilustra o corte transversal de uma máquina de relutância variável com topologia 6/4, isto é, seis polos no estator e quatro polos no rotor.

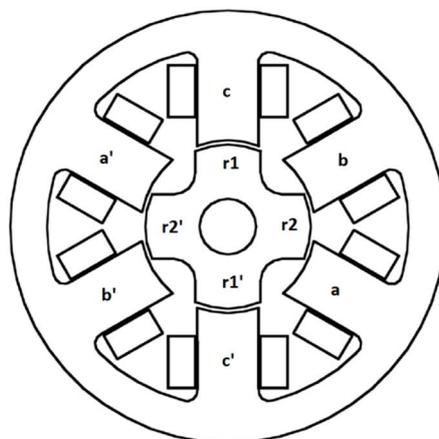


Figura 2.14 - Corte vertical de uma máquina de relutância variável, adaptado de [24].

Quando uma das bobinas de fase é alimentada, o rotor se movimenta para a posição de relutância mínima para esta fase. Quando o rotor se aproxima do equilíbrio deve ocorrer o chaveamento de corrente para a próxima fase a fim de manter a sua rotação. Para a manutenção da rotação de uma MRV deve-se controlar a sequência de excitação das bobinas do estator de acordo com a posição do rotor.

O movimento da MRV operando como motor pode ser mais bem explicado com o auxílio da Figura 2.14. Como pode-se ver na figura, os polos do rotor $r1$ e $r1'$ estão alinhados aos polos do estator c e c' . Aplicando-se uma corrente à fase a , será estabelecido um fluxo magnético através dos polos do estator a e a' e dos polos do rotor $r2$ e $r2'$. Este fluxo magnético exerce uma força que tenderá a alinhar os polos envolvidos. Quando este alinhamento estiver próximo, a corrente do enrolamento a é desligada e uma corrente deve ser estabelecida no enrolamento da fase b , neste momento a força magnética tenderá a alinhar os polos $r1$ e $r1'$ do rotor aos polos b e b' do estator. No momento do alinhamento a máquina terá girado por 30° . Momentos antes de ocorrer o alinhamento com a fase b a corrente é interrompida e o enrolamento da fase c será alimentado, ocorrendo então, a força magnética para o alinhamento dos polos $r2$ e $r2'$ aos polos c e c' . Este procedimento se repete então para a fase a e assim sucessivamente ocasionando a rotação da máquina no sentido horário. Para esta topologia $6/4$ são necessários doze passos para que a máquina execute uma volta completa. Alterando-se a sequência de acionamento das fases para “ b, c, a ” obtém-se a rotação no sentido anti-horário.

A Figura 2.15 ilustra o perfil da indutância em um dos enrolamentos da MRV com relação ao ângulo do rotor, enquanto os materiais ferromagnéticos não estão saturados. Observa-se que a indutância varia de um valor mínimo (L_u), quando não há alinhamento do polo do rotor, com um polo do estator, até um valor máximo (L_a) quando estes polos se encontram totalmente alinhados.

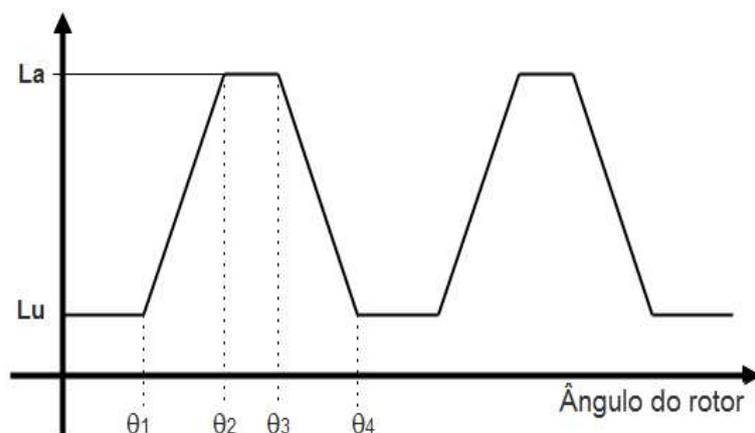


Figura 2.15 - Perfil de indutância de uma fase.

Em [27] é feita uma revisão sobre a operação da MRV no modo gerador. O funcionamento da MRV como gerador consiste em aplicar uma corrente, por

exemplo na fase \underline{a} , ainda na região motora, isto é, $\theta_1 < \theta_{ON} < \theta_3$, de modo a criar um fluxo magnético no enrolamento e desligar as chaves no início da região geradora, a partir de $\theta_{OFF} > \theta_3$. Como a máquina estava em movimento prévio, isto é, devido ao momento de inércia acumulado no volante da máquina, os polos do rotor tendem a se afastar do centro criando o perfil de indutância com derivada negativa. Esta variação da indutância com derivada negativa reforça a corrente que foi aplicada inicialmente na fase e este reforço de corrente retorna para o elo CC. Segundo [27] os ângulos de θ_{ON} e θ_{OFF} são a melhor estratégia para implementar o controle da potência gerada pela MRV. No presente trabalho, não será implementado controle de potência por simplificação, portanto os ângulos θ_{ON} e θ_{OFF} são fixos.

A MRV se caracteriza pela facilidade de construção, baixo custo de fabricação e manutenção, alta confiabilidade e simplicidade dos conversores de potência unipolares associados. Outra vantagem da MRV é possuir uma melhor relação potência/peso quando comparado a outros sistemas motrizes [28].

A MRV possui, entretanto, algumas desvantagens: a necessidade de um sensor de posição para determinados tipos de estratégia de controle; a oscilação no conjugado eletromagnético gerado pela máquina, quando se aplicam pulsos de tensão ou de corrente; e o alto nível de ruído sonoro em relação a outras máquinas de sua classe de potência. Além disto, a modelagem matemática do MRV é complexa devido à sua significativa não linearidade magnética. Durante a operação, o perfil de excitação das fases determina a amplitude das oscilações do conjugado [29].

O torque é dado em função da variação da indutância em relação à posição do rotor e da corrente, logo é uma função não linear. Devido a esta não linearidade não é possível criar um circuito equivalente para o motor. Como exemplo para a MRV do tipo 6/4 utilizada nos ensaios deste trabalho, a Figura 2.16 ilustra um perfil de corrente para as três fases de uma MRV e a Figura 2.17 apresenta o perfil de torque correspondente.

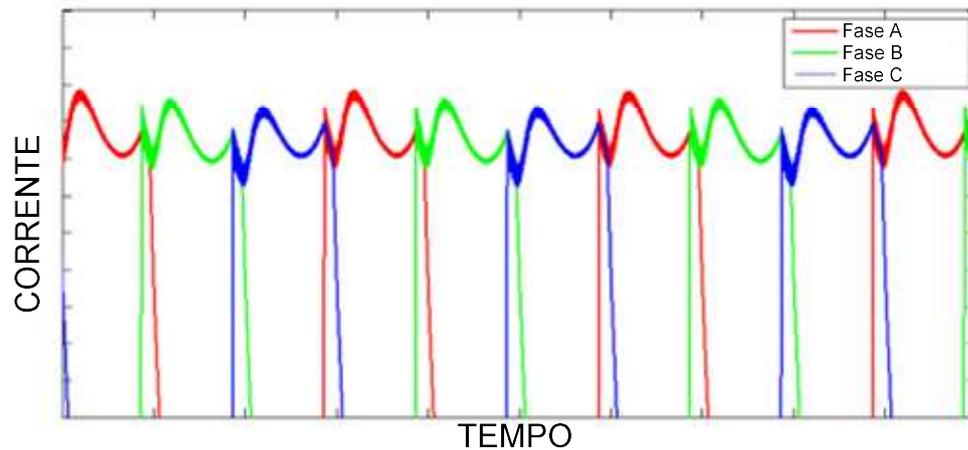


Figura 2.16 - Perfil de corrente das três fases de uma MRV 6/4, adaptado de [30].

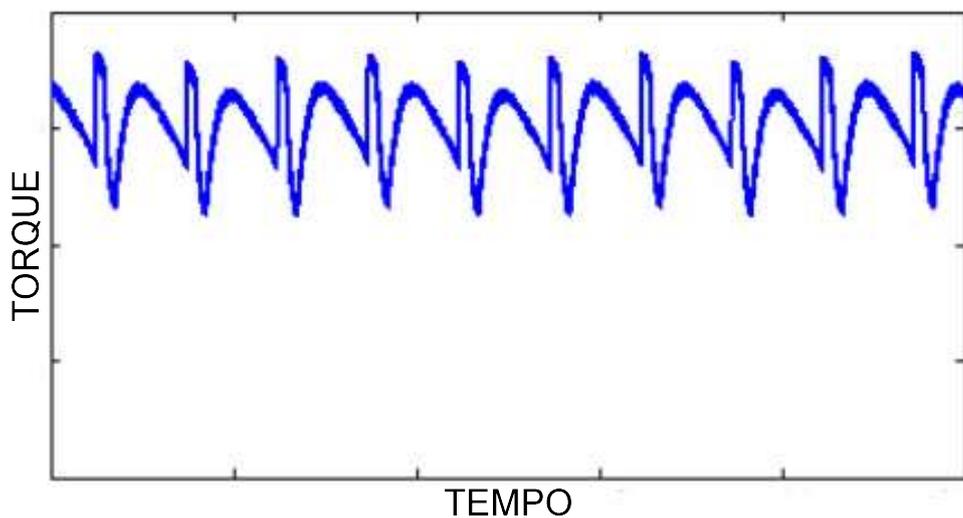


Figura 2.17 - Perfil de torque de uma MRV 6/4 , adaptado de [30].

O torque da MRV pode ser expresso como:

$$T_e = \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \frac{i^2}{2} \quad (2.9)$$

Desta equação de torque pode-se concluir que:

1. O torque é proporcional ao quadrado da corrente, logo a corrente pode ser aplicada em um único sentido, ao contrário das máquinas de indução que requerem a variação do sentido da corrente. Uma vantagem desta característica é que se pode utilizar um menor número de chaves de potência para acionar cada fase da MRV em relação à máquina de

indução quando a mesma deve ser conectada a um barramento de corrente contínua;

2. Como o torque é proporcional ao quadrado da corrente, pode-se fazer uma analogia a uma máquina de corrente contínua com ligação dos enrolamentos em série, que se traduz em um bom torque de partida;
3. É possível utilizar esta máquina como gerador mesmo com a corrente unipolar, caso que é obtido quando a derivada da indutância é negativa;

E mais, acerca da construção e operação da MRV podemos concluir que:

4. A direção da rotação é obtida alterando-se a sequência de energização das fases “A”, “B” e “C”;
5. Esta máquina requer a utilização de um controlador conversor de potência para sua operação, portanto não pode ser conectada diretamente a um sistema de energia trifásico.
6. Qualquer controle que venha a ser implementado, seja no modo motor ou gerador é imprescindível um método de obtenção da posição do rotor.

3 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO DE *FLYWHEEL* DESENVOLVIDO

Este capítulo se dedica a apresentar detalhes do protótipo desenvolvido nesta dissertação. São apresentadas informações construtivas da MRV e dados do conversor eletrônico que foi projetado e construído para o acionamento da máquina como motor e gerador. Também é dado um destaque para o controle da MRV através de um microcontrolador.

A topologia do conversor eletrônico para a conexão do *flywheel* com a rede deve ser uma configuração do tipo bidirecional. Neste caso, dois conversores (conversor rede e conversor máquina) são interligados por um elo de corrente contínua. No presente trabalho, o conversor do lado da rede será substituído por uma fonte CC e toda a energia armazenada no *flywheel* será trocada com o elo CC. O esquema simplificado do protótipo utilizado para os ensaios propostos é apresentado na Figura 3.1. Neste esquema observa-se o conversor eletrônico de potência do lado máquina que foi desenvolvido especificamente para o controle da MRV. Este controlador tem a capacidade de converter a energia elétrica em ambos os sentidos. Em um primeiro momento o controlador aciona a MRV como gerador de torque, convertendo energia elétrica para energia cinética que será armazenada no volante de inércia. Em seguida o controlador possibilita que a MRV funcione como gerador de energia elétrica a partir da energia cinética armazenada no *flywheel*. Observa-se ainda duas chaves S1 e S2: a primeira está conectada à fonte de energia de corrente contínua e a segunda conectada a uma carga resistiva. Estas chaves foram adicionadas ao esquema para possibilitar os ensaios de motor e gerador de forma isolada. A chave S1 é ligada para fornecer energia ao ELO CC enquanto o controlador aciona a MRV no modo motor e carregando o banco de capacitores. Em seguida a chave S1 é desligada e a chave S2 ligada conectando a carga resistiva ao ELO CC. A carga resistiva possibilita o consumo da energia elétrica que é gerada pela MRV. O banco de capacitores tem a função de fornecer energia para a excitação dos enrolamentos da MRV quando esta atua em modo gerador.

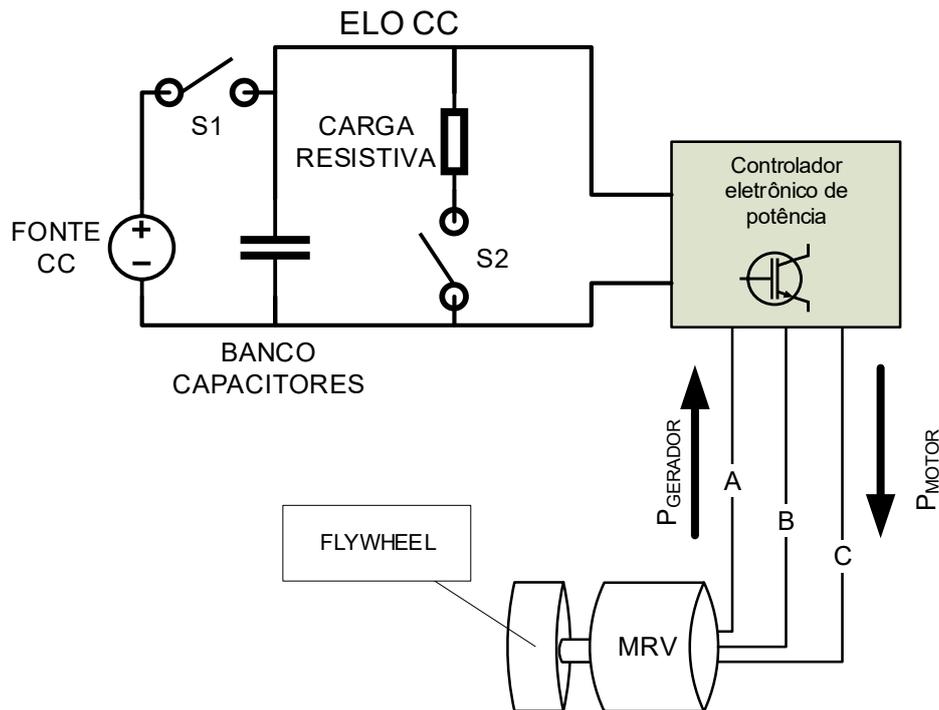


Figura 3.1 - Esquema ambiente de ensaios.

A bancada desenvolvida para teste do protótipo é composta pelos seguintes componentes, que estão apresentados na Figura 3.2:

- Máquina de Relutância Variável e o volante de inércia;
- Controlador eletrônico de potência da MRV;
- Sensor incremental de posição (*encoder*);
- Placa com as chaves de controle de conexão do ELO CC e da carga;
- Banco de capacitores;

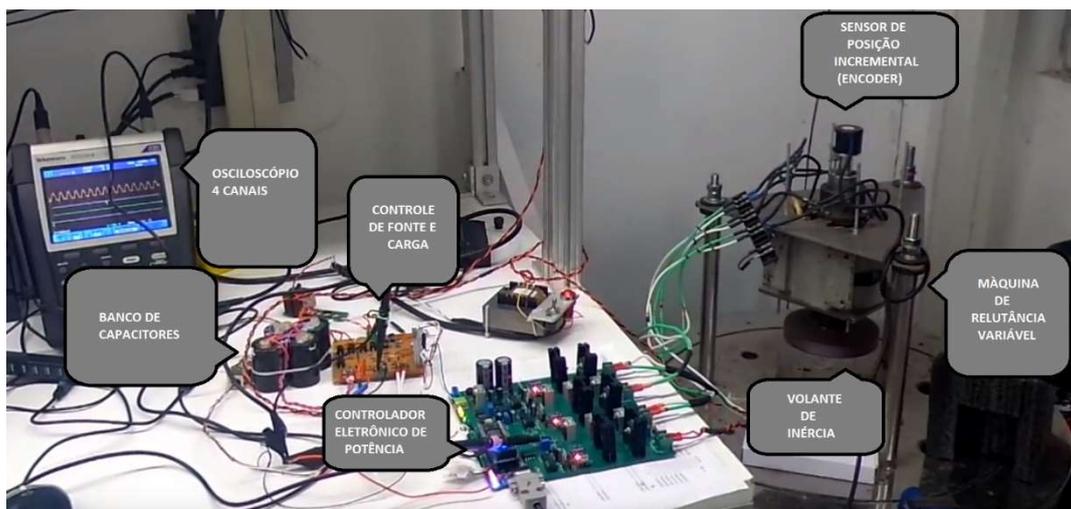


Figura 3.2 – Foto do protótipo utilizado nos ensaios.

3.1 MÁQUINA DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL - MRV

A topologia da MRV utilizada é 6/4, isto é, 6 polos no estator e 4 polos no rotor. A placa de identificação da máquina informa que a mesma possui uma corrente máxima de operação de 12 A em cada enrolamento e velocidade máxima de 6000 rpm. Segundo o fabricante, a máquina possui potência nominal de 1 kW. A resistência elétrica de cada enrolamento foi obtida por meio de ensaio com valor próximo a $0,48 \Omega$. Acoplado ao eixo da MRV existe um volante de material magnético [31]. Este volante também exerce a função de mancal magnético supercondutor de escora, quando a MRV configurada para este arranjo mecânico. No presente trabalho foram utilizados apenas os mancais de rolamento.

A Figura 3.3 ilustra a máquina de relutância utilizada montada na base para os ensaios:



Figura 3.3 - MRV montada na base de ensaios

A Figura 3.4 mostra detalhes do rotor de quatro polos e do estator de seis polos com enrolamentos.



Figura 3.4 - Rotor e estator da MRV

A Figura 3.5 ilustra os polos rotor da MRV com o volante de inércia acoplado ao eixo. O eixo do rotor se encontra montado sobre os mancais mecânicos. O mancal inferior está acoplado à base da MRV.

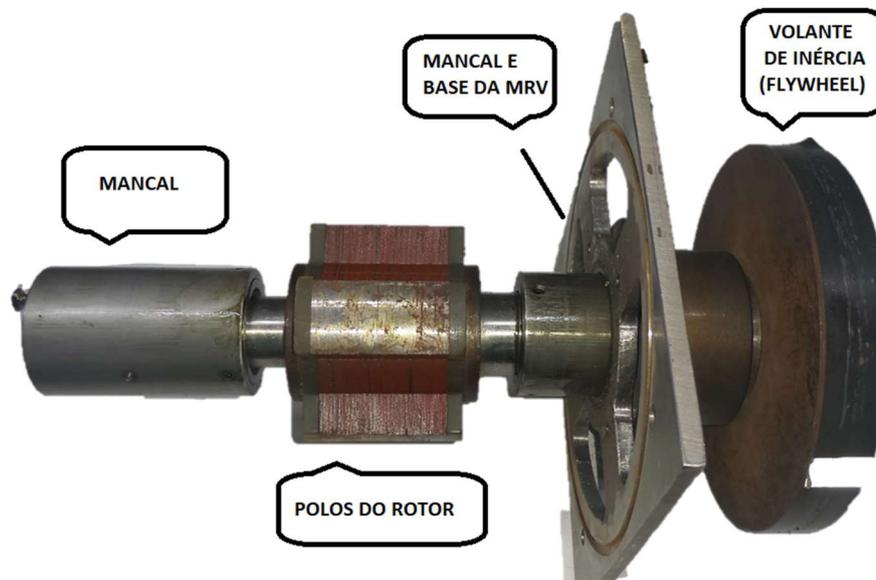


Figura 3.5 -Detalhes do rotor da MRV.

O volante de inércia acoplado ao rotor foi modelado no CAD Solidworks com o objetivo de se obter o momento de inércia MRV. Com este *software* é possível obter o momento de inércia, porém não se trata de uma modelagem detalhada pois não são conhecidos os valores exatos das massas específicas dos materiais envolvidos. Outros detalhes foram ignorados como, por exemplo, o polo do rotor foi adicionado ao modelo como uma peça única apesar de ser composto de lâminas. A Figura 3.6 apresenta o desenho do modelo no Solidworks do rotor da MRV acoplado ao volante de inércia.

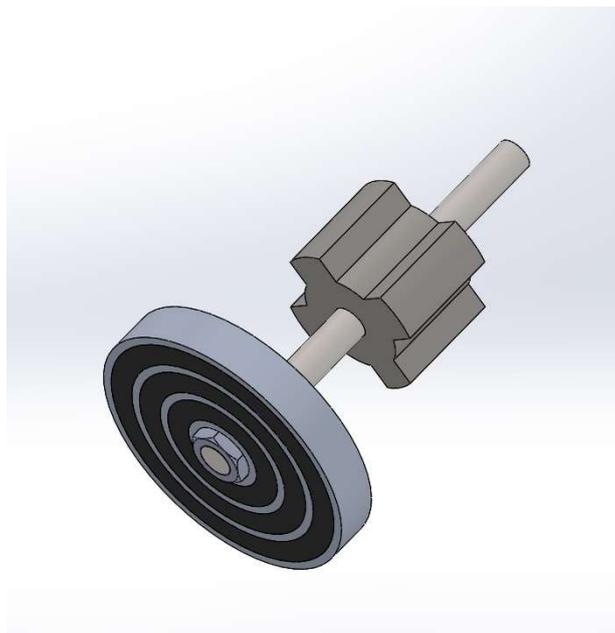


Figura 3.6 - Modelo no *Solidworks* do rotor da MRV e volante de inércia

O momento de inércia de um corpo sólido pode ser obtido a partir da equação [32]:

$$I_m = \int_C r^2 dm \quad (3.1)$$

A partir do modelo do *Solidworks* pode-se obter a Tabela 3.1 com diversas informações sobre o rotor com destaque para o momento de inércia. O momento de inércia exibido foi calculado em relação ao eixo z coincidente com o centro do eixo do rotor:

Tabela 3.1 – Parâmetros do rotor obtidos pelo modelo do Solidworks

Parâmetro do rotor	Valor obtido pelo Solidworks
Massa	1364,65 g
Volume	250251,42 mm ³
Superfície	100568,66 mm ²
Momento de inércia (Jz)	3032300,46 g mm ²

O momento de inércia com valores aproximados no Sistema Internacional de Unidades (SI):

$$I_m = 3032300.46 \text{ gr} \cdot \text{mm}^2 \cong 0,0030 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

3.2 CONTROLADOR E CONVERSOR ELETRÔNICO DE POTÊNCIA

A Figura 3.7 mostra uma foto da placa projetada para o acionamento da MRV. Esta placa abriga os circuitos do conversor de potência e o do controlador da MRV. Vale ressaltar que se trata de um protótipo experimental e não foram considerados os valores máximos de operação da MRV, deste modo, esta placa admite tensões e correntes máximas descritas na Tabela 3.2. Todos os digramas de circuitos da placa podem ser observados nos anexos do Capítulo 7.

