

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ROBERTO MÜLLER

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA RÉGUA
MAGNÉTICA**

Porto Alegre

2011

ROBERTO MÜLLER

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA RÉGUA
MAGNÉTICA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia - Dispositivos Eletromagnéticos

ORIENTADOR: ÁLY FERREIRA FLORES FILHO

Porto Alegre

2011

ROBERTO MÜLLER

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA RÉGUA MAGNÉTICA

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

Doutor pela University of Wales, Cardiff, País de Gales, Reino Unido

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich - PPGEE – UFRGS

Doutor pela Unicampi, Campinas, Brasil

Prof. Dr. Mario Norberto Baibich – IF – IFRGS

Doutor pela McGill University, Montreal, Canada

Prof. Dr. Felix Alberto Farret – DEC – CT – UFSM

Doutor pela University of London, Londres, Reino Unido

Prof. Dr. Milton Antonio Zaro – IBTeC – RS

Doutor pela UFRGS, Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Valner João Brusamarello - PPGEE – UFRGS

Doutor pela UFSC, Florianópolis, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, junho de 2011.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, a minha esposa e filhas em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos colegas do PPGEE pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

À Metalúrgica Falgatter que gentilmente fez cortes a laser, de modo gratuito para os primeiros protótipos do transdutor.

RESUMO

O objeto de estudo deste trabalho é caracterizar um transdutor magnético de posição absoluto de longo percurso e robusto quanto à sua resposta dinâmica. O transdutor foi concebido na dissertação de mestrado do autor e denominada de "Régua Magnética" na qual foi estudada a sua resposta estática. Diferentemente de outros transdutores magnéticos este tem como princípio de funcionamento a divisão do fluxo magnético entre dois caminhos distintos, cujas dimensões variam em função da movimentação da bobinas de excitação. Neste estudo analisa-se então a resposta dinâmica do transdutor, pois, quando o seu carro se desloca com velocidade constante, há uma modificação na grandeza física que é responsável pelo sinal de saída correlacionado à posição daquele carro. O estudo foi desenvolvido em dois transdutores de aproximadamente 2 m de comprimento confeccionados com lâminas de Fe-Si cortadas a laser. Os sinais de tensão induzida nas culatras, corrente e fluxo magnético no eletro-ímã do carro bem como o sinal de posição deste são coletados por um dispositivo digital e processados em um computador de modo a se poder obter as curvas estáticas e dinâmicas e assim compará-las. Com este propósito, foi desenvolvida uma bancada original de ensaio de transdutores de posição lineares para a medição da diferença dos sinais entre o caso estático e o dinâmico, denominado de diferença dinâmica, na qual foi empregado um transdutor de posição resistivo para a referência de posição, um sistema de aquisição de sinais para a medição das grandezas envolvidas no processo e um conjunto movimentador e servomotor para controle da velocidade e posição da parte móvel do transdutor. No final deste trabalho são comparados os resultados analíticos e experimentais obtidos como antes descritos.

Palavras-chave: Sensor de posição. Sensor sem contato. Resposta Dinâmica.

ABSTRACT

The aim of this work is to characterize a long-span absolute magnetic position transducer that presents a robust dynamic response. The transducer was conceived by the MSc studies of the author and is called named “Magnetic Ruler” by which its static response was studied. Unlike other magnetic transducers, the magnetic ruler is based on the principle of the division of magnetic flux between two distinct magnetic paths that depends on the linear position of its movable part along the span of the transducer. This present study examines the dynamic response of the transducer when its movable part or car is moving with constant speed. Under such conditions, there is a change in the signal output that is correlated to the position of that car. The study was conducted by means of two transducers of approximately 2-m long laminations of Si-Fe that were laser cut. The voltage signals induced through the search coils on the end yokes, current and magnetic flux in the excitation coil on car, and the position are acquired by a digital device and processed by a computer. That is done to obtain the static and the dynamic curves and, thus, to allow the comparison between the two behaviors. With this objective, a specially built and unique test bench was developed to test linear position transducers under static and dynamic cases. The difference between the two results is called dynamic difference. That test bench employs a resistive position transducer to provide position reference, a signal acquisition system for measuring the quantities involved in the process, and a controlled traction system based on a servo system to control the speed and the position of the moving part of the transducer under test. At the end this work the analytical and experimental results obtained as described above are compared.

Keywords: Position sensor. Contactless sensor. Dynamic response.

SUMÁRIO

1. ESTADO DA ARTE.....	23
1.1 SENSORES DE POSIÇÃO E VELOCIDADE.....	23
1.1.1 Resistivos ou Potenciométricos.....	23
1.1.2 Indutivos.....	24
1.1.3 Ópticos.....	27
2. O TRANSDUTOR DE POSIÇÃO MAGNÉTICO.....	29
2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	29
3. MODELAGEM TEÓRICA.....	32
3.1 MODELAGEM TEÓRICA DO TRANSDUTOR SEM ENTREFERRO DE MEDIÇÃO.....	32
3.1.1 Análise da Distribuição do Fluxo Magnético no Transdutor sem Entreferro de Medição.....	36
3.2 CASO ESTÁTICO.....	44
4. PROJETO PARA CONSTRUÇÃO DOS TRANSDUTORES TRANSDUTOR COM LÂMINAS DE AÇO SILÍCIO.....	47
4.1 TRANSDUTOR COM LÂMINAS DE AÇO SILÍCIO.....	47
4.2 CURVA TEÓRICA DO TRANSDUTOR PROPOSTO.....	57
5. EXCITAÇÃO DO TRANSDUTOR E RESULTADOS ESTÁTICOS.....	63
5.1 CALCULO DA EXCITAÇÃO DOS TRANSDUTORES.....	63
5.1.1 Levantamento da Curva $B \times H$	65
5.1.2 Calculo da excitação usando a curva $B \times H$ medida.....	70
5.2 RESULTADOS ESTÁTICOS DOS TRANSDUTORES.....	71
5.2.1 Resultados estáticos do Transdutor I.....	73
5.2.2 Resultados estáticos do Transdutor II.....	79
5.2.3 Comparação entre os resultados dos Transdutores I e II.....	83
5.3 COMPARAÇÕES DOS VALORES MEDIDOS E OS CALCULADOS PARA O TRANSDUTOR I E II.....	86
5.3.1 Comparação entre os medidos e calculados do Transdutor I.....	86
5.3.2 Comparação entre os medidos e calculados do Transdutor II.....	90
6. RESPOSTA DO TRANSDUTOR AO FLUXO MAGNÉTICO CONTÍNUO.....	94
6.1 ANÁLISE TEÓRICA DO FLUXO MAGNÉTICO C.C.....	94
6.1.1 Análise do sinal através da curva experimental estático do transdutor.....	95
6.2 RESULTADOS DO FLUXO CONTINUAM MEDIDOS COMPARANDO COM O ANALÍTICO.....	97
6.2.1 Resultados medidos com fluxo contínuo do Transdutor I.....	98
6.2.2 Resultado medido do fluxo contínuo do Transdutor II.....	104
7. ANÁLISE E MODELAGEM DINÂMICA PARA FLUXO MAGNÉTICO SENOIDAL.....	111
7.1 CASO DINÂMICO PARA FLUXO SENOIDAL.....	111
7.1.1 Sinal de tensão dinâmico na bobina central.....	111
7.1.2 Sinal de tensão dinâmico nas bobinas exploradoras.....	111
7.2 SINAL DE SAÍDA.....	118
7.3 COMPARANDO VALORES ESTÁTICOS EXPERIMENTAIS COM VALORES DINÂMICOS TEÓRICOS.....	120
8. RESULTADOS DAS CURVAS DINÂMICAS DOS TRANSDUTORES.....	129

8.1 COMPARAÇÃO DOS VALORES ESTÁTICOS COM OS VALORES DINÂMICOS LENTOS.....	137
8.1.1 Comparação dos valores estáticos com os valores dinâmicos lentos para o Transdutor I.....	138
8.1.2 Comparação dos valores estáticos com os valores dinâmicos lentos para o Transdutor II.....	141
8.2 COMPARAÇÃO DOS VALORES ESTÁTICOS COM OS VALORES DINÂMICOS.....	145
8.2.1 Comparação dos valores estáticos com os valores dinâmicos do Transdutor I.....	145
8.2.2 Comparação dos valores estáticos com os valores dinâmicos do Transdutor II.....	155
8.3 COMPARAÇÃO DOS VALORES ESTÁTICOS COM OS VALORES DINÂMICOS LENTOS DE $S(x)$.....	169
8.4 COMPARAÇÃO DOS ERROS DINÂMICOS DE $S(x)$.....	172
9. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	177
9.1 RESULTADOS ESTÁTICOS.....	177
9.2 RESULTADOS DINÂMICOS C.C.....	178
9.3 RESULTADOS DAS DIFERENÇAS DINÂMICAS C.A.....	178
9.4 PROBLEMAS ENFRENTADOS.....	180
9.4.1 Estabilidade térmica do transdutor.....	181
10. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	183
10.1. CONCLUSÃO.....	183
10.2. RECOMENDAÇÕES.....	184
REFERÊNCIAS.....	186
APÊNDICE A.....	190
APÊNDICE B.....	218
APÊNDICE C.....	227

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Sensor resistivo (a) Angular, (b) Símbolo, (c) Linear [KILLIAN].....	24
Figura 2 LVDT com acoplamento central [KILLIAN].....	26
Figura 3 Sinal de saída para o acoplamento (a) esquerdo, (b) central, (c) direito [KILLIAN].....	26
Figura 4 Diagrama esquemático de um <i>encoder</i> [GONÇALVES].....	27
Figura 5 O código Gray adotado nos <i>encoders</i> absolutos [GONÇALVES].....	27
Figura 6 - Vista geral do transdutor proposto.....	30
Figura 7 Vista frontal de um transdutor sem entreferro de medição.....	33
Figura 8 Modelo de relutâncias distribuídas sem entreferro de medição.....	34
Figura 9 Simplificação do modelo de relutâncias da Figura 8.....	36
Figura 10 Modelo reduzido da Figura 9.....	37
Figura 11 Modelo de relutâncias reduzidas final do transdutor sem entreferro de medição.....	38
Figura 12 Vista frontal do transdutor sem entreferro e seus parâmetros construtivos.....	40
Figura 13 Representação do transdutor com fluxo magnético c.a. para o caso estático.....	44
Figura 14 Vista frontal do Transdutor I, medidas em mm.....	49
Figura 15 Vista frontal parcial do Transdutor I (a) primeira camada (b) camada subsequente.....	50
Figura 16 Vista frontal parcial da junção das duas configurações de camadas.....	51
Figura 17 Vista frontal do Transdutor II, medidas em mm.....	52
Figura 18 Vista frontal parcial do Transdutor II (a) primeira camada (b) camada subsequente.....	53
Figura 19 Vista frontal parcial da junção das duas configurações de camadas do Transdutor II 53	53
Figura 20 Vista frontal da peça que formam as culatras horizontais do Transdutor I e II, medidas em mm.....	54
Figura 21 Vista frontal da peça que forma as culatras laterais do Transdutor I, medidas em mm.....	55
Figura 22 Vista frontal da peça que forma as culatras laterais do Transdutor II, medidas em mm.....	56
Figura 23 Vista frontal da peça que forma o carro do Transdutor I, medidas em mm.....	57
Figura 24 Vista frontal da peça que forma o carro do Transdutor II, medidas em mm.....	58
Figura 25 Curva teórica do Transdutor I e II proposto para uma permeabilidade $\mu_{Fe} = 5000 \mu_0$	61
Figura 26 Foto da montagem do Transdutor I.....	62
Figura 27 Foto da montagem do Transdutor II.....	62
Figura 28 Diagrama das relutâncias do transdutor simplificadas.....	63
Figura 29 Agrupamento das relutâncias da Figura 28.....	64
Figura 30 Agrupamento das relutâncias da Figura 29.....	64
Figura 31 Foto da montagem das culatras do $B \times H$	65
Figura 32 Esquema de montagem de duas camadas consecutivas.....	66
Figura 33 Esquema de sobreposição de duas camadas consecutivas.....	67
Figura 34 Esquema de montagem do dispositivo $B \times H$	69
Figura 35 Curva $B \times H$ medida comparando com a curva de Tabela padrão.....	69
Figura 36 Curva $u_r \times H$ medida comparando com a curva de Tabela padrão.....	70
Figura 37 Montagem da experiência da curva estática.....	71
Figura 38 Vista superior da montagem da experiência.....	72
Figura 39 Vista frontal da montagem da experiência.....	72

Figura 40 Curva média de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita.....	74
Figura 41 Curva média de I_c com o carro partindo da esquerda para direita.....	75
Figura 42 Curva média de $S(x)$ com o carro partindo da esquerda para direita.....	75
Figura 43 Curva média dos fluxos magnéticos produzidos no carro com este partindo da esquerda para direita.....	76
Figura 44 Curva média das relutâncias com o carro partindo da esquerda para direita.....	77
Figura 45 Curva média dos fluxos magnéticos com o carro partindo da esquerda para direita.....	78
Figura 46 Curva média do percentual dos fluxos magnéticos dispersos com o carro partindo da esquerda para direita.....	78
Figura 47 Curva média de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita para as frequências de 60, 120 e 240 Hz.....	79
Figura 48 Curva média de I_c com o carro partindo da esquerda para direita para as frequências de 60, 120 e 240 Hz.....	80
Figura 49 Curva média de $S(x)$ com o carro partindo da esquerda para direita para as frequências de 60, 120 e 240 Hz.....	80
Figura 50 Curva média dos fluxos magnéticos produzidos no carro com este partindo da esquerda para direita para as frequências de 60, 120 e 240 Hz.....	81
Figura 51 Curva média das relutâncias com o carro partindo da esquerda para direita para as frequências de 60, 120 e 240 Hz.....	82
Figura 52 Curva média dos fluxos magnéticos produzidos no carro com este partindo da esquerda para direita para as frequências de 60, 120 e 240 Hz.....	82
Figura 53 Curva média do percentual dos fluxos magnéticos dispersos com o carro partindo da esquerda para direita para as frequências de 60, 120 e 240 Hz.....	83
Figura 54 Curva média de V_1 e V_2 do Transdutor I e II com o carro partindo da esquerda para direita para frequência de 60 Hz.....	84
Figura 55 Curva média dos fluxos magnéticos do Transdutor I e II com o carro partindo da esquerda para direita para frequência de 60 Hz.....	84
Figura 56 Curva média das relutâncias vista do carro do Transdutor I e II com o carro partindo da esquerda para direita para frequência de 60 Hz.....	85
Figura 57 Curva média dos fluxos magnéticos dispersos do Transdutor I e II com o carro partindo da esquerda para direita para frequência de 60 Hz.....	85
Figura 58 Comparação dos valores medidos e calculados do Transdutor I para frequência de 60 Hz.....	86
Figura 59 Representação da variação do fluxo magnético nas culatras do Transdutor I com a excursão do carro para frequência de 60 Hz.....	87
Figura 60 Curva uxH da régua, mostrando a excursão do carro para 60 Hz.....	87
Figura 61 Comparação dos valores medidos e calculados do Transdutor I para frequência de 60 Hz corrigindo os valores do fluxo total para cada posição do carro.....	88
Figura 62 Valores da indução magnética nas culatras laterais com a posição do carro do Transdutor I para frequência de 60 Hz.....	89
Figura 63 Comparação dos valores medidos e calculados do Transdutor I para frequência de 60 Hz corrigindo os valores do fluxo e da permeabilidade para cada posição do carro.....	89
Figura 64 Comparação dos valores medidos e calculados do Transdutor II para frequência de 60 Hz.....	90
Figura 65 Representação da variação do fluxo magnético nas culatras do Transdutor II com a excursão do carro para frequência de 60 Hz.....	91
Figura 66 Comparação dos valores medidos e calculados do Transdutor II para frequência de 60 Hz corrigindo os valores do fluxo total para cada posição do carro.....	92
Figura 67 Valores da indução magnética nas culatras laterais com a posição do carro do Transdutor II para frequência de 60 Hz.....	92
Figura 68 Comparação dos valores medidos e calculados do Transdutor II para frequência de 60 Hz corrigindo os valores do fluxo e da permeabilidade para cada posição do carro.....	93
Figura 69 Vista frontal de um transdutor sem entreferro de medição.....	94
Figura 70 Curva estática do Transdutor I para frequência de 60 Hz.....	99

Figura 71 Curva da tensão induzida de V_1 e V_2 pelo tempo do Transdutor I para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.....	100
Figura 72 Curva da tensão induzida de V_1 com a posição do carro do Transdutor I para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.....	101
Figura 73 Curva da tensão induzida de V_2 com a posição do carro do Transdutor I para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.....	101
Figura 74 Curva da tensão induzida de V_1 e V_2 pelo tempo do Transdutor I para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da direita.....	102
Figura 75 Curva da tensão induzida de V_1 com a posição do carro do Transdutor I para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da direita.....	103
Figura 76 Curva da tensão induzida de V_2 com a posição do carro do Transdutor I para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da direita.....	103
Figura 77 Curva estática de V_1 e V_2 do Transdutor II para frequência de 60 Hz.....	105
Figura 78 Curva da tensão induzida de V_1 e V_2 pelo tempo do Transdutor II para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.....	106
Figura 79 Curva da tensão induzida de V_1 com a posição do carro do Transdutor II para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.....	107
Figura 80 Curva da tensão induzida de V_2 com a posição do carro do Transdutor II para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.....	107
Figura 81 Curva da tensão induzida de V_1 e V_2 pelo tempo do Transdutor II para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da direita.....	108
Figura 82 Curva da tensão induzida de V_1 com a posição do carro do Transdutor II para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da direita.....	109
Figura 83 Curva da tensão induzida de V_2 com a posição do carro do Transdutor II para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da direita.....	109
Figura 84 Representação do sensor com fluxo c.a. para o caso dinâmico.....	111
Figura 85 Representação trigonométrica da equação 157.....	115
Figura 86 Representação trigonométrica da equação 166.....	116
Figura 87 Tensão induzida nas bobinas exploradoras no Transdutor I, caso estático e frequência de 60 Hz.....	121
Figura 88 Gráfico da diferença no Transdutor I relativa à parcela dinâmica em V_1 para $v=5;4;3;2;1$ m/s.....	123
Figura 89 Gráfico da diferença no Transdutor I relativa à parcela dinâmica em V_2 para $v=5;4;3;2;1$ m/s.....	124
Figura 90 Tensão induzida nas bobinas exploradoras no Transdutor II, caso estático e frequência de 60 Hz.....	125
Figura 91 Gráfico da diferença no Transdutor II relativa à parcela dinâmica em V_1 para $v=5$ m/s.....	127
Figura 92 Gráfico da diferença no Transdutor II relativa à parcela dinâmica em V_2 para $v=5$ m/s.....	127
Figura 93 Montagem da experiência com o Transdutor I.....	130
Figura 94 Montagem da experiência com o Transdutor II.....	130
Figura 95 Sinal de tensão na bobina da culatra lateral esquerda V_1 (a) e direita V_2 (b) para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4$ m/s.....	131
Figura 96 Sinal da corrente no eletroímã (a) e da tensão induzida na bobina exploradora do carro (b) para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4$ m/s.....	132
Figura 97 Gráfico da posição (a) e velocidade do carro (b) para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4$ m/s.....	132
Figura 98 Sinal de tensão de V_1 (a) e V_2 (b) de ida para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4$ m/s.....	131
Figura 99 Sinal da corrente no eletroímã do carro (a) e da tensão induzida no carro (b) na ida para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4$ m/s.....	133
Figura 100 Sinal de tensão de V_1 (a) e V_2 (b) de volta para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4$ m/s.....	133

Figura 101 Sinal da corrente no eletroímã do carro (a) e da tensão induzida no carro (b) na volta para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4$ m/s.....	134
Figura 102 Sinal de tensão da régua potenciométrica (a) e de $V_1(x)$ e $V_2(x)$ (b) com o ciclo de ida e o ciclo de volta para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4$ m/s...	134
Figura 103 Sinal da corrente no eletroímã do carro (a) e do fluxo magnético criado no carro (b) em valores <i>rms</i> de ida e volta para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4$ m/s.....	135
Figura 104 Parcela do sinal de tensão de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4$ m/s constante.....	135
Figura 105 Parcela de corrente (a) e tensão induzida no eletroímã (b) no ciclo de ida para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4$ m/s constante.....	136
Figura 106 Parcela do sinal de tensão de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4$ m/s constante.....	136
Figura 107 Parcela de corrente (a) e tensão induzida no eletroímã (b) no ciclo de volta para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4$ m/s constante.	136
Figura 108 Parcela do sinal de tensão da régua potenciométrica (a) e de $V_1(x)$ e $V_2(x)$ (b) com o ciclo de ida e volta para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4$ m/s constante.....	137
Figura 109 Parcela de corrente $I_c(x)$ (a) e $V_c(x)$ (b) no eletroímã no ciclo de ida e volta para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4$ m/s constante.....	137
Figura 110 Comparação das tensões estáticas e dinâmicas lentas de V_1 e V_2 no ciclo de ida para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2$ m/s constante.....	138
Figura 111 Comparação da corrente (a) e V_c (b) estático e dinâmico lento no carro para o ciclo de ida e volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2$ m/s constante.....	139
Figura 112 Comparação das tensões estáticas e dinâmicas lentas de V_1 e V_2 no ciclo de ida para frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2$ m/s constante.....	139
Figura 113 Comparação da corrente (a) e V_c (b) estático e dinâmico lento no carro para o ciclo de ida e volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2$ m/s constante.....	140
Figura 114 Comparação das tensões estáticas e dinâmicas lentas de V_1 e V_2 no ciclo de ida para frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2$ m/s constante.....	140
Figura 115 Comparação da corrente (a) e V_c (b) estático e dinâmico lento no carro para o ciclo de ida e volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2$ m/s constante.....	141
Figura 116 Comparação das tensões estáticas e dinâmicas lentas de V_1 e V_2 no ciclo de ida para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2$ m/s constante.....	142
Figura 117 Comparação da corrente (a) e V_c (b) estático e dinâmico lento no carro para o ciclo de ida e volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2$ m/s constante.....	142
Figura 118 Comparação das tensões estáticas e dinâmicas lentas de V_1 e V_2 no ciclo de ida para frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2$ m/s constante.....	143
Figura 119 Comparação da corrente (a) e V_c (b) estático e dinâmico lento no carro para o ciclo de ida e volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2$ m/s constante.....	143
Figura 120 Comparação das tensões estáticas e dinâmicas lentas de V_1 e V_2 no ciclo de ida para frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2$ m/s constante.....	144
Figura 121 Comparação da corrente estática e dinâmica lenta no carro para o ciclo de ida e volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2$ m/s constante....	144
Figura 122 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	148

Figura 123 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	148
Figura 124 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	148
Figura 125 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 V_2 e no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	149
Figura 126 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	149
Figura 127 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	149
Figura 128 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.....	150
Figura 129 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.....	150
Figura 130 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda.....	150
Figura 131 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.....	151
Figura 132 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita.....	151
Figura 133 Comparação a diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita.....	151
Figura 134 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	152
Figura 135 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	152
Figura 136 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	152
Figura 137 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	153
Figura 138 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	153
Figura 139 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	153
Figura 140 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.....	154
Figura 141 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita.....	154
Figura 142 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e (b) V_2 no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita.....	154
Figura 143 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e (b) V_2 no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.....	155

Figura 144 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e (b) V_2 no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.....	155
Figura 145 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e (b) V_2 no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.....	155
Figura 146 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.....	156
Figura 147 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.....	156
Figura 148 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda.....	156
Figura 149 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.....	157
Figura 150 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita.....	157
Figura 151 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita.....	157
Figura 152 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	159
Figura 153 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	159
Figura 154 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	159
Figura 155 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	160
Figura 156 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	160
Figura 157 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	160
Figura 158 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.....	161
Figura 159 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.....	161
Figura 160 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda.....	161
Figura 161 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.....	162
Figura 162 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita.....	162
Figura 163 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita.....	162
Figura 164 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	163
Figura 165 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	163
Figura 166 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	163

Figura 167 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	164
Figura 168 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	164
Figura 169 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	164
Figura 170 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.....	165
Figura 171 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita.....	165
Figura 172 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita.....	165
Figura 173 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.....	166
Figura 174 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.....	166
Figura 175 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.....	166
Figura 176 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.....	167
Figura 177 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.....	167
Figura 178 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda.....	167
Figura 179 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.....	168
Figura 180 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita.....	168
Figura 181 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita.....	168
Figura 182 Comparação entre o valor dinâmico de $S(x)$ para $v = 0,2$ m/s e o valor estático do Transdutor I para o ciclo de ida e volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.....	169
Figura 183 Comparação entre o valor dinâmico de $S(x)$ para $v = 0,2$ m/s e o valor estático do Transdutor I para o ciclo de ida e volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.....	170
Figura 184 Comparação entre o valor dinâmico de $S(x)$ para $v = 0,2$ m/s e o valor estático do Transdutor II para o ciclo de ida e volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.....	171
Figura 185 Comparação entre o valor dinâmico de $S(x)$ para $v = 0,2$ m/s e o valor estático do Transdutor II para o ciclo de ida e volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.....	171
Figura 186 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor I para o ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.....	172
Figura 187 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor I para o ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.....	173
Figura 188 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor I para o ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.....	173
Figura 189 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor I para o ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.....	174
Figura 190 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor II para o ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.....	175

Figura 191 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor II para o ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.....	175
Figura 192 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor II para o ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.....	176
Figura 193 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor I para o ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.....	176
Figura 194 Variação do sinal em V_1 com o tempo até atingir a estabilização do Transdutor I com o carro partindo da esquerda para frequência de 60 Hz.....	181
Figura 195 Variação do sinal em V_2 com o tempo até atingir a estabilização do Transdutor I com o carro partindo da esquerda para frequência de 60 Hz.....	182
Figura 196 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz.....	190
Figura 197 Gráfico dos desvios padrões da posição x para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz.....	191
Figura 198 Gráfico do pior caso dos desvios padrões de V_1 e V_2 para o ciclo de ida e volta com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz.....	191
Figura 199 Gráfico dos desvios padrões da corrente I_c para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz.....	192
Figura 200 Gráfico dos desvios padrões do fluxo magnético no carro $\phi_c(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz.....	192
Figura 201 Curva média de subida e descida de $S(x)$ com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz.....	193
Figura 202 Gráfico dos desvios padrões $S(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz.....	193
Figura 203 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=60$ Hz.....	194
Figura 204 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=120$ Hz.....	194
Figura 205 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=120$ Hz.....	195
Figura 206 Gráfico dos desvios padrões da posição x para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=120$ Hz.....	195
Figura 207 Gráfico do pior caso dos desvios padrões de V_1 e V_2 para o ciclo de ida e volta com o carro partindo da direita para esquerda com $f=120$ Hz.....	196
Figura 208 Gráfico dos desvios padrões da corrente I_c para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=120$ Hz.....	196
Figura 209 Gráfico dos desvios padrões do fluxo magnético no carro $\phi_c(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=120$ Hz.....	197
Figura 210 Curva média de subida e descida de $S(x)$ com o carro partindo da direita para esquerda com $f=120$ Hz.....	197
Figura 211 Gráfico dos desvios padrões $S(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=120$ Hz.....	198
Figura 212 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=240$ Hz.....	198
Figura 213 Gráfico dos desvios padrões da posição x para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=240$ Hz.....	199
Figura 214 Gráfico do pior caso dos desvios padrões de V_1 e V_2 para o ciclo de ida e volta com o carro partindo da esquerda para direita com $f=240$ Hz.....	199
Figura 215 Gráfico dos desvios padrões da corrente I_c para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=240$ Hz.....	200
Figura 216 Gráfico dos desvios padrões do fluxo magnético no carro $\phi_c(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=240$ Hz.....	200
Figura 217 Curva média de subida e descida de $S(x)$ com o carro partindo da esquerda para direita com $f=240$ Hz.....	201

Figura 218 Gráfico dos desvios padrões $S(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=240$ Hz.....	201
Figura 219 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=240$ Hz.....	202
Figura 220 Curva média V_1 e V_2 com o carro partindo da direita e da esquerda com $f=60$ Hz.....	202
Figura 221 Curva média V_1 e V_2 com o carro partindo da direita e da esquerda com $f=120$ Hz.....	203
Figura 222 Curva média V_1 e V_2 com o carro partindo da direita e da esquerda com $f=240$ Hz.....	203
Figura 223 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz.....	204
Figura 224 Gráfico dos desvios padrões da posição x para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz.....	205
Figura 225 Gráfico do pior caso dos desvios padrões de V_1 e V_2 para o ciclo de ida e volta com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz.....	205
Figura 226 Gráfico dos desvios padrões da corrente I_c para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz.....	206
Figura 227 Gráfico dos desvios padrões do fluxo magnético no carro $\phi_c(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz.....	206
Figura 228 Curva média de subida e descida de $S(x)$ com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz.....	207
Figura 229 Gráfico dos desvios padrões $S(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz.....	207
Figura 230 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=60$ Hz.....	208
Figura 231 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=120$ Hz.....	208
Figura 232 Gráfico dos desvios padrões da posição x para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=120$ Hz.....	209
Figura 233 Gráfico do pior caso dos desvios padrões de V_1 e V_2 para o ciclo de ida e volta com o carro partindo da esquerda para direita com $f=120$ Hz.....	209
Figura 234 Gráfico dos desvios padrões da corrente I_c para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=120$ Hz.....	210
Figura 235 Gráfico dos desvios padrões do fluxo magnético no carro $\phi_c(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=120$ Hz.....	210
Figura 236 Curva média de subida e descida de $S(x)$ com o carro partindo da esquerda para direita com $f=120$ Hz.....	210
Figura 237 Gráfico dos desvios padrões $S(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz.....	210
Figura 238 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=120$ Hz.....	212
Figura 239 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=240$ Hz.....	212
Figura 240 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=240$ Hz.....	213
Figura 241 Gráfico dos desvios padrões da posição x para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=240$ Hz.....	213
Figura 242 Gráfico do pior caso dos desvios padrões de V_1 e V_2 para o ciclo de ida e volta com o carro partindo da direita para esquerda com $f=240$ Hz.....	214
Figura 243 Gráfico dos desvios padrões da corrente I_c para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=240$ Hz.....	214
Figura 244 Gráfico dos desvios padrões do fluxo magnético no carro $\phi_c(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=240$ Hz.....	214
Figura 245 Curva média de subida e descida de $S(x)$ com o carro partindo da direita para esquerda com $f=240$ Hz.....	215

Figura 246 Gráfico dos desvios padrões $S(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=240$ Hz.....	216
Figura 247 Curva média V_1 e V_2 com o carro partindo da direita e da esquerda com $f=60$ Hz.....	218
Figura 248 Curva média V_1 e V_2 com o carro partindo da direita e da esquerda com $f=120$ Hz.....	217
Figura 249 Curva média V_1 e V_2 com o carro partindo da direita e da esquerda com $f=240$ Hz.....	217
Figura 250 Gráfico das curvas do pior caso na frequência de 60 Hz do Transdutor I dos desvios padrões de V_1 e ou V_2 dinâmicos do ciclo de ida e volta que ocorre na velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.	218
Figura 251 Gráfico das curvas do pior caso na frequência de 120 Hz do Transdutor I dos desvios padrões de V_1 e/ou V_2 dinâmicos do ciclo de ida e volta que ocorre na velocidade de 5 m/s com o carro partindo da direita.....	219
Figura 252 Gráfico das curvas do pior caso na frequência de 240 Hz do Transdutor I dos desvios padrões de V_1 e/ou V_2 dinâmicos do ciclo de ida e volta que ocorre na velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.....	219
Figura 253 Gráfico das curvas do pior caso na frequência de 60 Hz do Transdutor II dos desvios padrões de V_1 e/ou V_2 dinâmicos do ciclo de ida e volta que ocorre na velocidade de 4 m/s com o carro partindo da esquerda.....	220
Figura 254 Gráfico das curvas do pior caso na frequência de 120 Hz do Transdutor II dos desvios padrões de V_1 e/ou V_2 dinâmicos do ciclo de ida e volta que ocorre na velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.....	220
Figura 255 Gráfico das curvas do pior caso na frequência de 240 Hz do Transdutor II dos desvios padrões de V_1 e/ou V_2 dinâmicos do ciclo de ida e volta que ocorre na velocidade de 0,2 m/s com o carro partindo da direita.....	221
Figura 256 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de ida de $S(x)$ dinâmico no Transdutor I para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da esquerda para $f=60$ Hz	221
Figura 257 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de volta de $S(x)$ dinâmico no Transdutor I para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da esquerda para $f=60$ Hz	222
Figura 258 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de ida de $S(x)$ dinâmico no Transdutor I para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da direita para $f=60$ Hz	222
Figura 259 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de volta de $S(x)$ dinâmico no Transdutor I para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da direita para $f=60$ Hz	223
Figura 260 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de ida de $S(x)$ dinâmico no Transdutor II para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da esquerda para $f=60$ Hz	223
Figura 261 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de volta de $S(x)$ dinâmico no Transdutor II para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da esquerda para $f=60$ Hz	224
Figura 262 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de ida de $S(x)$ dinâmico no Transdutor II para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da direita para $f=60$ Hz	224
Figura 263 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de volta de $S(x)$ dinâmico no Transdutor II para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da direita para $f=60$ Hz	225
Figura 264 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida do Transdutor I na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda com os pontos de dispersão gerados pelo Matlab para $v=0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	225
Figura 265 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida do Transdutor I na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda com as médias das curvas geradas pelo Excel para $v=0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.....	226
Figura 264 Curva média comparativa dos valores de tensão <i>rms</i> dos multímetros Agilent e o DAQ de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda com $f=60$ Hz.....	228

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Conversão de números decimais e binários em código Gray.....	26
Tabela 2 Parâmetros dimensionais dos transdutores.....	46
Tabela 3 Comparação entre o sinal devido ao efeito da velocidade com o sinal estático para o Transdutor I em $x=0$	104
Tabela 4 Comparação entre o sinal devido ao efeito da velocidade com o sinal estático para o Transdutor II em $x=0$	110
Tabela 5 Comparação no Transdutor I entre os valores estáticos e dinâmicos de V_1 para $v=5\text{m/s}$	122
Tabela 6 Comparação no Transdutor I entre os valores estáticos e dinâmicos de V_2 para $v=5\text{m/s}$	123
Tabela 7 Comparação no Transdutor II entre os valores estáticos e dinâmicos de V_1 para $v=5\text{m/s}$	126
Tabela 8 Comparação no Transdutor II entre os valores estáticos e dinâmicos de V_2 para $v=5\text{m/s}$	126
Tabela 9 Valores das taxas de aquisição para cada velocidade.....	129

LISTA DE ABREVIATURAS

B_1	Densidade de fluxo magnético no entreferro 1	[T]
B_2	Densidade de fluxo magnético no entreferro 2	[T]
B_i	Indução magnética no entreferro i	[Wb/m ² ou T]
D	Refere-se à relutância que está à direita do carro	
d	Refere-se à dispersão	
E	Refere-se à relutância que está à esquerda do carro	
E_m	Tensão externa aplicada a um eletroímã	[V]
e	Refere-se a entreferro entre culatra e carro	
f	Frequência	[Hz]
\mathfrak{S}_m	Força magneto-motriz do eletroímã	[Ae]
\mathfrak{S}	Força magneto-motriz	[Ae]
H	Intensidade de campo magnético	[Ae/m]
H	Refere-se à culatra ferromagnética horizontal quando usado como índice	
H_m	Campo magnético criado pelo carro	[Ae/m]
$-H_m l_m$	Força magneto-motriz	[Ae]
I	Refere-se às peças que estão na parte inferior quando usado como índice	
I_c	Corrente no eletro-ímã do carro	[A]
I	Corrente na bobina	[A]
J	Densidade de corrente	[A/m ²]
k_c	Fator de empilhamento	
l_m	Comprimento axial da bobina	[m ou mm]
l_e	Comprimento do entreferro entre o afastador e a culatra	[m ou mm]
l	Comprimento do caminho magnético	[m ou mm]
L_f	Fator de fluxo magnético disperso	
L_0	Indutância do sistema	[Henry]
M_{0j}	Indutância Mútua da bobina j e o sistema	[Henry]
N	Número total de espiras na bobina	
N_m	Número de espiras do eletroímã	
N_1	Número de espiras da bobina 1	
N_2	Número de espiras da bobina 2	
NI	Força magneto-motriz da bobina	[Ae]
\mathfrak{R}	Relutância magnética	[Ae/Wb ou 1/Henry]
\mathfrak{R}_{el}	Relutância inferior entre os afastadores e a culatra	[Ae/Wb ou 1/Henry]
\mathfrak{R}_{es}	Relutância superior entre os afastadores e a culatra	[Ae/Wb ou 1/Henry]
\mathfrak{R}_e	Relutância total entre os afastadores e a culatra	[Ae/Wb ou 1/Henry]

\mathcal{R}^*	A parte da relutância ferromagnética que está entre a relutância de dispersão e o carro	[Ae/Wb ou 1/Henry]
S	Refere-se às peças que estão na parte superior quando usado como índice	
S_e	Seção do afastador	[m ² ou mm ²]
S	Seção transversal do caminho magnético	[m ² ou mm ²]
S_i	Seção transversal do entreferro i	[m ² ou mm ²]
$S(x)$	Sinal de saída diferencial	
V	Refere-se à culatra ferromagnética vertical quando usado como índice	
V_1 ou $V1$	Tensão eficaz induzida na bobina 1	[V]
V_2 ou $V2$	Tensão eficaz induzida na bobina 2	[V]
V_c	Tensão eficaz induzida na bobina exploradora no carro	[V]
V_m	Tensão eficaz senoidal aplicada no eletroímã	[V]
v	Velocidade de deslocamento do carro	[m/s]
w	Velocidade angular	
z	Espessura do transdutor	[m ou mm]
ϕ	Fluxo magnético	[Wb]
ϕ_e	Fluxo magnético do ímã permanente que alcança a porção ferromagnética do outro lado do entreferro	[Wb]
ϕ_c	Fluxo magnético criado no carro	[Wb]
ϕ_1	Fluxo magnético efetivo por \mathcal{R}_{gE}	[Wb]
ϕ_2	Fluxo magnético efetivo por \mathcal{R}_{gD}	[Wb]
ϕ_{dE}	Fluxo magnético de dispersão efetivo entre as culatras superior e inferior à esquerda do carro	[Wb]
ϕ_{dD}	Fluxo magnético de dispersão efetivo entre as culatras superior e inferior à direita do carro	[Wb]
ϕ_1^*	Fluxo magnético total à esquerda	[Wb]
ϕ_2^*	Fluxo magnético total à direita	[Wb]
ϕ_e	Fluxo magnético efetivo que entre nas culatras	[Wb]
ϕ_m	Fluxo magnético produzido pelo eletroímã	[Wb]
ϕ_l	Fluxo magnético disperso entre o carro e a armadura	[Wb]
ϕ_i	Fluxo magnético através da área S_i	[Wb]
μ_0	Permeabilidade do vácuo	[T/(Ae/m)]
$\mu_{Eq\ ef}$	Permeabilidade equivalente efetiva	[T/(Ae/m)]

1. ESTADO DA ARTE

Apesar de haver vários tipos de sensores de posição linear, independente de seus princípios de funcionamento, mas pouco se apresenta na literatura até o presente momento quanto à análise do erro dinâmico devido à velocidade, que está presente na régua magnética. Não foi encontrado outro sensor de posição onde a grandeza física que estava sendo medida fosse alterada pelo efeito da velocidade, a não ser o LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*); porém não foi encontrado na literatura qualquer menção do efeito da velocidade sobre o sinal de saída do LVDT.

A literatura apresenta mais comumente trabalhos a cerca do erro dinâmico que ocorre no condicionador de sinais. Este erro é o tempo de resposta do condicionador a uma função salto na entrada, ou seja, é o atraso da resposta do condicionador de sinais. Isto nada mais é do que o tempo que o condicionador precisa para processar o sinal de entrada e fornecer o sinal de saída.

Por outro lado, a modelagem matemática desenvolvida neste trabalho para a diferença dinâmica também pode ser aplicado ao LVDT. Tem-se para este último, pela modelagem matemática, que o erro dinâmico é inversamente proporcional à frequência, e como os LVDTs funcionam com frequências muito altas, este erro seria desprezível para eles.

Na secção seguinte alguns dos sensores de posição mais utilizados com deslocamentos em velocidades altas serão apresentados.

1.1. SENSORES DE POSIÇÃO E VELOCIDADE

Os sensores de posição lineares ou angulares mais utilizados em processos com velocidades de deslocamento muito rápidas, principalmente em máquinas CNC, são basicamente de três tipos: Resistivos, Indutivos e Ópticos.

1.1.1. Resistivos ou Potenciométricos

Podem ser dos tipos posição linear ou angular.

Quando se aplica uma tensão nos extremos de um potenciômetro linear, a tensão entre o extremo inferior e o centro (cursor) é proporcional à posição linear (potenciômetro deslizante) ou angular (rotativo), e o sinal não é afetado pela velocidade de deslocamento.

Nos sistemas de controle usam-se potenciômetros especiais, de alta linearidade e dimensões adequadas, de fio metálico em geral, com menor desgaste.

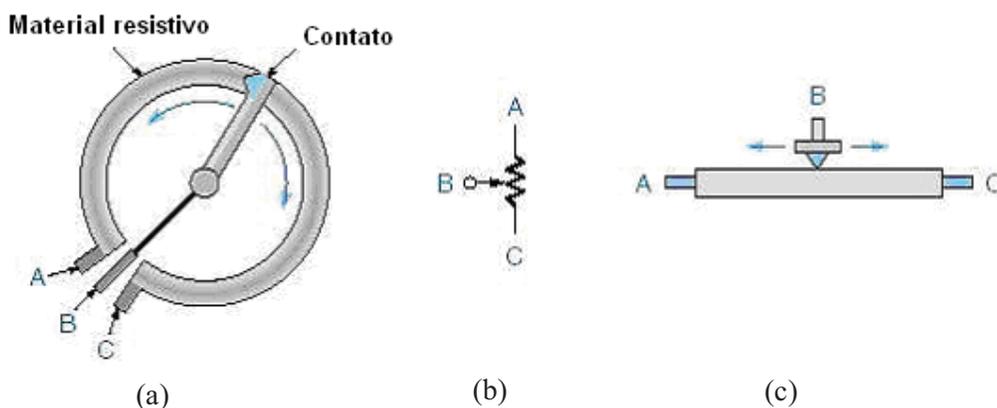


Figura 1 Sensor resistivo a) Angular, b) Símbolo, c) Linear [KILLIAN]

Vantagens:

- de baixo custo;
- simples;
- robustos;
- produz como resultado a posição absoluta.

Desvantagens:

- desgaste e ruído elétrico devido aos contatos;
- baixa imunidade a ruído externo.

1.1.2 Indutivos

Dentre os sensores indutivos destaca-se o LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). Sua estrutura consiste num transformador de acoplamento variável. Dois enrolamentos secundários de mesmas características são enrolados nas extremidades do eixo longitudinal do núcleo de alta permeabilidade. O enrolamento primário fica situado na região central do núcleo. Os secundários são ligados em série, mas com tensões opostas, para que se obtenha uma faixa de maior linearidade do sinal de saída. O acoplamento magnético entre primário e secundário é alterado pelo movimento do núcleo de alta permeabilidade, Figura 2, ou seja o êmbolo.

O enrolamento primário é excitado com um sinal senoidal. O campo magnético alternado induz praticamente as mesmas tensões em ambos os enrolamentos secundários. A tensão de saída será então o resultado da diferença entre as tensões nas duas bobinas. Se o êmbolo estiver simetricamente localizado em relação aos extremos, as tensões de ambos os enrolamentos secundários serão iguais, e o sinal de saída total será zero.

O funcionamento deste sensor dá como saída um sinal linear, proporcional ao deslocamento do êmbolo que está fixado ou em contato com o corpo cuja a posição que se deseja medir.

De acordo com a movimentação do núcleo de alta permeabilidade, a indutância mútua entre primário e secundário muda, fazendo com que as tensões nas bobinas secundárias mudem também.

Quando o núcleo é movimentado em uma direção a tensão em uma das bobinas secundárias aumenta enquanto na outra diminui, fazendo com que a tensão aumente de zero para um máximo. Esta tensão está em fase com a tensão primária. Quando o núcleo se move em outra direção, a tensão de saída também aumenta de zero para um máximo, mas sua fase é oposta à fase primária. A amplitude da tensão de saída é proporcional à distância movida pelo núcleo (até o seu limite de curso), sendo por isso a denominação "linear" para o sensor. Assim, a fase da tensão indica a direção do deslocamento, Figura 3. Com o uso de um condicionador de sinais obtém-se um sinal de saída $S(x)$

$$S(x) = (V_1 - V_2) / (V_1 + V_2) \dots \dots \dots (1)$$

Neste caso o sinal de tensão de V_1 e V_2 são retificados dentro do condicionador.

O LVDT é usado em posicionadores de precisão, desde frações de mm até dezenas de cm. São também usado em máquinas ferramentas, CNC e robôs industriais

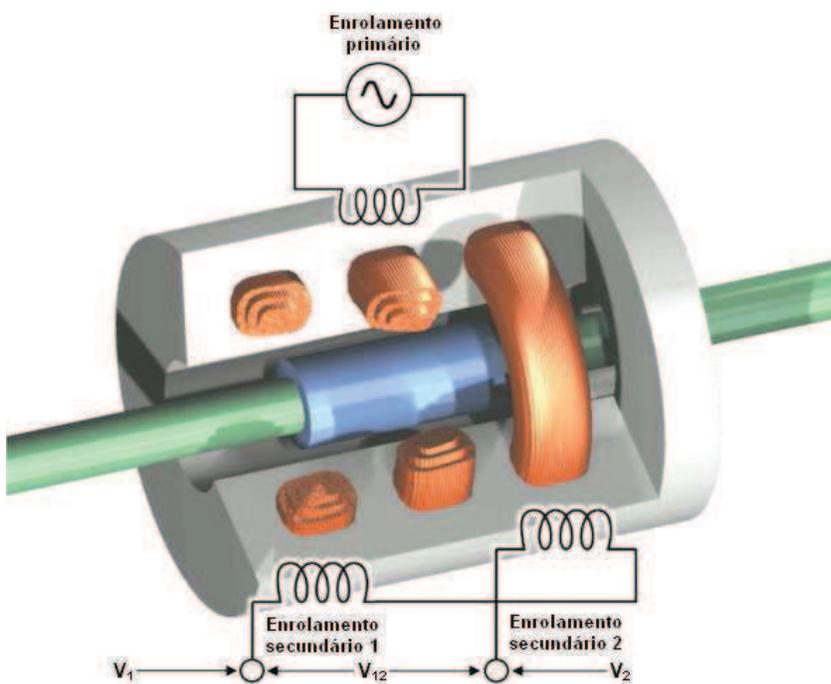


Figura 2 LVDT com acoplamento central [KILLIAN]

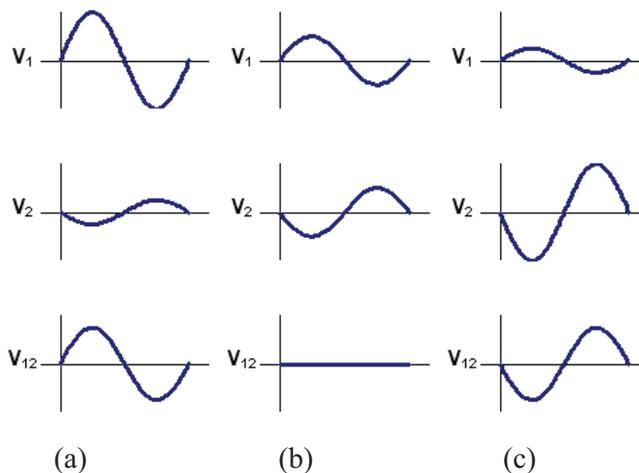


Figura 3 Sinal de saída para o acoplamento (a) esquerdo, (b) central, (c) direito [KILLIAN]

Vantagens:

- alta resolução;
- boa sensibilidade.

Desvantagens:

- necessita de freqüente calibração;
- seu condicionamento do sinal também é mais elaborado.

1.1.3 Ópticos

Podem ser lineares ou rotativos (angulares). Em ambos os casos, o princípio de operação é o mesmo.

São sensores que atuam por transmissão de luz. São chamados de *encoders* (codificadores) lineares ou rotacionais, que determinam a posição através de um disco ou trilho marcado, Figura 4.

Dividem-se em relativos, nos quais a posição é demarcada por contagem de pulsos transmitidos, acumulados ao longo do tempo, e absolutos, onde há um código digital gravado no disco ou trilho, Figura 5, lido por um conjunto de sensores ópticos (diodos LED e sensor). Os códigos adotados são os de Gray, Tabela 1, nos quais de um número para o seguinte só muda um bit, o que facilita a identificação e correção de erros.

A demarcação do disco ou trilho é feita através de furo ou ranhuras, ou por impressão num disco plástico, Figura 4, ou trilho transparente, que podem ser feitos através de técnicas fotolitográficas, permitindo grande precisão e dimensões micrométricas.

A fonte de luz é geralmente o LED, e o sensor, um fotodiodo ou fototransistor.

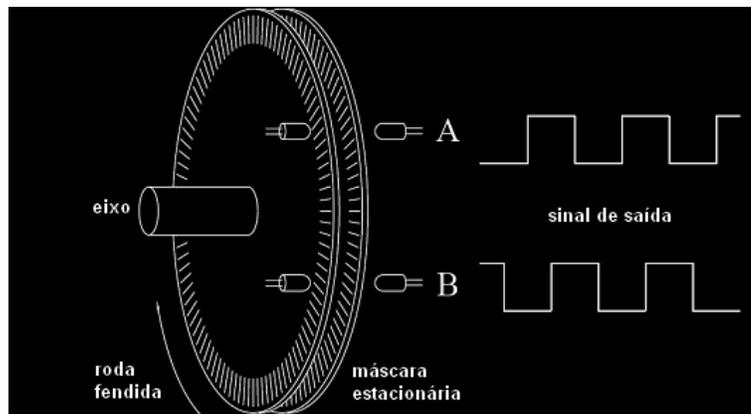


Figura 4 Diagrama esquemático de um *encoder* [GONÇALVES]

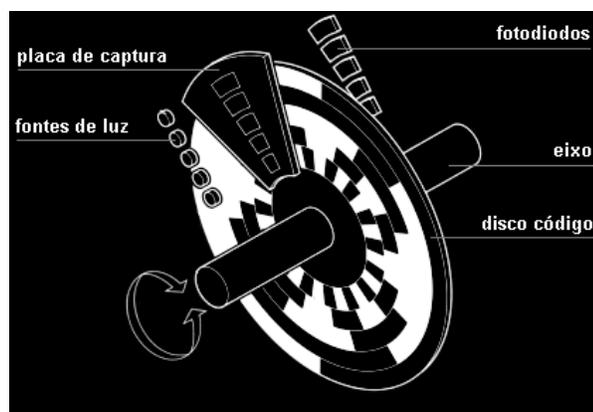


Figura 5 O código Gray adotado nos *encoders* absolutos [GONÇALVES]

Tabela 1 Conversão de números decimais e binários em código Gray

Decimal	Binário	Código Gray
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

Estes sensores são muito precisos e práticos em sistemas digitais (*encoder* absoluto), e são usados em robôs, máquinas-ferramenta e CNC.

Há uma tendência do uso deste tipo de sensor de posição nas grandes indústrias de máquinas CNC onde a velocidade do processo é muito alta.

Vantagens:

- a saída é diretamente digital;
- fornece saída absoluta;
- não há contato físico para a detecção;
- tem alta repetitividade.
- não tem reação magnética.

Desvantagens:

- preço maior em função da precisão de construção;
- o mau alinhamento das fotocélulas pode gerar erros de leitura no caso de código binário.

2. O TRANSDUTOR DE POSIÇÃO MAGNÉTICO

O objetivo deste trabalho é analisar o funcionamento da régua magnética sob o efeito de velocidade. Para tanto, é focado o desvio da resposta do transdutor quando este se move com velocidade constante. Como a velocidade altera a grandeza física que está sendo medida, se quer entender o quão ela é significativa nas bobinas exploradoras e se o sinal de saída diferencial do transdutor também é por ela influenciado.

Neste capítulo tem-se uma breve revisão do princípio de funcionamento do transdutor, do tipo de transdutor utilizado neste trabalho além de uma análise resumida da modelagem e da resposta estática [MULLER 2003].

O desenvolvimento completo da modelagem do transdutor pode ser vista no capítulo 3.

2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento do transdutor proposto é simples: o dispositivo consta de uma culatra constituída de um material ferromagnético de alta permeabilidade em forma de retângulo, Figura 6, sendo que suas partes de maior comprimento ou horizontais são retas e de mesma seção; uma fonte de fluxo magnético colocado entre as culatras horizontais produz um fluxo no circuito magnético. Quando desloca-se a fonte (carro) linearmente entre as partes de maior comprimento (na janela) e na direção longitudinal por elas definida, o circuito magnético é modificado, proporcionando uma mudança na distribuição do fluxo magnético na estrutura. Essa mudança é função da posição relativa do carro em relação às culatras laterais ou ao fim de curso do transdutor.

O transdutor pode ser de dois tipos:

- a) com entreferro nas culatras laterais;
- b) sem entreferro nas culatras laterais.

O transdutor utilizado neste trabalho será do tipo sem entreferro.

