



COPPE/UFRJ

SINCRONIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TREM DE LEVITAÇÃO
MAGNÉTICA MAGLEV-COBRA

Marcos Dantas Alves dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Rio de Janeiro
Setembro de 2010

SINCRONIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TREM DE LEVITAÇÃO
MAGNÉTICA MAGLEV-COBRA

Marcos Dantas Alves dos Santos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.

Prof. Luis Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.

Prof. Lisandro Lovisolo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
SETEMBRO DE 2010

Santos, Marcos Dantas Alves dos

Sincronização da operação do protótipo de trem de levitação magnética MagLev-Cobra / Marcos Dantas Alves dos Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XII, 77 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 65-67.

1. Eletrônica de potência. 2. Acionamento de motores.
3. Programação micro-processador. I. Stephan, Richard Magdalena. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Jasson e Maria da Glória (*in-memorian*), pois tudo o que eles me deram garantiu o homem que sou hoje.

“Não existe o livre-arbítrio. Estamos sobre a relação causa-efeito do Universo.”

“Liberdade não é a possibilidade de dizer "não" aquilo que nos acontece, mas sim a possibilidade de dizer "sim" e compreender completamente por que as coisas deverão acontecer de determinada maneira”.

Baruch Spinoza

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo a Deus. Ele já me conhecia antes de nascer e, mesmo sem merecer, teve misericórdia por mim a cada respiração do meu ser. Tudo que sou e tenho devo integralmente a Ele. Tudo o que terei no futuro virá de Suas mãos. A única coisa que Ele me pede é amá-Lo.

Ao Prof. Richard Magdalena Stephan, no início de tudo, por ter acreditado em mim e ter me aceitado no Mestrado e como seu orientando.

A Patrícia Coimbra pelo apoio administrativo, ao Ocione Machado pelo apoio técnico, a Rita Cavaliere pelo apoio na revisão e a Walter Monteiro pelo grande amigo todos estes anos.

Obrigado a todos que direta ou indiretamente me ajudaram nesta caminhada.

Sou grato a todos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SINCRONIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TREM DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA MAGLEV-COBRA

Marcos Dantas Alves dos Santos

Setembro/2010

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Programa: Engenharia Elétrica

A utilização do trem de levitação magnética (MagLev) para transporte de massa com acionamento por motor linear apresenta-se como uma promissora solução em alguns projetos ao redor do mundo. O Japão, com o JR-MagLev, implantado experimentalmente em Yamanashi, e a Alemanha, com a tecnologia Transrapid, com protótipo implantado experimentalmente em Emsland, são os países que mais investem nesta solução. As duas tecnologias utilizam motores lineares síncronos de primário longo. Como parte do projeto, este primário longo é dividido em trechos menores. Como consequência, é preciso sincronizar a passagem do trem entre os trechos. O tipo do motor linear e os tipos de sensores utilizados, dependendo de onde estão posicionados, no trilho ou no trem, afetam substancialmente a metodologia de acionamento do veículo e como ele é impulsionado sem solavancos e, principalmente, sem perda de sincronismo durante a aceleração entre os trechos do motor linear. Na presente dissertação, dentre os sensores avaliados, a opção pela chave de efeito Hall associada a um sensor linear de velocidade desenvolvido no próprio Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) foi escolhida. A sincronização foi implementada no protótipo do trem de levitação magnética do LASUP/UFRJ que emprega um motor linear síncrono de primário longo. Testes experimentais confirmam a viabilidade do método proposto.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

THE MAGLEV-COBRA MAGNETIC LEVITATION TRAIN PROTOTYPE
OPERATION SYNCHRONIZATION

Marcos Dantas Alves dos Santos

September/2010

Advisor: Richard Magdalena Stephan

Department: Electrical Engineering

The use of magnetic levitation (MagLev) train for mass transportation with linear motor drive is presented as a promising solution to some projects around the world. Japan, with the JR-MagLev, experimented in Yamanashi, and Germany, with the Transrapid technology, in an experimental line in Emsland, are the countries that invested most in this solution. Both technologies use a synchronous linear motor with long primary. As a part of the project, this long primary is divided into smaller chunks. As a result, the passage of the train between these parts must be synchronized. The linear motor type and the used sensors type, in addition to where they are placed, in the rail or at the train, substantially affect the methodology of actuation over the vehicle as it is driven with no bumps and especially without loss of synchronism during acceleration between the parts of the linear motor. In this thesis, among the sensors evaluated, the choice of a Hall effect switch associated with a linear velocity sensor developed at the Laboratory for Applied Superconductivity (LASUP) was chosen. The synchronization was implemented in the magnetic levitation train prototype of LASUP/UFRJ that employs a synchronous linear motor with long primary. Experimental tests confirm the viability of the proposed method.

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO	1
1.2. MOTIVAÇÃO	1
1.3. BREVE HISTÓRICO DOS TRABALHOS ANTERIORES	5
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	7
2. MOTORES LINEARES APLICADOS EM VEÍCULOS MAGLEV	8
2.1. MOTOR LINEAR DE INDUÇÃO	8
2.2. MOTOR LINEAR SÍNCRONO	9
2.3. SINCRONIZAÇÃO	11
2.4. CONCLUSÃO	11
3. PROTÓTIPO MONTADO NO LASUP	13
3.1. INTRODUÇÃO	13
3.2. DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO	14
3.2.1. O TRILHO	14
3.2.2. O MOTOR LINEAR SÍNCRONO	15
3.2.3. OS VEÍCULOS PROTÓTIPOS	20
3.3. CONCLUSÃO	22
4. IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DE SINCRONIZAÇÃO.....	23
4.1. INTRODUÇÃO	23
4.2. INVERSOR CFW-09	23
4.3. SENSORES DO PROTÓTIPO.....	27
4.4. SOFTWARE DESENVOLVIDO	42
4.4.1. SOFTWARE INTERNO AO CFW-09.....	42
4.4.2. INTERFACE HOMEM-MÁQUINA	46
4.5. CONCLUSÃO	52
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	54
6. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
8. APÊNDICES.....	68
8.1. FLUXOGRAMAS DOS MÓDULOS EM C	68

Índice de Figuras

FIG. 1: DETALHE DO MODELO DE LEVITAÇÃO ELETRO-DINÂMICA. BOBINAS NAS LATERAIS DA LINHA SUSTENTAM O TREM ENQUANTO ELE ESTÁ EM ALTA VELOCIDADE.....	2
FIG. 2: DETALHE DO MODELO DE LEVITAÇÃO SUPERCONDUTORA. CRIOSTATOS MANTÊM SUPERCONDUTORES REFRIGERADOS ENQUANTO FLUTUAM SOBRE ÍMÃS.....	3
FIG. 3: IMAGEM DE UM TRECHO NO INÍCIO DO MOTOR LINEAR DE PRIMÁRIO LONGO DO LASUP.....	4
FIG. 4: SECUNDÁRIO DO MOTOR LINEAR SÍNCRONO DE PRIMÁRIO LONGO MONTADO NO VEÍCULO SOBRE RODAS NO LASUP.....	6
FIG. 5: DETALHE DO VEÍCULO SOBRE RODAS NO PROTÓTIPO DE CIRCUITO OVAL NO LASUP.....	6
FIG. 6: VISTA SUPERIOR DO PROTÓTIPO MONTADO NO LASUP.....	13
FIG. 7: DETALHE DE CONSTRUÇÃO DO TRILHO DE ÍMÃS DO PROTÓTIPO.....	14
FIG. 8: PLANO CONSTRUTIVO DO ENROLAMENTO DO PRIMÁRIO LONGO DO MOTOR LINEAR.....	15
FIG. 9: IMAGEM EM DETALHE DO MOTOR LINEAR SÍNCRONO DE PRIMÁRIO LONGO. ACIMA A VISTA SUPERIOR E ABAIXO A VISTA LATERAL.....	16
FIG. 10: DOIS PROTÓTIPOS UTILIZADOS NO TRILHO. DETALHE DO “BACK- IRON” NOS PROTÓTIPOS SOBRE RODAS À ESQUERDA E SOBRE CRIOSTATOS À DIREITA.....	20
FIG. 11: VISTA INFERIOR DOS PROTÓTIPOS EXPONDO O SECUNDÁRIO DE ÍMÃS DO MOTOR LINEAR.....	21
FIG. 12: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO HARDWARE DO INVERSOR CFW-09.	25
FIG. 13: FOTO DA CHAVE DE EFEITO HALL UGN3040T.....	29
FIG. 14: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO PARA A CHAVE DE EFEITO HALL.....	29

FIG. 15: FOTO DA INSTALAÇÃO DAS CHAVES DE EFEITO HALL NA ENTRADA (À DIREITA) E SAÍDA (À ESQUERDA) DO MOTOR LINEAR DE PRIMÁRIO LONGO.....	30
FIG. 16: PADRÃO DE INTERRUÇÃO LUMINOSA DO SENSOR ÓTICO LINEAR. CADA LISTA PRETA OU BRANCA POSSUI 1 MM. A ALTURA TOTAL DO SENSOR É DE 40 MM.	31
FIG. 17: PEÇA DE FIXAÇÃO DA TIRA DO SENSOR LINEAR ÓTICO.....	33
FIG. 18: FIXAÇÃO DA FITA DO SENSOR LINEAR ÓTICO.....	33
FIG. 19: POSICIONAMENTO DA FITA DO SENSOR INSTALADA AO LADO DO MOTOR LINEAR E DO TRILHO.	34
FIG. 20: MONTAGEM MECÂNICA DA CABEÇA ÓTICA.	35
FIG. 21: MONTAGEM FINAL DA CABEÇA ÓTICA.....	35
FIG. 22: ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DA CABEÇA ÓTICA.	37
FIG. 23: MÓDULO RECEPTOR (RXM) DA EMPRESA LINX.	38
FIG. 24: MONTAGEM DO CONJUNTO FIXADO NOS VEÍCULOS. APRESENTA A CABEÇA ÓTICA, O CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO E O MÓDULO TRANSMISSOR (TXM) DA LINX.	39
FIG. 25: MÓDULO RECEPTOR (RXM) ACOPLADO AO HARDWARE DO INVERSOR CFW-09.	41
FIG. 26: FINALIZAÇÃO DO SINCRONISMO E INÍCIO DA MOVIMENTAÇÃO DO VEÍCULO.	45
FIG. 27: ASPECTO GERAL DA JANELA DA INTERFACE HOMEM-MÁQUINA.....	53
FIG. 28: DETALHE DOS CONTROLES DA INTERFACE.....	53
FIG. 29: VELOCIDADE MÉDIA MANTIDA ENTRE 10 E 15 CM/S EM TODO O PERCURSO DO MOTOR LINEAR.....	56
FIG. 30: VELOCIDADE MÉDIA NO FINAL MANTIDA EM 37,97 CM/S. CORRESPONDENTE AO SEGUNDO PATAMAR. VELOCIDADE INICIAL IGUAL A ZERO.	58
FIG. 31: VELOCIDADE MÉDIA NO FINAL MANTIDA EM 74,99 CM/S. CORRESPONDENTE AO TERCEIRO PATAMAR. VELOCIDADE INICIAL IGUAL A ZERO.	59

FIG. 32: VELOCIDADE MÉDIA NO FINAL MANTIDA EM 99,85 CM/S. CORRESPONDENTE AO QUARTO PATAMAR. VELOCIDADE INICIAL IGUAL A ZERO.	59
FIG. 33: VELOCIDADE MÉDIA NO FINAL MANTIDA EM 123,81 CM/S. CORRESPONDENTE AO QUINTO E ÚLTIMO PATAMAR. VELOCIDADE INICIAL IGUAL A ZERO.	60
FIG. 34: VELOCIDADE DE ENTRADA DO VEÍCULO MOMENTOS ANTES DE SINCRONIZAR COM O INVERSOR.	61
FIG. 35: FREQUÊNCIA GERADA NO MOMENTO DA ENTRADA DO VEÍCULO SOBRE O MOTOR LINEAR NO ALTO À DIREITA.	61
FIG. 36: SINCRONISMO DO VEÍCULO NA ENTRADA DO MOTOR LINEAR COM NOVA ACELERAÇÃO ATÉ A VELOCIDADE DE ESCAPE DE 120 CM/S.	62
FIG. 37: DIAGRAMA DE BLOCOS DO MÓDULO PROJETOLEVIMAG.C.	69
FIG. 38: DIAGRAMA DE BLOCOS DOS MÓDULOS HWSETUP.C E CFW- 09_SERIAL.C.	71
FIG. 39: DIAGRAMA DE BLOCOS DOS MÓDULOS INTPRG.C E VELCONTROL.C.	73
FIG. 40: DIAGRAMA DE BLOCOS DO MÓDULO SENCOS.C.	74
FIG. 41: DIAGRAMA DE BLOCOS DO MÓDULO PWMCONTROL.C – PARTE 1.	76
FIG. 42: DIAGRAMA DE BLOCOS DO MÓDULO PWMCONTROL.C – PARTE 2.	77

Índice de Tabelas

TABELA 1: CORRIDA DE TEMPERATURA PARA UMA CORRENTE DE 15 A DE PICO.	17
TABELA 2: CORRIDA DE TEMPERATURA PARA UMA CORRENTE DE 10 A DE PICO.	18
TABELA 3: CORRIDA DE TEMPERATURA PARA UMA CORRENTE DE 12 A DE PICO.	19
TABELA 4: PATAMARES DE VELOCIDADE ALCANÇADOS PELO VEÍCULO DURANTE A ACELERAÇÃO.	57

1. Introdução

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver a sincronização do veículo de levitação magnética no modelo em escala reduzida para demonstração da tecnologia MagLev-Cobra. Como subprodutos deste trabalho, serão desenvolvidos procedimentos de instrumentação, de acionamento de motores lineares síncronos, de transmissão de sinais por rádio-freqüência e de software de controle em tempo real.

1.2. Motivação

Dentre as técnicas de levitação magnética conhecidas, três delas se destacam na utilização do transporte de massa ferroviário: a levitação eletrodinâmica, a levitação eletromagnética e a levitação supercondutora conforme STEPHAN [1] e MOON [10].

Na levitação eletrodinâmica desenvolvida pelo Railway Technical Research Institute do Japão com o nome de JR-MagLev, um campo magnético de alta intensidade é gerado por elementos supercondutores no trem. Bobinas encontram-se dispostas nas paredes ao lado do trilho e, quando este trem se desloca, o forte campo magnético interage com as bobinas gerando correntes que, neste caso, provocam uma força de levitação. Este processo de levitação, dependendo da sua forma de construção, é estável. Parado ou em baixa velocidade, o trem permanece repousado sobre rodas em trilhos convencionais. A desvantagem apresentada é que este modelo ainda depende de rodas e trilhos para iniciar a sua levitação. A tração é composta por bobinas de um motor linear síncrono que também estão posicionadas nas paredes ao lado do trilho conforme mostrado na Fig. 1.

A levitação eletromagnética emprega o princípio de atração magnética aplicado a um trem onde o eletroímã substitui as rodas e uma estrutura de ferro substituiu o trilho. Quando o sistema de controle do trem aciona os eletroímãs, ele mantém o trem flutuando a aproximadamente 10 milímetros de altura. Este modelo está implantado em uma linha de testes em Emsland na Alemanha e em uma linha operacional de 30 km de extensão em Shanghai na China. A tração é realizada por um motor linear síncrono que está posicionado nos trilhos. GIERAS et al. em [7] detalha os projetos do JR-Maglev e do Transrapid.

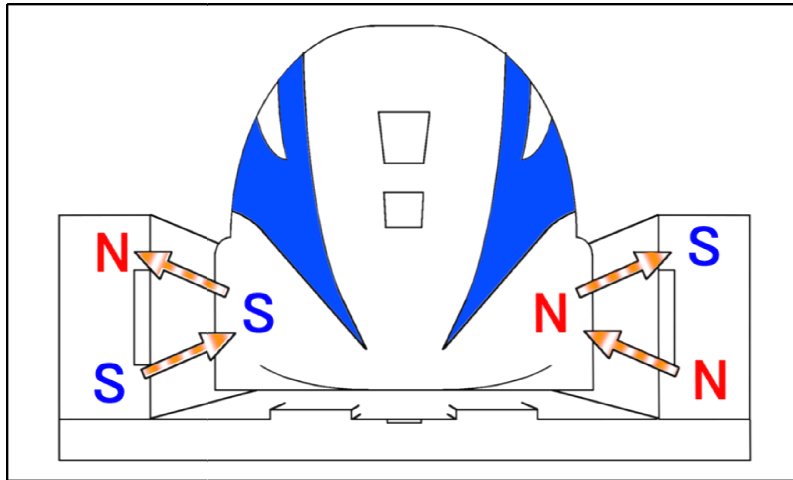


Fig. 1: Detalhe do modelo de levitação eletro-dinâmica. Bobinas nas laterais da linha sustentam o trem enquanto ele está em alta velocidade¹.

No modelo de levitação supercondutora, mostrada na Fig. 2 abaixo, os trilhos são constituídos por ímãs de Neodímio-Ferro-Boro (Nd-Fe-B) provendo um forte campo magnético. As rodas do trem são substituídas por criostatos, onde blocos supercondutores estão acondicionados a temperaturas de 193 graus Celsius negativos (Nitrogênio líquido). Na presença de campo magnético, estes blocos comportam-se como materiais diamagnéticos e, enquanto estiverem resfriados, permitirão a levitação sobre os trilhos. Esta técnica de levitação é adequada para transporte urbano e a tração pode ser realizada por um motor síncrono posicionado nos trilhos ou de indução posicionado no trem, conforme o caso.

O tipo de levitação magnética utilizada vai interferir de forma incisiva no tipo do motor que será utilizado para impulsionar o trem, pois cada tipo de levitação possui seu aspecto técnico particular e uma aplicação específica. As formas de levitação eletrodinâmica e eletromagnética são mais apropriadas para trens de velocidade de cruzeiro acima de 350 km/h e a levitação supercondutora para trens de menor velocidade da ordem de 60 km/h como abordados por STEPHAN [1]. RHODES et al. em [8] também apresenta esta discussão.

¹ Cortesia Wikipédia sobre a permissão da Gnu License.

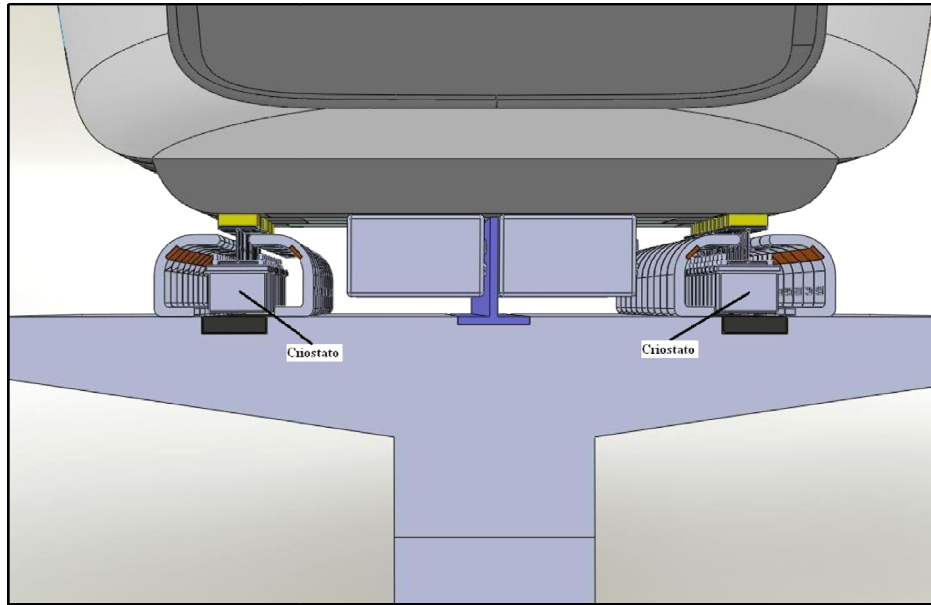


Fig. 2: Detalhe do modelo de levitação supercondutora. Criostatos mantêm supercondutores refrigerados enquanto flutuam sobre ímãs.

Os dois tipos básicos de motores lineares que podem ser utilizados no trem de levitação magnética supercondutora são os motores de primário curto ou os motores de primário longo. O motor de primário longo é caracterizado pelo posicionamento do seu primário ao longo da linha do trilho e o secundário do motor no trem. Toda a parte de eletrônica de potência de acionamento deste motor está localizada ao longo dos trilhos também. Para o motor de primário curto, o primário está localizado sob o trem e o secundário está ao longo dos trilhos. Por conta disto, a eletrônica de potência, neste caso, está posicionada dentro do trem.

Cada um destes motores possui vantagens e desvantagens que serão abordadas no decorrer desta dissertação. O caso do protótipo do trem de levitação magnética do LASUP é um motor síncrono do tipo primário longo. O estudo de como o sincroniza o veículo com o motor linear aponta algumas soluções interessantes que poderão ser utilizadas no trem em escala real caso seja utilizada a mesma configuração de motor de primário longo.

Por questões construtivas, no caso do motor de primário longo, não é possível realizar todo o comprimento da linha em um único primário. Isto levaria a

dificuldades no acionamento devido a impedâncias altas, tanto resistivas quanto indutivas, e em um baixo fator de potência, ou seja, maiores perdas. Este primário é dividido em vários trechos ao longo da linha e cada um com seu próprio acionamento e controle. Cada trecho permanece acionado somente enquanto o veículo está sobre ele, isto, conseqüentemente, acarreta o problema da passagem do veículo de um trecho para o outro. Esta passagem precisa acontecer de forma harmônica e sem trancos e, a única forma, é sincronizando a entrada do veículo no trecho seguinte do motor linear ajustando a frequência e fase de acordo com a velocidade de entrada do veículo. A Fig. 3 mostra onde o veículo protótipo do LASUP deverá ser sincronizado.



Fig. 3: Imagem de um trecho no início do motor linear de primário longo do LASUP.

Para o motor de primário curto esta opção não se faz necessária pois todo o motor e o acionamento encontram-se dentro do veículo. O secundário do motor linear está disposto ao longo do trilho de maneira contínua e sem interrupções.

1.3. Breve histórico dos trabalhos anteriores

Os trabalhos anteriores que envolveram levitação magnética no LASUP foram focados em características diferentes do trabalho aqui proposto. No trabalho realizado por ROCHA [2], foi desenvolvido um modelo de tração baseado em um motor linear síncrono no qual o secundário é composto de um campo magnético fixo de ímãs permanentes entre os trilhos e, o primário, dentro do veículo, alimentado por um inversor trifásico. Este é o modelo de primário curto com motor síncrono. Foi constatado também que os inversores tradicionais de mercado não apresentavam um bom rendimento no acionamento deste motor linear. Por este motivo, naquele trabalho, desenvolveu-se um hardware com processador DSP ligado a uma ponte trifásica de IGBT para fazer o acionamento e o controle da corrente do motor linear.

O trabalho seguinte foi a construção de um protótipo composto por um trilho em circuito oval fechado de 30 metros de comprimento com o primário do motor linear posicionado ao longo do trilho. O projeto e a validação deste motor encontram-se em MOREIRA [3].