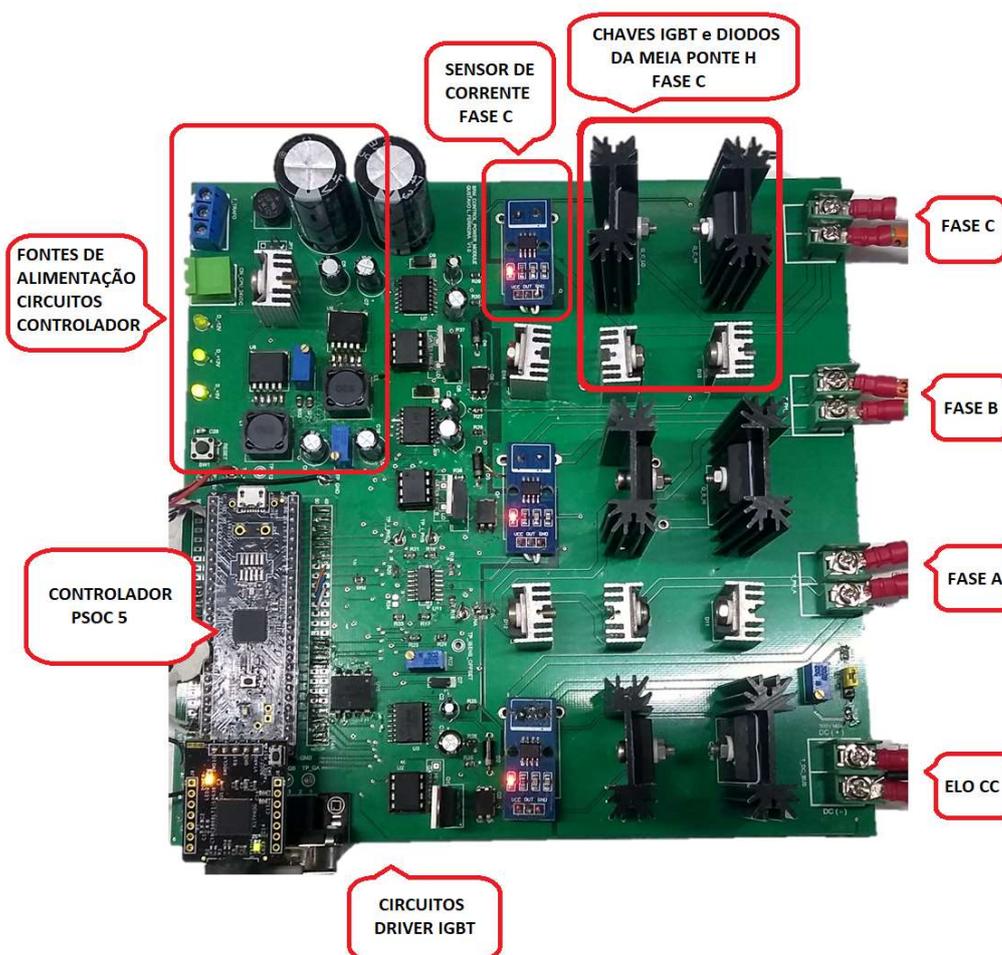


Figura 3.7 - Placa controladora da MRV e conversão de potência.

Tabela 3.2 – Parâmetros de operação do protótipo

Parâmetro	Valor máximo
Tensão do ELO CC	120 V
Corrente contínua por fase	10 A
Tensão de alimentação das fontes (AC)	+24 V e - 24 V

. A Figura 3.8 ilustra o diagrama em blocos dos circuitos que compõem o controlador da MRV. No decorrer deste capítulo serão detalhados os módulos mais relevantes que compõem o diagrama.

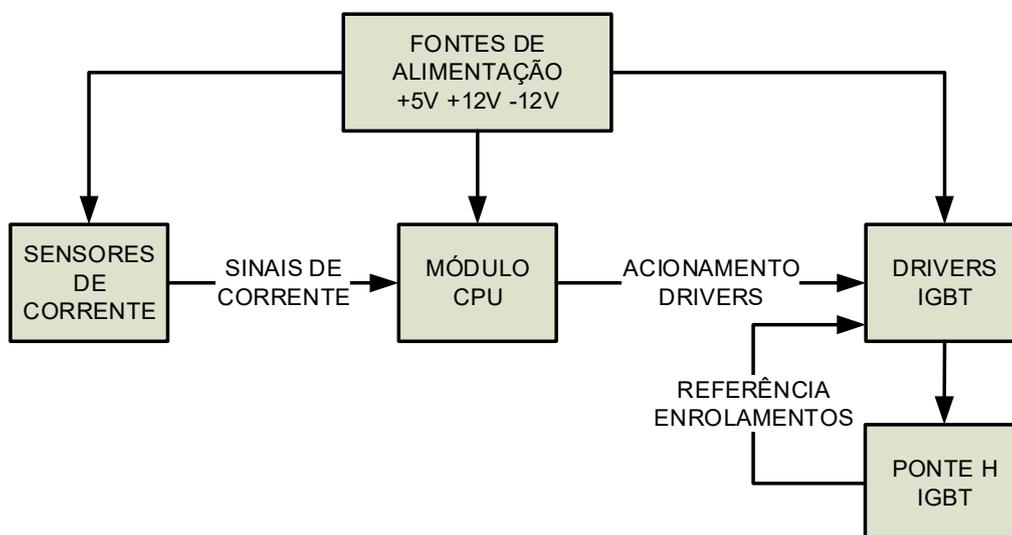


Figura 3.8 - Diagrama em blocos do *driver* desenvolvido para a MRV.

3.2.1 MÓDULO FONTES DE ALIMENTAÇÃO

Este módulo fornece as tensões contínuas para alimentar todos os outros circuitos do controlador. Um transformador com terminal central fornece a tensão alternada de 12 V. Após a retificação e filtragem por capacitores obtém-se as tensões contínuas de +16 V e -16 V. Estas duas tensões são então encaminhadas para reguladores fornecendo as tensões contínuas de +12 V, -12 V e +5 V. As tensões de +12 V e -12 V são utilizadas pelos circuitos *drivers* e pelos amplificadores operacionais que condicionam os sinais dos sensores de corrente. A tensão de 5 V é utilizada pelo microcontrolador e pelos sensores de corrente.

3.2.2 MÓDULO CPU

A Figura 3.9 mostra o detalhe do módulo microcontrolador acoplado à placa do conversor eletrônico de potência. Trata-se de módulo fornecido pela *Cypress* contendo o microcontrolador além de alguns circuitos auxiliares como o circuito de programação. A utilização deste módulo facilita a integração ao protótipo, visto que o acesso aos pinos do microcontrolador é feito através de conectores do tipo *header*.

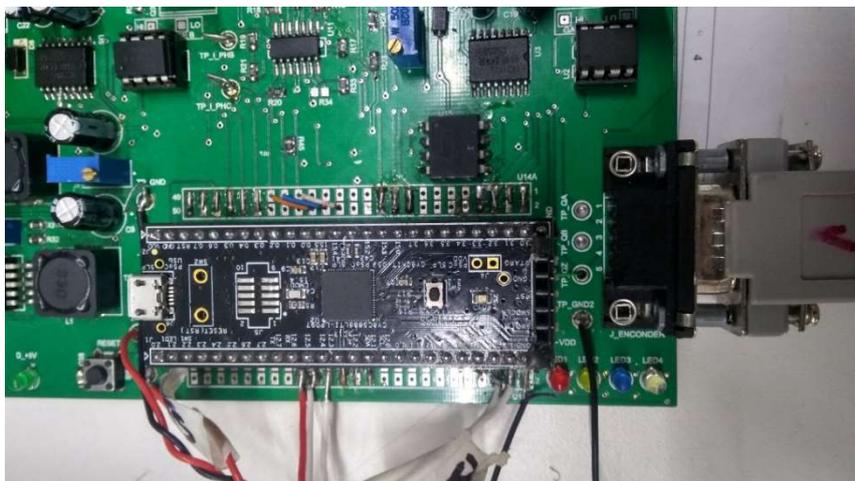


Figura 3.9 – Detalhe do módulo microcontrolador PSOC 5.

Este módulo possui um microcontrolador da família PSOC modelo 5LP do fabricante Cypress. A palavra PSOC representa, na realidade, as iniciais em inglês para *Programmable System-on-Chip*, isto é, sistema programável em um único chip. O fato de ser um sistema programável e não apenas um microcontrolador significa que são encontrados recursos disponíveis em circuitos integrados do tipo *Field-Programmable Gate Array* (FPGA) ou *Complex Programmable Logic Device* (CPLD). Esta característica possibilita que alguns circuitos, que deveriam ser implementados em *hardware* na placa do conversor, podem ser programados dentro do microcontrolador. Além de blocos digitais, o PSOC também apresenta blocos analógicos programáveis como comparadores e amplificadores operacionais. A Figura 3.10, retirada da folha de dados do fabricante, mostra um diagrama em blocos simplificado da arquitetura deste microcontrolador.

Na Figura 3.10 destacam-se os blocos *CPU System*, *Digital System* e *Analog System*.

No bloco CPU System observa-se os seguintes recursos mais relevantes que são descritos com detalhes retirados da folha de dados:

- CPU de arquitetura *Acorn RISC Machine* (ARM) Cortex - M3 de 32 bits e frequência de operação máxima de 80 MHz de *clock* principal;
- 64 kbytes de memória *Static Random-Access Memory* (SRAM) e 256 Kbytes de memória flash;
- Controlador de Interrupções de 32 entradas.

No bloco *Digital System* destaca-se os seguintes recursos:

- 24 blocos de lógica programável *Universal Digital Block* (UDB);
- 4 Contadores/temporizadores/ *Pulse Width Modulation* (PWM) de 16 bits.

No bloco *Analog System* destacam-se:

- 2 conversores analógico/digital (*Successive-Approximation-Register* (SAR) *Analog-to-Digital Converters* (ADC)) de 12 bits e taxa de amostragem de 1 millions of samples per second (MSPS);
- 4 conversores digital/analógico (*Digital-to-Analog Converter* - DAC) de 8 bits;
- 4 comparadores analógicos;
- Filtro digital em ponto fixo de 24 bits (*Digital Filter Block* - DFB).

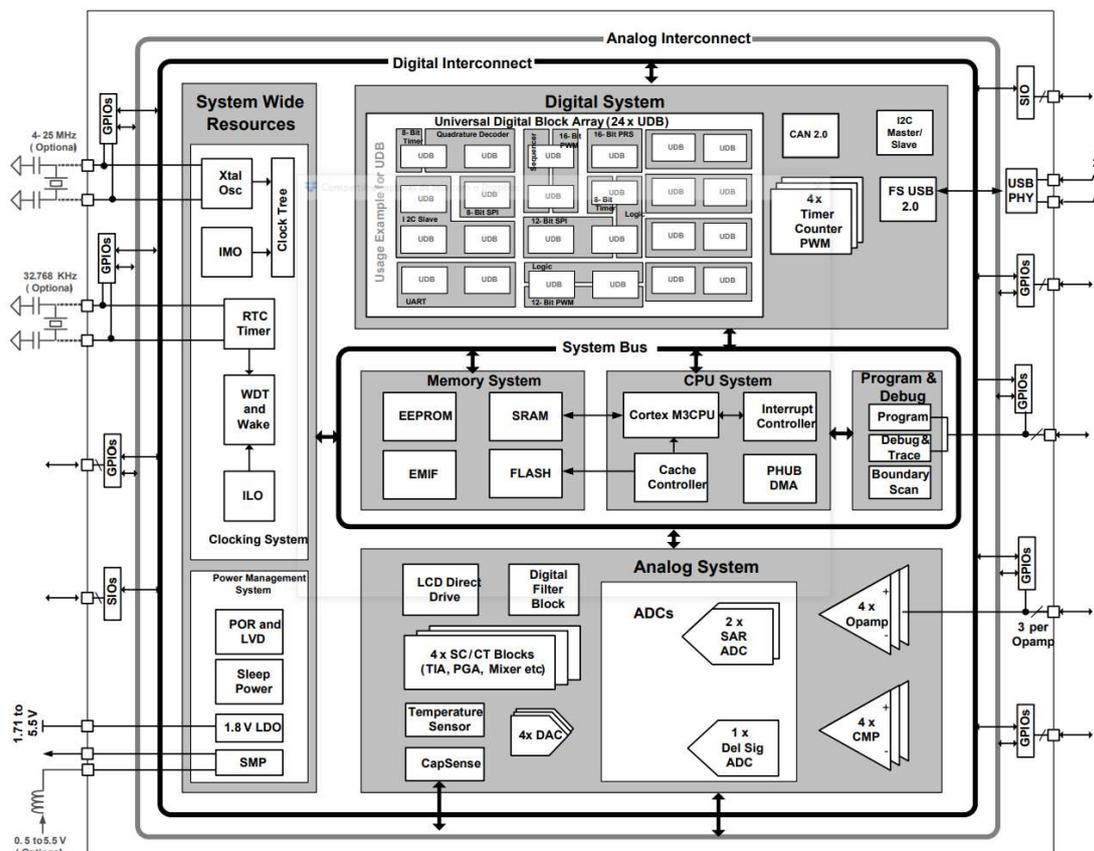


Figura 3.10 – Diagrama em blocos simplificado do PSOC 5

Observa-se ainda os blocos GPIO (*General-Purpose Input/Output*) que representam os pinos de entrada e saída do PSOC. Os pinos podem ser direcionados para um barramento digital (*Digital Interconnect*) que conecta os pinos aos recursos do *Digital System* ou para um barramento analógico (*Analog Interconnect*) que possibilita que os pinos sejam conectados aos recursos do *Analog System*.

Como o PSOC é um dispositivo que possibilita a programação de circuitos de *hardware*, o desenvolvimento de todo o *software*, incluindo destes componentes programáveis, deve ser feito dentro do ambiente PSOC Creator fornecido pela Cypress, fabricante do dispositivo. A Figura 3.11 apresenta a tela principal do PSOC Creator na versão 4.1.

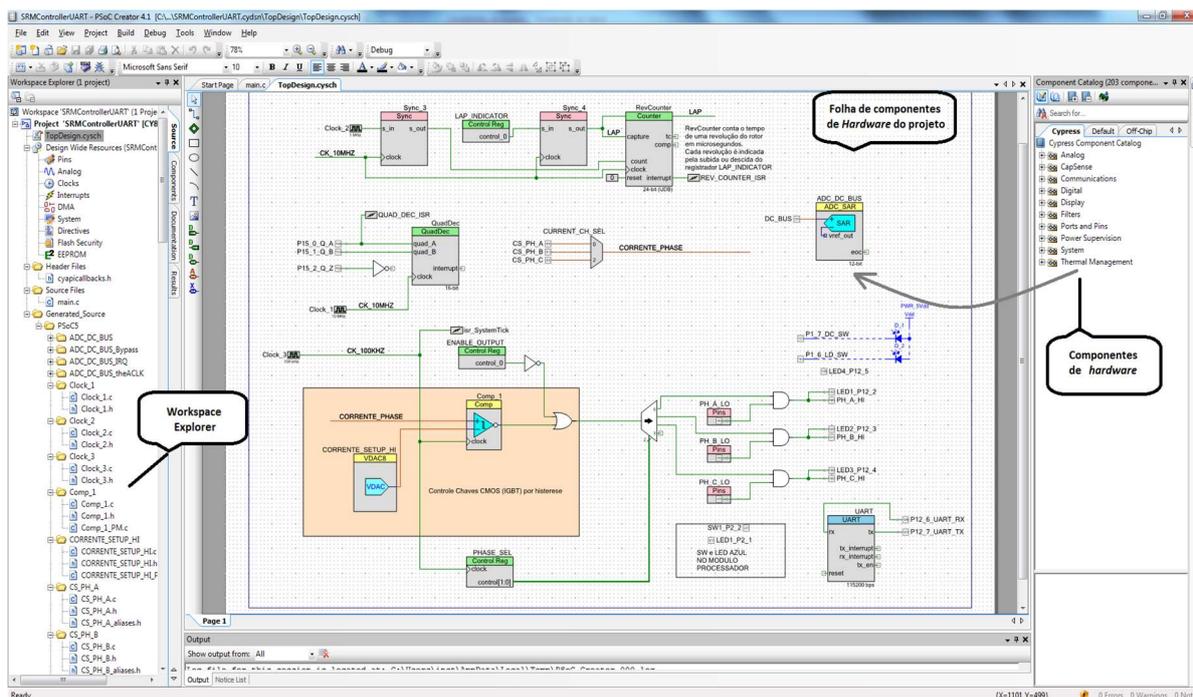


Figura 3.11 - Tela do ambiente de desenvolvimento PSOC Creator.

Na Figura 3.11 observa-se na lateral esquerda a árvore de recursos do projeto atual. Ao centro, a janela com o recurso selecionado, neste caso a folha com os recursos de *hardware* que são utilizados neste projeto. É também na tela central que o *software* em linguagem C deve ser editado. Na lateral direita estão listados os componentes de *hardware* disponíveis para o dispositivo PSOC selecionado para o projeto e que podem ser inseridos na folha com recursos de *hardware* conforme mostrado pela seta no lado direito da Figura 3.11.

3.2.3 MÓDULO PONTE H IGBT

O módulo identificado por “PONTE H IGBT”, observado na Figura 3.8, contém as chaves do tipo *Insulated-Gate Bipolar Transistor* (IGBT). No circuito foi utilizado o H20R1203 fabricado pela Infineon. O Capítulo 7 de anexos apresenta uma figura o do IGBT alguns parâmetros do manual do dispositivo.

Estas chaves atuam nas regiões de corte e saturação, realizando o chaveamento da tensão do elo CC para os enrolamentos da MRV. Este chaveamento é necessário, pois é deste modo que a corrente nos enrolamentos é limitada com o auxílio dos circuitos do microcontrolador e dos sensores de corrente. Estes transistores estão conectados de modo a formar uma ponte assimétrica, como

ilustrado na Figura 3.12. Esta configuração tem como vantagem o fato de evitar que o elo CC entre em curto-circuito em caso de falha das chaves. Uma das chaves está conectada entre o elo CC e o enrolamento, identificada como Q1. A segunda chave está conectada entre o enrolamento e o retorno do elo CC, identificada como Q2.

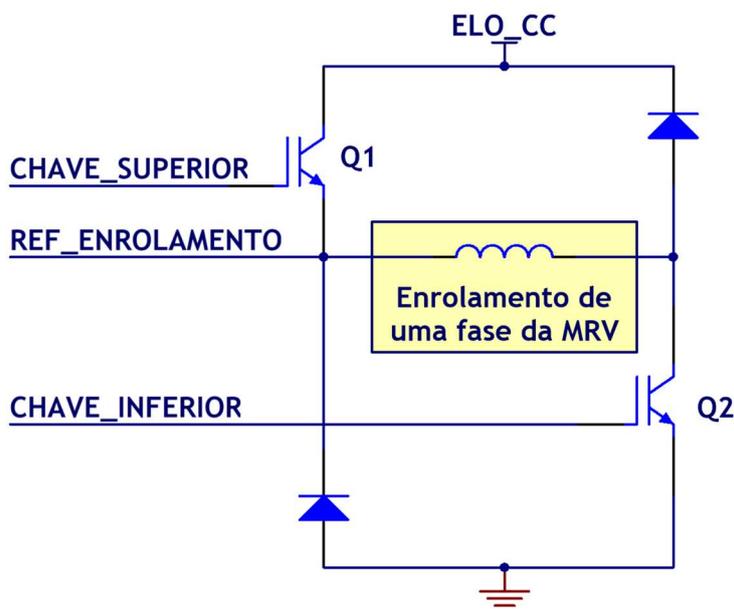


Figura 3.12 – Meia ponte H com chaves IGBT e diodos de *freewheel*.

Este módulo também abriga os diodos de potência que atuam como *freewheel*, que permite que a corrente armazenada no indutor continue a fluir mesmo quando as chaves IGBT são desligadas. Este efeito de *freewheel* também é utilizado para a operação da MRV como gerador, porém neste modo de operação, a corrente é intencionalmente inserida nos indutores em um ângulo do rotor no momento que os polos se desalinham. A corrente é intensificada devido à rotação do rotor da MRV e retorna por estes diodos ao elo CC. Os componentes que compõem o circuito da meia ponte H para fase C na placa do controlador estão destacados na Figura 3.7.

3.2.4 MÓDULO DRIVER IGBT

Este módulo contém os circuitos que acionam os transistores IGBT presentes no módulo ponte H IGBT descrito anteriormente. Os *drivers* são baseados no circuito integrado IR2110S da Infineon Technologies. Este circuito integrado faz o isolamento do microcontrolador que opera em baixa tensão, tipicamente em 5 V, dos circuitos que operam em alta tensão, neste caso, os transistores IGBT que podem

atingir 600 V. O módulo faz o acionamento da chave inferior Q2 da Figura 3.12 como também aciona a chave superior Q1. A chave Q1, por se posicionar na parte superior da fase da MRV, isto é, conecta a fonte de alta tensão do elo CC à fase da MRV, necessita de um circuito de fonte de tensão flutuante, capaz de fornecer a tensão para acioná-la. Neste caso, foi utilizada a técnica do capacitor de *bootstrap*. A Figura 3.13 ilustra detalhe deste circuito *driver* com o indutor L1 representando uma das fases da MRV.