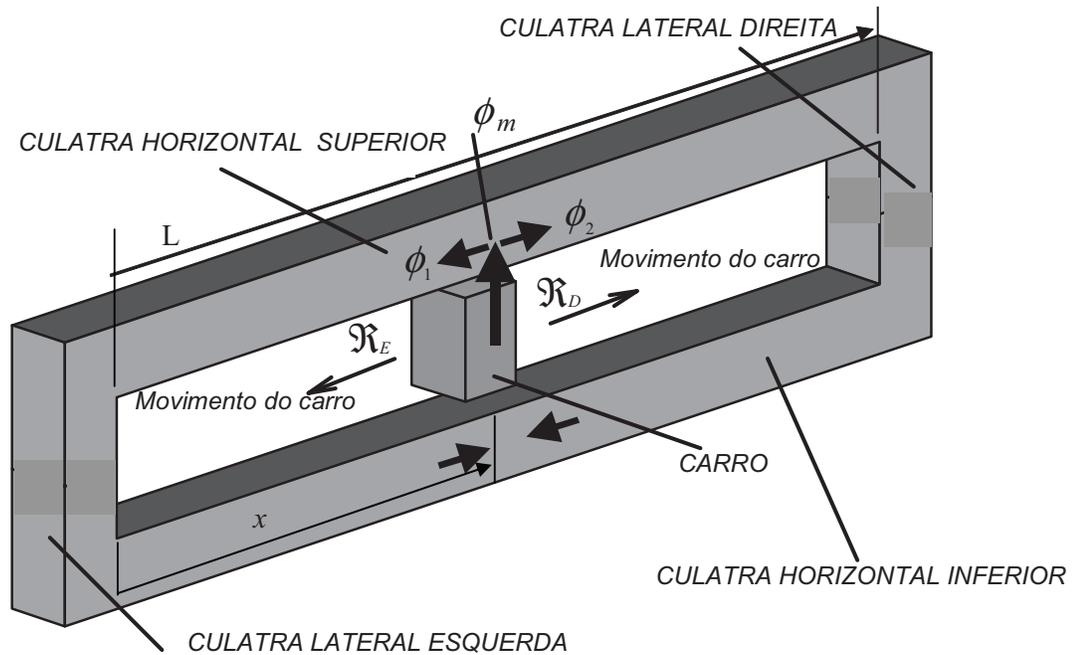


Figura 6 Vista geral do transdutor proposto

De forma simplificada, o princípio de divisão de fluxo magnético pode ser explicado e aplicado ao transdutor proposto com base na analogia magnética do divisor de corrente em um circuito elétrico.

A partir da Figura 6, pode-se dizer que:

$$\phi_1 = \phi_m \frac{\mathcal{R}_D}{\mathcal{R}_D + \mathcal{R}_E} \quad (2)$$

e

$$\phi_2 = \phi_m \frac{\mathcal{R}_E}{\mathcal{R}_D + \mathcal{R}_E} \quad (3)$$

onde

ϕ_m é o fluxo magnético produzido pela fonte,

ϕ_1 é o fluxo magnético que se divide à esquerda do carro,

ϕ_2 é o fluxo magnético que se divide à direita do carro,

\mathfrak{R}_E é a relutância ferromagnética total à esquerda do carro e

\mathfrak{R}_D é a relutância ferromagnética total à direita do carro.

De forma simples e ideal, se despreza a relutância ferromagnética da culatra lateral por ser muito pequena em relação às relutâncias totais à esquerda e à direita do carro. Assim tem-se que:

$$\mathfrak{R}_E = \frac{1}{\mu} \frac{2x}{S_{mag}} \quad (4)$$

e

$$\mathfrak{R}_D = \frac{1}{\mu} \frac{2(L-x)}{S_{mag}} \quad (5)$$

onde

x é a distância da culatra lateral esquerda até o carro com $x \neq 0$

L é comprimento do transdutor,

μ é a permeabilidade ferromagnética das culatras e

S_{mag} é a seção das culatras.

Aplicando 4 e 5 em 2 e 3 tem-se:

$$\phi_1 = \phi_m \frac{(L-x)}{L} \quad (6)$$

e

$$\phi_2 = \phi_m \frac{x}{L} \quad (7)$$

Então, considerando-se condições ideais, isto é: permeabilidade μ constante e uniforme no circuito magnético, seção magnética S_{mag} uniforme e relutâncias que dependem da posição do carro, o fluxo magnético de excitação se divide em ϕ_1 e ϕ_2 de forma linear com a posição x .

3. MODELAGEM TEÓRICA

Nesta seção se tratará da modelagem matemática para se obter uma equação que descreva o sinal de saída em função da posição do carro para o transdutor sem entreferro. Devido à complexidade do efeito da histerese magnética em termos de modelagem nos casos considerados, ela não será considerada nesta análise teórica onde o transdutor será representado por um circuito de relutâncias magnéticas.

3.1 MODELAGEM TEÓRICA DO TRANSDUTOR SEM ENTREFERRO DE MEDIÇÃO

A lei básica para determinar um modelo teórico onde se tem corrente elétrica e campo magnético é a lei circuital de Ampère.

$$\int_S \vec{J} d\vec{a} = \oint \vec{H} d\vec{l} = NI \quad (8)$$

para o eletroímã e onde

\vec{J} é o vetor densidade de corrente,

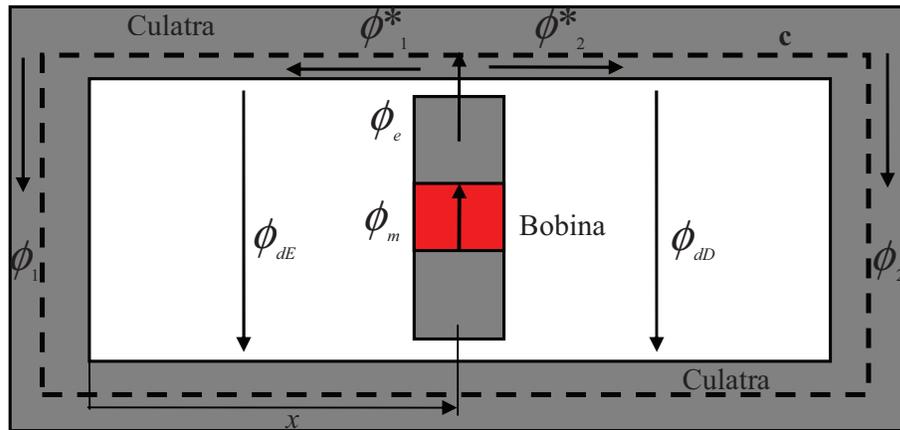
\vec{H} é o vetor intensidade do campo magnético,

S é a superfície plana por onde passa a corrente,

N é o número de espiras do eletroímã e

I é a corrente no eletroímã.

A solução da equação acima pode ser muito complexa, pois envolve conhecimento do comportamento de \vec{H} em toda extensão do material ferromagnético do dispositivo. Pode-se então, adotar inicialmente um modelo matemático mais simples, como o das relutâncias distribuídas ou de rede de relutâncias. Para isto, baseia-se no desenho esquemático da distribuição do fluxo magnético do transdutor da Figura 7, onde a fonte de fluxo magnético pode ser um ímã ou um eletroímã alimentado com corrente contínua ou alternada.



Agora, com base no desenho da Figura 7, pode-se desenvolver um modelo de relutâncias distribuídas ou também chamado de análogo elétrico, onde a relutância é definida como:

$$\mathfrak{R} = \frac{\int \vec{H} d\vec{l}}{\int_S \vec{B} d\vec{S}} = \frac{\mathfrak{S}_c}{\phi} = \frac{l}{\mu \cdot S} \quad (9)$$

sendo

\mathfrak{R} a relutância magnética,

\vec{B} a indução magnética,

ϕ o fluxo magnético,

\mathfrak{S}_c o potencial magnético ao longo do caminho c ,

l o comprimento do caminho estabelecido pelo fluxo magnético e

S a seção magnética.

A idéia é representar por relutâncias distintas as partes do transdutor por onde se estabelecem os diferentes fluxos representados na Figura 7. Assim na Figura 8 obtém-se a representação dada pela Figura 7.

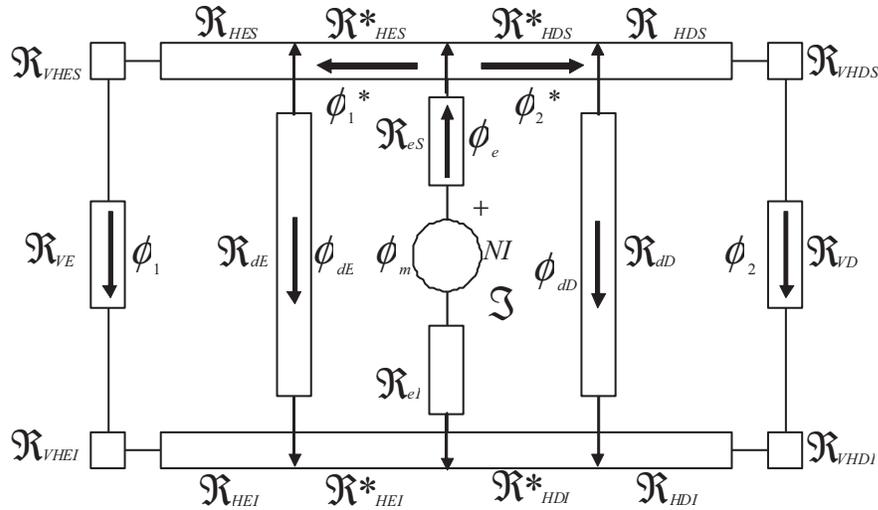


Figura 8 - Modelo de relutâncias distribuídas sem entreferro de medição

Nela:

\mathcal{R}^* é a parte da relutância ferromagnética que está entre a relutância de dispersão e o ímã permanente ou eletroímã c.c. ou c.a.;

H refere-se à culatra ferromagnética horizontal ou longitudinal quando usado como índice;

V refere-se à culatra ferromagnética vertical ou transversal quando usado como índice;

E refere-se à esquerda do ímã permanente ou eletroímã;

D refere-se à direita do ímã permanente ou eletroímã;

S refere-se às peças que estão na parte superior quando usado como índice;

I refere-se às peças que estão na parte inferior quando usado como índice;

d refere-se à dispersão do fluxo magnético;

e refere-se ao entreferro entre culatra e o carro;

ϕ_m é o fluxo magnético de excitação produzido pela fonte de fluxo magnético;

ϕ_e é o fluxo magnético efetivo através das cultras;

ϕ_1^* é o fluxo magnético total à esquerda;

ϕ_2^* é o fluxo magnético total à direita;

ϕ_1 é o fluxo magnético efetivo na culatra lateral esquerda;

ϕ_2 é o fluxo magnético efetivo na culatra lateral direita;

ϕ_{dE} é o fluxo magnético disperso efetivo entre as culatras superior e inferior à esquerda do eletroímã; e

ϕ_{dD} é o fluxo magnético disperso efetivo entre as culatras superior e inferior à direita do eletroímã.

Como uma característica do transdutor é sua simetria entre as duas culatras horizontais ou longitudinais, superior e inferior, aglutinam-se os termos comuns das relutâncias ferromagnéticas superior e inferior em uma só; assim:

$$\mathcal{R}_{HE} = \mathcal{R}_{HES} + \mathcal{R}_{HEI} \quad (10)$$

$$\mathcal{R}^*_{HE} = \mathcal{R}^*_{HES} + \mathcal{R}^*_{HEI} \quad (11)$$

$$\mathcal{R}_{VE} = \mathcal{R}_{VES} + \mathcal{R}_{VEI} \quad (12)$$

$$\mathcal{R}_{VHE} = \mathcal{R}_{VHES} + \mathcal{R}_{VHEI} \quad (13)$$

De forma análoga para o lado direito, pode-se escrever:

$$\mathcal{R}_{HD} = \mathcal{R}_{HDS} + \mathcal{R}_{HDI} \quad (14)$$

$$\mathcal{R}^*_{HD} = \mathcal{R}^*_{HDS} + \mathcal{R}^*_{HDI} \quad (15)$$

$$\mathcal{R}_{VD} = \mathcal{R}_{VDS} + \mathcal{R}_{VDI} \quad (16)$$

$$\mathcal{R}_{VHD} = \mathcal{R}_{VHDS} + \mathcal{R}_{VHDI} \quad (17)$$

Tem-se ainda que:

$$\mathcal{R}_e = \mathcal{R}_{eS} + \mathcal{R}_{eI} \quad (18)$$

Pode-se, agora, devido à simetria entre as partes superior e inferior do dispositivo, simplificar o modelo da Figura 8, como indicado na Figura 9.

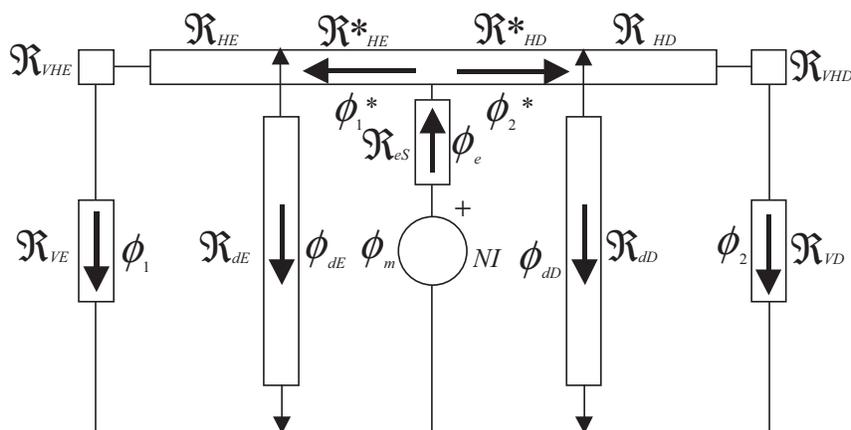


Figura 9 Simplificação do modelo de relutâncias da Figura 8

Este será o modelo base de relutâncias distribuídas ao qual vai se referenciar de agora em diante para o transdutor sem entreferros de medição, tanto no caso de fluxo magnético de excitação c.c. quanto para fluxo magnético de excitação c.a.. Para efeitos desta análise, considere-se que o fluxo magnético de excitação c.c. produzido por um eletroímã com corrente contínua I_{cont} . é equivalente ao fluxo magnético de excitação c.a. efetivo produzido por uma corrente $I_{efetivo}=I_{cont}$.

O modelo analítico proposto apresenta, ainda, as seguintes características:

- não considera as não-linearidades da curva de magnetização do material ferromagnético;
- não considera histerese magnética;
- usa um modelo simplificado de fluxo disperso;
- não considera efeitos de fim de curso.

3.1.1 Análise da Distribuição do Fluxo Magnético no Transdutor sem Entreferro de Medição

Na análise da distribuição do fluxo no transdutor deve-se reduzir o circuito da Figura 9 até um circuito equivalente onde se possa obter uma relação entre o fluxo culatras laterais de medição, ϕ_1 ou ϕ_2 , e o fluxo efetivo que entra nas culatras, ϕ_e , ou o fluxo gerado pela bobina, ϕ_m , através de uma razão de relutâncias, e essa razão depende da posição x do carro.

Se no modelo da Figura 9 define-se que

$$\mathcal{R}_{Equiv} = \mathcal{R}_{VHE} + \mathcal{R}_{VE} + \mathcal{R}_{HE} \quad (19)$$

$$\mathcal{R}_{Dequiv} = \mathcal{R}_{VHD} + \mathcal{R}_{VD} + \mathcal{R}_{HD} \quad (20)$$

tem-se como resultado o modelo da Figura 10

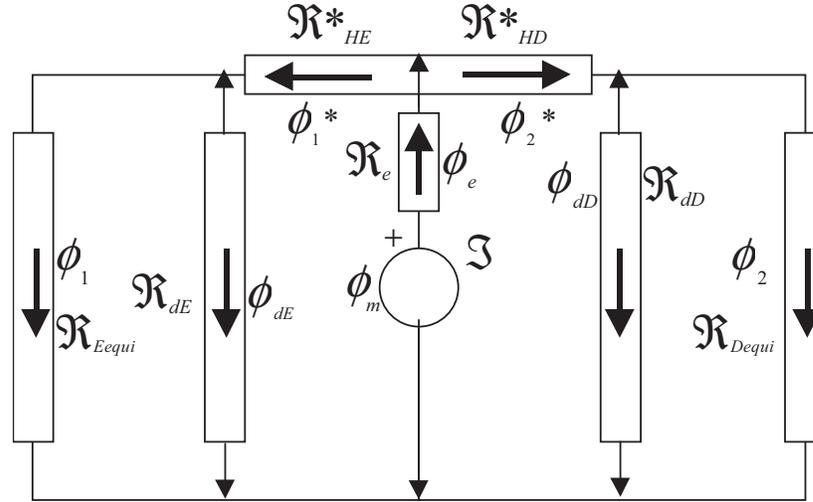


Figura 10 Modelo reduzido da Figura 9

Da Figura 3.4 acima pode-se ver que:

$$\phi_e = \phi_1^* + \phi_2^* \quad (21)$$

$$\phi_1^* = \phi_1 + \phi_{dE} \quad (22)$$

$$\phi_2^* = \phi_2 + \phi_{dD} \quad (23)$$

$$\phi_1 \mathcal{R}_{Equiv} = \phi_{dE} \mathcal{R}_{dE} \quad (24)$$

$$\phi_1 \mathcal{R}_{Equiv} = \phi_1^* \left(\frac{\mathcal{R}_{Equiv} \mathcal{R}_{dE}}{\mathcal{R}_{Equiv} + \mathcal{R}_{dE}} \right) \quad (25)$$

e

$$\phi_1 = \phi_1^* \left(\frac{\mathcal{R}_{dE}}{\mathcal{R}_{Equiv} + \mathcal{R}_{dE}} \right) \quad (26)$$

Agora define-se uma relutância equivalente total à esquerda e à direita do carro.

$$\mathcal{R}_E = \mathcal{R}_{HE}^* + \left(\frac{\mathcal{R}_{Equiv} \mathcal{R}_{dE}}{\mathcal{R}_{Equiv} + \mathcal{R}_{dE}} \right) \quad (27)$$

$$\mathcal{R}_D = \mathcal{R}_{HD}^* + \left(\frac{\mathcal{R}_{Dequiv} \mathcal{R}_{dD}}{\mathcal{R}_{Dequiv} + \mathcal{R}_{dD}} \right) \quad (28)$$

Pode-se simplificar o modelo da Figura 10, conforme indicado na Figura 11.

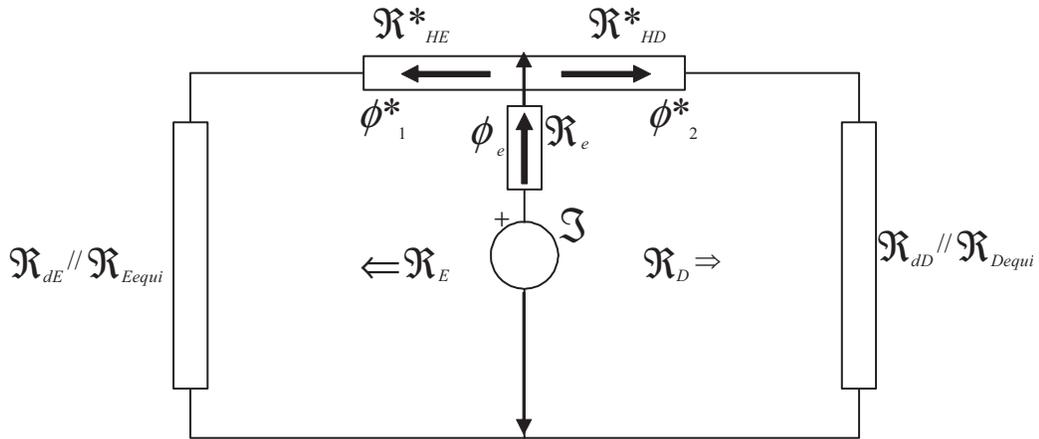


Figura 11 – Modelo de relutâncias reduzidas final do transdutor sem entreferro de medição

Assim

$$\phi_1^* = \phi_e \left(\frac{\mathcal{R}_D}{\mathcal{R}_E + \mathcal{R}_D} \right) \quad (29)$$

Das equações 26 e 29 tem-se que:

$$\phi_1 = \phi_e \left(\frac{\mathcal{R}_D \mathcal{R}_{dE}}{(\mathcal{R}_E + \mathcal{R}_D)(\mathcal{R}_{dE} + \mathcal{R}_{Equiv})} \right) \quad (30)$$

De forma análoga tem-se que:

$$\phi_2 = \phi_e \left(\frac{\mathcal{R}_E \mathcal{R}_{dD}}{(\mathcal{R}_E + \mathcal{R}_D)(\mathcal{R}_{dD} + \mathcal{R}_{Dequiv})} \right) \quad (31)$$

Definindo se agora:

$$\phi_m = \phi_e + \phi_l \quad (32)$$

onde

ϕ_l é o fluxo magnético disperso.

Introduz-se agora, o fator de fluxo disperso, L_f , equação 33.

$$L_f = \frac{(\phi_e + \phi_l)}{\phi_e} = \frac{\phi_m}{\phi_e} = 1 + \frac{\phi_l}{\phi_e} \quad (33)$$

De (30), (31) e (33) tem-se que

$$\phi_1 = \frac{\phi_m}{L_f} \left(\frac{\mathcal{R}_D \mathcal{R}_{dE}}{(\mathcal{R}_E + \mathcal{R}_D)(\mathcal{R}_{dE} + \mathcal{R}_{Eequiv})} \right) \quad (34)$$

e

$$\phi_2 = \frac{\phi_m}{L_f} \left(\frac{\mathcal{R}_E \mathcal{R}_{dD}}{(\mathcal{R}_E + \mathcal{R}_D)(\mathcal{R}_{dD} + \mathcal{R}_{Dequiv})} \right) \quad (35)$$

Deve-se agora introduzir os parâmetros construtivos do transdutor na análise da distribuição do fluxo. Antes de começar, deve-se considerar certos critérios de projeto sobre o dispositivo, tais como:

- a) O material ferromagnético das culatras tem propriedades magnéticas uniformes;
- b) A seção transversal ao longo de toda culatra é a mesma, inclusive nas laterais;
- c) A permeabilidade magnética deve ser constante e correspondente à da região linear da curva de magnetização $B \times H$;
- d) Quando o carro está na posição central a permeabilidade magnética do carro deve ser a metade da permeabilidade máxima do material ferro magnético.
- e) Não há saturação presente nas culatras.

Com isto pode-se introduzir os parâmetros dimensionais no desenho da Figura 12.

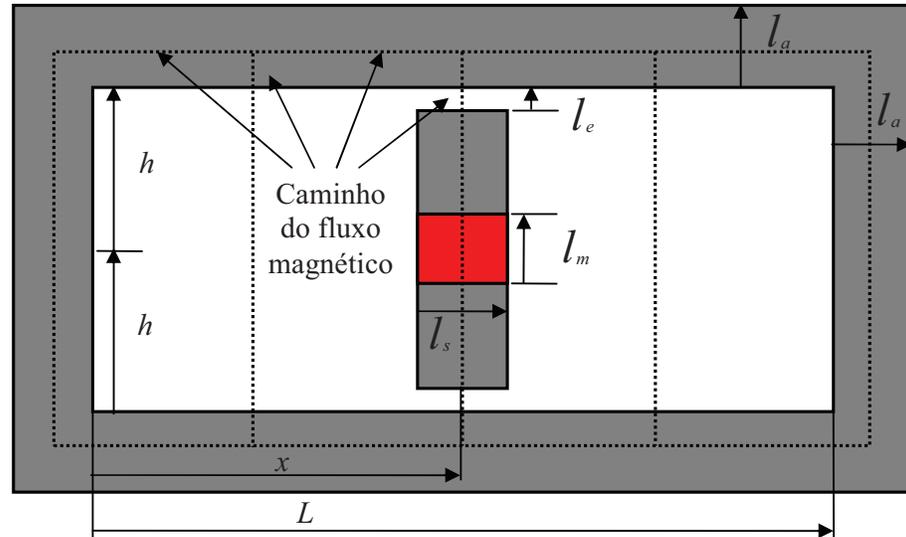


Figura 12 – Vista frontal do transdutor sem entreferro e seus parâmetros construtivos

Onde

$$S_a = l_a z \quad (36)$$

e

h é a metade da altura da culatra lateral,

l_e é a comprimento do entreferro entre o carro e a culatra superior e inferior,

l_m é o comprimento axial do ímã permanente,

l_s é comprimento do afastador,

z é a espessura das culatras ferromagnéticas e

S_a é a seção transversal das culatras ferromagnéticas,

l_a é a largura das culatras horizontal e vertical.

Adota-se aqui que a largura da culatra horizontal l_{aH} e a largura da culatra vertical l_{aV} são de mesmo tamanho e representadas na Figura 12 como l_a . Assim:

$$l_a = l_{aH} = l_{aV} \quad (37)$$

Desta mesma consideração resulta que a seção transversal das culatras horizontal e lateral são iguais, então

$$S_a = S_{aH} = S_{aV} \quad (38)$$

Assim as equações 34 e 35 podem ser definidas em relação aos parâmetros construtivos e em função da posição do carro, conforme segue:

$$\phi_1(x) = \frac{\phi_m}{L_f} \left(\frac{\mathfrak{R}_D(x) \mathfrak{R}_{dE}(x)}{(\mathfrak{R}_E(x) + \mathfrak{R}_D(x))(\mathfrak{R}_{dE}(x) + \mathfrak{R}_{Eequiv}(x))} \right) \quad (39)$$

e

$$\phi_2(x) = \frac{\phi_m}{L_f} \left(\frac{\mathfrak{R}_E(x) \mathfrak{R}_{dD}(x)}{(\mathfrak{R}_E(x) + \mathfrak{R}_D(x))(\mathfrak{R}_{dD}(x) + \mathfrak{R}_{Dequiv}(x))} \right) \quad (40)$$

onde, de acordo com a equação 9 e os parâmetros da Figura 12, pode-se definir as equações 10 a 18 em relação a estes parâmetros. Assim:

$$\mathfrak{R}_{HE}(x) = \mathfrak{R}_{HES}(x) + \mathfrak{R}_{HEI}(x) = \frac{x/2}{\mu_{Fe} S_a} + \frac{x/2}{\mu_{Fe} S_a} = \frac{x}{\mu_{Fe} S_a} \quad (41)$$

Por definição tem-se que:

$$\mathfrak{R}_{HE}(x) = \mathfrak{R}^*_{HE}(x) \quad (42)$$

Ou seja, está-se colocando sempre a relutância de dispersão concentrada no meio do caminho entre o carro e o entreferro de medição, mesmo quando o carro se desloca.

$$\mathfrak{R}_{VE} = \mathfrak{R}_{VES} + \mathfrak{R}_{VEI} = \frac{h}{\mu_{Fe} S_a} + \frac{h}{\mu_{Fe} S_a} = \frac{2h}{\mu_{Fe} S_a} \quad (43)$$

$$\mathfrak{R}_{HVE} = \mathfrak{R}_{HVES} + \mathfrak{R}_{HVEI} = \frac{l_a}{\mu_{Fe} S_a} + \frac{l_a}{\mu_{Fe} S_a} = \frac{2l_a}{\mu_{Fe} S_a} \quad (44)$$

$$\mathfrak{R}_{dE}(x) = \frac{2h}{\mu_0 (x - l_s/2)^2} \quad (45)$$

As relutâncias do lado direito são análogas:

$$\mathfrak{R}_{HD}(x) = \mathfrak{R}_{HDS}(x) + \mathfrak{R}_{HDI}(x) = \frac{(L/2 - x/2)}{\mu_{Fe} S_a} + \frac{(L/2 - x/2)}{\mu_{Fe} S_a} = \frac{(L - x)}{\mu_{Fe} S_a} \quad (46)$$

$$\mathfrak{R}^*_{HD}(x) = \mathfrak{R}_{HD}(x) \quad (47)$$

$$\mathfrak{R}_{dD}(x) = \frac{2h}{\mu_0 [L - (x + l_s/2)]^2} \quad (48)$$

Como as culatras e entreferros laterais são simétricas, tem-se que:

$$\mathfrak{R}_{VD} = \mathfrak{R}_{VE} \quad (49)$$

$$\mathfrak{R}_{HVD} = \mathfrak{R}_{HVE} \quad (50)$$

e

$$\mathfrak{R}_e = \mathfrak{R}_{eS} + \mathfrak{R}_{el} = \frac{l_e}{\mu_0 S_a} + \frac{l_e}{\mu_0 S_a} = \frac{2l_e}{\mu_0 S_a} \quad (51)$$

Agora com estas definições pode-se expandir as equações 19 e 20

$$\mathfrak{R}_{Equiv}(x) = \frac{2l_a}{\mu_{Fe} S_a} + \frac{2h}{\mu_{Fe} S_a} + \frac{x}{\mu_{Fe} S_a} \quad (52)$$

$$\mathfrak{R}_{Equiv}(x) = \frac{2l_a + 2h + x}{\mu_{Fe} S_a} \quad (53)$$

$$\mathfrak{R}_{Dequiv}(x) = \frac{2l_a}{\mu_{Fe} S_a} + \frac{2h}{\mu_{Fe} S_a} + \frac{L-x}{\mu_{Fe} S_a} \quad (54)$$

$$\mathfrak{R}_{Dequiv}(x) = \frac{2l_a + 2h + L - x}{\mu_{Fe} S_a} \quad (55)$$

Substituindo estes resultados nas equações 27 e 28 tem-se:

$$\mathfrak{R}_E(x) = \frac{x}{\mu_{Fe} S_a} + \frac{\left(\frac{2l_a + 2h + x}{\mu_{Fe} S_a} \left(\frac{2h}{\mu_0 (x - l_s/2) z} \right) \right)}{\left(\frac{2l_a + 2h + x}{\mu_{Fe} S_a} + \frac{2h}{\mu_0 (x - l_s/2) z} \right)} \quad (56)$$

$$\mathfrak{R}_D(x) = \frac{L-x}{\mu_{Fe} S_a} + \frac{\left(\frac{2l_a + 2h + L - x}{\mu_{Fe} S_a} \left(\frac{2h}{\mu_0 (L - (x + l_s/2)) z} \right) \right)}{\left(\frac{2l_a + 2h + L - x}{\mu_{Fe} S_a} + \frac{2h}{\mu_0 (L - (x + l_s/2)) z} \right)} \quad (57)$$

As equações acima podem ser usadas tanto para fluxo magnético c.c. quanto c.a..

No caso de fluxo magnético c.a. pode-se medir a indução magnética nas culatras laterais empregando-se duas bobinas exploradoras, uma em cada culatra lateral, podendo

medir-se a tensão senoidal induzida através delas, quando uma corrente senoidal é aplicada ao eletroímã tem-se que:

$$\phi_m = \frac{V_m}{4,44 f N_m} \quad (58)$$

$$\phi_1 = \frac{V_1}{4,44 f N_1} \quad (59)$$

$$\phi_2 = \frac{V_2}{4,44 f N_2} \quad (60)$$

Os fluxos magnéticos estão em fase entre si e 90° atrasados em relação às tensões, que também estão em fase entre si.

Pode-se então agora definir as equações 39 e 40 em função das tensões induzidas nas bobinas exploradoras, equações 61 a 62.

$$V_1(x) = \frac{V_m N_1}{L_f N_m} \left(\frac{\mathfrak{R}_D(x) \mathfrak{R}_{dE}(x)}{(\mathfrak{R}_E(x) + \mathfrak{R}_D(x))(\mathfrak{R}_{dE}(x) + \mathfrak{R}_{Equiv}(x))} \right) \quad (61)$$

e

$$V_2(x) = \frac{V_m N_2}{L_f N_m} \left(\frac{\mathfrak{R}_E(x) \mathfrak{R}_{dD}(x)}{(\mathfrak{R}_E(x) + \mathfrak{R}_D(x))(\mathfrak{R}_{dD}(x) + \mathfrak{R}_{Equiv}(x))} \right) \quad (62)$$

E o sinal de saída S(x) é definido como:

$$S(x) = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \quad (63)$$

Todo o equacionamento desenvolvido até aqui só é válido, se a permeabilidade do material ferromagnético variar de forma desprezível com a posição do carro, pois quanto maior a variação da permeabilidade, maior será o comportamento não linear.

3.2 CASO ESTÁTICO

A relação entre fluxo magnético senoidal e tensão induzida é bastante conhecida na literatura, e o caso sob estudo aqui é semelhante ao de um transformador com secundário aberto

Pode-se considerar então um transformador, Figura 13, com o circuito de dois secundários abertos e uma tensão alternada e senoidal V_1 aplicada aos terminais do primário.

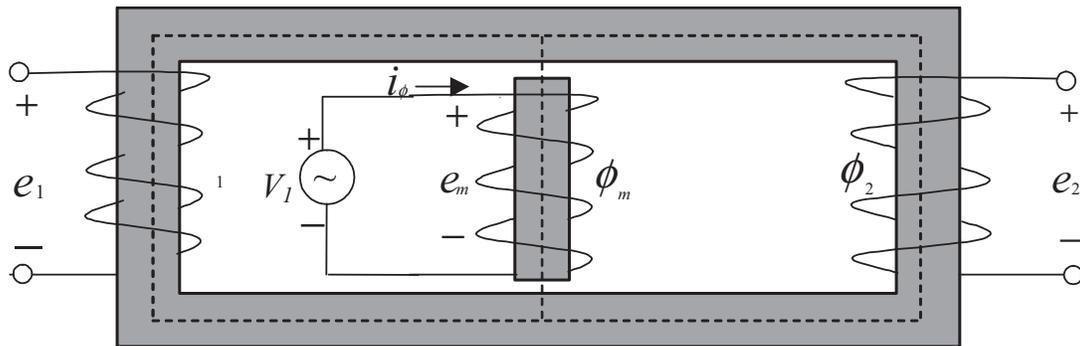


Figura 13 Representação do transdutor com fluxo magnético c.a. para o caso estático

Uma corrente de regime i_ϕ chamada corrente de excitação, circula no primário e estabelece um fluxo magnético alternado no circuito. Este fluxo magnético induz uma f.e.m. no primário igual a

$$e_m = -\frac{\partial \lambda_m}{\partial t} = -N_m \frac{\partial \phi_m}{\partial t} \quad (64)$$

onde

λ_m é o fluxo magnético concatenado com o primário,

ϕ_m é o fluxo magnético no primário, considerado todo confinado ao núcleo, ou seja, está-se considerando o caso ideal onde o fluxo disperso ϕ_f é igual a zero

$$\phi_m = \phi_1 + \phi_2 \text{ e}$$

N_m é o número de espiras do primário.

A lei de Lenz mostra que e_m é uma força contra-eletromotriz (f.c.e.m.), tendo a polaridade relativa à V_1 mostrada pelos sinais + e - na Figura 13. Esta f.c.e.m., junto com a

queda de tensão na resistência de primário r_m , deve contrabalançar a tensão aplicada V_1 ; assim

$$V_1 = r_m i_\phi + e_m \quad (65)$$

Como os dois secundários estão abertos (sem carga) pode-se desprezar a queda de tensão na resistência e aproximar a f.e.m. induzida e_m igual à tensão aplicada V_1 . Agora, como as formas de onda de tensão e fluxo magnético são senoidais, o fluxo magnético instantâneo é

$$\phi_m = \phi_{m \max} \text{sen}(wt) \quad (66)$$

Da equação 64 a tensão induzida será

$$e_m = -N_m \frac{\partial \phi_m}{\partial t} = -\omega N_m \phi_{m \max} \cos(wt) \quad (67)$$

onde

$\phi_{m \max}$ é o valor máximo do fluxo magnético e

$w = 2\pi f$, onde f é a frequência em Hz.

Pode-se ver pelas equações 66 e 67 que a f.e.m. induzida está adiantada de 90° em relação ao fluxo magnético. O valor eficaz da f.e.m. induzida será

$$V_m = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_m \phi_{m \max} = 4,44 f N_m \phi_{m \max} \quad (68)$$

Então, se a queda de tensão na resistência for desprezada, a f.c.e.m. será igual à tensão aplicada. Nestas condições, se uma tensão senoidal for aplicada a um enrolamento, deverá estabelecer-se um fluxo magnético no núcleo, variando senoidalmente e cujo valor máximo $\phi_{m \max}$ satisfaça a exigência de que e_m na equação 68 iguale o valor eficaz V_m da tensão aplicada, isto é

$$\phi_{m \max} = \frac{V_m}{4,44 f N_m} \quad (69)$$

O fluxo magnético é então determinado somente pela tensão aplicada, pela frequência e pelo número de espiras no enrolamento. As propriedades magnéticas do núcleo determinam a corrente de excitação. Ela deve ajustar-se de modo a produzir a f.m.m. exigida para criar o fluxo magnético requerido pela equação 69.

De maneira análoga, as tensões eficazes induzidas nos secundários abertos serão

$$V_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \phi_1 = 4,44 f N_1 \phi_1 \quad (70)$$

$$V_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_2 \phi_2 = 4,44 f N_2 \phi_2 \quad (71)$$

onde

V_1 e V_2 são as tensões eficazes induzidas nos secundários,

N_1 e N_2 são os números de espiras dos secundários e

ϕ_1 e ϕ_2 são os fluxos magnéticos através dos núcleos dos secundários.

4. PROJETO PARA CONSTRUÇÃO DOS TRANSDUTORES

Neste capítulo vai-se dimensionar os transdutores para que o carro possa se mover por uma distância e tempo suficientes, a uma velocidade constante, a fim de permitir algumas medições e constatações.

4.1 TRANSDUTOR COM LÂMINAS DE AÇO SILÍCIO

Devido aos bons resultados obtidos com lâminas de Fe-Si , optou-se por construir dois transdutores, definidos como Transdutor I e Transdutor II, com diferentes espaçamentos entre as culatras horizontais, confeccionado de Fe-Si (Ferro Silício de Grão Orientado) tipo M4 de espessura aproximada de 0,28 mm. As lâminas foram cortadas de chapas de 2010 x 820 mm por corte a laser.

As considerações de projeto foram as seguintes:

- a) A largura das culatras deveria ter uma largura suficiente para não se deformar pelo corte a laser.
- b) O comprimento do transdutor deve ser maior que o do movimentador para evitar os efeitos de fim de curso. O comprimento do movimentador deveria permitir que o carro se deslocasse por um metro à velocidade constante, mais o espaço para a aceleração e desaceleração do carro.
- c) Largura do carro aproximadamente o dobro da largura da culatra horizontal para que quando o carro estivesse na posição central, os dois terem a mesma indução magnética.
- d) A altura da janela do Transdutor II ser aproximadamente quatro vezes a do Transdutor I.

Deste modo pode-se obter parâmetros construtivos para os transdutores, Tabela 2

Tabela 2 Parâmetros dimensionais dos transdutores

Parâmetros	Transdutor I	Transdutor II	
L	1910 mm	1910 mm	Comprimento do transdutor
l_s	84 mm	84 mm	Comprimento do carro
l_{aV}	45 mm	42,74 mm	Largura da culatra vertical
l_{aH}	45 mm	45 mm	Largura da culatra horizontal
h	30 mm	115 mm	Metade da altura da janela
z	8,7 mm	8,7 mm	Espessura
l_e	1 mm	1 mm	<i>Gap</i> entre o carro e a culatra
S_{av}	391,5 mm ²	371,838 mm ²	Seção da culatra vertical
S_{ah}	391,5 mm ²	391,5 mm ²	Seção da culatra horizontal

Inicialmente, pensou-se em uma largura do transdutor, l_a , menor que 45 mm, porém, para larguras menores, devido ao corte a laser, ocorria a deformação das lâminas. O comprimento do transdutor ficou limitado pelo comprimento da chapa de Fe-Si.

Os transdutores são então constituídos por 30 camadas de lâminas e, cada camada, é composta por quatro peças de espessura 0,289 mm e de dimensões dadas na Tabela 2, a montagem dos transdutores podem ser vistas nas Figuras 14 a 24.

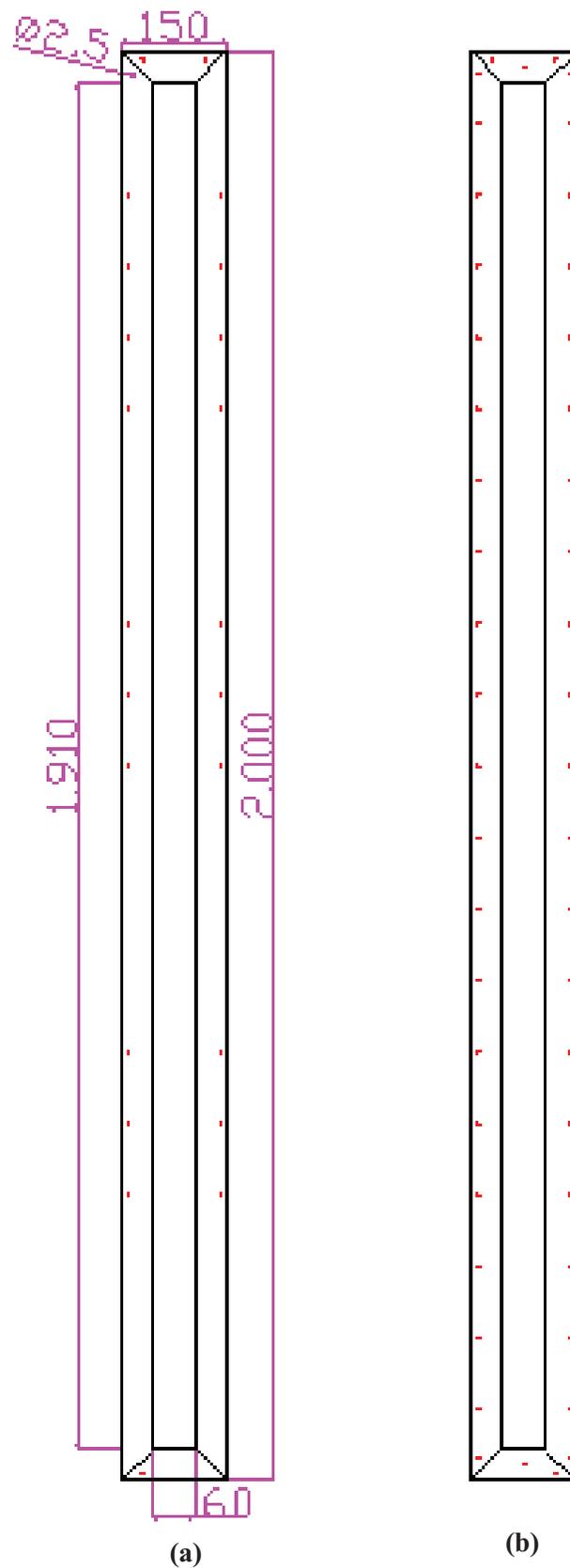


Figura 14 Vista frontal do Transdutor I, medidas em mm

O Transdutor I, Figuras 14(a) e 14(b), é composto por duas camadas em uma configuração de corte a 45 graus, com duas camadas subsequentes espelhadas em relação às duas anteriores. Isto pode ser mais bem observado nas Figuras 15(a) e 15 (b):

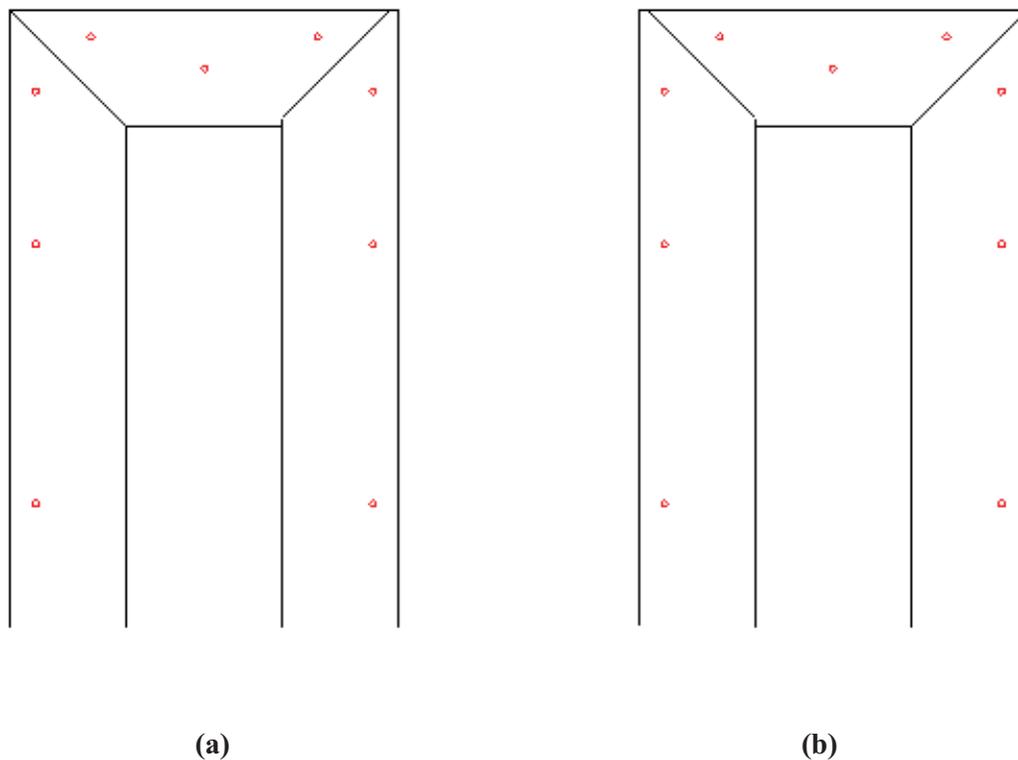


Figura 15 Vista frontal parcial do Transdutor I (a) primeira camada (b) camada subsequente

As duas configurações de camadas são então justapostas duas a duas. Isto faz com que as junções das culatras horizontal e lateral não coincidam no mesmo ponto, o que reduz o fluxo magnético disperso do mesmo modo que é feito no núcleo de transformadores de distribuição. Tal junção das duas camadas pode ser vista na Figura 16. O mesmo vale para o Transdutor II, Figuras 17, 18 e 19. Os transdutores são então constituídos apenas por duas peças, uma para a culatra horizontal, Figura 20, para os Transdutores I e II e outra para a culatra lateral, Figura 21 para o transdutor I e Figura 22 para o Transdutor II, que estão dispostas em duas configurações diferentes para compor o transdutor.

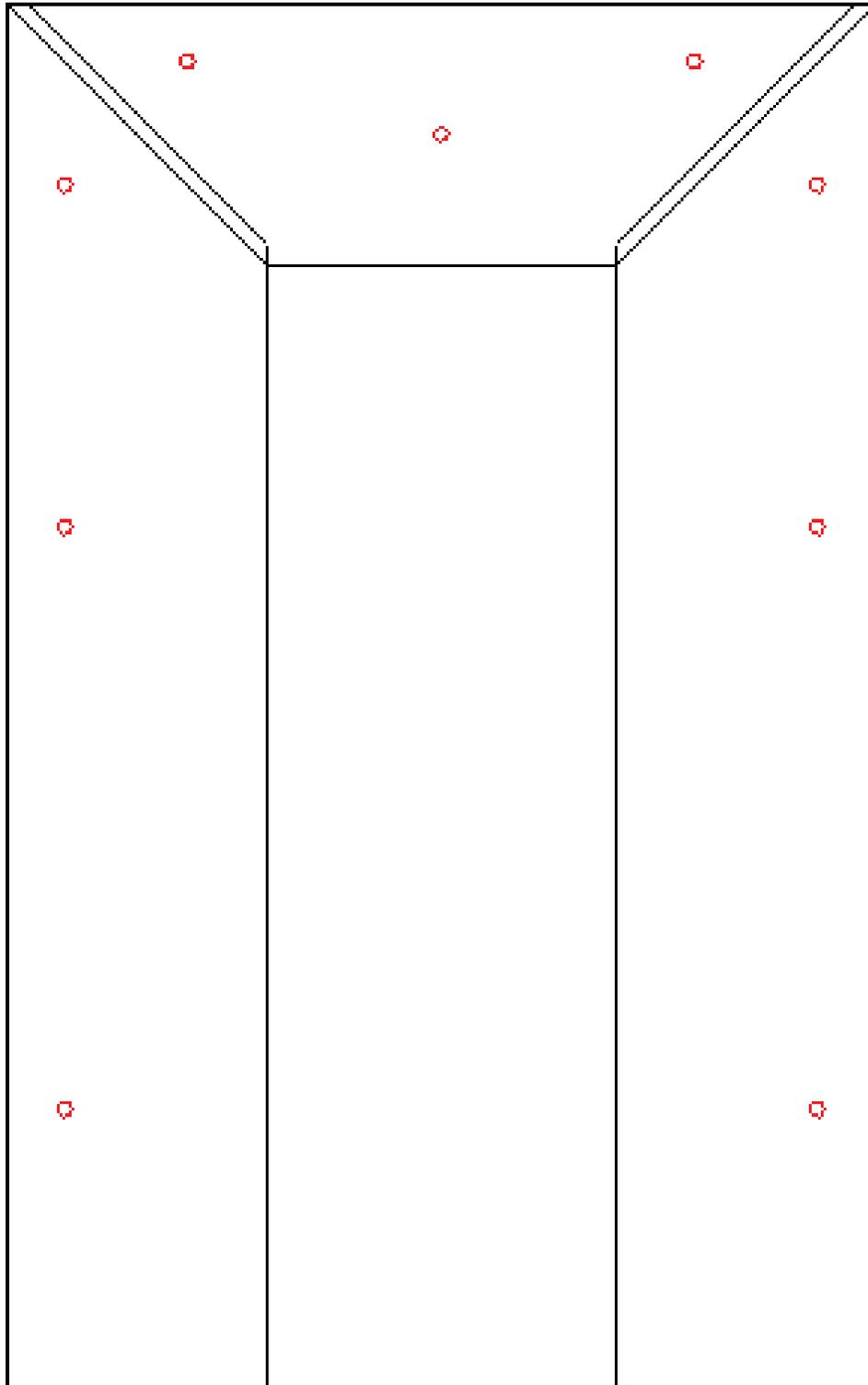


Figura 16 Vista frontal parcial da junção das duas configurações de camadas

O Transdutor II é montado da mesma forma que o Transdutor I, apenas o que muda é o comprimento da culatra lateral.