O passo seguinte consistiu em utilizar um inversor trifásico comercial para acionar o motor linear neste protótipo de 30 metros e avaliar a partida de um carro sobre rodas somente na parte reta do circuito oval feito por ROBERTO [4]. No carro encontra-se o secundário deste motor linear, construído com ímãs permanentes. Este é o modelo de primário longo com motor linear síncrono. A Fig. 4 mostra o secundário do carro sobre rodas exposto a Fig. 5, o carro sobre rodas pronto para operar.

A presente dissertação apresenta a seqüência destes estudos.

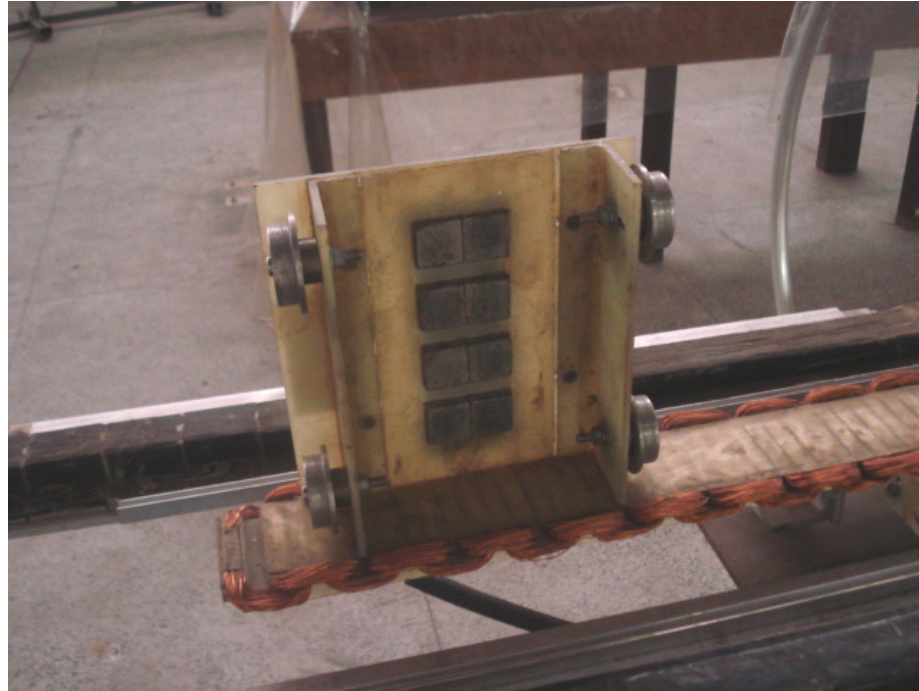


Fig. 4: Secundário do motor linear síncrono de primário longo montado no veículo sobre rodas no LASUP.

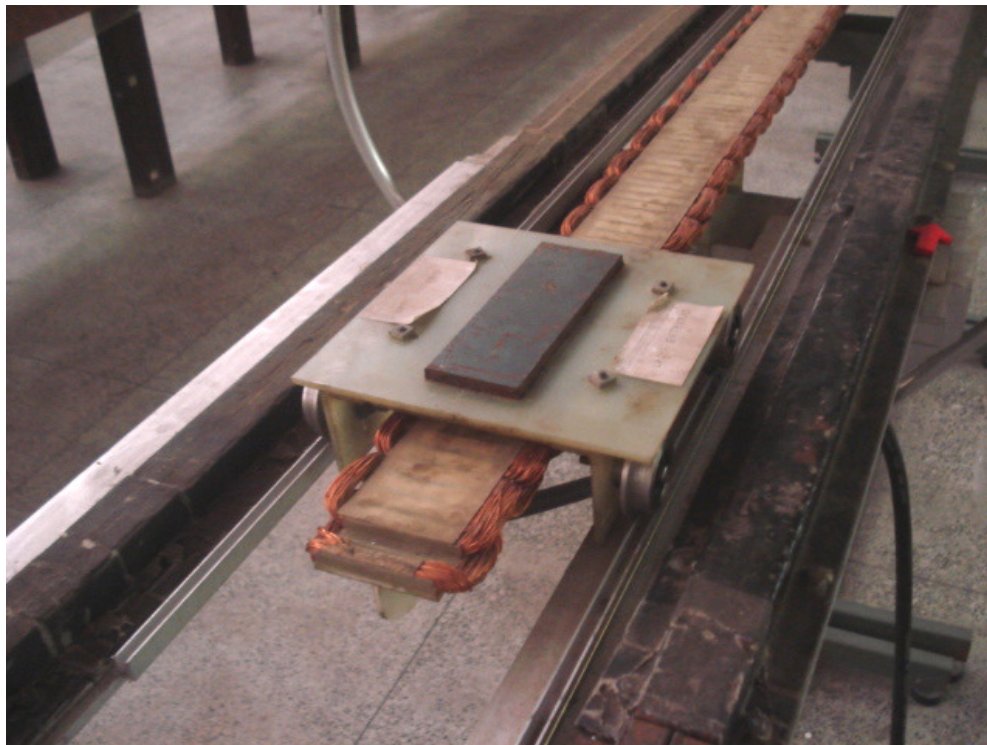


Fig. 5: Detalhe do veículo sobre rodas no protótipo de circuito oval no LASUP.

1.4. Organização da Dissertação

Este trabalho está organizado em seis capítulos. O capítulo dois apresenta os dois tipos de motores lineares aplicados em veículos MAGLEV. São descritos o motor linear de indução e o motor linear síncrono, suas características básicas, casos em que são aplicados e as necessidades de sincronização.

O capítulo três apresenta as características do protótipo do trem de levitação magnética desenvolvido no LASUP. Detalhes de construção da linha de trilhos de ímãs e também dos criostatos que flutuam caminhando sobre os trilhos.

O capítulo quatro apresenta a técnica de sincronização desenvolvida utilizando o inversor comercial da WEG modelo CFW09. São apresentadas também alternativas de sensores para a sincronização do protótipo na entrada do motor linear e a escolha feita para o protótipo do LASUP utilizando chaves de efeito hall e o sensor linear de velocidade construído. Por fim, é descrito o software desenvolvido para a técnica de sincronização escolhida.

O capítulo cinco apresenta os resultados experimentais obtidos com a passagem do veículo no trilho sobre o motor linear.

O capítulo seis apresenta as conclusões e possibilidades de trabalhos futuros.

2. Motores lineares aplicados em veículos MAGLEV

Os motores lineares pertencem ao grupo de máquinas elétricas especiais que, em algumas aplicações específicas, permitem a substituição das soluções mecânicas tradicionais, como os fusos e engrenagens, nas quais seria necessário transformar um movimento de rotação de um motor elétrico convencional em um movimento de translação da carga. Estes motores podem ser classificados como: motores de corrente contínua; motores de indução; motores síncronos, incluindo os de relutância variável e os motores de passo e motores híbridos.

Para os sistemas de transporte de massa de alta velocidade, especialmente os veículos MAGLEV, os principais modelos adotados são o motor linear de indução e o motor linear síncrono como citado em GIERAS [5].

2.1. Motor linear de indução

Os motores lineares de indução se estabeleceram ampla e fortemente em aplicações envolvendo sistemas de transporte como exemplificado em GIERAS [5]. Estes sistemas de transporte, que utilizam motores lineares de indução, incluem veículos de rodas sobre trilhos de tração elétrica apresentando a vantagem de ter a propulsão e a frenagem independentes do atrito das rodas.

Outra área de aplicação dos motores lineares são as aplicações industriais, ou seja, em processos manufaturados sob a forma de ferramentas, separadores de insumos, fresas e prensas. Podem-se encontrar também equipamentos de testes como aceleradores para a indústria automobilística e indústria naval.

Para GIERAS [5], o estator é chamado de primário e o rotor de secundário. Não é importante, pelo ponto de vista do princípio de operação, qual das duas partes está em movimento. Os motores lineares de indução podem ainda ser classificados como: motores face simples; motores de dupla face e motores de fluxo magnético longitudinal.

As principais vantagens dos motores lineares de indução face dupla sobre os de face simples são a eliminação das forças de atração existentes entre o primário e o secundário e o torque 4 vezes maior em relação ao motor face simples, assumindo o mesmo volume. As principais desvantagens do motor de face dupla são: a dificuldade de eliminação das faltas causadas pelas deformações do secundário quando este se encontra posicionado entre dois primários e a dificuldade de manter um entreferro pequeno e uniforme em toda a sua extensão. Se o motor linear de indução for do tipo face simples, além de produzir aceleração, pode produzir sustentação. Esta é a chamada suspensão eletrodinâmica.

O motor linear de indução encontra aplicações envolvendo baixas velocidades, normalmente abaixo dos 100 km/h. Uma de suas vantagens seria seu menor custo de construção em relação ao motor linear síncrono. Para isto, ele é construído no modelo de primário curto, onde o primário encontra-se no vagão e o secundário encontra-se na linha, entre os trilhos. Outra grande vantagem é o fato do secundário poder ser construído em alumínio, cujo custo é menor do que se fosse construído de cobre.

É necessária uma grande quantidade de potência no interior do veículo de primário curto, pois esta potência é principalmente utilizada para fazer o acionamento do motor linear no veículo. Uma alternativa já utilizada é se utilizar de escovas coletando esta energia dos trilhos enquanto o veículo está em movimento. Outra proposta é utilizar catenárias aéreas. Estas escovas e catenárias funcionam bem nas baixas velocidades, que é o caso onde o motor linear de indução se aplica bem.

2.2. Motor linear síncrono

Em um motor linear síncrono, chama-se de armadura a parte onde se aplica o campo magnético viajante e, de excitação de campo, a parte que provê o campo magnético fixo. Para unificar a nomenclatura dos dois tipos de motor nesta dissertação, será utilizada a mesma nomenclatura do motor linear de indução, ou seja, primário para a armadura e secundário para o campo fixo.

No motor linear síncrono o secundário está em sincronismo com o campo magnético gerado no primário, isto é, a velocidade mecânica linear é a mesma do

campo magnético viajante. Esta velocidade está definida pela fórmula abaixo, onde f é a frequência de acionamento do inversor e τ é o passo polar do motor linear. Passo polar em uma máquina rotativa é definido como o ângulo de abrangência de um pólo magnético, ou seja, dividindo 360 pelo número de pólos do motor. No caso de um motor linear, pode ser definido como a metade da distância entre duas bobinas acionadas pela mesma fase. Para este motor linear construído no LASUP, o passo polar é de 0,039 m.

$$v_s = 2 \cdot f \cdot \tau = \omega \cdot \tau / \pi \quad [\text{m/s}] \quad \text{Eq. (2-1)}$$

Por esta fórmula, observa-se que a velocidade síncrona do campo magnético, e por consequência a velocidade do secundário atrelado ao veículo, depende unicamente da frequência e do passo polar do motor.

Motores lineares síncronos podem ainda ser classificados como: plano ou tubular; face simples ou face dupla; com ranhuras ou sem ranhuras; núcleo de ferro ou de ar; fluxo transversal ou longitudinal. Todas as configurações de primário citadas anteriormente são possíveis quando se utiliza no secundário qualquer das seguintes formas: ímãs permanentes, excitação através de enrolamentos ou sistemas de excitação baseados em supercondutores.

Os dois únicos sistemas de levitação magnética de trens de alta velocidade implantados no mundo, o Transrapid e o JR-MagLev, utilizam motores lineares síncronos. Utilizam também a configuração de primário longo, onde a energia para movimentação é aplicada ao primário localizado ao longo dos trilhos, externamente ao veículo. A opção por primário curto levaria à utilização de cabos suspensos em catenária ou a um terceiro trilho energizado e escovas, o que é inaceitável para altas velocidades.

A justificativa para a escolha dos motores lineares síncronos no Transrapid e no JR-MagLev está relacionada às velocidades acima de 450 km/h alcançadas por estas composições. A potência necessária para levar estas composições a estas velocidades é da ordem de 10 MW. Seria muito inconveniente transportar para dentro do trem toda esta potência, em altíssimas velocidades, caso ele utilizasse a opção de primário curto, assim também como transportá-la dentro do veículo. Questões envolvendo peso

do gerador e combustível, poluição sonora e atmosférica devido à queima de combustíveis fósseis são, nos dias de hoje, questionáveis. Mesmo que a opção pela utilização do circuito de primário longo seja mais cara, devido à maior utilização do cobre na linha, ele se apresenta como a forma de propulsão mais elegante e ecológica para as altas velocidades.

2.3. Sincronização

Para a implantação física de um modelo de propulsão linear baseado em um primário longo é necessário que a linha seja separada por trechos. Cada um destes trechos é alimentado isoladamente de forma que, logo antes do trem chegar ao trecho, ele é ligado e, logo após a saída do trem, ele é desligado. Um trecho muito longo de primário implica em uma grande resistência e uma grande indutância. Isto sobrecarregaria as estações de alimentação da linha.

Esta divisão em trechos implica em um sistema de sincronização na passagem do trem entre os trechos. O sinal aplicado ao trecho seguinte ao qual o trem está situado deve estar na mesma fase e frequência para garantir a passagem entre os trechos de forma harmônica sem solavancos ou trancos.

ROST [6] mostra que o sistema utilizado pelo Transrapid utiliza dois inversores trifásicos que estão separados por uma distância aproximada de 50 km. A linha de alimentação entre estes dois inversores alimenta pequenos trechos de 500 m a 2000 m. Estes trechos são ligados e desligados à medida que o trem se desloca, conforme dito anteriormente.

2.4. Conclusão

A discussão sobre a forma de construção do motor linear, ou seja, se ele é de primário longo ou primário curto ou se ele é de indução ou síncrono, depende da aplicação que está sendo implantada. Para as aplicações envolvendo velocidades abaixo de 90 a 100 km/h torna-se mais vantajoso e eficiente a utilização do motor linear de indução de primário curto. Não se faz necessário o uso de cobre no

secundário. O alumínio pode ser implantado no secundário a um custo menor. Como ele anda em baixa velocidade, o uso de linhas de energia suspensas ou escovas para levar energia para dentro do veículo ainda torna-se viável.

Para as velocidades altas, entre 300 e 550 km/h, aplica-se o motor linear síncrono de primário longo. Estas velocidades demandam uma quantidade de energia muito grande para movimentar o trem sendo perfeitamente aceitável o custo de implantação de cobre no primário ao longo da linha. A potência necessária para as atividades internas do trem, como ar condicionado e iluminação, pode ser transferida da linha para o veículo através de transformadores lineares.

3. Protótipo montado no LASUP

3.1. Introdução

O protótipo montado no LASUP tem por objetivo aumentar o conhecimento do grupo sobre a levitação supercondutora. É possível realizar experiências de dinâmica de acionamento; aceleração do veículo; testes de levitação do carro sobre o trilho com aceleração; dinâmica do comportamento do carro com supercondutores nas curvas; distância que o carro flutua sobre os trilhos contra a capacidade de levitação; tempo de levitação dos criostatos, enquanto resfriados, sobre os trilhos, com o carro parado ou em movimento. Este protótipo pode ser dividido em três partes: o trilho; o motor linear e os carros de teste. Cada um destes itens está detalhado abaixo. É possível encontrar detalhes deste projeto em STEPHAN [14].



Fig. 6: Vista superior do protótipo montado no LASUP.

3.2. Descrição do protótipo

3.2.1. O Trilho

O trilho é composto por duas fileiras de ímãs distantes de 30 cm em um circuito quase oval de trinta metros de comprimento com duas retas de 6 metros. Cada curva possui uma circunferência com um raio médio de 3 metros. Foram utilizados aproximadamente 4740 ímãs de Nd-Fe-B de uma polegada de comprimento em todo o percurso. Na construção do trilho, os ímãs estão dispostos frente à frente com a mesma polaridade e separados por uma peça de ferro [4]. Esta peça de ferro entre eles garante a concentração de fluxo no centro de cada trilho. Esta montagem dos ímãs apresentou uma dificuldade que é a instabilidade dos ímãs nessa posição em que foram encaixados. Eles tendem a saltar destas posições pela força de repulsão que existe entre eles. Uma possibilidade de aumentar o campo magnético próximo à superfície do trilho seria um arranjo Halbach embora este arranjo trouxesse um aumento no problema da instabilidade dos ímãs. DIAS [11], STEPHAN [12], DE ANDRADE [13] e STEPHAN [16] apresentam modelagem e resultados comparativos de simulação para este tipo de trilho. A Fig. 7 apresenta uma vista da construção do trilho.



Fig. 7: Detalhe de construção do trilho de ímãs do protótipo.

3.2.2. O Motor Linear Síncrono

A construção do motor linear síncrono baseou-se em algumas premissas básicas que são listadas a seguir.

- Motor linear de face simples (“*single-sided*”) com o primário longo posicionado entre os trilhos de ímãs e somente nas retas. As curvas do traçado do trilho aumentam a complexidade da construção das bobinas do motor.
- Construção do primário longo com enrolamento trifásico ligado em “Y”.
- Núcleo de ar para reduzir força de atração entre o veículo e o trilho.
- Secundário com quatro pólos e construído de ímãs de Nd-Fe-B posicionados no veículo.
- Passo polar de $\tau = 39$ mm. Em 20 Hz, utilizando Eq. (2.1), obtém-se uma velocidade linear de 1,56 m/s.

A especificação e o projeto deste motor linear síncrono encontram-se bem detalhados em MOREIRA [3] e MOREIRA [15]. As figuras Fig. 8 e Fig. 9 mostram o planejamento e a construção deste motor linear de primário longo.

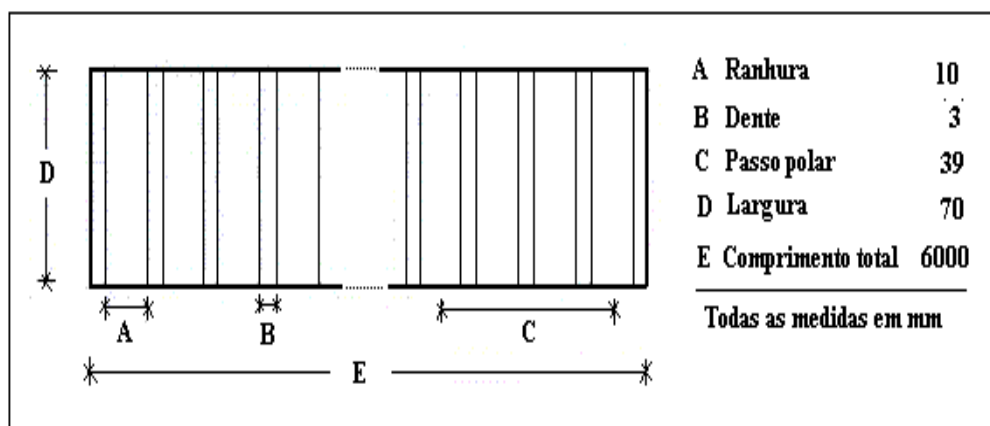


Fig. 8: Plano construtivo do enrolamento do primário longo do motor linear.



Fig. 9: Imagem em detalhe do motor linear síncrono de primário longo. Acima a vista superior e abaixo a vista lateral.

Como resultado prático da construção deste motor linear, pôde-se medir a resistência em cada fase. Seu valor é de cinco Ohms. Este valor vai permitir calcular a amplitude de corrente máxima que pode ser aplicada ao motor e associado a isto, verificar a temperatura de funcionamento do motor e seu regime de operação. A temperatura máxima de operação que este motor pode atingir é de 105 °C devido ao limite de temperatura que o verniz que isola suas espiras pode suportar.

Foram realizados três ensaios de temperatura no motor linear aplicando-se uma corrente senoidal trifásica em seus terminais através do inversor CFW-09. Para cada ensaio, aplicou-se a corrente senoidal trifásica com valor de pico constante e mediu-se em um ponto do motor entre as espiras a sua temperatura de minuto em minuto. Como não se sabia inicialmente qual corrente aplicar, optou-se pelo método de tentativa e erro e a condição inicial dos ensaios foi à temperatura ambiente de 30 °C.

Foi escolhida inicialmente a corrente de 15 A de pico. Este ensaio foi interrompido prematuramente pois a temperatura quase atingiu o limite de 105 °C e continuaria subindo conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Corrida de temperatura para uma corrente de 15 A de pico.

Tempo (min.)	Temperatura (°C)
0	30
1	41
2	54
3	64
4	73
5	80
6	86
7	92
8	96
9	100
10	104
11	Interrompido

Decidiu-se reduzir a corrente e verificar se a temperatura se estabilizaria em um patamar abaixo de 105 °C. A seguir foi realizado o mesmo ensaio com o valor da corrente de 10 A de pico. Este ensaio, mostrado na Tabela 2, conseguiu chegar a um patamar estável de temperatura mas ficou muito abaixo do limite.

Por fim, foi escolhida a corrente de 12 A de pico. A temperatura final entre as espiras do motor ficou estabilizada e bem perto do limite de 105 °C, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 2: Corrida de temperatura para uma corrente de 10 A de pico.

Tempo (min.)	Temperatura (°C)
0	34
1	39
2	44
3	49
4	53
5	57
6	60
7	63
8	65
9	68
10	70
11	72
12	73
13	74
14	76
15	77
16	78
17	79
18	80
19	81
20	81

Tempo (min.)	Temperatura (°C)
21	82
22	83
23	83
24	84
25	84
26	84
27	84
28	84
29	84
30	85
31	85
32	85
33	85
34	85
35	85
36	85
37	85
38	85
39	85
40	86
41	85

Tabela 3: Corrida de temperatura para uma corrente de 12 A de pico.

Tempo (min.)	Temperatura (°C)
0	30
1	36
2	44
3	51
4	56
5	61
6	65
7	69
8	72
9	76
10	78
11	80
12	83
13	85
14	86
15	88
16	89
17	90
18	91
19	92
20	93
21	94

Tempo (min.)	Temperatura (°C)
21	94
22	95
23	96
24	96
25	97
26	97
27	98
28	98
29	98
30	99
31	99
32	99
33	99
34	99
35	99
36	100
37	100
38	100
39	100
40	100
41	101
42	100

A norma da ABNT NBR 7094/2000 que trata de máquinas elétricas girantes, define os regimes de serviço de um motor elétrico. O regime de serviço indica o grau de regularidade da carga a qual o motor é submetido. Estes regimes variam de S1 até S10 sendo S1 o regime contínuo de operação em potência constante. Com os ensaios anteriores, chega-se à conclusão de que para operar em modo de potência contínua, ou seja, em modo “S1”, a corrente máxima de operação deste motor linear é de 12 A de pico.

3.2.3. Os Veículos Protótipos

Moreira em [3] projetou o secundário dos dois protótipos para operar sobre este trilho. A estrutura básica existente em ambos os protótipos consiste de um secundário de ímãs permanentes de Nd-Fe-B, como dito anteriormente, e um chapa de aço por trás dos ímãs para fechar o circuito magnético (“*back-iron*”).