Na Figura 3.13 observam-se três pinos de alimentação VDD, VCC e VB para o circuito integrado IR2110. O pino VDD recebe alimentação dos circuitos de baixa tensão do lado do microcontrolador. Os pinos VCC e VB recebem alimentação de tensão mais alta para acionamento dos transistores. As tensões de VDD e VCC têm como referência o pino “COM”, que é conectado ao zero volt, comum para todas as fontes de alimentação. Por outro lado, a tensão em VB tem como referência o pino VS. Os transistores Q1 e Q2 utilizados necessitam de uma tensão mínima de 10 V entre a sua porta e o emissor para entrarem em condução. Assim sendo, a alimentação de 12 V é suficiente para acionar o transistor Q2, visto que seu emissor está diretamente conectado a referência de zero volt. O transistor Q1, no entanto, necessita que sua porta esteja em uma tensão 10 V mais elevada que a tensão que aparece no pino A de L1 e esta tensão estará próxima da tensão do ELO_CC. Por este motivo a tensão de alimentação desta parte do circuito integrado é feita pelo capacitor C_BOOT e pelo diodo D1, que formam uma fonte de tensão flutuante, isto é, a sua referência varia conforme a tensão no pino VS. Em um momento inicial o terminal negativo de C_BOOT está ligado ao zero volt e o diodo conduz a corrente da tensão de 12 V carregando o capacitor com uma tensão próxima a 12 V, porém, quando o transistor Q2 entrar em condução, a tensão ELO_CC será conectada ao pino A de L1 e, deste modo, o terminal negativo do capacitor estará com uma tensão próxima ao do ELO_CC e seu terminal positivo estará com o valor (ELO_CC + 12 V) fornecendo a condição para que o transistor continue em condução. O diodo D1 impede que o capacitor se descarregue pela fonte de 12 V neste momento. Com o decorrer do tempo este capacitor C_BOOT se descarrega, pois deverá fornecer corrente para o acionamento da porta do transistor Q2, por este motivo é necessário que o capacitor seja recarregado. O circuito indicado no bloco “RECARGA C_BOOT” é o responsável por controlar o momento que o terminal negativo do capacitor é

conectado à referência de zero volt para que o capacitor se carregue com a tensão de 12 V novamente.

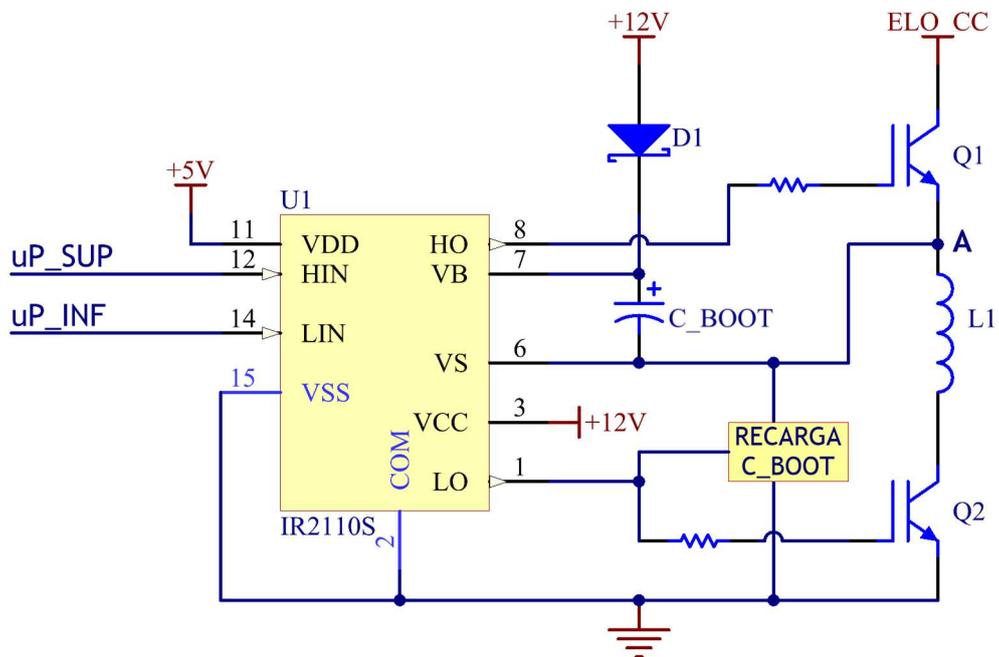


Figura 3.13 - Circuito do Driver IGBT.

O circuito “RECARGA C_BOOT” pode ser observado em destaque na Figura 3.14.

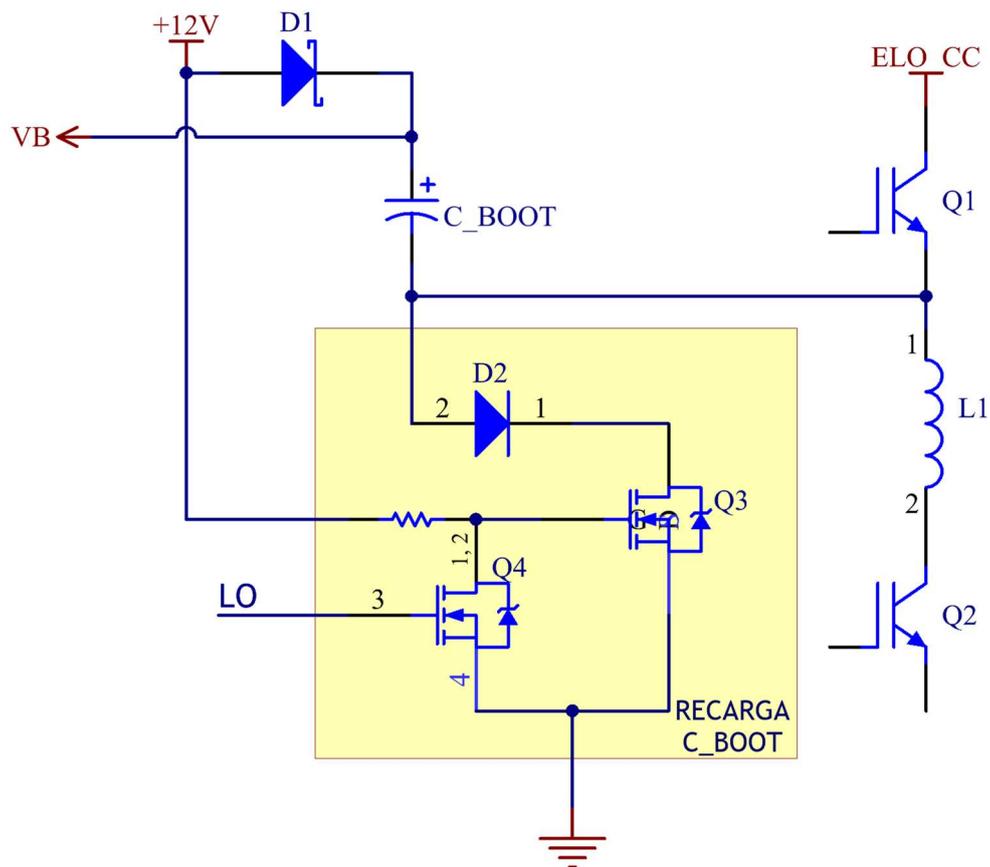


Figura 3.14 - Circuito RECARGA C_BOOT.

O circuito utiliza o transistor Q3 para conectar o pino negativo do capacitor C_BOOT a zero volt. O acionamento do transistor Q3 é feito através do inverso do sinal LO, isto é, quando o sinal LO se apresenta com tensão, o transistor Q3 entra em corte, pois o transistor Q4 conduz conectando a porta de Q3 a referência de zero volt. Com sinal LO em zero volt o transistor Q4 opera na região de corte permitindo que a tensão de 12 V chegue à porta de Q3 conduzindo o terminal negativo de C_BOOT ao zero volt. Deste modo, Q4 funciona como um inversor lógico para a tensão 12 V conectada à porta do transistor Q3, em outras palavras, a carga de C_BOOT está condicionada ao inverso do sinal LO que aciona a chave inferior da fase da MRV. Se a chave inferior estiver conduzindo o terminal negativo de C_BOOT funciona como fonte de tensão flutuante e, quando a chave está em corte, C_BOOT é conectado à referência permitindo que se carregue novamente. O diodo D2 tem a função de proteger o transistor Q3 quanto às tensões negativas que aparecem neste terminal devido à inversão da corrente em L1.

A conclusão é que o capacitor de *bootstrap* possui duas condições: em carga ou como fonte de tensão flutuante. Como o transistor Q2 é chave inferior da fase da MRV, pode-se deduzir a Tabela 3.1 que resume a condição de C_BOOT em relação à atividade de uma das fases da MRV.

Tabela 3.3 - Condição do capacitor de *bootstrap* C_BOOT.

FASE DA MRV	CONDIÇÃO DO C_BOOT
ATIVA	FONTE DE TENSÃO VB
INATIVA	EM CARGA

A utilização deste circuito de recarga do capacitor de *bootstrap* introduz uma desvantagem em relação ao circuito da ponte assimétrica. O diodo D2 e transistor Q3 introduzem um caminho alternativo para corrente, mesmo que a chave inferior esteja desligada. Caso a chave superior esteja acionada um curto-circuito será estabelecido entre no elo CC causando a perda destes elementos.

Existem alternativas de fonte com referência flutuante que podem ser consideradas para substituir o capacitor de *bootstrap* e o circuito de recarga. Uma alternativa é utilizar uma fonte com isolamento galvânico, como encontrados em alguns módulos conversores CC C. São exemplos destes conversores os módulos RH-xx1509D do fabricante RECOM.

Seria possível utilizar outro tipo de *driver*, como por exemplo o circuito integrado: FDA217 da IXYS que possui uma célula fotovoltaica interna dispensando a fonte externa.

Os custos destas soluções são bem mais elevados em comparação com a solução do capacitor de *bootstrap* adotada para o protótipo. Deve-se considerar que estes circuitos devem ser triplicados para controle de uma MRV 6/4. No entanto estas alternativas devem ser consideradas em soluções comerciais.

3.3 MÓDULOS DOS SENSORES DE CORRENTE

Nestes módulos estão contidos os circuitos dos sensores de corrente que circula em cada fase da MRV. Foram utilizados três módulos com sensores de efeito Hall do fabricante Allegro Microsystems de código AC712-30. A Figura 3.15 (a) mostra a

foto de um destes módulos e a Figura 3.15 (b) mostra o módulo adaptado na placa do controlador.

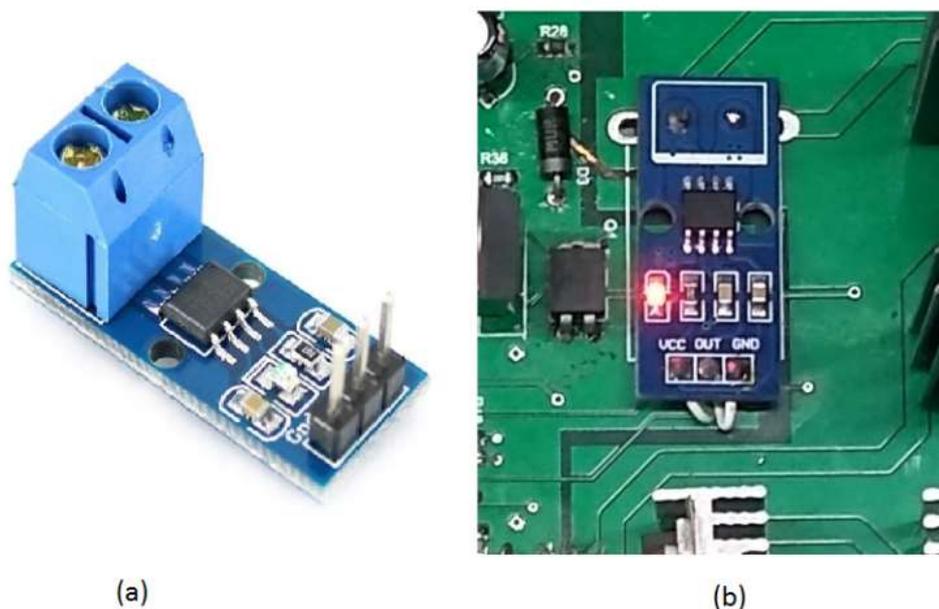


Figura 3.15 - Módulo sensor de corrente.

Estes módulos apresentam em sua saída uma tensão proporcional à corrente que circula pelos seus terminais de prova na taxa de 66 mV/A. Em estado de repouso apresentam a tensão de metade da tensão de alimentação, neste caso 2,5 V, pois são alimentados com a tensão de 5 V. Com o objetivo de facilitar as medidas, a saída dos sensores foram condicionadas com auxílio de amplificadores operacionais para apresentar a taxa aproximada de 100 mV/A e alterar o *offset* para 200 mV. A Figura 3.16 ilustra o circuito de condicionamento de sinal dos sensores de corrente. Trata-se de um amplificador operacional configurado como não inversor. Com o objetivo de facilitar a visualização do valor da corrente no osciloscópio, o ganho do amplificador foi programado para 1.5, assim cada 1 A medido pelo sensor de corrente representava o valor aproximado de 99 mV, podendo-se assim considerar a taxa 100 mV/A com erro de 1%. A tensão OFF_SET presente na entrada negativa é uma tensão ajustável por um potenciômetro na placa do controlador para que, na condição de repouso, o amplificador apresente a saída próxima a 200 mV.

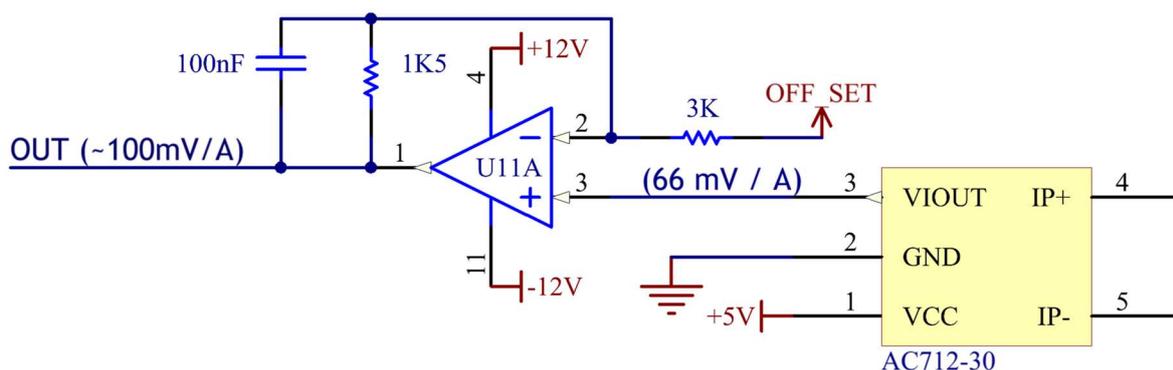


Figura 3.16 - Circuito de condicionamento do sensor de corrente.

3.4 ENCODER INCREMENTAL DE ROTAÇÃO

O modelo do *encoder* é o LPD3806-600BM-G5-24C do fabricante GTEACH. Este *encoder* utiliza discos óticos para geração dos sinais de duas fases em quadratura, isto é, defasados de 90° . Neste *encoder* são gerados 600 pulsos por revolução como uma taxa máxima de 20 kHz e uma velocidade máxima de rotação de 5000 rpm. A Figura 3.17 mostra o *encoder* utilizado acoplado ao eixo da MRV.



Figura 3.17 – Encoder rotativo incremental utilizado.

Por se tratar de um dispositivo incremental, é necessário que o *software* embarcado no controlador mantenha um contador de pulsos com o objetivo de obter a posição absoluta do rotor da máquina. Este contador deve ser zerado quando o número máximo de pulsos por revolução é alcançado. Os pulsos gerados pelo *encoder* em quadratura possibilitam ao *software* do controlador identificar a direção que o rotor está girando, isto é, em um sentido o contador deve ser incrementado e

no sentido contrário deve ser decrementado. A posição do rotor é fundamental para operação da máquina tanto em modo motor quanto em modo gerador, por este motivo a cada incremento gerado pelo *encoder* é gerada uma interrupção no *software* do controlador com a finalidade de manter o contador de posição sempre atualizado. Os gráficos da Figura 3.18 ilustram os pulsos das fases em quadratura gerados pelo *encoder*.

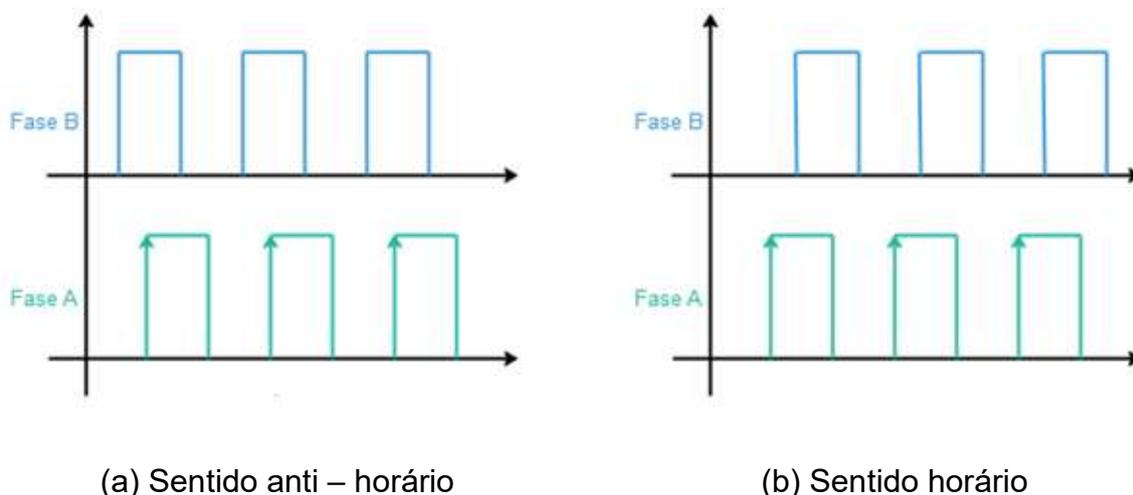


Figura 3.18 - Fases dos pulsos em quadratura gerados pelo encoder.

Na Figura 3.18 (a) observa-se os pulsos gerados em duas fases no sentido anti-horário enquanto que na Figura 3.18 (b) ilustra os pulsos gerados no sentido horário. A contagem dos pulsos é feita pelo componente de *hardware Quadrature Decoder (QuadDec)* implementado no microcontrolador. A Figura 3.19 mostra o componente utilizado no *software* do microcontrolador. As entradas do componente *quad_A* e *quad_B* estão conectadas às fases do *encoder* pelos pinos do microcontrolador.

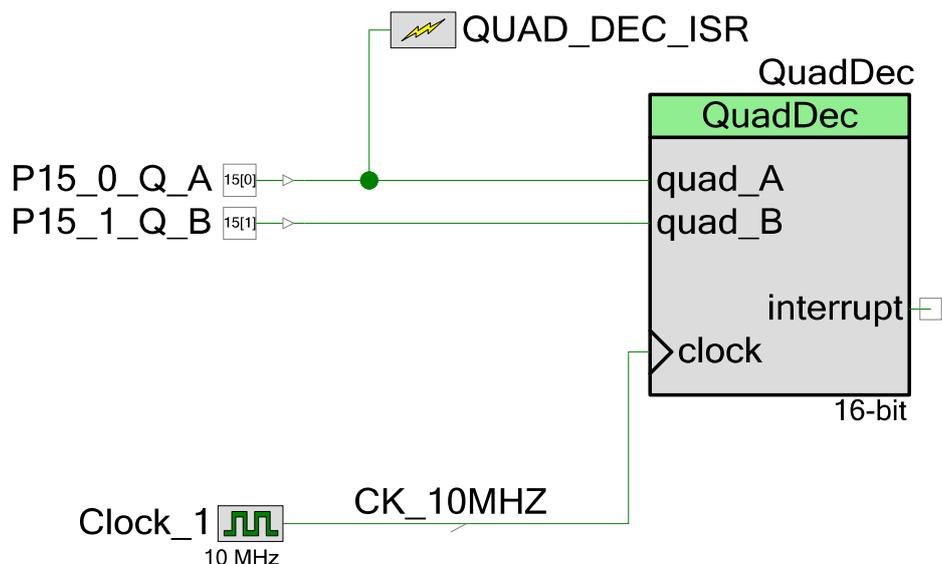


Figura 3.19 – Componente *Quadrature Decoder*.

Um sinal de *clock* de 10MHz se encarrega de sincronizar as leituras das fases. As setas ilustradas na fase A da Figura 3.18 mostram o momento que uma interrupção é gerada para o microcontrolador e por este motivo, na Figura 3.19, existe um componente denominado QUAD_DEC_ISR responsável por gerar a interrupção para o processador. Na rotina de tratamento desta interrupção, o processador interroga o componente *QuadDec* e obtém o número de pulsos que foram contados até o momento; caso este número exceda a quantidade de pulsos por revolução do *encoder*, o número obtido é subtraído da quantidade total de pulsos por revolução e o componente é reconfigurado para este novo valor. O *encoder* utilizado possui 600 pulsos por revolução, logo a maior contagem do componente é 599. Por exemplo, se uma leitura feita no *encoder* retornar a contagem 602 então o registrador do componente é reconfigurado para o valor 2, sendo este o número utilizado como posição atual do rotor. É fundamental para todo o controle da MRV que este procedimento de obtenção de posição do rotor seja confiável, por este motivo essa interrupção é configurada com a mais alta prioridade.

3.5 PLACA CONTROLADORA DO ELO CC E ACIONAMENTO DA CARGA

Com o objetivo de testar o modo gerador da MRV foi desenvolvida uma placa controladora com um relé capaz de conectar e desconectar o elo CC da placa que

abriga o conversor de potência. Também foi adicionado a esta placa um transistor de potência que conecta a carga resistiva ao elo CC. Tanto a bobina do rele como o transistor são acionados pelo microcontrolador da placa controladora. Com estes componentes foi possível programar a sequência de passos do algoritmo proposto para os ensaios do sistema armazenador de energia. A Figura 3.20 ilustra um diagrama em blocos da forma como estes componentes estão conectados ao ambiente de ensaios.