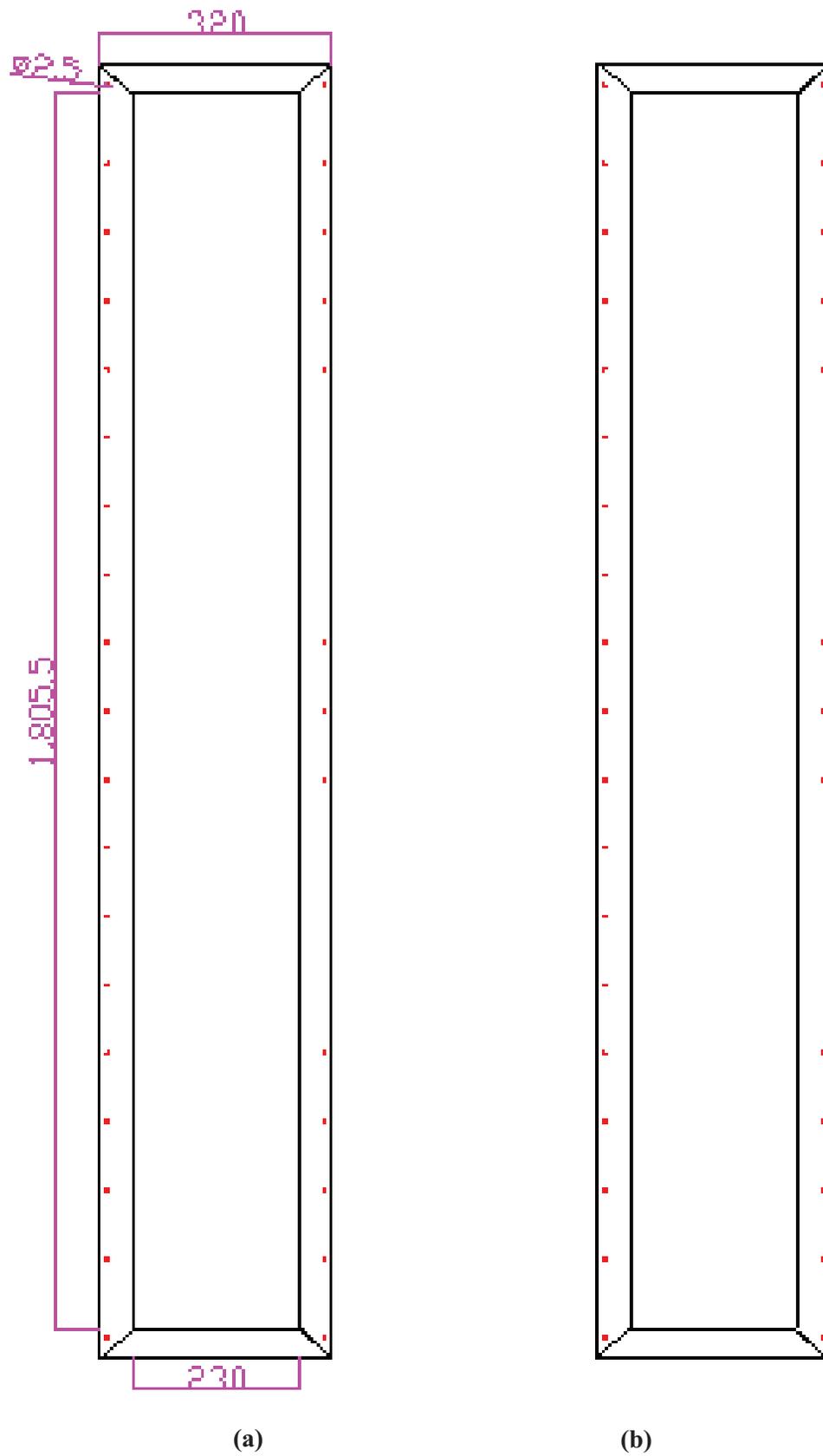


Figura 17 Vista frontal do Transdutor II, medidas em mm

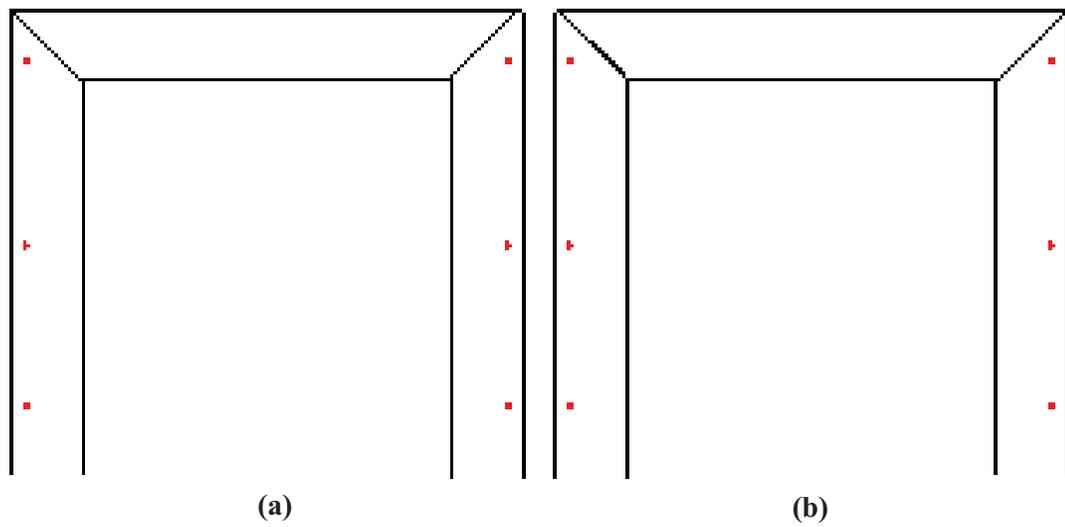


Figura 18 Vista frontal parcial do Transdutor II (a) primeira camada (b) camada subsequente

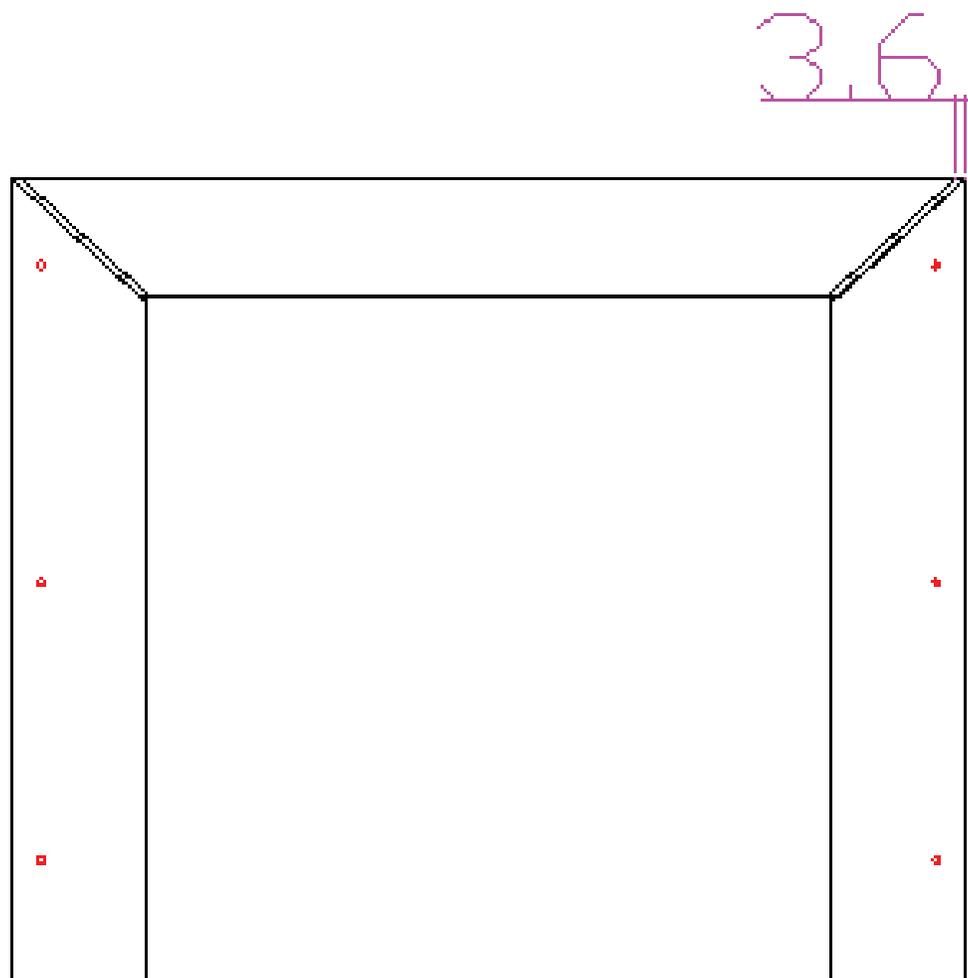


Figura 19 Vista frontal parcial da junção das duas configurações de camadas do Transdutor II

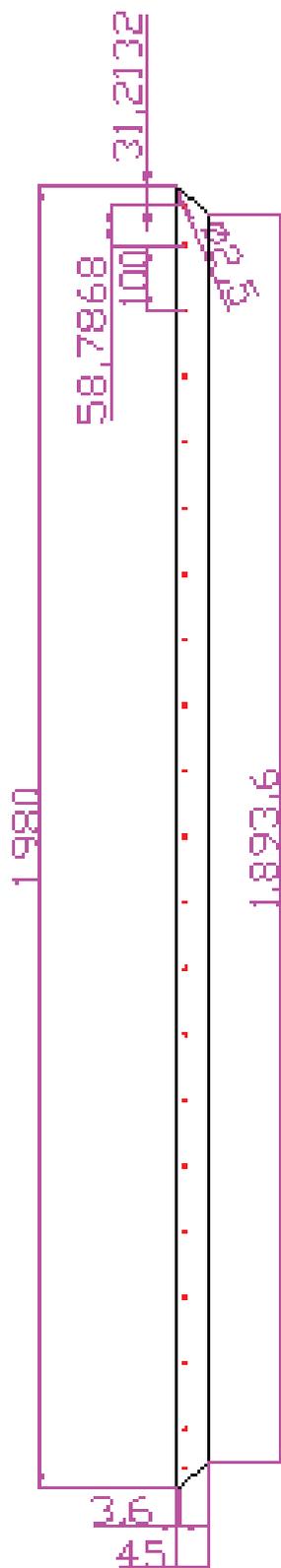


Figura 20 Vista frontal da peça que formam as culatras horizontais do Transdutor I e II, medidas em mm

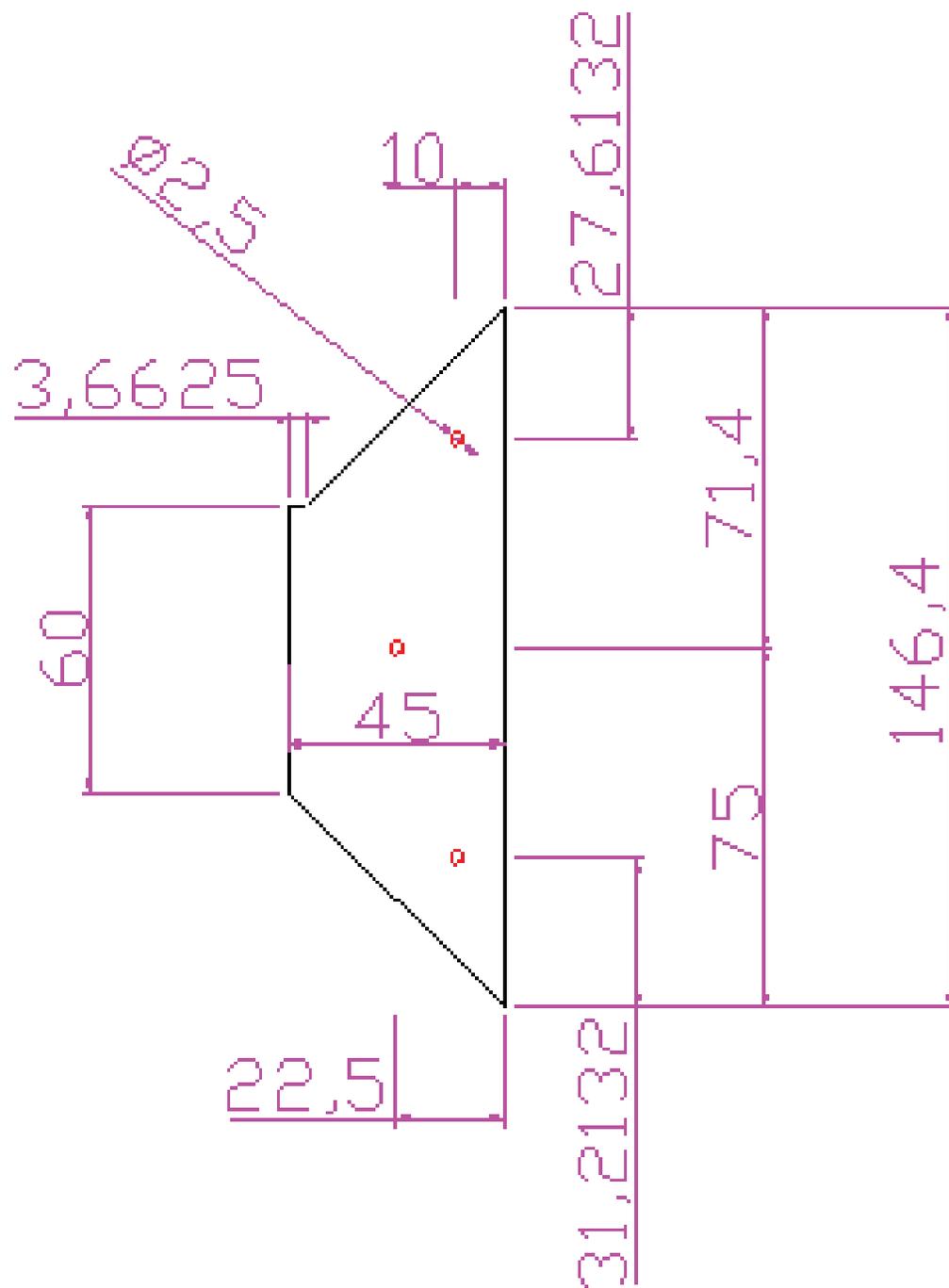


Figura 21 Vista frontal da peça que forma as culatras laterais do Transdutor I, medidas em mm

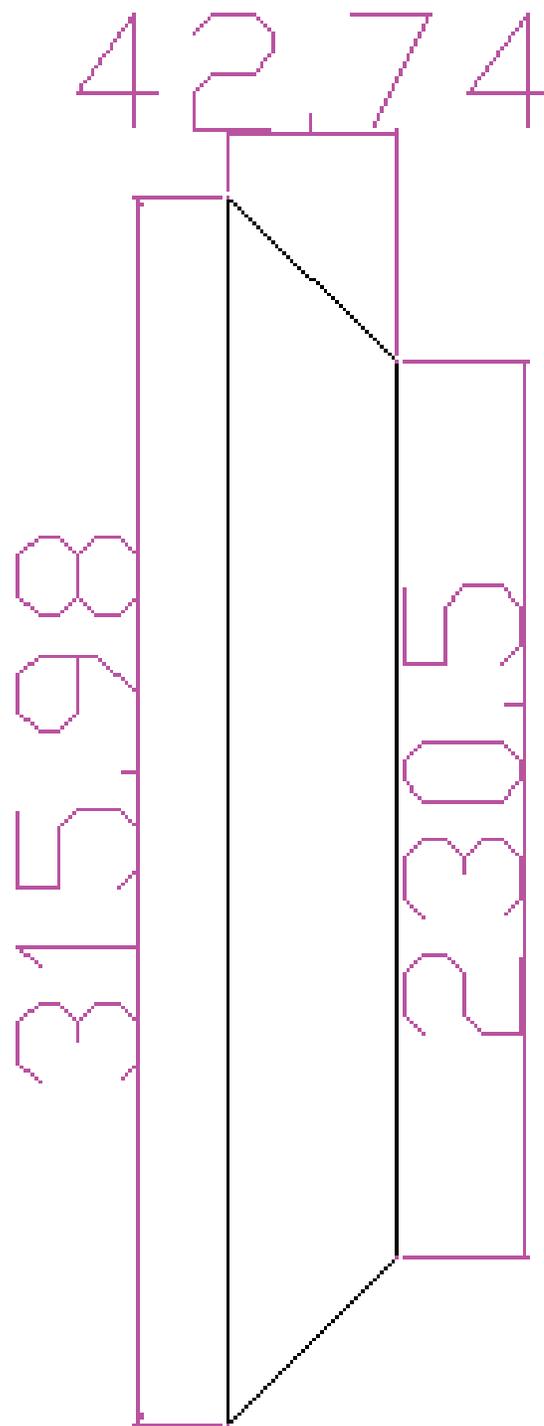


Figura 22 Vista frontal da peça que forma as culatras laterais do Transdutor II, medidas em mm

As dimensões dos carros dos Transdutores I e II podem ser vistas nas Figuras 23 e 24.

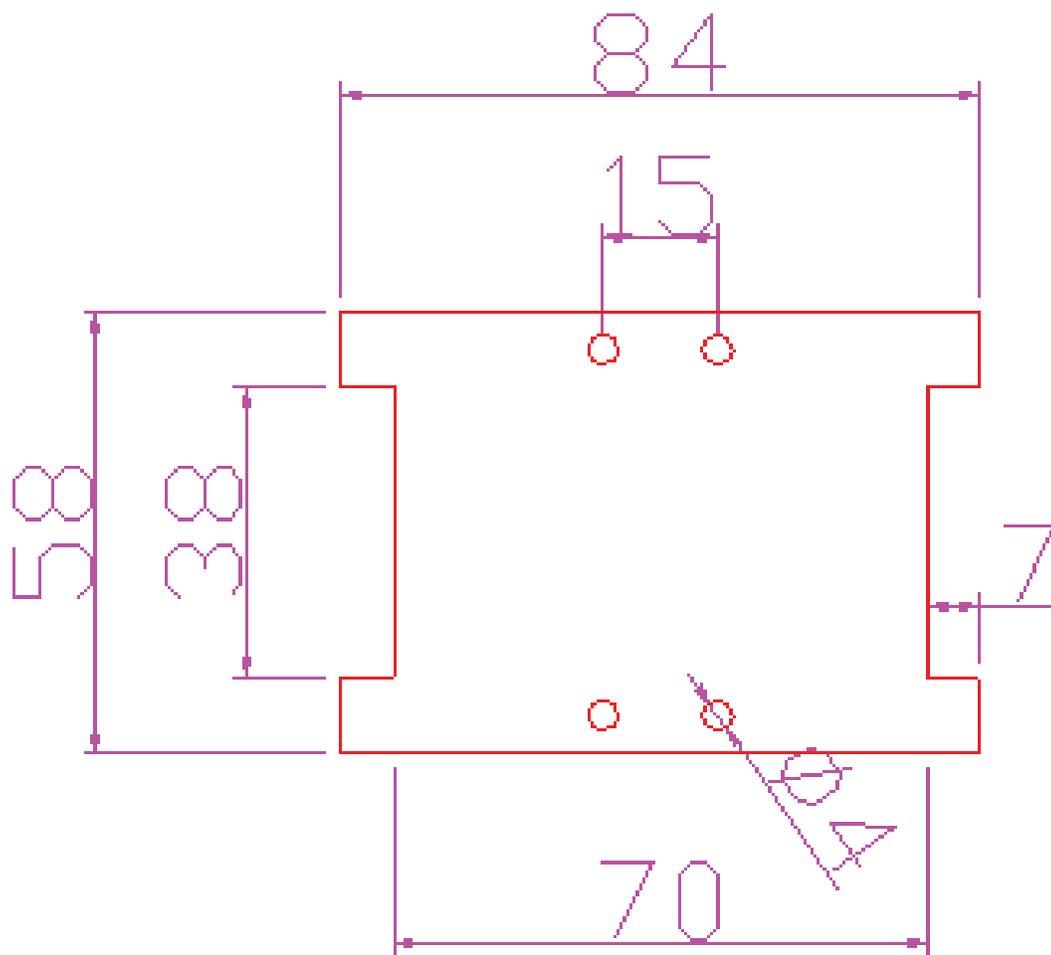


Figura 23 Vista frontal da peça que forma o carro do Transdutor I, medidas em mm

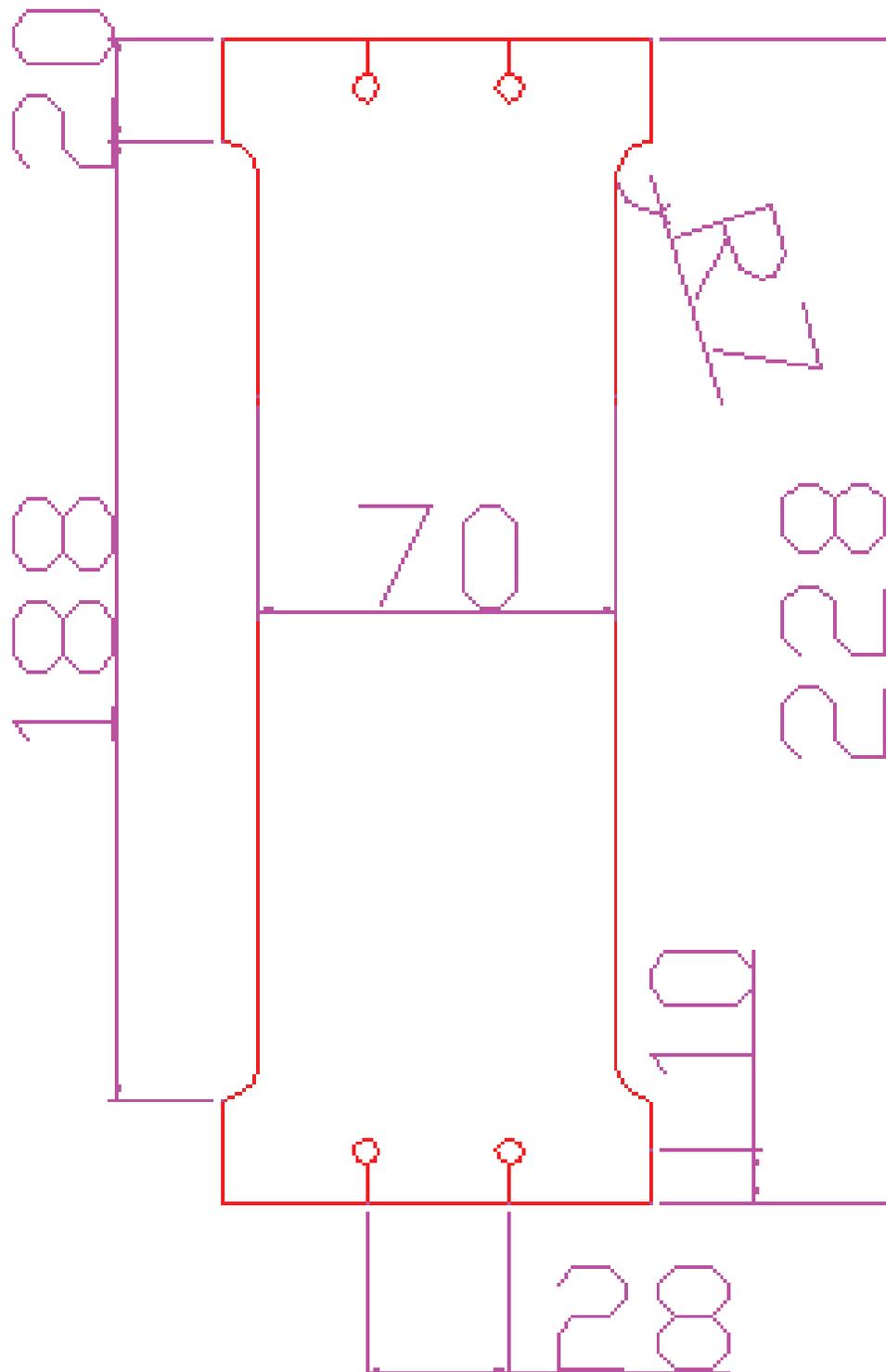


Figura 24 Vista frontal da peça que forma o carro do Transdutor II, medidas em mm

4.2 CURVA TEÓRICA PARA OS TRANSDUTORES PROPOSTOS

De acordo com os parâmetros da Tabela 2 agora aqui convertidos para metros e as equações do capítulo 3.1, tem-se que as equações para a curva teórica do fluxo magnético nos transdutores podem ser vistas abaixo:

$$\phi_1(x) = \frac{\phi_m}{L_f} \left(\frac{\mathfrak{R}_D(x) \mathfrak{R}_{dE}(x)}{(\mathfrak{R}_E(x) + \mathfrak{R}_D(x))(\mathfrak{R}_{dE}(x) + \mathfrak{R}_{Equiv}(x))} \right) \quad (72)$$

e

$$\phi_2(x) = \frac{\phi_m}{L_f} \left(\frac{\mathfrak{R}_E(x) \mathfrak{R}_{dD}(x)}{(\mathfrak{R}_E(x) + \mathfrak{R}_D(x))(\mathfrak{R}_{dD}(x) + \mathfrak{R}_{Dequiv}(x))} \right) \quad (73)$$

Onde para o Transdutor I com as equações 56 e 57 e os parâmetros da Tabela 2.

$$\mathfrak{R}_E(x) = \frac{x}{\mu_{Fe} * 0,000387} + \left(\frac{\left(\frac{0,15 + x}{\mu_{Fe} * 0,000387} \right) \left(\frac{0,06}{\mu_0(x - 0,042)0,0086} \right)}{\frac{0,15 + x}{\mu_{Fe} * 0,000387} + \frac{0,06}{\mu_0(x - 0,042)0,0086}} \right) \left[\frac{1}{H} \right] \quad (74)$$

$$\mathfrak{R}_D(x) = \frac{1,91 - x}{\mu_{Fe} * 0,000387} + \left(\frac{\left(\frac{2,06 - x}{\mu_{Fe} * 0,000387} \right) \left(\frac{0,06}{\mu_0(1,91 - (x + 0,042))0,0086} \right)}{\frac{2,06 - x}{\mu_{Fe} * 0,000387} + \frac{2 * 0,03}{\mu_0(1,91 - (x + 0,042))0,0086}} \right) \left[\frac{1}{H} \right] \quad (75)$$

Agora levando em conta as equações 53, 55, 45 e 48 e os parâmetros da Tabela 2

$$\mathfrak{R}_{Equiv}(x) = \frac{0,15 + x}{\mu_{Fe} * 0,000387} \left[\frac{1}{H} \right] \quad (76)$$

$$\mathfrak{R}_{Dequiv}(x) = \frac{2,06 - x}{\mu_{Fe} * 0,000387} \left[\frac{1}{H} \right] \quad (77)$$

$$\mathfrak{R}_{dE}(x) = \frac{0,06}{\mu_0(x - 0,042)0,0086} \left[\frac{1}{H} \right] \quad (78)$$

$$\mathfrak{R}_{dD}(x) = \frac{0,06}{\mu_0[1,91 - (x + 0,042)]0,0086} \left[\frac{1}{H} \right] \quad (79)$$

e para o Transdutor II também com as equações 56 e 57 e os parâmetros da Tabela 2 tem-se

$$\mathfrak{R}_E(x) = \frac{x}{\mu_{Fe} * 0,000387} + \left(\frac{\left(\frac{0,387 + x}{\mu_{Fe} * 0,000387} \right) \left(\frac{0,30}{\mu_0 (x - 0,042) 0,0086} \right)}{\frac{0,387 + x}{\mu_{Fe} * 0,000387} + \frac{0,30}{\mu_0 (x - 0,042) 0,0086}} \right) \left[\frac{1}{H} \right] \quad (80)$$

$$\mathfrak{R}_D(x) = \frac{1,91 - x}{\mu_{Fe} * 0,000387} + \left(\frac{\left(\frac{2,293 - x}{\mu_{Fe} * 0,000387} \right) \left(\frac{0,30}{\mu_0 (1,91 - (x + 0,042)) 0,0086} \right)}{\frac{2,293 - x}{\mu_{Fe} * 0,000387} + \frac{0,30}{\mu_0 (1,91 - (x + 0,042)) 0,0086}} \right) \left[\frac{1}{H} \right] \quad (81)$$

Novamente para o Transdutor II levando em conta as equações 53, 55, 45 e 48 e os parâmetros da Tabela 2

$$\mathfrak{R}_{Eequiv}(x) = \frac{0,387 + x}{\mu_{Fe} 0,000387} \left[\frac{1}{H} \right] \quad (82)$$

$$\mathfrak{R}_{Dequiv}(x) = \frac{2,297 - x}{\mu_{Fe} 0,000387} \left[\frac{1}{H} \right] \quad (83)$$

$$\mathfrak{R}_{dE}(x) = \frac{0,30}{\mu_0 (x - 0,042) 0,0086} \left[\frac{1}{H} \right] \quad (84)$$

$$\mathfrak{R}_{dD}(x) = \frac{0,30}{\mu_0 [1,91 - (x + 0,042)] 0,0086} \left[\frac{1}{H} \right] \quad (85)$$

Considerando a curva da permeabilidade magnética medida do material ferro magnético na seção 5.1.1, Figura 34 e conforme critério d) da seção 3.1.1, obtém-se um $\mu_{Fe} = 5000 \mu_0$ e normalizando o fluxo do eletroímã $\phi_e / L_f = 1$, ou seja o fluxo magnético produzido pela fonte de fluxo magnético é igual ao fluxo que entra nas culatras horizontais e unitário, assim como uma primeira aproximação o fluxo magnético disperso é nulo, e pode-se obter a curva teórica que pode ser vista na Figura 25

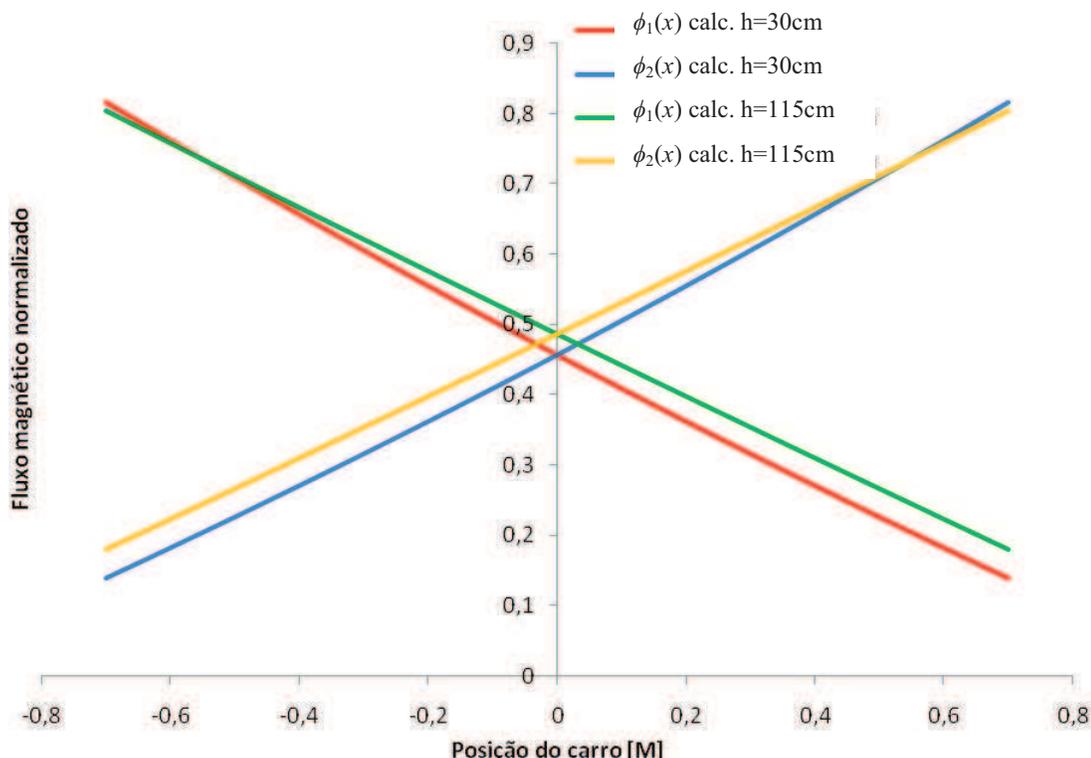


Figura 25 Curva teórica do Transdutor I e II proposto para uma permeabilidade $\mu_{Fe} = 5000 \mu_0$ com fluxo magnético normalizado e sem fluxo disperso.

As equações e as curvas acima não levam em conta as não linearidades da permeabilidade magnética e a variação da relutância vistas do carro devido ao comprimento do transdutor e representam bem materiais com alta permeabilidade magnética.

Em materiais com baixa permeabilidade magnética há grande variação da indução magnética ao longo das culatras horizontais quando o carro se desloca para uma das extremidades, com isto tem-se também uma variação significativa da permeabilidade magnética em função da posição do carro $\mu_{Fe}(x)$. Assim, as relutâncias à direita e à esquerda do carro não dependem apenas do espaçamento entre o carro e a extremidade, mas também da indução magnética que por ela se estabelece, $\mathfrak{R}(x) = \frac{x}{\mu(x)_{fe} \cdot S}$, nestes casos o equacionamento aqui desenvolvido não se aplica.

A relutância do sistema vista do carro nestes casos também não é constante. Ela é máxima quando o carro está a meio caminho das extremidades do transdutor e diminui à medida que se aproxima das extremidades. Com isto, usando uma fonte de tensão para alimentar o carro, o fluxo magnético ϕ_e é constante, mas se for usada uma fonte de corrente,

a força magneto-motriz \mathfrak{S} é constante. Ainda o coeficiente de fluxo disperso também depende da posição, $L_f(x)$.

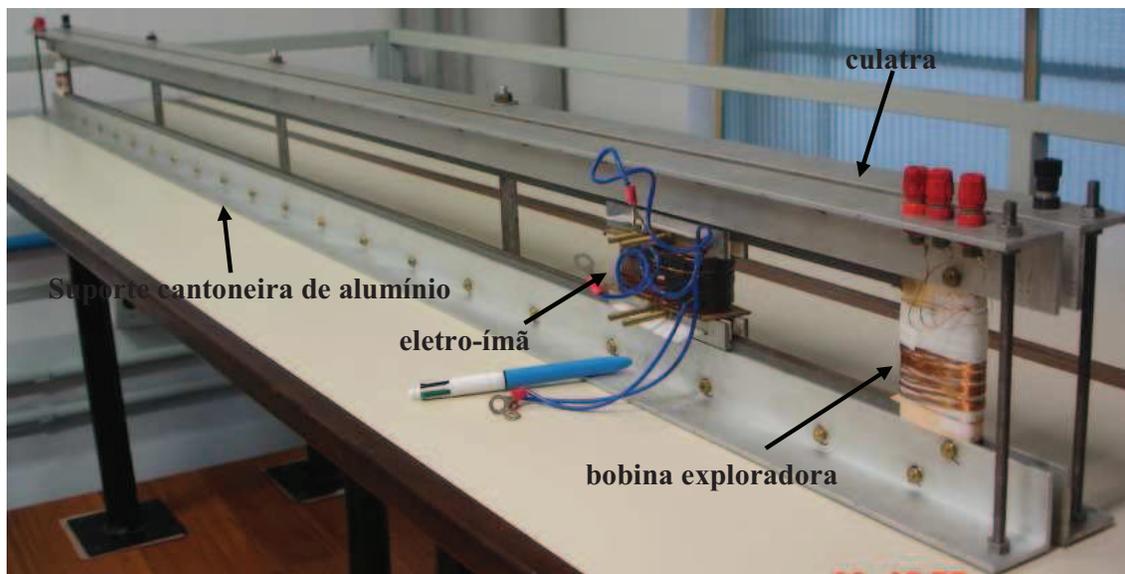


Figura 26 Foto da montagem do Transdutor I.

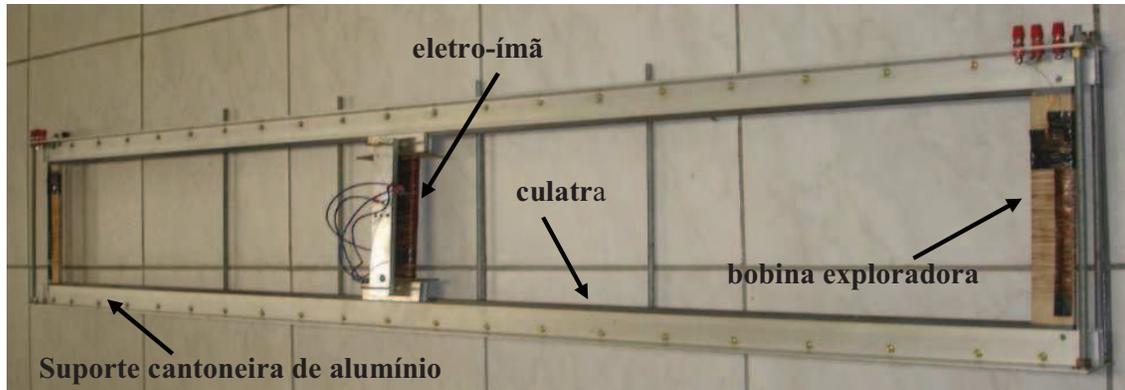


Figura 27 Foto da montagem do Transdutor II.

5. EXCITAÇÃO DO TRANSDUTOR E RESULTADOS ESTÁTICOS

Neste capítulo vai-se determinar a excitação do transdutor, obter as curvas de calibração estática dos transdutores e compará-las com as curvas analiticamente obtidas.

Para a excitação do carro foi primeiramente usado uma curva $B \times H$ padrão do aço Fe-Si M5; como premissa de projeto quer-se que a força magneto-motriz aplicada fosse tal que a permeabilidade do aço no carro fosse a metade de seu valor máximo. Para isto tem-se que

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} \quad (86)$$

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (87)$$

Assim, uma das considerações de projeto era que quando o carro estivesse na posição central, a indução magnética seria aproximadamente igual nas culatras horizontais e no carro; desta forma tem-se a permeabilidade das culatras usando a curva padrão de μH e pode-se calcular a relutância vista do carro e com isto determinar a força magneto-motriz necessária para excitar o transdutor.

5.1 CÁLCULO DA EXCITAÇÃO DOS TRANSDUTORES

Para o cálculo da excitação do transdutor considera-se o carro na posição central. Assim a relutância à esquerda e à direita do carro são iguais e usando uma análise simplificada de relutâncias distribuídas tem-se:

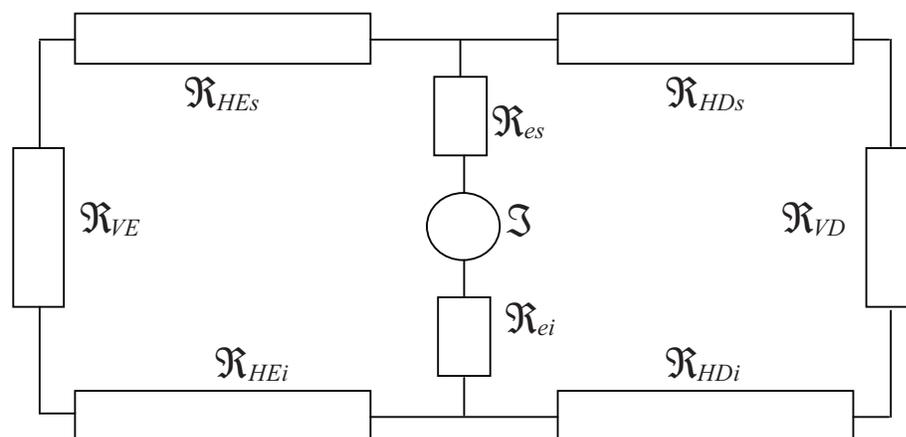


Figura 28 Diagrama das relutâncias do transdutor simplificadas.

Na Figura 28 os índices H e V referem-se à relutância das culatras horizontal e vertical e os índices s e i referem-se às relutâncias superior e inferior, o índice e refere-se à relutância entre o carro e a culatra horizontal. As relutâncias à esquerda e à direita do carro podem ser agrupadas em uma única relutância. Desta forma:

$$\mathcal{R}_E = \mathcal{R}_{HEs} + \mathcal{R}_{HEi} + \mathcal{R}_{VE} \quad (87)$$

$$\mathcal{R}_D = \mathcal{R}_{HDs} + \mathcal{R}_{HDi} + \mathcal{R}_{VD} \quad (88)$$

$$\mathcal{R}_e = \mathcal{R}_{es} + \mathcal{R}_{ei} \quad (89)$$

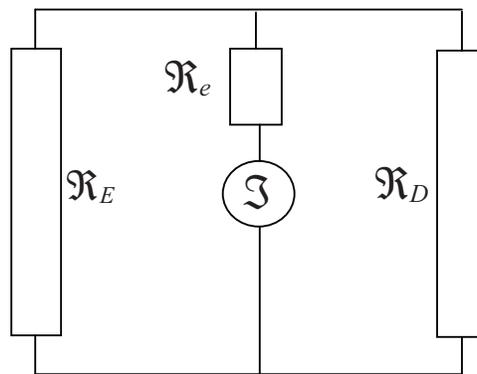


Figura 29 Agrupamento das relutâncias da Figura 28.

Como no caso em que o carro está na posição central as relutâncias agrupadas à esquerda e à direita do carro são iguais, tem-se que

$$\mathcal{R}_{ED} = \frac{\mathcal{R}_E}{2} = \frac{\mathcal{R}_D}{2} \quad (90)$$

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_e + \mathcal{R}_{ED} \quad (91)$$

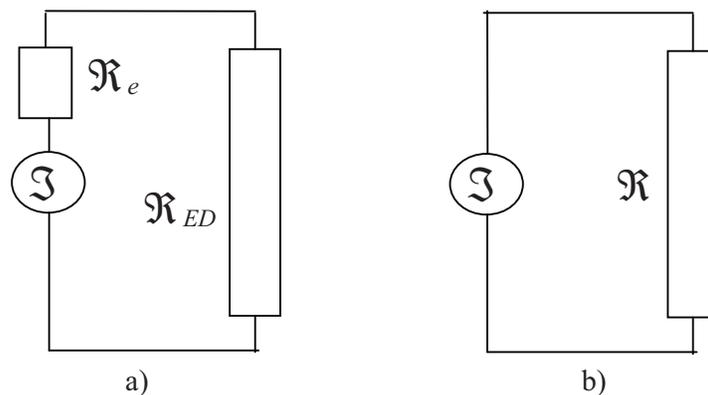


Figura 30 Agrupamento das relutâncias da Figura 29.

Assim, de acordo com os parâmetros definidos na Tabela 2, tem-se que

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_e + \frac{\mathcal{R}_E}{2} = \mathcal{R}_{es} + \mathcal{R}_{ei} + \frac{\mathcal{R}_{HEs} + \mathcal{R}_{HEi} + \mathcal{R}_{VE}}{2} \quad (92)$$

$$\mathcal{R} = \frac{2l_g}{\mu_0 l_a z} + \frac{(L/2)/\mu_{Fe} l_a z + (L/2)/\mu_{Fe} l_a z + 2h/\mu_{Fe} l_a z}{2} \quad (93)$$

$$\mathcal{R} = \frac{2l_g}{\mu_0 l_a z} + \frac{((L/2) + h)}{\mu_{Fe} l_a z} \quad (94)$$

$$\mathcal{R} = \frac{3,322}{\mu_0} + \frac{2545,319}{\mu_{Fe}} \left[\frac{1}{H} \right] \quad (95)$$

Os resultados encontrados para a relutância e a força magneto-motriz usando a curva padrão do aço Fe-Si GO M5 não eram nada compatíveis com a realidade experimental, o que nos levou a fazer uma curva $B \times H$ do material usado no transdutor.

5.1.1. Levantamento da Curva $B \times H$

Para levantar a curva $B \times H$ do aço usado no transdutor, monta-se um quadrado com o mesmo formato das culatras verticais do Transdutor I, com 18 camadas de espessura total 0,005 m; a junção das peças de uma camada não se sobrepõe à camada seguinte para minimizar o fluxo disperso, conforme vê-se nas Figuras 31, 32 e 33.

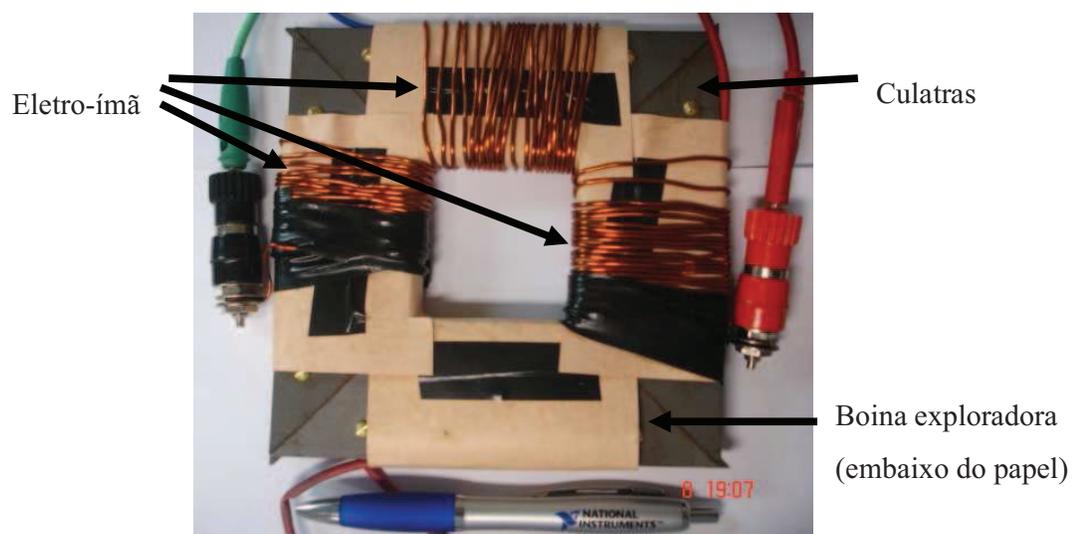


Figura 31 Foto da montagem das culatras do dispositivo para medir a curva $B \times H$.

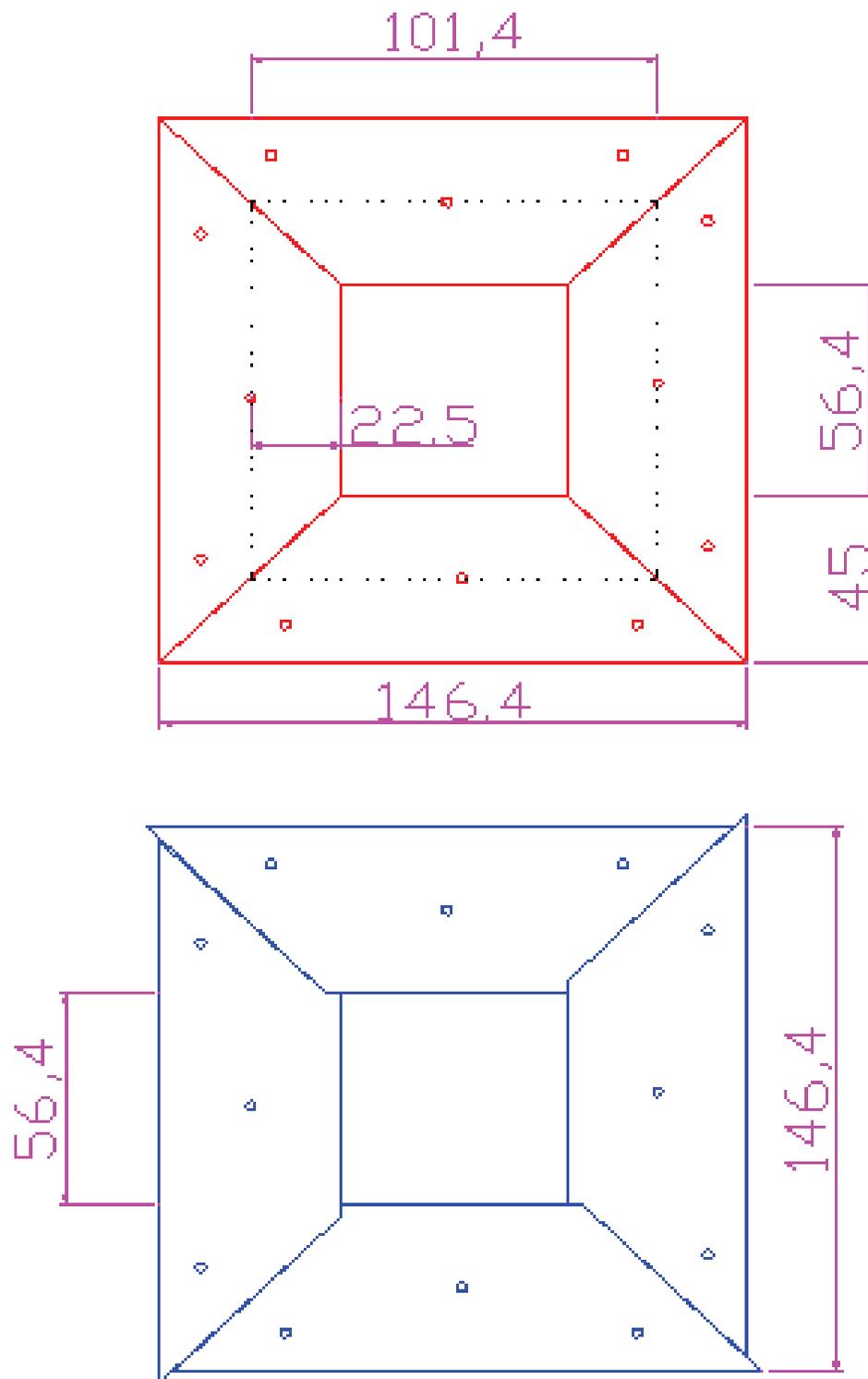


Figura 32 Esquema de montagem de duas camadas consecutivas; dimensões em mm.

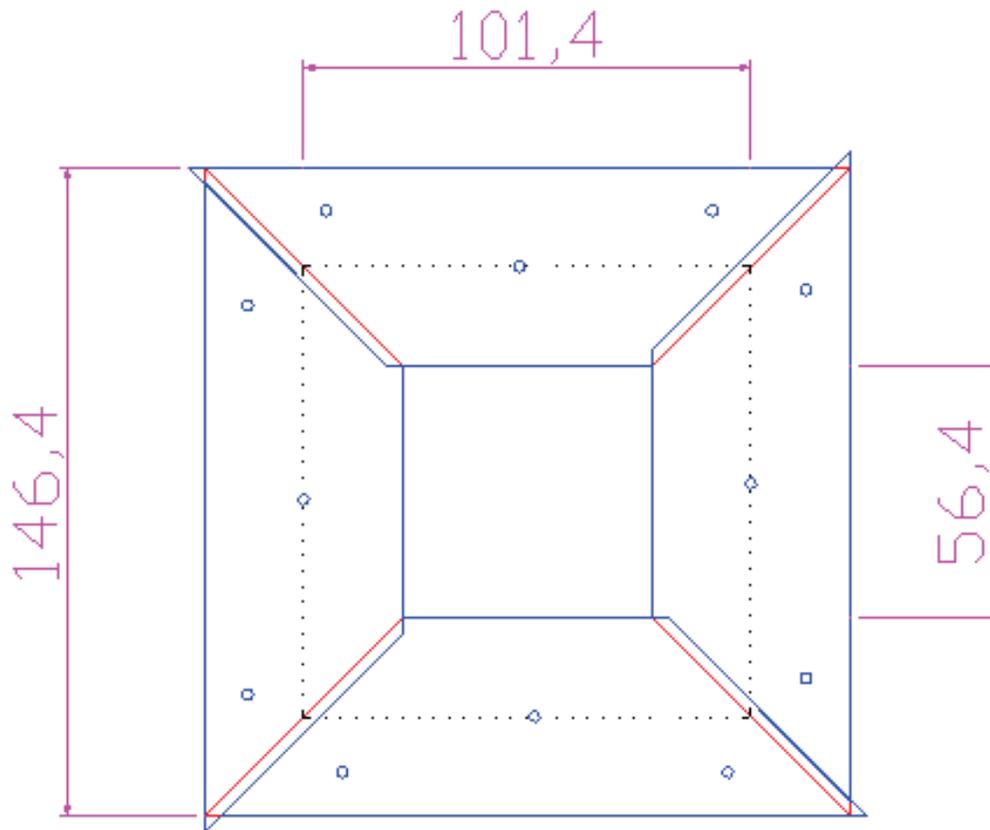


Figura 33 Esquema de sobreposição de duas camadas consecutivas, dimensões em mm.

Na montagem da culatra da Figura 33 enrola-se em três lados uma bobina com 65 espiras feita de fio 15 AWG; no quarto lado coloca-se uma bobina exploradora com 41 espiras e fio 30 AWG. Assim, de acordo com a lei circuital de Ampère vista na equação 8

$$\int_S \vec{J} d\vec{a} = \oint \vec{H} d\vec{l} = Hl = NI \quad (96)$$

para o eletroímã e

\vec{J} é o vetor densidade de corrente,

\vec{H} é o vetor intensidade do campo magnético,

l é o comprimento do caminho estabelecido pelo fluxo magnético, 0,4056 m,

N é o número de espiras do eletroímã, 65 espiras, e

I é a corrente no eletroímã.

S é a superfície plana onde passa a corrente

Deste modo determina-se a intensidade do campo magnético. Para determinar a indução magnética usa-se as equações 97 e 98.

$$\phi = \frac{V}{4,44fn} \quad (97)$$

e

$$B = \frac{\phi}{S} = \frac{\phi}{l_a z k_c} \quad (98)$$

onde

B é a indução magnética,

ϕ é o fluxo magnético,

V é a tensão induzida na bobina exploradora,

n é o número de espiras na bobina exploradora, 41 espiras,

f é a frequência do sinal senoidal, 60 Hz,

S é a seção magnética da culatra,

l_a é a largura da culatra, 0,045 m,

z é a espessura da culatra, 0,005 m, e

k_c é o fator de empilhamento, usualmente definido como sendo 0,98.

Na Figura 34 vê-se uma representação da montagem do dispositivo. O eletroímã é alimentado por uma fonte de corrente, e a bobina exploradora é conectada a um multímetro, sendo assim pode-se determinar a B e H substituindo os parâmetros acima nas equações 96 e 98

$$H = \frac{65I}{0,4056} \quad Aesp/m \quad (99)$$

$$B = \frac{V}{2,4083} \quad Wb/m^2 \quad (100)$$

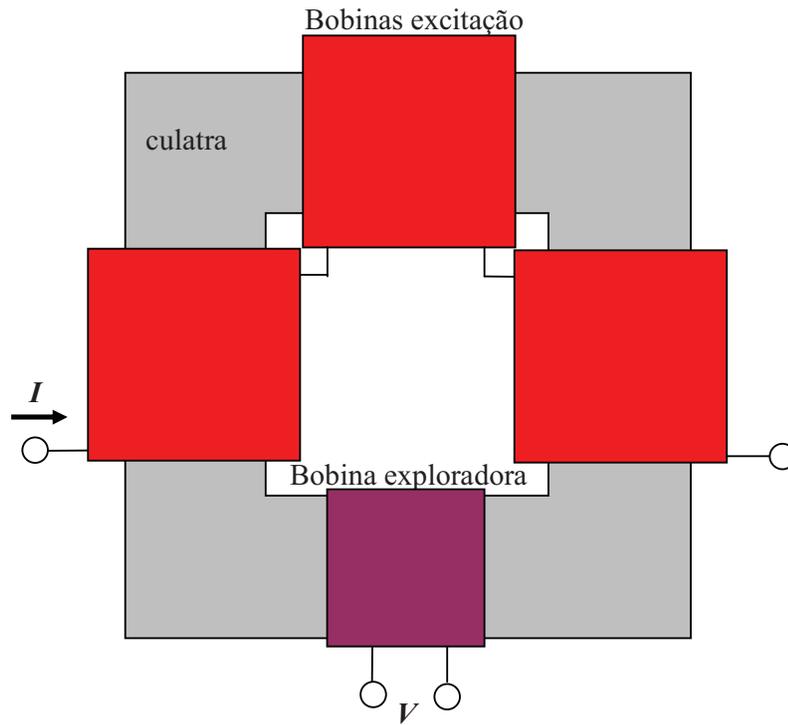


Figura 34 Esquema de montagem do dispositivo $B \times H$.

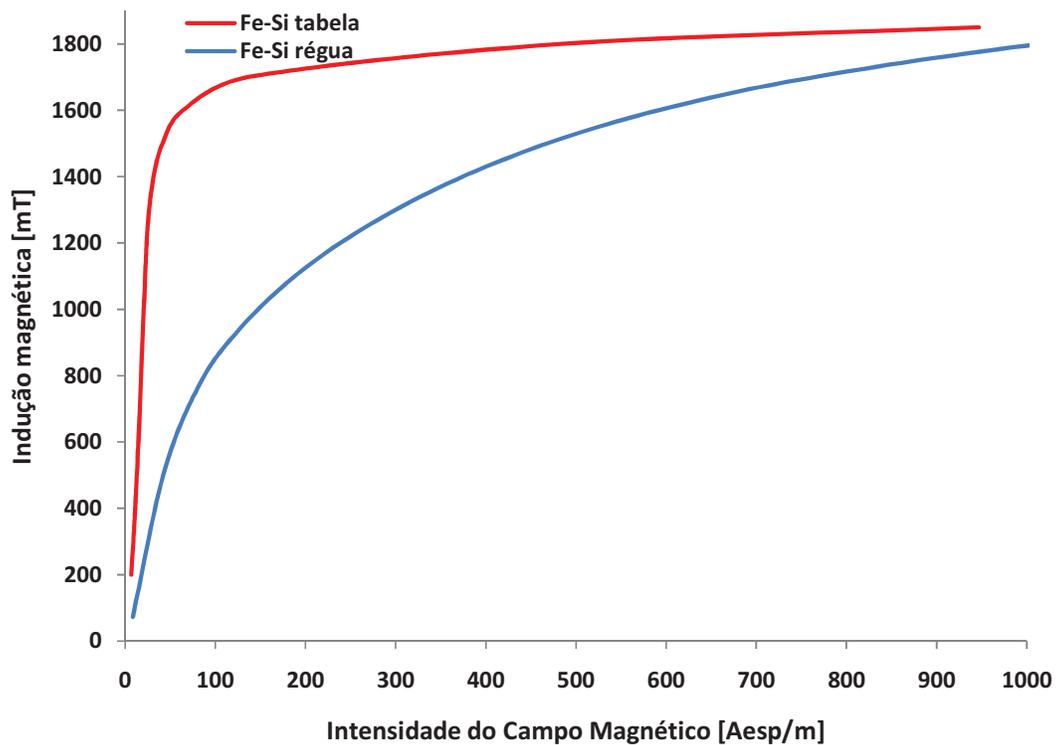


Figura 35 Curva $B \times H$ medida comparando com a curva de Tabela padrão.