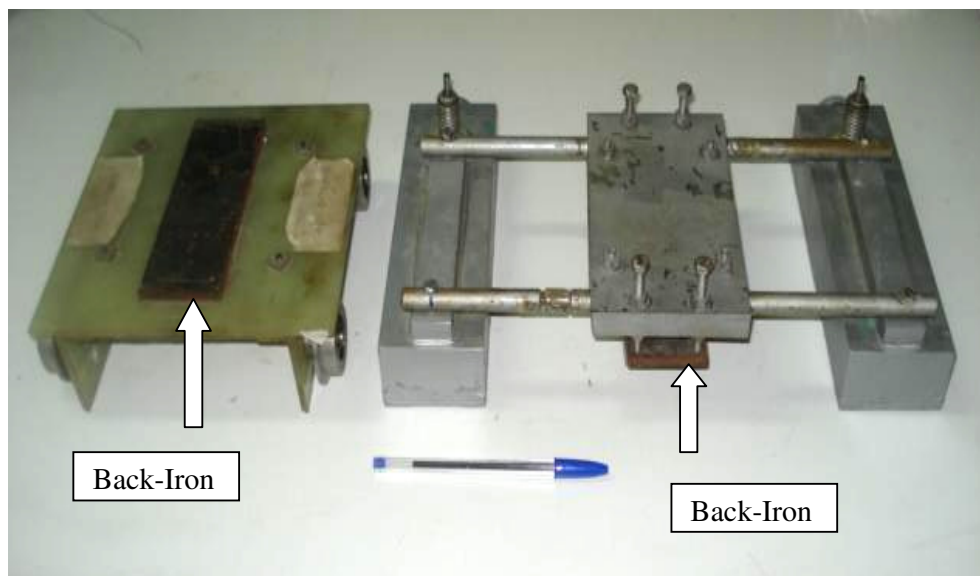


Fig. 10: Dois protótipos utilizados no trilho. Detalhe do “*back-iron*” nos protótipos sobre rodas à esquerda e sobre criostatos à direita.

O primeiro protótipo desenvolvido teve por objetivo fazer testes com o motor linear síncrono. Ele foi adaptado para utilizar um conjunto de rodas, como visto no lado esquerdo das Fig. 10 e Fig. 11 e percorre um apoio auxiliar na reta principal ao lado do motor linear como visto anteriormente na Fig. 5. Roberto em [4] fez vários ensaios de partida e aceleração do protótipo com rodas utilizando o inversor com software original CFW-09 da WEG.

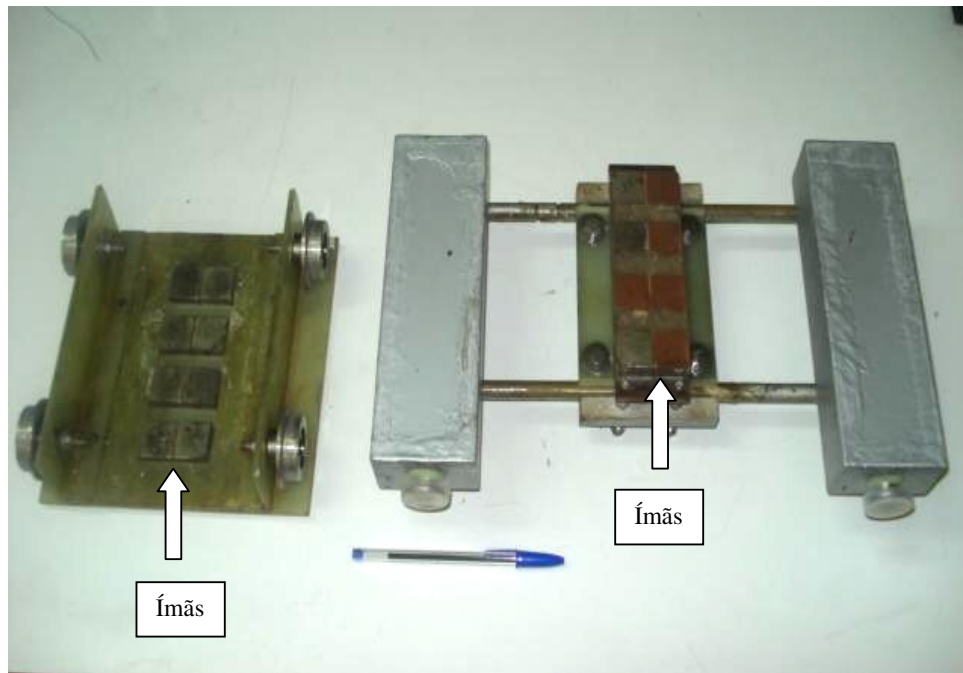


Fig. 11: Vista inferior dos protótipos expondo o secundário de ímãs do motor linear.

A empresa alemã Adelwitz Technologiezentrum GmbH desenvolveu os criostatos do segundo protótipo que pode ser visto à direita das Fig. 10 e Fig. 11 e foi construído para realizar os testes de levitação supercondutora. Utilizou-se da mesma estrutura de secundário do primeiro protótipo mas, no lugar das rodas, apresenta os criostatos contendo os supercondutores. Estes supercondutores, após refrigerados, fazem a sustentação do conjunto sobre os trilhos magnéticos. Os dois protótipos também apresentam uma diferença no peso de cada um. O protótipo de rodas tem 2,12 kg e o protótipo com criostatos 4,32 kg. Estes valores são importantes pois eles estão

diretamente ligados à inércia e à capacidade de aceleração máxima do motor linear síncrono sem perder o sincronismo. Cada um dos criostatos, com capacidade aproximada de 270 cm³ de nitrogênio, contém duas pastilhas supercondutoras do tipo II de Ítrio-Bário-Cobre (YBCO) com dimensão de 65 x 30 x 12 mm.

Para que houvesse a sincronização do protótipo, foi necessária a implantação de um sensor ótico com circuito de condicionamento de sinal no veículo para medir a própria velocidade.

3.3. Conclusão

Após o levantamento dos trabalhos já realizados e das características do protótipo, pode-se propor a sincronização do veículo protótipo MagLev-Cobra, como será visto no capítulo seguinte.

4. Implementação da técnica de sincronização

4.1. Introdução

Antes de estabelecer a discussão da melhor técnica de sincronização do protótipo, faz-se necessário conhecer todo o sistema envolvido e as possibilidades à disposição. O equipamento utilizado para acionar o motor linear síncrono nos projetos anteriores tem sido o inversor CFW-09 da empresa WEG Automação. Este equipamento é um inversor trifásico com todo o software interno voltado para o controle de motores de indução. Isto implica em uma dificuldade no controle e na partida dos veículos sobre o motor síncrono. A interface homem-máquina do CFW-09, totalmente voltada para o controle de máquinas de indução, não permite uma versatilidade no acionamento do motor linear síncrono. Outra dificuldade também é a impossibilidade de um controle mais apurado e visualização das formas de onda aplicadas ao motor do protótipo.

O software desenvolvido para esta dissertação se dividiu em duas plataformas. Uma parte foi desenvolvida em linguagem C para funcionar dentro do próprio inversor para controlar o funcionamento do motor utilizando as ferramentas de programação da empresa Renesas. A outra parte foi construída em Java para funcionar em um computador ou “*notebook*” e servir de interface homem-máquina.

4.2. Inversor CFW-09

Para realizar o procedimento de sincronização com controle automático da reentrada do veículo sobre o motor, não seria possível utilizar o CFW-09 da maneira como ele se apresenta originalmente. Uma alternativa para resolver este problema seria o projeto e a construção de um inversor que pudesse ser programado conforme a necessidade para o motor linear síncrono. Esta hipótese se tornou inviável devido à certificação do bom funcionamento deste novo inversor dentro do tempo de projeto. Outra solução seria a compra de um inversor novo para motor linear síncrono que envolveria um custo adicional que não estava previsto neste projeto.

A opção que se tornou mais interessante foi utilizar o hardware do CFW-09 e alterar seu software interno. Este hardware possui as características necessárias para o

desenvolvimento desta sincronização. Possui ainda um grupo de interfaces externas que permitem uma ampla variedade de sensores no controle da passagem do veículo sobre o motor. MOHAN em [9] aborda como gerar as ondas trifásicas para acionamento do motor linear.

A utilização do hardware do CFW-09 foi possível devido ao conhecimento acumulado de projetos anteriores e a facilidade que este hardware possui de interagir com o meio externo. Isto permitiu um ganho de tempo no projeto pois este equipamento tem as seguintes características:

- atende às normas de segurança UL508C, UL840, EN50178, EN60204-1, EN60146, EN61800-2;
- atende às normas de mecânica EN60529 e UL50;
- atende às normas de compatibilidade eletromagnética EN61800-3, EN55011, CISPR11, EN61000-4-2, EN61000-4-3, EN61000-4-4 e EN61000-4-5 conforme descritas em seu manual;
- utiliza um processador de ponto fixo Renesas de 32 bits RISC SH7044 de 28 MHz e 256K bytes de memória para atender às necessidades do controle do motor linear síncrono;
- possui proteções contra sobre-corrente, sobre-tensão, curto-circuito e pré-carga já incorporadas ao hardware;
- possui também entradas e saídas analógicas, digitais e relés;
- possui comunicação com o mundo exterior através de interface serial RS-232.

A Fig. 12 mostra o diagrama de blocos do hardware do CFW-09.

O CFW-09 desta dissertação foi instalado na parede próxima a reta onde está instalado o motor linear do circuito oval do trilho, em local apropriado e ventilado, perto do motor linear e teve sua programação interna totalmente apagada para poder receber o novo software.

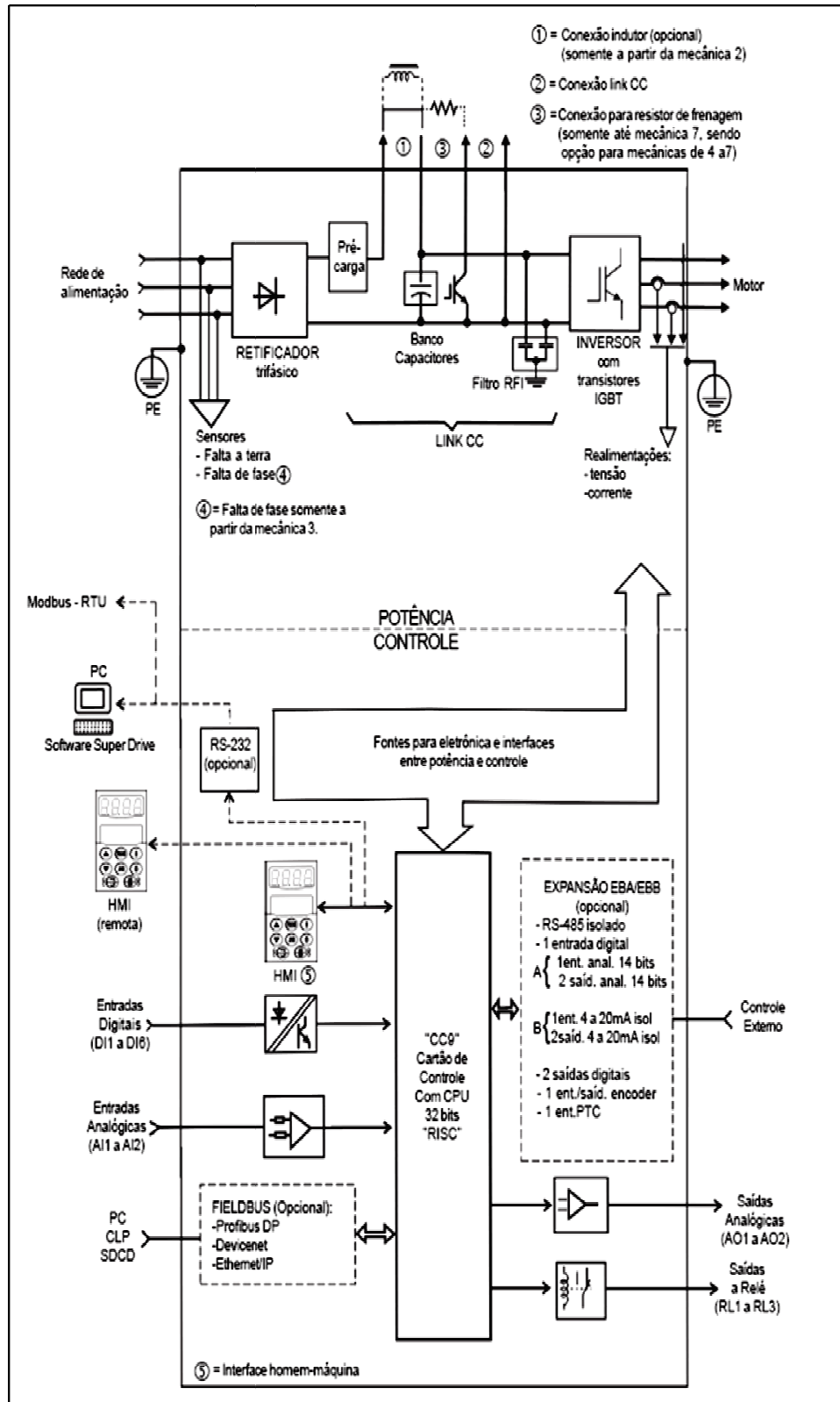


Fig. 12: Diagrama esquemático do hardware do inversor CFW-09.

Das interfaces que o CFW-09 apresenta para o mundo externo, cinco são de relevância para esta dissertação: as entradas digitais, as saídas analógicas, as entradas analógicas, entrada de interrupção e a interface serial RS-232.

As seis entradas digitais numeradas de DI1 a DI6 são isoladas opticamente e aceitam tensões entre 15 e 24 Volts. São utilizadas para checar a passagem do veículo e decidir se o PWM do motor deve ser ligado ou desligado.

As duas saídas analógicas denominadas de AO1 e AO2 possuem capacidade para gerar sinais de tensão de saída entre 0 e 10 Volts. Podem ser programadas para repetir qualquer sinal de corrente ou tensão do inversor ou mesmo fazer o rastreamento de alguma variável interna do software. Isto facilita a observação de sinais internos do inversor no osciloscópio.

As sete entradas analógicas denominadas de AI0 a AI6 podem ler sinais entre 0 e 5 Volts e estão comprometidas com algumas funcionalidades internas do hardware do CFW-09 descritas a seguir. AI0 e AI4 estão comprometidas com a leitura da corrente de saída de duas das três fases chamadas I_V e I_W . A entrada AI5 faz a leitura da tensão do link DC entre o retificador e o inversor. A entrada AI3 mede a temperatura interna sobre os IGBTs. A entrada AI6 tem acesso restrito por um conector interno e está livre. As entradas AI1 e AI2 estão em um conector externo de mais fácil acesso e também estão livres. Os canais internos de corrente, de link DC e temperatura estão em constante monitoração para impedir danos provenientes de alguma sobrecarga ao inversor CFW-09 durante a sua operação.

A entrada de interrupção, apesar de estar em um conector de acesso interno restrito da placa, está diretamente ligada ao processador e pode gerar eventos que tem tratamento especial pelo software. Esta entrada será muito útil para a monitoração de velocidade do veículo.

A interface serial RS-232 é usada para a comunicação entre o inversor com a nova programação interna e o computador externo fazendo a função de interface homem-máquina.

4.3. Sensores do protótipo

Os sensores desta aplicação são necessários para ocorra o correto funcionamento da sincronização e do acionamento do veículo sobre o motor linear. É necessário detectar a chegada do veículo no início do motor e medir a sua velocidade de aproximação. Foram investigadas várias abordagens para o sensoriamento deste protótipo. A proposta que se tornou viável e mais prática foi a utilização de sensores ao redor do motor linear tanto no primário entre os trilhos, quanto no secundário no veículo. Estes sensores precisam conectar-se ao inversor CFW-09 para enviar os seus sinais e controlar o momento de ligar e desligar o motor durante a passagem do veículo, e informar a frequência que deve ser aplicada ao motor.

O sensor de detecção da chegada do veículo na aproximação sobre o motor linear é o responsáveis por informar ao CFW-09 da entrada do veículo sobre o motor. Outro sensor igual a este será implantado na saída do motor para permitir o desligamento do motor quando o veículo não estiver sobre ele. Evita-se assim que o motor fique ligado por muito tempo e não cumprindo a sua função básica que é acelerar o veículo. Não seria problema para este motor funcionar no regime de serviço S1, onde a carga está acionada 100% do tempo, desde que ele operasse dentro dos limites discutidos no tópico 3.2.2 anterior.

A norma ABNT NBR 7094/2000 também define a operação no regime de serviço intermitente S3, onde se caracteriza o acionamento do motor em ciclos. O motor permanece ligado durante uma parte do ciclo e desligado na parte restante do ciclo. Este regime de serviço neste motor linear não apresenta riscos de operação de sobrecarga mesmo que fosse aplicada a capacidade máxima de corrente do CFW-09 instalado que é de 18 A de pico. O regime de serviço intermitente S3, no caso deste motor linear, é de 25% pois pode ser considerado como a relação entre o comprimento do primário do motor linear (6 metros) e o comprimento do restante do trilho (24 metros).

Foram consideradas duas opções para este sensor. Uma opção era um sensor do tipo óptico utilizando leds infravermelhos. Estes sensores são muito sensíveis em ambientes com poeira e variação de luminosidade, por isto, foram logo descartados. A opção mais recomendada neste caso foi a utilização de uma chave digital de efeito

Hall. Esta chave muda seu estado na presença de campo magnético e não apresenta variações de comportamento devido a mudanças ambientais. Como o secundário do motor linear está instalado no veículo, e é feito de ímãs permanentes, torna-se a opção ideal para ser colocado na entrada e na saída do primário detectando a chegada ou saída do veículo.

O componente selecionado para esta tarefa foi a chave de efeito Hall UGN-3040T da empresa Sprague Electric Co. Cada chave possui internamente um regulador de voltagem, um gerador de tensão Hall, amplificador de sinal, um “*Schmitt trigger*” e saída em coletor aberto. Quando a densidade de fluxo do campo magnético perpendicular à face do componente é maior que o limite superior, o transistor de saída é ativado. Quando esta densidade está baixo do limite inferior, o transistor é desligado. Esta chave possui ainda as seguintes características:

- operação entre 4.5 e 24 Volts,
- limite magnético superior em torno de 150 Gauss,
- limite magnético inferior em torno de 100 Gauss,
- opera sem restrições com os ímãs de Nd-F-B que estão no secundário posicionados no veículo.
- pode operar com ímãs de tamanho reduzido e de baixo custo,
- ativado pela presença de um pólo Sul,
- não possui partes móveis,
- encapsulamento TO-92;
- saída em coletor aberto permite compatibilizar com qualquer família lógica,
- pode drenar correntes de até 20 mA em frequências até 100 kHz;
- temperatura de operação entre -20 °C e +85 °C,
- opera somente com 3 pinos: Vcc, Gnd e Vout.

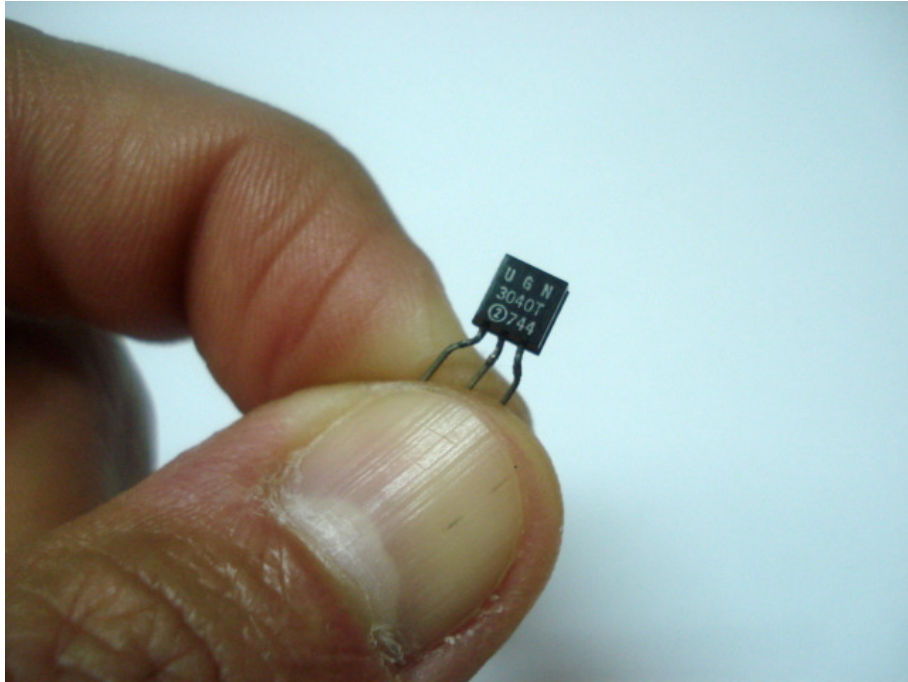


Fig. 13: Foto da chave de efeito Hall UGN3040T.

O circuito proposto para esta funcionalidade e sua conexão com o CFW-09 está mostrado na Fig. 14. A Fig. 15 mostra o detalhe de instalação das chaves de efeito Hall na entrada e na saída do motor linear.

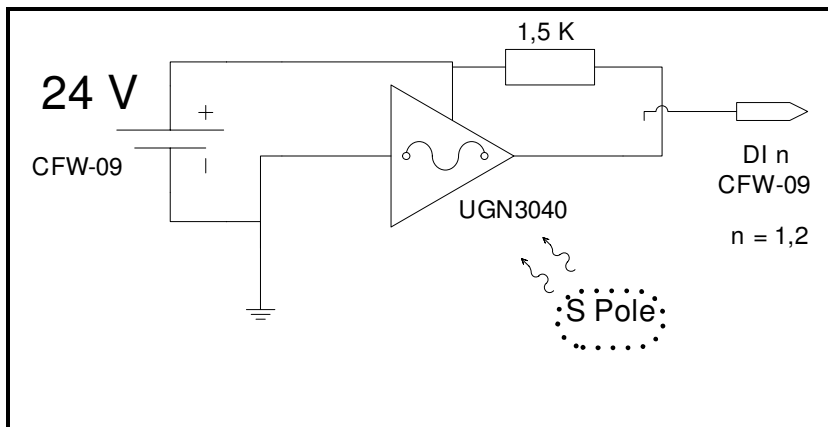


Fig. 14: Diagrama esquemático do circuito para a chave de efeito Hall.

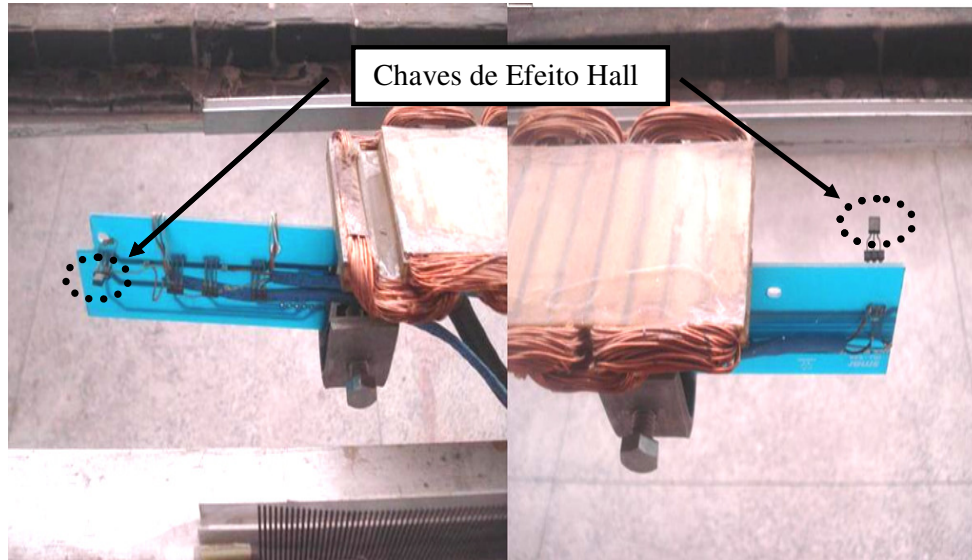


Fig. 15: Foto da instalação das chaves de efeito Hall na entrada (à direita) e saída (à esquerda) do motor linear de primário longo.