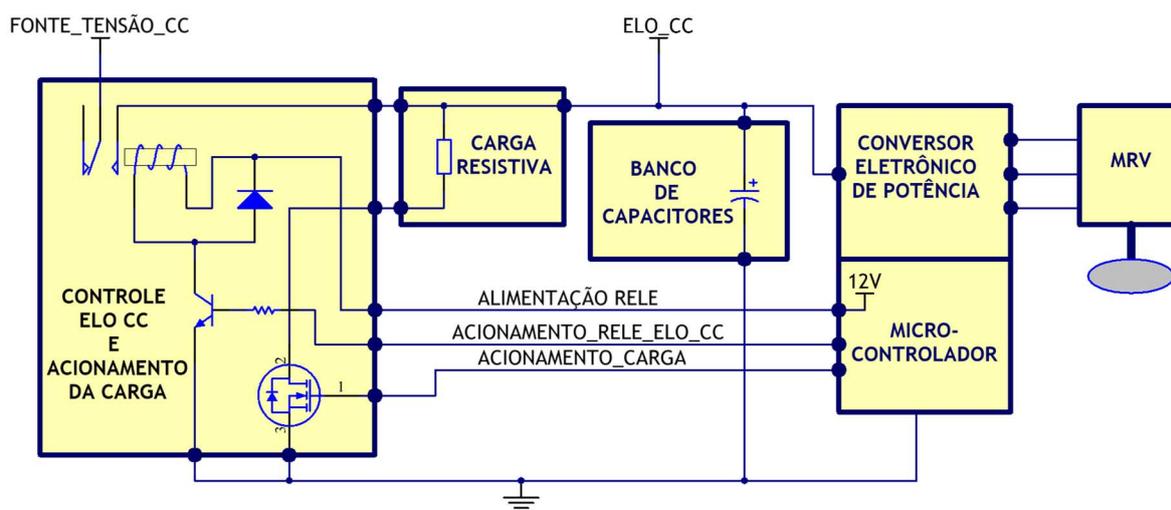


Figura 3.20 - Chaves de acionamento da fonte de tensão CC e da carga resistiva.

3.6 BANCO DE CAPACITORES

O banco de capacitores é composto por quatro capacitores com valor nominal de $3300 \mu F$ para tensão de até $160 V$. Os capacitores estão conectados em paralelo de modo que o valor nominal total do banco é de $13200 \mu F$. A energia armazenada E em um capacitor de capacitância C submetido a uma tensão V pode ser calculada pela equação:

$$E = \frac{CV^2}{2} \quad (3.1)$$

Como a fonte DC utilizada fornece o máximo de $64 V$, é possível calcular a energia armazenada como $27,03 J$. Parte desta energia armazenada será utilizada para energizar os enrolamentos da MRV quando a mesma estiver no modo gerador. O restante da energia mantém o elo CC com uma tensão constante.

3.7 CARGA RESISTIVA

Para o ensaio da MRV no modo gerador foi necessário adicionar uma carga resistiva ao elo CC. Foram utilizados resistores ligados em duas configurações com resistências totais aproximadas de 155 Ω e 270 Ω .

3.8 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Para alimentação do elo CC foi utilizada uma fonte comercial do fabricante ICEL modelo PS-6000. Trata-se de uma fonte ajustável de corrente contínua capaz de fornecer a tensão máxima de 64 V com controle de corrente de até 6 A, possuindo um isolamento galvânico da rede elétrica. A utilização deste equipamento possibilitou que os ensaios em bancada ocorressem de forma controlada, gradativa e com segurança para as pessoas e demais equipamentos envolvidos.

3.9 ESTRATÉGIA DE CONTROLE DA MRV - MOTOR

O diagrama da Figura 3.21 auxilia no entendimento da estratégia de controle da MRV atuando como motor. O controle é executado pelo conjunto de *software* e *hardware* embarcado no microcontrolador. No modo motor o objetivo do controle é a velocidade de referência ω_{ref} que é subtraída da velocidade real do motor obtida a partir do *encoder* acoplado ao eixo do rotor da MRV, gerando o sinal de erro ω_{err} . Este sinal é utilizado como variável de entrada para um controlador proporcional e integral (PI), gerando a corrente de referência I_{ref} para as três fases da MRV.

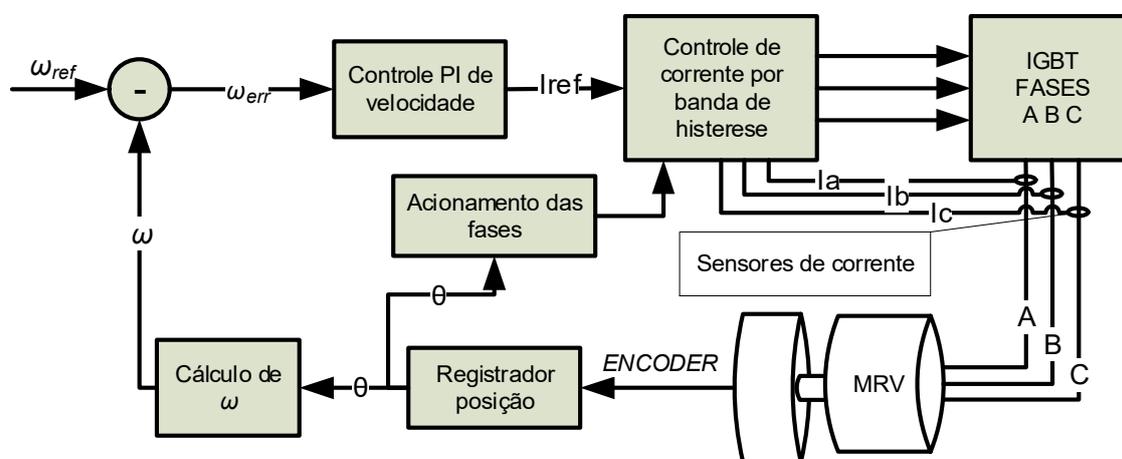


Figura 3.21 - Diagrama de controle MRV modo motor.

O bloco “Controle PI de velocidade” é um controlador proporcional e integral implementado em um trecho de código do laço principal do *software* do microcontrolador. Cada iteração do laço principal é executada em 1 ms, portanto, este é o tempo de amostragem utilizado para os cálculos do controlador.

A velocidade real da máquina é obtida a cada volta completa do rotor e é calculada pelo bloco “Cálculo de ω em rpm”. A Figura 3.22 ilustra o circuito no PSOC que auxilia na obtenção da velocidade. O circuito funciona da seguinte forma: o componente de *hardware* (RevCounter) é um contador de 24 bits com um *clock* (Clock_count) de 1 MHz capaz de registrar a contagem de acordo com a transição de um sinal na sua entrada de captura, LAP_INDICATOR. O sinal LAP_INDICATOR é um registrador de um bit acionado por *software*.

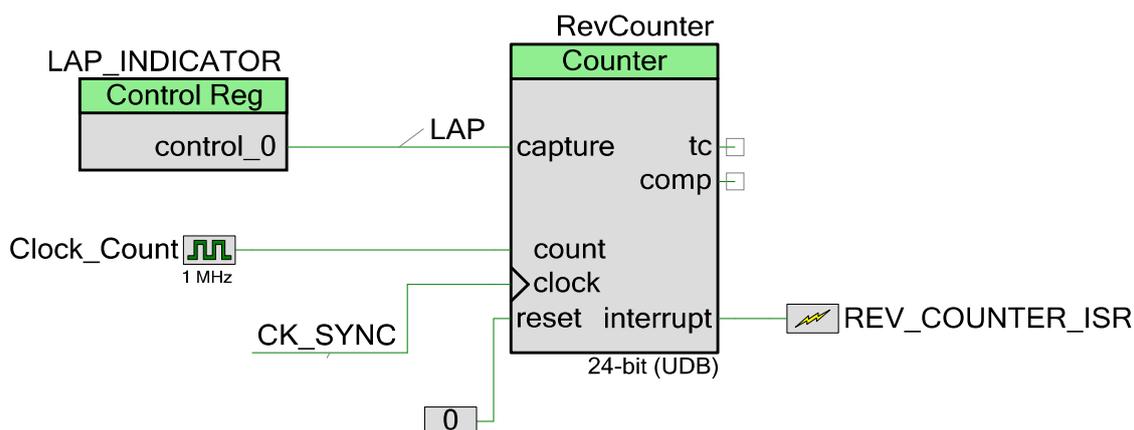


Figura 3.22 - Circuito contador de tempo de uma volta da MRV.

A cada volta completa do rotor da MRV, o bloco Registrador de posição inverte o sinal do registrador LAP_INDICATOR. Essa transição de LAP_INDICATOR força a captura da contagem de RevCounter em um registrador interno ao componente e reinicia a contagem. Neste momento também é gerada uma interrupção REV_COUNTER_ISR. A rotina de tratamento desta interrupção copia o valor do registrador interno para uma variável global do *software* e assim obtém o tempo de uma volta completa com resolução de 1 μ s, que é o período do gerador de *clock* conectado à entrada *count* do componente. O bloco “Cálculo de ω em rpm” utiliza esta variável global para calcular a velocidade em rpm. Dado que o tempo de uma volta completa é significativamente maior que 1 ms, por exemplo, uma volta 10 ms

representa a velocidade 6000 rpm, o controle de velocidade PI obtém o mesmo ω_{err} repetidas vezes por vários ciclos do laço principal, porém a saída do controlador que é a corrente de referência I_{ref} para as fases da MRV será atualizada a cada 1 ms. Este método pode causar problemas no controle, pois introduzi atrasos variáveis no laço de realimentação. Uma alternativa seria obter o tempo entre o chaveamento de duas fases consecutivas ou até mesmo entre duas transições passos do *encoder* de rotação. Estas duas alternativas aumentam a resolução da velocidade de rotação, porém o número de cálculos ou interrupções no microcontrolador também aumenta podendo degradar o desempenho do controle de toda forma.

Os parâmetros utilizados no controlador PI foram ajustados conforme os valores obtidos a partir da simulação realizada no trabalho da referência [33] com a função de transferência descrita em (3.1):

$$C(s) = \frac{K_i(1+sT_i)}{sT_i} \quad (3.1)$$

Onde $K_i = 2,2897$ é o ganho e $T_i = 0.4738$ constante de tempo. Esta equação pode ser escrita de outra forma evidenciando os ganhos proporcional, G_p , e integral G_i .

$$C(s) = G_p + \frac{G_i}{s} \quad (3.2)$$

$$\text{Onde } G_p = K_i \text{ e } G_i = \frac{K_i}{T_i}.$$

Pode-se finalmente calcular os ganhos: $G_p = 2,2897$ e $G_i = 4,8326$.

Cada uma das fases deve ser acionada de acordo com a posição θ obtida pelo bloco “Registador de posição” conforme a teoria descrita no Capítulo 2. O bloco da Figura 3.21, identificado por “Acionamento das fases”, tem esta função. Este bloco foi desenvolvido como uma rotina de tratamento da interrupção QUAD_DEC_ISR gerada pela transição positiva da fase A do *encoder* de posição, descrita no item 3.4. Esta rotina deve ser executada muito rapidamente pelo microcontrolador, pois são geradas 600 interrupções por volta completa da MRV. Para isto foi criada um vetor na memória do microcontrolador onde o índice deste vetor representa cada uma das posições do *encoder* (0 a 599) e em cada posição do vetor está armazenada qual a fase deve ser acionada. Esta solução limita a velocidade de acionamento da MRV,

pois para velocidades maiores pode ser necessário o acionamento de mais de uma fase simultaneamente. A Figura 3.23 ilustra o uso destes vetores pelo *software* do microcontrolador. Esta figura apresenta também um exemplo do vetor utilizado quando controlador opera a MRV em modo gerador, que será detalhado mais adiante neste texto.

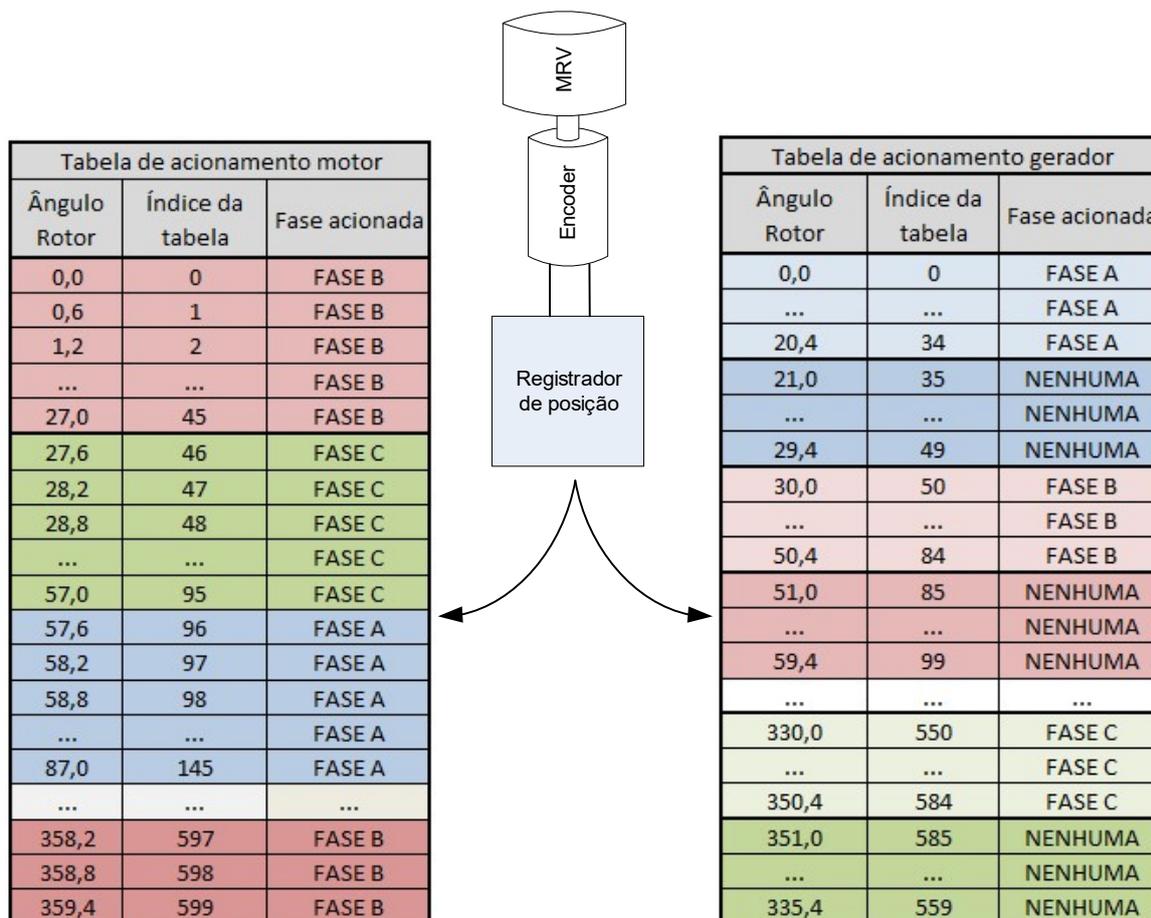


Figura 3.23 - Vetores de acionamento da fase de acordo com a posição.

A saída do controlador PI é a corrente de referência, I_{ref} , que é utilizada como entrada do bloco “Controlador de corrente por histerese”. O circuito que desempenha este controlador está ilustrado na Figura 3.24.

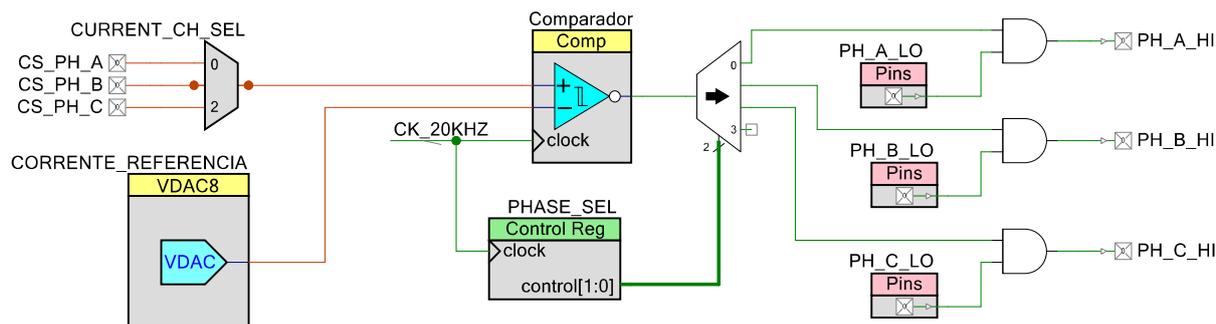


Figura 3.24 - Controlador de corrente por histerese.

Este controlador por histerese compara a corrente de referência com a corrente obtida pelos sensores de corrente conectados a cada uma das fases. Este circuito possui apenas um comparador. A entrada negativa está conectada ao conversor digital-analógico “CORRENTE_REFERENCIA” que, como o nome sugere, é configurado com o valor desejado da corrente que se deseja no enrolamento. A entrada positiva está conectada a um multiplexador analógico de três entradas para uma saída. As entradas deste multiplexador estão conectadas a cada um dos sensores de corrente. A seleção deste multiplexador é feita pelo bloco “Acionamento das fases”, isto é, de acordo com a posição atual do rotor decide-se qual sensor será comparado com a referência. De maneira semelhante está a saída do comparador, neste caso, a saída está conectada a um demultiplexador de uma entrada para três saídas. A saída do demultiplexador também é selecionada pelo bloco “Acionamento das fases” que de acordo com a posição atual do rotor ajusta o registrador PHASE_SEL para que a saída do comparador acione a chave superior da meia ponte H correspondente àquela fase selecionada. Os pinos PH_A_LO, PH_B_LO e PH_C_LO acionam a chave inferior da meia ponte H e são acionados pelo bloco “Acionamento das fases”. Importante notar que as portas lógicas tipo AND possibilitam que a chave superior seja acionada somente se a respectiva chave inferior estiver acionada.

A histerese do comparador impede que a sua saída oscile quando as suas entradas se encontram com valores muito próximos deste modo o valor da histerese é adicionado ou subtraído do valor da entrada de referência quando a saída lógica do comparador é “0” ou “1” respectivamente.

Em resumo, a saída do comparador representa uma saída lógica que atua na chave superior da ponte H com os efeitos indicados na corrente das fases conforme a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Saída do circuito comparador por histerese.

Estado das entradas do comparador	Saída lógica do comparador	Efeito na chave superior e na corrente da fase
$V_{\text{sensor de corrente}} > V_{\text{corrente referência}} + V_{\text{HIST}}$	0	Desliga a chave e a corrente da fase diminui
$V_{\text{sensor de corrente}} < V_{\text{corrente referência}} - V_{\text{HIST}}$	1	Liga a chave e a corrente da fase aumenta.

O valor da histerese, V_{HIST} , do componente utilizado é fixo em 5 mV. Este valor é baixo para os propósitos deste circuito, pois a amplitude típica do ruído apresentado pelos sensores de corrente é de 21 mV pico à pico.

Com a finalidade de limitar a sincronizar a saída deste circuito comparador, o componente apresenta uma entrada de *clock*. Esta entrada possibilita que a saída seja registrada em um circuito lógico de memória com a frequência do *clock*. Assim mesmo que a entrada do comparador oscile numa frequência maior que a frequência do *clock* a saída deste circuito lógico se mantém estável durante o período de um ciclo de *clock*. No presente circuito foi utilizada frequência de 20 KHz com o objetivo de reduzir efeito do ruído no sensor de corrente, que possui banda de frequência de 80 KHz. Esta frequência também foi utilizada para a simulação no trabalho da referência [33].

3.10 ESTRATÉGIA DE CONTROLE DA MRV - GERADOR

A Figura 3.25 apresenta o digrama utilizado para o acionamento da MRV no modo gerador. Observa-se que neste controle, o modo gerador é mais simples, pois foi retirado o controle PI de velocidade em comparação com o diagrama do controle no modo motor da Figura 3.21. Isto significa que não foi implementado realimentação para a potência gerada, ou seja, a tensão gerada no elo CC

dependerá da potência drenada pela carga e do ângulo e valor da corrente de excitação das fases.

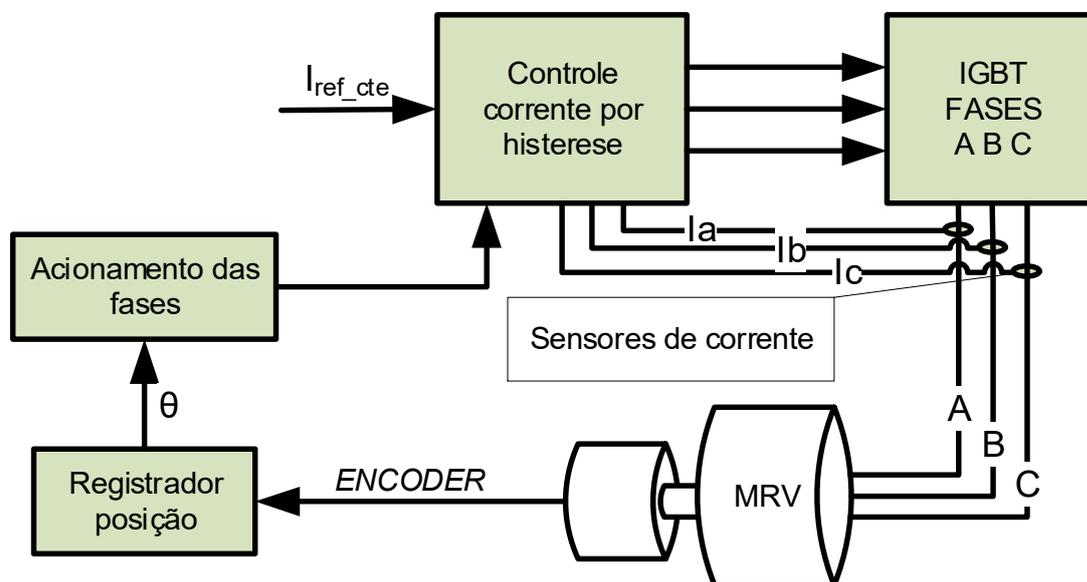


Figura 3.25 - Controle da MRV em modo gerador

Como visto no Capítulo 2, para operar a MRV no modo gerador, é necessário excitar os enrolamentos com uma corrente em um determinado intervalo de ângulos do rotor e em seguida abrir as chaves de alimentação da fase, por este motivo o bloco “Controle de corrente por histerese” permanece idêntico ao controle do modo motor. O bloco “Acionamento das fases” sofre uma alteração no seu vetor de acionamento das fases enquanto o algoritmo deste bloco permanece inalterado. Com esta estratégia, são criados dois vetores na memória do controlador: um para o modo gerador e outro para o modo motor como foi ilustrado na Figura 3.23. Deste modo, a tarefa de alterar o modo de atuação da máquina é feita por dois passos simples: alterar o vetor usado para acionamento das fases e a origem da corrente de referência, controle PI ou valor constante. No presente estudo, foram utilizados valores constantes para corrente de referência no modo gerador, assim foi possível gerar curvas da potência gerada pela MRV para várias correntes de excitação. Porém os ângulos θ_{ON} e θ_{OFF} , descritos no Capítulo 2, foram fixados nos ângulos 30° e 50° respectivamente.