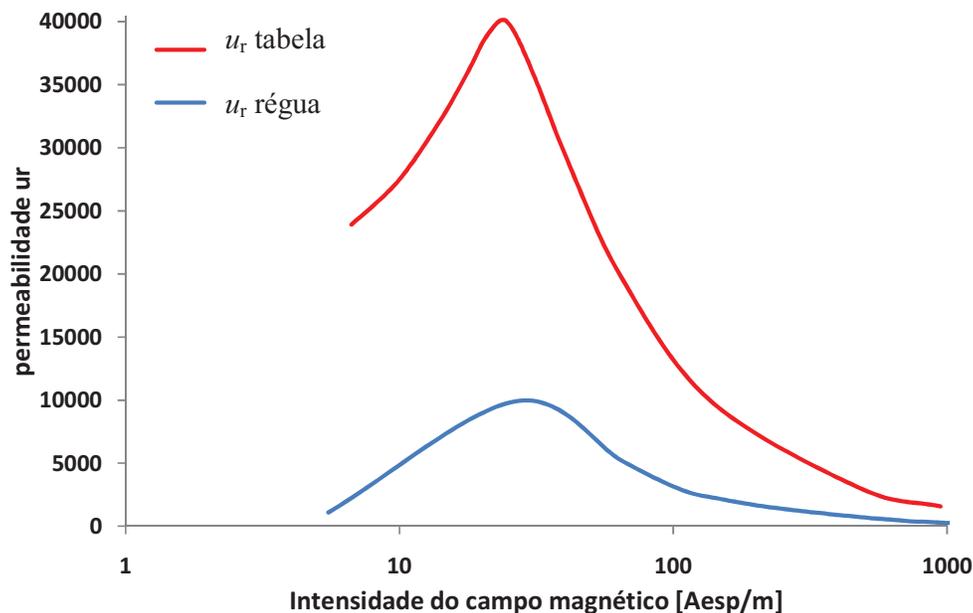


Figura 36 Curva $u_r \times H$ medida comparando com a curva de Tabela padrão.

Pode-se ver pelas Figuras 35 e 36 que os valores de indução magnética e de permeabilidade do aço de Fe-Si usado nos transdutores esta muito abaixo dos valores esperados para um aço de Fe-Si GO M4. A curva $B \times H$ adotada para calcular a excitação dos transdutores será a que foi levantada experimentalmente apenas de forma qualitativa.

5.1.2 Calculo da excitação usando a curva $B \times H$ medida

Utilizando a curva da Figura 34, escolhe-se uma indução magnética de 200 mT para o Transdutor I, quando o carro está na posição central. Isto de acordo com a Figura 36 corresponde a uma permeabilidade relativa aproximadamente igual a 5.000. Substituindo estes valores na equação 95 tem-se que

$$\mathfrak{R} = 3050400 \quad Aesp / Wb \quad (101)$$

Da equação 87 calcula-se o fluxo magnético

$$\phi = BA = 0,0000774 \quad Wb \quad (102)$$

A força magneto-motriz é determinada então pela equação 86.

$$\mathfrak{S} = \phi \mathfrak{R} = 236,1 \quad Aesp \quad (103)$$

Escolhe-se confeccionar o carro com 310 espiras com Fio 19 AWG e de acordo com a equação 96.

$$I = \frac{\mathfrak{F}}{N} = \frac{236}{310} = 0,76 \text{ A} \quad (104)$$

Escolhe-se o valor de 0,8 A para excitar o eletroímã do carro para compensar perdas magnéticas, como, por exemplo, correntes de Foucault por fluxo magnético disperso que não estão consideradas na dedução acima.

5.2. Resultados estáticos dos transdutores

Analisa-se nesta seção os resultados das medições estáticas feitas com os dois transdutores. As variáveis medidas são a corrente nas bobinas do carro, o fluxo magnético produzido no carro através de uma bobina exploradora no carro com 40 espiras, o fluxo magnético nas culatras laterais através de uma bobina exploradora com derivações de 200/100/50 espiras e a saída do transdutor resistivo de posição que dá a referência de posição de -10 a +10 Vcc. O esquemático da montagem da experiência pode ser visto nas Figuras 36 a 38.

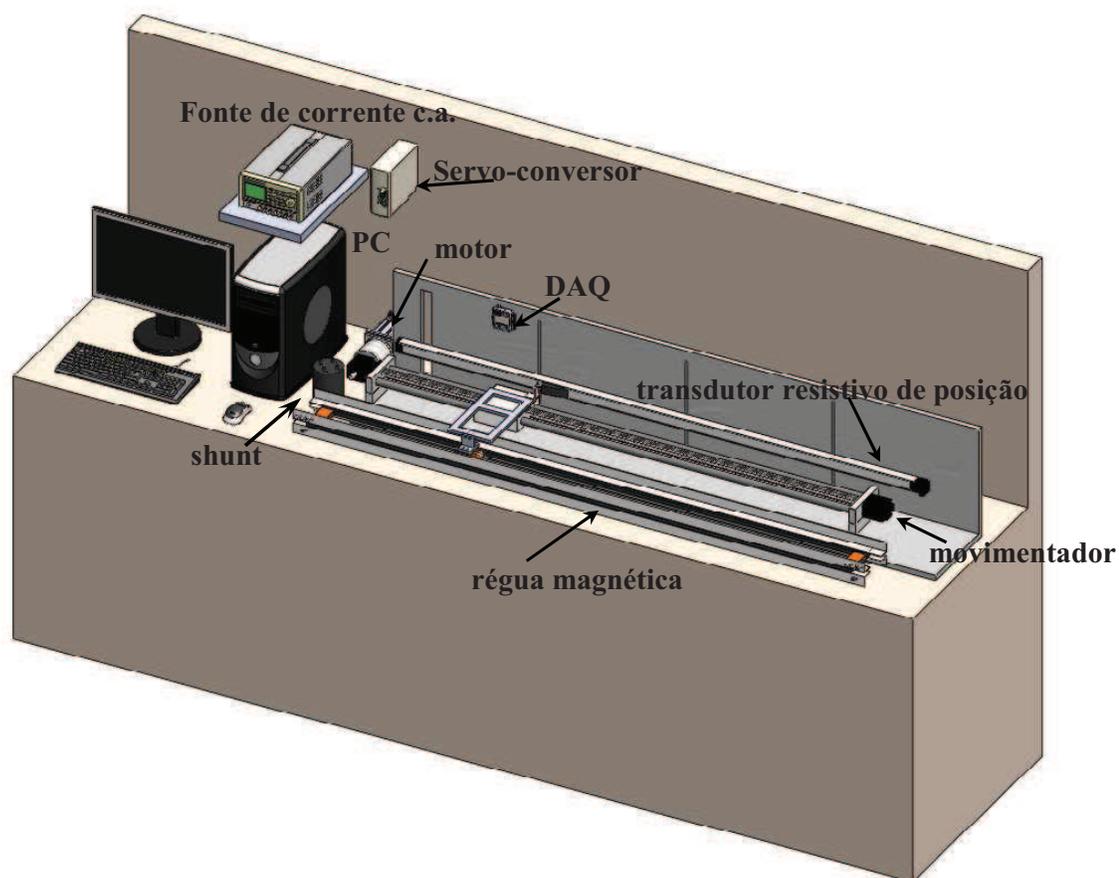


Figura 37 Montagem da experiência da curva estática.

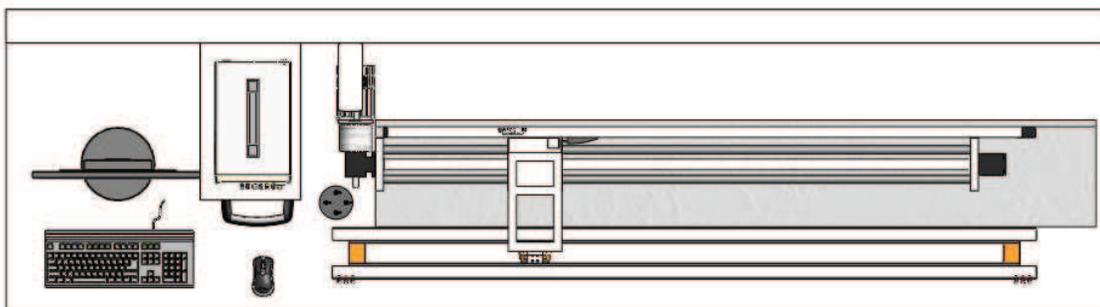


Figura 38 Vista superior da montagem da experiência.

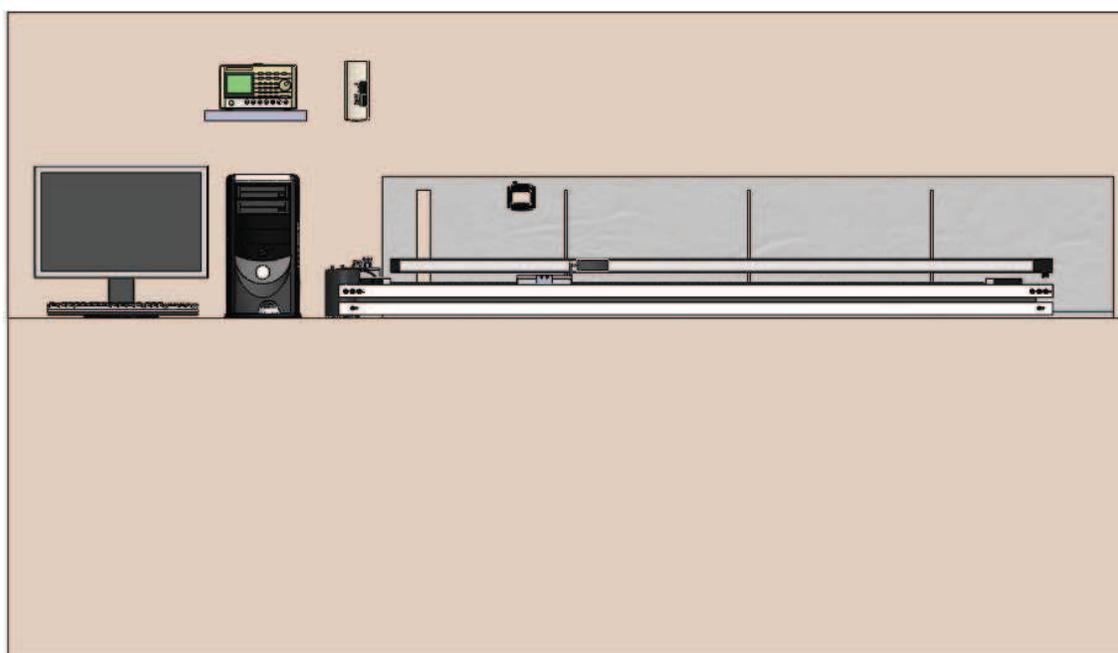


Figura 39 Vista frontal da montagem da experiência.

Então, para obter-se a curva de resposta experimental estática da régua magnética, acopla-se a mesma a um movimentador linear que é tracionado por um servo-motor e este por sua vez é acionado por um servo-conversor. O movimentador também está acoplado a um transdutor de posição resistivo com saída de -10 V a $+10\text{ V}$ contínua, que dará a referência de posição. O carro é alimentado por uma fonte de corrente senoidal.

As tensões induzidas nas bobinas exploradoras e o sinal de posição do sensor resistivo são adquiridos por uma placa de aquisição de dados DAQ (*Data Acquisition*). A corrente da bobina central no carro é adquirida através da tensão sobre um shunt de 1 ohm .

Para obter-se a curva de calibração do transdutor utiliza-se então o servo-conversor para dar passos de volta, comandados pelo PC via ethernet e em cada passo faz-se a aquisição dos sinais através do DAQ. Estes dados são enviados via USB ao computador e processados pelo programa LABVIEW, onde os sinais alternados são integrados durante 1 segundo para obter-se os valores *rms* dos sinais c.a.. O carro parte da esquerda para direita parando 100 vezes, avançando a uma velocidade de 1m/s entre cada passo e com uma rampa de aceleração de 30 ms. Na volta do carro este processo de aquisição é igual. Este procedimento é repetido 10 vezes para ter-se uma curva média. O mesmo procedimento é realizado com o carro partindo inicialmente da direita para esquerda.

Este procedimento foi repetido para frequências de 60, 120 e 240 Hz, mantendo sempre a mesma força magneto-motriz aplicada nos três casos. Devido à limitação de 10 V pico a pico na entrada do DAQ, as bobinas exploradoras nas culatras laterais ficaram com três derivações, 200 espiras para frequência de 60 Hz, 100 espiras para 120 Hz e 50 espiras para 240 Hz, todas com fio 30 AWG. Como a força magneto-motriz é a mesma para as três frequências, o uso das três derivações garante uma mesma escala de medição no DAQ nas três frequências e consequentemente tem-se a mesma resolução para as três frequências estudadas. Foi colocada ainda uma bobina exploradora no carro com 40 espiras, fio 30 AWG, para medir o fluxo magnético produzido no carro. No Apêndice C comenta-se sobre as características dos aparelhos utilizados nas experiências.

O mesmo procedimento para calibração estática e excitação foi mantido no Transdutor II.

5.2.1 Resultados estáticos do Transdutor I

As variáveis medidas pelo processo descrito na seção 5.2 são então o fluxo magnético nas culatras laterais através das bobinas exploradoras, a corrente no carro através de um shunt de 1 ohm, o fluxo magnético produzido no carro através de uma bobina exploradora no carro e a tensão no condicionador de sinais de posição do transdutor de posição resistivo.

As curvas médias dos ciclos de ida e volta com o carro partindo da esquerda e depois da direita para as três frequências estudadas podem ser vistas no Apêndice A, onde se mostra os desvios padrões das grandezas medidas x , V_1 , V_2 , I_c , V_c e $S(x)$ com seu desvio padrão apenas para os piores casos dos desvios padrões de V_1 e ou V_2 de cada uma das três frequências estudadas com o carro partindo da esquerda e da direita para o Transdutor I e II. Analisam-se nesta seção as médias das curvas com o carro partindo da esquerda para direita.

Na Figura 40 vêem-se as tensões médias de V_1 e V_2 induzidas nas culatras laterais para as três frequências com o carro partindo da esquerda para direita.

A corrente no carro, Figura 41, não tem variação significativa em 60 e 120 Hz; na frequência de 240 Hz a fonte de corrente não conseguiu manter o mesmo nível, mas mesmo assim a diferença é da ordem de 0,12%; pode-se assim considerar que foi aplicada a mesma força magneto-motriz nos três casos.

O valor das curvas do sinal diferencial $S(x)$ das três frequências testadas, Figura 42, não tem alteração significativa entre elas, mesmo tendo os valores das curvas de tensão induzidas nas culatras para frequência de 60 e 240 Hz, Figura 40, diferenças da ordem de 20%. Devido ao caráter diferencial deste sinal, não há uma mudança significativa no sinal de saída.

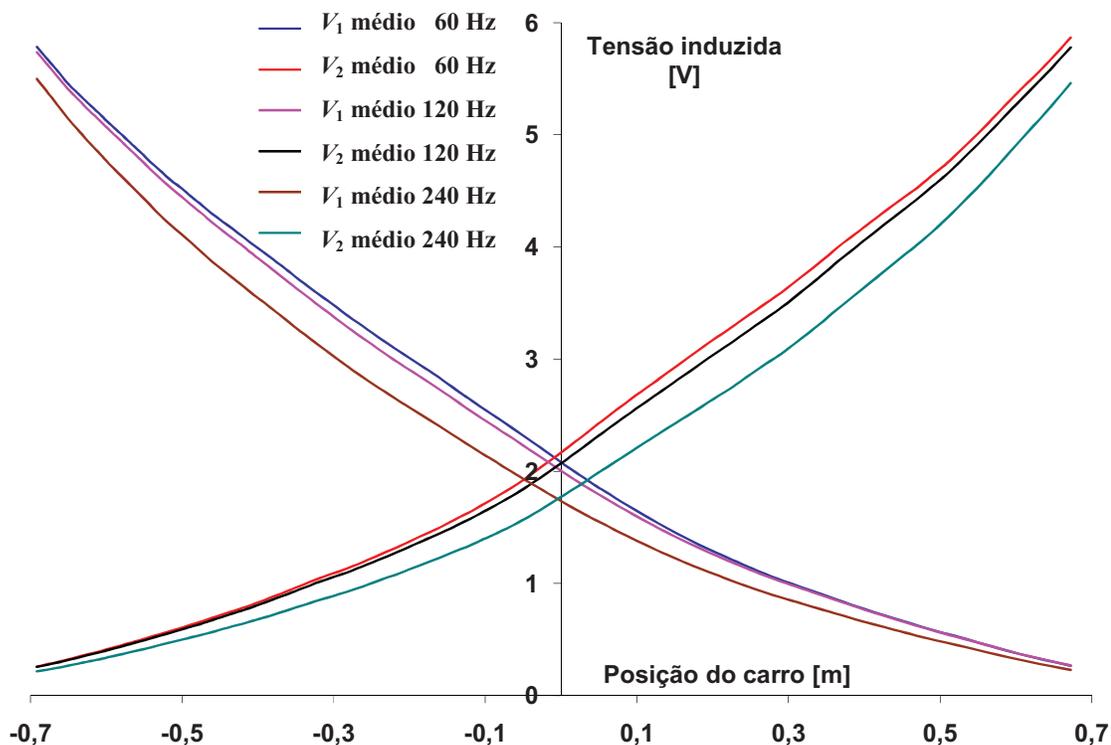


Figura 40 Curva média de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita.

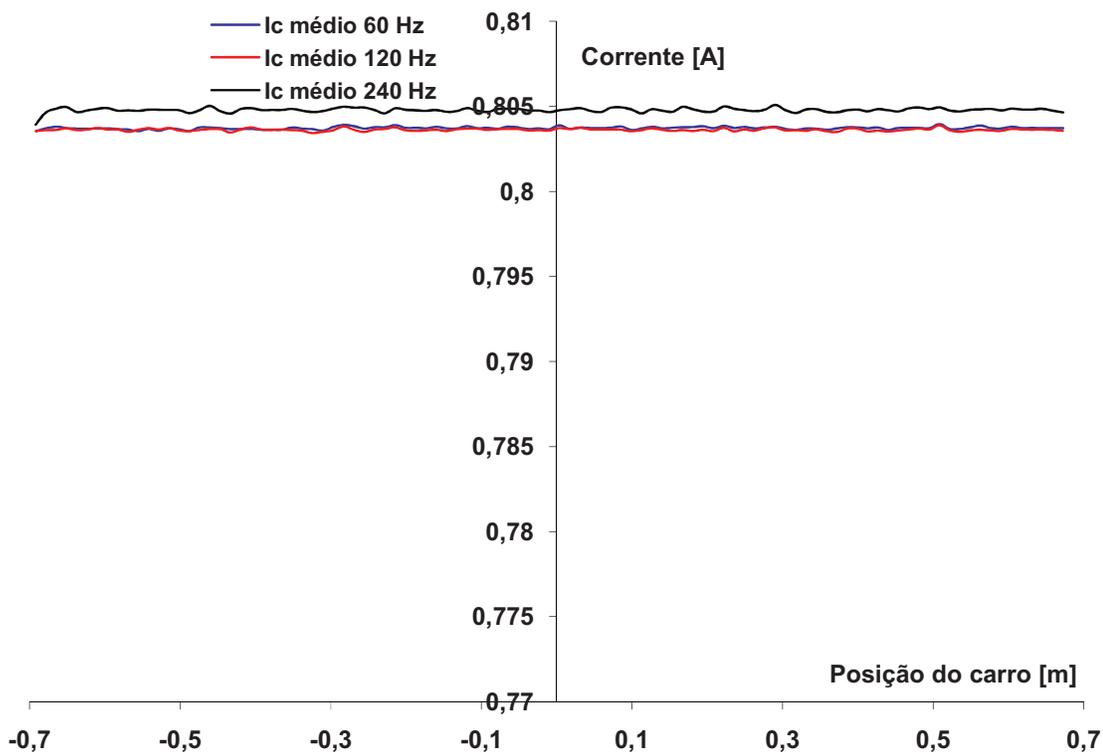


Figura 41 Curva média de I_c com o carro partindo da esquerda para direita.

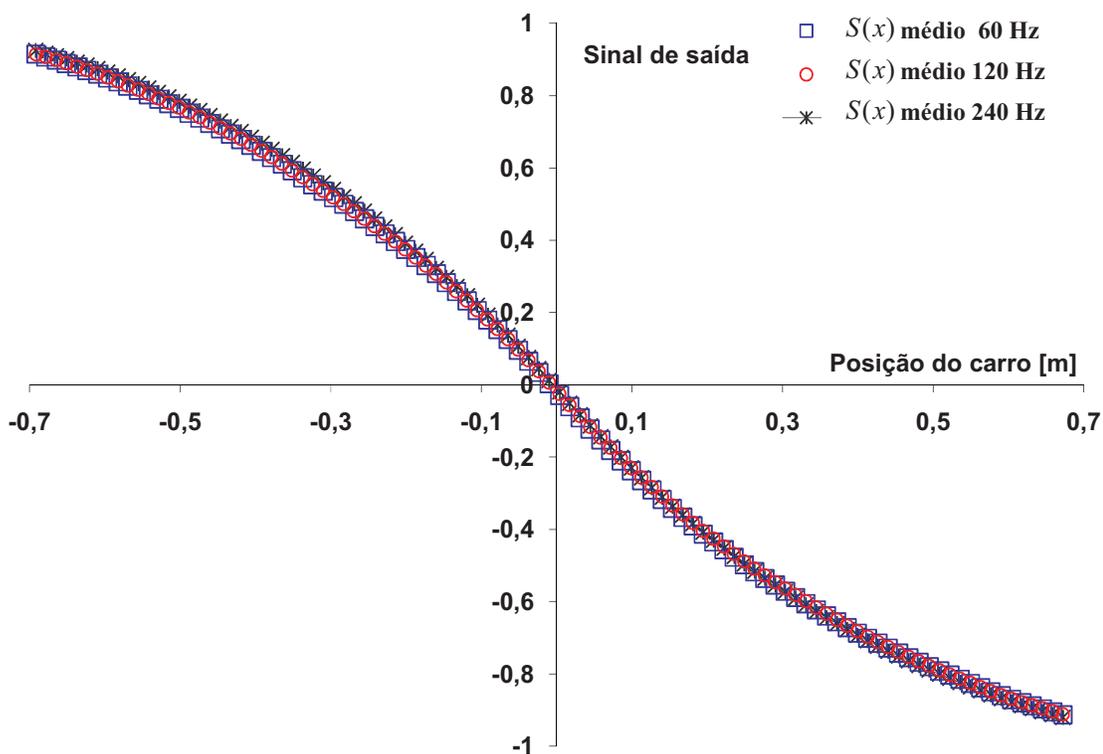


Figura 42 Curva média de $S(x)$ com o carro partindo da esquerda para direita.

Na Figura 43 vê-se as curvas do fluxo magnético produzido no carro, onde para o Transdutor I e II tem-se que $\phi_c = V_s / (177,6 \cdot f)$ [Wb]. Pode-se notar que o fluxo magnético do lado esquerdo do eixo central é um pouco menor que do lado direito, não havendo uma perfeita simetria como deveria ser, provavelmente devido a imperfeições na montagem. Isto acontece devido à montagem não ser perfeitamente simétrica, ou seja, as culatras horizontais não ficaram perfeitamente paralelas. O fluxo magnético tem um mínimo na sua posição central e aumenta quando o carro se desloca para as extremidades.

Pode-se, então, calcular a relutância vista pelo carro, Figura 44, pois se sabe a força magneto-motriz aplicada no carro, onde

$$\mathfrak{R} = \frac{\mathfrak{S}}{\phi} = \frac{NI}{\phi} \quad (105)$$

A relutância vista do carro é maior em 240 Hz, pois a culatra ferromagnética do transdutor tem uma maior perda no ferro e uma menor permeabilidade magnética nesta frequência. Como neste caso a força magneto-motriz é constante, a relutância tem um máximo na posição central e diminui quando se desloca o carro para qualquer das extremidades.

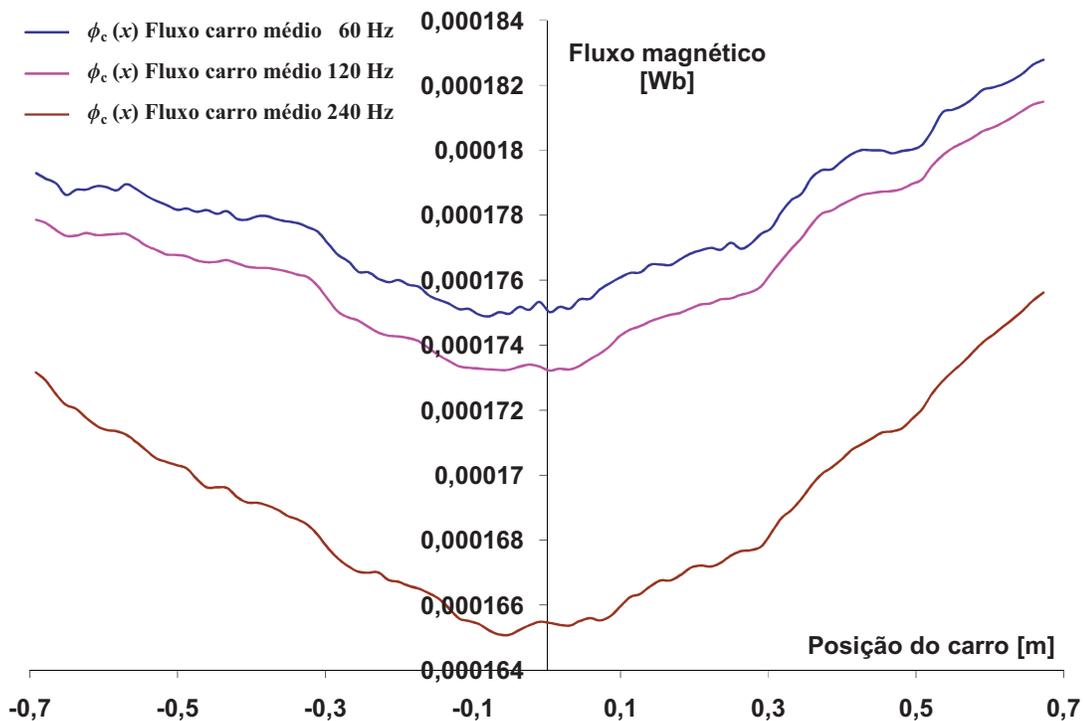


Figura 43 Curva média dos fluxos magnéticos produzidos no carro com este partindo da esquerda para direita.

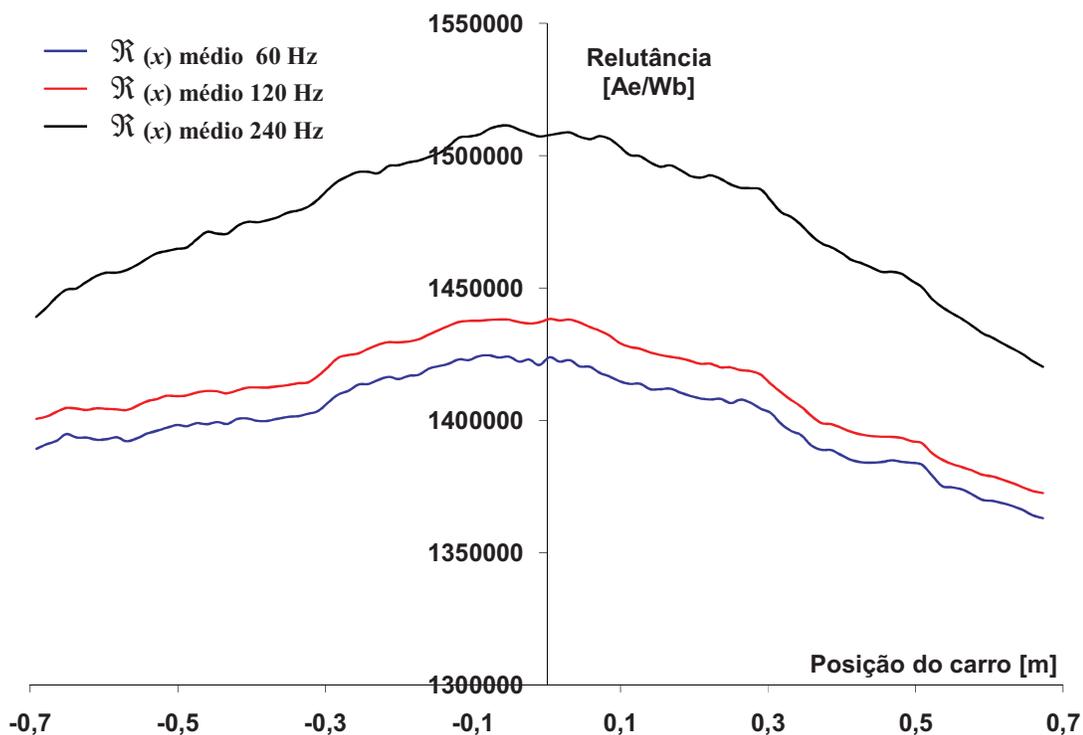


Figura 44 Curva média das relutâncias com o carro partindo da esquerda para direita.

Na Figura 45 tem-se uma comparação do fluxo magnético produzido no carro com a soma dos fluxos magnéticos nas culatras laterais, levando-se em conta que não há saturação magnética no carro. Pode-se assim ter uma visualização do fluxo magnético disperso, que é a relação entre as duas curvas do gráfico para cada frequência. Assim na Figura 46 observar-se o percentual de fluxo disperso. O fluxo magnético disperso é máximo na posição central ficando acima dos 50% para as três frequências medidas. Para as frequências de 60 e 120 Hz a diferença é da ordem de 1% e entre 60 e 240 Hz de 6% na posição central. Nas extremidades as três frequências tendem a um valor menor e igual para os três casos. Então, quando o carro se aproxima de uma extremidade, o lado com o menor caminho magnético, há um aumento do fluxo magnético e conseqüentemente há um aumento da permeabilidade magnética nele. Com isto tem-se uma diminuição da relutância neste ramo e um aumento no outro ramo, produzindo uma diminuição do fluxo magnético disperso.

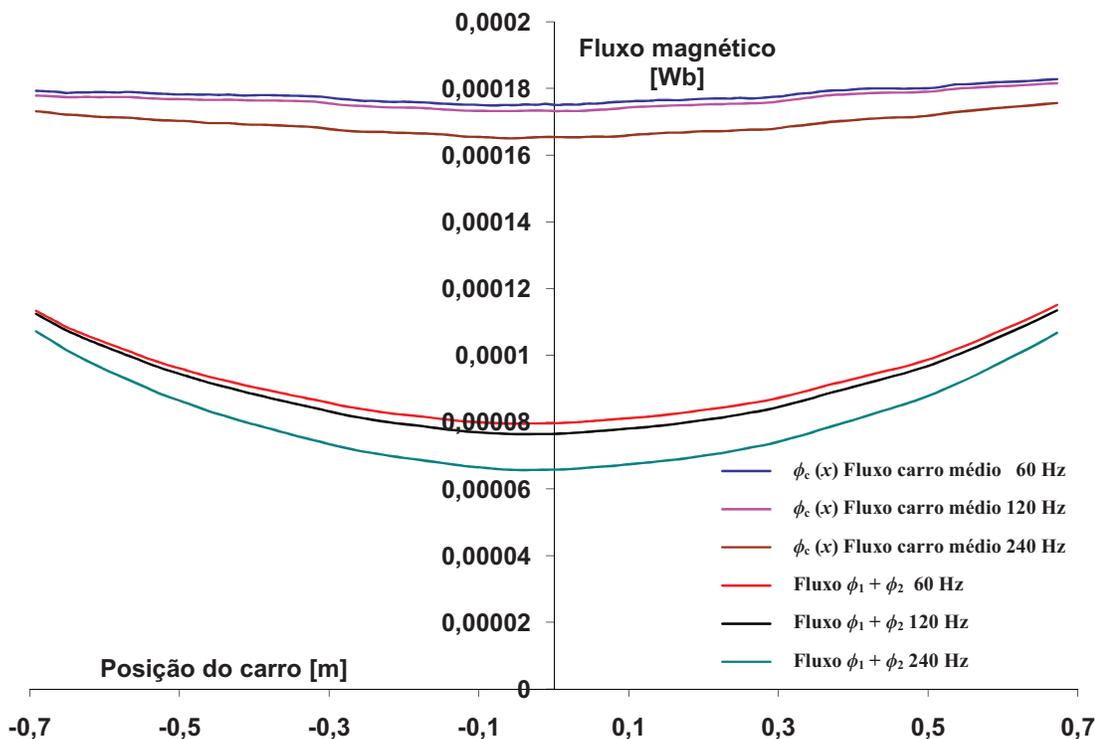


Figura 45 Curva média dos fluxos magnéticos com o carro partindo da esquerda para direita.

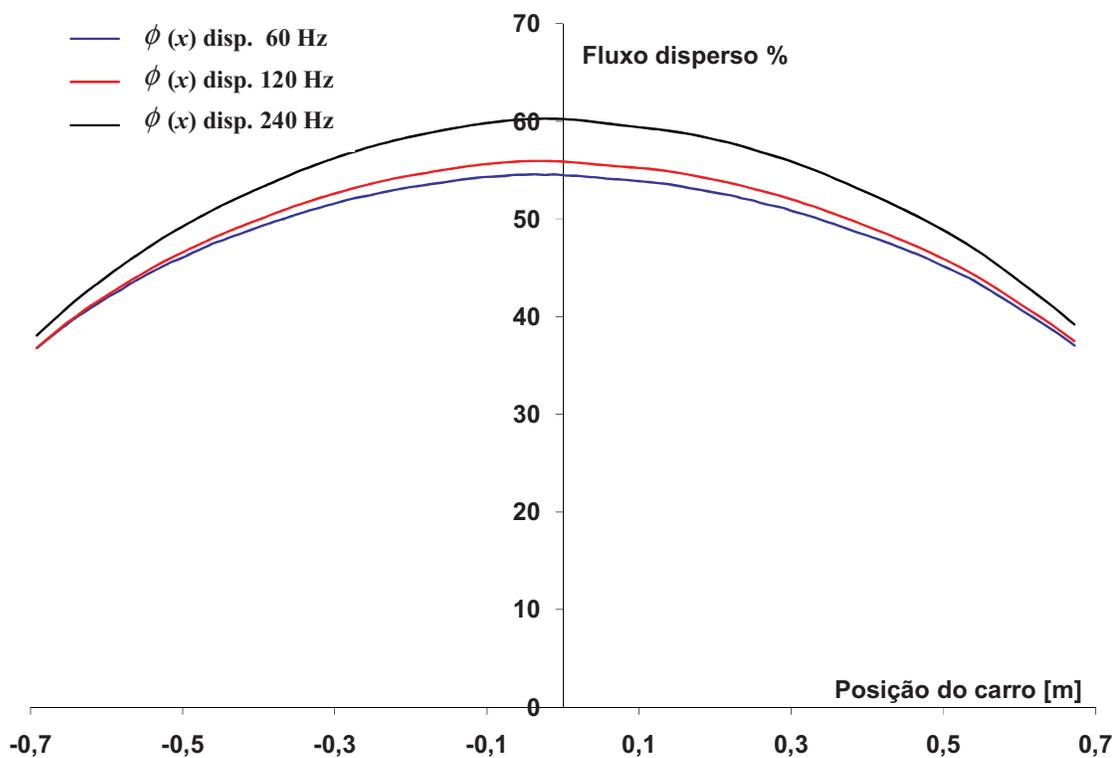


Figura 46 Curva média do percentual dos fluxos magnéticos dispersos com o carro partindo da esquerda para direita.

5.2.2 Resultados estáticos do Transdutor II

As mesmas variáveis e procedimentos adotados para obter as curvas de calibração do Transdutor I são adotados no Transdutor II.

Na Figura 47 pode-se ver que, em relação ao Transdutor I, o nível de excitação nas culatras laterais é maior no Transdutor II, e as curvas para as três frequências são mais distintas, o que é devido à maior janela entre as culatras horizontais, pois diminui o fluxo disperso.

Na Figura 48, que mostra a corrente no carro para as três frequências, vê-se que novamente que não há uma diferença significativa entre a corrente em 60 Hz e a de 120 Hz. A corrente em 240 Hz novamente ficou um pouco acima da ordem de 0,1%.

O sinal de saída visto na Figura 49 novamente não sofre alteração significativa, apesar do nível de excitação nas culatras laterais ser diferentes para as três frequências como no Transdutor I.

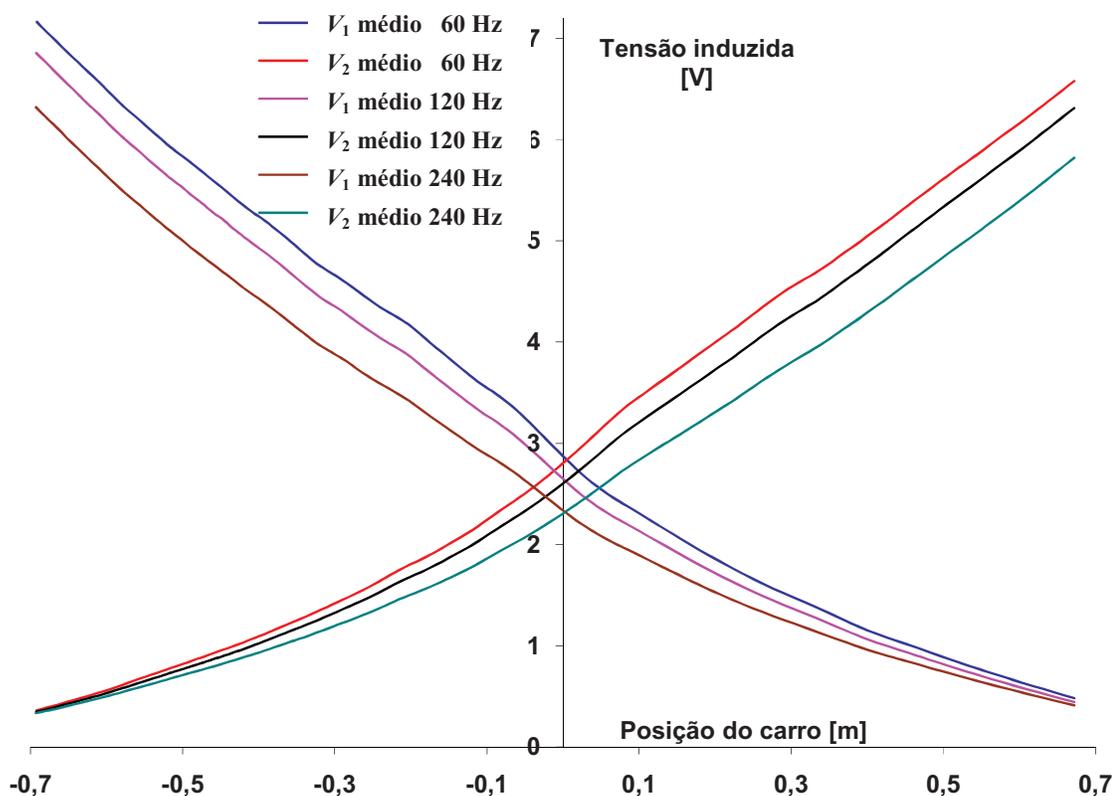


Figura 47 Curva média de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita para as frequências de 60, 120 e 240 Hz.

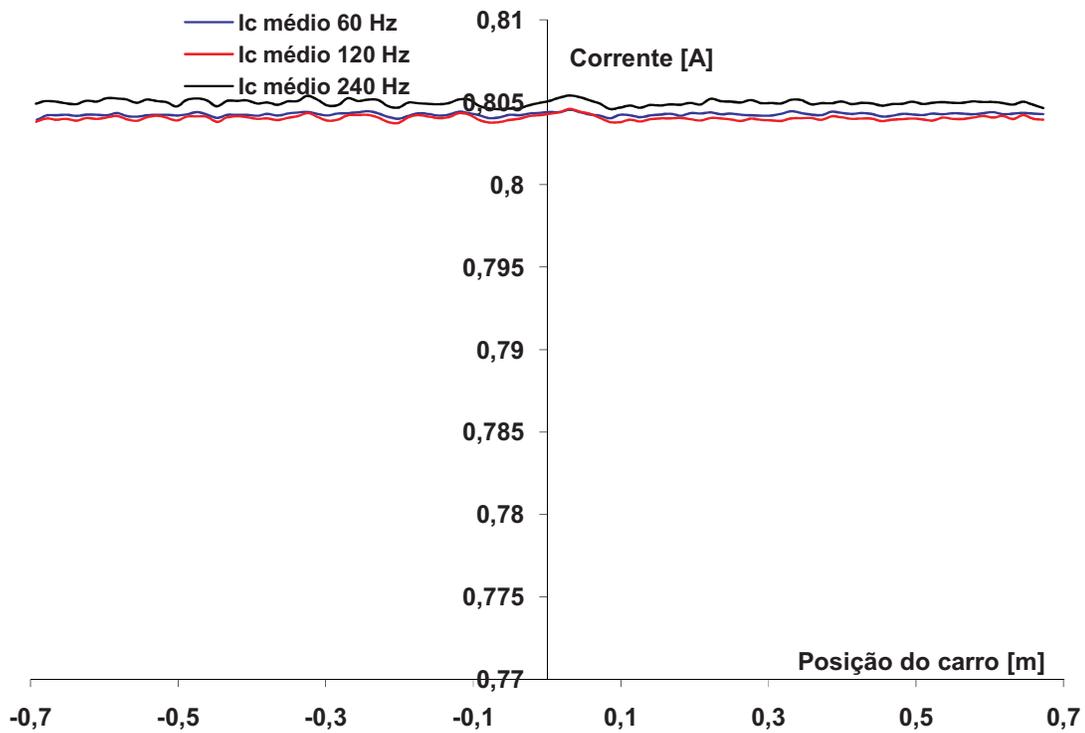


Figura 48 Curva média de I_c com o carro partindo da esquerda para direita para as frequências de 60, 120 e 240 Hz.

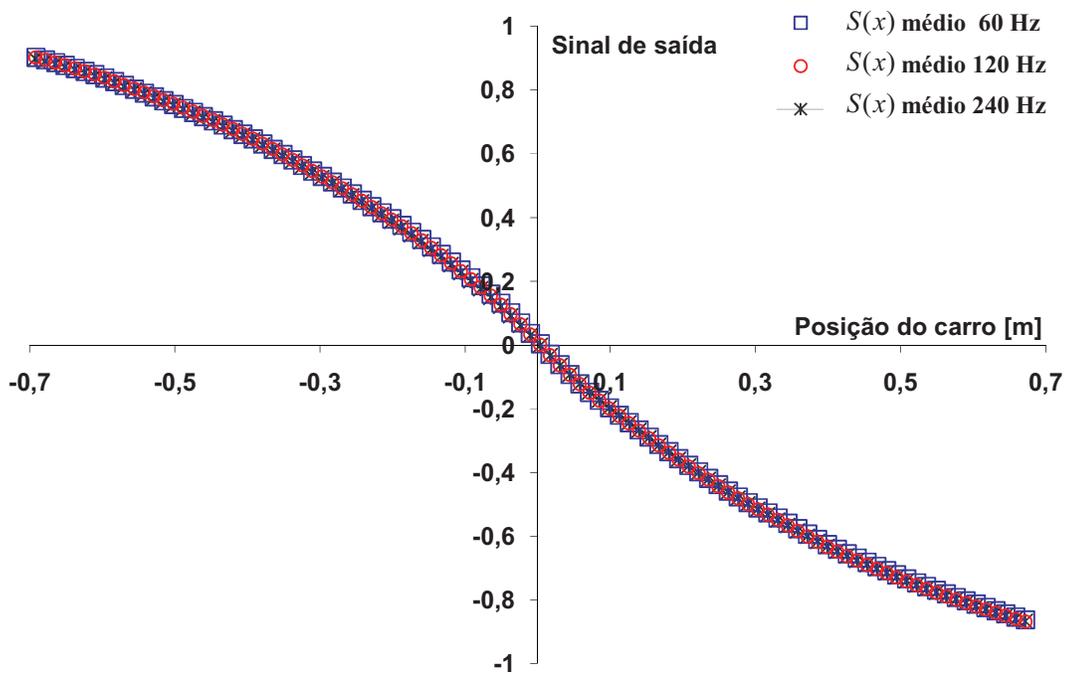


Figura 49 Curva média de $S(x)$ com o carro partindo da esquerda para direita para as frequências de 60, 120 e 240 Hz.

O fluxo magnético produzido no carro é maior no Transdutor II, Figura 50. Como a janela entre as culatras laterais é maior, mais fluxo magnético se estabelece através das culatras, aumentando assim a permeabilidade magnética do Fe-Si e, conseqüentemente, diminuindo a relutância do circuito magnético. Observa-se que a curva do fluxo magnético não é exatamente simétrica em relação ao eixo central devido à imperfeição na montagem das culatras. Como a força magneto-motriz é constante, a relutância do circuito, vista do carro, é menor, Figura 51, que a do Transdutor I.

Na Figura 52 vê-se que, em relação ao Transdutor I, tem-se mais fluxo magnético produzido no carro e mais fluxo magnético nas culatras. Isso é devido à maior janela entre as culatras, porém o fluxo magnético disperso percentual não muda significativamente entre os dois transdutores. Nota-se também que as curvas de fluxo magnético disperso para as três frequências estão mais próximas do que no Transdutor II.

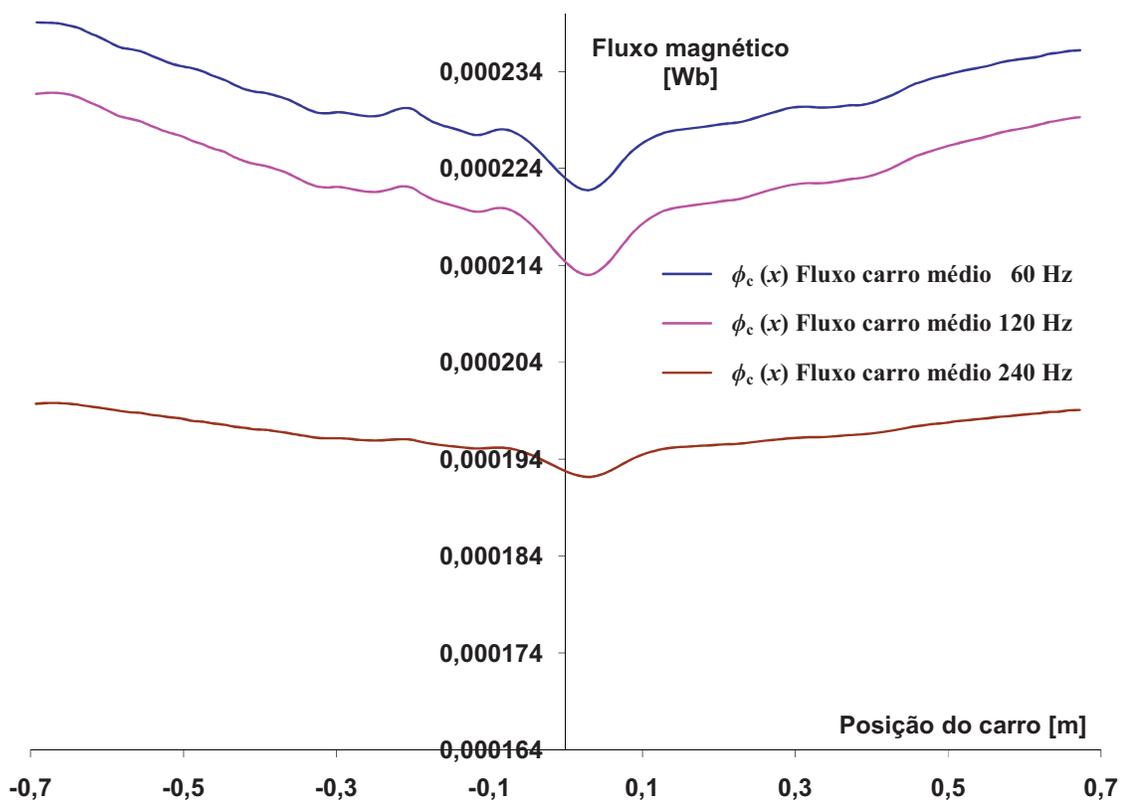


Figura 50 Curva média dos fluxos magnéticos produzidos no carro com este partindo da esquerda para direita para as frequências de 60, 120 e 240 Hz.

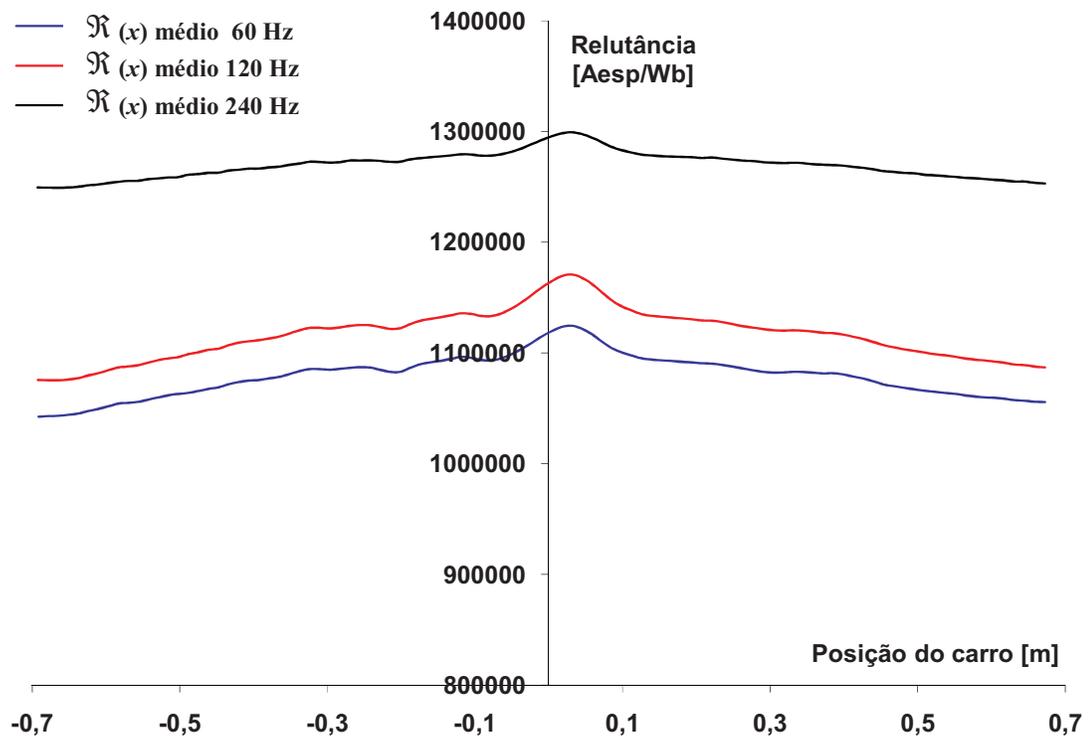


Figura 51 Curva média das relutâncias com o carro partindo da esquerda para direita para as frequências de 60, 120 e 240 Hz.

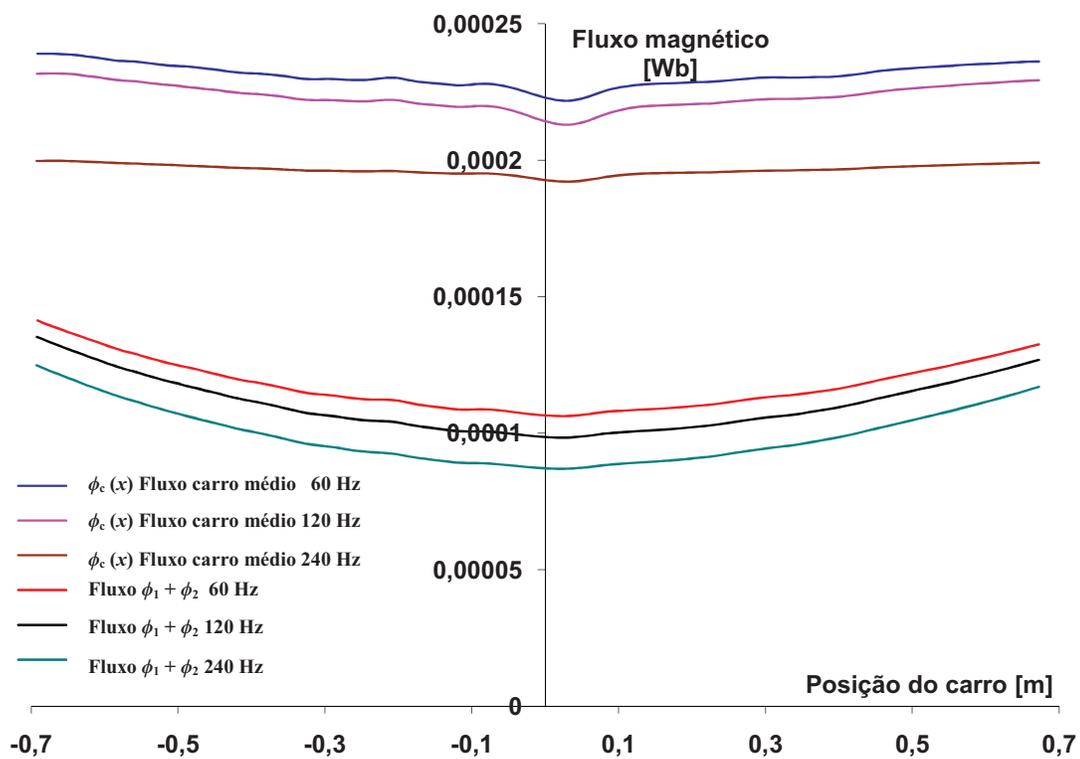


Figura 52 Curva média dos fluxos magnéticos produzidos no carro com este partindo da esquerda para direita para as frequências de 60, 120 e 240 Hz.