O tratamento de software para este sensor se baseia em uma leitura digital de uma porta de entrada do CFW-09. O sensor normalmente apresenta o nível digital zero mas, quando o veículo passa pelo sensor, ele leva o nível da porta lógica para um, indicando sua passagem. Isto resolve o problema da detecção do veículo na aproximação do motor linear. Esta identificação permite que o inversor atue no motor ligando ou desligando-o em função da passagem do veículo. Este é um dos objetivos desta dissertação.

O próximo passo é a determinação da velocidade de entrada do veículo sobre o primário do motor linear. Isto é fundamental para o sincronismo do veículo sobre o motor linear, que é o foco principal desta dissertação.

Para um motor rotativo tradicional, é possível achar diversos fabricantes comerciais de inversores com vários tipos de sensores, sejam eles magnéticos ou óticos, ou mesmo, absolutos ou incrementais. No caso de um motor linear onde o secundário, com sua movimentação, extrapola o comprimento do seu primário, é necessário o desenvolvimento de um sensor de velocidade linear que atenda a alguns requisitos básicos a seguir: permitir a reentrada do secundário sobre o primário; não interferir na movimentação do secundário sobre o primário; cobrir todo o

comprimento do primário e informar ao inversor CFW-09 da velocidade do veículo enquanto ele se desloca sobre o primário.

A utilização de um sensor magnético não se tornou viável porque não existe variação de fluxo ao longo da linha do primário. Os ímãs mantêm o fluxo constante para a levitação do veículo e, mesmo que se tentasse utilizar a efeito borda de cada ímã, não se teria uma boa resolução. Resta, neste caso, a utilização de um sensor ótico. O projeto deste sensor ótico deve também prever imunidade às variações de luz ambiente. GIERAS et al. em [7] aborda com detalhes outros modelos de sensores.

Uma forma de se obter resolução, neste caso, é criar um “*encoder*” ótico linear. Para isto, é necessário ter uma fita com um padrão de interrupção de luz disposta ao longo do trilho. O sensor ótico lê este padrão e transmite para o inversor CFW-09. Isto permite que o inversor receba a informação da velocidade do veículo e calcule a frequência da senóide a ser aplicada no primário do motor linear através do PWM de saída. Isto vai garantir o sincronismo do veículo sobre o primário do motor linear.

Estabeleceu-se, a princípio, que a fita teria uma resolução de 1 mm. Para valores menores de resolução, seria complicado construir uma mecânica apropriada para os leds. A fita, deste modo, teria uma faixa transparente seguida de uma faixa opaca ambas de 1 mm como na figura abaixo.

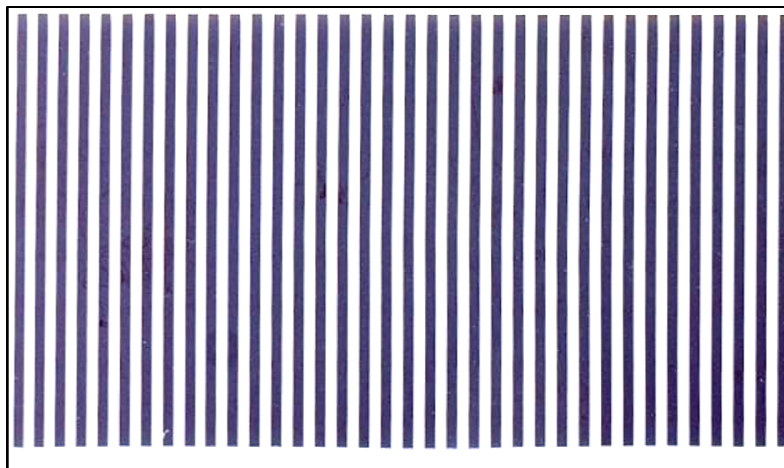


Fig. 16: Padrão de interrupção luminosa do sensor ótico linear. Cada lista preta ou branca possui 1 mm. A altura total do sensor é de 40 mm.

A utilização de uma impressora laser e uma folha de transparência para construção do padrão acima, não foi possível porque o “*toner*” da impressora não permitia uma opacidade suficiente segundo os ensaios iniciais. A solução deste problema de pouca opacidade foi utilizar uma gráfica de “*offset*” e gerar um fotolito como em um método de construção das placas de circuito impresso. Os testes iniciais demonstraram que o fotolito conseguiu atingir 100% de opacidade para esta aplicação. Foi gerado um fotolito com tamanho de 0,56 m por 1 m. Ele foi cortado em 14 tiras de 4 cm por 1 m. Destas tiras cortadas, seis delas foram unidas com cola comum de ciano-acrilato até formar uma grande tira de comprimento total 6 m, que corresponde ao tamanho total do motor linear. Este conjunto de tiras coladas será posicionado verticalmente ao lado do motor para fazer a parte fixa do “*encoder*” linear.

A fixação desta trilha de 6 m ao lado do motor linear precisou levar em consideração a utilização de ambos os veículos, tanto o veículo sobre rodas quanto o veículo com criostatos. A única diferença entre a movimentação dos veículos é que o veículo sobre rodas anda somente na reta adaptada para o seu uso onde existe o motor linear e o veículo com criostatos consegue dar a volta completa na pista. No trabalho de construir a peça que fixará a trilha de fotolito de 6 m foram utilizadas chapas de duas espessuras diferentes do material G10 com 4 mm e 0,5 mm. O material G10 é um composto de fibra de vidro endurecida com resina epóxi. Estas chapas foram cortadas e coladas com cola epóxi para formar a peça conforme a Fig. 17.

Estas peças coladas ao lado do motor linear fixam a tira de fotolito e estão espaçadas de aproximadamente 50 cm uma da outra. A seqüência de montagem desta peça com a tira de fotolito pode ser vista nas Fig. 18 e Fig. 19.

A próxima etapa de desenvolvimento do “*encoder*” é a sua parte ótica. Procurou-se um sistema que fosse insensível às variações da luminosidade ambiente. O laser seria uma ótima escolha pela sua precisão e imunidade, se não fosse o seu custo mais alto que os leds e a maior dificuldade de alinhamento. A utilização de leds passa a ser a melhor escolha. Com o uso de transmissor e de receptor ótico à led não é possível estar totalmente imune à característica de variação de luminosidade. O que melhora esta imunidade são os componentes que tem o comprimento de onda de emissão de luz no espectro do infravermelho. Os componentes escolhidos para esta tarefa foram o

OP233 e o OP593 da empresa Optek. Estes componentes utilizam a tecnologia de Arseneto de Gálio-Alumínio com pico de emissão em 890 nm.

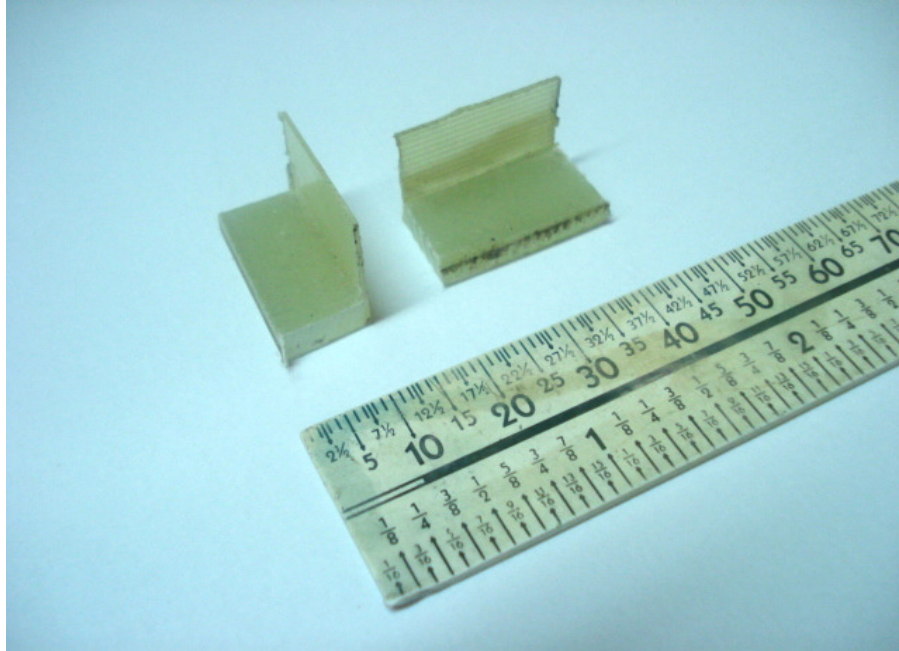


Fig. 17: Peça de fixação da tira do sensor linear ótico.

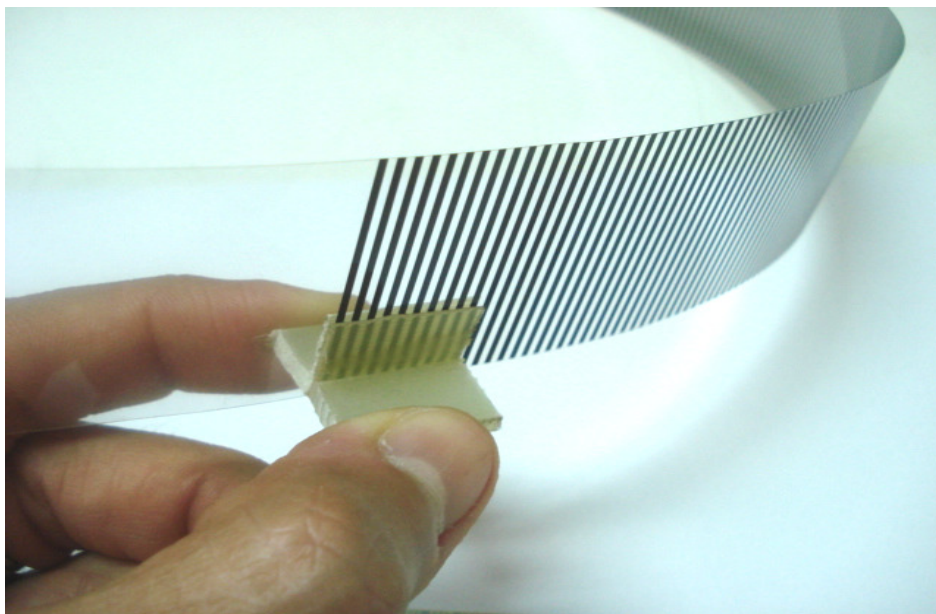


Fig. 18: Fixação da fita do sensor linear ótico.

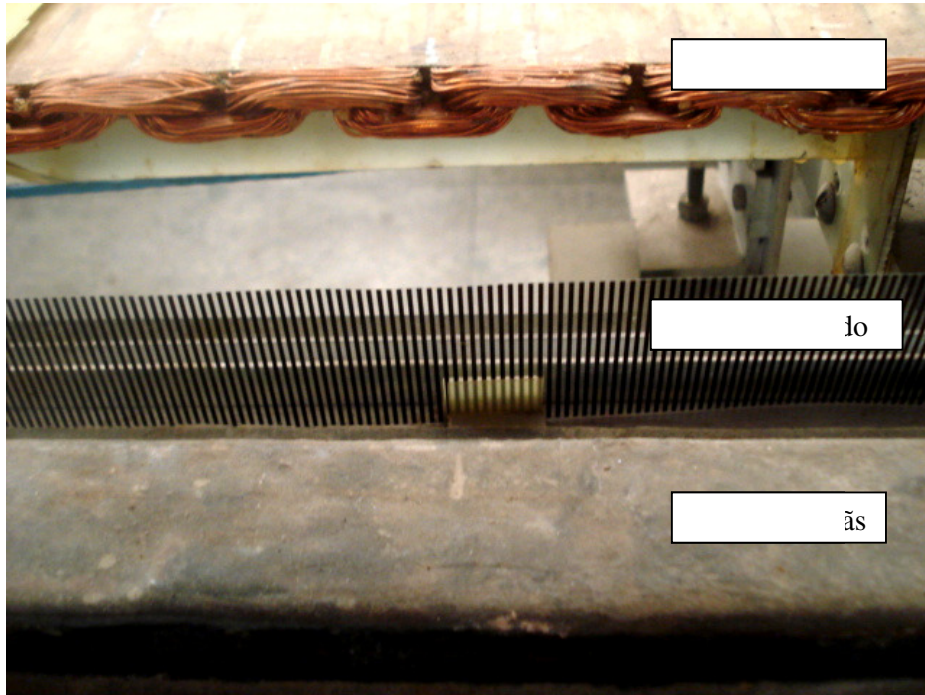


Fig. 19: Posicionamento da fita do sensor instalada ao lado do motor linear e do trilho.

O transmissor e o receptor ótico necessitam de uma montagem física frente a frente para que o feixe entre eles seja interrompido. Para isso, foi empregada uma estrutura de fibra de vidro com epóxi (G10) utilizando um tubo de 8 mm de diâmetro externo e 6 mm de diâmetro interno e uma placa de 5 mm de espessura. Os tubos servem para acondicionar internamente os elementos óticos e a placa serve de sustentação física do conjunto. Uma fina placa de 0,5 mm foi colocada para fechar os tubos à frente dos componentes óticos. Todo este material foi colado com cola epóxi conforme a Fig. 20.

O espaço livre entre os componentes óticos foi escolhido para ser de 10 mm. Isto facilitou o alinhamento e a escolha de uma potência ótica reduzida a ser emitida pelo diodo devido à proximidade. O material G10 tem um comportamento translúcido para o comprimento de onda do infravermelho. Foi necessária a utilização de pequenos pedaços do fotolito preto à frente dos componentes óticos para torná-los opacos. Nestes pedaços de fotolito foi criada uma fenda vertical de 0,8 mm, que é menor do que o espaço de 1 mm na fita de 6 m conforme mostra a Fig. 21, para melhorar a resolução do pulso de luz.

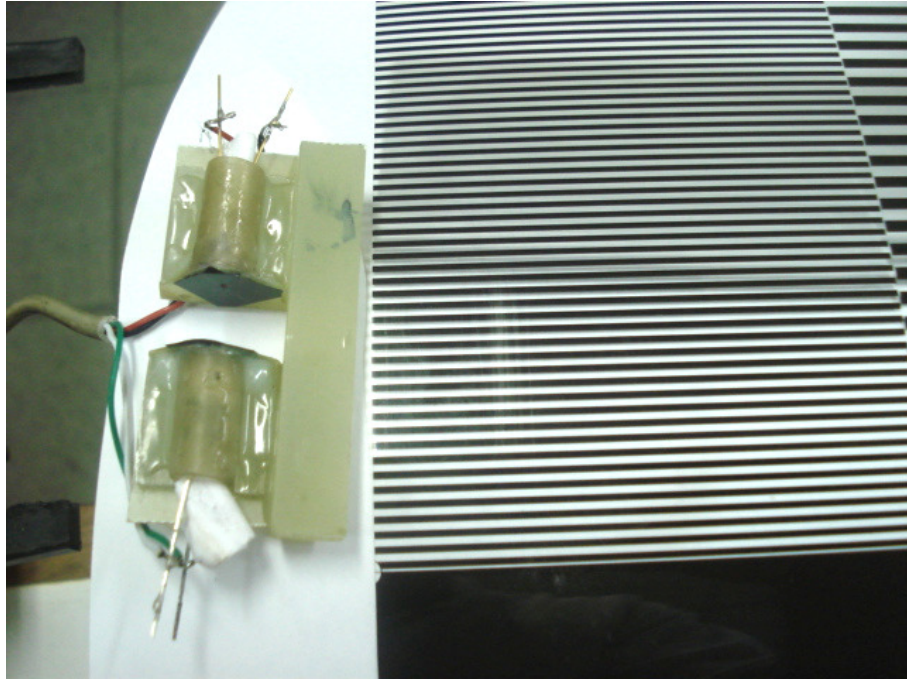


Fig. 20: Montagem mecânica da cabeça ótica.

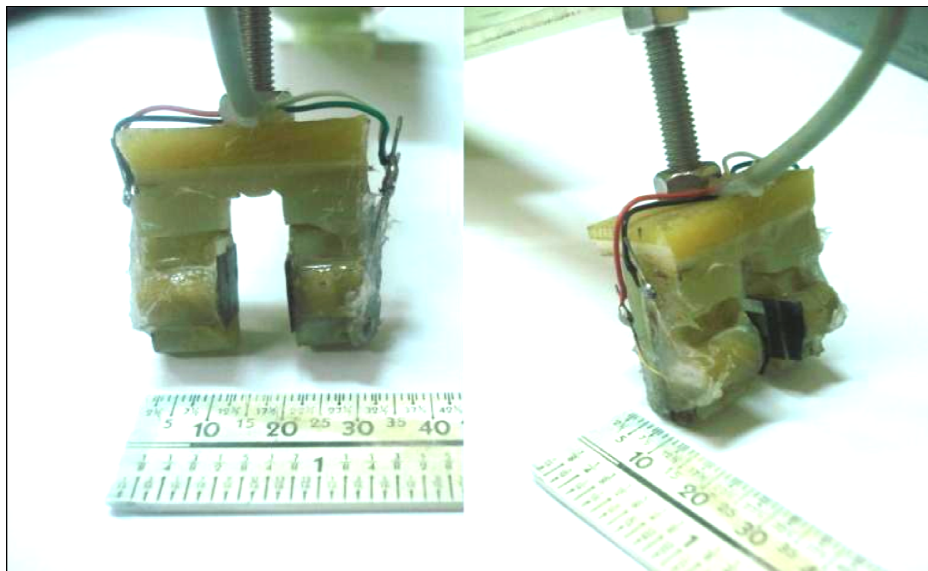


Fig. 21: Montagem final da cabeça ótica.

O condicionamento de sinal deste sensor tem o objetivo de transformar o sinal luminoso pulsante em uma saída digital padrão TTL. A Fig. 22 mostra o circuito com seus valores.

O circuito é alimentado por uma bateria porque precisa estar embarcado no veículo. Um regulador compatibiliza o nível de tensão do circuito para o padrão TTL de 5 Volts. O resistor de 470Ω foi escolhido de forma a garantir uma corrente em torno de 10 mA ao foto-emissor OP233. Em seqüência, o nível de tensão do coletor foi avaliado para a maior excursão possível entre 0 e 5 Volts nas duas condições possíveis: com luz incidente na base e sem luz incidente. O resistor de $40 \text{ k}\Omega$ foi escolhido por apresentar a melhor combinação entre a potência transmitida pelo led e a sensibilidade do foto-detector para a distância que os componentes óticos foram montados. Com isto, garantiu-se a existência de uma boa excursão do sinal de saída dentro do padrão que um sinal TTL exige. O comparador de voltagem LM311 faz a comparação da saída do foto-detector, na forma de onda quadrada entre 0 e 5 Volts, com uma tensão constante de 2,5 Volts. Quando a luz não é bloqueada na cabeça ótica, a saída do LM311 é 5 Volts. Quando a luz é interrompida, a saída é 0 Volts.

A velocidade máxima do veículo sobre o motor está limitada pela frequência máxima aplicada ao motor linear. MOREIRA em [3] especifica no projeto do motor linear esta frequência máxima em 24 Hz assim, pela Eq. 2-1 tem-se a velocidade máxima do veículo em 183 cm/s. Nesta velocidade máxima cada espaço de 1 mm da fita de interrupção de luz é percorrido em 5,46 ms. O valor do tempo de resposta do LM311 informado pelo manual é de 200 ns. Comparando estes dois últimos valores pode-se observar que o amplificador operacional é muito mais rápido que a variação da informação de luz na sua entrada.

Neste ponto, faz-se necessário enviar esta informação ao CFW-09 para o cálculo da velocidade atual. A solução por fio foi descartada porque o veículo deveria circular em toda a pista e sem obstáculos. Neste caso, a transmissão via rádio foi o método escolhido pela liberdade dada ao veículo em trafegar em toda a pista. Foi escolhido um módulo de transmissão e recepção da empresa Linx. Este módulo trabalha na faixa de frequência de 433 MHz para transmissão de dados e é apropriado para fazer comunicação serial RS-232 via rádio podendo trabalhar em velocidades de transmissão até 10000 bits por segundo. Segundo o anexo da resolução 365 de 10 de

maio de 2004 da Agência Nacional de Telecomunicações é permitido o uso da frequência de 433 MHz para transmissão em áreas internas de edificações com potência de transmissão máxima de 10 mW. Para uma velocidade de transmissão de 10000 bits por segundo, cada bit é transmitido em 0,1 ms. Observa-se que este tempo é menor do que os 5,46 ms necessários para transmitir uma mudança da fita de interrupção luminosa na velocidade máxima do veículo. Isto torna este par Tx/Rx compatível com a utilização da transmissão luminosa para o CFW-09.

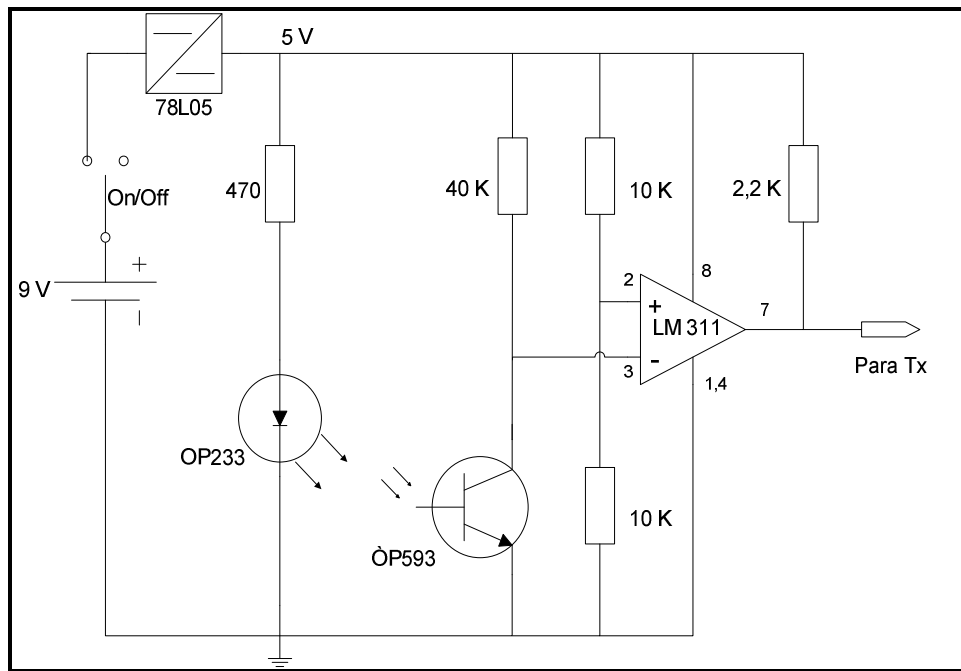


Fig. 22: Esquemático do circuito de condicionamento da cabeça ótica.