A Figura 3.26 auxilia a descrever como foi programada, no *software* do microcontrolador, a estratégia completa de controle para o funcionamento da MRV

em ambos os modos de operação. Neste diagrama observa-se: a chave lógica implementada no *software* e o bloco “Acionamento das fases”, que agora apresenta dois vetores, um para modo gerador e um para modo motor. A seleção de qual vetor será utilizado é sincronizado com a chave lógica do modo de operação.

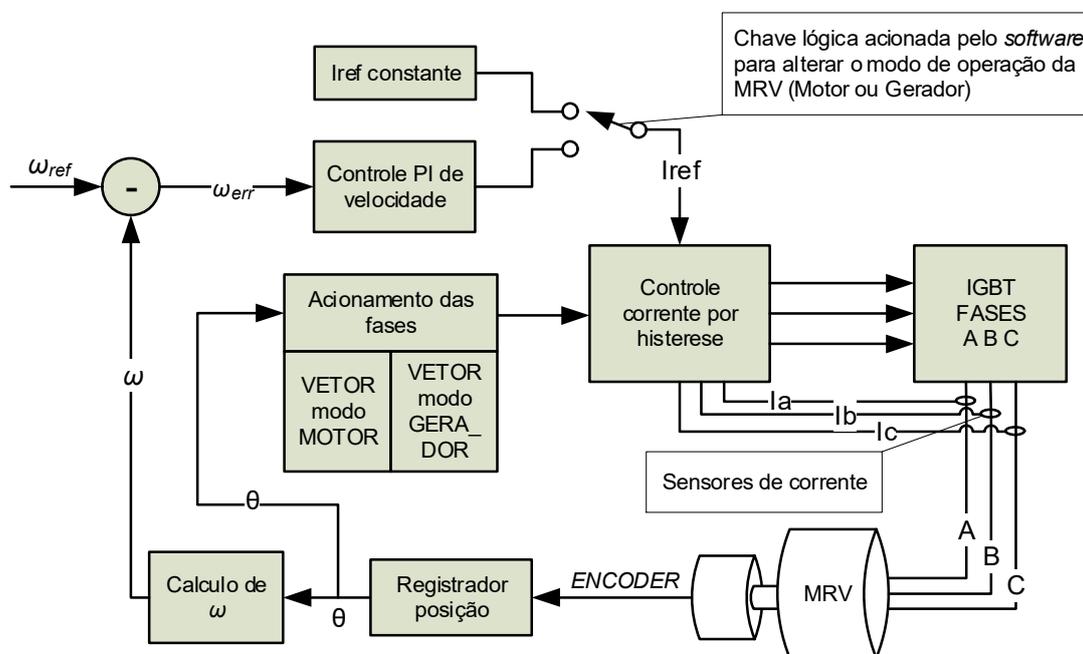
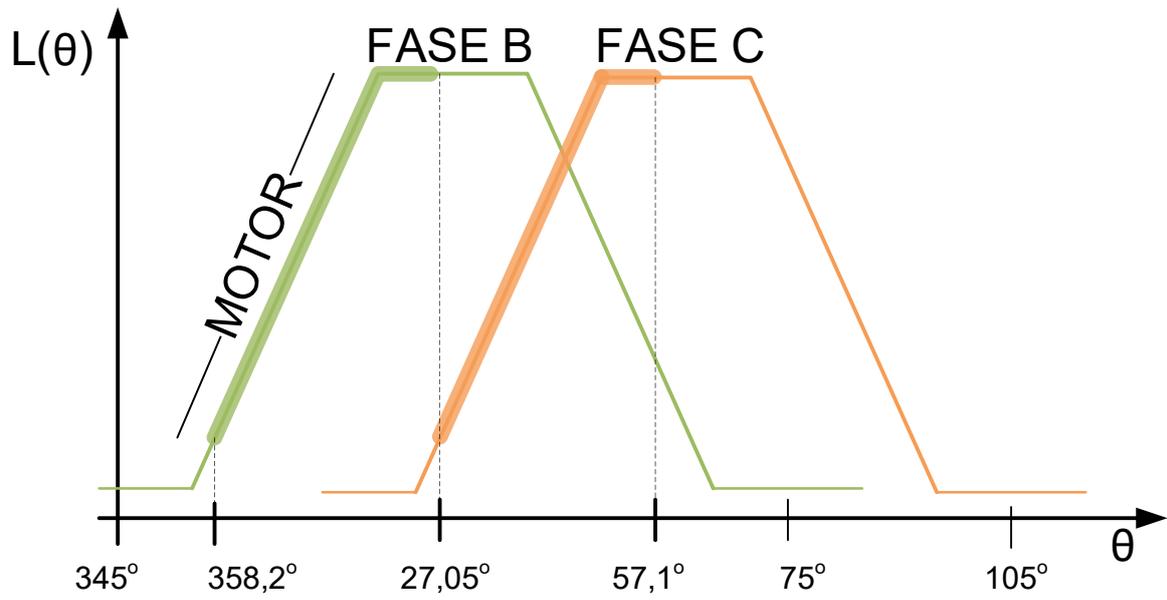
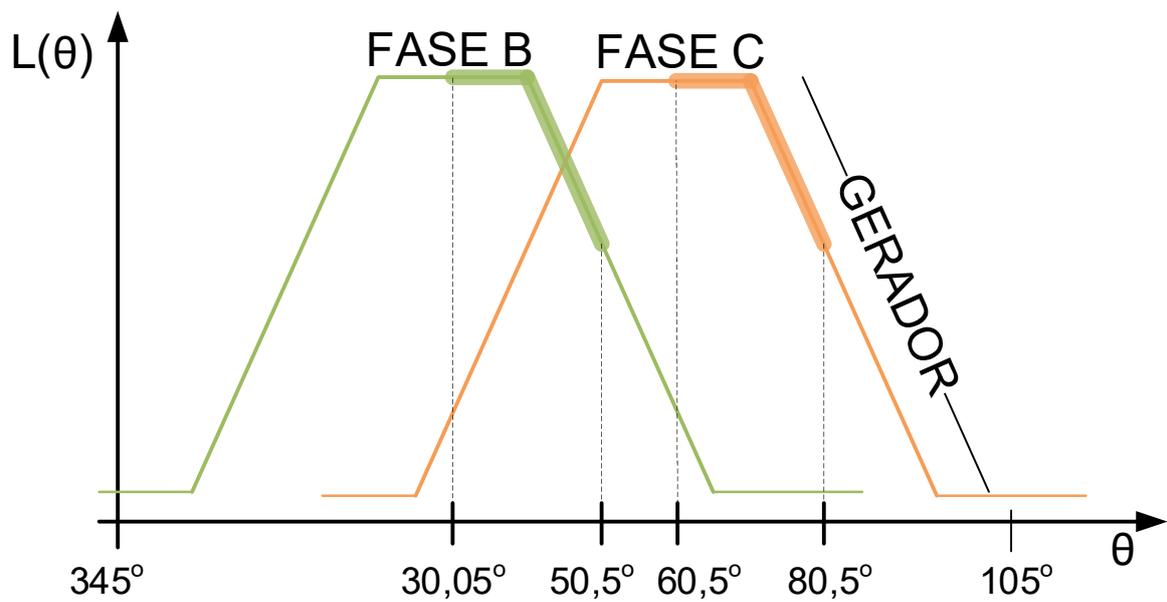


Figura 3.26 - Controlador completo da MRV

Os gráficos da Figura 3.27 ilustram como foi montado um trecho dos vetores que são utilizados para acionamento das fases da MRV de acordo com a posição atual do rotor. Este trecho representa a sequência de acionamento de duas fases. O eixo horizontal representa o ângulo atual do rotor e o eixo vertical a indutância correspondente. Por exemplo: na figura327 (a) quando o rotor se encontra próximo da posição de 358° a fase B é acionada até o ângulo próximo de 27° . Após 27° a fase C é acionada e assim sucessivamente.



(a) Modo motor



(b) Modo gerador

Figura 3.27 – Exemplo dos ângulos de acionamento das fases nos modos motor e gerador

4 RESULTADOS DOS ENSAIOS EXECUTADOS NA MRV

Este capítulo apresentará os resultados dos testes realizados na MRV operando como motor e gerador. O objetivo dos ensaios propostos para o presente trabalho é armazenar energia cinética no *flywheel* e em seguida retornar a energia armazenada para o elo CC na forma de energia elétrica para ser consumida por uma carga puramente resistiva. Não é realizado nenhum controle no sentido de regular a potência gerada. O objetivo é simplesmente demonstrar a capacidade de transferir totalmente a energia armazenada no volante de inércia para carga. Será visto, no entanto, que algum controle pode ser realizado limitando-se a corrente que é utilizada para excitar as fases da MRV em modo gerador, apesar desta não ser a melhor estratégia para o controle da potência gerada. Existem algumas aplicações onde é necessário despejo de toda energia armazenada no menor tempo possível, gerando um pulso de energia. Exemplos destas aplicações são os sistemas bélicos, com EMALS, *Rail Guns* ou *E-bomb* [34].

A Figura 4.1 ilustra o esquema elétrico dos elementos envolvidos nos ensaios.

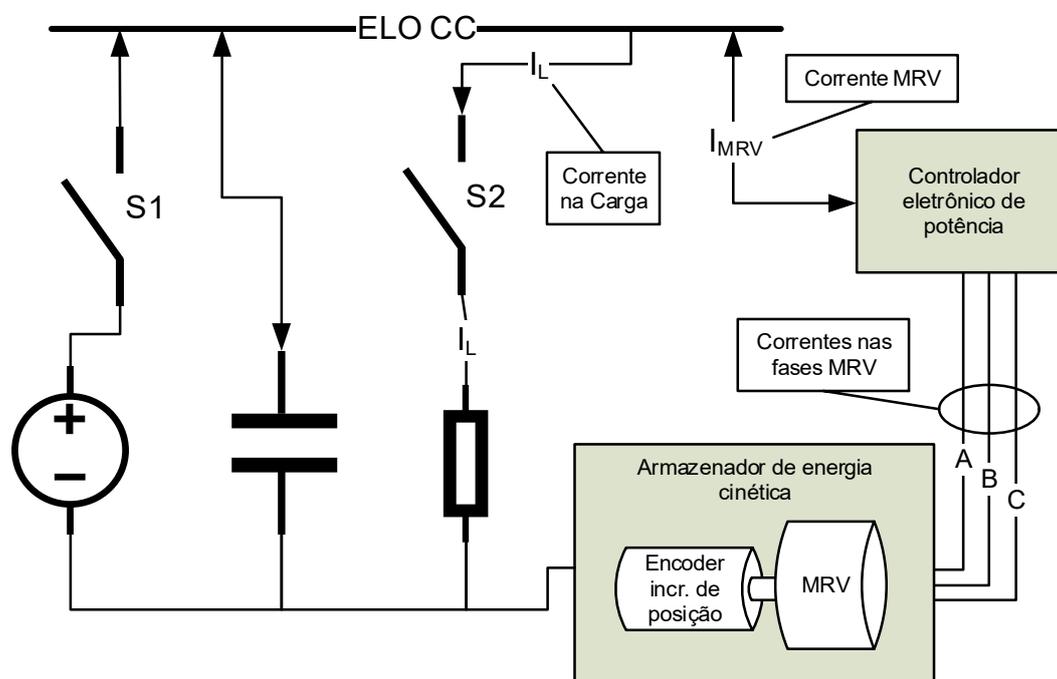


Figura 4.1 - Esquema elétrico para os ensaios do sistema armazenador de energia

Um transistor *mosfet*, atuando como chave S2, controla o momento em que a carga é conectada ao elo CC. Um relé representado pela chave S1 permite que uma

fonte de corrente contínua seja conectada ao elo CC alimentando todo o sistema enquanto o *flywheel* não está gerando energia elétrica. Tanto o relé como a chave de controle da carga são acionados pelo microcontrolador.

O instrumento utilizado para visualizar os dados foi um osciloscópio da marca *Tektronix* da série THS3000 com quatro canais e banda passante de 100 MHz. O equipamento possui a capacidade de medir correntes através de pontas de prova com sensores de efeito *hall*. A Figura 4.2 ilustra a foto de um instrumento da série THS3000.

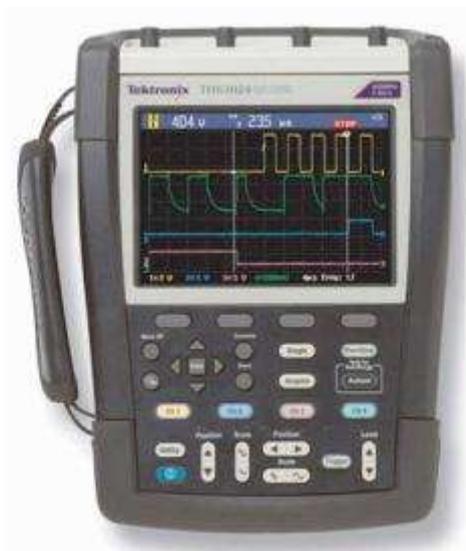


Figura 4.2 - Osciloscópio série THS3000 [35]

A seguir são exibidos e comentados os gráficos que representam os resultados para os ensaios. O primeiro ensaio exhibe as curvas de funcionamento da MRV no modo motor. O segundo ensaio demonstra o funcionamento da MRV no modo gerador.

4.1 MRV NO MODO MOTOR

Na primeira fase dos ensaios foram obtidos os dados e traçadas as curvas e dados de acionamento da máquina em funcionamento como motor elétrico, isto é, armazenando energia cinética no seu volante de inércia.

O *software* do controlador foi programado para gerar quatro degraus na referência de velocidade ω_{ref} do controlador de velocidade. As velocidades selecionadas foram 1500, 2500, 3500 e 4500 rpm. Quando a MRV atinge cada

degrau de velocidade, esta é mantida por aproximadamente um segundo. O gráfico da Figura 4.3 ilustra o comportamento da velocidade de rotação e da corrente referência, que representa a variável manipulada pelo controlador.

Observa-se a atuação do controlador PI sobre a corrente de referência em dois momentos: transitório e permanente. Ao início de cada degrau, estado transitório, o controlador configura a corrente de referência para a máxima corrente. Ao atingir a velocidade próxima à do degrau, ou seja, em regime permanente, o controlador reduz a corrente de referência apenas para manter a MRV em torno da velocidade de rotação do degrau.

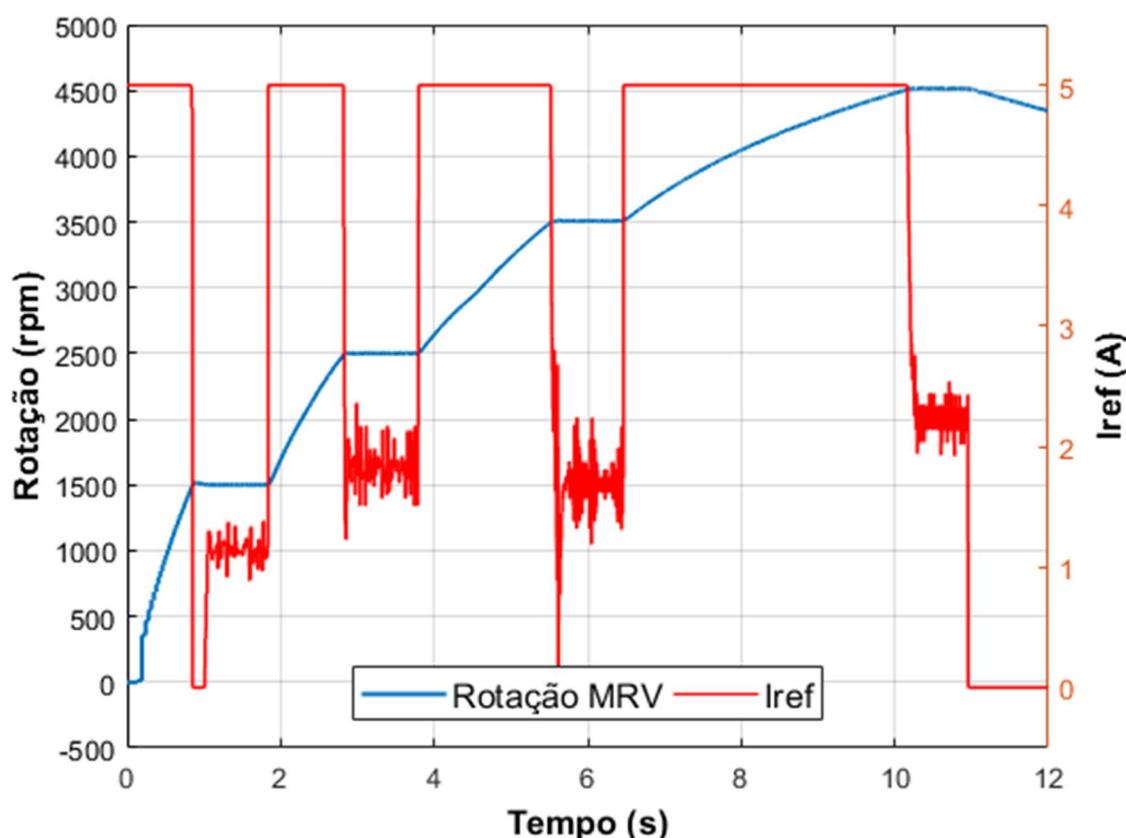


Figura 4.3 – Controlador PI: degraus de velocidade vs. corrente de referência.

A Figura 4.4 ilustra o gráfico da corrente em cada enrolamento da máquina de relutância no momento da aceleração da MRV para 4500 rpm. No momento que estes dados foram obtidos a corrente de referência para acionamento das fases era de 5 A e a velocidade real da MRV era 3507 rpm. Pode-se notar neste gráfico que a corrente medida não alcança o valor da corrente de referência. Isto se deve a três

fatores: a tensão de alimentação do elo CC, a indutância dos enrolamentos da máquina e a alta velocidade do rotor da MRV. Este modo de operação da MRV é denominado pulso único, isto é, a tensão do elo CC é conectada ao enrolamento sem que haja o chaveamento dos transistores. Os transistores ficam em estado de condução até que seja necessário acionar o próximo enrolamento.

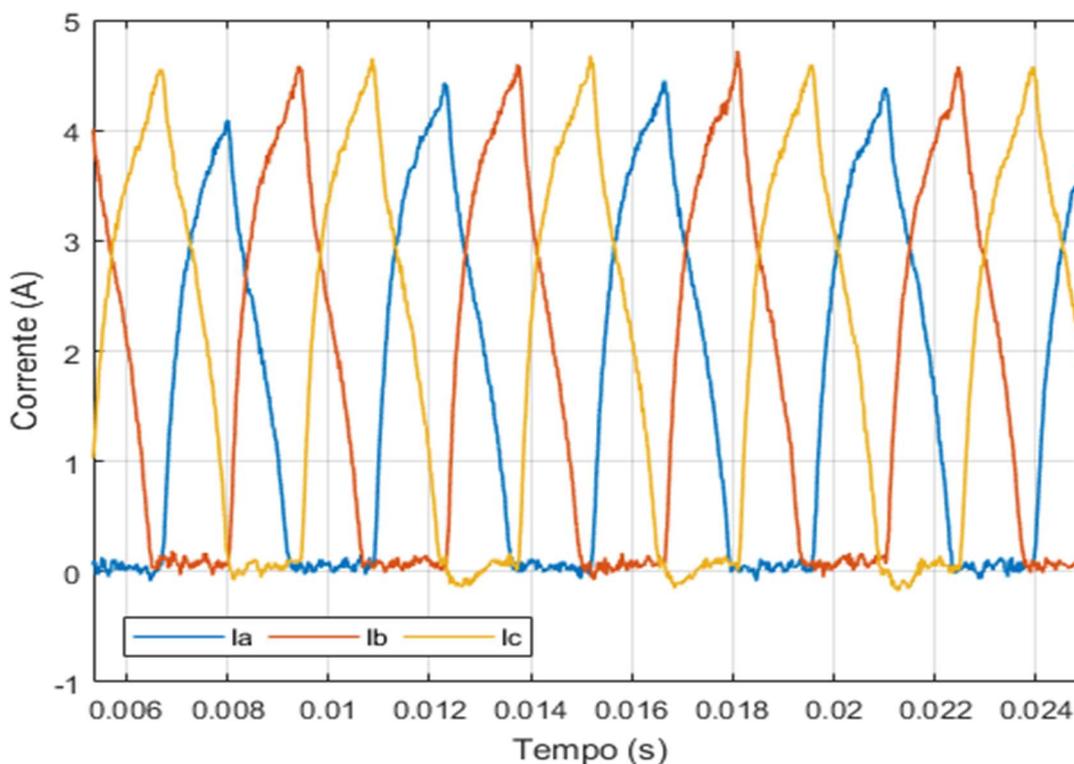


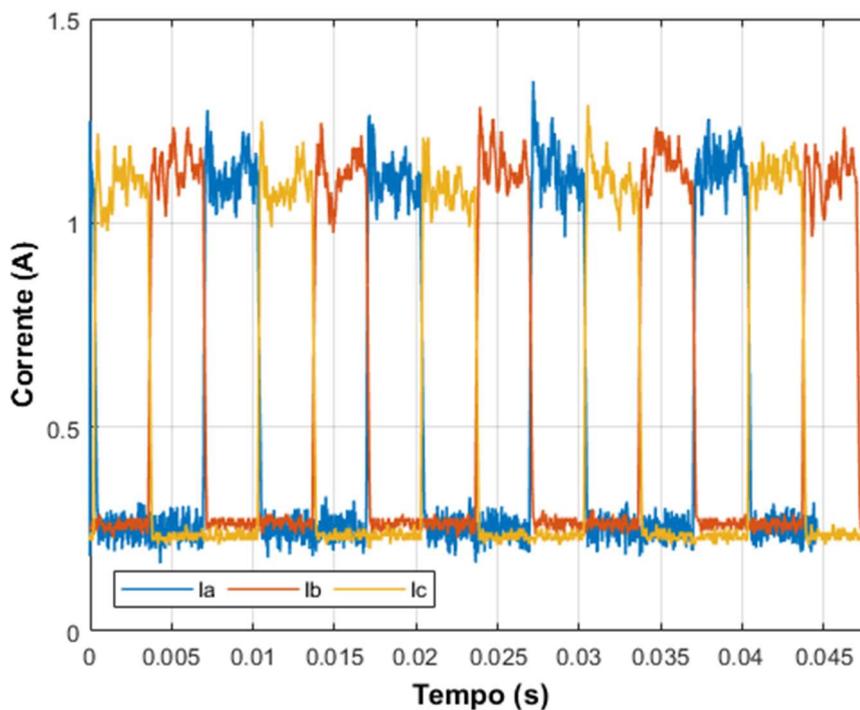
Figura 4.4 - Corrente nas fases em pulso único, $\omega_{MRV} = 3507$ rpm.