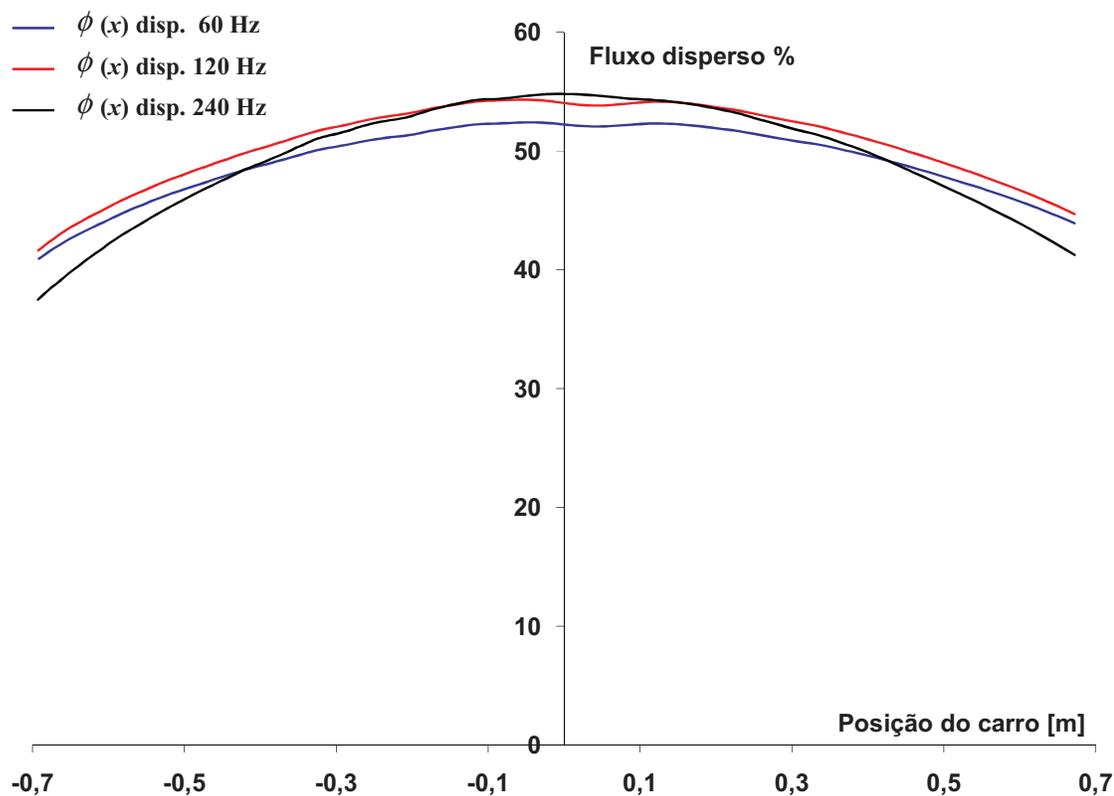


Figura 53 Curva média do percentual dos fluxos magnéticos dispersos com o carro partindo da esquerda para direita para as frequências de 60, 120 e 240 Hz.

5.2.3 Comparação entre os resultados dos Transdutores I e II

Compara-se agora os resultados do Transdutor I com o Transdutor II que tem uma janela entre as culatras horizontais 3,83 vezes maior e fazendo isto somente para a frequência de 60 Hz. Na Figura 54, tem-se uma comparação da tensão induzida nas bobinas das culatras verticais, onde, para a posição central, tem-se que esta é 38,5% maior no Transdutor II. Na Figura 55 vê-se que o fluxo magnético produzido no carro é 27,5% maior no Transdutor II e, conseqüentemente, a relutância do circuito magnético vista do carro é 27,5% menor no Transdutor II, Figura 56.

Analisando o fluxo disperso na Figura 57, vê-se que, apesar da janela no Transdutor II ser 3,83 vezes maior no Transdutor II, o fluxo magnético disperso proporcionalmente é somente 4,3% menor. Quando o carro se desloca para as extremidades o fluxo disperso acaba ficando proporcionalmente menor no Transdutor I. Isto é devido ao modo como varia a permeabilidade magnética, Figura 36, nos dois casos.

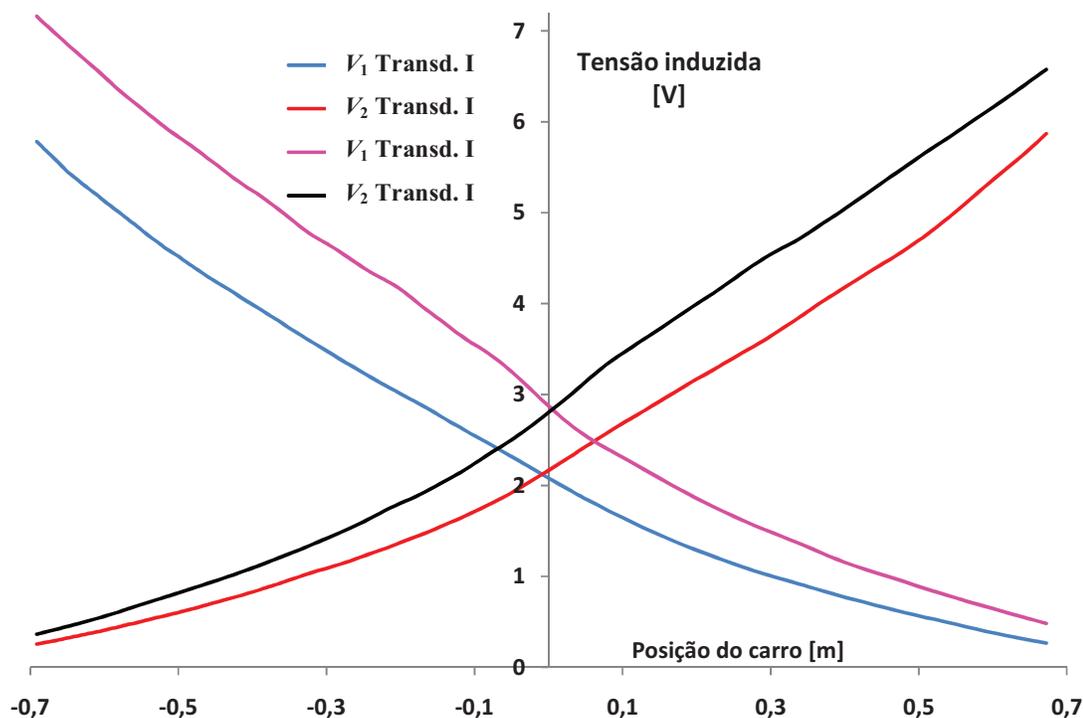


Figura 54 Curva média de V_1 e V_2 do Transdutor I e II com o carro partindo da esquerda para direita para frequência de 60 Hz.

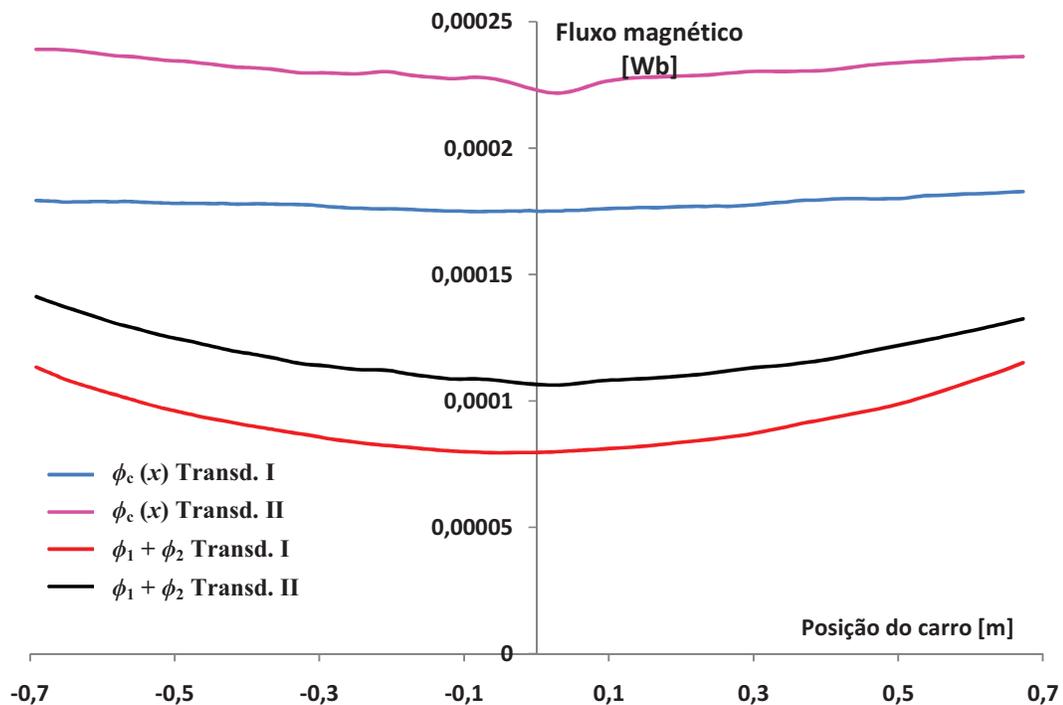


Figura 54 Curva média dos fluxos magnéticos do Transdutor I e II com o carro partindo da esquerda para direita para frequência de 60 Hz.

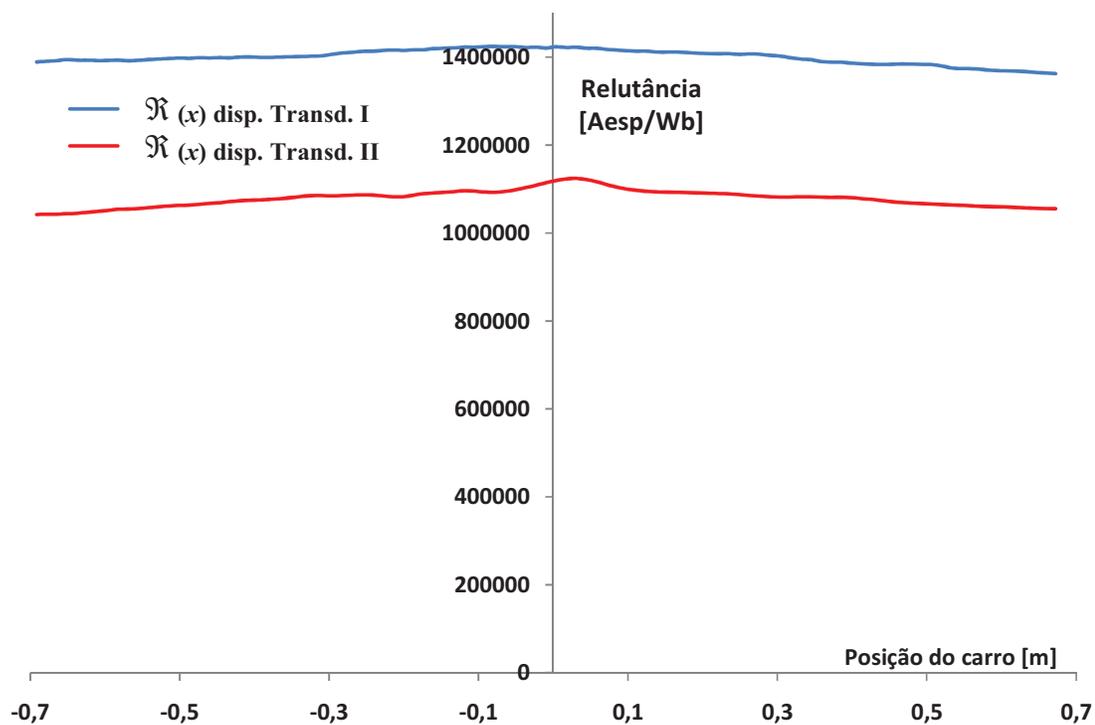


Figura 55 Curva média das relutâncias vista do carro do Transdutor I e II com o carro partindo da esquerda para direita para frequência de 60 Hz.

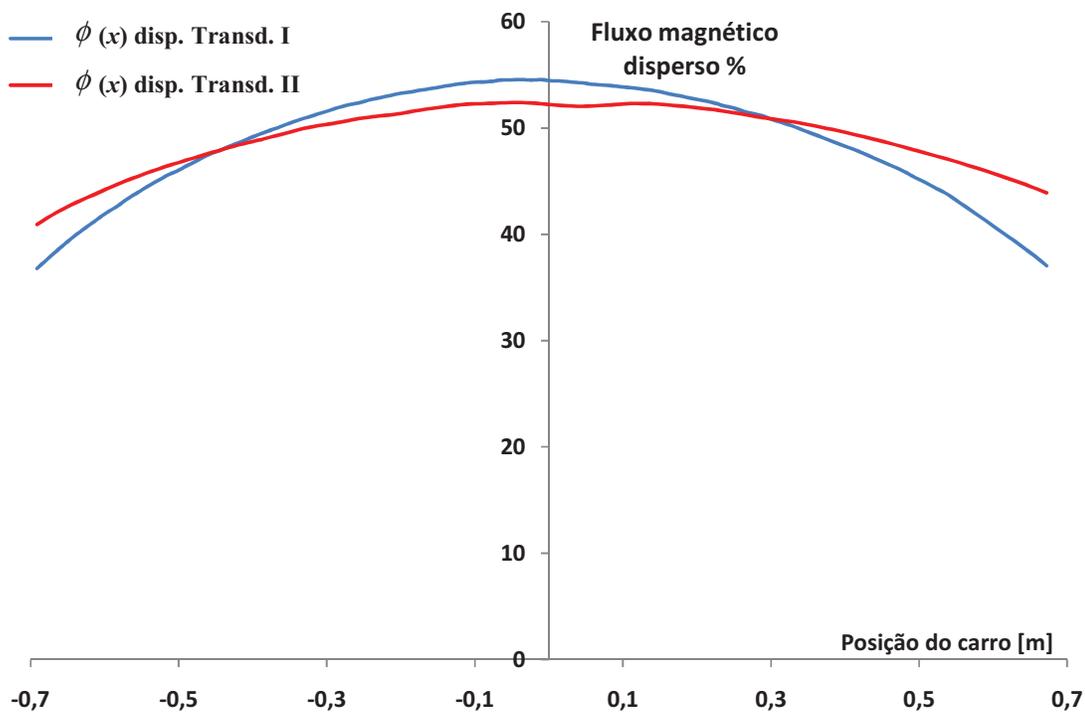


Figura 56 Curva média dos fluxos magnéticos dispersos do Transdutor I e II com o carro partindo da esquerda para direita para frequência de 60 Hz.

5.3. Comparações dos valores medidos e os calculados para o Transdutor I e II

Comparam-se, nesta seção, os valores de fluxo magnéticos medidos e calculados para os Transdutores I e II, supondo inicialmente que o fluxo magnético produzido no carro e a permeabilidade magnética não variem com a posição do carro e depois introduzindo a sua variação.

5.3.1 Comparação entre os valores medidos e calculados do Transdutor I

Comparando os valores da Figura 25 com os da Figura 54 supondo uma permeabilidade relativa constante de $5.000\mu_0$ e frequência de 60 Hz, assim como também constante o fluxo magnético disperso ao longo da excursão do carro, como visto na Figura 58, onde se pode ver que os valores medidos e calculados estão muito diferentes por esta abordagem.

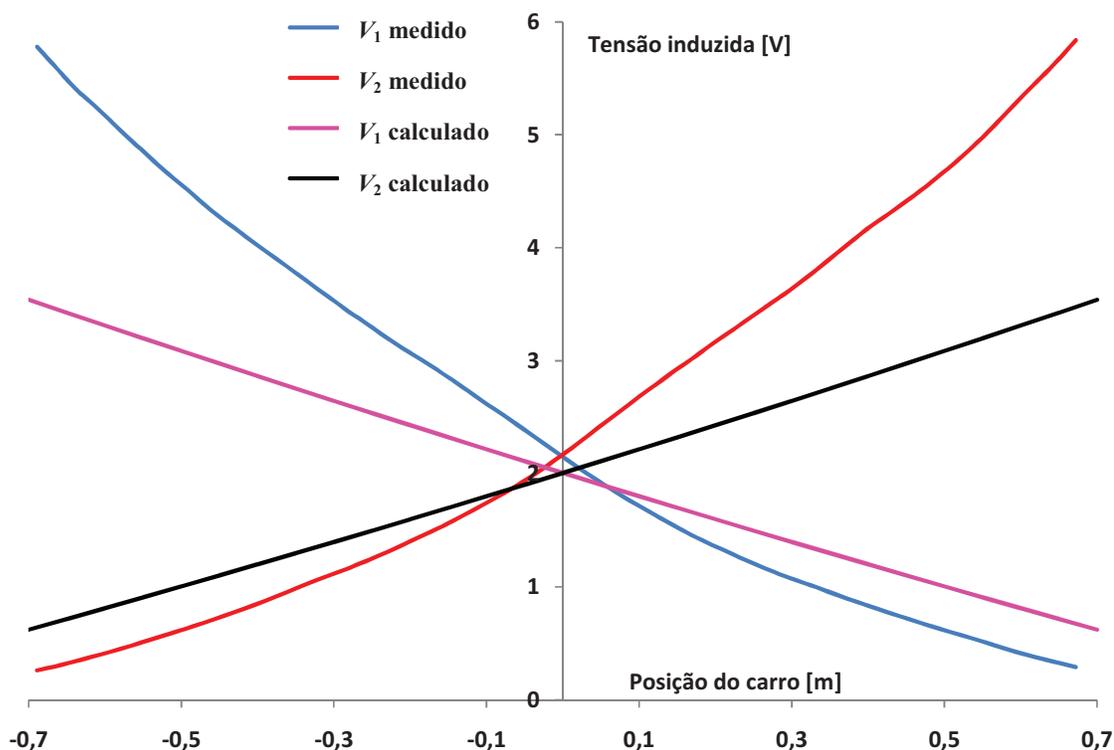


Figura 58 Comparação dos valores medidos e calculados do Transdutor I para frequência de 60 Hz.

Entretanto, a permeabilidade relativa ao longo da excursão do carro não é constante como se pode ver na Figura 54, onde é mostrada a faixa de operação do transdutor. Por este motivo o fluxo disperso também não é constante, pois a soma de V_1 e V_2 não é constante. Isto pode ser melhor visto nas Figuras 58 e 59.

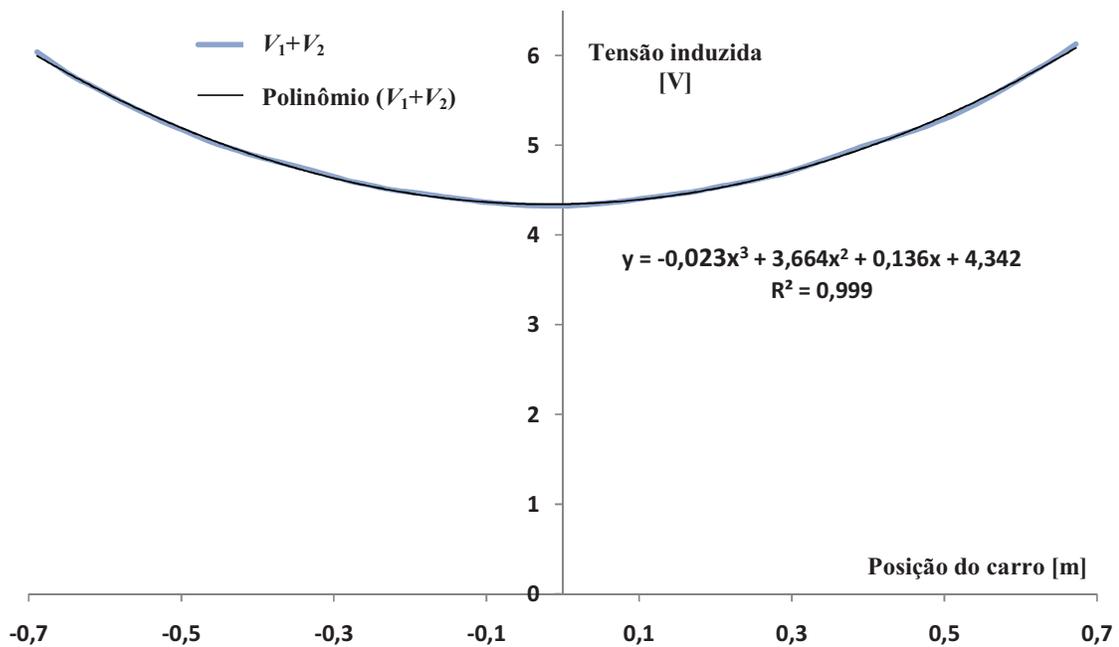


Figura 59 Representação da variação do fluxo magnético nas culatras do Transdutor I com a excursão do carro para frequência de 60 Hz.

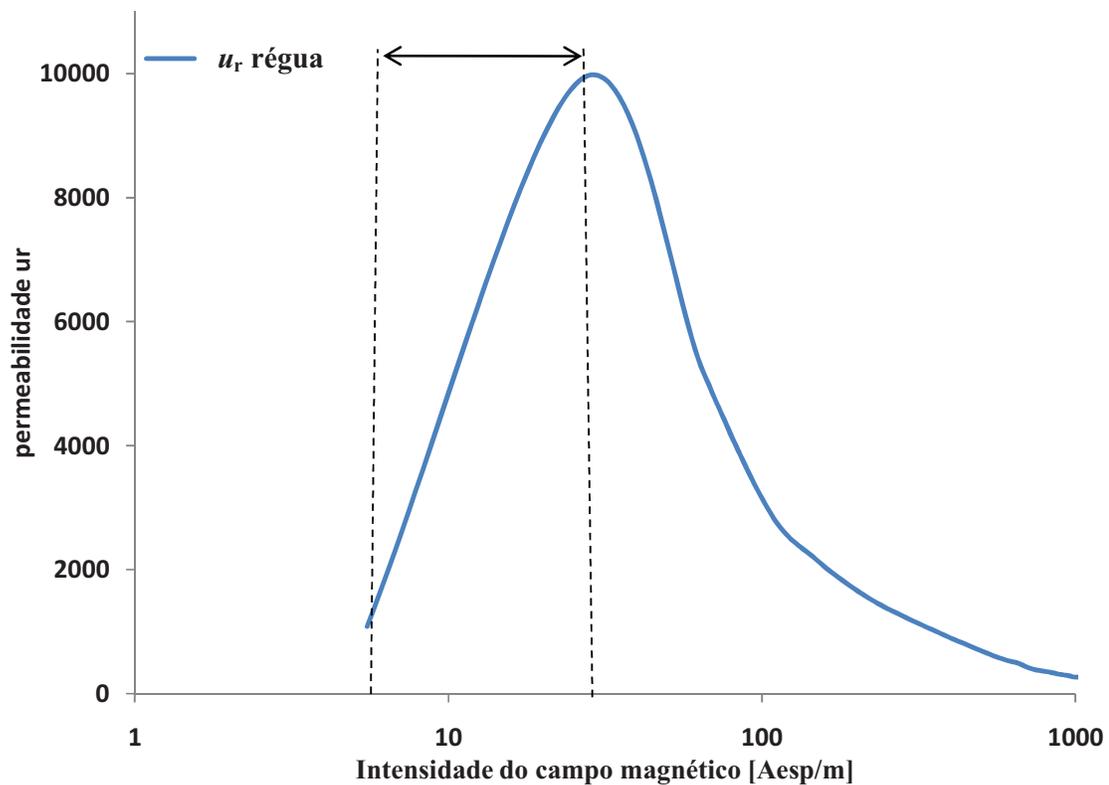


Figura 60 Curva $\mu_r \times H$ da régua, mostrando a excursão do carro para 60 Hz

Levando-se em conta nas equações 72 e 73 que o perfil do fluxo magnético dado pela equação 54 da Figura 59 para uma determinada posição do carro é:

$$V(x) = V_1(x) + V_2(x) = -0,023x^3 + 3,664x^2 + 0,136x + 4,342 \quad (106)$$

Deste modo, corrigindo estes valores para cada posição do carro nas equações 72 e 73, tem-se o seguinte gráfico:

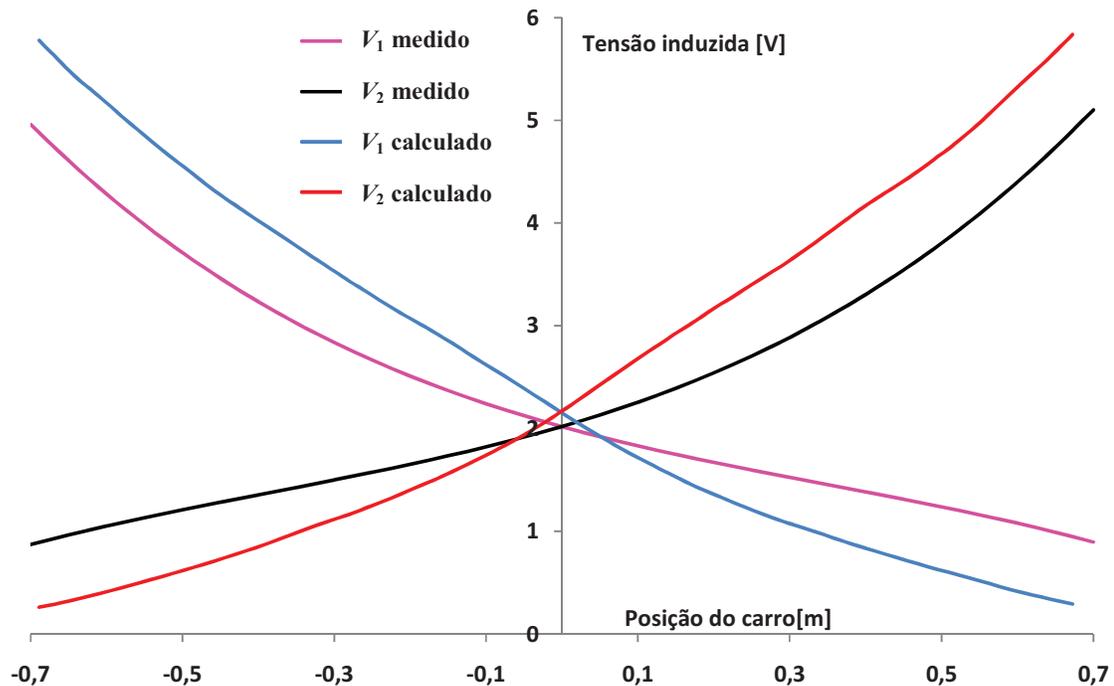


Figura 61 Comparação dos valores medidos e calculados do Transdutor I para frequência de 60 Hz corrigindo os valores do fluxo total para cada posição do carro.

Pode-se ver na Figura 61 que os valores calculados se aproximam mais dos valores medidos.

Levando-se em conta agora a variação da permeabilidade à esquerda e à direita do carro para cada posição de deslocamento do carro nas equações 72 e 73, isto pode ser feito olhando a indução magnética nas culatras laterais, pois se sabe o fluxo magnético através delas pelas bobinas exploradoras e tem-se a seção das culatras. Isto pode ser visto na Figura 62. Adotando que esta indução magnética é constante à direita e à esquerda do carro e relacionando com as Figuras 35 e 36, tem-se:

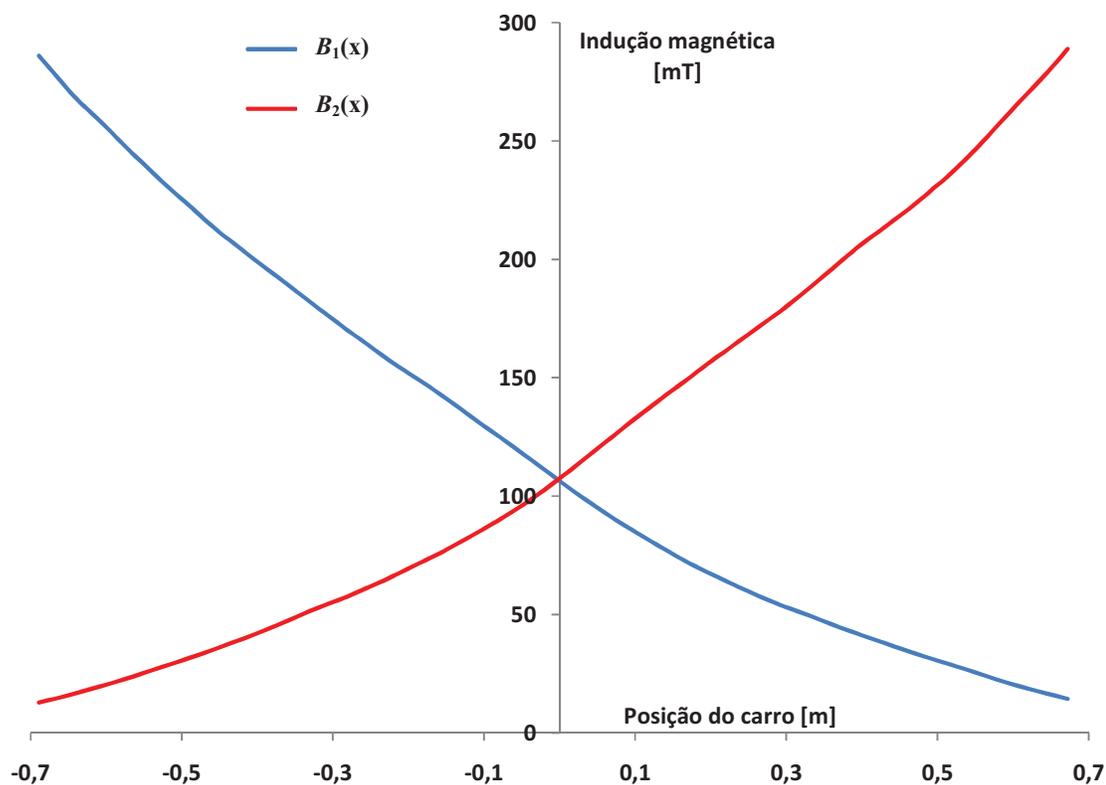


Figura 62 Valores da indução magnética nas culatras laterais com a posição do carro do Transdutor I para frequência de 60 Hz.

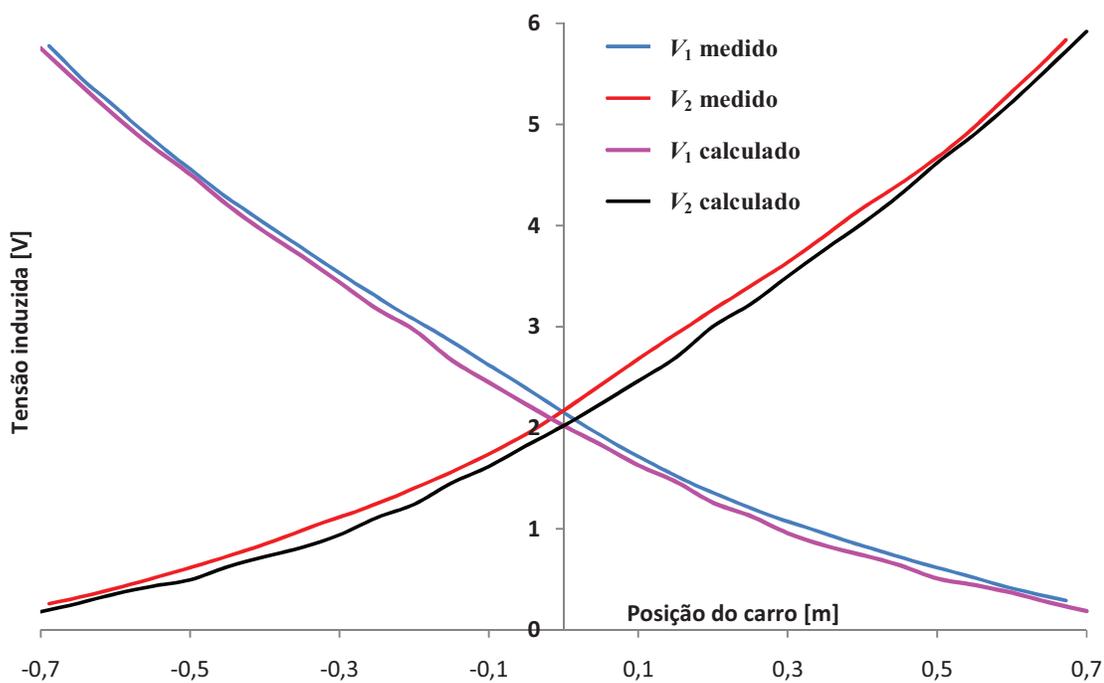


Figura 63 Comparação dos valores medidos e calculados do Transdutor I para frequência de 60 Hz corrigindo os valores do fluxo e da permeabilidade para cada posição do carro.

Vê-se na Figura 63 que, introduzindo o comportamento não linear nas equações de relutâncias distribuídas, onde o fluxo magnético efetivo através das culatras não é constante. Isto é devido que a relutância vista da fonte não é constante e à grande variação da permeabilidade magnética ao longo da excursão do carro, como visto na Figura 60, onde, por exemplo, quando o carro se encontra quase todo deslocado à esquerda, a permeabilidade relativa da culatra à esquerda do carro vai ser da ordem de $10.000 u_0$ e a permeabilidade relativa da culatra à direita do carro será da ordem de $2.000 u_0$. Assim, a introdução das não linearidades da permeabilidade e do fluxo disperso nas equações teóricas faz com que os valores das curvas medidas e calculadas fiquem mais próximos.

5.3.2 Comparação entre valores os medidos e calculados do Transdutor II

Pode-se, então, comparar os valores da Figura 25 com os da Figura 54, supondo uma permeabilidade relativa constante de $6.000u_0$, assim como também constante o fluxo magnético disperso ao longo da excursão do carro, como visto na Figura 64 onde se pode ver que os valores medidos e calculados estão muito diferentes por esta abordagem.

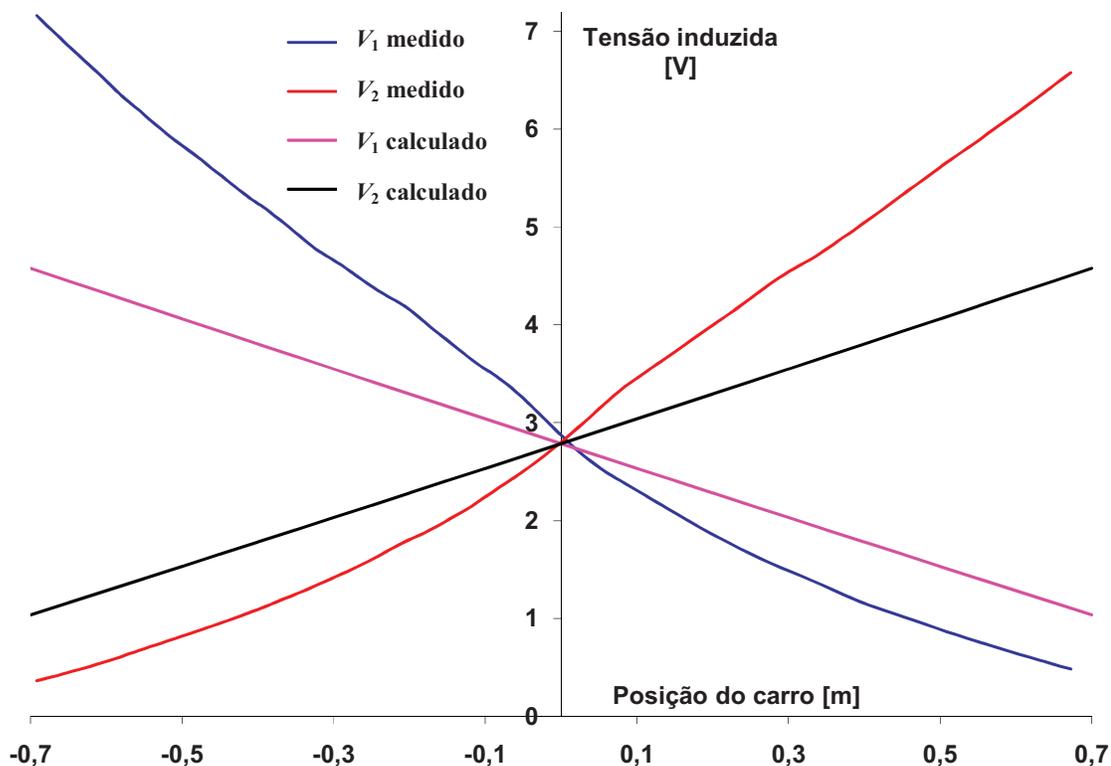


Figura 64 Comparação dos valores medidos e calculados do Transdutor II para frequência de 60 Hz.

Da mesma forma como visto no Transdutor I, a permeabilidade relativa ao longo da excursão do carro não é constante como se pode ver na Figura 60, onde é mostrada a faixa de operação do transdutor. Por este motivo o fluxo disperso também não é constante, pois a soma de V_1 e V_2 não é constante. Isto pode ser melhor visto na Figura 65.

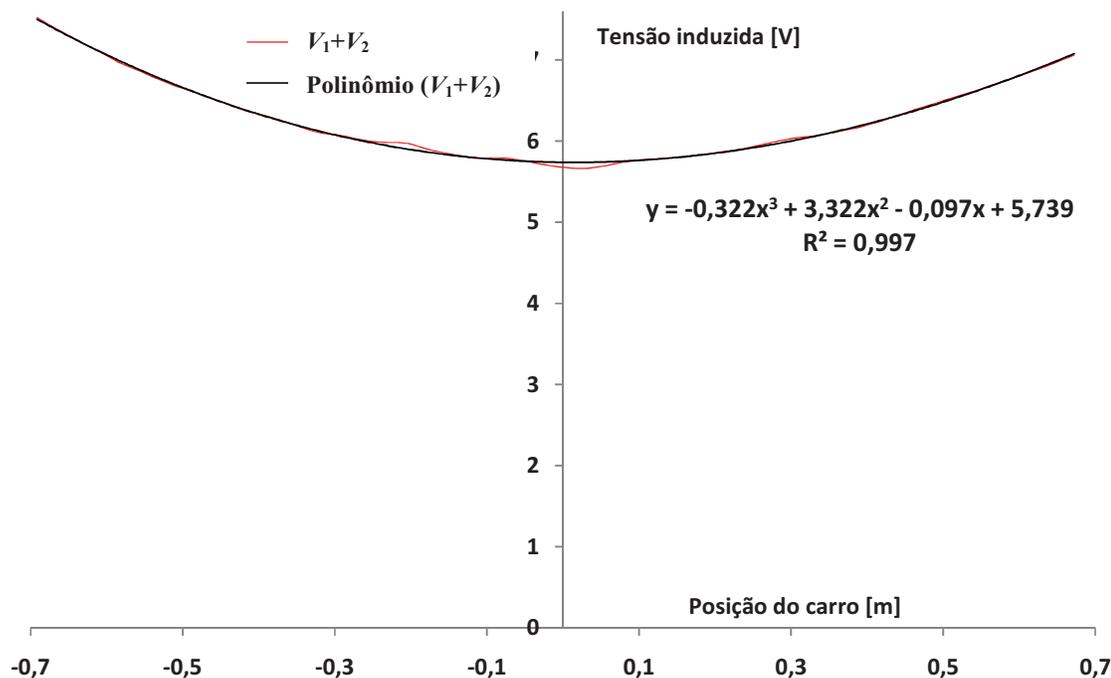


Figura 65 Representação da variação do fluxo magnético nas culatras do Transdutor II com a excursão do carro para frequência de 60 Hz.

Levando-se em conta nas equações 72 e 73 que o perfil do fluxo magnético dado pela equação 107 da Figura 65 para uma determinada posição do carro é dada por:

$$V(x) = V_1(x) + V_2(x) = -0,322x^3 + 3,322x^2 + 0,097x + 5,739 \quad (107)$$

O resultado disto pode ser visto na Figura 66, com os valores calculados se aproximando mais dos valores medidos

Levando-se novamente em conta agora para o Transdutor II que a variação da permeabilidade à esquerda e à direita do carro para cada posição de deslocamento do carro nas equações 72 e 73, isto pode ser feito olhando a indução magnética nas culatras laterais, pois se sabe o fluxo magnético através delas pelas bobinas exploradoras onde se tem a seção das culatras. Isto pode ser visto na Figura 67. Adotando-se que esta indução magnética é constante à direita e à esquerda do carro e relacionando com as Figuras 35 e 36, tem-se uma aproximação dos valores calculados com os medidos, Figura 68.

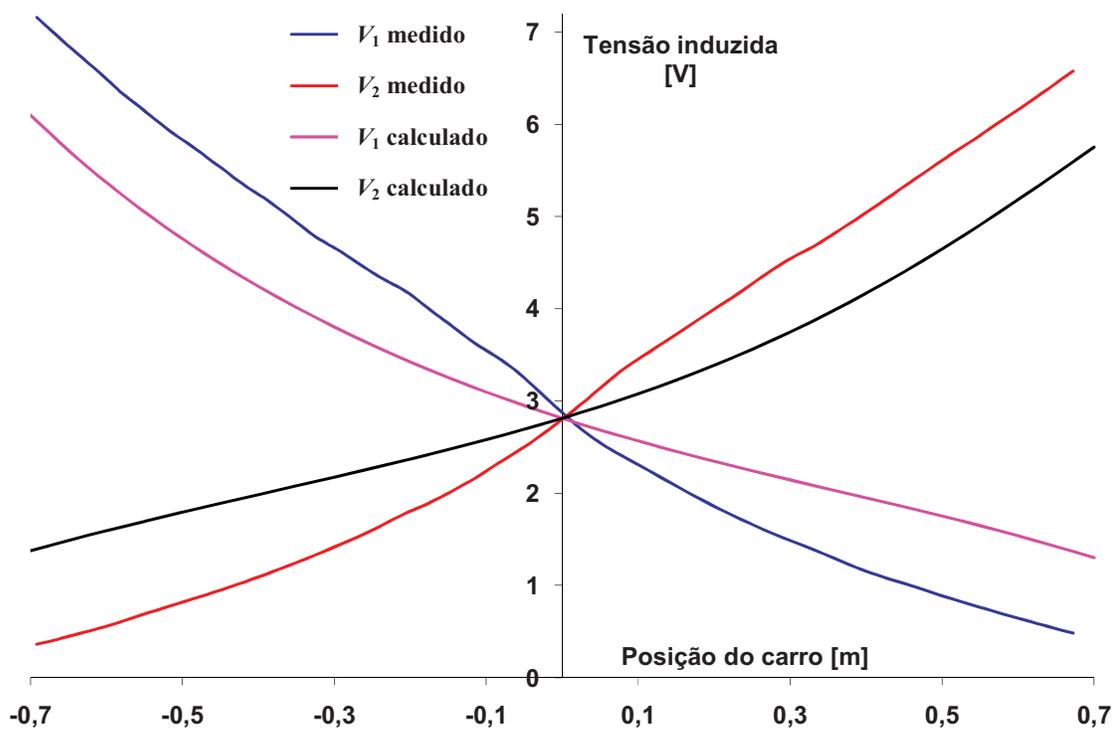


Figura 66 Comparação dos valores medidos e calculados do transdutor Transdutor II para frequência de 60 Hz corrigindo os valores do fluxo total para cada posição do carro.

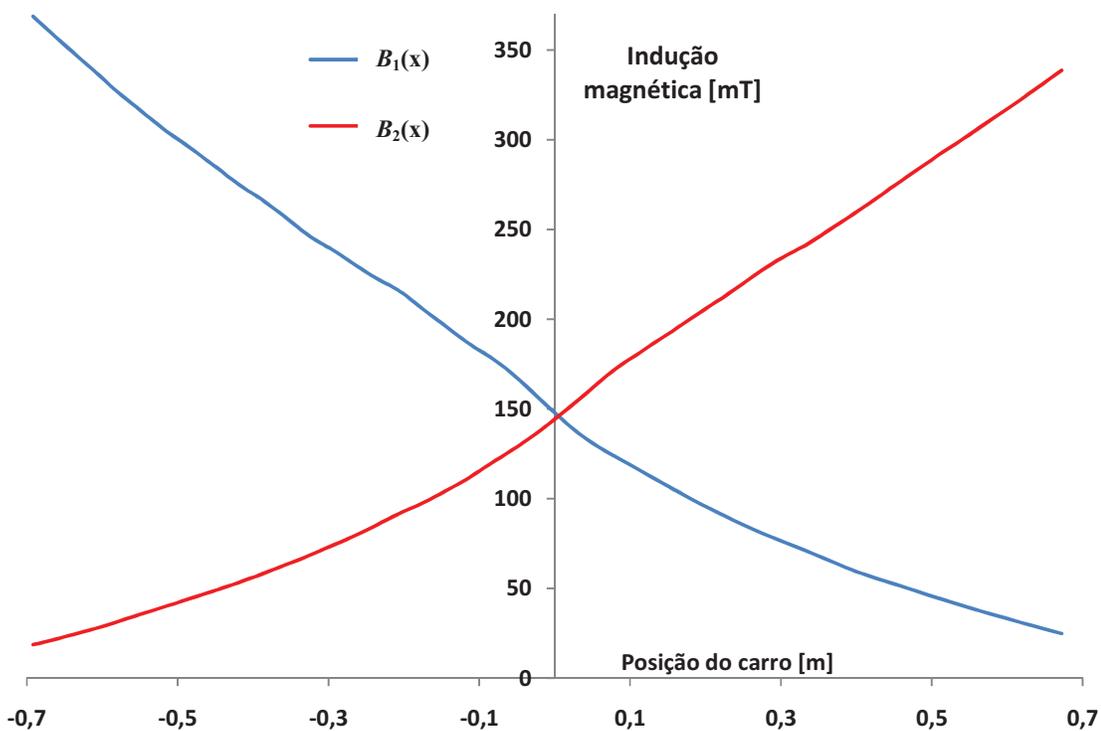


Figura 67 Valores da indução magnética nas culatras laterais com a posição do carro do Transdutor II para frequência de 60 Hz.

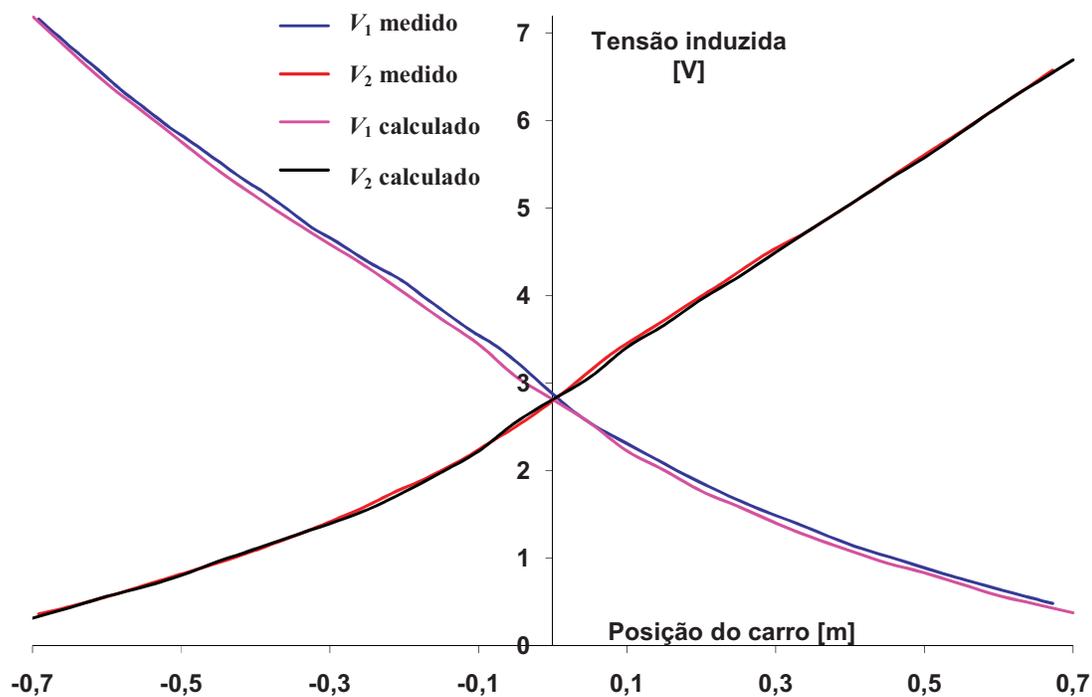


Figura 68 Comparação dos valores medidos e calculados do Transdutor II para frequência de 60 Hz corrigindo os valores do fluxo e da permeabilidade para cada posição do carro.

Tanto para o Transdutor I como para o Transdutor II, quando são introduzidas as não linearidades do fluxo magnético no circuito magnético das culatras como também da permeabilidade magnética do material ferromagnético, os valores medidos e calculados das tensões induzidas nas culatras laterais são muito próximos, Figura 63 e 68.

6. RESPOSTA DO TRANSDUTOR AO FLUXO MAGNÉTICO CONTÍNUO

As equações 39 e 40 da variação do fluxo magnético ϕ_i , Figura 69, nas culatras do transdutor se aplicam tanto para fluxo contínuo quanto alternado.

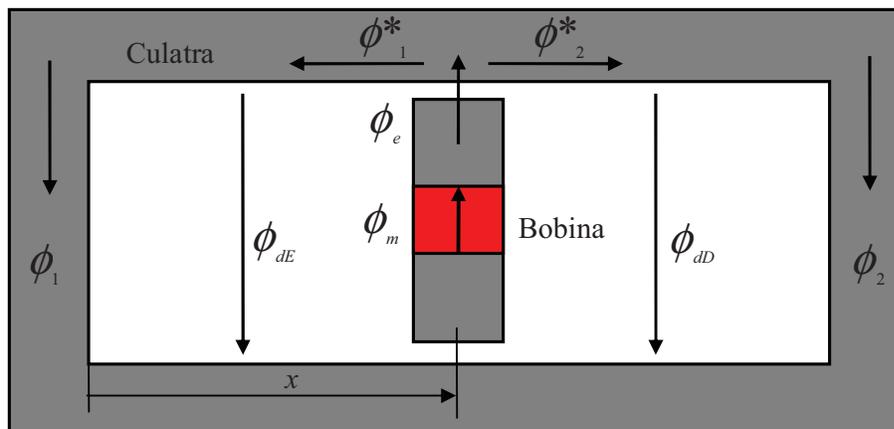


Figura 69 Vista frontal de um transdutor sem entreferro de medição

O carro do transdutor pode, então, ser excitado com fluxo magnético contínuo. Neste caso, quando se movimentar o carro com velocidade constante, há variação do fluxo magnético nas bobinas exploradoras. Como o fluxo magnético contínuo apresenta a mesma distribuição dos picos do fluxo magnético alternado, pode-se isolar somente a componente de tensão induzida devido à velocidade nas bobinas exploradoras. Com isto se observa que, quando o fluxo magnético está diminuindo, aparece nesta bobina um sinal de tensão positivo, e quando o fluxo magnético está aumentando aparece nesta bobina uma tensão com sinal negativo. No entanto, a limitação nessa condição é que os efeitos de correntes parasitas devido à variação da tensão de excitação aplicada ao enrolamento do carro não estarão presentes.

Como as taxas de variação são as mesmas nas bobinas exploradoras, apenas de sinais contrários, os sinais induzidos serão também iguais em módulo em cada caso, mas de sinais contrários, como pode ser visto nos gráficos deste capítulo.

6.1. ANÁLISE TEÓRICA DO FLUXO MAGNÉTICO C.C.

Para que o valor do fluxo magnético contínuo seja igual ao fluxo magnético alternado, o fluxo magnético contínuo deve ser igual ao valor eficaz do fluxo magnético alternado, ou seja:

$$\phi_{contínuo} = \phi_{eficaz} \quad (108)$$

Para que isto seja verdade, a corrente contínua que alimenta o carro deve ser igual à corrente alternada eficaz, ou seja:

$$i_{contínuo} = i_{eficaz} \quad (109)$$

A tensão induzida nas bobinas exploradoras é obtida pela lei de Faraday.

$$e_{i_{cont.}} = - \frac{d(N_i \phi_{i_{cont.}})}{dt} \quad (110)$$

Substituindo o fluxo magnético contínuo pelo fluxo eficaz alternado tem-se:

$$e_{i_{cont.}} = - \frac{d(N_i \phi_{i_{eficaz}})}{dt} \quad (111)$$

Analisando a tensão induzida nas bobinas exploradoras devido à velocidade através da equação teórica da variação do fluxo magnético ou através da curva de calibração estática do transdutor.

6.1.1. Análise do sinal através da curva experimental estática do transdutor

Pode-se analisar o sinal relativo à variação do fluxo magnético c.c. através da curva de calibração experimental estática do transdutor com fluxo magnético c.a.. Parte-se da condição de que a distribuição do fluxo magnético c.c. devido a uma corrente contínua ($i_{contínua} = i$) é igual à distribuição do fluxo magnético c.a. devido a uma corrente c.a. ($i_{efetiva} = i$). Nesta análise não está se considerando os efeitos das correntes parasitas induzidas no material devido ao fluxo magnético c.a. e considera-se que a permeabilidade c.c. e c.a. são iguais.

De acordo com a equação 112, a tensão induzida nas bobinas exploradoras para o caso estático é

$$e_{i_{eficaz}}(x)_{estático} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_i \phi_{i_{max}}(x)_{estático} \quad (112)$$

Com $i=1$ ou 2 e onde

$e_{i_{eficaz}}(x)_{estático}$ é tensão induzida nas bobinas exploradoras para o caso estático,

f é a frequência da fonte,

N_i é o número de espiras das bobinas exploradoras, e

$\phi_{i\max}(x)_{\text{estático}}$ é fluxo magnético máximo nas bobinas exploradoras.

Como se quer comparar o fluxo magnético c.a. eficaz com o fluxo magnético contínuo, e como o fluxo magnético c.a. é senoidal, tem-se que a equação 112 fica

$$e_{i\text{eficaz}}(x)_{\text{estático}} = 2\pi f N_i \phi_{i\text{eficaz}}(x)_{\text{estático}} \quad (113)$$

com $i=1$ ou 2 .

Então,

$$\phi_{i\text{eficaz}}(x)_{\text{estático}} = \frac{e_{i\text{eficaz}}(x)_{\text{estático}}}{2\pi f N_i} \quad (114)$$

Assim, quando o carro se move com velocidade constante, tem-se que a variação de fluxo magnético contínuo nas bobinas exploradoras pode ser calculada pelas equações 111 e 114. Logo, tem-se que:

$$e_i(x)_{\text{cont}} = -\frac{\partial(N_i \phi_i(x)_{\text{eficaz}})}{\partial t} = -N_i \frac{\partial(\phi_i(x)_{\text{eficaz}})}{\partial t} \quad (115)$$

$$e_i(x)_{\text{cont}} = -\frac{\partial(N_i \phi_i(x)_{\text{eficaz}})}{\partial t} = -N_i \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{e_{i\text{eficaz}}(x)_{\text{estático}}}{2\pi f N_i} \right) \quad (116)$$

$$e_i(x)_{\text{cont}} = -\frac{1}{2\pi f} \frac{\partial}{\partial t} (e_{i\text{eficaz}}(x)_{\text{estático}}) \quad (117)$$

com $i=1$ ou 2 .

Assim, depois de se obter a curva estática do transdutor, pode-se calcular a equação da curva das tensões induzidas nas bobinas exploradoras através, por exemplo, de regressão linear.