Pode-se observar pelo circuito da Fig. 23 que não existe nenhum processador para dar inteligência ao veículo ou gerar o padrão de comunicação RS-232. Mesmo sem utilizar o padrão RS-232, é possível utilizar a função de transmissão simples dos níveis lógicos “um” e “zero” entre o transmissor e o receptor. A solução utilizada, neste caso, foi transmitir para o CFW-09 a informação de interrupção de luz da forma como ela é gerada e deixar o CFW-09 fazer os cálculos que forem necessários simulando uma transmissão de bits comum. O sincronismo entre os módulos é

automático quando os módulos são ligados simultaneamente e mantém-se o transmissor transmitindo o bit lógico “um” por 300 ms segundo o manual de especificações. Nada impede que, no futuro, seja possível colocar um microcontrolador no circuito acima e propiciar um tratamento diferenciado ao sinal de interrupção de luz enviando o dado de velocidade com algum tratamento para o CFW-09.



Fig. 23: Módulo receptor (RXM) da empresa Linx.

Como o módulo transmissor Linx foi desenvolvido para operar com um padrão de comunicação RS-232, ele apresenta problemas para transmitir um nível lógico “zero” contínuo e maior que 30 ms, resultando em uma saída pulsada aleatória e sem nenhum controle. Em um padrão tradicional de comunicação RS-232, existe um estado de descanso do sinal em um nível lógico “um”. O nível lógico “zero” aparece somente quando precisa ser transmitido e por curto espaço de tempo. No caso do circuito da Fig. 22, eventualmente, é possível que o estado lógico “zero” fique contínuo na cabeça ótica, ou seja, quando ela para sobre uma parte escura da marcação do sensor. O problema desta saída pulsada aleatória do transmissor em caso de um nível lógico “zero” contínuo foi resolvido através de filtragem por software no CFW-09. Por causa desta característica, as medições de velocidade só ocorrem acima de um patamar mínimo para evitar erros de leitura inconsistentes de velocidade quando o veículo está parado em uma área escura da fita do sensor. A forma de inibir estas medidas erráticas

se dá por inibição da interrupção que trata da medição de velocidade. Quando a distância percorrida pelo veículo de 1 mm é realizada em um tempo menor que 30 ms, ou seja, a sua velocidade é maior do que 3,3 cm/s, a interrupção é novamente habilitada.

Um possível erro de transmissão ocasionado pelo efeito Doppler relacionado à movimentação do veículo não seria possível. A transmissão em rádio-freqüência tem velocidade de onda próxima à velocidade da luz, ou seja, da ordem de 10^8 m/s e a velocidade do veículo está na casa de 10^{-2} m/s. Como o efeito Doppler está associado a velocidade relativa entre a fonte e o receptor, o veículo sempre parecerá parado em relação a transmissão de rádio-freqüência. A Fig. 24 mostra a montagem final do conjunto do sensor ótico, da placa de condicionamento de sinal e do módulo transmissor (TXM) Linx.

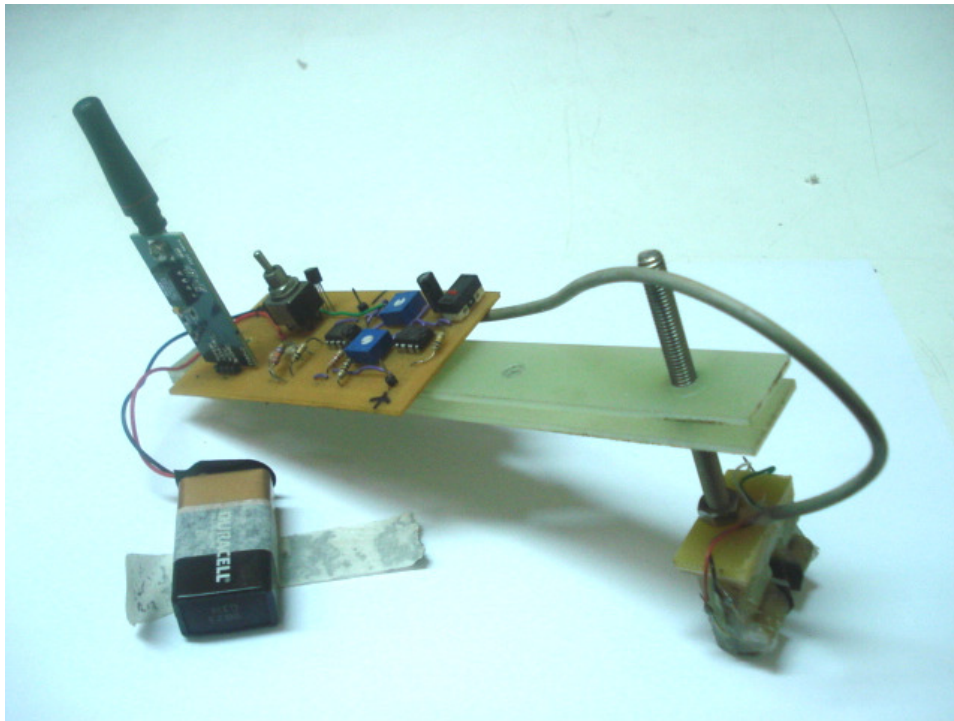


Fig. 24: Montagem do conjunto fixado nos veículos. Apresenta a cabeça ótica, o circuito de condicionamento e o módulo transmissor (TXM) da Linx.

O módulo receptor da Linx encontra-se ligado ao CFW-09 e recebe diretamente do transmissor os níveis lógicos correspondentes às interrupções luminosas conforme a Fig. 25. Os dois componentes que podem ser vistos a mais na placa, são um regulador de tensão 78L05, para transformar os 24 Volts disponíveis no CFW-09 em 5 Volts para o receptor, e o integrado CMOS HCF4093, que possui quatro portas de 2 entradas NAND “*Schmidt-trigger*”. Utilizando-se somente uma de suas 4 portas, este componente garante que a saída do receptor seja TTL para a entrada de interrupção do CFW-09.

Dentro do CFW-09, este sinal é tratado pelo pino de interrupção externa do processador IRQ0, acionado a cada transição negativa, que está diretamente associado a uma rotina de tratamento de interrupção de software. Duas transições negativas consecutivas correspondem a 2 mm na fita de interrupção luminosa. Esta entrada IRQ0 está no pino 4 do conector XC3 da placa de controle do CFW-09. A rotina de interrupção, assim que é chamada pelo pino IRQ0, lê o valor do registrador de contagem do timer interno do processador (*timer 1*). Cada incremento de contagem do contador *timer 1* equivale a um período transcorrido de 559,345 ns. Desta maneira é sabido o tempo que transcorreu entre duas interrupções luminosas consecutivas do sensor. Como o espaço percorrido entre as duas interrupções consecutivas é constante (2 mm), é possível calcular a velocidade do veículo protótipo sobre o sensor. Para o valor máximo (65535 ou 36,656 ms) de contagem do *timer 1* tem-se uma velocidade mínima do veículo de 5,45 cm/s. Abaixo desta velocidade aconteceria um “*overflow*” do *timer* que não será tratado. Abaixo deste valor a leitura de velocidade pelo *timer* é inibida. Este valor de velocidade foi estabelecido como o menor valor que o sistema processaria.

Dentro da medida do passo polar deste motor linear, que é de 39 mm, tem-se 39 listas brancas e pretas. As interrupções para o microprocessador ocorrem a cada conjunto de duas listas consecutivas. Isto dá uma resolução aproximada de vinte interrupções por passo polar. Esta quantidade de interrupções é baixa em comparação com os “*encoders*” do mercado que podem apresentar resoluções de mais de 500 por passo polar embora não inviabilize um controle de velocidade preciso. Devido a baixa resolução do sensor e com a velocidade do veículo até 180 cm/s, o método recomendável para medir velocidade com precisão é manter o espaço fixo e medir o

tempo necessário para percorrer este espaço. O método de manter o tempo de leitura fixo e medir o espaço percorrido reduziria a resolução em relação ao método anterior neste caso embora seja o método preferencial para médias e altas velocidades.



Fig. 25: Módulo receptor (RXM) acoplado ao hardware do inversor CFW-09.

A descrição do hardware utilizado para fazer a sincronização está completa. Todo o software a ser desenvolvido é baseado nos sinais gerados por este hardware. O inversor, através do seu software desenvolvido, faz a geração das tensões senoidais através do PWM para o motor linear, ou seja, a onda magnética que impulsiona o veículo. A cabeça óptica instalada no veículo em movimento lê a variação luminosa no “*encoder*” linear óptico que, por sua vez, transmite via rádio-freqüência os pulsos de luz para o inversor calcular a velocidade. Todo este trabalho é supervisionado remotamente por uma interface homem-máquina. O software interno do inversor e a interface homem-máquina desenvolvida especialmente para esta monitoração serão discutidos nos próximos itens.

4.4. Software desenvolvido

O desenvolvimento de software para esta aplicação foi baseado no hardware conhecido do CFW-09. Este hardware é dividido em duas placas: a placa da CPU, onde é realizada a programação e o controle dos sinais e a placa de eletrônica de potência que faz interface e gera as correntes trifásicas para o motor linear. Como já mostrado anteriormente, o software original da placa de CPU foi totalmente apagado para abrigar a funcionalidades novas que são necessárias para operar com o motor linear síncrono do LASUP.

O CFW-09 possui a sua própria interface homem-máquina funcionando com o software original. À medida que este software foi totalmente modificado, não é mais possível utilizar esta interface. Devido às novas condições de visualização e de interação dificultadas com o novo software, foi desenvolvido também outro software para funcionar dentro de um computador tipo PC e fazer a nova interface homem-máquina.

As funcionalidades implantadas no software interno, o software da interface homem-máquina e como estes softwares se relacionam estão descritos nos próximos itens.

4.4.1. Software interno ao CFW-09

O processador interno do CFW-09 é o chip SH7044 da Renesas. O ambiente de programação recomendado para trabalhar com ele é o programa “*High-performance Embedded Workshop - HEW*”, também da Renesas, que apresenta uma interface de programação em linguagem “C” com um editor, compilador, programador via interface serial e um conjunto de diretivas e constantes pré-definidas para trabalhar com este processador.

Os seguintes módulos em C fazem parte deste projeto:

- ProjetoLeviMag.c – Inicializa variáveis e faz o loop principal do programa.
- Hwsetup.c – Configura o processador para funcionar com o hardware da placa em que está inserido no inversor CFW-09.
- Cfw09_serial.c – Funções de envio e recepção de dados pela serial.
- Initsct.c – Inicialização interna do processador.
- Vecttbl.c – Tabela de vetores de interrupção do processador.
- Intprg.c – Mapeamento das rotinas de interrupção.
- Velcontrol.c – Trata a interrupção do sensor linear de velocidade.
- Sencos.c – Cálculo estimado de senos e cossenos.
- Pwmcontrol.c – Controla a forma de onda de saída para o motor linear.

O módulo “*ProjetoLeviMag.c*” tem a responsabilidade de iniciar todas as variáveis deste programa. Contém a rotina principal “*main()*” e também faz toda a parte de comunicação serial com a interface homem-máquina recebendo comandos e alterando a forma de operação do inversor através da interface serial. Recebe as configurações iniciais de operação do CFW-09 e também pode enviar serialmente algumas variáveis internas para serem representadas graficamente na interface homem-máquina.

O módulo “*Hwsetup.c*” configura o microprocessador SH7044 para operar segundo o hardware do inversor CFW-09 que incluem a placa de controle e a placa de potência. As portas do processador de I/O recebem sua designação de funcionar como entrada ou saída e a interface serial é programada com o padrão de comunicação de “*115200, 8, n, 1*”. Os dois conversores A/D começam a operar coletando os dados internos de tensão e corrente que podem ser enviados para a interface homem-máquina. Os contadores 2, 3 e 4, responsáveis por gerar o sinal PWM trifásico de saída, são inicializados junto com o timer 1 que se responsabiliza por medir a velocidade enviada pelo sensor linear de velocidade. Os dois canais de conversores D/A são inicializados permitindo uma observação externa, através de multímetro ou osciloscópio, de até duas variáveis de referência internas do programa que está rodando no inversor através dos pinos 17, 18, 19 e 20 do conector XC1 da placa de

controle. Este módulo é chamado logo após a inicialização da memória do processador e entrega o processamento para a função “*main()*”.

O módulo “*Cfw-09_serial.c*” possui o conjunto de rotinas que lidam com a recepção e a transmissão serial de informações como bytes e pacotes de dados entre a interface homem-máquina e o software do inversor.

Os módulos “*Initsct.c*” e “*Vecttbl.c*” são gerados pela ferramenta de compilação HEW da Renesas e devem ser mantidos inalterados durante o processo de desenvolvimento. Eles tratam da inicialização da memória do processador e do mapeamento da tabela de vetores de interrupções. As prioridades de interrupções estão definidas no módulo “*Hwsetup.c*”.

O módulo “*Intprg.c*” é o responsável pelo tratamento das interrupções geradas no processador e chamada de suas respectivas rotinas de tratamento. De todas as interrupções que estão disponíveis no processador, quatro delas são as mais relevantes para esta dissertação que são: IRQ0, RXI1, TGI2A e TGI2B. Como já foi descrito anteriormente, IRQ0 está associada à leitura de velocidade do sensor ótico linear através do Timer1 e RXI1 está associada à recepção de comandos enviados pela interface homem-máquina através interface serial. As interrupções TGI2A e TGI2B, que ocorrem alternadamente, provenientes do Timer 2, são as responsáveis pela temporização da chamada da rotina de controle do inversor “*PwmControl.c*” a cada 100µs.

O módulo “*SenCos.c*” calcula os valores de um seno ou cosseno a partir de um ângulo definido de entrada. Esta rotina é uma otimização por interpolação do cálculo de senos para uso na formação das senóides do PWM, tornando seu cálculo mais rápido e permitindo, portanto, seu uso dentro da rotina de interrupção “*PwmControl.c*”.

O módulo “*PwmControl.c*”, chamado a cada 100 µs, é também responsável por checar se as variáveis de tensão do barramento DC, temperatura de operação do dissipador e duas corrente de saída do PWM estão dentro dos parâmetros de segurança de operação previamente programados. Neste momento inicial, o veículo encontra-se parado no começo do motor linear. Logo que este módulo recebe o comando de iniciar o PWM de saída, ele inicia uma fase de sincronização do veículo

sobre o motor linear. Durante esta fase de sincronização é aplicado, através do PWM de saída, a tensão de 100% da variável de referência em uma das fases e 50% nas outras duas fases. Isto obriga que o veículo sincronize em uma posição onde o vetor tensão é conhecido. Após esta fase de sincronização o módulo inicia a geração das três senóides de referência, defasadas de 120 graus, que servem de base para o PWM de saída. Desta forma, o veículo começa a se movimentar e ser acelerado sobre o motor linear e o trilho. A Fig. 26 mostra as variáveis de referência de duas fases no início da movimentação do veículo após a sincronização inicial.

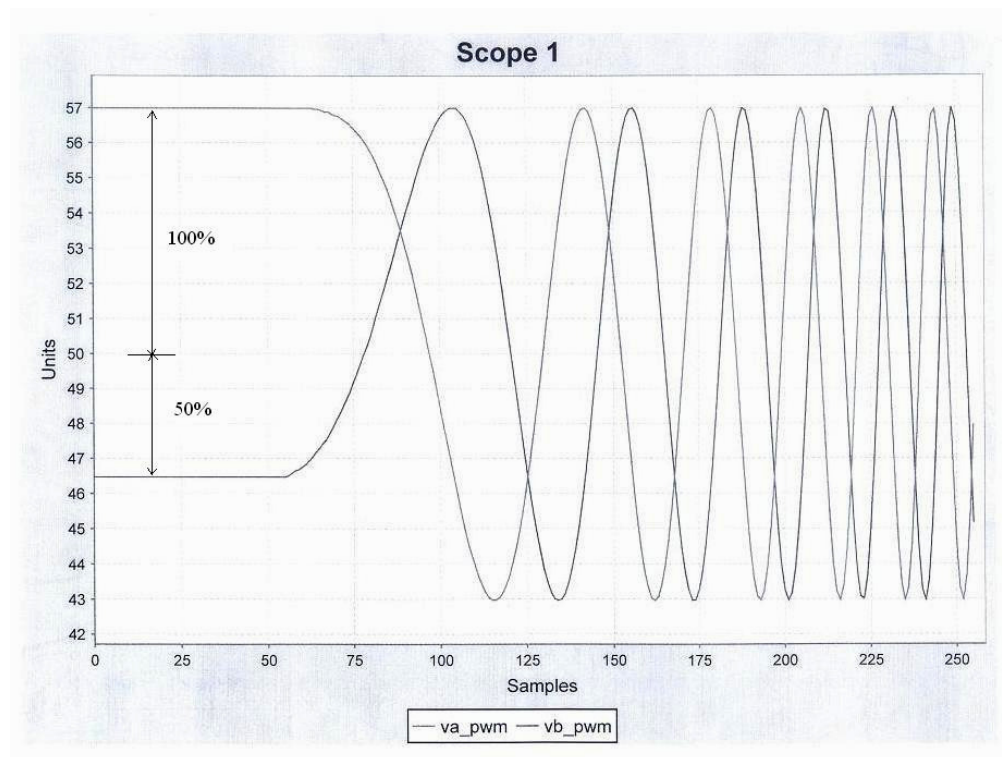


Fig. 26: Finalização do sincronismo e início da movimentação do veículo.

A posição que o veículo estabiliza após este período de sincronização se repete sobre o motor linear a cada dois passos polares, ou seja, 78 mm. Desta maneira é possível saber qual a combinação de tensões que inicialmente devem ser aplicadas no motor linear no exato momento em que ele entra novamente para realizar o sincronismo. Desta forma foi solucionado o problema de descobrir a fase inicial do sinal de referência na entrada do veículo sobre o motor linear. Esta fase se repete em toda reentrada.

Este módulo provê o controle da aceleração do veículo na partida e na reentrada na forma de degraus até a velocidade final de escape do motor linear. O conversor analógico-digital interno faz a aquisição das variáveis de temperatura, tensão e corrente para posterior checagem de segurança já mencionada. Estes dados podem ser armazenados e enviados para a interface homem-máquina para observação.

A forma de geração das senóides é feita através de uma variável de referência de ângulo que pode assumir valores entre zero e 360 graus. Outra variável com função de incrementar o ângulo é constantemente adicionada a variável anterior. Quanto mais alta a frequência maior o valor da variável de incremento. A função *SenCos* é invocada para verificar o valor atualizado do seno. Este valor de seno atualizado é corrigido para a amplitude de saída programada e é disponibilizado para a variável de referência responsável pela geração da forma de onda senoidal de saída através das portas de saída PWM do inversor. A defasagem entre as três fases é gerada adicionando-se uma constante equivalente ao ângulo de 120 graus às outras variáveis de referência das outras fases.

O apêndice A apresenta os diagramas de blocos de cada um destes módulos.

4.4.2. Interface Homem-máquina

A decisão de construir uma interface homem-máquina baseou-se na necessidade de operar o novo software interno do CFW-09 remotamente. A opção escolhida para a linguagem de programação foi o Java porque é uma linguagem com disponibilidade de bibliotecas que podem ser utilizadas livremente e também porque é uma linguagem em que o mesmo código pode ser levado facilmente para qualquer plataforma de sistema operacional.

O ambiente escolhido para este desenvolvimento em Java foi o NETBEANS da empresa Sun Microsystems. Para este ambiente funcionar, é necessário que já esteja instalado o Java Development Toolkit (JDK) mais recente, também da empresa Sun. Este ambiente permite o desenvolvimento completo da interface gráfica e do comportamento que esta interface deve ter como resposta aos comandos, alterar os valores de campos ou fazer seleções de opções na interface.

Para o desenvolvimento nesta dissertação foram utilizadas três bibliotecas livres para realizar funções específicas. Uma biblioteca para fazer gráficos, uma de suporte e uma de comunicação serial. A biblioteca gráfica se chama “*JFreeChart*” e permite uma grande variedade de formatos gráficos. A biblioteca de suporte a esta biblioteca gráfica se chama “*JCommons*”. Estas duas bibliotecas estão disponíveis em “www.jfree.org”. A biblioteca de comunicação serial se chama “*RxTx*” e poder ser encontrada em “www.rxtx.org”.

Os seguintes módulos em Java fazem parte deste projeto:

- *DebugDSPApp.java* – Possui a função “*main()*” que executa a classe principal do programa.
- *DebugDSPAbout.java* – Uma janela falando de alguns detalhes sobre o programa.
- *Dados.java* – Apresenta o formato de dados recebidos serialmente pelo software do CFW-09 e utilizados nos gráficos pelo programa em Java.
- *PlotaXY.java* – Faz os desenhos dos gráficos.
- *SerialComLeitura.java* – Realiza todo o tratamento da interface serial e comunicação entre o computador e o inversor.
- *DebugDSPView.java* – Esta é a janela e a interface principal do programa e seu comportamento.

O módulo *DebugDSPApp.java* é o módulo onde se encontra a função *main()* e que não sofre nenhuma alteração durante todo o desenvolvimento. Esta função *main()* é a responsável por iniciar a execução da classe principal do programa.

O módulo *DebugDSPAbout.java* faz surgir uma janela informativa falando sobre o programa.

O módulo *Dados.java* apresenta a classe de dados que é utilizada nos gráficos desta aplicação. Estes dados são armazenados, após um tratamento, no formato de uma série e fica disponível para que a classe *PlotaXY* os utilize e faça os desenhos das séries em cada um dos gráficos. Os métodos desta classe encontram-se descritos resumidamente abaixo:

- Dados () – Construtor 1.
- Dados (label, formatoQ, gain, pontosQ [], invert) – Construtor 2.
- addDados (label, formatoQ, gain, pontosQ []) – Adiciona uma série.
- clearPontos() – Elimina a série inteira.
- getFormatoQ () – Retorna o formatoQ dos pontos da série.
- getLabel () – Retorna o título dos pontos associados.
- getXYSeries () – Retorna a série associada ao objeto.
- setFormatoQ (formatoQ) – Indica o formatoQ dos pontos da série.
- setLabel (label) – Indica o título dos pontos associados.
- setXYSeries (Serie) – Atualiza a série.
- setPontos (pontosQ []) – Adiciona novos pontos a uma nova série.

O módulo *PlotaXY.java* possui a classe que faz a ligação entre os dados e os gráficos. Ele recebe os dados no formato de uma série e faz a preparação para que os pontos sejam desenhados nos gráficos. Os métodos desta classe encontram-se descritos resumidamente abaixo:

- PlotaXY (titulo, xlabel, ylabel, dados) – Construtor.
- AddSeries (Dados) – Adiciona seqüência de pontos a um gráfico.
- RemoveSeries (Dados) – Remove uma série de um gráfico.
- getChart() – Retorna o gráfico inteiro.

O módulo *SerialComLeitura.java* possui a classe responsável por todo o gerenciamento da comunicação serial. Desde a abertura da porta de comunicação até o seu fechamento, passando pela leitura de dados que chegam do canal serial. Os métodos desta classe encontram-se descritos resumidamente abaixo:

- SerialComLeitura(Porta, Baudrate, Timeout) – Construtor.
- OpenComm () – Abre a porta serial com os dados do construtor.
- CloseComm () – Libera a porta serial.
- ReceiveByte () – Retorna um byte da porta serial.
- SendByte (Byte) – Envia um byte pela porta serial.
- SendString (String) – Envia uma string pela porta serial.
- LerEntrada () – Lê os dados que o inversor envia para montar os gráficos.