Os gráficos das Figura 4.5 ilustram dois momentos do chaveamento das fases quando o controlador entra em regime permanente. Estas medidas foram obtidas em duas rodadas semelhantes ao ensaio anterior, utilizando-se uma saída digital do microcontrolador para gerar uma transição de sinal após a velocidade ω_{MRV} atingisse os valores aproximados de 1500 rpm e 2500 rpm. Os valores da corrente de referência foram enviados pela saída serial do microcontrolador.

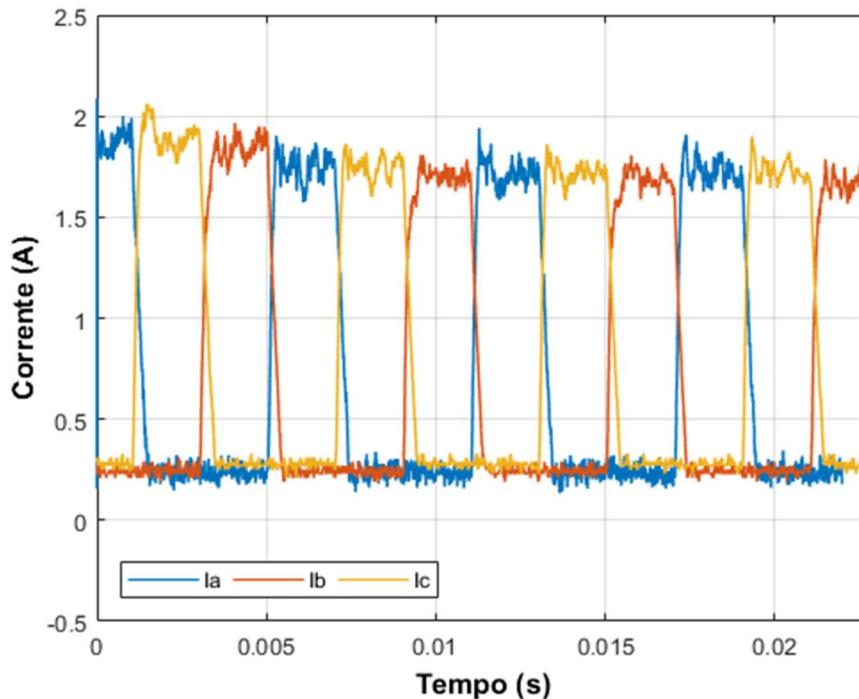
Na Figura 4.5 (a), a corrente de referência para as fases era de 1,1 A enquanto a velocidade de rotação ω_{MRV} obtida pelo microcontrolador era de 1500 rpm. Na Figura 4.5 (b) observa-se a atuação do controlador de velocidade. A corrente de

referência sofre uma alteração de 1,87 A para 1,74 A. Esta redução mostra a atuação do controlador PI na corrente para manter velocidade de rotação da MRV.

Nestes dois gráficos pode-se notar a atuação do circuito controlador de corrente por histerese. Ao contrário do modo de pulso único apresentado na Figura 4.4, no presente caso, ocorre o chaveamento dos transistores, em alta frequência, aplicando a tensão do elo CC nos terminais dos enrolamentos. Observa-se que as medidas se apresentam ruidosas. Parte deste efeito se explica pela baixa amplitude dos sinais nos sensores de corrente, apesar das medidas serem apresentadas em amperes, o controle real é feito na casa das centenas de milivolts. Comparando-se os dois gráficos, pode-se notar que quanto maior a corrente a ser controlada menor é o ruído apresentado na medição.



(a) $I_{ref} = 1,1$ A e $\omega_{MRV} = 1500$ rpm



(b) $I_{ref} = 1,87$ e $\omega_{MRV} = 2500$ rpm

Figura 4.5 - Corrente nas fases A B e C em regime permanente para correntes de referência I_{ref} 1,1 e 1,87 A.

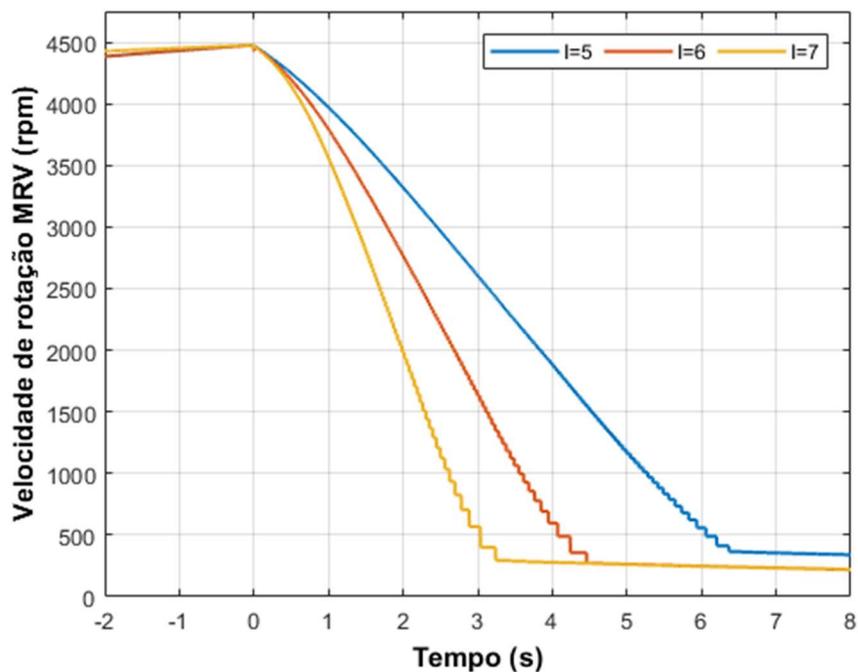
4.2 MRV NO MODO GERADOR

A segunda fase consistiu em realizar ensaios da MRV em modo gerador. A seguinte sequência de passos foi programada no microcontrolador:

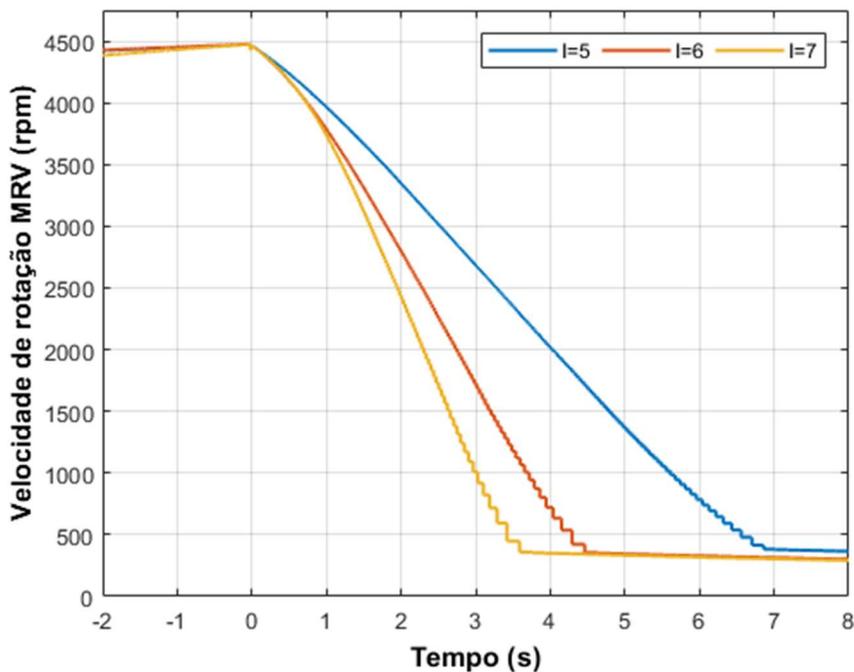
- A fonte DC é conectada, através da chave S1, para alimentar o elo CC;
- A MRV entra em modo motor até atingir a velocidade próxima de 4450 rpm;
- A fonte DC é desconectada do elo CC através de S1;
- A carga resistiva é conectada ao elo CC acionando a chave S2;
- A máquina entra em modo gerador.

Os gráficos da Figura 4.6 mostram a rotação da MRV em relação ao tempo após a mesma iniciar o modo gerador. O *software* estava programado para interromper a geração quando atingisse a rotação de 450 rpm, que pode ser verificado ao final de quase todas as curvas quando a rotação permanece quase constante.

Estes gráficos permitem comparar o comportamento da rotação da máquina para diferentes correntes de excitação. A Figura 4.6(a) apresenta os resultados do ensaio para a carga de 280Ω enquanto a Figura 4.6(b) apresenta para a carga de 185Ω . Conclui-se destes gráficos que a rotação da MRV cai mais rapidamente quanto maior a corrente de excitação. Este comportamento é esperado, visto que no modo de operação de gerador, a corrente de excitação gera um campo magnético que atua como um freio para o rotor da MRV. Por outro lado, o aumento da carga não influenciou muito no tempo de geração. Esse comportamento pode ser explicado pois não há controle da potência gerada. Um controlador de potência poderia ser implementado com o objetivo de manter a tensão do elo CC atuando na corrente de excitação.



(a) Carga de 280Ω



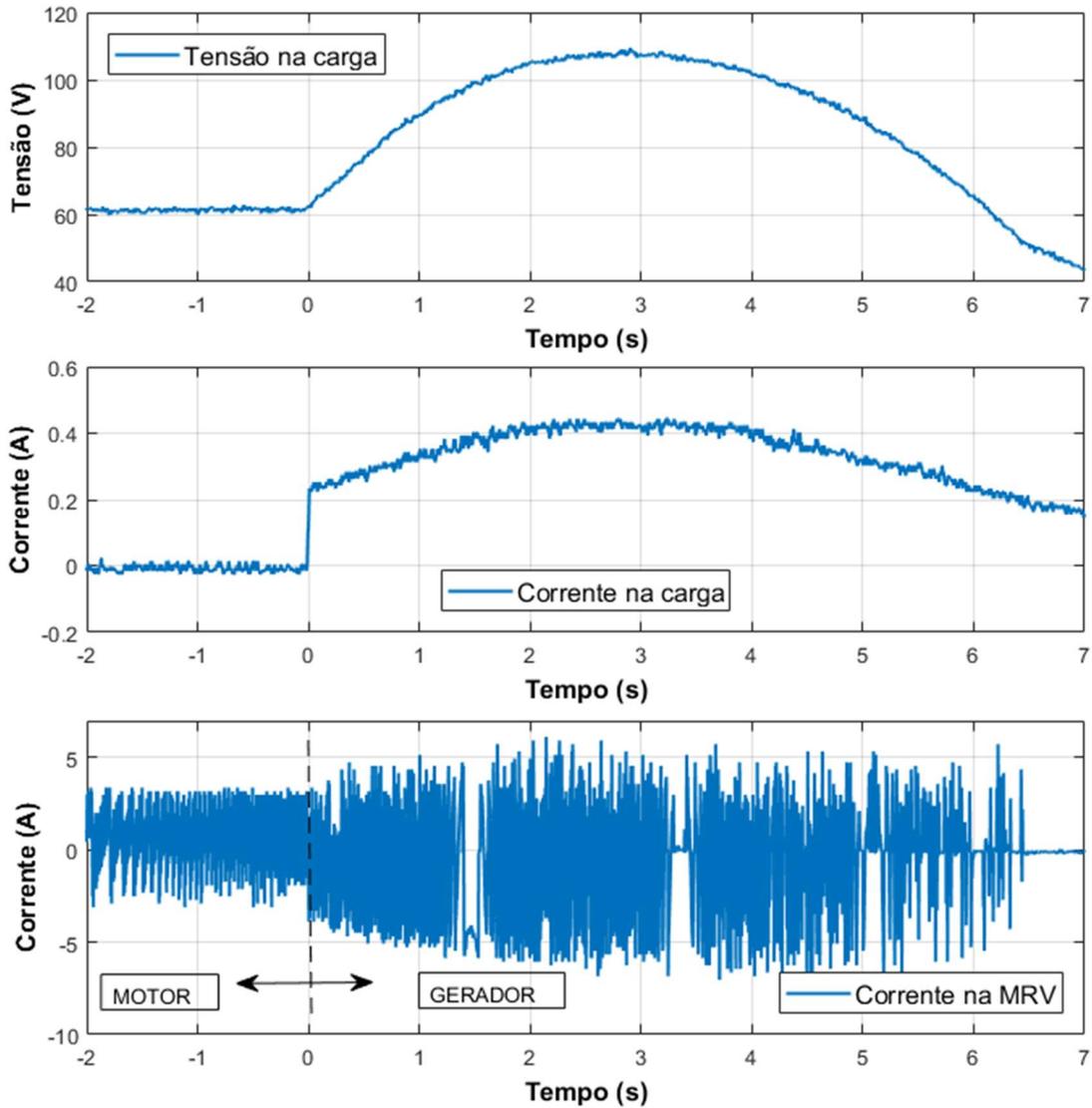
(b) Carga de 185 Ω

Figura 4.6 – Tempo de geração por corrente de excitação, 5, 6 e 7 A e carga de 280 e 185 Ω

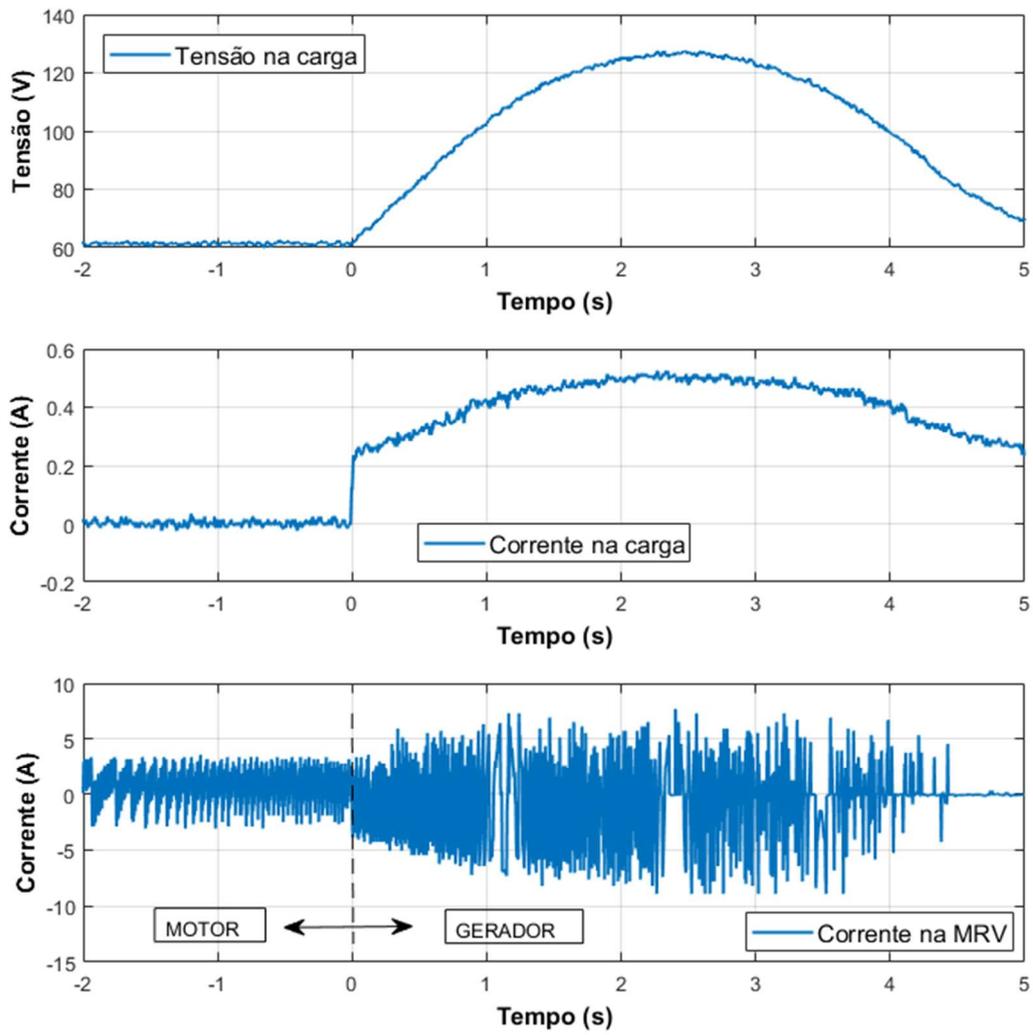
Os gráficos da Figura 4.7 ilustram o comportamento da tensão do elo CC e corrente I_L vistos na Figura 4.1. Estes dados foram obtidos pelo osciloscópio, para as correntes de excitação de 5, 6 e 7 A. Apenas são ilustrados os gráficos para a carga de 280 Ω. O salto da corrente na carga observado demonstra o momento que é fechada a chave S2, que aciona a carga. O sinal que gerou o disparo para a aquisição dos dados pelo o osciloscópio foi gerado por *software* em um pino do microcontrolador e não está evidenciado nestes gráficos. Por este motivo a origem do eixo tempo não coincide exatamente com o momento exato do acionamento da carga.

A curva de corrente inferior de cada um dos gráficos mostra a corrente I_{MRV} . Pode-se observar o fluxo de corrente entre o elo CC e a MRV nos modos de operação motor e gerador. Valores positivos de corrente indicam a corrente que é drenada pela MRV enquanto os valores negativos mostram a corrente saindo da MRV para o elo CC. Verifica-se que na região do modo motor existe maior

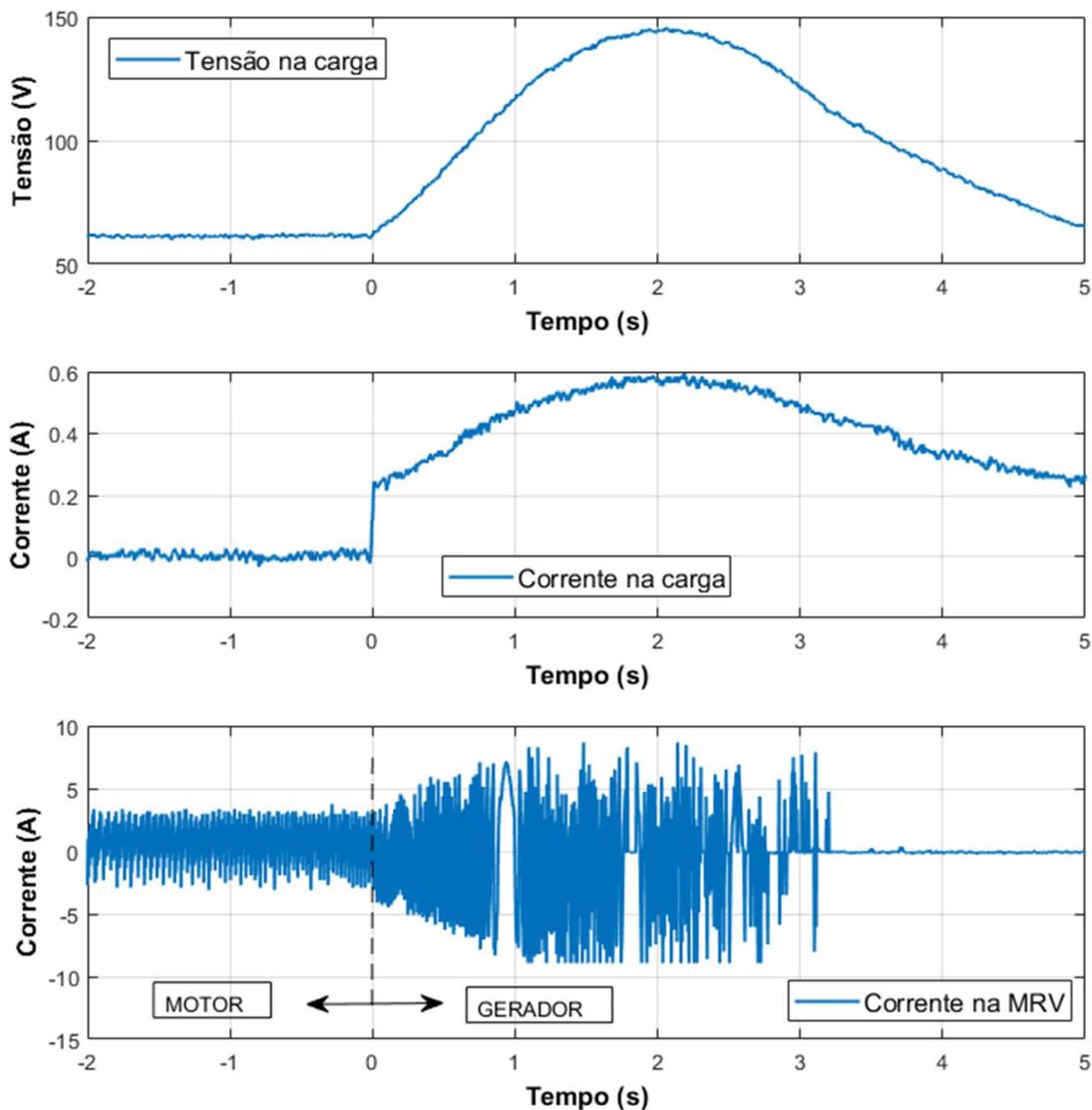
quantidade de corrente entrando na MRV enquanto no modo gerador os valores negativos da corrente são maiores. O fato desta corrente negativa ser maior na região de geração se deve à intensificação da corrente nos enrolamentos da MRV devido variação negativa da indutância ou ao torque negativo gerado no rotor da MRV.