Nos gráficos das curvas de calibração de V_1 e V_2 do capítulo 5 podem ser adequadamente representadas através de regressão linear por uma equação de 3º grau. Analisando, então, a equação 117 para este caso e para equações de graus menores, pode-se supor que a curva da tensão induzida nas bobinas exploradoras é dada por

$$e_{i\text{eficaz}}(x)_{\text{estático}} = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i \quad (118)$$

A equação 117 fica

$$e_i(x)_{cont} = -\frac{1}{2\pi f} \frac{\partial}{\partial t} (a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i) \quad (119)$$

$$e_i(x)_{cont} = -\frac{1}{2\pi f} \left(a_i \frac{\partial(x^3)}{\partial t} + b_i \frac{\partial(x^2)}{\partial t} + c_i \frac{\partial x}{\partial t} \right) \quad (120)$$

$$e_i(x)_{cont} = -\frac{1}{2\pi f} \left(a_i \frac{\partial(x^3)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + b_i \frac{\partial(x^2)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + c_i \frac{\partial x}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \right) \quad (121)$$

$$e_i(x)_{cont} = -\frac{1}{2\pi f} \left(3a_i x^2 \frac{\partial x}{\partial t} + 2b_i x \frac{\partial x}{\partial t} + c_i \frac{\partial x}{\partial t} \right) \quad (122)$$

$$e_i(x)_{cont} = -\frac{1}{2\pi f} (3a_i x^2 v + 2b_i x v + c_i v) \quad (123)$$

com $i=1$ ou 2 e v é a velocidade do carro.

Para uma curva de resposta do transdutor, de segundo grau, tem-se que

$$e_{eficaz}(x)_{estático} = b_i x^2 + c_i x + d_i \quad (124)$$

$$e_i(x)_{cont} = -\frac{1}{2\pi f} (2b_i x v + c_i v) \quad (125)$$

E para uma curva de resposta de primeiro grau obtém-se

$$e_{eficaz}(x)_{estático} = c_i x + d_i \quad (126)$$

$$e_i(x)_{cont} = -\frac{c_i v}{2\pi f} \quad (127)$$

com $i=1$ ou 2 .

6.2. RESULTADOS DO FLUXO CONTÍNUO MEDIDO COMPARANDO COM O ANALÍTICO

Usando a montagem da experiência com o sistema de aquisição de dados (DAQ) para se obter as curvas estáticas, obtêm-se as curvas de tensão induzida com fluxo contínuo, quando o carro se desloca com velocidade constante. Usando, então, uma fonte de corrente contínua para alimentar o eletroímã do carro com uma corrente de 0,8 A c.c.. Para aquisição dos sinais com o DAQ, adota-se uma taxa de amostragem de 2.000 amostras por segundo por canal e uma rampa de aceleração e desaceleração de 30 ms no movimentador.

Realiza-se dois tipos de medição: primeiro com o carro partindo da extremidade esquerda para a extremidade direita e voltando ao ponto inicial; no segundo caso, com o carro partindo da direita até a esquerda e voltando, a velocidade do carro é constante em 5 m/s. Também em ambos os casos inverte-se a corrente no eletroímã do carro e novamente volta o sentido da corrente à condição anterior e no mesmo instante começa o processo de medição da tensão induzida descrito acima.

Os gráficos dos sinais de tensão induzida pelo efeito da velocidade neste capítulo são apenas de caráter qualitativo, servem somente para poder visualizar separadamente o efeito do sinal gerado pela velocidade no transdutor.

6.2.1 Resultados medidos com fluxo contínuo do Transdutor I

Para obter a curva teórica da tensão induzida para o fluxo magnético contínuo, equação 117 ainda que uma equação de terceiro grau seja suficiente para representar as curvas de tensão induzida, se emprega a regressão linear com uma equação de quinto grau, equações 128 e 129, usando os valores medidos do Transdutor I, Figura 70, para a frequência de 60 Hz. Estas equações das curvas estáticas junto com a equação 117 resultam nas equações da tensão induzida para o fluxo magnético contínuo, equações 130 e 131.

Para as curvas estáticas a 60 Hz tem-se:

$$e_{1eficaz}(x)_{estático} = -4,493x^5 + 0,171x^4 + 2,837x^3 + 1,819x^2 - 4,375x + 2,079 \quad (128)$$

$$e_{2eficaz}(x)_{estático} = 4,805x^5 + 0,117x^4 - 3,025x^3 + 1,906x^2 + 4,555x + 2,183 \quad (129)$$

Assim, as equações para o fluxo contínuo ficam:

$$e_1(x)_{cont.} = -\frac{v(-22,465x^4 + 0,684x^3 + 8,511x^2 + 3,638x^1 - 4,375)}{376,991} \quad (130)$$

$$e_2(x)_{cont.} = -\frac{v(24,025x^4 + 0,468x^3 - 9,075x^2 + 3,812x^1 + 4,555)}{3760991} \quad (131)$$

As equações 128 e 129 representam então a variação do fluxo magnético c.a. *rms* nas bobinas exploradoras, conforme visto no início deste capítulo; representam também a variação do fluxo magnético c.c. quando as correntes c.a. *rms* e c.c são iguais em módulo. Quando o fluxo magnético c.c. estiver diminuindo devido ao movimento do carro, aparece uma tensão induzida positiva c.c. na bobina exploradora, e na bobina em que o fluxo

magnético c.c. estiver aumentando, devido ao movimento do carro, aparece uma tensão induzida negativa c.c..

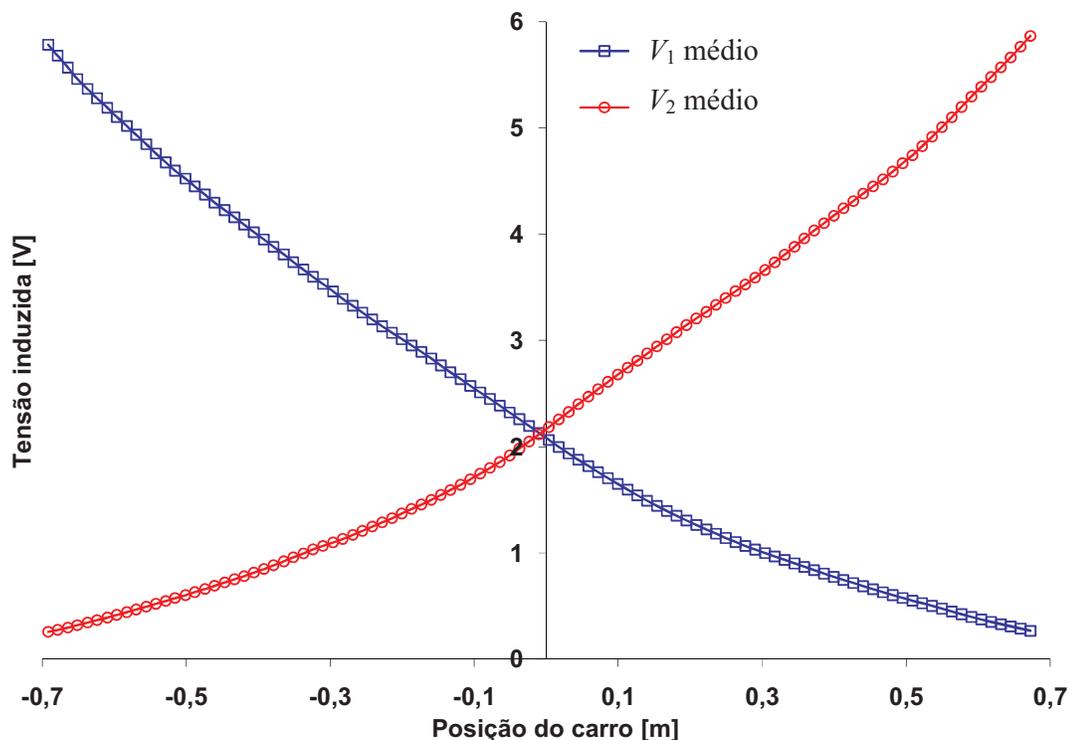


Figura 70 Curva estática do Transdutor I para frequência de 60 Hz

Na Figura 71, observa-se as tensões induzidas em V_1 e V_2 com o carro partindo da extremidade esquerda para direita e voltando à posição inicial, e outra curva de V_1 e V_2 onde é feita a inversão da corrente; logo em seguida, volta-se à condição anterior e inicia-se a aquisição. Em todos os casos, a velocidade é constante de 5 m/s com períodos de aceleração e desaceleração. Tem-se, ainda, no mesmo gráfico, as curvas teóricas de V_1 e V_2 levando em conta os períodos de aceleração e desaceleração e velocidade constante. Quando se inicia o movimento, a tensão induzida em V_1 é positiva pela lei de Faraday-Lenz, pois o fluxo magnético está diminuindo, e em V_2 , como o fluxo está aumentando, a tensão é negativa.

Pode-se ver na Figura 71 que para V_1 não há alteração no sinal da tensão induzida entre a medição com o fluxo normal e aquele onde há uma inversão, mas para V_2 tem-se um aumento do sinal de tensão induzida no caso onde houve a inversão. Este aumento do sinal ocorre apenas na parte de ida do carro, quando este se aproxima da bobina de V_2 , mas na volta os sinais são iguais. Observa-se aqui, que esta inversão da corrente muda a permeabilidade c.c. apenas à direita do carro e somente no ciclo de ida.

Tem-se, ainda, no gráfico as curvas teóricas de V_1 e V_2 considerando a velocidade constante de 5 m/s e os períodos de aceleração e desaceleração.

Pode-se agora analisar os gráficos da tensão induzida com fluxo magnético contínuo para os valores teóricos e os medidos experimentalmente, por exemplo, na posição central do transdutor. Estes valores seriam o erro máximo que seria acrescentado ao valor da tensão induzida com fluxo magnético alternado. Os valores medidos da tensão induzida c.a. para a posição central são $V_1 = 2,06$ V e $V_2 = 2,18$ V conforme Figura 70.

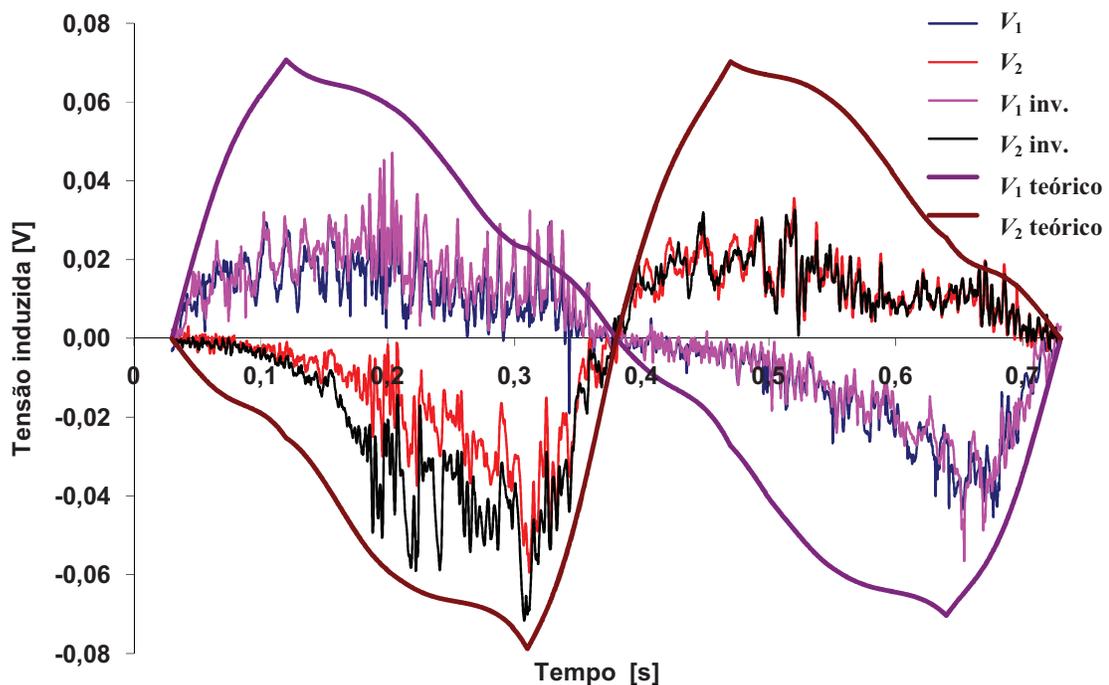


Figura 71 Curva da tensão induzida de V_1 e V_2 pelo tempo do Transdutor I para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.

Na Figura 72 e na 73, tem-se a tensão induzida c.c. devido à velocidade de 5 m/s do carro com a posição com este partindo da esquerda para direita percorrendo um ciclo de ida e volta e pode-se ver em cada figura que se tem dois valores de tensão contínua medidos com ciclos de ida e volta: o primeiro corresponde ao sinal de tensão sem a inversão da corrente no carro que se denomina agora como $V_{i_cont_ida}$ e $V_{i_cont_volta}$; e o segundo, onde é feita a inversão da corrente como $V_{i_cont_inv_ida}$ e $V_{i_cont_inv_volta}$, com $i=1$ e 2 . Estes valores estão comparados nas Figuras 72 e 73 com o valor da curva teórica, chamadas aqui de $V_{i_teórico}$.

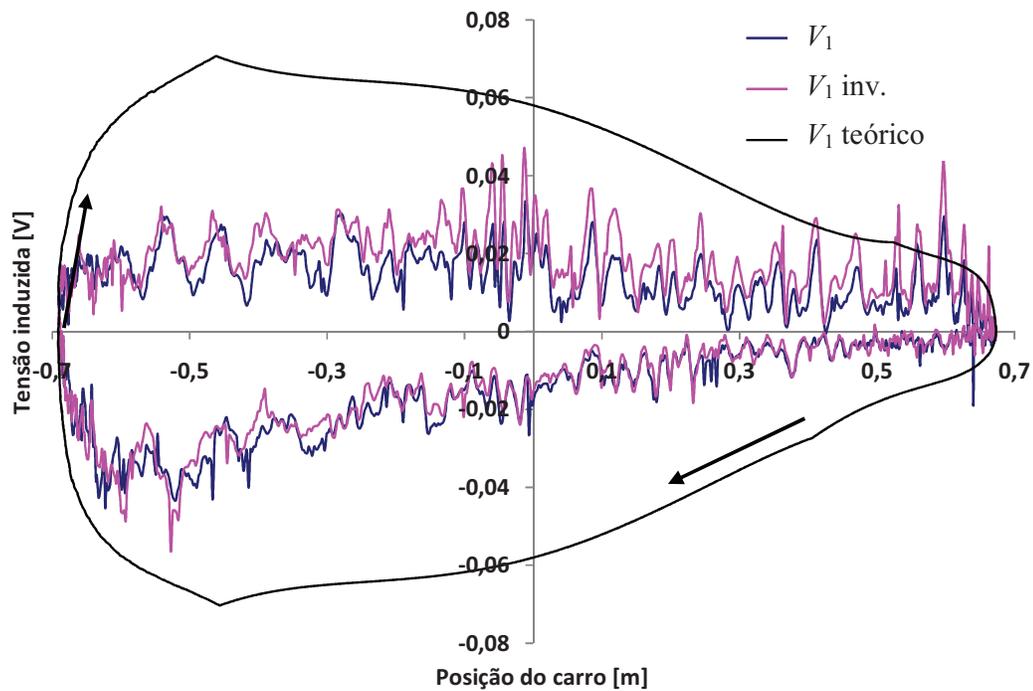


Figura 72 Curva da tensão induzida de V_1 com a posição do carro do Transdutor I para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.

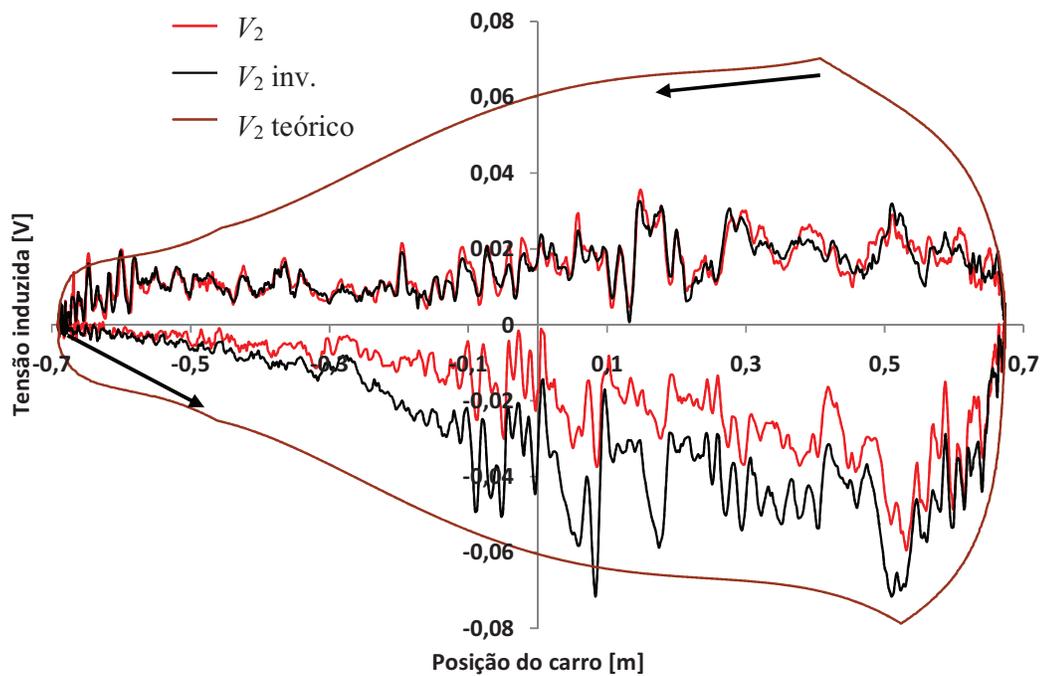


Figura 73 Curva da tensão induzida de V_2 com a posição do carro do Transdutor I para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.

No gráfico da Figura 74 o carro sai da extremidade direita indo para esquerda e voltando, onde vê-se as tensões induzidas c.c. pelo tempo. Neste caso tem-se uma diferença na tensão induzida c.c. em V_1 entre o fluxo normal e o invertido para a ida do carro, no ciclo da volta não há diferença, para V_2 , tanto no ciclo de ida como no da volta, não há diferença na tensão induzida entre o fluxo normal e o da inversão.

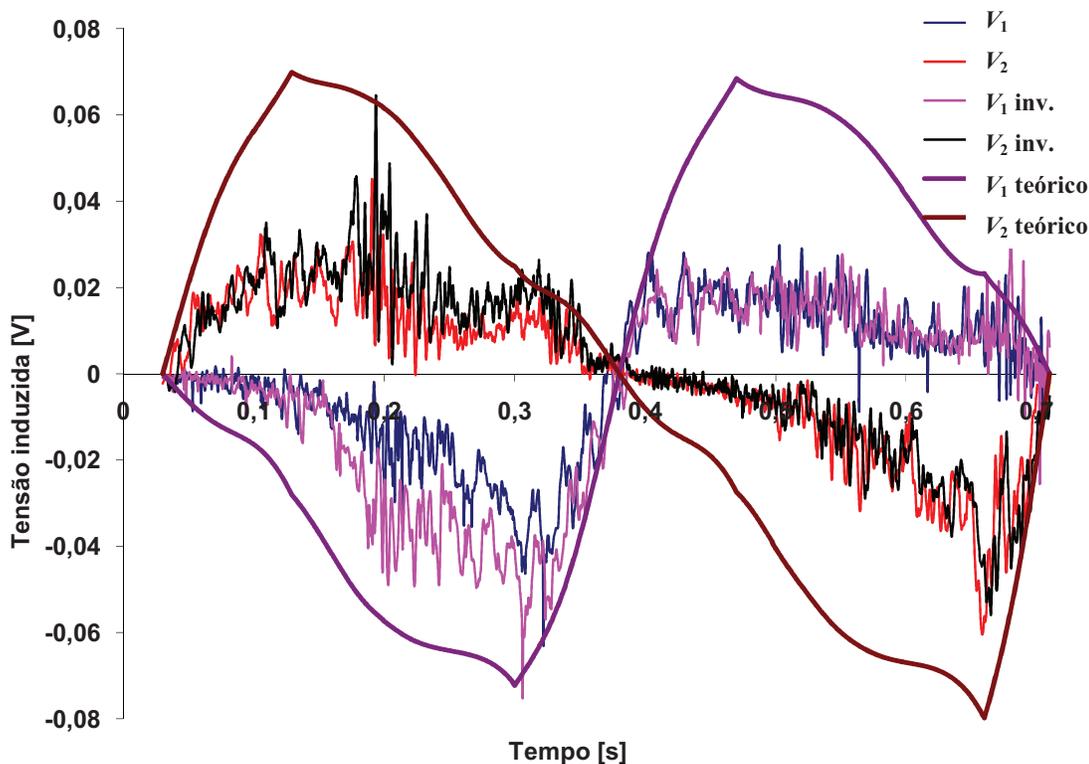


Figura 74 Curva da tensão induzida de V_1 e V_2 pelo tempo do Transdutor I para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da direita.

Nas Figuras 75 e 76 tem-se a tensão induzida c.c. pela posição devido à velocidade de 5 m/s do carro. Este parte da direita para esquerda e percorre um ciclo de ida e volta. Neste caso, vê-se que o inverso do que ocorre quando o carro parte da esquerda, aqui V_1 é modificado pela inversão da corrente e V_2 não é.

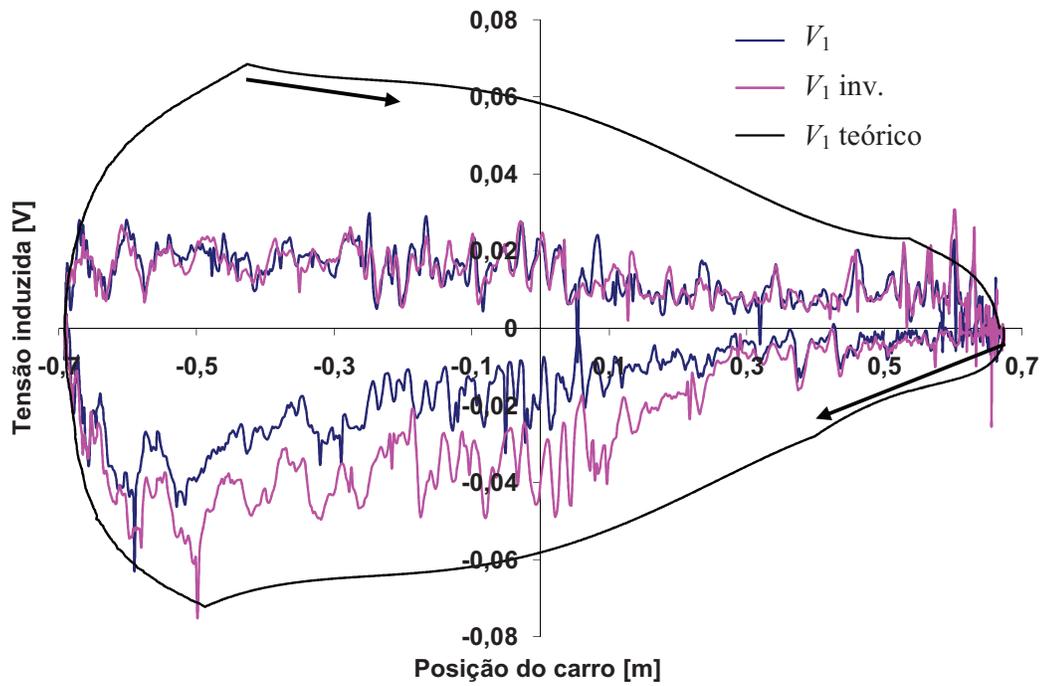


Figura 75 Curva da tensão induzida de V_1 com a posição do carro do Transdutor I para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da direita.

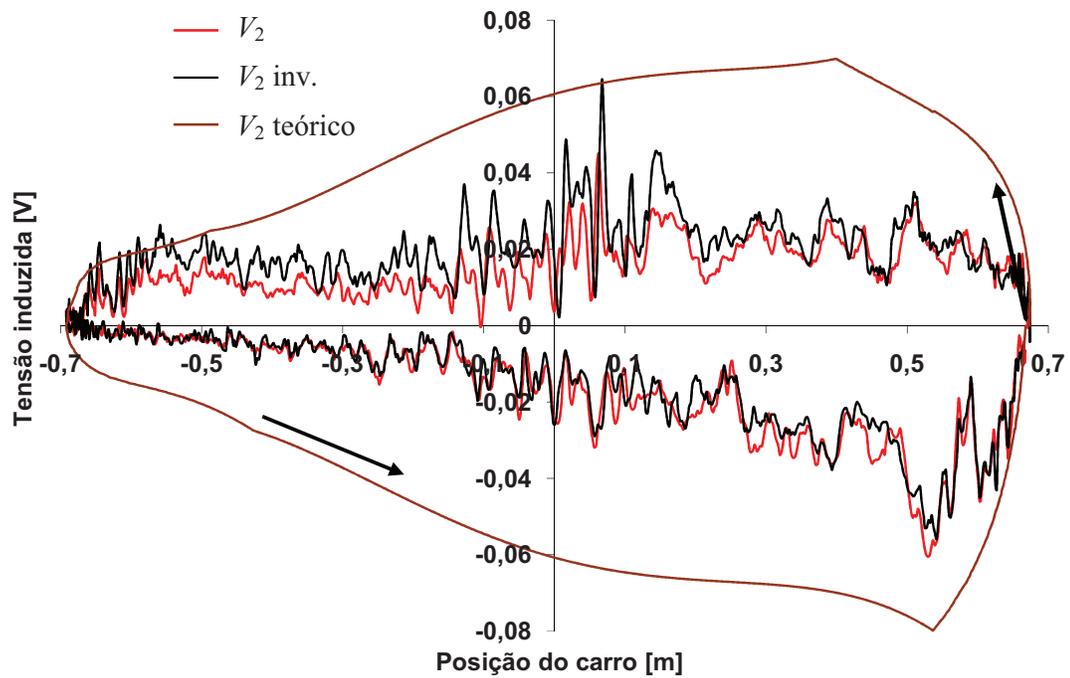


Figura 76 Curva da tensão induzida de V_2 com a posição do carro do Transdutor I para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da direita.

Como o objetivo deste capítulo é observar somente o sinal gerado pelo efeito da velocidade e fazer uma análise qualitativa, pode-se montar uma tabela da diferença relativa a este sinal em relação ao sinal alternado e estático. Supondo, por exemplo, que na posição $x = 0$ a soma se dê de maneira escalar, Tabela 3. Os valores das tensões c.c. para o carro partindo da esquerda e da direita, nos ciclos de ida e volta para a posição $x = 0$ são obtidos das Figuras 72, 73, 75 e 76, e comparados com os valores de tensão estática c.a. da Figura 69 onde $V_1(0) = 2,06 \text{ V}$ e $V_2(0) = 2,18 \text{ V}$

Tabela 3 Comparação entre o sinal devido ao efeito da velocidade com o sinal estático para o Transdutor I em $x=0$

Partida	ciclo	$V_{1 \text{ cont. teó.}}(0)[\text{V}]$	Diferença%	$V_{1 \text{ cont.}}(0)[\text{V}]$	Diferença%	$V_{1 \text{ cont. inv.}}(0)[\text{V}]$	Diferença%
esq.	ida	0,058	2,82	0,02	0,97	0,02	0,97
	volta	0,058	2,82	-0,017	0,83	-0,017	0,83
dir.	ida	0,058	2,82	-0,02	0,97	-0,04	1,94
	volta	0,058	2,82	0,02	0,97	0,02	0,97
		$V_{2 \text{ cont. teó.}}(0)[\text{V}]$	Diferença%	$V_{2 \text{ cont.}}(0)[\text{V}]$	Diferença%	$V_{2 \text{ cont. inv.}}(0)[\text{V}]$	Diferença%
esq.	ida	0,06	2,75	-0,017	0,78	-0,04	1,83
	volta	0,06	2,75	0,02	0,92	0,02	0,92
dir.	ida	0,06	2,75	0,022	1,01	0,022	1,01
	volta	0,06	2,75	-0,02	0,92	-0,02	0,92

Para o Transdutor I a diferença máxima analisando pelo fluxo contínuo tanto para V_1 e V_2 e levando em conta os valores teóricos seria da ordem de 2,9% para a posição central. Analisando os resultados com o fluxo magnético c.c. normal, vê-se que a diferença seria menor que 1% tanto para V_1 como para V_2 . Quando se inverte o fluxo magnético e volta-se à condição inicial, os valores da tensão induzida têm um aumento considerável no circuito do lado contrário ao movimento do carro; nestes casos, a diferença é da ordem de 1,8%.

6.2.2 Resultado medido do fluxo contínuo do Transdutor II

Do mesmo modo como foi feito no Transdutor I, usa-se a regressão linear nos valores de tensão induzida estática do Transdutor II, Figura 77, e obtém-se as equações teóricas com um polinômio de quinto grau com $R^2 = 1$, equações 132 e 133.

$$e_{1\text{eficaz}}(x)_{\text{estático}} = -7,551x^5 - 0,012x^4 + 5,443x^3 + 1,834x^2 - 5,818x + 2,908 \quad (132)$$

$$e_{2\text{eficaz}}(x)_{\text{estático}} = 6,097x^5 - 0,264x^4 - 5,008x^3 + 1,594x^2 + 5,644x + 2,826 \quad (133)$$

Para a posição central os valores de tensão induzida estática são $V_1 = 2,84$ V e $V_2 = 2,82$ V.

Novamente, com as equações acima e a equação 117 obtém-se as equações para as tensões induzidas com fluxo magnético contínuo.

$$e_1(x)_{cont.} = -\frac{v(-37,755x^4 - 0,048x^3 + 16,329x^2 + 3,668x^1 - 5,818)}{2\pi 60} \quad (134)$$

$$e_2(x)_{cont.} = -\frac{v(24,025x^4 + 0,468x^3 - 9,075x^2 + 2,812x^1 + 4,555)}{2\pi 60} \quad (135)$$

Assim, na Figura 78, tem-se as tensões induzidas de V_1 e V_2 com fluxo magnético contínuo pelo tempo com o carro partindo da extremidade esquerda para direita e voltando ao ponto de início, onde se observa que na ida do carro as tensões induzidas de V_1 e V_2 tem um valor em modulo maior do que na volta. Pode-se observar também que ao se fazer a medição com o processo de inverter e voltar o fluxo magnético à condição anterior, a tensão induzida em V_2 neste caso é menor do que no fluxo normal até o meio do transdutor, depois são iguais.

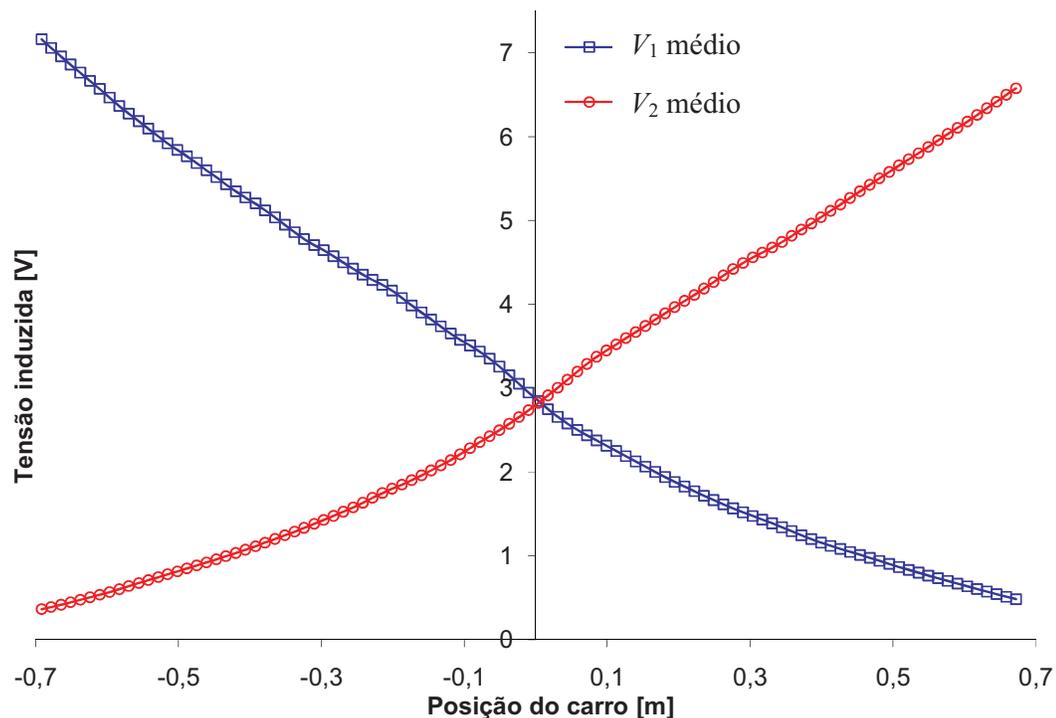


Figura 77 Curva estática de V_1 e V_2 do Transdutor II para frequência de 60 Hz

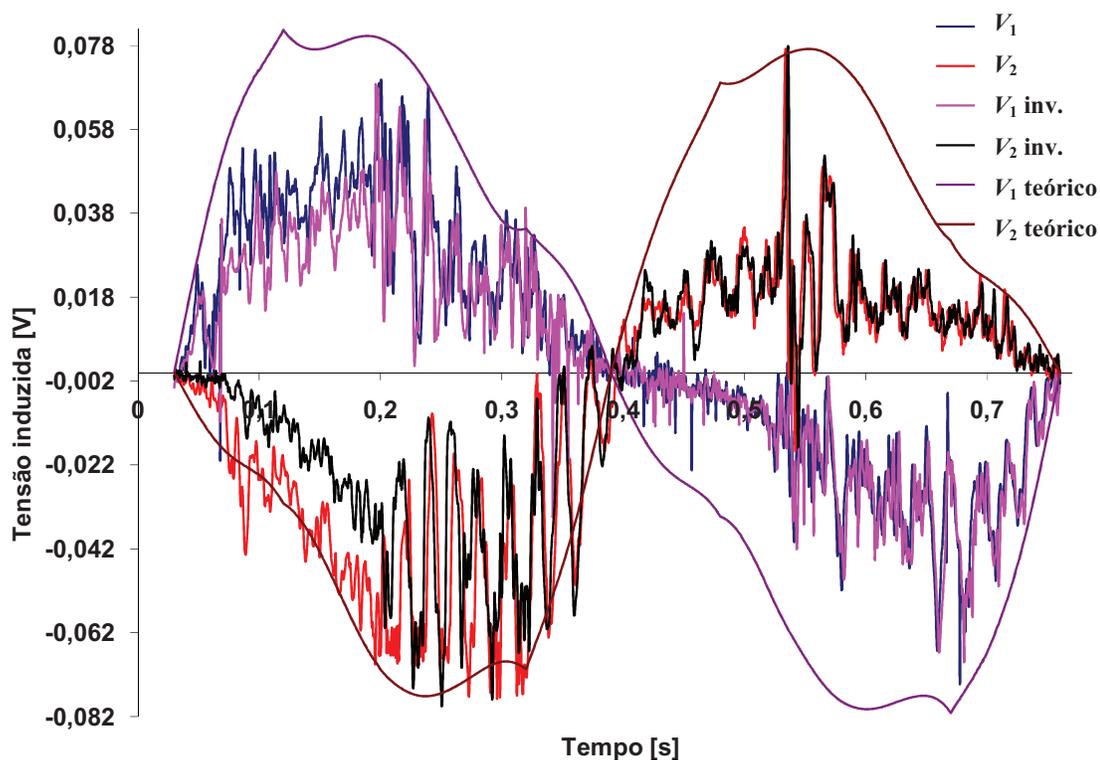


Figura 78 Curva da tensão induzida de V_1 e V_2 pelo tempo do Transdutor II para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.

Nas Figuras 79 e 80 tem-se a tensão induzida c.c. pela posição devido à velocidade de 5 m/s do carro. Este parte da esquerda para direita percorrendo um ciclo de ida e volta. Neste caso vê-se que em V_2 , quando é feita a inversão da corrente, o valor do sinal é menor do que quando não é feita a inversão.

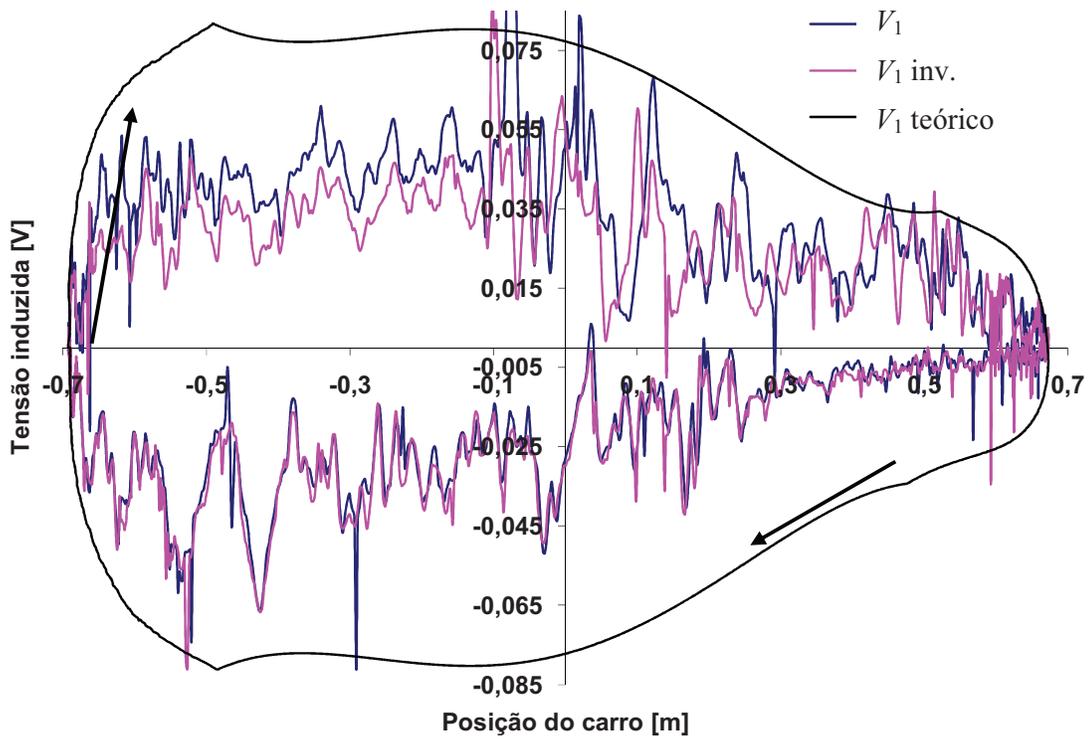


Figura 79 Curva da tensão induzida de V_1 com a posição do carro do Transdutor II para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.

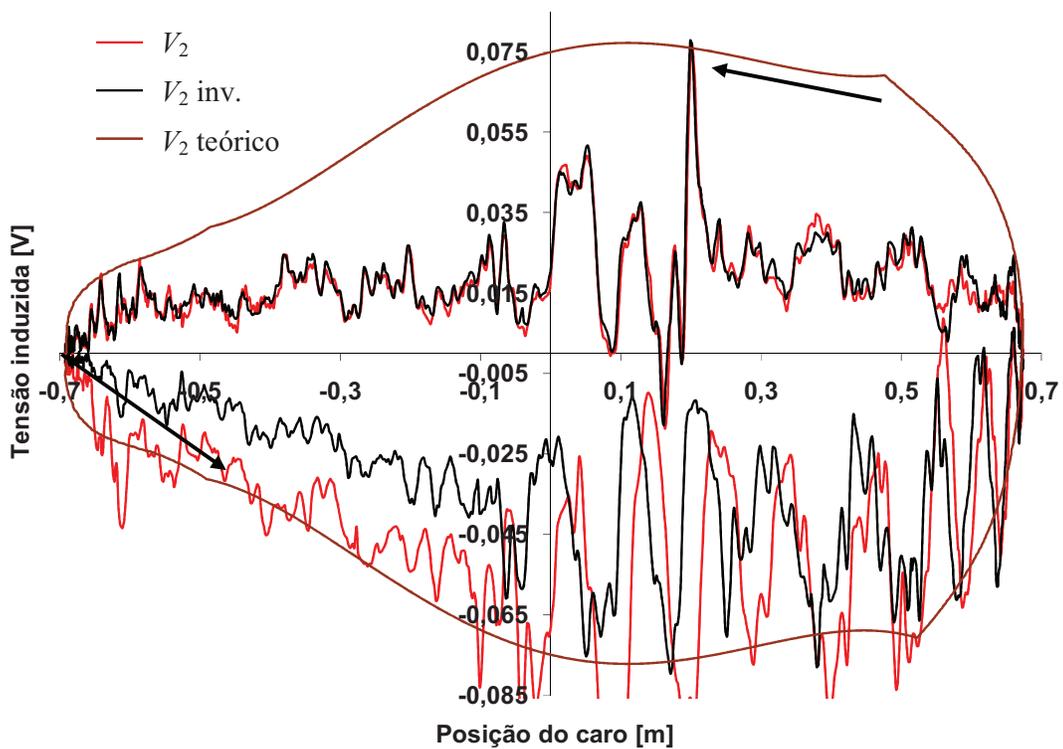


Figura 80 Curva da tensão induzida de V_2 com a posição do carro do Transdutor II para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.

Na Figura 81, tem-se as tensões induzidas de V_1 e V_2 com fluxo magnético contínuo pelo tempo com o carro partindo da extremidade direita para esquerda e voltando ao ponto de início. Pode-se observar que na ida do carro as tensões induzidas V_1 e V_2 têm um valor em módulo maior do que na volta. Pode-se observar também que ao se fazer a medição com o processo de inverter e voltar o fluxo magnético, a condição anterior, a tensão induzida em V_2 neste caso é maior do que no fluxo normal até o meio do transdutor, depois são iguais.

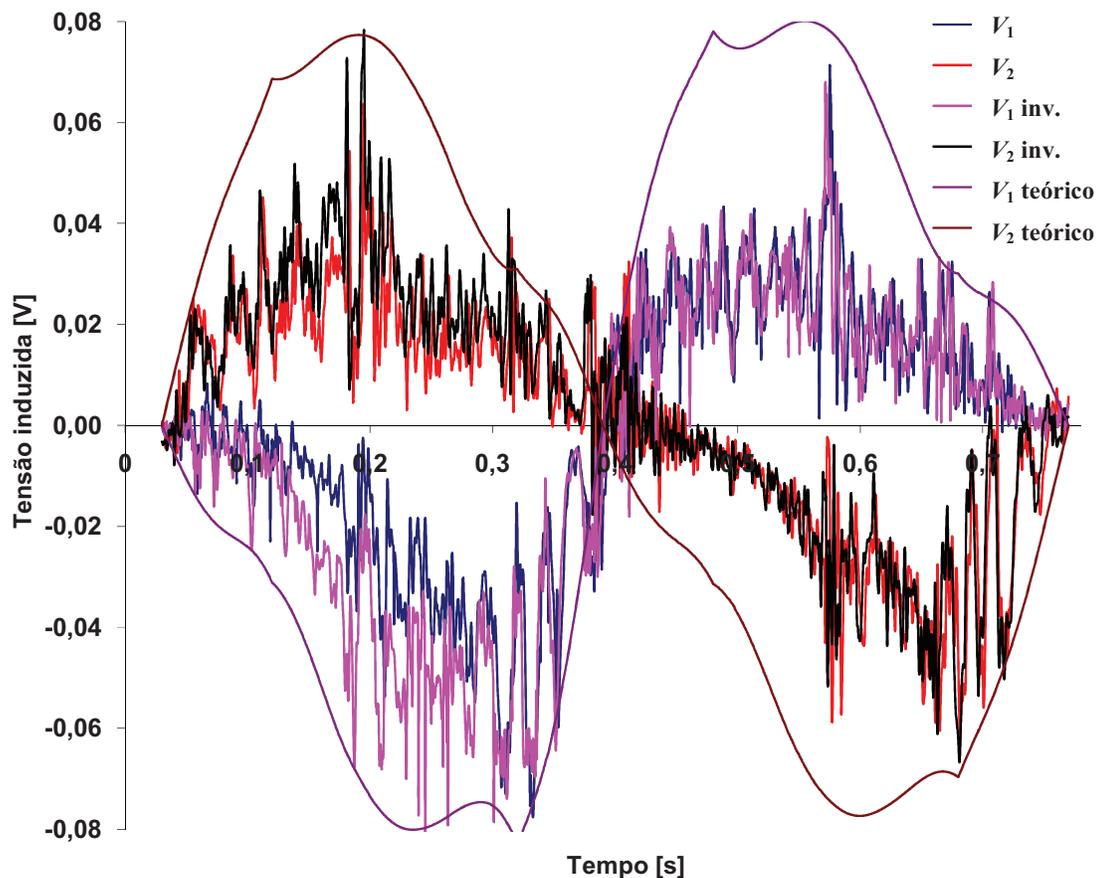


Figura 81 Curva da tensão induzida de V_1 e V_2 pelo tempo do Transdutor II para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da direita.

Nas Figuras 82 e 83 tem-se a tensão induzida c.c. pela posição devido à velocidade de 5 m/s do carro. Este parte da direita para esquerda percorrendo um ciclo de ida e volta. Neste caso vê-se que em V_1 , quando é feita a inversão da corrente, o valor do sinal é maior do que quando não é feito a inversão.

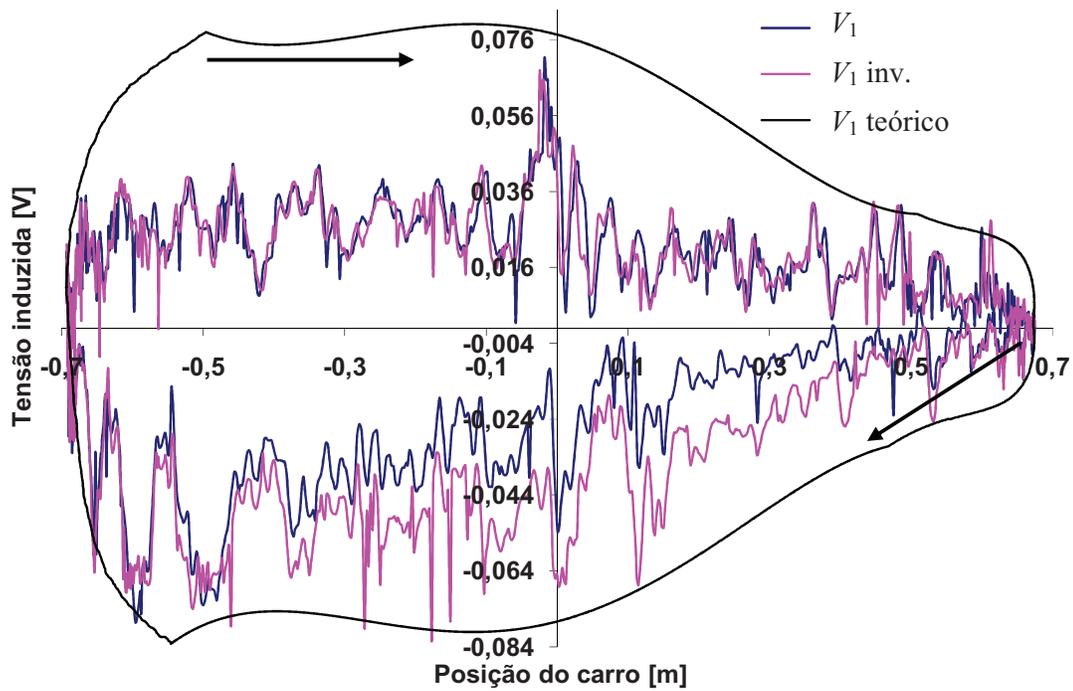


Figura 82 Curva da tensão induzida de V_1 com a posição do carro do Transdutor II para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da direita.

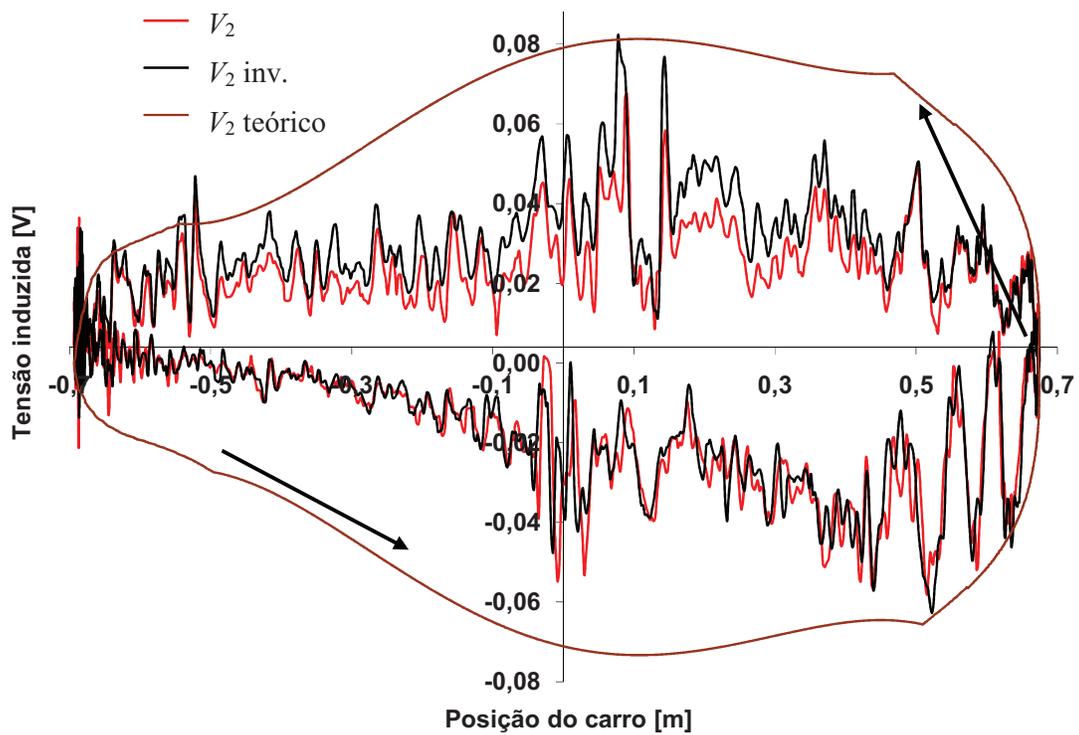


Figura 83 Curva da tensão induzida de V_2 com a posição do carro do Transdutor II para velocidade de 5 m/s com o carro partindo da direita.

Tabela 4 Comparação entre o sinal devido ao efeito da velocidade com o sinal estático para o Transdutor II em $x=0$

Partida	ciclo	$V_{1_cont_teó.}(0)[V]$	Diferença%	$V_{1_cont.}(0)[V]$	Diferença%	$V_{1_cont_inv.}(0)[V]$	Diferença%
esq.	ida	0,077	2,71	0,055	1,94	0,055	1,94
	volta	0,077	2,71	-0,027	0,95	-0,027	0,95
dir.	ida	0,077	2,71	-0,04	1,41	-0,05	1,76
	volta	0,077	2,71	0,03	1,06	0,03	1,06
		$V_{2_cont_teó.}(0)[V]$	Diferença%	$V_{2_cont.}(0)[V]$	Diferença%	$V_{2_cont_inv.}(0)[V]$	Diferença%
esq.	ida	0,074	2,62	-0,066	2,34	-0,045	1,60
	volta	0,074	2,62	0,017	0,60	0,017	0,60
dir.	ida	0,074	2,62	0,04	1,42	0,04	1,42
	volta	0,074	2,62	-0,03	1,06	-0,03	1,06

Pode-se observar nas Figuras 78 e 81 que, devido ao menor fluxo magnético disperso no Transdutor II, os valores da tensão induzida pelo fluxo magnético contínuo são maiores neste do que no Transdutor I e também quando o carro parte da extremidade esquerda ou da direita, na ida os valores da tensão induzida são maiores do que na volta.

Então, para o Transdutor II, se a diferença devido ao efeito da velocidade fosse do tipo soma escalar, para a posição central do transdutor a uma velocidade de 5 m/s a diferença máxima teórica, Tabela 4, seria da ordem de 2,7% e a diferença máxima medida com fluxo magnético c.c. seria menor do que 2,3%.

7. ANÁLISE E MODELAGEM DINÂMICA PARA FLUXO MAGNÉTICO SENOIDAL

Analisa-se agora o efeito que ocorre nas tensões induzidas e no sinal de saída quando o eletroímã é alimentado por uma corrente senoidal, considerando o caso ideal onde não há fluxo disperso e efeito de fim de curso. Para isto vai-se analisar a Figura 84.

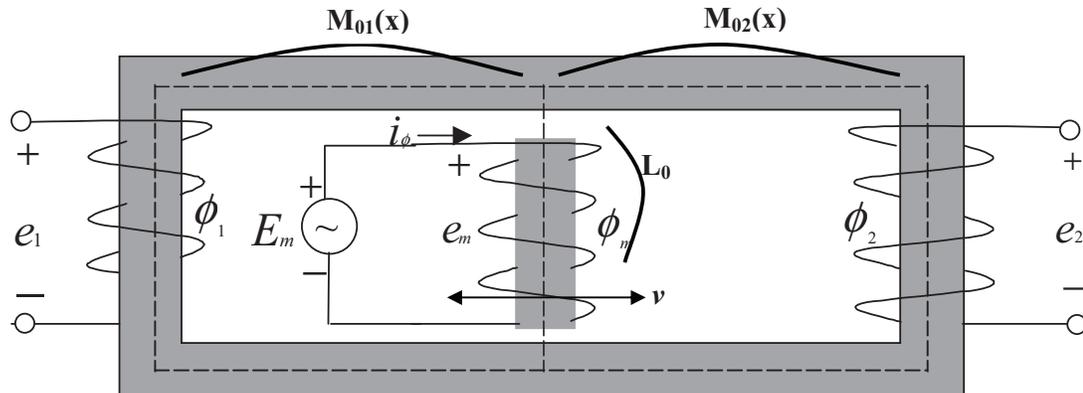


Figura 84 Representação do sensor com fluxo c.a. para o caso dinâmico

Na Figura 84,

L_0 = Indutância do Sistema,

M_{01} = Indutância Mútua da bobina exploradora 1 e o Sistema, e

M_{02} = Indutância Mútua da bobina exploradora 2 e o Sistema.

v é a velocidade de deslocamento do carro.

7.1. CASO DINÂMICO COM FLUXO MAGNÉTICO SENOIDAL

Considere-se que o carro está sendo alimentado por uma corrente senoidal e , ao mesmo tempo, se desloca com velocidade constante.