- `getFormatoQ ()` – Retorna o formatoQ dos pontos do gráfico.
- `getLabel ()` – Retorna o título dos pontos associados.
- `getPontos ()` – Retorna a matriz de pontos de dados para os gráficos lidos pela serial.
- `getPontosVel ()` – Retorna o conjunto de valores de velocidade lidos pelo inversor.
- `readVelocityStart ()` – Instala uma tarefa de leitura automática de velocidade.
- `readVelocity ()` – Recebe os últimos dados de velocidade que chegaram e os coloca no gráfico.
- `SerialEvent (Event)` – Quando existe um dado disponível na serial para ser lido, lê este dado e o armazena em um buffer.

O módulo *DebugDSPView.java* possui a classe com a janela principal da aplicação e os métodos que tratam do comportamento da interface. Os métodos desta classe encontram-se descritos resumidamente abaixo:

- `DebugDSPView(SingleFrameApplication)` – Construtor.
- `atualizaCanal(Canal)` – Monta as matrizes de dados para os gráficos.
- `jButtonAtualizaActionPerformed (Evento)` – Atualiza e refaz os gráficos.
- `jButtonCheckFreqActionPerformed (Evento)` – Lê a velocidade que o inversor envia do veículo e desenha em um gráfico.
- `jButtonClearGraphicsActionPerformed (Evento)` – Apaga os gráficos.
- `jButtonConectarActionPerformed (Evento)` – Conecta serialmente este programa ao inversor.
- `jButtonConfigActionPerformed (Evento)` – Envia configurações básicas de funcionamento do inversor como amplitude, frequência, direção e tipos de gráficos selecionados.
- `jButtonConfigAmplActionPerformed (Evento)` – Envia configuração de amplitude a ser gerada e direção isoladamente.
- `jButtonConfigFreqActionPerformed (Evento)` – Envia configuração de frequência isoladamente.

- `jButtonLigaPWMActionPerformed` (Evento) – Envia comando para ligar ou desligar o PWM e iniciar ou cessar a geração de frequência do motor linear para movimentar o veículo.
- `jCheckBoxCanal1ActionPerformed` (Evento) – Habilita o canal 1 do gráfico.
- `jCheckBoxCanal2ActionPerformed` (Evento) – Habilita o canal 2 do gráfico.
- `jCheckBoxCanal3ActionPerformed` (Evento) – Habilita o canal 3 do gráfico.
- `jCheckBoxCanal4ActionPerformed` (Evento) – Habilita o canal 4 do gráfico.
- `jComboBoxSelecionaCanal1ActionPerformed` (Evento) – Seleciona o tipo de informação do canal 1.
- `jComboBoxSelecionaCanal2ActionPerformed` (Evento) – Seleciona o tipo de informação do canal 2.
- `jComboBoxSelecionaCanal3ActionPerformed` (Evento) – Seleciona o tipo de informação do canal 3.
- `jComboBoxSelecionaCanal4ActionPerformed` (Evento) – Seleciona o tipo de informação do canal 4.
- `jRadioButton1FwdDirActionPerformed` (Evento) – Seleciona a direção de movimentação do veículo a frente.
- `jRadioButton1RewrActionPerformed` (Evento) – Seleciona a direção de movimentação do veículo a ré
- `jTextField2ActionPerformed` (Evento) – Valor de tensão que é enviado ao inversor para ser gerada no motor linear.
- `jTextField3ChangeFreqActionPerformed` (Evento) – Valor da frequência final enviada ao inversor para ser gerada no motor linear.
- `jTextField5ChangeVelActionPerformed` (Evento) – Valor de velocidade a ser alcançado pelo veículo.

A Fig. 27 mostra como é o aspecto geral da janela desta interface. Esta interface apresenta dois gráficos onde é possível visualizar até quatro variáveis diferentes. Duas variáveis no gráfico superior e duas variáveis no gráfico inferior. Com a seleção

“Canal 1” marcada e associada à combinação com a variável ao lado, faz o inversor enviar as últimas aquisições desta variável e mostrá-la no canal 1 do gráfico superior. O mesmo acontece para as seleções de “Canal 2”, “Canal 3”, “Canal 4”. Os canais três e quatro são direcionados para o gráfico inferior.

A Fig. 28 mostra com detalhes os botões e controles postos lado a lado. Da esquerda para direita, pode-se observar:

- Botão “Connect” – Abre a comunicação serial com o inversor. Nenhuma operação funciona sem esta conexão. O identificador acima do botão se torna vermelho.
- Botão PWM – Liga o PWM trifásico sobre o motor. O indicador acima do botão se torna vermelho.
- Scope – O “Sampler” reduz a frequência de amostragem dos gráficos. O botão “Config” permite que seja enviado pela interface serial a amplitude, frequência, direção e as variáveis a serem adquiridas pelos gráficos. O botão “Transfer” pede ao inversor os últimos dados adquiridos. O botão “Clear Graphics” apaga os últimos gráficos desenhados.
- Amplitude (volts) – Mostra o valor de tensão de pico do PWM de saída que será programado no inversor assim que for pressionado o botão “Config” logo abaixo. O identificador abaixo do botão informa o valor esperado da corrente de pico sobre o motor.
- Frequência – Informa a frequência final que o inversor deve atingir. Esta frequência final está associada a uma velocidade final do veículo que está informada logo abaixo.
- Botão “Check” – Captura os dados de velocidade transmitidos serialmente pelo inversor.
- Direction – Indica se o veículo será acelerado para frente ou para trás.

4.5. Conclusão

A interface de programação HEW da Renesas, em linguagem “C”, que foi utilizada na programação do software interno do CFW-09, permitiu uma reprogramação mais rápida, eficiente e simplificada.

A utilização da linguagem Java na interface homem-máquina, além de ser de uso gratuito, permite a sua utilização em qualquer plataforma.

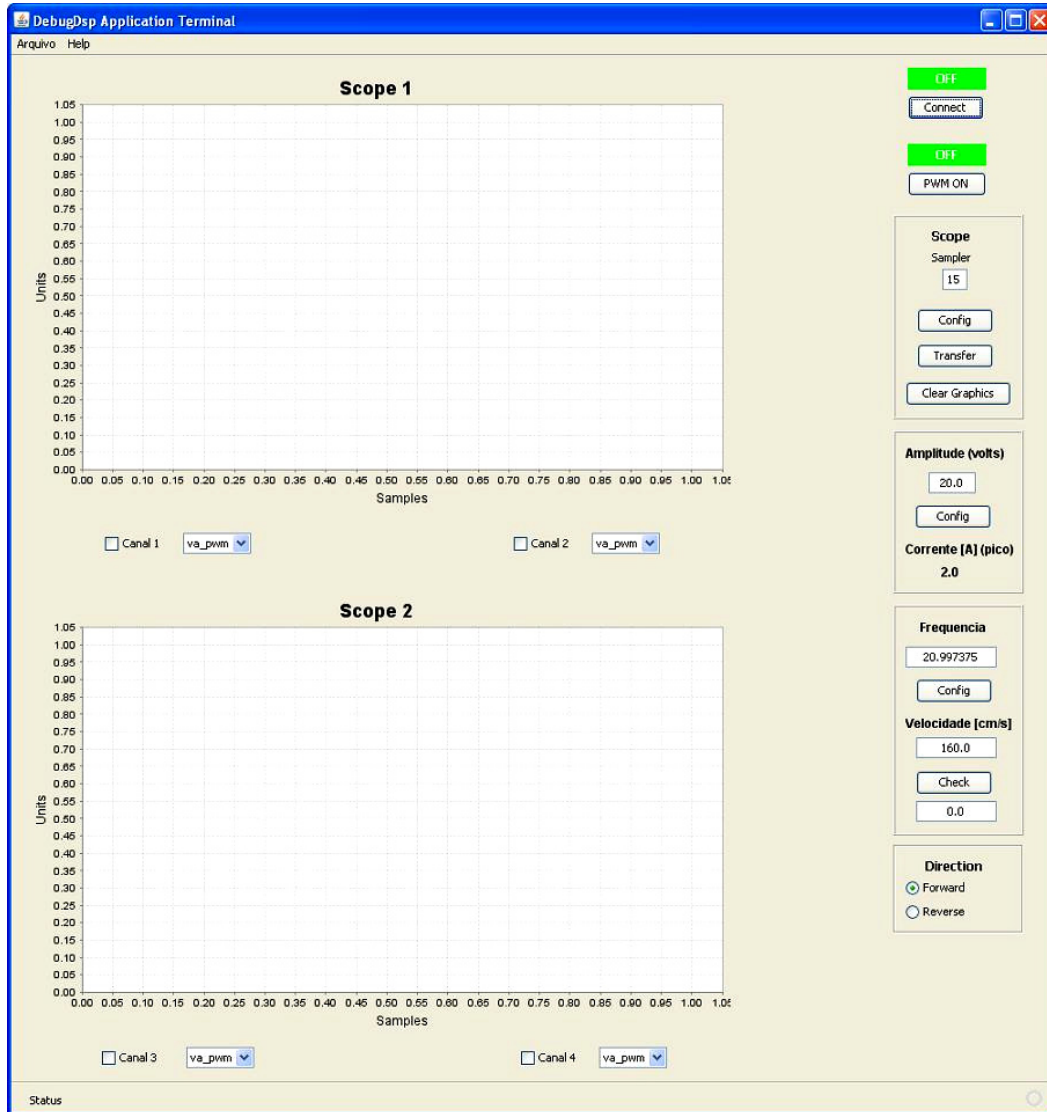


Fig. 27: Aspecto geral da janela da Interface homem-máquina.

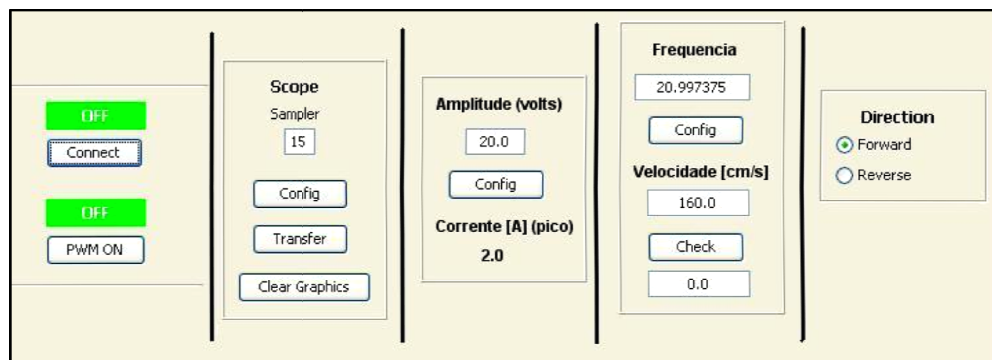


Fig. 28: Detalhe dos controles da interface.

5. Resultados experimentais

A metodologia empregada para estudar o processo de sincronismo da entrada do veículo no motor linear será baseada, inicialmente, em testes de partida do veículo no motor para garantir uma velocidade mínima de escape. Com esta velocidade mínima de escape ao final do motor linear é garantido que o veículo percorra todo o restante do trilho e faça a reentrada do veículo no início do motor novamente. A partida do veículo sobre o motor linear será realizada através de patamares para garantir uma aceleração suave e gradual até a velocidade final e sem o risco de perder o sincronismo. A seguir, será observada a velocidade de reentrada do veículo sobre o motor linear e verificada a frequência gerada pelo inversor para ver se são coerentes garantindo assim o sincronismo na reentrada.

A fase inicial da senóide aplicada pelo inversor ao motor na reentrada foi pré-ajustada de modo que, no momento em que o inversor começa a aplicar a onda senoidal através do PWM, o veículo está passando exatamente na extremidade do motor linear permitindo uma reentrada suave. Esta fase inicial se repete a cada dois passos polares no motor linear. Durante a partida do veículo, quando a velocidade é zero, também é utilizada a fase inicial através da aplicação de 100% da variável de referência de tensão na fase U do motor e 50% da mesma variável nas outras duas fases V e W. Isto garante que o veículo sempre acelera a partir de uma fase inicial conhecida.

Para realizar este posicionamento inicial é aplicado um conjunto de tensões constantes nas três fases do motor.

A velocidade do veículo, enquanto estiver sobre o motor linear, será monitorada pela interface homem-máquina que receberá os dados vindos serialmente do inversor, que por sua vez, recebe por rádio-frequência os pulsos provenientes do sensor ótico instalado no veículo. A observação da variável velocidade será fundamental para analisar a reentrada do veículo e calcular a frequência correta de acionamento pelo inversor.

O primeiro ensaio realizado no sistema veículo-motor foi determinar a mínima tensão a ser aplicada no motor linear para que o veículo se movimente por toda a extensão continuamente e sem interrupções. ROBERTO em [4] estabelece esta tensão

em 88 volts para os ensaios do veículo sobre rodas. Como o veículo com criostatos apresenta uma inércia maior devido ao seu peso, espera-se que este valor de tensão seja maior também. Outro problema constatado e que precisa ser levado em consideração, é o alinhamento do motor linear em relação ao trilho que não está perfeito. Isto implica em uma variação do “*gap*” entre o primário e o secundário no veículo fazendo variar o torque do motor.

O torque deste motor linear é proporcional ao fluxo magnético gerado no primário. Uma forma de manter este fluxo constante ou seja, o torque constante, é fazer a razão entre a tensão e a frequência aplicadas constante. Para valores de frequência mais próximos de zero, esta curva perde esta proporcionalidade devido à influência da resistência do enrolamento que passa a ter um valor significativo comparativamente à sua reatância. Para se manter o mesmo torque, é necessário aplicar um valor maior de tensão. O pior caso para este motor linear é portanto a movimentação do veículo na partida pois isto corresponde a uma baixa frequência de acionamento e necessariamente a um aumento da tensão a ser aplicada para se manter o mesmo torque do motor.

A velocidade escolhida para realizar este teste foi propositalmente baixa. Foi escolhida uma faixa de velocidade entre 10 e 15 cm/s durante todo o percurso do veículo sobre o motor. Para valores de velocidade menores do que 5,45 cm/s, a interrupção do processador é desabilitada conforme já explicado anteriormente no capítulo 4.

Foi realizada uma seqüência de experimentos variando-se a tensão de pico aplicada ao motor linear durante a partida do veículo com criostato a partir da velocidade zero. O menor valor de tensão que permitiu a movimentação do veículo em todo o motor linear e sem perda de sincronismo foi 100 Volts. Este valor de tensão foi utilizado em todo o percurso do veículo sobre o motor linear. Na velocidade máxima do veículo de 183 cm/s o inversor sintetizará uma frequência máxima de 24 Hz. Dividindo-se esta tensão pela frequência máxima é obtido um ganho de aproximadamente 4 na velocidade máxima do veículo. Este ganho é mais do que o necessário para manter o veículo em movimento na velocidade final. Para velocidades muito baixas, da ordem de 1 cm/s, é necessário aplicar uma frequência de 0,13 Hz. Para baixas velocidades o ganho é superior a 150. Esta será a lei de controle do

sistema onde a tensão se manterá constante e a frequência será variável. A Fig. 29 mostra o resultado lido pelo sensor ótico e transmitido para a interface homem-máquina. Visualmente se observa que o valor médio de velocidade encontra-se dentro da faixa esperada. As grandes variações devem-se a ruídos na transmissão serial do dado do inversor para a interface homem-máquina.

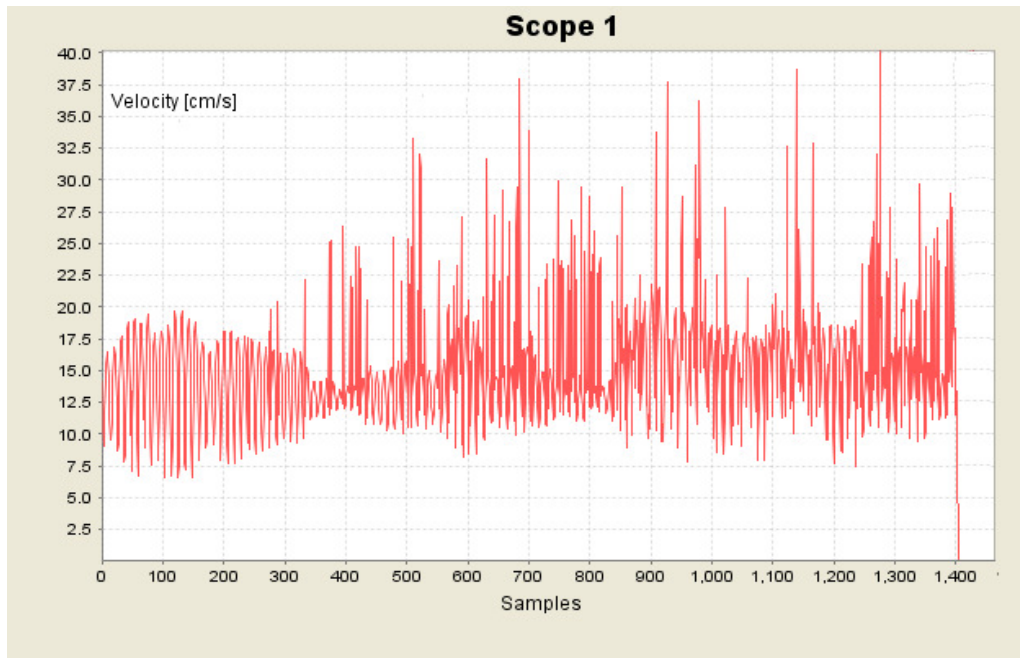


Fig. 29: Velocidade média mantida entre 10 e 15 cm/s em todo o percurso do motor linear.

Segundo levantamento experimental realizado no veículo em movimento foi possível verificar que a velocidade mínima de escape do veículo no fim do motor linear deve ser de 120 cm/s para que ele dê uma volta completa no trilho e volte novamente para a entrada do motor. Para fazer o veículo alcançar esta velocidade de escape, tanto na situação de partida quanto na de reentrada, é preciso acelerar o veículo em etapas e garantir que não haja perda de sincronismo durante o processo. Foi escolhida uma forma de aceleração com cinco patamares crescentes. A duração de cada patamar é de 1 segundo e a frequência varia linearmente do valor do patamar anterior até o valor máximo de cada patamar. O valor máximo de frequência dos patamares corresponde aproximadamente a um percentual da velocidade de escape. O

primeiro patamar é de 10% da velocidade de escape. O segundo patamar é de 20% da velocidade de escape somada ao primeiro patamar. O terceiro é de 30% da velocidade de escape somada ao segundo patamar. O quarto patamar é de 20% da velocidade de escape somada ao terceiro patamar e quinto patamar é de 20% da velocidade de escape somada ao quarto patamar. O somatório de todos os patamares dá o valor de 100% da velocidade final. Para a velocidade de escape de 120 cm/s os patamares de frequência encontram-se na **Erro! Auto-referência de indicador não válida.** Os valores de frequência foram medidos no osciloscópio e os valores correspondentes de velocidade foram calculados segundo a Eq. (2-1).

Tabela 4: Patamares de velocidade alcançados pelo veículo durante a aceleração.

Patamar	Frequência final (Hz)	Velocidade (cm/s)
0	0	0
1	1,685	13,14
2	4,869	37,97
3	9,615	74,99
4	12,738	99,35
5	15,870	123,81

Testes experimentais foram programados para verificar a movimentação do veículo sobre o motor linear e a velocidade final alcançada segundo a programação da frequência do inversor. Cinco testes, correspondendo cada um à frequência final de cada patamar, são mostrados a seguir. O primeiro teste corresponde à Fig. 29, mostrada anteriormente, onde a velocidade do veículo deve ficar em 13,14 cm/s. No segundo teste, segundo a Fig. 30, o veículo atingiu a velocidade final conforme programado no segundo patamar. A oscilação em torno da média é característica do sistema veículo-motor linear em malha aberta e não compensado.

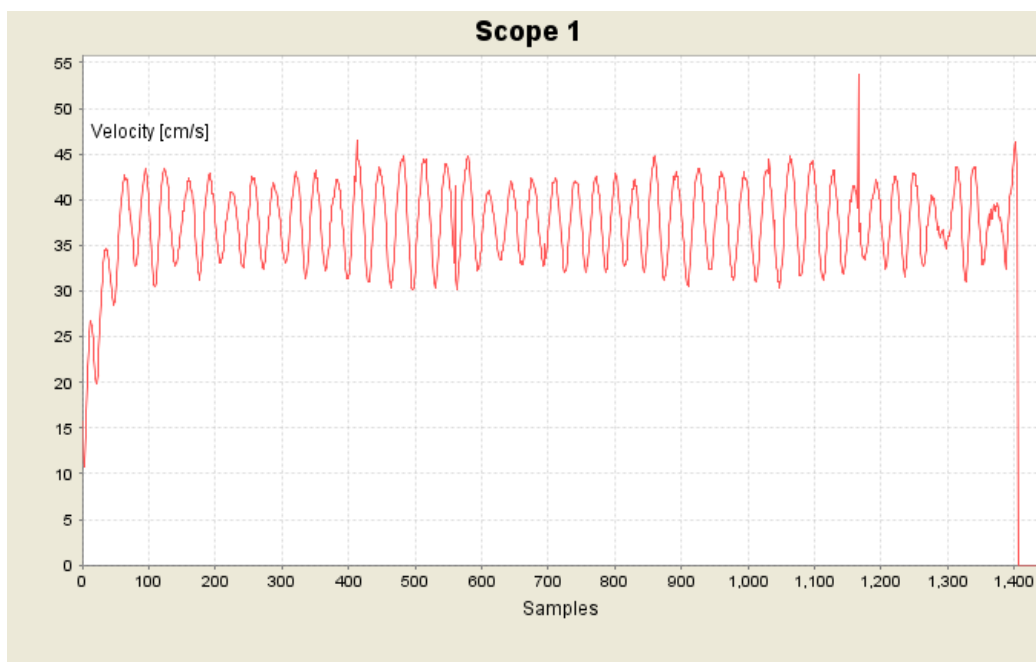


Fig. 30: Velocidade média no final mantida em 37,97 cm/s. Correspondente ao segundo patamar. Velocidade inicial igual a zero.

O terceiro teste tem por objetivo levar a velocidade final do veículo ao terceiro patamar e verificar o sincronismo em todo o percurso. Conforme mostrado na Fig. 31 o objetivo foi atingido.

As Fig. 32 e Fig. 33, mostram respectivamente o quarto e o quinto patamares com as respectivas velocidades de 99,85 cm/s e 123,81 cm/s sendo alcançadas. Com o último patamar atingido, garantiu-se que a velocidade de escape do veículo sobre o motor linear atingiu o mínimo necessário para a reentrada acontecer. Após o veículo ser lançado e andar aproximadamente 24 metros de trilho na inércia, ele atinge novamente o início do motor linear iniciando o processo de sincronismo sobre o mesmo.

O próximo ensaio a ser realizado é verificar a velocidade de entrada do veículo sobre o motor linear e observar o comportamento do inversor gerando a frequência coerente com esta velocidade de entrada e acelerando novamente até a velocidade de escape para que o veículo percorra mais uma vez todo o percurso do protótipo. Verifica-se assim o sincronismo do veículo sobre o motor linear funcionando.