(a) Corrente de excitação 5 A



(b) Corrente de excitação 6 A



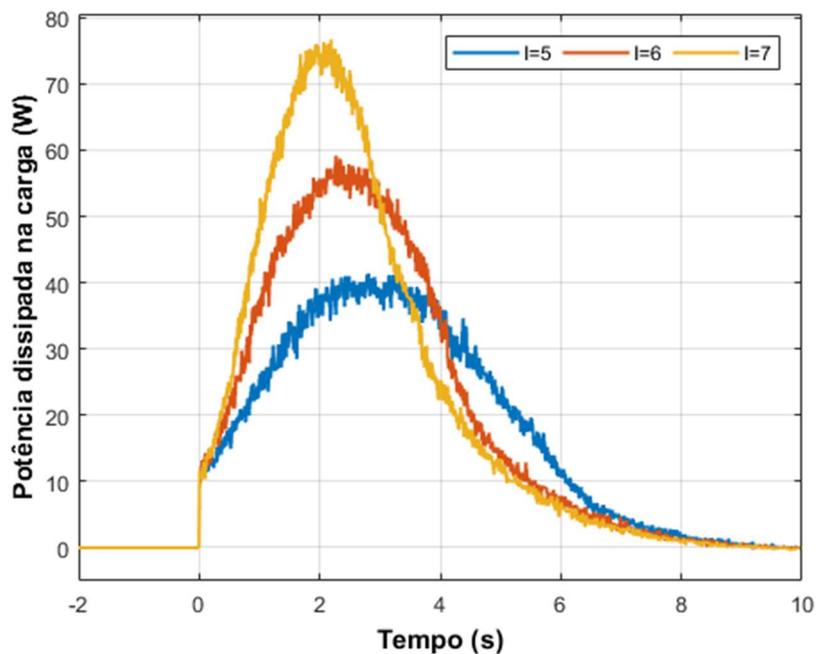
(c) Corrente de excitação 7 A

Figura 4.7 - Modo gerador R_L 280 Ω para correntes de excitação 5, 6 e 7 A

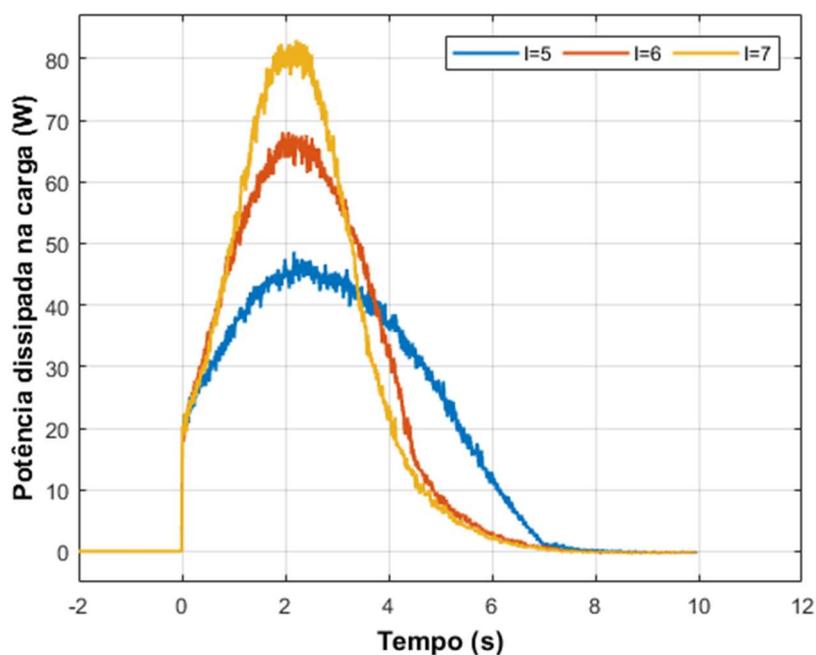
A Figura 4.8 ilustra a potência consumida pela carga, para três valores de corrente de excitação. Estas curvas de potência foram obtidas a partir do produto dos gráficos de corrente e tensão que são as unidades possíveis de se obter a partir do osciloscópio, exibidas nos gráficos da Figura 4.7. Na Figura 4.8 observa-se o aumento da potência de acordo com o valor da corrente de excitação.

A variação da carga não influenciou o comportamento dos ensaios, isto é, para ambos os valores de carga, a potência gerada obedece a uma resposta proporcional à corrente de excitação. O tempo de geração é menor com aumento da carga, este

comportamento é esperado pois o maior consumo extrai mais rapidamente a energia armazenada no volante de inércia.



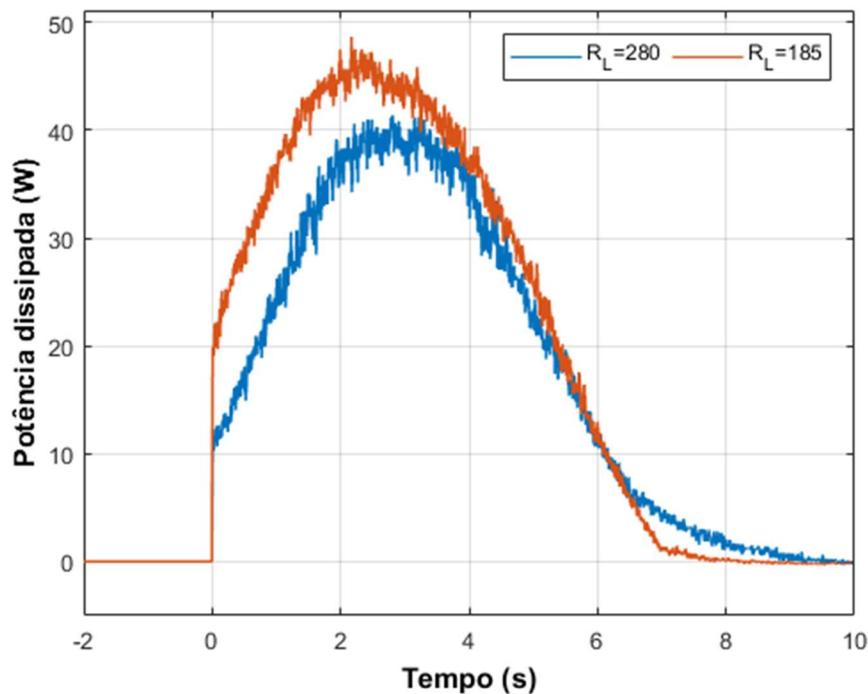
(a) Carga de 280 Ω



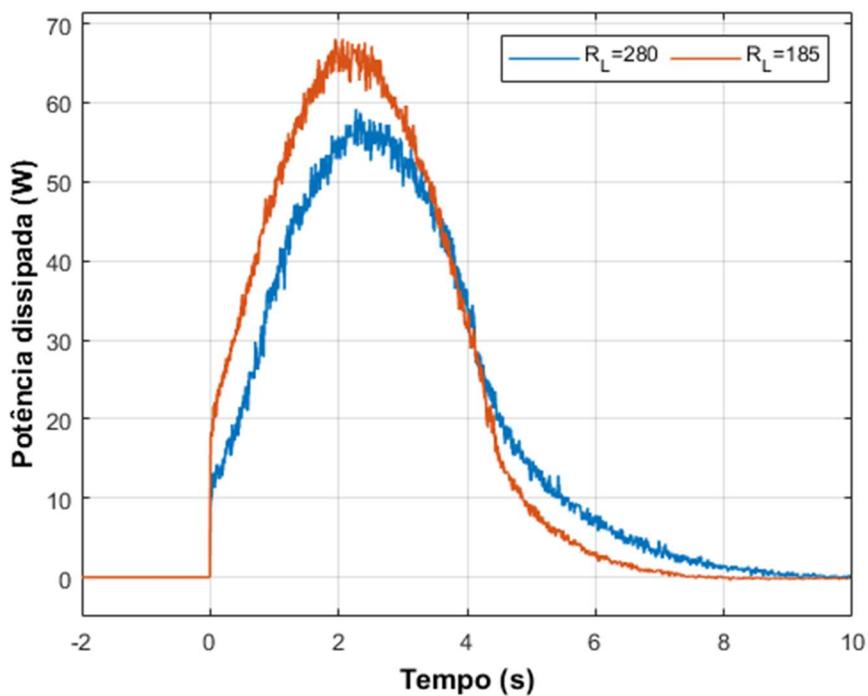
(b) Carga de 185 Ω

Figura 4.8 - Potência consumida vs corrente de excitação de 5, 6 e 7 A.

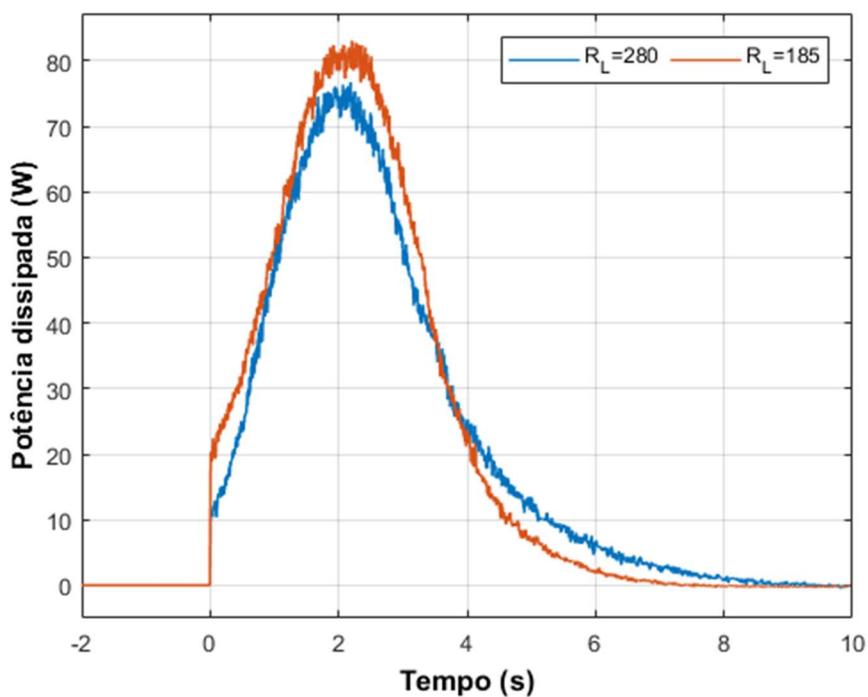
Nos gráficos da Figura 4.9 pode-se observar a potência consumida pela carga resistiva para várias correntes de excitação. Foram utilizados dois valores de carga resistiva e três correntes de excitação 5 A, 6 A e 7 A. Observa-se que para uma mesma corrente de excitação a potência máxima gerada é maior quanto maior a carga (280 Ω para 185 Ω), porém o tempo de geração se reduz. Deste modo, a partir da comparação destes gráficos, pode-se concluir que a corrente de excitação pode ser uma das variáveis manipuladas para se obter o controle da potência gerada pela MRV apesar de não ser a única nem a melhor variável para esse controle.



(a) Corrente de excitação 5 A



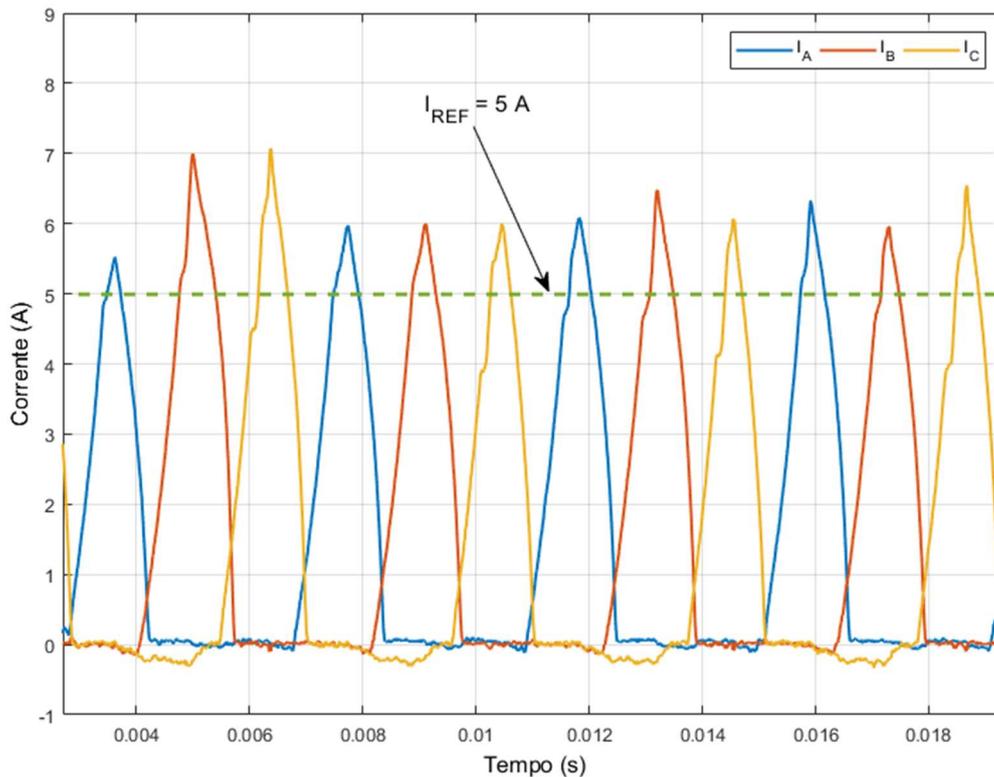
(b) Corrente de excitação 6 A



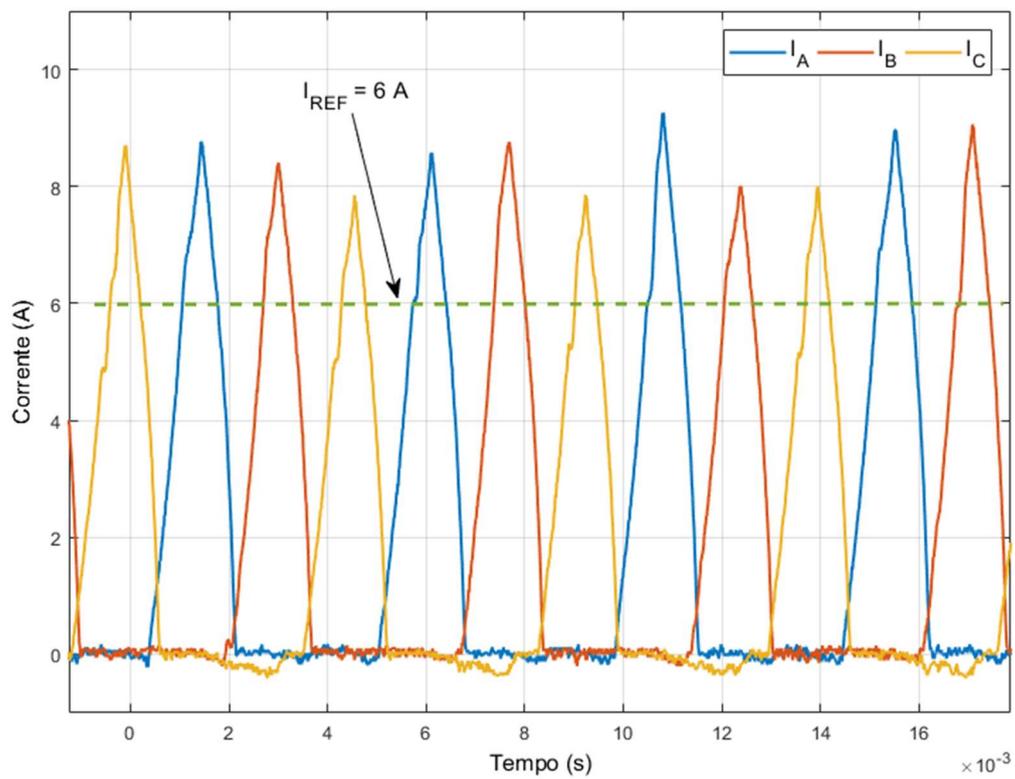
(c) Corrente de excitação 7 A

Figura 4.9 – Comparativo de curvas de potência geradas pela MRV para correntes de 5, 6 e 7 A e cargas de 280 e 185 Ω .

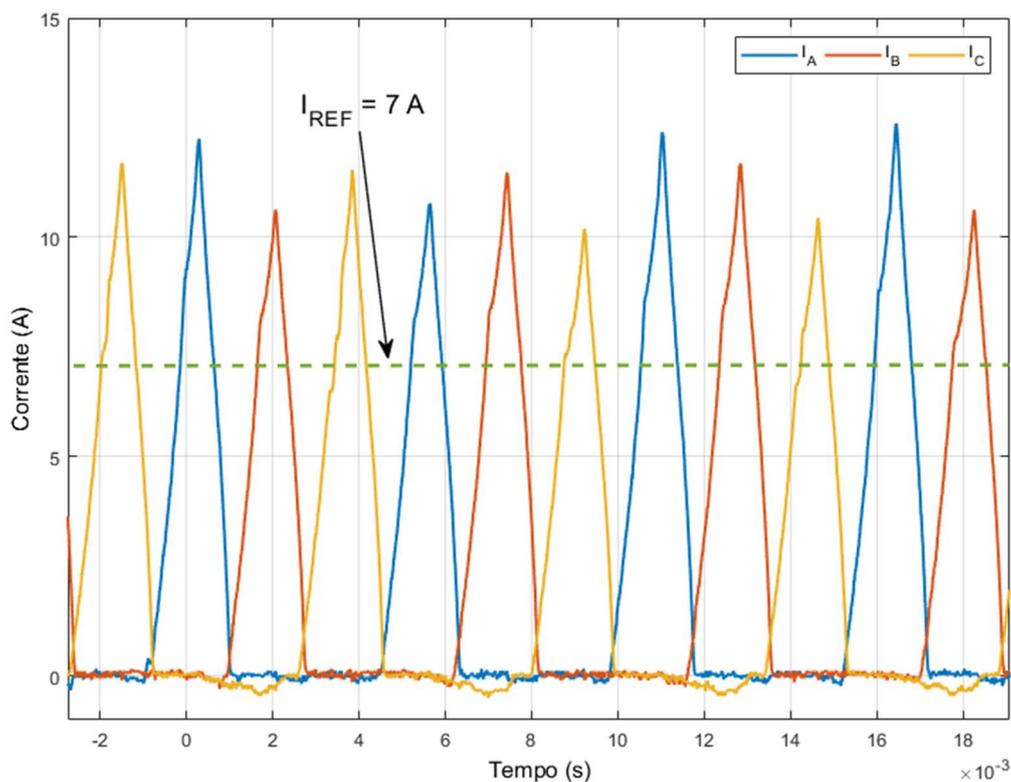
Os gráficos Figura 4.10 ilustram as correntes em cada uma das fases no momento da geração para as correntes de excitação 5, 6 e 7 A. Nota-se claramente nos gráficos que as correntes possuem picos superiores às correntes de excitação. Este pico se deve ao incremento da corrente devido à perfil de derivada negativa da indutância de cada fase apesar do controlador de corrente. Isto é o controlador de corrente em ponte assimétrica não consegue controlar a corrente na fase em pulso único, pois devido à rotação da máquina, ao desligar a chave superior para realizar o controle a corrente não se reduz como esperado neste tipo de controle. Apesar deste comportamento essas correntes possuem uma relação de proporção com a corrente de referência configurada.



(a) Corrente de excitação $I_{REF} = 5$ A



(b) Corrente de excitação $I_{REF} = 6$ A



(c) Corrente de excitação $I_{REF} = 7 \text{ A}$

Figura 4.10 -Corrente nas fases com MRV no modo gerador para correntes de excitação I_{REF} de 5, 6 e 7 A.

Com o objetivo de explicar variação dos picos de corrente nas fases para as correntes de excitação no modo gerador, foram feitas medidas diretamente em um dos enrolamentos da MRV. A Figura 4.11 apresenta a tensão e corrente obtidas na fase B da MRV para a corrente de excitação pretendida, I_{REF} , de 4 amperes. O segmento de reta que indica a corrente de referência encontra-se um pouco abaixo de 4 amperes, isto se deve a calibração e *offset* de tensão do sensor de corrente. Verifica-se, na curva de tensão, o chaveamento do controlador, em dois momentos “a” e “b”.

Em “a”, o chaveamento pode ser explicado a pela seleção do multiplexador digital dentro microcontrolador. Este tipo de chaveamento indesejado, conhecido como *glitch*, pode ocorrer em circuitos formado apenas por portas lógicas como é o caso deste multiplexador. Apesar de indesejado estes pulsos não chegam a influenciar no funcionamento do controlador, pois são pulsos de muito curta duração

além de ocorrer no início do chaveamento da fase. Este problema pode ser evitado com a utilização de circuitos registradores na saída do multiplexador.

Em “b” observa-se que o controlador atua para manter a corrente próxima da corrente de referência I_{ref} , desligando a chave e em seguida ligando novamente, causando um aumento na corrente muito além da corrente de referência. Nota-se ainda que mesmo quando a chave é desligada a corrente continua crescente. Este incremento se deve à variação negativa da indutância, pois neste momento o os polos da MRV está se afastando. O motivo que explica esta oscilação em “b” é o ruído no sensor de corrente maior que o valor da histerese. Aliado a isso, ressalta-se que cada pulso de saída do comparador possui uma largura mínima de $50 \mu s$ como explicado no Capítulo 3.