7.1.1. Sinal de tensão dinâmico na bobina central

De acordo com a equação 64 tem-se:

$$E_m = \frac{\partial N\phi}{\partial t} = \frac{\partial(L_0 i_m)}{\partial t} \quad (136)$$

$$E_m = L_0 \frac{\partial i_m}{\partial t} + i_m \frac{\partial L_0}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (137)$$

Como a indutância do sistema é sempre constante, ou seja, não depende, em princípio, da posição do eletroímã, sua derivada em relação à posição é nula; assim, a tensão induzida no eletroímã é

$$E_m = L_0 \frac{\partial i_m}{\partial t} \quad (138)$$

7.1.2 Sinal de tensão dinâmico nas bobinas exploradoras

As tensões induzidas nas bobinas exploradoras, contudo, dependem da posição do eletroímã, ou seja, da indutância mútua das bobinas exploradoras que depende da posição. Assim:

$$E_j(x,t) = \frac{\partial N_j \phi_j}{\partial t} = \frac{\partial (M_{0j}(x) i_m)}{\partial t} = M_{0j}(x) \frac{\partial i_m}{\partial t} + i_m \frac{\partial M_{0j}(x)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (139)$$

onde

$j = 1$ e 2 , e

$$\frac{\partial x}{\partial t} = v, \text{ velocidade que se move o eletroímã.} \quad (140)$$

Resta achar uma expressão para a derivada da indutância mútua em relação à posição. Isto pode ser feito analisando a equação 139 somente para o caso estático, onde

$$E_{j \text{ estático}}(x,t) = M_{0j}(x) \frac{\partial i_m}{\partial t} \quad (141)$$

Admitindo-se que

$$i_m(t) = I \sin(\omega t) \quad (142)$$

$$E_{j \text{ estático}}(x,t) = E_{j \text{ estático}}(x) \cos(\omega t) \quad (143)$$

onde I é o valor de pico da corrente no eletroímã e $E_{j \text{ estático}}(x)$ é o valor de pico da tensão

induzida nas bobinas exploradoras no caso estático, então,

$$E_{j, \text{estático}}(x, t) = E_{j, \text{estático}}(x) \cos(\omega t) = M_{0j}(x) \left(\frac{\partial(I \text{sen}(\omega t))}{\partial t} \right) = M_{0j}(x) I \omega \cos(\omega t) \quad (144)$$

$$M_{0j}(x) = \frac{E_{j, \text{estático}}(x)}{I \omega} \quad (145)$$

Assim, as expressões das indutâncias mútuas resultam em curvas semelhantes às curvas das tensões das bobinas exploradoras com a posição, apenas em uma outra escala. No caso em que o transdutor é constituído de materiais de alta permeabilidade, baixa histerese, baixo fluxo disperso, as curvas tendem a ser lineares. Assim, a derivada com relação à posição é constante, e a classe de precisão fica limitada pela velocidade do eletroímã.

Assim, a equação 139 fica:

$$E_j(x, t) = M_{0j}(x) \frac{\partial i_m}{\partial t} + i_m \frac{\partial M_{0j}(x)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (146)$$

Substituindo as equações 143 e 145 em 146, tem-se que

$$E_{j, \text{dinâmico}}(x, t) = E_{j, \text{estático}}(x) \cos(\omega t) + \frac{v}{\omega} \text{sen}(\omega t) \frac{\partial E_{j, \text{est}}(x)}{\partial x} \quad (147)$$

$$E_{j, \text{dinâmico}}(x, t) = E_{j, \text{estático}}(x, t) + \Delta E_{j, \text{dinâmico}}(x, t) \quad (148)$$

Para os casos em que o sinal das bobinas exploradoras tem característica linear, pode-se expressar os picos da senóide em função da posição na forma

$$E_{j, \text{estático}}(x) = \pm kx + b_j \quad (149)$$

Então

$$\frac{\partial E_{j, \text{est}}(x)}{\partial x} = \pm k \quad (150)$$

As equações 147 e 148 podem ser transformadas em

$$\Delta E_{1, \text{dinâmico}}(x, t) = E_{1, \text{dinâmico}}(x, t) - E_{1, \text{estático}}(x, t) = \frac{v}{\omega} \text{sen}(\omega t) \frac{\partial E_{1, \text{est}}(x)}{\partial x} = -\frac{v}{\omega} \text{sen}(\omega t) k \quad (151)$$

$$\Delta E_2(x,t) = E_{2 \text{ dinâmico}}(x,t) - E_{2 \text{ estático}}(x,t) = \frac{v}{\omega} \text{sen}(wt) \frac{\partial E_2(x)}{\partial x} = \frac{v}{\omega} \text{sen}(wt)k \quad (152)$$

onde k é uma constante quando as curvas das tensões induzidas dos sinais de saída são lineares.

Então

$$E_i(x,t) = E_{i \text{ estático}}(x) \cos(wt) \mp k \frac{v}{w} \text{sen}(wt) \quad (153)$$

Assim, tem-se que:

$$E_1(x,t) = E_{1 \text{ estático}}(x) \cos(wt) - k \frac{v}{w} \text{sen}(wt) \quad (154)$$

$$E_2(x,t) = E_{2 \text{ estático}}(x) \cos(wt) + k \frac{v}{w} \text{sen}(wt) \quad (155)$$

Pode-se passar as equações 147 para uma forma senoidal ou cossenoidal única onde fica fácil calcular o valor eficaz para se poder comparar com os valores medidos pelos voltímetros tipo ferro móvel, que são valores eficazes.

Se aplicar as relações trigonométricas para a subtração de dois argumentos de uma função cosseno, tem-se que:

$$D \cos(wt + \varphi) = D \cos(\varphi) \cos(wt) - D \text{sen}(\varphi) \text{sen}(wt) \quad (156)$$

Comparando as equações 154 e 156 , tem-se:

$$\begin{aligned} E_{1 \text{ dinâmico}}(x,t) &= E_{1 \text{ estático}}(x) \cos(wt) - k \frac{v}{w} \text{sen}(wt) \\ D_1(x) \cos(wt + \varphi_1) &= D_1(x) \cos(\varphi_1) \cos(wt) - D_1(x) \text{sen}(\varphi_1) \text{sen}(wt) \end{aligned} \quad (157)$$

Comparando os termos da equação 157:

$$E_{1 \text{ dinâmico}}(x,t) = D_1(x) \cos(wt + \varphi_1) \quad (158)$$

$$D_1(x) \cos(\varphi_1) = E_{1 \text{ estático}}(x) \quad (159)$$

$$D_1(x) \text{sen}(\varphi_1) = k \frac{v}{w} \quad (160)$$

Se dividir a equação 160 pela 159 , tem-se:

$$\frac{D_1(x)\text{sen}(\varphi_1)}{D_1(x)\text{cos}(\varphi_1)} = \frac{k \frac{v}{w}}{E_1(x)_{\text{estático}}} \quad (161)$$

$$\frac{\text{sen}(\varphi_1)}{\text{cos}(\varphi_1)} = \tan(\varphi_1) = \frac{k \frac{v}{w}}{E_1(x)_{\text{estático}}} \quad (162)$$

Então

$$\varphi_1 = \arctan \left(\frac{k \frac{v}{w}}{E_1(x)_{\text{estático}}} \right) \quad (163)$$

Assim, a equação 157 pode ser representada pelo círculo trigonométrico conforme a Figura 85.

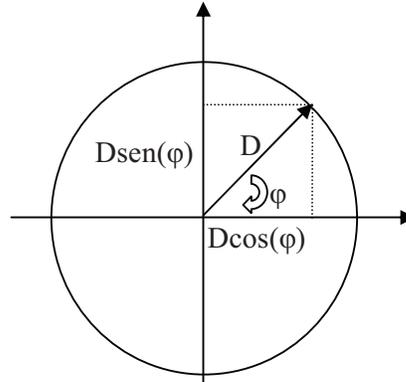


Figura 85 Representação trigonométrica da equação 157

Desta forma, pode-se calcular $D_1(x)$, pois de acordo com a equação 157 tem-se que:

$$D_1(x)^2 = \left(D_1(x) \text{cos}(\varphi_1) \right)^2 + \left(D_1(x) \text{sen}(\varphi_1) \right)^2 \quad (164)$$

$$D_1(x) = \sqrt{\left(E_1(x)_{\text{estático}} \right)^2 + \left(k \frac{v}{w} \right)^2} \quad (165)$$

Da mesma forma, se aplicar as relações trigonométricas para a soma de dois argumentos de uma função cosseno, tem-se que:

$$D(x) \cos(\omega t - \varphi) = D(x) \cos(\varphi) \cos(\omega t) + D(x) \sin(\varphi) \sin(\omega t) \quad (166)$$

Comparando as equações 155 e 166, tem-se:

$$E_2(x, t) = E_2(x) \cos(\omega t) + k \frac{v}{w} \sin(\omega t) \quad (167)$$

dinâmico estático

$$D_2(x) \cos(\omega t - \varphi_2) = D_2(x) \cos(\varphi_2) \cos(\omega t) + D_2(x) \sin(\varphi_2) \sin(\omega t)$$

Comparando os termos da equação 167

$$E_2(x, t) = D_2(x) \cos(\omega t - \varphi_2) \quad (168)$$

$$D_2(x) \cos(\varphi_2) = E_2(x) \quad (169)$$

estático

$$D_2(x) \sin(\varphi_2) = k \frac{v}{w} \quad (170)$$

Se dividir a equação 170 pela 169, tem-se:

$$\frac{D_2(x) \sin(\varphi_2)}{D_2(x) \cos(\varphi_2)} = \frac{k \frac{v}{w}}{E_2(x)} \quad (171)$$

estático

$$\frac{\sin(\varphi_2)}{\cos(\varphi_2)} = \tan(\varphi_2) = \frac{k \frac{v}{w}}{e_2(x)} \quad (172)$$

estático

Então

$$\varphi_2 = \arctan \left(\frac{k \frac{v}{w}}{E_2(x)} \right) \quad (173)$$

estático

Assim, da mesma forma, a equação 166 pode ser representada pelo círculo trigonométrico conforme a Figura 86.

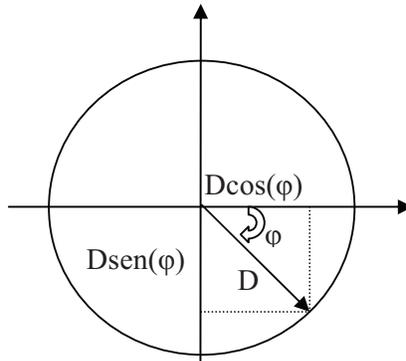


Figura 86 Representação trigonométrica da equação 166

Desta forma, pode-se calcular $D_2(x)$, pois, de acordo com a Figura 86, tem-se que:

$$D_2(x)^2 = \left(D_2(x) \cos(\varphi_2) \right)^2 + \left(D_2(x) \text{sen}(\varphi_2) \right)^2 \quad (174)$$

$$D_2(x) = \sqrt{\left(E_{2(x)} \right)_{\text{estático}}^2 + \left(k \frac{v}{w} \right)^2} \quad (175)$$

As equações 174 e 175 só valem para o caso em que a velocidade do carro é constante, e quanto maior a velocidade, maior será a diferença dinâmica. Quando a velocidade é zero, as equações 158 e 168 ficam iguais às equações do caso estático. Deste modo, a forma geral das equações das tensões induzidas nas bobinas exploradoras, estando o carro com velocidade constante, são:

$$E_{j(x,t)}^{\text{dinâmico}} = D_j(x) \cos(\omega t \pm \varphi_j) \quad (176)$$

$$\varphi_j = \arctan \left(\frac{k \frac{v}{w}}{E_j(x)_{\text{estático}}} \right) \quad (177)$$

$$D_j(x) = \sqrt{\left(E_j(x) \right)_{\text{estático}}^2 + \left(k \frac{v}{w} \right)^2} \quad (178)$$

onde

$j = 1; 2.$

Para tensões com forma de onda seno ou cosseno, o valor eficaz é bem conhecido sendo:

$$e_j(x)_{\text{eficaz}}^{\text{dinâmico}} = \frac{D_j(x)}{\sqrt{2}} \quad (179)$$

$$e_j(x)_{\text{eficaz}}^{\text{dinâmico}} = \sqrt{\left(\frac{E_j(x)}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{k \frac{v}{w}}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (180)$$

$$e_j(x)_{\text{eficaz}}^{\text{dinâmico}} = \sqrt{\left(e_j(x)_{\text{eficaz}}^{\text{estático}}\right)^2 + \left(\frac{kv}{w\sqrt{2}}\right)^2} \quad (181)$$

$$e_j(x)_{\text{eficaz}}^{\text{dinâmico}} = \sqrt{\left(e_j(x)_{\text{eficaz}}^{\text{estático}}\right)^2 + \left(\frac{k_{\text{eficaz}} v}{w}\right)^2} \quad (182)$$

A equação 181 reproduz a tensão eficaz induzida medida nas bobinas exploradoras para o caso dinâmico, sendo que, quando a velocidade é igual a zero, de acordo com a equação 178 ela é igual ao valor da tensão induzida nas bobinas exploradoras do caso estático.

Por esta modelagem pode-se fazer uma analogia da tensão induzida nas bobinas exploradoras devido ao efeito da velocidade como sendo um fasor, que sofre um deslocamento angular positivo e negativo. A componente no eixo vertical é a tensão induzida nas bobinas devido ao efeito da velocidade. Assim, quando o fluxo magnético em uma bobina diminui devido ao efeito da velocidade, a componente da tensão dinâmica está defasada de +90 graus da componente estática, e na outra bobina, como o fluxo aumenta, a defasagem será de -90 graus. Outra forma de se ver isto é simplesmente olhando a equação 147 onde se tem que a componente estática é, por definição, representada por uma função cosseno que é somada à parte dinâmica representada por uma função seno, ou seja, há uma defasagem de 90 graus na soma das duas parcelas.

7.2 SINAL DE SAÍDA

O sinal de saída tanto para o caso estático como para o dinâmico é obtido de dois modos:

1- Via *software*, através do qual se obtém os valores de tensões eficazes das bobinas exploradoras através de um voltímetro, e o computador processa.

2- Via um condicionador de sinais; os sinais de tensão c.a. das bobinas exploradoras alimentam um condicionador de sinais que transforma os sinais de tensão c.a. em sinais c.c.; a amplitude dá o deslocamento, e a fase indica o sentido do deslocamento.

A equação do sinal de saída $S(x,t)$ para o caso estático fica desta forma:

$$S(x,t)_{\text{estático}} = \frac{\left(e_{1(x,t)_{\text{estático}}}_{\text{eficaz}} - e_{2(x,t)_{\text{estático}}}_{\text{eficaz}} \right)}{\left(e_{1(x,t)_{\text{estático}}}_{\text{eficaz}} + e_{2(x,t)_{\text{estático}}}_{\text{eficaz}} \right)} \quad (183)$$

Para o caso dinâmico expressão do sinal de saída é:

$$S(x,t)_{\text{dinâmico}} = \frac{\left(e_{1(x,t)_{\text{dinâmico}}}_{\text{eficaz}} - e_{2(x,t)_{\text{dinâmico}}}_{\text{eficaz}} \right)}{\left(e_{1(x,t)_{\text{dinâmico}}}_{\text{eficaz}} + e_{2(x,t)_{\text{dinâmico}}}_{\text{eficaz}} \right)} \quad (184)$$

Assim de acordo com 181 tem-se

$$S(x,t)_{\text{dinâmico}} = \frac{\left(\sqrt{\left(e_{1(x)_{\text{estático}}}_{\text{eficaz}} \right)^2 + \left(\frac{k_{\text{eficaz}} v}{w} \right)^2} - \sqrt{\left(e_{2(x)_{\text{estático}}}_{\text{eficaz}} \right)^2 + \left(\frac{k_{\text{eficaz}} v}{w} \right)^2} \right)}{\left(\sqrt{\left(e_{1(x)_{\text{estático}}}_{\text{eficaz}} \right)^2 + \left(\frac{k_{\text{eficaz}} v}{w} \right)^2} + \sqrt{\left(e_{2(x)_{\text{estático}}}_{\text{eficaz}} \right)^2 + \left(\frac{k_{\text{eficaz}} v}{w} \right)^2} \right)} \quad (185)$$

Observando as equações 182 e 184, tem-se ainda que:

$$S(x_0,t)_{\text{estático}} = S(x_0,t)_{\text{dinâmico}} = 0 \quad (186)$$

Desta forma, a velocidade não altera o ponto de mudança de fase para $S(x)$, mas altera sua inclinação com referência a este ponto. Em outras palavras, existe uma diferença na amplitude do sinal dinâmico em relação ao estático, porém não existe uma diferença na fase

do sinal, isto é, no sentido do deslocamento - considerando o caso ideal onde as bobinas são idênticas com k igual para ambas.

O que ocorre aqui é que esta diferença para uma curva linear, se confirmada a modelagem matemática, seria muito pequeno, pois como as duas bobinas têm seus valores *rms* acrescidos igualmente em módulo de um valor muito pequeno, equações 165 e 175, o sinal de saída, por ser da forma diferencial, não apresentaria uma diferença considerável. Esta diferença seria compensada pelo modo diferencial do mesmo modo quando ocorre uma flutuação da fonte.

Na seção seguinte mostra-se a diferença que ocorreria no transdutor já estudado seguindo a modelagem anterior, onde haveria uma diferença relativamente grande no sinal das bobinas exploradoras, quando o sinal estático é pequeno, e uma diferença relativamente pequena, quando o sinal estático é grande.

Para o sinal de saída diferencial diferença na tensão das bobinas seria uma média das duas, ficando esta diferença praticamente constante.

7.3 COMPARANDO VALORES ESTÁTICOS EXPERIMENTAIS COM VALORES DINÂMICOS TEÓRICOS.

Pode-se agora utilizar os resultados experimentais obtidos para os Transdutores I e II para analisar teoricamente a diferença dinâmica a partir das curvas estáticas e do equacionamento visto neste capítulo. Pode-se ver na Figura 87, para o Transdutor I, as curvas de calibração estática onde as equações das curvas de V_1 e V_2 são determinadas por regressão linear e vai-se considerar para estas equações um polinômio de ordem três e, assim, pode-se aplicar as equações 165 e 175 para fazer uma comparação teórica desta diferença devido à velocidade.

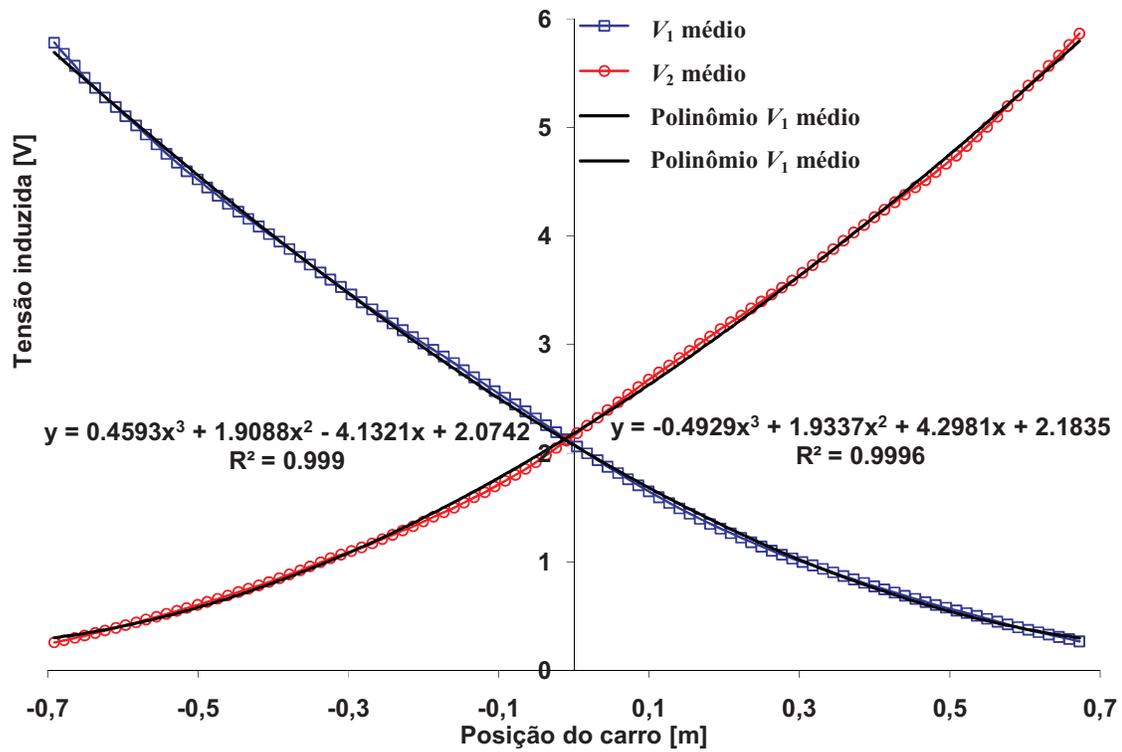


Figura 87 Tensão induzida nas bobinas exploradoras no Transdutor I, caso estático e frequência de 60 Hz

Assim, de acordo com o gráfico da Figura 87, a tensão eficaz estática nas bobinas exploradoras para a frequência de 60 Hz pode ser representado por:

$$e_{1eficaz}(x)_{estático} = 0,4593 x^3 + 1,9088 x^2 - 4,1321x + 2,0742 \quad (187)$$

$$e_{2eficaz}(x)_{estático} = -0,4929 x^3 + 1,9337 x^2 + 4,2981x + 2,1835 \quad (188)$$

As equações 165 e 175 foram desenvolvidas para curvas lineares e podem ser estendidas para equações de terceiro grau como as da Figura 87, ou seja, equações do tipo

$$e_i(x)_{eficaz}^{estático} = \pm a_i x^3 + b_i x^2 \mp c_i x + d_i \quad (189)$$

onde

$$\frac{\partial e_i(x)_{eficaz}^{estático}}{\partial x} = \pm 3a_i x^2 + 2b_i x \mp c_i \quad \text{com} \quad i = 1,2 \quad (190)$$

Assim, as equações 165 e 175 podem ser redefinidas para uma curva de segundo grau como vemos abaixo:

$$e_{1(x)}^{eficaz}_{Dinâmico} = \sqrt{\left(e_{1(x)}^{eficaz}_{estaático} \right)^2 + \left(\frac{v}{w} (-3a_1x^2 - 2b_1x + c_1) \right)^2} \quad (191)$$

$$e_{1(x)}^{eficaz}_{Dinâmico} = \sqrt{\left(e_{1(x)}^{eficaz}_{estaático} \right)^2 + \left(\frac{v}{2\pi 60} (-1,3779x^2 - 3,8176x + 4,1321) \right)^2} \quad (192)$$

e

$$e_{2(x)}^{eficaz}_{Dinâmico} = \sqrt{\left(e_{2(x)}^{eficaz}_{estaático} \right)^2 + \left(\frac{v}{w} (+3a_2x^2 - 2b_2x - c_2) \right)^2} \quad (193)$$

$$e_{2(x)}^{eficaz}_{Dinâmico} = \sqrt{\left(e_{2(x)}^{eficaz}_{estaático} \right)^2 + \left(\frac{v}{2\pi 60} (+1,4787x^2 - 3,8674 - 4,2981) \right)^2} \quad (194)$$

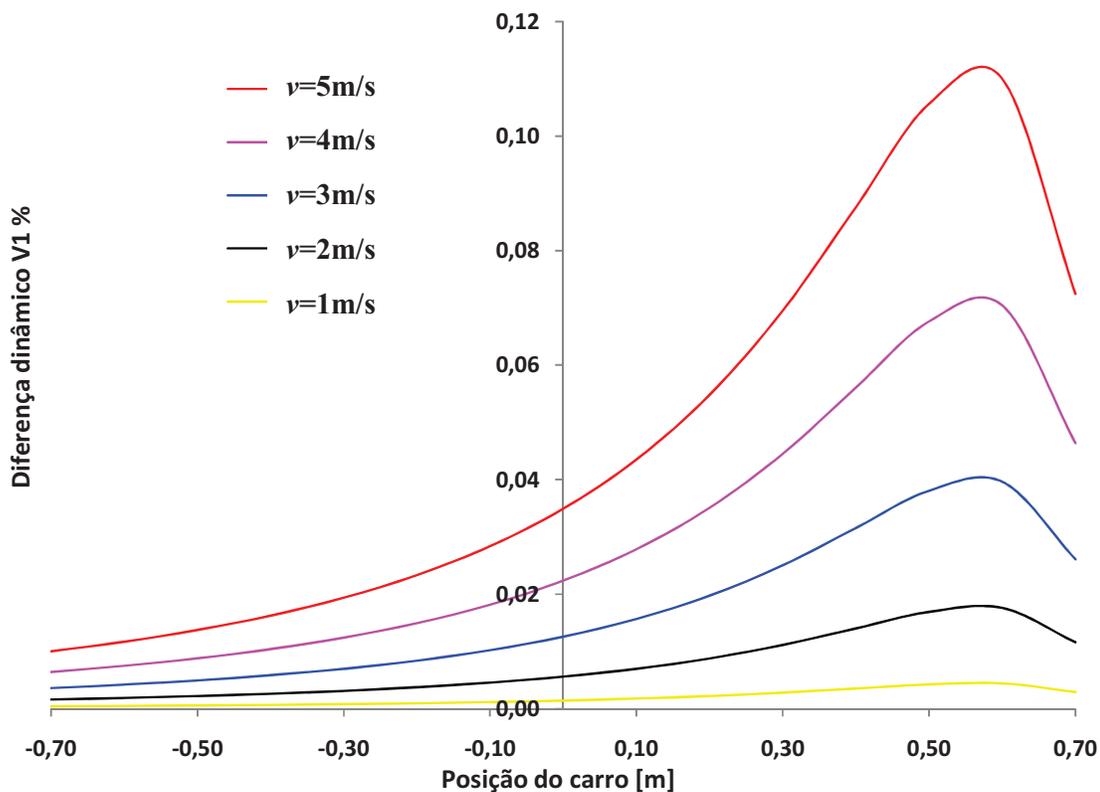
Assim, pode-se agora comparar os valores estáticos e dinâmicos teórico nas duas bobinas exploradoras. Para exemplificar pode-se montar uma tabela comparativa de V_1 e V_2 para velocidades de 5 m/s. A partir de tabelas como estas se pode montar os gráficos da diferença dinâmica teórica para várias velocidades, que podem ser vistas nas Figuras 88 e 89

Tabela 5 Comparação no Transdutor I entre os valores estáticos e dinâmicos de V_1 para $v = 5\text{m/s}$

Posição [m]	V_1 Estático [V]	V_1 Dinâmico [V]	Diferença [V]	Diferença%
-0,70	5,7439	5,7445	0,0006	0,0100
-0,60	5,1409	5,1415	0,0006	0,0117
-0,50	4,5596	4,5603	0,0006	0,0137
-0,40	4,0027	4,0034	0,0007	0,0162
-0,30	3,4729	3,4736	0,0007	0,0194
-0,20	2,9730	2,9737	0,0007	0,0233
-0,10	2,5058	2,5065	0,0007	0,0284
0,00	2,0740	2,0747	0,0007	0,0349
0,10	1,6803	1,6811	0,0007	0,0435
0,20	1,3276	1,3283	0,0007	0,0548
0,30	1,0185	1,0192	0,0007	0,0696
0,40	0,7559	0,7565	0,0007	0,0876
0,50	0,5424	0,5429	0,0006	0,1057
0,60	0,3808	0,3812	0,0004	0,1100
0,70	0,2740	0,2742	0,0002	0,0725

Tabela 6 Comparação no Transdutor I entre os valores estáticos e dinâmicos de V_2 para $v = 5\text{m/s}$

Posição [m]	V_2 Estático [V]	V_2 Dinâmico [V]	Diferença [V]	Diferença%
-0,70	0,2903	0,2904	0,0000	0,0126
-0,60	0,4064	0,4064	0,0001	0,0179
-0,50	0,5788	0,5788	0,0001	0,0168
-0,40	0,8046	0,8047	0,0001	0,0138
-0,30	1,0809	1,0810	0,0001	0,0109
-0,20	1,4047	1,4048	0,0001	0,0086
-0,10	1,7730	1,7731	0,0001	0,0068
0,00	2,1830	2,1831	0,0001	0,0055
0,10	2,6316	2,6318	0,0001	0,0044
0,20	3,1160	3,1161	0,0001	0,0036
0,30	3,6331	3,6332	0,0001	0,0030
0,40	4,1800	4,1801	0,0001	0,0025
0,50	4,7538	4,7539	0,0001	0,0021
0,60	5,3514	5,3515	0,0001	0,0018
0,70	5,9700	5,9701	0,0001	0,0016

Figura 88 Gráfico da diferença no Transdutor I relativa à parcela dinâmica em V_1 para $v = 5, 4, 3, 2$ e 1m/s

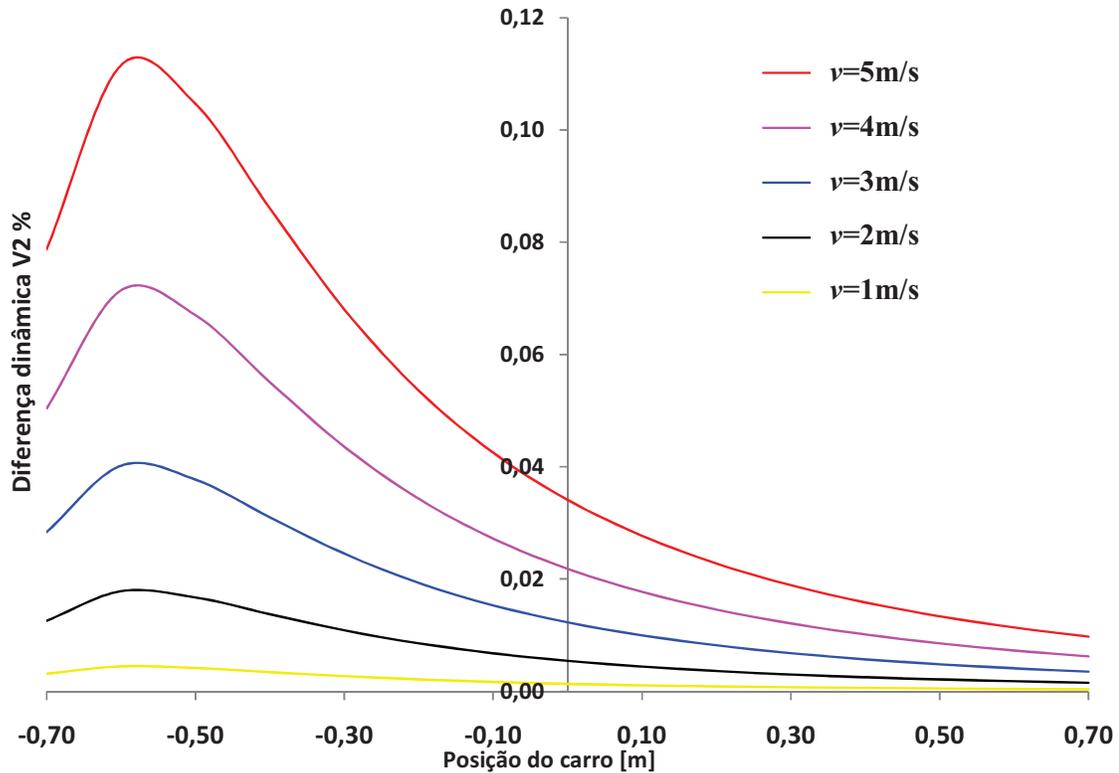


Figura 89 Gráfico da diferença no Transdutor I relativa à parcela dinâmica em V_2 para $v = 5, 4, 3, 2$ e 1 m/s

Pela teoria desenvolvida antes, temos que o efeito da velocidade é somado ao valor da curva estática vetorialmente de forma ortogonal. Com isto, a diferença teórica da velocidade de 5 m/s não passa de $0,12\%$ para as tensões induzidas de menor valor, tanto para V_1 como para V_2 , Figuras 88 e 89. Quando a tensão induzida aumenta, a diferença tende a diminuir exponencialmente, chegando a ser menor que $0,02\%$ para velocidade 5 m/s.

Para o Transdutor II utilizam-se as curvas obtidas por regressão linear de terceira ordem, equação 195 e 196, para V_1 e V_2 do gráfico da Figura 90.

$$e_{1\text{eficaz}}(x)_{\text{estático}} = +1,4576 x^3 + 1,8618 x^2 - 5,4124 x + 2,9055 \quad (195)$$

$$e_{2\text{eficaz}}(x)_{\text{estático}} = -1,7799 x^3 + 1,4611 x^2 + 5,3146 x + 2,8341 \quad (196)$$

Pode-se, então, através das equações 193 e 195 calcular a diferença dinâmica teórica para o Transdutor II pelas equações 197 e 198.

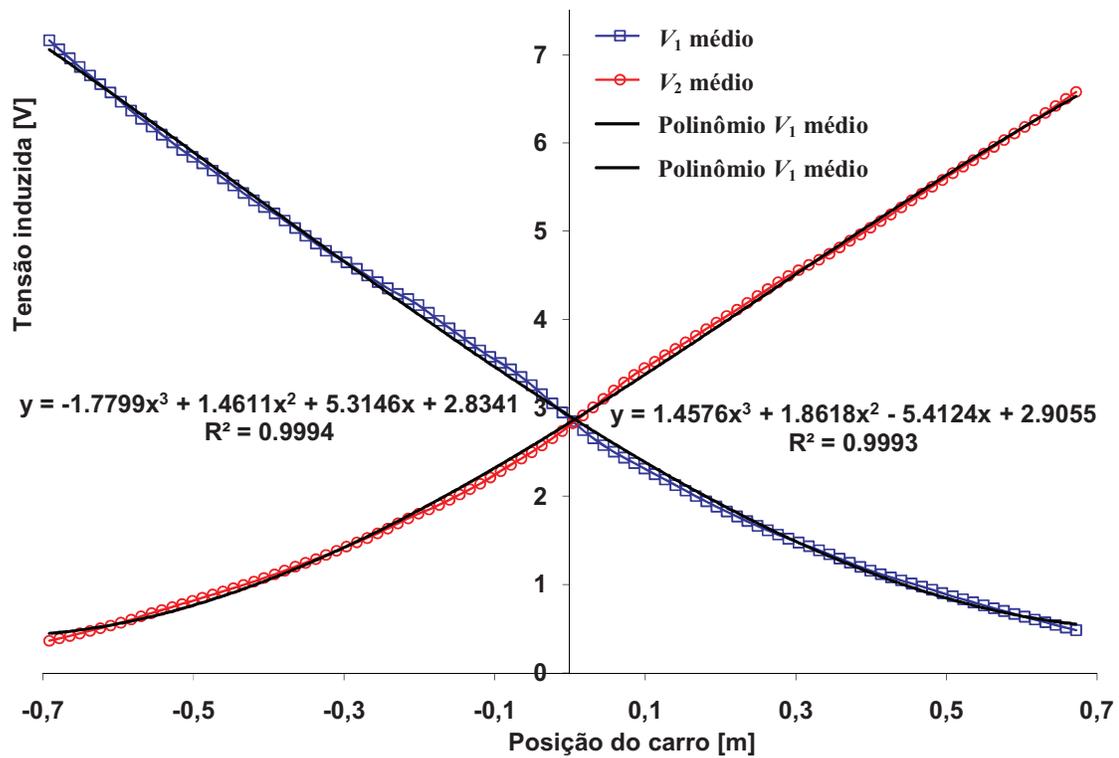


Figura 90 Tensão induzida nas bobinas exploradoras no Transdutor II, caso estático e frequência de 60 Hz

$$e_{1(x)}^{\text{eficaz}}_{\text{Dinâmico}} = \sqrt{\left(e_{1(x)}^{\text{eficaz}}_{\text{estático}} \right)^2 + \left(\frac{v}{2\pi 60} \left(-4,3728x^2 - 3,7236x + 5,4124 \right) \right)^2} \quad (197)$$

e

$$e_{2(x)}^{\text{eficaz}}_{\text{Dinâmico}} = \sqrt{\left(e_{2(x)}^{\text{eficaz}}_{\text{estático}} \right)^2 + \left(\frac{v}{2\pi 60} \left(+5,3397x^2 - 2,9222 - 5,3146 \right) \right)^2} \quad (198)$$

Assim, pode-se agora comparar os valores estático e dinâmico teóricos nas duas bobinas exploradoras e, para exemplificar, pode-se montar uma tabela comparativa para V_1 e V_2 para velocidade de 5 m/s. A partir de tabelas como estas se pode montar os gráficos da diferença dinâmica para varias velocidades, que podem ser vistos nas Figuras 91 e 92.

Tabela 7 Comparação no Transdutor II entre os valores estáticos e dinâmicos de V_1 para $v = 5\text{m/s}$

Posição [m]	V_1 Estático [V]	V_1 Dinâmico [V]	Diferença [V]	Diferença%
-0,70	7,1055	7,1060	0,0004	0,0060
-0,60	6,5074	6,5079	0,0005	0,0077
-0,50	5,8941	5,8947	0,0006	0,0097
-0,40	5,2743	5,2750	0,0006	0,0122
-0,30	4,6568	4,6575	0,0007	0,0153
-0,20	4,0502	4,0510	0,0008	0,0192
-0,10	3,4634	3,4642	0,0008	0,0242
0,00	2,9050	2,9059	0,0009	0,0306
0,10	2,3839	2,3848	0,0009	0,0387
0,20	1,9087	1,9096	0,0009	0,0488
0,30	1,4882	1,4891	0,0009	0,0605
0,40	1,1312	1,1320	0,0008	0,0715
0,50	0,8464	0,8470	0,0006	0,0742
0,60	0,6425	0,6428	0,0004	0,0549
0,70	0,5282	0,5283	0,0001	0,0139

Tabela 8 Comparação no Transdutor II entre os valores estáticos e dinâmicos de V_2 para $v = 5\text{m/s}$

Posição [m]	V_2 Estático [V]	V_2 Dinâmico [V]	Diferença [V]	Diferença%
-0,70	0,4403	0,4403	0,0001	0,0020
-0,60	0,5558	0,5561	0,0003	0,0451
-0,50	0,7646	0,7652	0,0006	0,0729
-0,40	1,0560	1,0568	0,0008	0,0728
-0,30	1,4193	1,4202	0,0009	0,0620
-0,20	1,8439	1,8448	0,0009	0,0499
-0,10	2,3190	2,3199	0,0009	0,0394
0,00	2,8340	2,8349	0,0009	0,0310
0,10	3,3782	3,3791	0,0008	0,0243
0,20	3,9410	3,9418	0,0008	0,0191
0,30	4,5117	4,5123	0,0007	0,0151
0,40	5,0795	5,0801	0,0006	0,0118
0,50	5,6339	5,6344	0,0005	0,0092
0,60	6,1641	6,1645	0,0004	0,0071
0,70	6,6595	6,6598	0,0004	0,0053

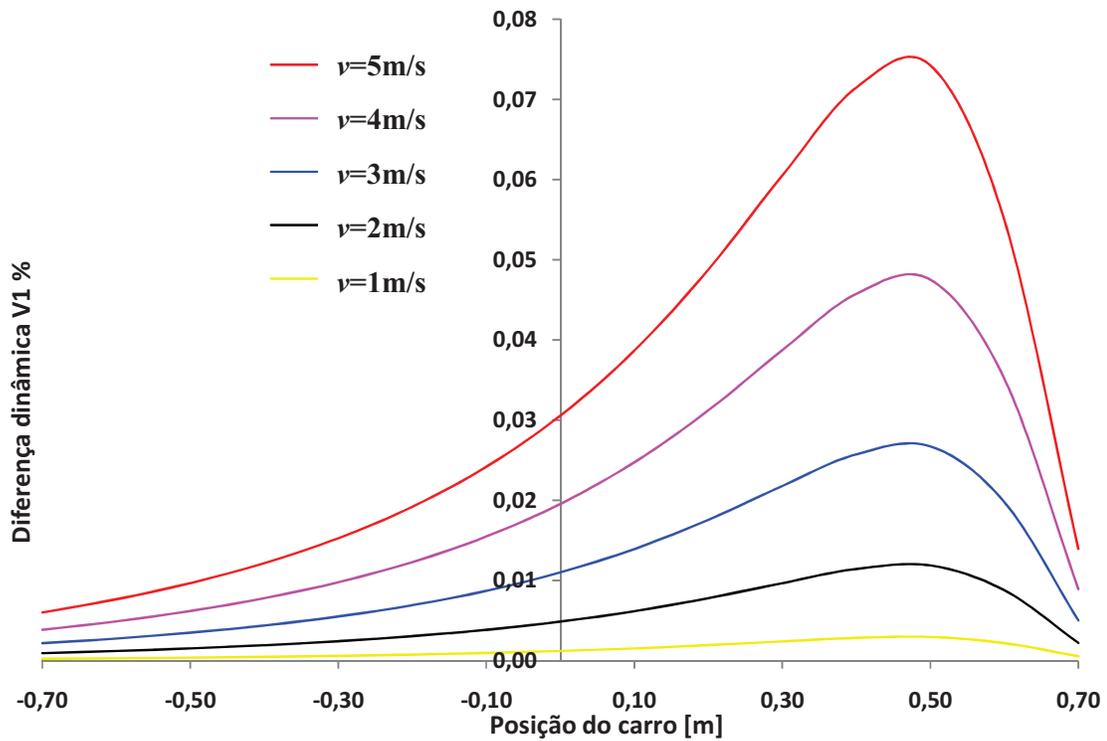


Figura 91 Gráfico da diferença no Transdutor II relativa à parcela dinâmica em V_1 para $v = 5,4,3,2$ e 1m/s

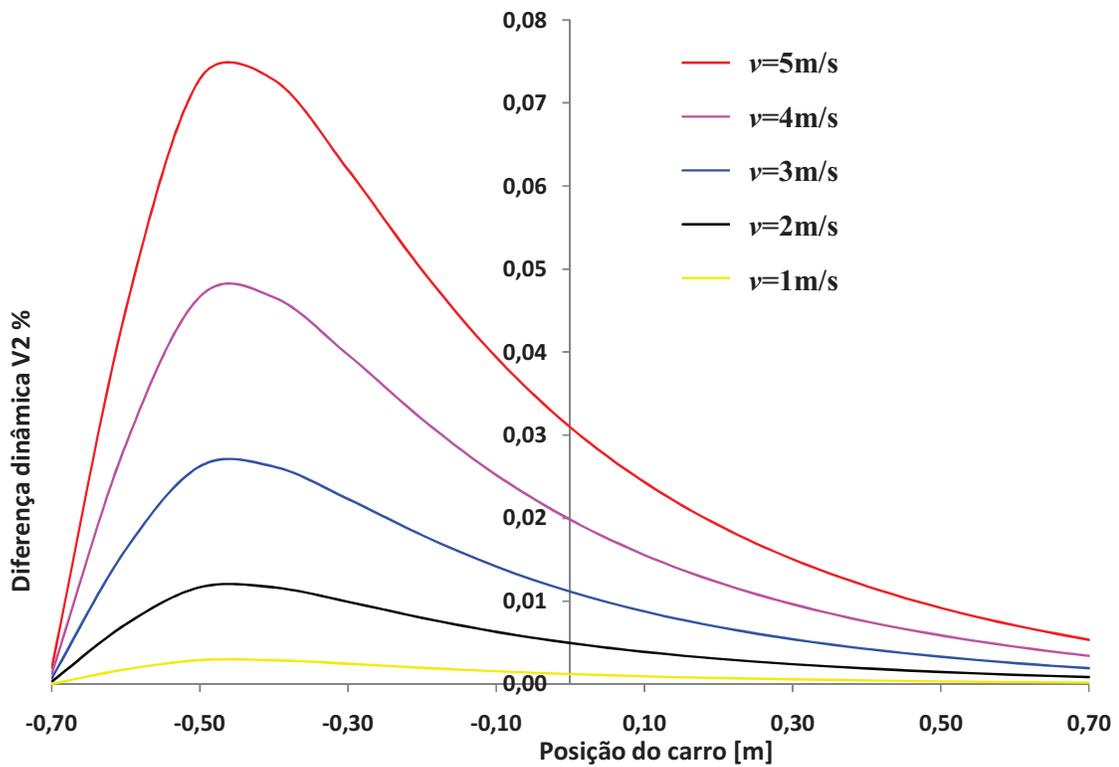


Figura 92 Gráfico da diferença no Transdutor II relativa à parcela dinâmica em V_2 para $v = 5,4,3,2$ e 1m/s

Da mesma forma como foi visto no Transdutor I, o efeito da velocidade no Transdutor II é somada ao valor da curva estática vetorialmente de forma ortogonal. Com isto, a diferença teórica para velocidade 5 m/s não passa de 0,08% para as tensões induzidas de menor valor, tanto para V_1 como para V_2 , Figuras 91 a 92. Quando a tensão induzida aumenta a diferença tende a diminuir exponencialmente, chegando a ser menor que 0,01% para velocidade 5 m/s.

Assim pela teoria desenvolvida na seção 7.1.2 vê-se que o efeito da variação do módulo do fluxo magnético é pequeno e ainda é somado vetorialmente de forma ortogonal ao sinal estático. Com isto, o efeito da velocidade no sinal do transdutor é muito pequeno e, pelo cálculo teórico, a diferença está na terceira ou quarta casa depois da vírgula como mostrado nas tabelas 5 a 8.

8. RESULTADOS DAS CURVAS DINÂMICAS DOS TRANSDUTORES

Neste capítulo vai-se analisar os resultados dinâmicos para uma excitação alternada dos Transdutores I e II. O procedimento para obtenção dos dados com fluxo magnético alternado dinâmico é igual ao feito para obtenção dos dados com fluxo magnético contínuo, onde novamente tem-se o transdutor ligado a um movimentador que está ligado a uma régua potenciométrica que produz a referência de posição. O movimentador está acoplado a um servo-motor comandado por um servo-conversor, que está conectado a um PC via ethernet. O PC se comunica, então, via USB com o sistema de aquisição de dados (DAQ). A alimentação do eletroímã do carro é feita por uma fonte de corrente HP que permite variar a frequência e a amplitude. A corrente da fonte passa por um shunt de 1 Ohm através do qual se obtém o sinal de corrente.

O DAQ envia, via comunicação USB para o PC, os dados digitais do processo, e através do programa Labview se cria uma matriz de dados. A primeira coluna da matriz é a do tempo, a segunda e a terceira colunas são as tensões induzidas nas bobinas das culatras laterais esquerda e direita do transdutor, a quarta coluna é a referência de posição da régua potenciométrica, a quinta coluna é a corrente no eletroímã e a sexta é a tensão induzida na bobina exploradora no eletroímã do carro, Figuras 93 e 94.

A experiência consiste em realizar estas medições para velocidades diferentes e constantes de 0,2, 1, 2, 3, 4 e 5 m/s, para as frequências de 60, 120 e 240 Hz, com o carro partindo da extremidade esquerda para a direita, de forma cíclica, acontecendo o mesmo com o carro partindo da extremidade direita. Para cada caso foram feitas dez medições. O número de amostras por segundo obtidas para cada velocidade pode ser visto na Tabela 9, sendo igual para as três frequências com uma rampa de aceleração e desaceleração de 30 ms. Nas Figuras 95 a 109 vai-se mostrar como foi tratada a matriz de dados até se obter os resultados pretendidos. Como exemplo, vai-se analisar os dados obtidos com o carro a velocidade de 4 m/s partindo da esquerda para direita.

Tabela 9 Valores das taxas de aquisição para cada velocidade

v [m/s]	taxa de aquisição [amostras /s]
0,2	6.000
1	10.000
2	20.000
3	20.000
4	20.000
5	20.000

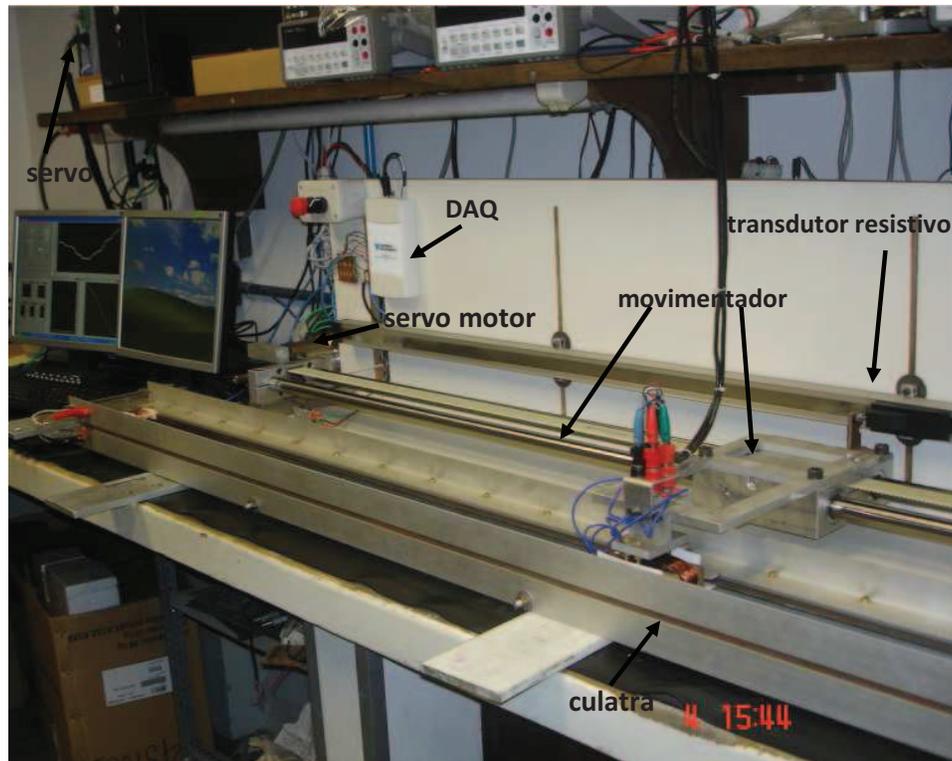


Figura 93 Montagem da experiência com o Transdutor I

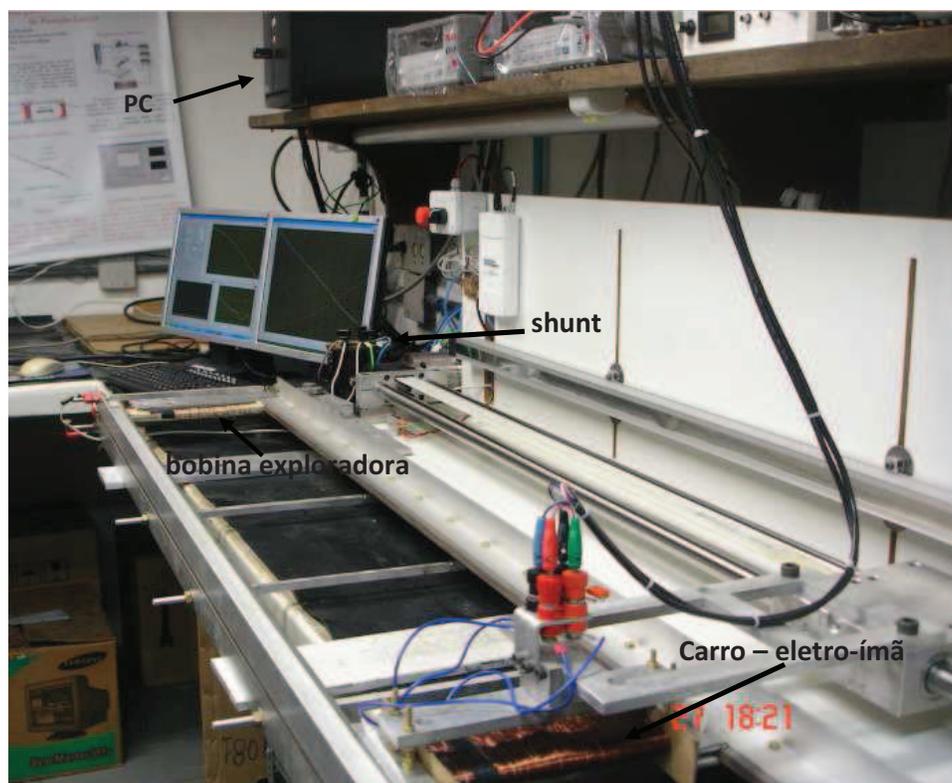


Figura 94 Montagem da experiência com o Transdutor II

Nas Figuras 95 a 98 vê-se um exemplo gráfico do resultado obtido através da matriz de dados experimentais para Transdutor I, Nela os valores das colunas da matriz de dados são plotados no tempo. O transdutor é excitado com uma corrente de 0,8 A, com o carro partindo da esquerda com uma velocidade de 4 m/s.

Na Figura 95(a) tem-se o sinal alternado senoidal de tensão induzida na bobina exploradora da culatra lateral esquerda V_1 pelo tempo no percurso de ida e volta. No gráfico também estão plotadas as envoltórias superior e inferior do sinal alternado. O mesmo pode ser visto na Figura 95(b) para o sinal da bobina exploradora da culatra lateral direita V_2 .

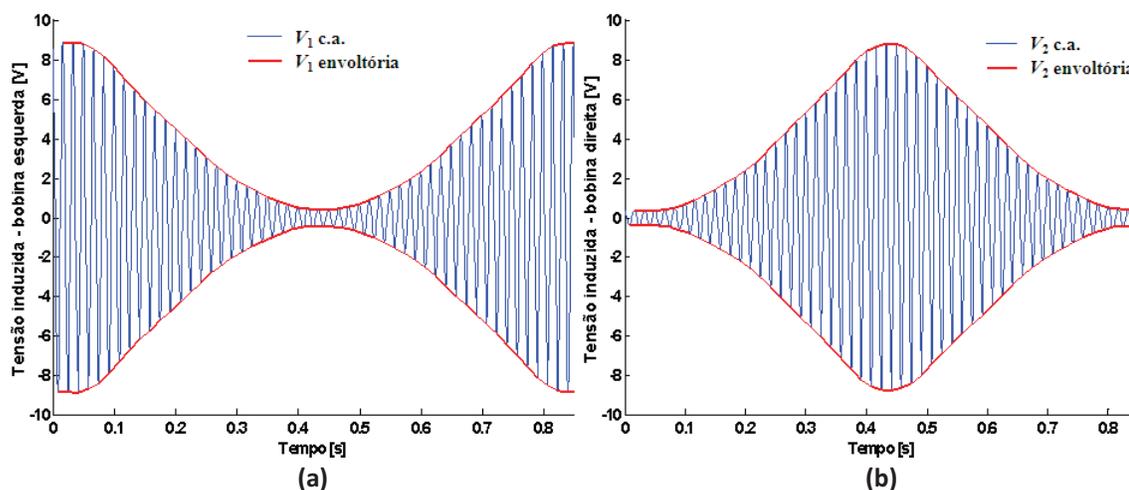


Figura 95 Sinal de tensão na bobina da culatra lateral esquerda V_1 (a) e direita V_2 (b) para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4\text{m/s}$.