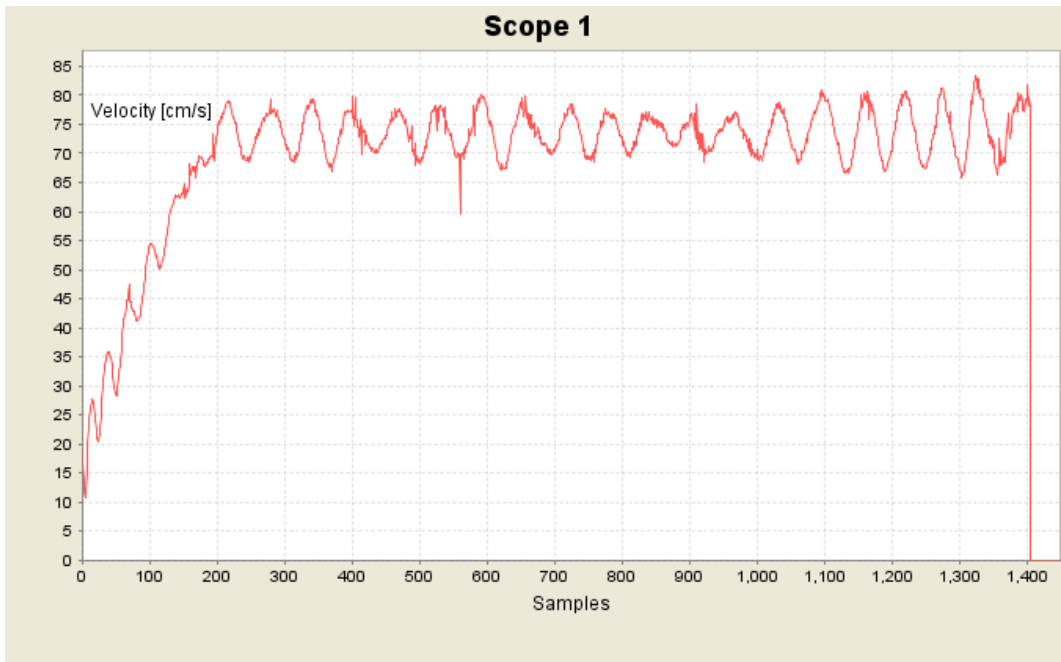


Fig. 31: Velocidade média no final mantida em 74,99 cm/s. Correspondente ao terceiro patamar. Velocidade inicial igual a zero.

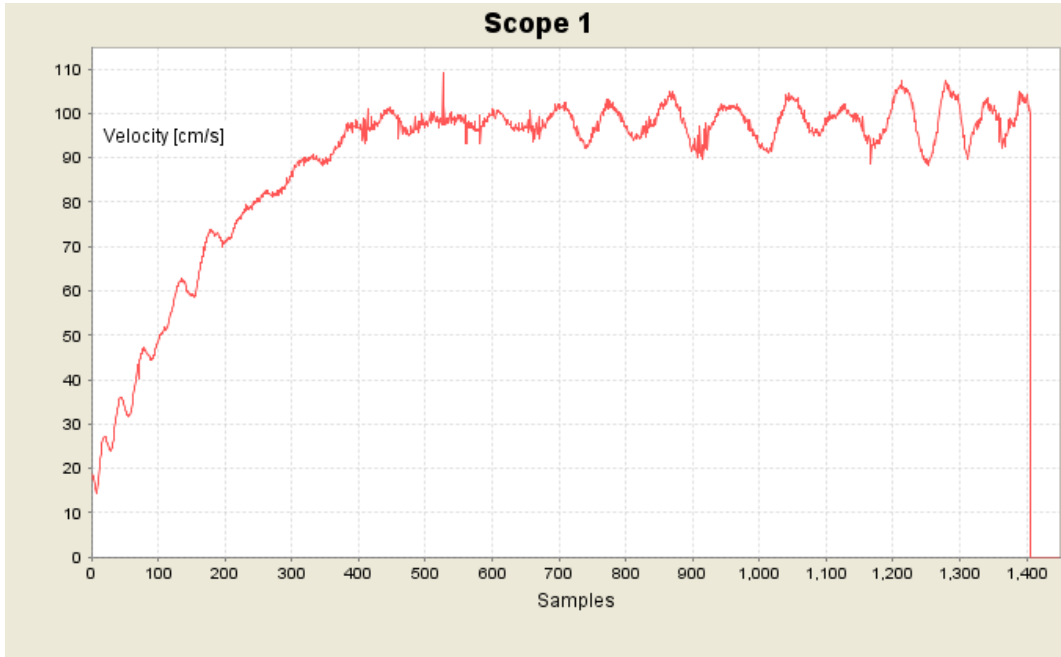


Fig. 32: Velocidade média no final mantida em 99,85 cm/s. Correspondente ao quarto patamar. Velocidade inicial igual a zero.

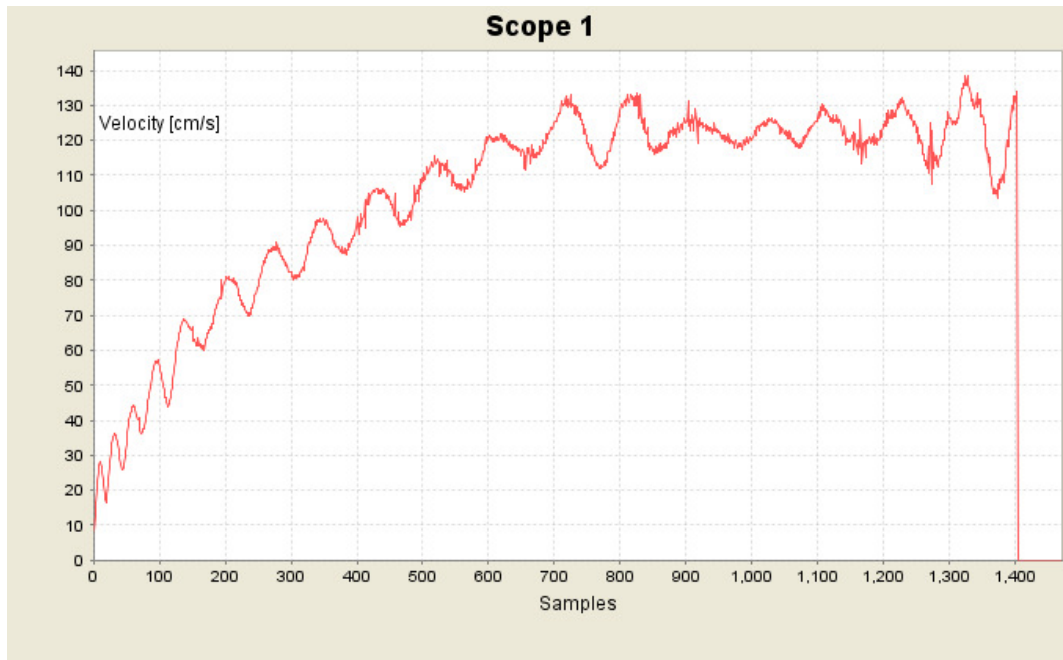


Fig. 33: Velocidade média no final mantida em 123,81 cm/s. Correspondente ao quinto e último patamar. Velocidade inicial igual a zero.

Foi observada a velocidade do veículo momentos antes da reentrada sobre o motor linear depois que ele foi ejetado do motor linear na velocidade de escape de 120 cm/s. A Fig. 34 mostra isto. Observando o gráfico, pode-se estimar o valor médio da velocidade de entrada em torno de 45,7 cm/s. Esta média aritmética foi tirada pela média do valor do vale, 44,3 cm/s, e a média do valor do pico alcançado que é 47,2 cm/s. Aplicando-se a Eq. (2-1) com este valor de velocidade obtém-se o valor de frequência de 6,013 Hz. Este é o valor de frequência calculado que o inversor deveria providenciar para a reentrada do veículo no motor linear.

Neste momento também foi observada em um osciloscópio, através de uma das saídas analógicas do CFW-09 reproduzindo uma das variáveis de referência do sinal do PWM de saída, a frequência do PWM gerado pelo software interno do inversor conforme a Fig. 35. No alto e a direita, observa-se o valor de 5,957 Hz. O erro de frequência entre o valor calculado pela Eq. (2-1) de 6,013 Hz e o valor lido no osciloscópio é de 0,9%. Este erro é aceitável para que haja o sincronismo na entrada do veículo sobre o motor linear.

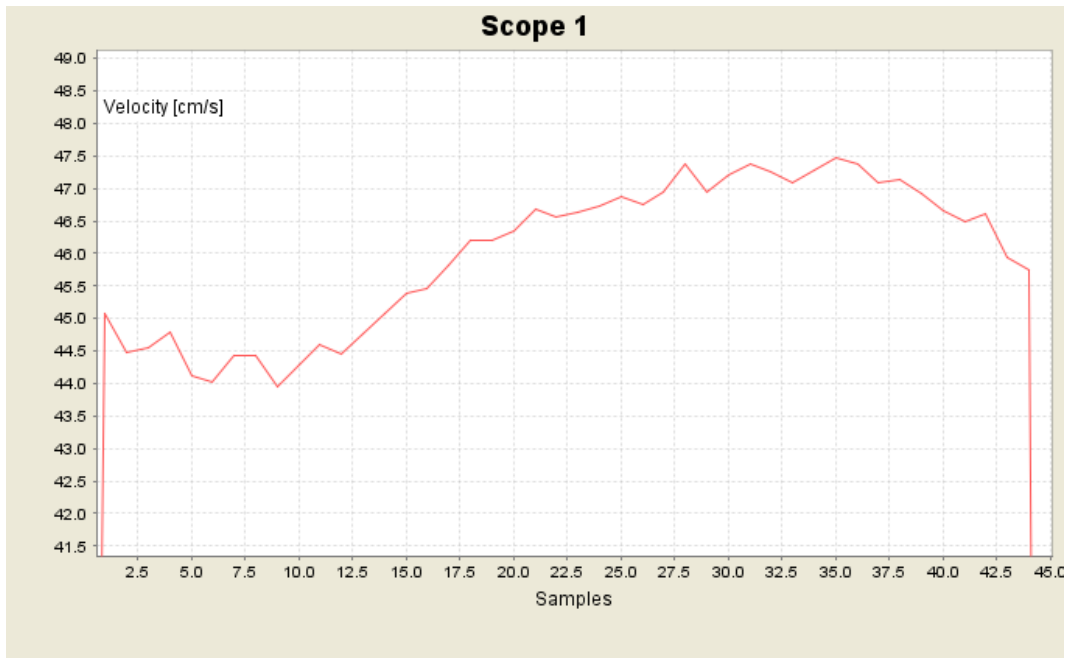


Fig. 34: Velocidade de entrada do veículo momentos antes de sincronizar com o inversor.

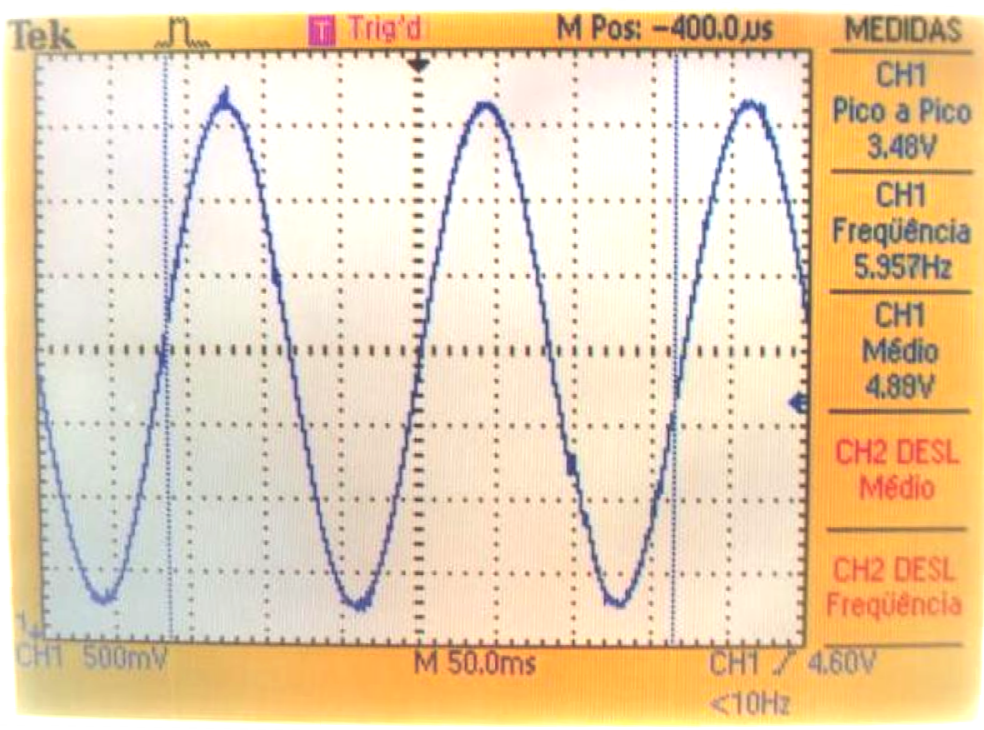


Fig. 35: Frequência gerada no momento da entrada do veículo sobre o motor linear no alto à direita.

A Fig. 36 mostra o sincronismo e a aceleração sobre o motor para se atingir novamente a velocidade de escape. Observa-se de uma forma acentuada a variação senoidal de velocidade tanto no gráfico abaixo quanto nos anteriores. Colocando-se uma malha de controle de corrente realimentada pela posição do veículo esta variação poderia ser eliminada. Os valores iniciais de velocidade no gráfico mostram a velocidade de entrada no motor linear.

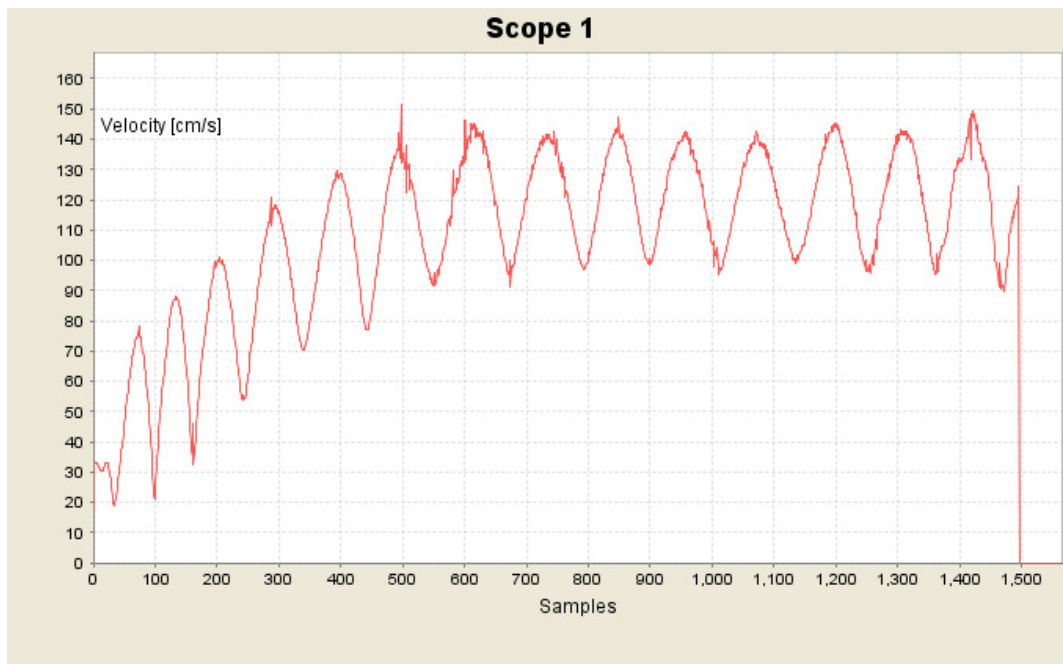


Fig. 36: Sincronismo do veículo na entrada do motor linear com nova aceleração até a velocidade de escape de 120 cm/s.

6. Conclusão e perspectivas futuras

O objetivo principal da dissertação foi desenvolver a sincronização de um veículo de levitação magnética tracionado por um motor linear através do acionamento do protótipo em escala reduzida do veículo MagLev-Cobra. Foram abordadas as diferentes técnicas de levitação e suas principais características e aplicações. As possibilidades de aplicações no uso de motores lineares, sejam eles de indução ou síncronos, também foram estudadas.

As opções feitas para a sincronização com o desenvolvimento de dois tipos de sensoriamento, tanto o ótico quanto o magnético, se mostraram compatíveis com os trabalhos anteriores realizados no protótipo do ponto de vista das adaptações mecânicas e de operação do sistema. A utilização do inversor da WEG com o software interno modificado simplificou o trabalho de acionamento e observação dos dados relevantes para o processo de sincronismo. Tanto o software interno quanto a interface homem-máquina construídos permitiram uma ampla observação do processo e do sistema como um todo, facilitando as análises e conclusões.

A metodologia experimental comprovou as análises realizadas e a escolha acertada dos sensores para o funcionamento deste projeto. A escolha da partida do veículo em patamares a partir da velocidade zero até a velocidade de escape se mostrou acertada e não houve perda de sincronismo na aceleração. A sincronização do veículo reentrando sobre o motor linear e a sua re-aceleração até novamente atingir a velocidade de escape funcionou permitindo a movimentação do veículo ininterruptamente no circuito oval do trilho. Estas foram as contribuições relevantes deste trabalho.

Para extrapolar este trabalho para um veículo em escala real, faz-se necessário aumentar o número de sensores para monitoração do veículo como, por exemplo, sensores de temperatura e vácuo para os criostatos. O sensor ótico de velocidade deve ser substituído por um sensor magnético por ser mais robusto. A arquitetura de aquisição dos dados dos sensores no interior do veículo, através de uma unidade de aquisição inteligente e transmissão destes dados para uma central de comandos é a forma ideal para um sistema em escala real. A monitoração remota destes dados permitiria uma ampla flexibilidade de operação e estudos. A implementação desta

arquitetura em um modelo de escala real, aumentaria consideravelmente a complexidade do software pois envolveria uma grande quantidade de dados a serem observados e também haveria sistemas de aviso e segurança de operação do veículo. A possibilidade de operação deste veículo remotamente, através de uma central de controle, se torna viável.

Como perspectivas futuras de trabalho são propostos os seguintes itens temas:

- Elaboração de um controle mais apurado para eliminação das variações de velocidade do motor linear utilizando controle vetorial.
- Desenvolvimento da tecnologia de acionamento “*sensorless*”.
- Reduzir as ondulações no primário do motor linear, diminuindo assim as variações do “*gap*” entre o primário, posicionado entre os trilhos e o secundário no veículo.
- Aumento do número de pólos do secundário permitindo uma operação mais suave e em maior frequência.
- Inclusão de micro-controlador no veículo permitindo a operação do sensor de velocidade em velocidades menores que 5,46 cm/s e a utilização de outros tipos de sensores como sensores de distância do trilho e sensores de temperatura e vácuo.
- Programar a frenagem do veículo sobre o motor linear.
- Colocar em funcionamento o motor linear existente na segunda reta do trilho.

7. Referências Bibliográficas

- [1] STEPHAN, R. M. , *Levitação Magnética (MagLev): Uma Quebra de Paradigma no Transporte de Massa do Século XXI*, CONINFRA, Agosto 2010, São Paulo, Brasil.
- [2] ROCHA, R. V., *Controle Vetorial para Motor Linear Síncrono com a utilização de Micro-Controlador*, Projeto Final de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Outubro de 2005.
- [3] MOREIRA, M. A. C., *Projeto de Motores Lineares com Auxílio do Método dos Elementos Finitos* , Tese D.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Março de 2009.
- [4] ROBERTO, K. C. A., *Ajuste de Partida de um Motor Linear a partir da Rampa de Aceleração*, Projeto Final de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Abril de 2006.
- [5] GIERAS, J. F, *Linear Induction Drives*. 1 ed. Clarendon Press – Oxford, 1994.
- [6] ROST, J., *Modellierung und Identifikation der Parameter des Linearantriebs der Magnetschwebbahn Transrapid*, Dr.-Ing Technische Universität Dresden, Dresden, Deuschland, 2008.
- [7] GIERAS, J. F, PIECH Z. J., *Linear Synchronous Drives*. 1 ed. CRC Press – Boca Raton, 2000.
- [8] RHODES, R. G, MULHALL B. E., *Magnetic Levitation for Rail Transport*. 1 ed. Clarendon Press – Oxford, 1981.
- [9] MOHAN, N., *Electric Drives an Integration Approach*. 1 ed. MNPERE – Minneapolis, 2003.

- [10] MOON, F. C., CHANG, P., *Superconducting Levitation*. 1 ed. Jonh Wiley & Sons – New York, 1994.
- [11] DIAS, D. H. N., MOTTA, E. S., SOTELO, G. G., DE ANDRADE, R., STEPHAN, R. M., KUEHN, L., DE HAAS, O., SCHULTZ, L. , *Simulations and Tests of Superconducting Linear Bearings for a MAGLEV Prototype*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 19, p. 2120-2123, 2009.
- [12] STEPHAN, R. M., NICOLSKY, R., NEVES, M. A. ; FERREIRA, A. C., ANDRADE JR, R., MOREIRA, M. A. C., ROSÁRIO, M. A. P., MACHADO, O. J., *A Superconducting Levitation Vehicle Prototype*, Physica C, Superconductivity, v. 408, p. 932-934, 2004.
- [13] DE ANDRADE, R., SANTOS, G., ROSÁRIO, M. A. P., NEVES, M. A., PEREIRA, A. S., RIPPER, A., COSTA, G. C., NICOLSKY, R., STEPHAN, R. M., *Performance of Nd-Fe-B and Ferrite Magnets in Superconducting Linear Bearings with Bulk YBCO*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, EUA, v. 13, n. 2, p. 2271-2274, 2003.
- [14] STEPHAN, R. M. ; FERREIRA, A. C., ANDRADE JR, R., ROLIM, L. G. B., NEVES, M. A. ; MOREIRA, M. A. C., ROSÁRIO, M. A. P. ; MACHADO, O. J. ; NICOLSKY, R., *Um Protótipo Brasileiro de Trem de Levitação Magnética*, Eletrônica de Potência, Florianópolis, v. 8, n. 1, p. 1-8, 2003.
- [15] MOREIRA, M. A. C., STEPHAN, R. M., FERREIRA, A. C., *Long Armature LSM with Nd-Fe-B Excitation Field*. CIÊNCIA E ENGENHARIA, Brasil, v. 12, n. 3, p. 63-66, 2003.

- [16] STEPHAN, R. M., ANDRADE JR, R., SANTOS, G. , NEVES, M. A., NICOLSKY, R., “Levitation force and stability of superconducting linear bearings using NdFeB and ferrite magnets”, *Physica. C, Superconductivity*, v. 386, p. 490-494, 2003.

8. Apêndices

8.1. Fluxogramas dos módulos em C

- ProjetoLeviMag.c

Contém a declaração e inicialização de todas as variáveis do programa. A rotina principal “*main()*” também faz toda a parte de comunicação serial com a interface homem-máquina recebendo comandos e alterando a forma de operação do inversor. Este módulo recebe as configurações iniciais de operação do CFW-09 e também pode enviar serialmente algumas variáveis de controle internas para serem representadas graficamente na interface homem-máquina. A Fig. 37 mostra o detalhe do diagrama em blocos.