Em “c”, o rotor atinge o ângulo de desligamento das chaves da ponte assimétrica, e neste momento a tensão no enrolamento se inverte, invertendo também o fluxo de corrente. A partir deste ponto não há controle da corrente gerada.

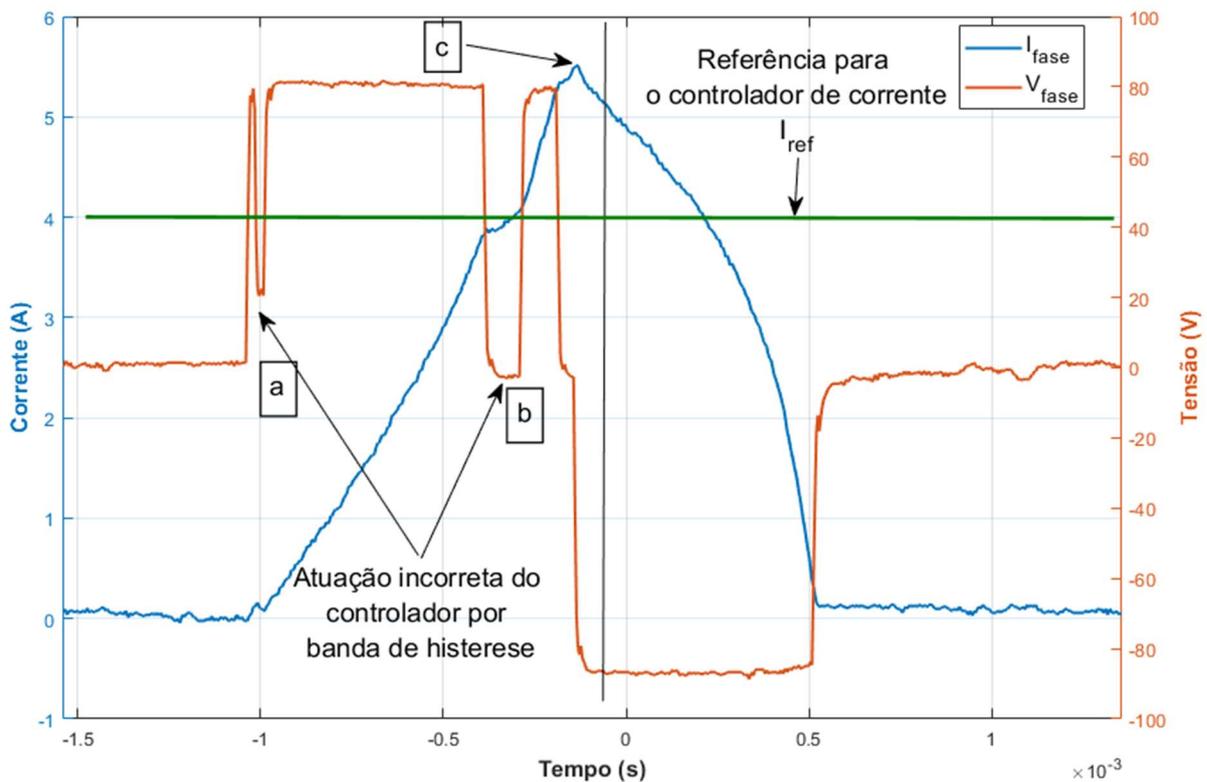


Figura 4.11 - Detalhe da tensão e corrente em uma fase no modo gerador

A Figura 4.12 apresenta a transformação de energia na MRV para a corrente de excitação de 6 A e carga de 280 Ω . O momento anterior até linha tracejada “A”, a MRV atua como armazenador de energia. Neste momento o rotor se aproxima da rotação máxima definida para o ensaio de 4450 rpm. A carga se encontra desconectada do elo CC por este motivo a energia dissipada é zero.

Após a linha “A” a MRV entra no modo gerador e a carga é conectada ao elo CC. Deste modo ocorre um incremento da taxa energia dissipada e o decréscimo da energia armazenada. A taxa de dissipação de energia é maior entre “A” a e “B” pois neste momento o elo CC possui tensão mais elevada causada pela corrente gerada pela MRV. Devido ao aumento da tensão no elo, verifica-se também que a energia armazenada no capacitor aumenta. Após a linha “B”, a taxa do consumo de energia é menor pois a única fonte de energia neste momento é o banco de capacitores.

O gráfico inferior apresenta a corrente que flui entre elo CC e a MRV. Este gráfico auxilia a identificar as regiões do modo de atuação da MRV: motor ou gerador. Neste gráfico a corrente é positiva quando flui do elo CC para e MRV e negativa em sentido contrário. No intervalo anterior a linha pontilhada “A” verifica-se o maior fluxo de corrente de valor positivo. Devido a forma como o sensor de corrente foi posicionado no ensaio, o valor positivo indica fluxo de corrente consumida pela MRV. Os picos de corrente negativa representam a corrente que não é aproveitado pelos enrolamentos da MRV para geração de torque positivo, e retornam para o elo CC. No intervalo entre as linhas “A” e “B”, a MRV opera no modo gerador. Observa-se que os valores dos picos da corrente positiva são menores que os picos de corrente negativa. Este comportamento demonstra que um existe um fluxo maior de corrente para o elo CC a partir da MRV. Esta corrente gera o torque negativo na MRV, isto é, opõe-se ao movimento prévio do volante inércia.

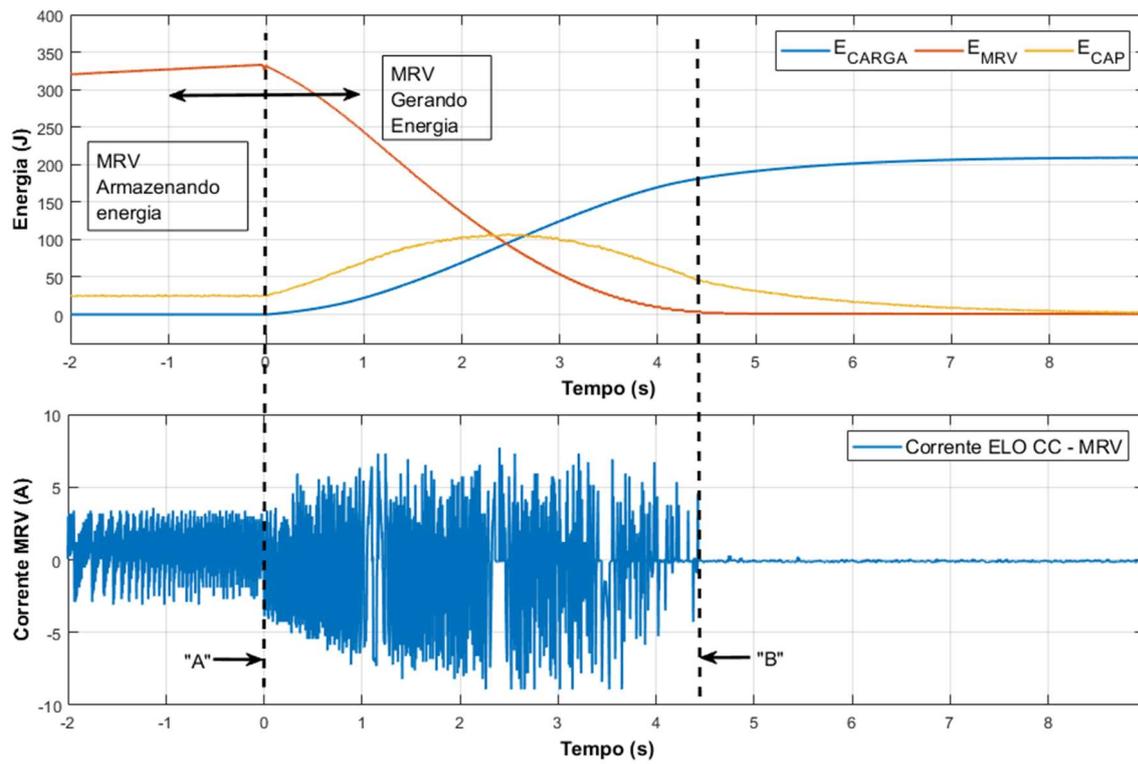


Figura 4.12- Balanço da energia gerada e consumida no ensaio da *flywheel*

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou a verificação do funcionamento, através de ensaios experimentais em laboratório, de um sistema armazenador de energia cinética (SAEC), acionado por uma máquina de relutância variável (MRV). Nos ensaios realizados pode-se verificar o armazenamento de energia na forma cinética em um volante de inércia e sua descarga para a transformação reversa desta energia cinética em elétrica. Foram obtidos dados gráficos do funcionamento da MRV em modo motor e modo gerador, que comprovam a viabilidade de utilização deste tipo de máquina em sistemas de armazenamento de energia cinética.

O acionamento de uma MRV não é trivial, visto que não se pode, de forma tradicional, conectar seus enrolamentos à uma rede de alimentação trifásica por exemplo. Neste trabalho foi desenvolvido, para o acionamento da MRV, um controlador eletrônico de potência capaz de operá-la tanto como motor elétrico quanto como gerador de energia elétrica, atuando de forma bidirecional. Os modos de funcionamento da MRV dependem da posição angular do rotor da MRV e este aspecto torna o controlador mais crítico, visto que as velocidades de rotação da MRV devem ser elevadas em sistemas armazenadores de energia cinética. Foram apresentadas as soluções técnicas utilizadas para: monitoramento da posição do rotor da MRV e acionamento das correntes no momento correto e o controle do valor da corrente nos enrolamentos da MRV.

Os dados de velocidade e corrente de referência foram obtidos pelo próprio microcontrolador embarcado no controlador eletrônico de potência através de comunicação serial com um microcomputador.

Os resultados apresentados comprovam o funcionamento do controlador proporcional integral desenvolvido para controlar a velocidade da MRV em modo motor, porém não foi possível verificar se este controlador opera no ponto ótimo de operação.

Foram apresentados detalhes das correntes nos enrolamentos da MRV em modo motor, verificando o funcionamento do controlador de corrente por histerese atuando em pulso único ou com modulação de largura de pulso. Também foram

apresentados detalhes da corrente nos enrolamentos com a MRV no modo gerador. Estes resultados demonstram o funcionamento não ideal do controlador por banda de histerese quando a MRV opera neste modo.

Foi possível comparar a geração de energia para várias correntes de excitação no modo gerador. Observou-se também o comportamento da MRV no modo gerador quanto a potência fornecida para duas cargas diferentes e o comportamento da velocidade de rotação da MRV. Conclui-se destes resultados que é possível controlar a potência gerada através da corrente de excitação, porém este método pode não ser o melhor com os circuitos utilizados neste protótipo devido a sua baixa eficácia para controlar a corrente gerada quando no modo gerador.

Estes resultados e análises atestam que os objetivos propostos de armazenamento e geração de energia em um sistema *flywheel* acionado por uma MRV foram atingidos.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho deixa uma base para próximas pesquisas que podemos citar:

- Análise quantitativa da energia armazenada no SAEC;
- Controle de potência gerada pela MRV como um sistema de controle de duas variáveis: intensidade da corrente de excitação e ângulo do rotor para excitação;
- Avaliar a eficiência da MRV aplicada ao SAEC, isto é, a capacidade de geração em relação ao armazenamento de energia.
- Realizar o controle de corrente nas fases com circuitos PWM dedicados que sejam mais eficientes que o controlador por banda de histerese.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Silva, L. Guilherme Barbosa Rolim, and G. Sotelo, "INTERFACING A FLYWHEEL-BASED ENERGY STORAGE SYSTEM TO THE POWER UTILITY GRID THROUGH A SWITCHED RELUCTANCE MOTOR/GENERATOR." May-2003.
- [2] "2_4 - Machine Design II Prof K.Gopinath Prof M.M.Mayuram Module 2 GEARS Lecture 4 WORKED OUT PROBLEMS ON INVOLUTE SPUR GEARS Content 4.1 Introduction." [Online]. Available: <https://www.coursehero.com/file/15215386/2-4/>. [Accessed: 08-May-2018].
- [3] S. M. Mousavi G, F. Faraji, A. Majazi, and K. Al-Haddad, "A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 477–490, Jan. 2017.
- [4] J. Gonçalves de Oliveira, "Power Control Systems in a Flywheel based All-Electric Driveline."
- [5] H. Hõimoja, "Flywheel energy storage: principles and possibilities."
- [6] A. A. K. Arani, H. Karami, G. B. Gharehpetian, and M. S. A. Hejazi, "Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, pp. 9–18, Mar. 2017.
- [7] K. R. Amiryar, Mustafa E.; Pullen, "A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications.," *Appl. Sci.*, vol. 7, no. 3, p1–21. 21p., pp. 2076–3417, 17AD.
- [8] M. Hedlund, T. Kamf, J. de Santiago, J. Abrahamsson, and H. Bernhoff, "Reluctance Machine for a Hollow Cylinder Flywheel," 2017.
- [9] S. Samineni, B. Johnson, ... H. H.-I. T. on, and undefined 2006, "Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for voltage sag correction," *ieeexplore.ieee.org*.
- [10] H. Liu and J. Jiang, "Flywheel energy storage—An upswing technology for energy sustainability," *Energy Build.*, vol. 39, no. 5, pp. 599–604, May 2007.
- [11] M. M. Lanes and L. G. B. Rolim, "Análise e Avaliação Experimental de

Requisitos para Controle Digital do Acionamento de um Armazenador Cinético (Flywheel) de Alta Velocidade com Máquina de Relutância Chaveada,” Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

- [12] R. Cardenas, R. Pena, M. Perez, J. Clare, G. Asher, and P. Wheeler, “Power Smoothing Using a Flywheel Driven by a Switched Reluctance Machine,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1086–1093, Jun. 2006.
- [13] T. M. Aljohani, “The Flywheel Energy Storage System: A Conceptual Study, Design, and Applications in Modern Power Systems,” *Int. J. Electr. Energy*, 2014.
- [14] J. A. Momoh, *Smart grid: fundamentals of design and analysis*. IEEE Press, 2012.
- [15] “Electrochemical Capacitors | Energy Storage Association.” [Online]. Available: <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/electrochemical-capacitors>. [Accessed: 21-May-2018].
- [16] “Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) | Energy Storage Sense.”
- [17] “Compressed Air Energy Storage (CAES) | Energy Storage Association.” [Online]. Available: <http://energystorage.org/compressed-air-energy-storage-caes>. [Accessed: 08-May-2018].
- [18] “Amazing kinetic energy storage system.” [Online]. Available: <http://automationandcontrols.blogspot.com.br/2012/10/amazing-kinetic-energy-storage-system.html>. [Accessed: 22-May-2018].
- [19] “Welcome | POWERTHRU | Clean Flywheel Energy Storage.” [Online]. Available: <http://www.power-thru.com/>. [Accessed: 20-Apr-2018].
- [20] P. Mertiny, M. Krack, and M. Secanell, “Rotor Design for High-Speed Flywheel Energy Storage Systems,” in *Energy Storage in the Emerging Era of Smart Grids*, R. Carbone, Ed. Rijeka: InTech, 2011.
- [21] “Stephentown, New York | Beacon Power.” [Online]. Available: <http://beaconpower.com/stephentown-new-york/>. [Accessed: 24-May-2018].
- [22] “Flywheel Energy Storage Lives On at Beacon Power | Greentech Media.” [Online]. Available: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/flywheel->

- energy-storage-lives-on-at-beacon-power#gs.yNAyHPc. [Accessed: 18-May-2018].
- [23] V. R. Bernardeli, D. A. Andrade, A. W. Fleury, and C. A. Bissochi Junior, "PROPOSTA DE ESTRATÉGIA PARA MELHORIA DO PERFIL DE CONJUGADO DE MOTORES A RELUTÂNCIA VARIÁVEL A STRATEGY FOR TORQUE RIPPLE IMPROVEMENT IN SWITCHED RELUCTANCE MOTORS."
- [24] R. (Ramu) Krishnan, *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*. CRC Press, 2001.
- [25] S. Chapman, *Electric machinery fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [26] E. S. SANCHES, "Uma contribuição ao estudo e controle de um motor de relutância chaveado de fluxo axial com um só estator," Universidade Federal Fluminense, 2015.
- [27] A. Arifin, I. Al-Bahadly, and S. C. Mukhopadhyay, "State of the Art of Switched Reluctance Generator," *Energy Power Eng.*, vol. 04, no. 06, pp. 447–458, 2012.
- [28] D. N. OLIVEIRA, "Método iterativo para cálculo da variação da indutância do motor rotativo de relutância chaveada," p. 11, 2006.
- [29] L. oscar de aráujo porto HENRIQUES, "Implementação de estratégia de minimização de oscilações de torque e remoção de sensor de posição para um acionamento de relutância variável usando técnica neuro-fuzzy," Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- [30] N. Saha and S. Panda, "Speed control with torque ripple reduction of switched reluctance motor by Hybrid Many Optimizing Liaison Gravitational Search technique," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 20, no. 3, pp. 909–921, Jun. 2017.
- [31] G. Sotelo, R. Jr, and A. Ferreira, *Magnetic bearing sets for a flywheel system. IEEE Trans Appl Supercond*, vol. 17(2). 2007.
- [32] D. Halliday, R. Resnick, and K. S. Krane, *Física: vol. 1*. Grupo Gen - LTC, 2003.
- [33] L. A. de Almeida, "ESTUDO DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE MÁQUINAS DE RELUTÂNCIA CHAVEADA PARA APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE

ACIONAMENTOS COM VELOCIDADE VARIÁVEL,” Universidade Federal de Juiz de Fora, 2018.

- [34] M. El-Mann, “Sistema Armazenador De Energia Cinética – Saec Implementação Experimental,” Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [35] “THS3000 Handheld Oscilloscope | Tektronix.” [Online]. Available: <https://www.tek.com/oscilloscope/ths3000-handheld-oscilloscope>. [Accessed: 24-May-2018].

7 ANEXOS

7.1 COMPONENTES ELETRÔNICOS MAIS RELEVANTES

Maximum Ratings

For optimum lifetime and reliability, Infineon recommends operating conditions that do not exceed 80% of the maximum ratings stated in this datasheet.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Collector-emitter voltage	V_{CE}	1200	V
DC collector current, limited by T_{vjmax} $T_C = 25^\circ\text{C}$ $T_C = 100^\circ\text{C}$	I_C	40.0 20.0	A
Pulsed collector current, t_p limited by T_{vjmax}	I_{Cpuls}	60.0	A
Turn off safe operating area $V_{CE} \leq 1200\text{V}$, $T_{vj} \leq 175^\circ\text{C}$	-	60.0	A
Diode forward current, limited by T_{vjmax} $T_C = 25^\circ\text{C}$ $T_C = 100^\circ\text{C}$	I_F	40.0 20.0	A
Diode pulsed current, t_p limited by T_{vjmax}	I_{Fpuls}	60.0	A
Gate-emitter voltage	V_{GE}	± 20	V
Transient Gate-emitter voltage ($t_p \leq 10\mu\text{s}$, $D < 0.010$)		± 25	V
Power dissipation $T_C = 25^\circ\text{C}$ Power dissipation $T_C = 100^\circ\text{C}$	P_{tot}	310.0 155.0	W
Operating junction temperature	T_{vj}	$-40 \dots +175$	$^\circ\text{C}$
Storage temperature	T_{stg}	$-55 \dots +175$	$^\circ\text{C}$
Soldering temperature, wave soldering 1.6mm (0.063in.) from case for 10s		260	$^\circ\text{C}$
Mounting torque, M3 screw Maximum of mounting processes: 3	M	0.6	Nm]

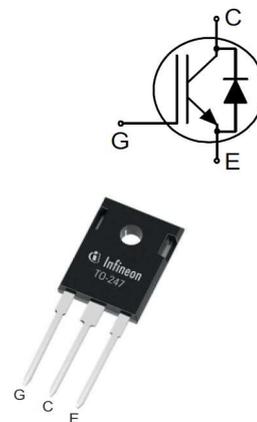


Figura 7.1 - Chaves de potência IGBT

IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

HIGH AND LOW SIDE DRIVER

Features

- Floating channel designed for bootstrap operation
Fully operational to +500V or +600V
Tolerant to negative transient voltage
dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible
Separate logic supply range from 3.3V to 20V
Logic and power ground $\pm 5V$ offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs

Description

The IR2110/IR2113 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 500 or 600 volts.

Product Summary

V_{OFFSET} (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
$I_{\text{O+/-}}$	2A / 2A
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{\text{on/off}}$ (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

Packages

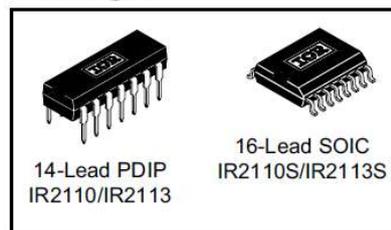


Figura 7.2 – IR2110 Acionador das chaves de potência



Absolute Maximum Ratings

Symbol	Parameter	RHRP3060	Unit
V_{RRM}	Peak Repetitive Reverse Voltage	600	V
V_{RWM}	Working Peak Reverse Voltage	600	V
V_R	DC Blocking Voltage	600	V
$I_{F(AV)}$	Average Rectified Forward Current ($T_C = 120^\circ\text{C}$)	30	A
I_{FRM}	Repetitive Peak Surge Current (Square Wave, 20KHz)	70	A
I_{FSM}	Nonrepetitive Peak Surge Current (Halfwave, 1 Phase, 60Hz)	325	A
P_D	Maximum Power Dissipation	125	W
E_{AVL}	Avalanche Energy (See Figures 10 and 11)	20	mJ
T_J, T_{STG}	Operating and Storage Temperature	-65 to 175	$^\circ\text{C}$

Figura 7.3 - Diodos de potência de retorno da corrente dos enrolamentos (*freewheel*).

7.2 ESQUEMAS DOS CIRCUITOS DO CONTROLADOR

A seguir são apresentados os esquemas com os circuitos que compõem a placa do conversor eletrônico de energia.

1. MainBlocks
2. ModuloCPU
3. DriversIGBT
4. PowerIGBT
5. Conectores
6. Sensores
7. PowerSources