Diagrama de blocos ProjetoLeviMag.c

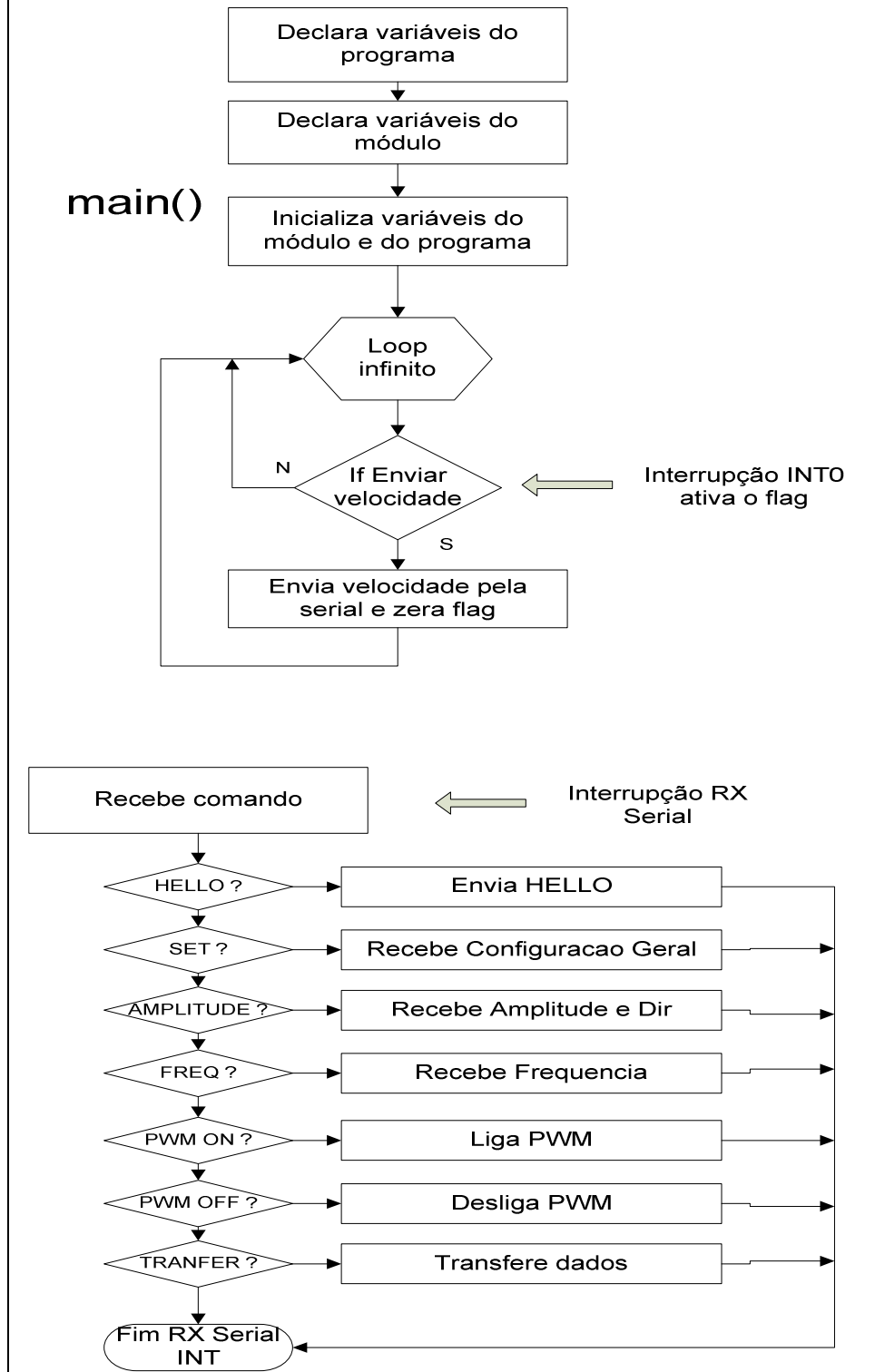


Fig. 37: Diagrama de blocos do módulo ProjetoLeviMag.c.

- Hwsetup.c

Configura o microprocessador SH7044 para operar segundo o hardware do inversor CFW-09 que incluem a placa de controle e a placa de potência. As portas do processador de I/O recebem sua designação de funcionar como entrada ou saída e a interface serial é programada com o padrão de comunicação de “115200, 8, n, 1”. Os dois conversores A/D começam a operar coletando os dados internos de tensão e corrente que podem ser enviados para a interface homem-máquina. Os contadores 2, 3 e 4, responsáveis por gerar o sinal PWM trifásico de saída, são inicializados junto com o timer 1 que se responsabiliza por medir a velocidade enviada pelo sensor linear de velocidade. Os dois canais de conversores D/A são inicializados permitindo uma observação externa, através de multímetro ou osciloscópio, de até duas variáveis de referência internas do programa que está rodando no inversor. Este módulo é chamado logo após a inicialização da memória do processador e entrega o processamento para a função “*main()*”.

- Cfw-09_serial.c

Possui o conjunto de rotinas que lidam com a recepção e a transmissão serial de informações como bytes e pacotes de dados entre a interface homem-máquina e o software do inversor. A Fig. 38 detalha o diagrama em blocos de Hwsetup.c e Cfw-09_serial.c.

Diagrama de blocos Hwsetup.c

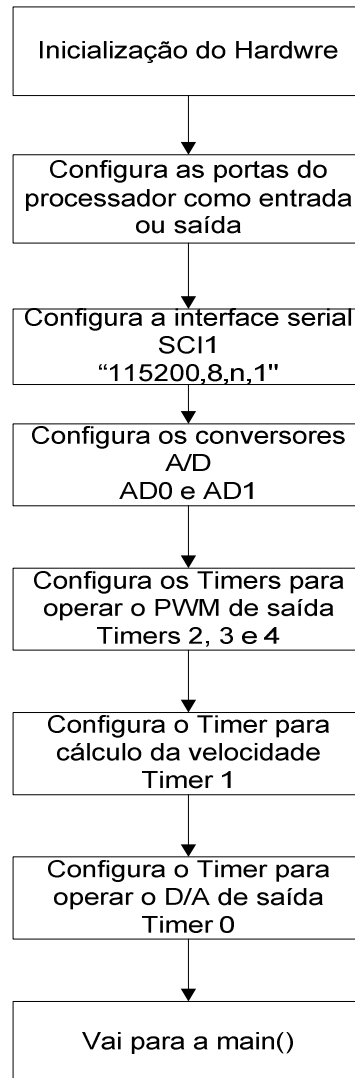


Diagrama de blocos Cfw-09_serial.c

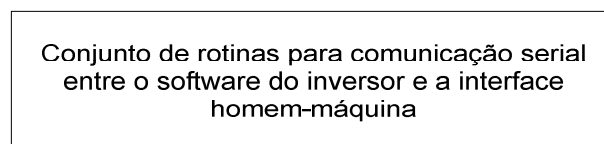


Fig. 38: Diagrama de blocos dos módulos Hwsetup.c e Cfw-09_serial.c.

- Initsct.c e Vecttbl.c

São gerados pela ferramenta de compilação HEW da Renesas e devem ser mantidos inalterados durante o processo de desenvolvimento. Eles tratam da inicialização da memória do processador e do mapeamento da tabela de vetores de interrupções. As prioridades de interrupções estão definidas no módulo “*Hwsetup.c*”.

- Intprg.c

Responsável pelo tratamento das interrupções geradas no processador e chamada de suas respectivas rotinas de tratamento. De todas as interrupções que estão disponíveis no processador, quatro delas são as mais relevantes para esta dissertação que são: IRQ0, RXI1, TGI2A e TGI2B. Como já foi descrito anteriormente, IRQ0 está associada à leitura de velocidade do sensor ótico linear através do Timer1 e RXI1 está associada à recepção de comandos enviados pela interface homem-máquina através interface serial. As interrupções TGI2A e TGI2B, que ocorrem alternadamente, provenientes do Timer 2, são as responsáveis pela temporização da chamada da rotina de controle do inversor “*PwmControl.c*” a cada 100µs.

- VelControl.c

É responsável pela leitura do *timer1*. Este valor lido está associado ao tempo transcorrido entre duas interrupções consecutivas de INT0 que, por sua vez, está associado a velocidade do veículo passando sobre o sensor ótico. A Fig. 39 detalha o diagrama de blocos de Intprg.c e VelControl.c.

Diagrama de blocos Intrprg.c

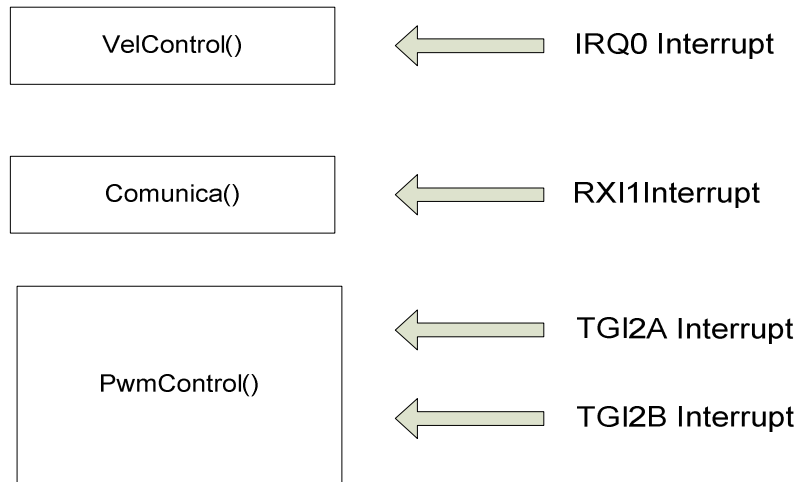


Diagrama de blocos VelControl.c

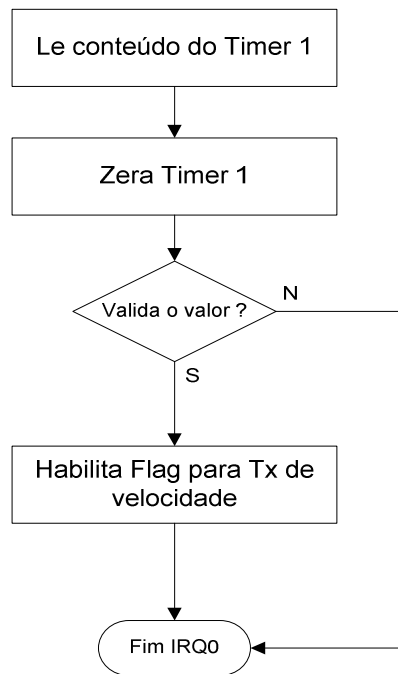


Fig. 39: Diagrama de blocos dos módulos Intrprg.c e VelControl.c.

- SenCos.c

Calcula os valores de um seno ou cosseno a partir de um ângulo definido de entrada. Esta rotina é uma otimização por interpolação do cálculo de senos para uso na formação das senóides do PWM, tornando seu cálculo mais rápido e permitindo, portanto, seu uso dentro da rotina de interrupção “*PwmControl.c*”. . A Fig. 40 detalha o diagrama de blocos de SenCos.c.

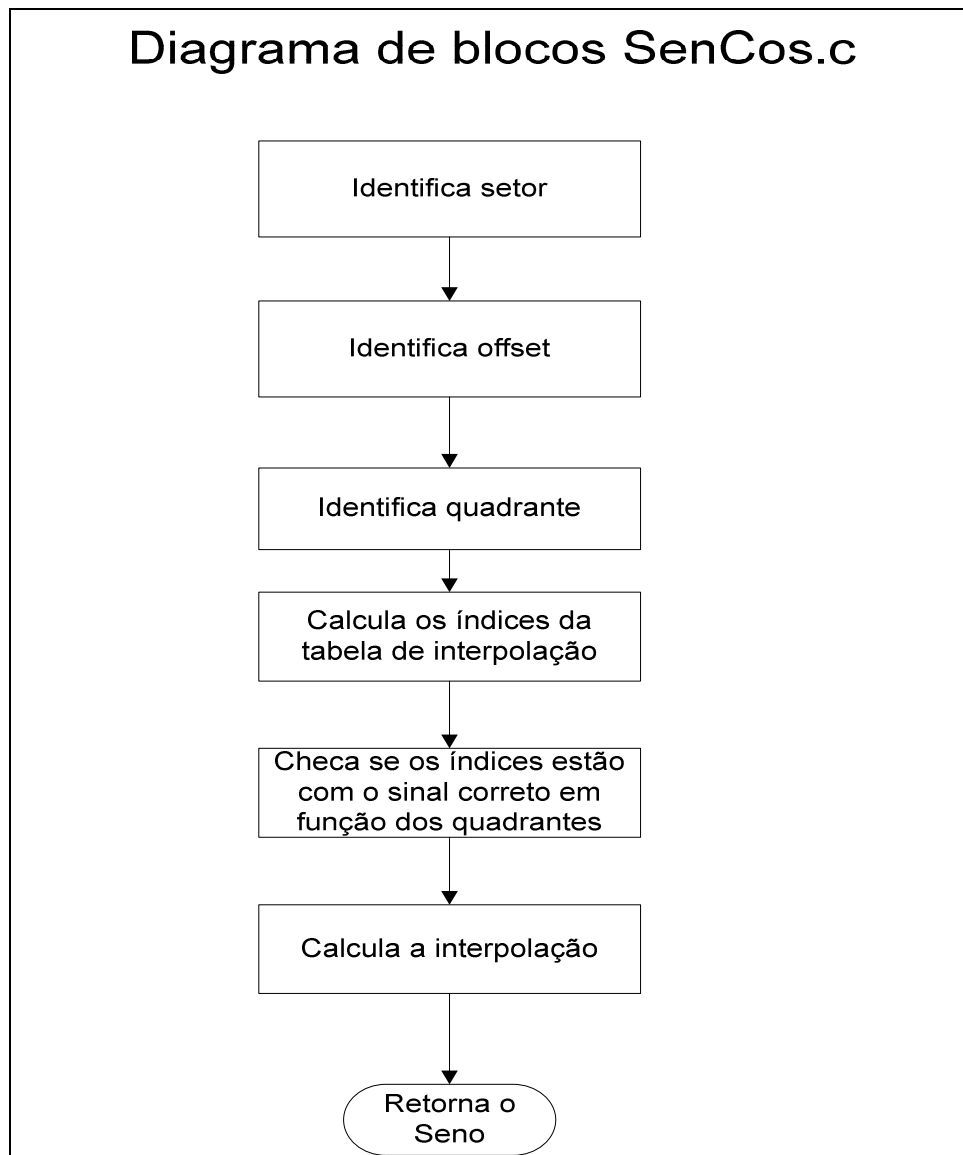


Fig. 40: Diagrama de blocos do módulo SenCos.c.

- PwmControl.c

Esta interrupção é chamada a cada 100 μ s, e é responsável por checar se as variáveis de tensão do barramento DC, temperatura de operação do dissipador e duas correntes de saída do PWM estão dentro dos parâmetros de segurança de operação previamente programados. Assim que a interface homem-máquina envia o comando de ligar o PWM para o inversor, este módulo habilita a saída PWM e inicia os procedimentos para fazer o veículo sincronizar em uma fase. Esta sincronização dura 4 segundos. Neste ponto a posição inicial do veículo é conhecida em relação ao vetor tensão aplicado. A partir deste momento o módulo inicia a aceleração do veículo em patamares e verifica as condições em que o veículo foi lançado ou está se aproximando da entrada do motor linear. Todo o cálculo dos senos dos ângulos de cada uma das fases é atualizado dentro deste módulo. As Fig. 41 e Fig. 42 detalham o diagrama de blocos de PwmControl.c.

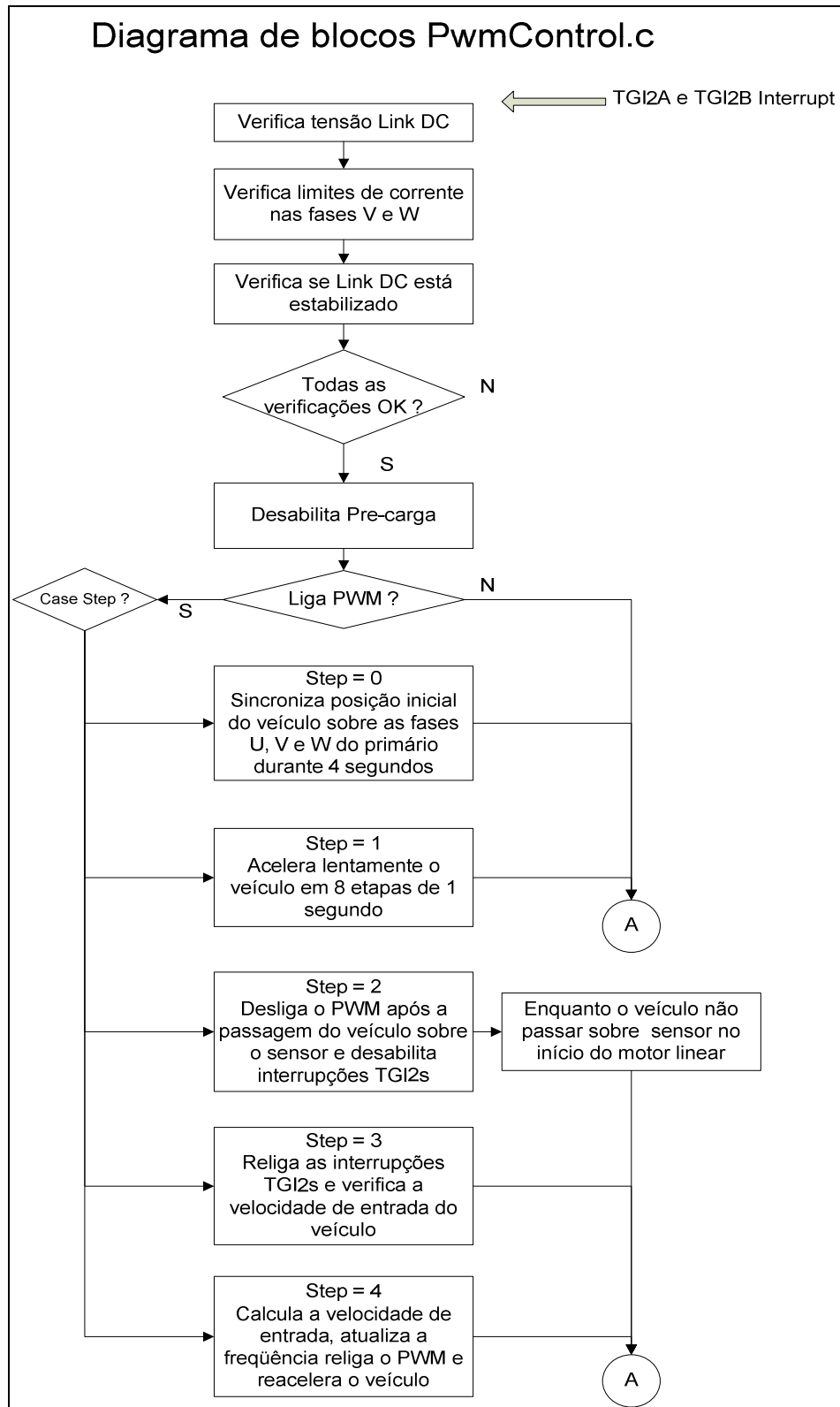


Fig. 41: Diagrama de blocos do módulo PwmControl.c – parte 1.

Diagrama de blocos PwmControl.c

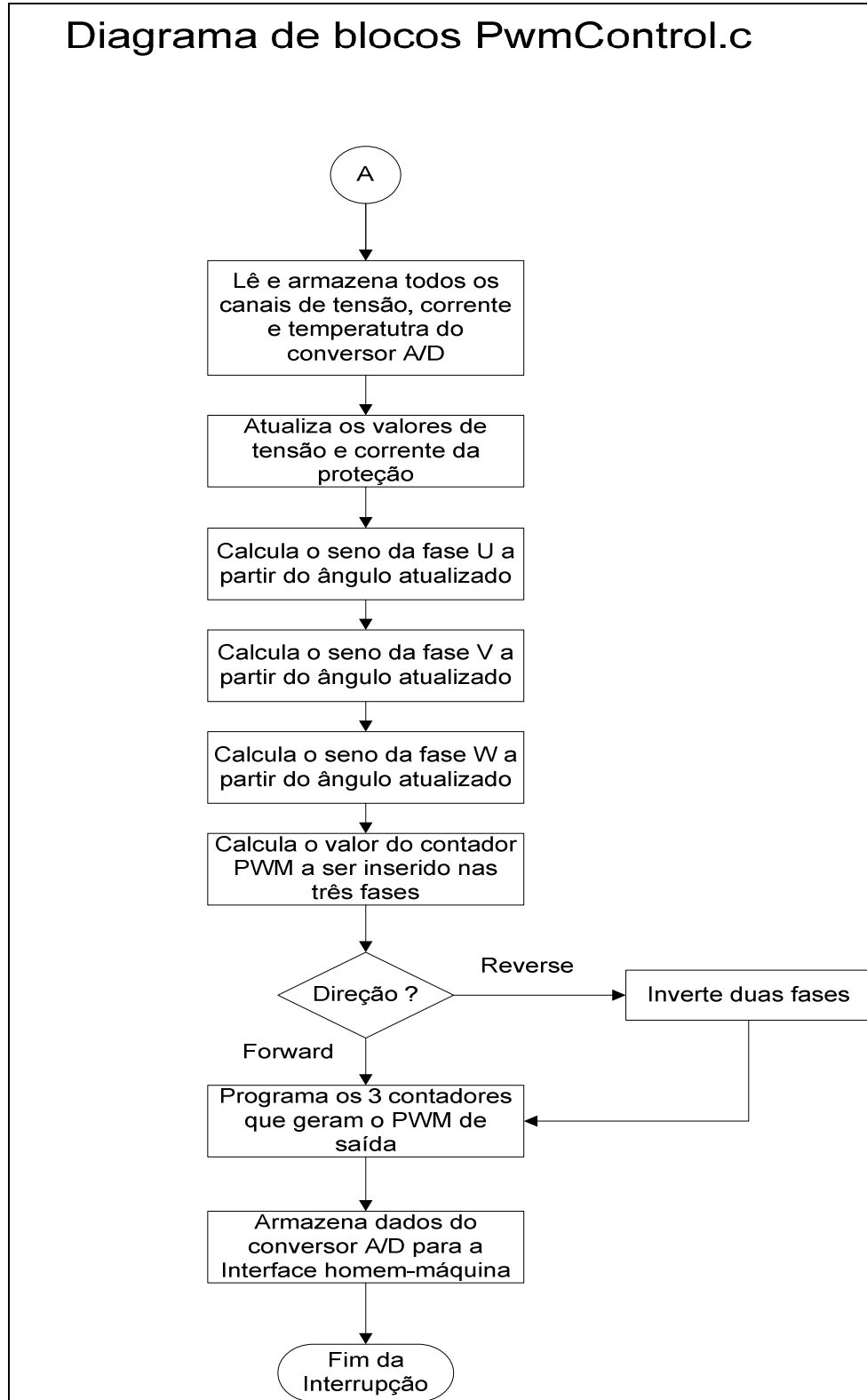


Fig. 42: Diagrama de blocos do módulo PwmControl.c – parte 2.