O sinal da corrente alternada senoidal no eletroímã do carro pode ser visto na Figura 96(a), bem como as envoltórias superior e inferior, e na Figura 96(b) tem-se o sinal da bobinas exploradora colocada no eletroímã do carro para medir o fluxo magnético ali criado, mostrando também as envoltórias superior e inferior.

Na Figura 97(a) tem-se o sinal de tensão da régua potenciométrica, sendo que esta tem um percurso total de 1,78 m, e o seu condicionador trabalha com uma faixa de +10 a - 10 V; mas como o percurso do transdutor foi limitado a 1,40 m, o sinal da régua potenciométrica fica entre +8 e -8 V. O fator de conversão de Volts para metros é igual a -0,088695 m/V. Assim, tendo os valores de posição e tempo pode-se calcular a velocidade do carro que pode ser vista no gráfico da Figura 97(b) onde observa-se o período de aceleração, velocidade constante, desaceleração e vice versa.

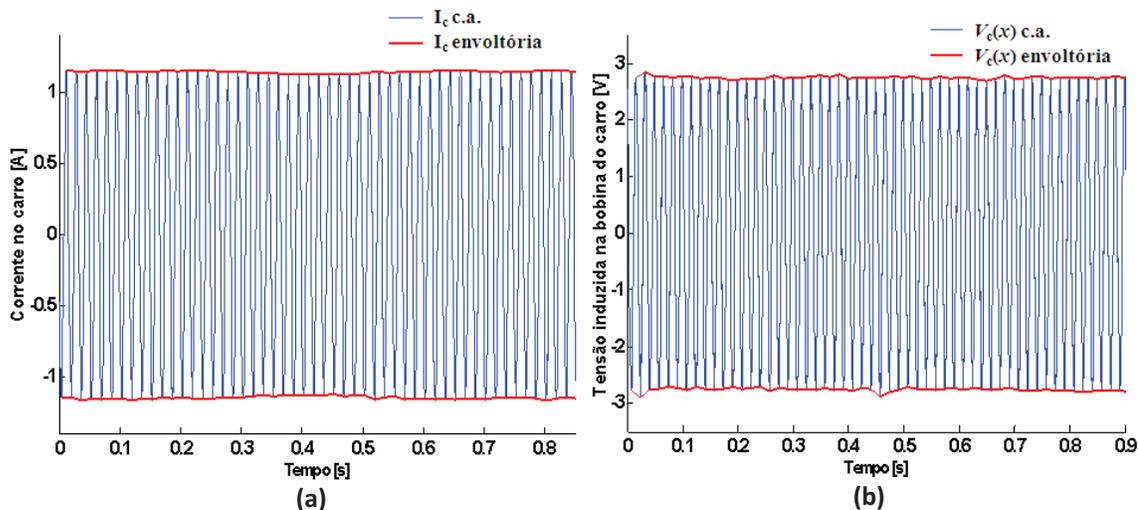


Figura 96 Sinal da corrente no eletroímã (a) e da tensão induzida na bobina exploradora do carro (b) para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4\text{m/s}$.

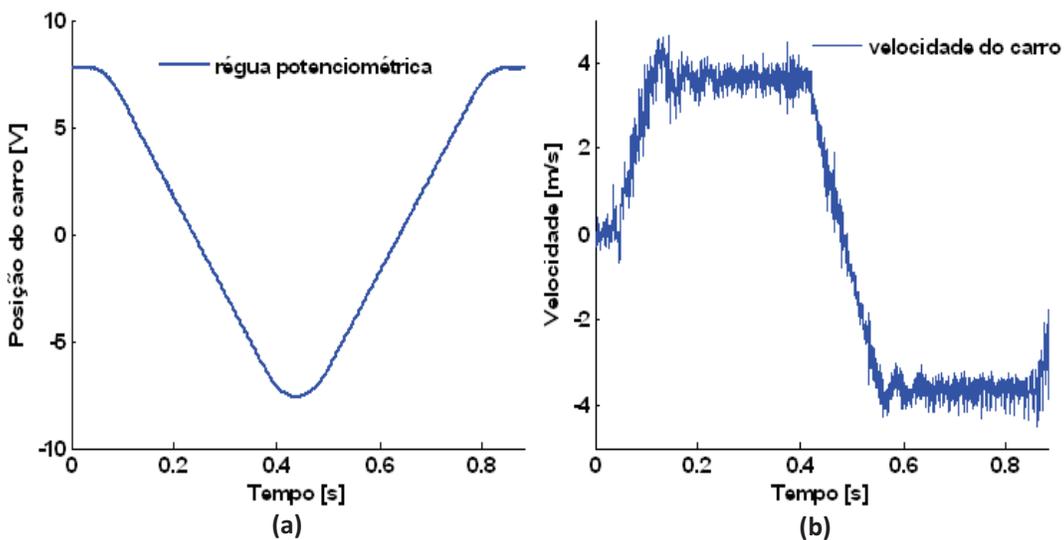


Figura 97 Gráfico da posição (a) e velocidade do carro (b) para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4\text{m/s}$.

Precisa-se, agora, dividir a matriz em duas, a primeira com os dados de subida e a outra com os de descida. Na Figura 98(a) e (b), tem-se os sinais de V_1 e V_2 da tensão induzida nas culatras laterais da ida do carro, ou seja, do primeiro ciclo do movimento do carro, e na Figura 99(a) e (b), os sinais de corrente no eletroímã do carro e do fluxo magnético ali criado. Da mesma forma, nas Figuras 100(a) e (b) e 101(a) e (b) tem-se os mesmos sinais correspondentes à volta do carro, ou seja, do segundo ciclo do movimento.

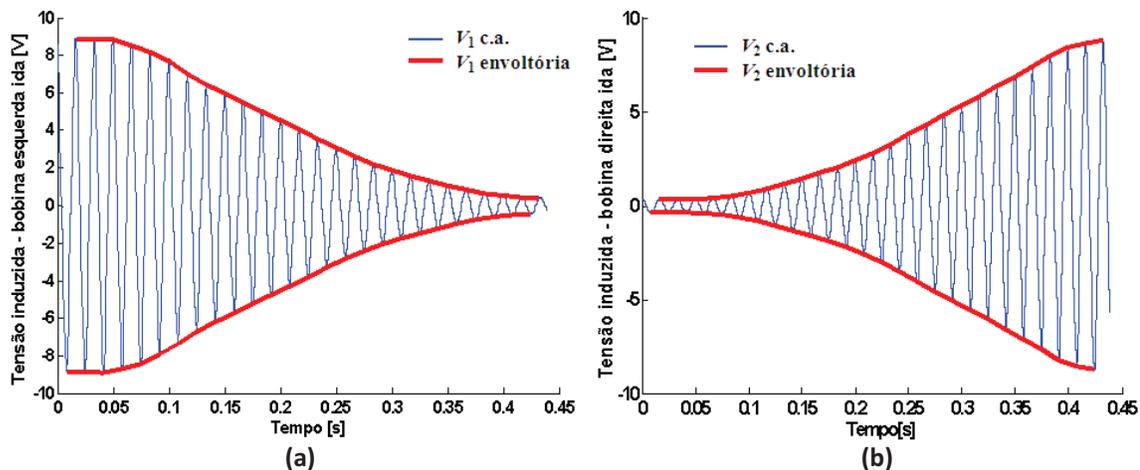


Figura 98 Sinal de tensão de V_1 (a) e V_2 (b) de ida para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4\text{m/s}$.

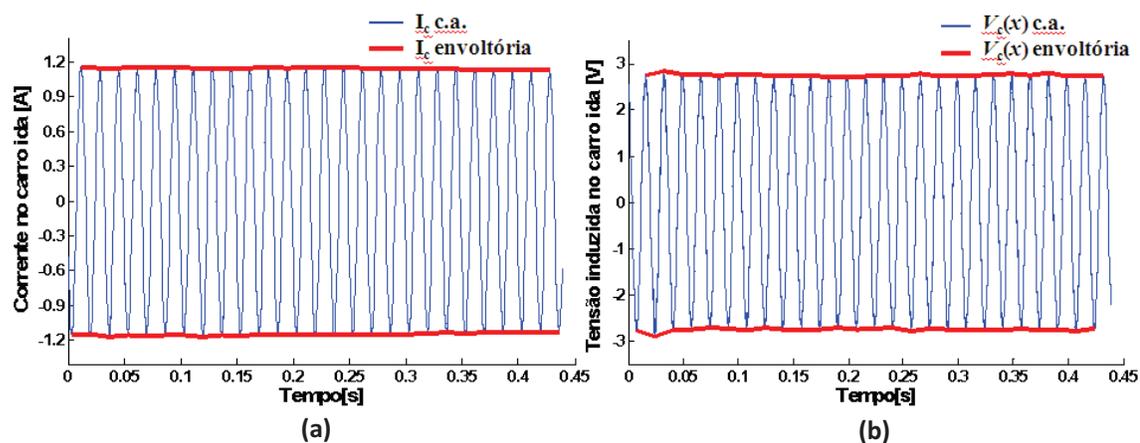


Figura 99 Sinal da corrente no eletroímã do carro (a) e da tensão induzida no carro (b) na ida para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4\text{m/s}$.

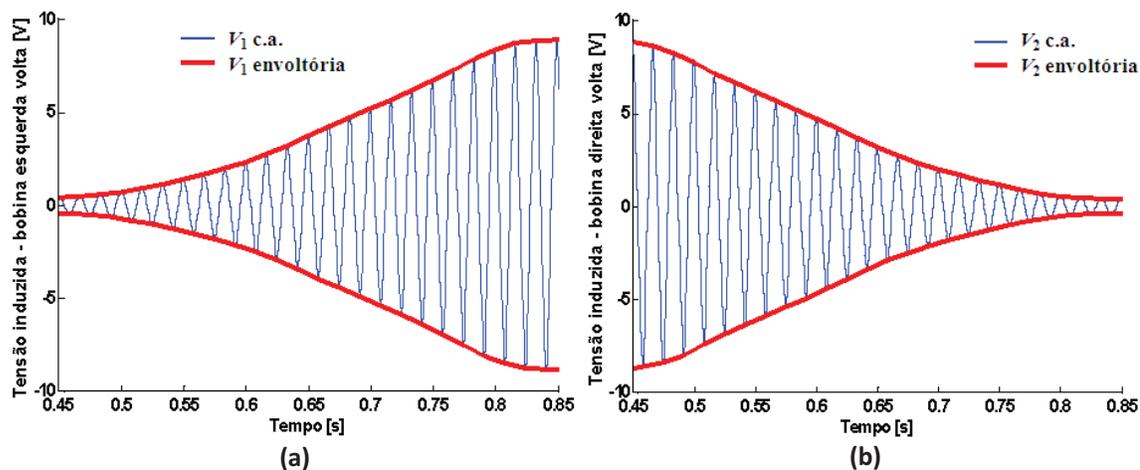


Figura 100 Sinal de tensão de V_1 (a) e V_2 (b) de volta para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4\text{m/s}$.

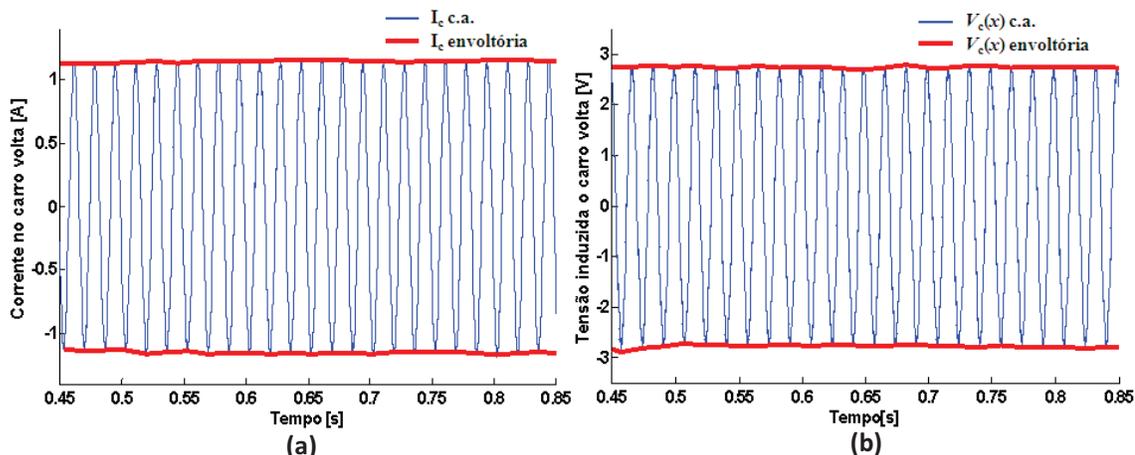


Figura 101 Sinal da corrente no eletroímã do carro (a) e da tensão induzida no carro (b) na voltagem para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4\text{m/s}$.

Para comparar os sinais estáticos com os dinâmicos dos Transdutores I e II, deve-se plotar os sinais em relação à posição do carro. Como a matriz de dados foi dividida em duas, tem-se os valores de posição separados na ida e na volta do carro já convertidos em metros, conforme pode ser visto na Figura 102(a). Assim tendo a relação da posição com o tempo, pode-se plotar os sinais de pico das senóides, ou seja, as envoltórias dos sinais pela posição. Sendo os sinais puramente senoidais basta dividir as envoltórias dos sinais alternados pela raiz quadrada de dois para obter o valor *rms*.

Na Figura 102(b) tem-se então os valores *rms* de $V_1(x)$ e $V_2(x)$ de ida e volta plotados em relação à posição do carro.

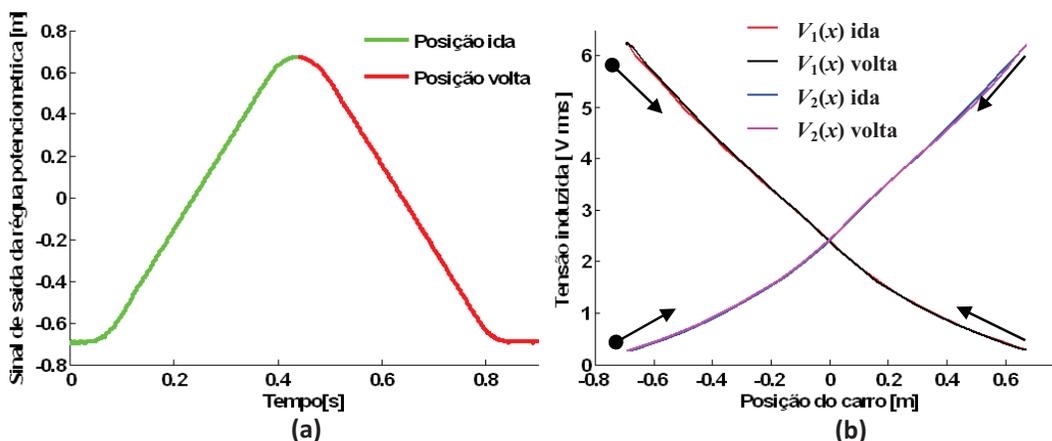


Figura 102 Sinal de tensão da régua potenciométrica (a) e de $V_1(x)$ e $V_2(x)$ (b) com o ciclo de ida e o ciclo de volta para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4\text{m/s}$.

Na Figura 103(a) e (b) tem-se os sinais *rms* de ida e volta da corrente do eletroímã do carro e do fluxo magnético ali criado pela posição do carro.

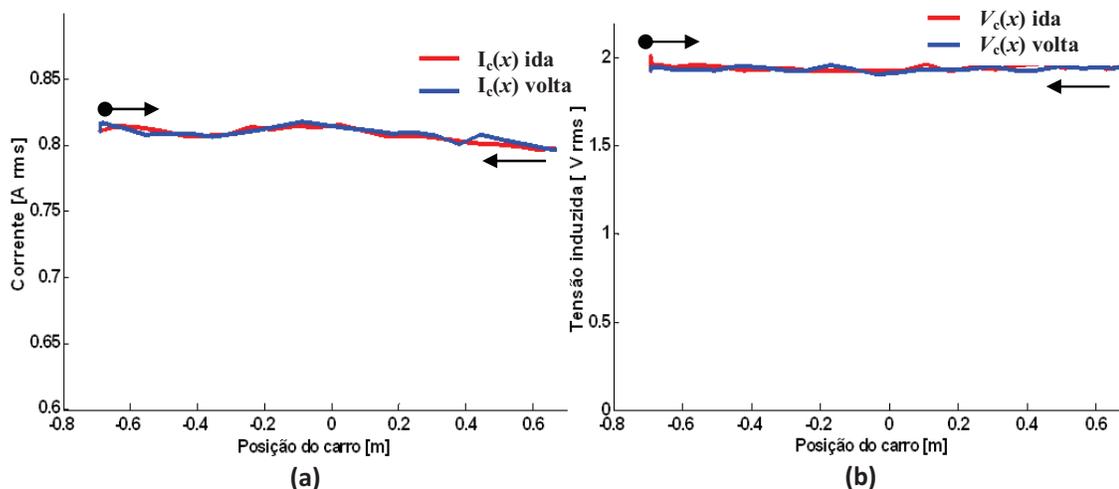


Figura 103 Sinal da corrente no eletroímã do carro (a) e da tensão induzida no carro (b) em valores *rms* de ida e volta para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4\text{m/s}$.

Como o trabalho considera somente os valores dos sinais dos transdutores com velocidade constante, precisa-se excluir das duas matrizes de dados os valores correspondentes ao período de aceleração e desaceleração nos dois ciclos do movimento; assim, em cada uma das duas matrizes, trunca-se os dados entre os valores de posição de $-0,55$ a $+0,55$ m do transdutor e entre estes valores selecciona-se os valores de pico superior das senóides que dão a envoltória superior do sinal alternado, que, dividido por raiz quadrada de dois, dá o valor *rms* dos sinais, Figuras 104 a 109; assim pode-se comparar estas curvas dinâmicas com as curvas estáticas.

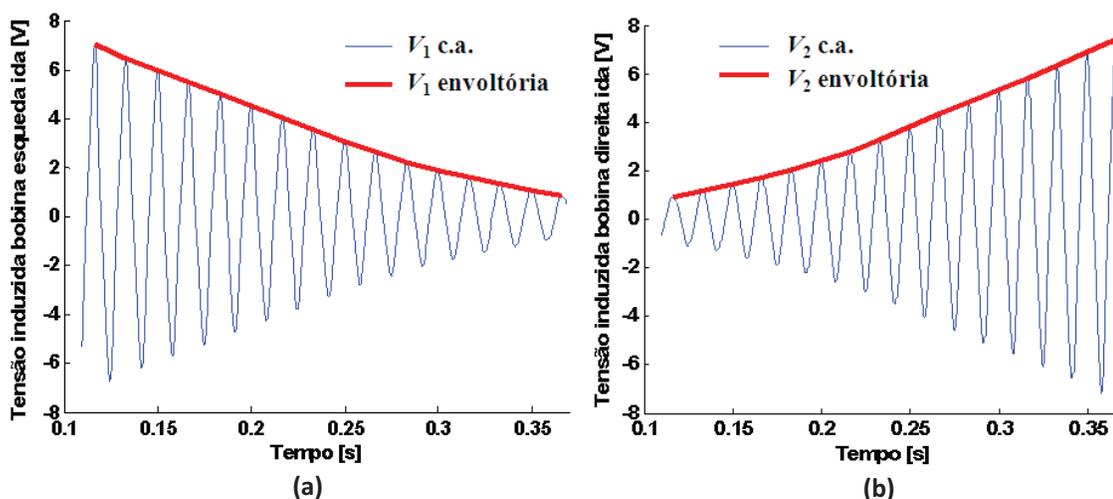


Figura 104 Parcela do sinal de tensão de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4\text{m/s}$ constante.

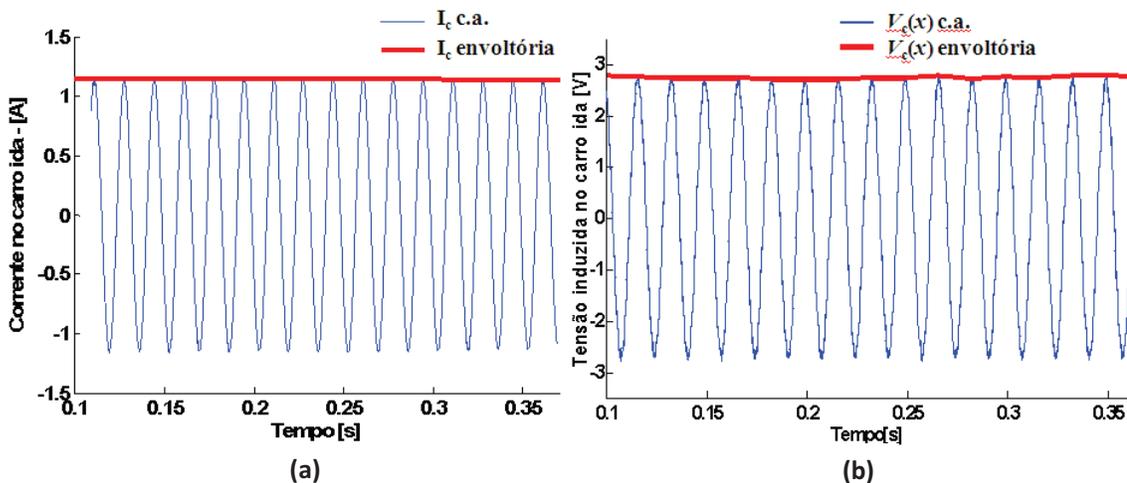


Figura 105 Parcela de corrente (a) e tensão induzida no eletroímã (b) no ciclo de ida para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4\text{m/s}$ constante.

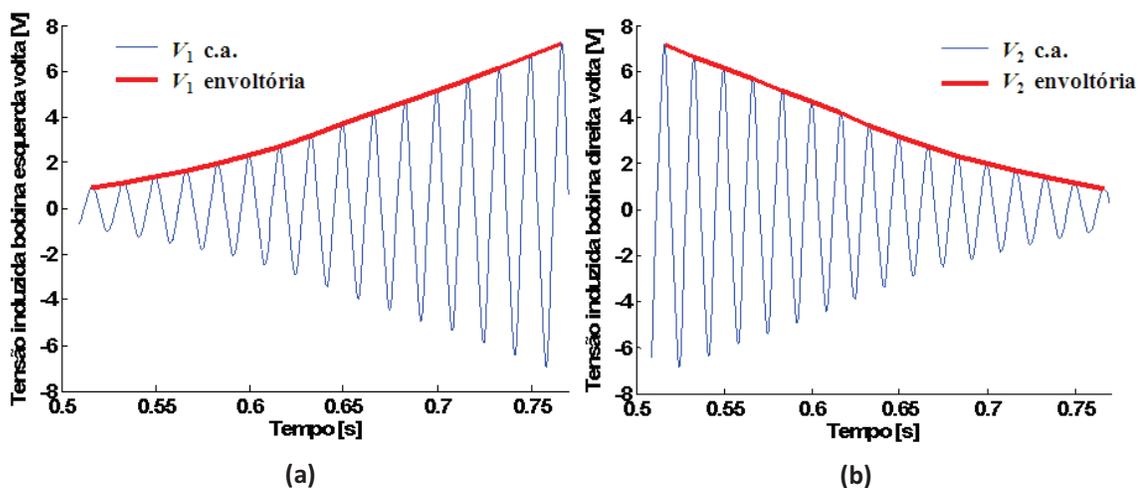


Figura 106 Parcela do sinal de tensão de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4\text{m/s}$ constante.

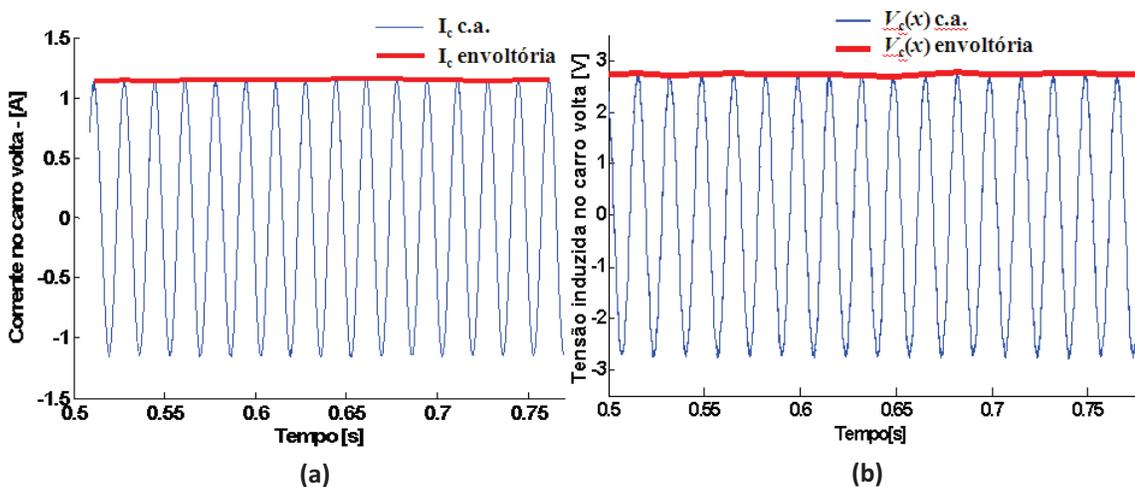


Figura 107 Parcela de corrente (a) e tensão induzida no eletroímã (b) no ciclo de volta para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4\text{m/s}$ constante.

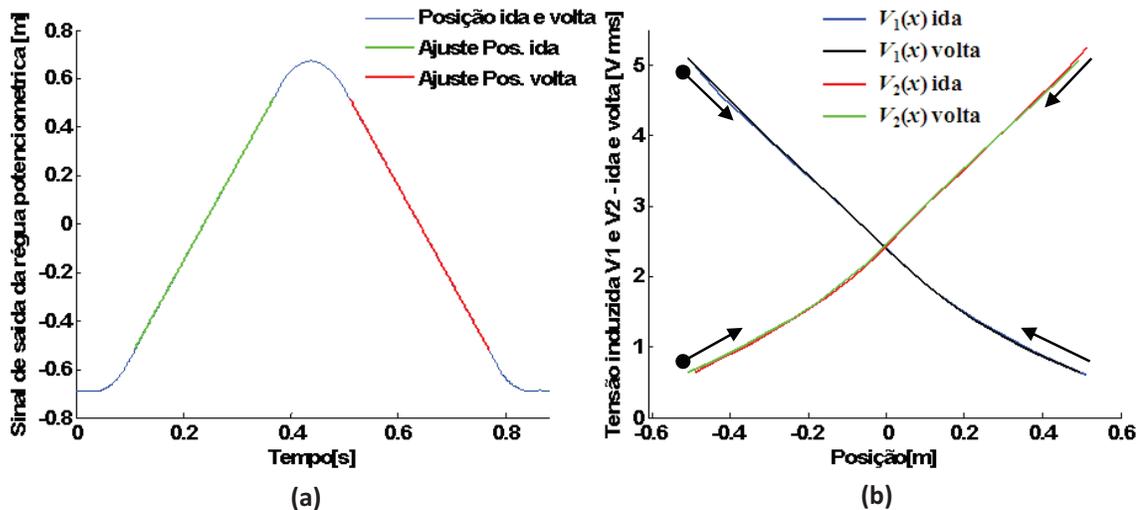


Figura 108 Parcela do sinal de tensão da régua potenciométrica (a) e de $V_1(x)$ e $V_2(x)$ (b) com o ciclo de ida e volta para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4\text{m/s}$ constante.

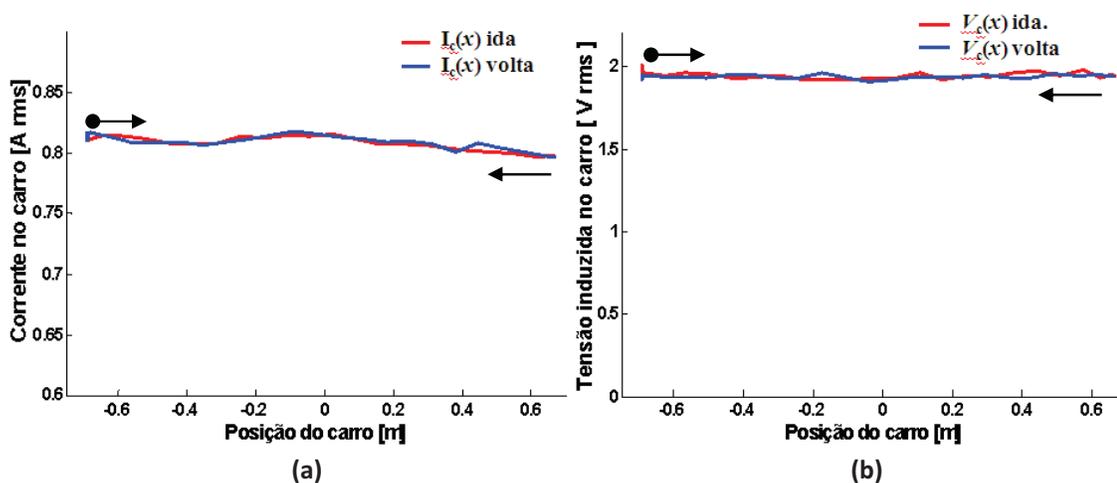


Figura 109 Parcela de corrente $I_c(x)$ (a) e $V_c(x)$ no eletroímã (b) no ciclo de ida e volta para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 4\text{m/s}$ constante.

Este procedimento de análise da matriz de dados é usado para todas as velocidades de deslocamento do carro do transdutor e assim pode-se compará-las.

8.1 COMPARAÇÃO DOS VALORES ESTÁTICOS COM OS VALORES DINÂMICOS LENTOS

As curvas estáticas podem ser comparadas com as curvas de velocidade muito baixas, pois neste caso qualquer efeito da variação do módulo do fluxo magnético devido à velocidade sobre a saída do transdutor é muito pequeno ou desprezível. Nas duas seções seguintes será vista a comparação das curvas estáticas dos dois transdutores com suas curvas dinâmicas de velocidades muito baixas.

8.1.1 Comparação dos valores estáticos com os valores dinâmicos lentos para o Transdutor I.

Pode-se, então, comparar os valores das curvas estáticas com os valores dinâmicos muito lentos, por exemplo, para uma velocidade de 0,2 m/s; e, como a rampa de aceleração e desaceleração do servo conversor é de 30 ms, pode-se considerar que todo o percurso do carro do transdutor está a uma velocidade constante de 0,2 m/s. Assim, pode-se comparar os sinais de tensão das bobinas nas culatras laterais, a corrente e o fluxo magnético no carro para as frequências de 60, 120 e 240 Hz. Não se nota diferenças entre os valores de velocidade entre 0 e 0,3 m/s nas curvas de V_1 e V_2 do transdutor; adota-se, então, um valor intermediário de 0,2 m/s e também porque, para valores muito mais baixos, a matriz de dados ficaria muito grande.

Na Figura 110 vê-se a comparação das tensões induzidas nas bobinas exploradoras para frequência de 60 Hz onde se observa que os valores das curvas dinâmicas lentas são da ordem de 10 % maior do que os valores das curvas estáticas, porém, nas curvas da Figura 111 (a) e (b), a corrente e o fluxo magnético no carro têm uma diferença entre 0 e 2%.

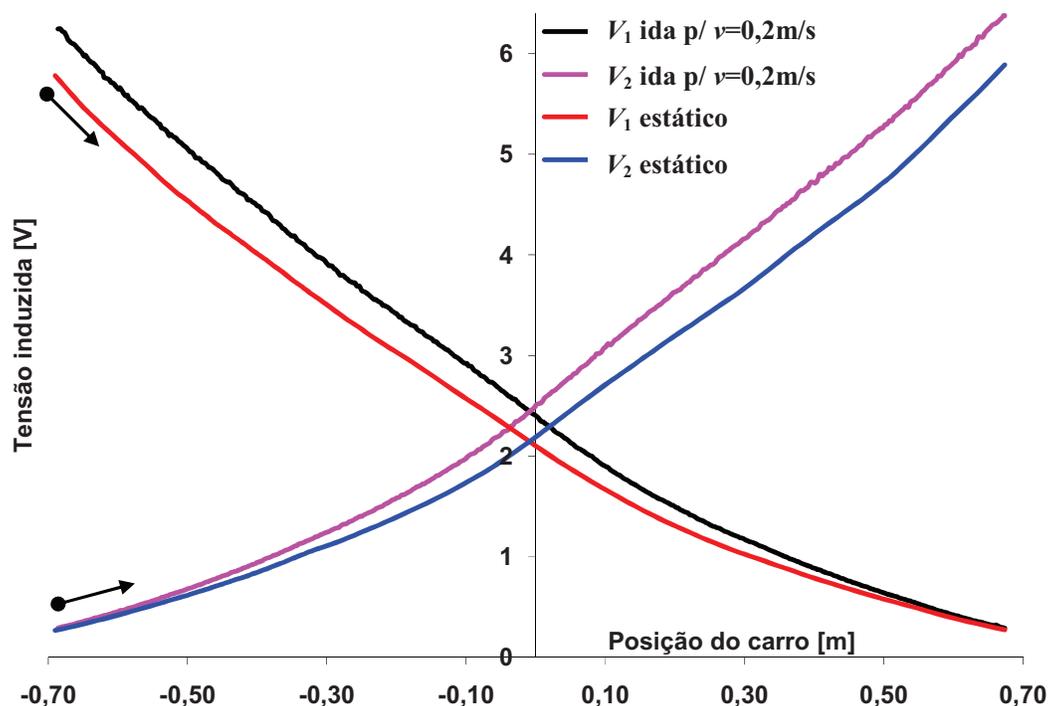


Figura 110 Comparação das tensões estáticas e dinâmica lentas de V_1 e V_2 no ciclo de ida para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2 \text{ m/s}$ constante.

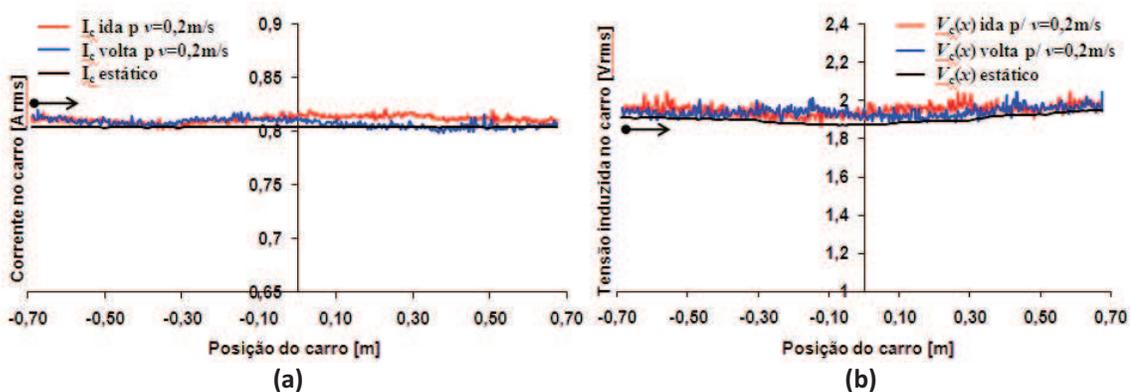


Figura 111 Comparação da corrente (a) e V_c (b) estático e dinâmico lento no carro para o ciclo de ida e volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2m/s$ constante.

Na Figura 112, comparam-se os valores para a frequência de 120 Hz de V_1 e V_2 e a diferença entre os valores das curvas é da ordem de 7%, porém, nas curvas da Figura 113 (a) e (b), o valor da corrente e o fluxo magnético no carro têm uma diferença entre 0 e 1,5% e 0 e 3% respectivamente.

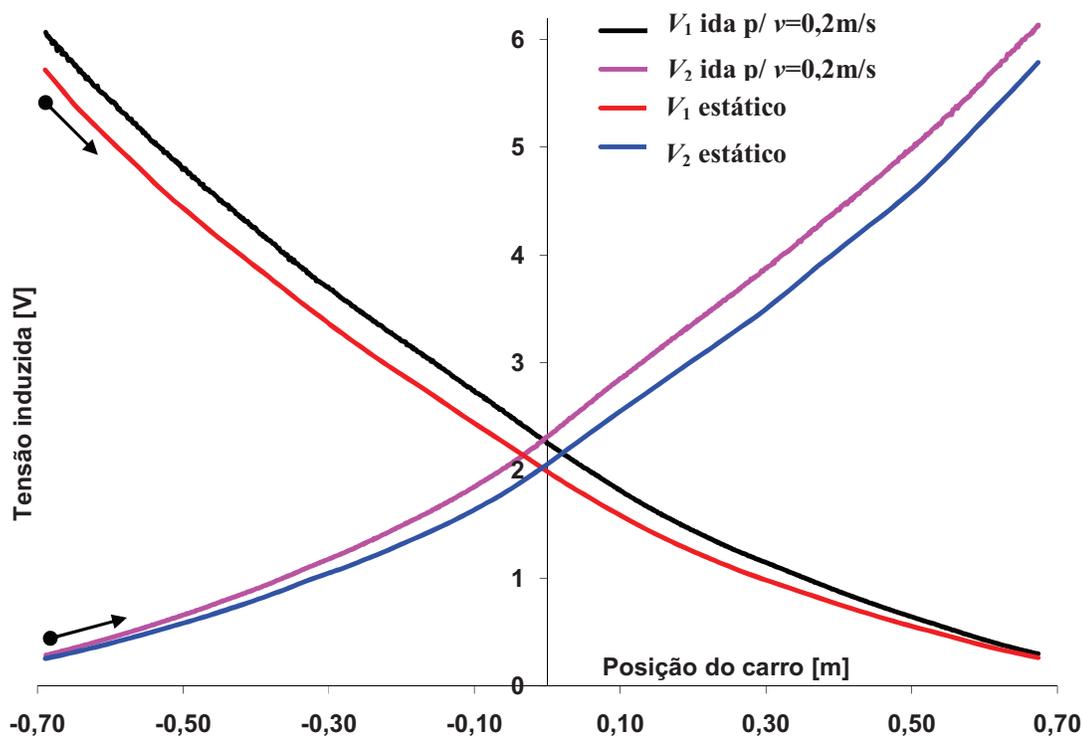


Figura 112 Comparação das tensões estáticas e dinâmica lentas de V_1 e V_2 no ciclo de ida para frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2m/s$ constante.

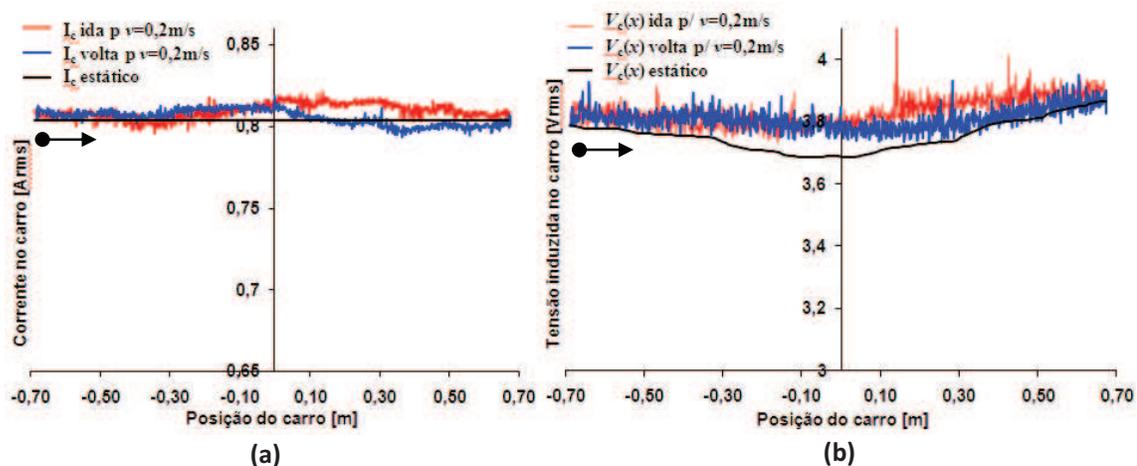


Figura 113 Comparação da corrente (a) e V_c (b) estático e dinâmico lento no carro para o ciclo de ida e volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2\text{m/s}$ constante.

Na Figura 114, comparam-se os valores para a frequência de 240 Hz de V_1 e V_2 e a diferença entre as curvas é da ordem de 7%, porém, nas curvas da Figura 115 (a) e (b), a corrente e o fluxo magnético no carro têm uma diferença entre 0 e 3% e 0 e 5% respectivamente.

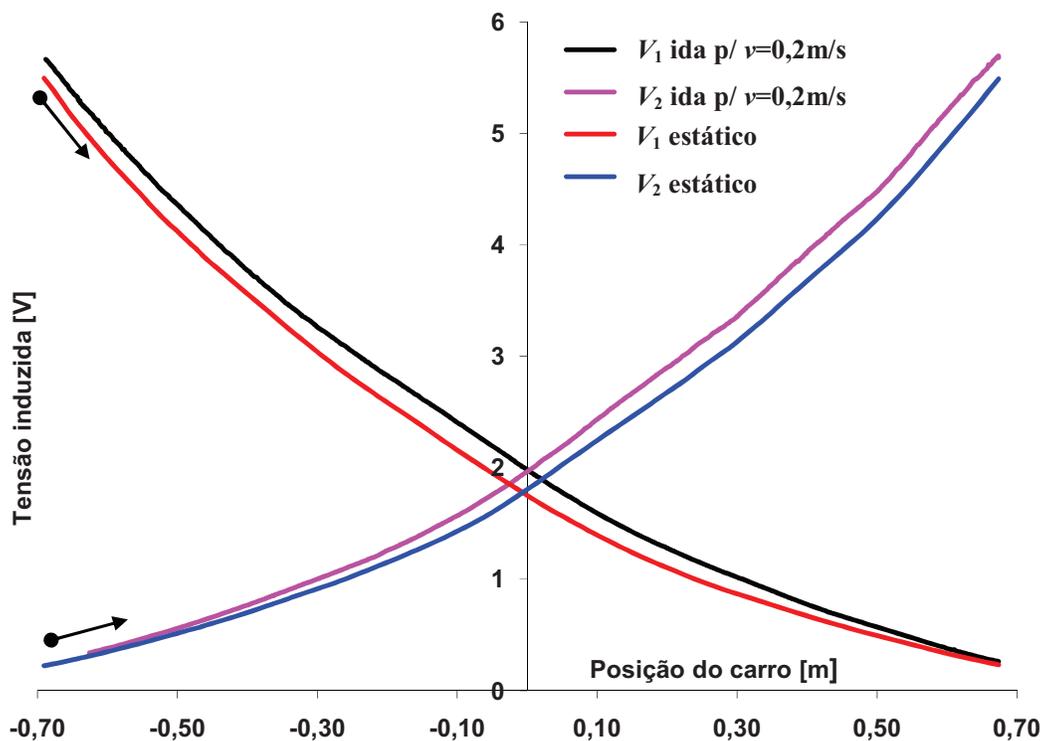


Figura 114 Comparação das tensões estáticas e dinâmica lentas de V_1 e V_2 no ciclo de ida para frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2\text{m/s}$ constante.

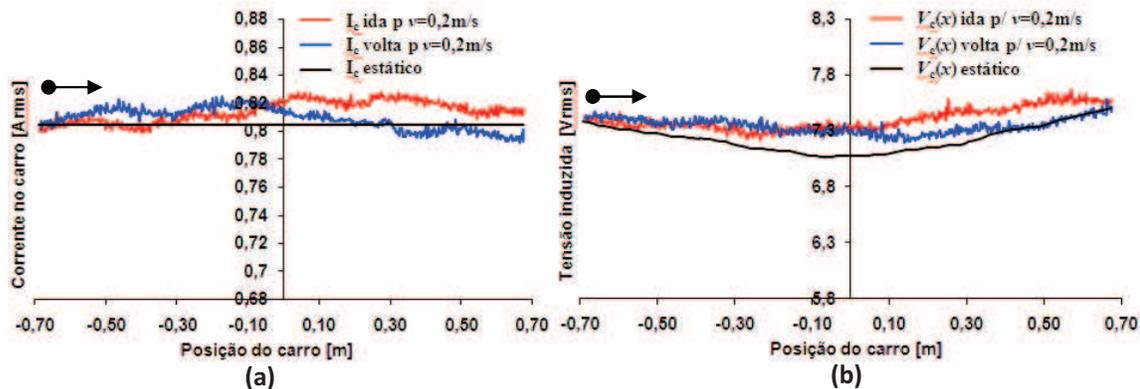


Figura 115 Comparação da corrente (a) e V_c (b) estático e dinâmico lento no carro para o ciclo de ida e volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2m/s$ constante.

8.1.2 Comparação dos valores estáticos com os valores dinâmicos lentos para o Transdutor II.

Da mesma forma comparam-se os valores das curvas estáticas com os valores dinâmicos muito lentos para uma velocidade de 0,2 m/s com a rampa de aceleração e desaceleração do servo conversor de 30 ms considerando todo o percurso do carro do Transdutor II com velocidade constante de 0,2 m/s e comparar os sinais de tensão das bobinas nas culatras laterais, a corrente e o fluxo magnético no carro, para as frequências de 60, 120 e 240 Hz.

Na Figura 116 vê-se a comparação das tensões induzidas nas bobinas exploradoras para frequência de 60 Hz onde se observa que as curvas dinâmicas lentas são da ordem de 8% maior do que as estáticas, porém, nas curvas da Figura 117 (a) e (b), a corrente e o fluxo magnético no carro têm uma diferença entre 0 e 3,8% e 0 e 6% respectivamente.

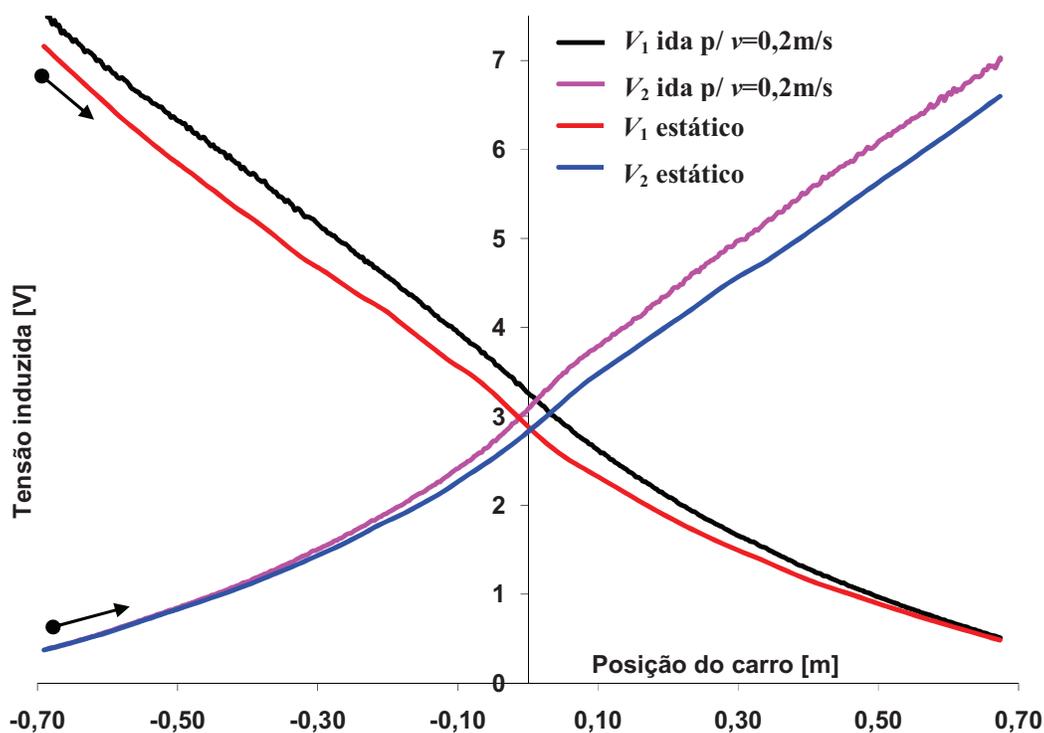


Figura 116 Comparação das tensões estáticas e dinâmicas lentas de V_1 e V_2 no ciclo de ida para frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2\text{m/s}$ constante.

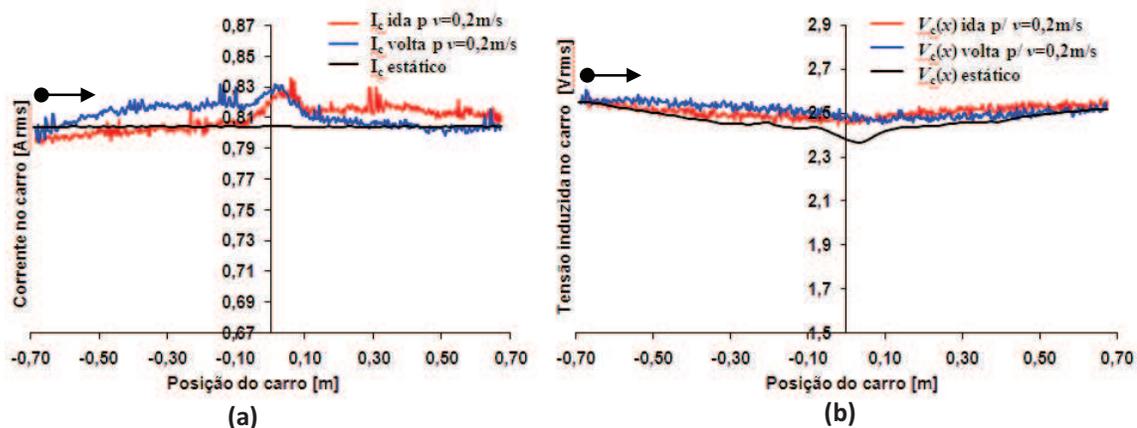


Figura 117 Comparação da corrente (a) e V_c (b) estático e dinâmico lento no carro para o ciclo de ida e volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2\text{m/s}$ constante.

Na Figura 118 tem-se a comparação dos valores para a frequência de 120 Hz de V_1 e V_2 , e a diferença entre as curvas é da ordem de 7%, porém, nas curvas da Figura 119 (a) e (b), a corrente e o fluxo magnético no carro têm uma diferença entre 0 e 4,5 % e 0 e 6% respectivamente.

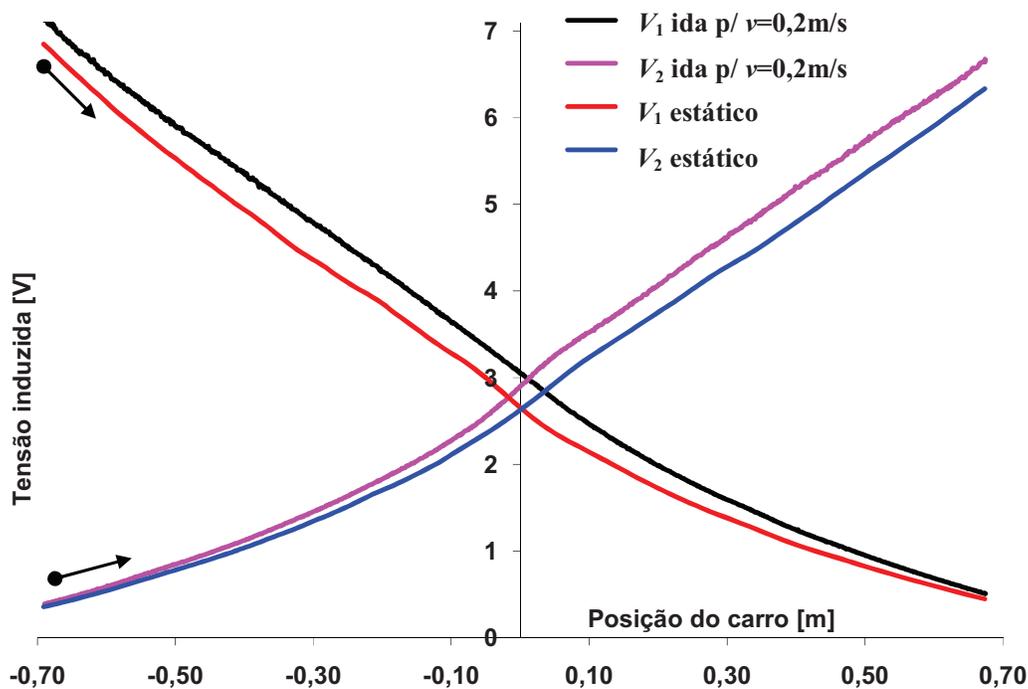


Figura 118 Comparação das tensões estáticas e dinâmicas lentas de V_1 e V_2 no ciclo de ida para frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2\text{m/s}$ constante.

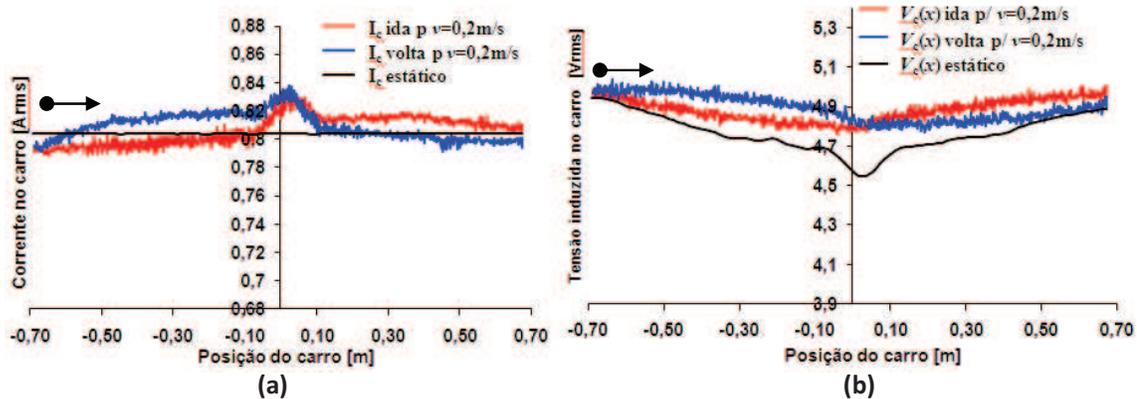


Figura 119 Comparação da corrente (a) e V_c (b) estático e dinâmico lento no carro para o ciclo de ida e volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2\text{m/s}$ constante.

Na Figura 120 tem-se a comparação dos valores para a frequência de 240 Hz de V_1 e V_2 , e a diferença entre as curvas é da ordem de 7%, porém, nas curvas da Figura 121, a corrente no carro tem uma diferença entre 0 e 4,8%. Para este caso não foi possível medir o fluxo magnético, pois devido à frequência ser 240 Hz, a tensão induzida na bobina exploradora foi maior do que 10V pico a pico saturando a entrada do DAQ.

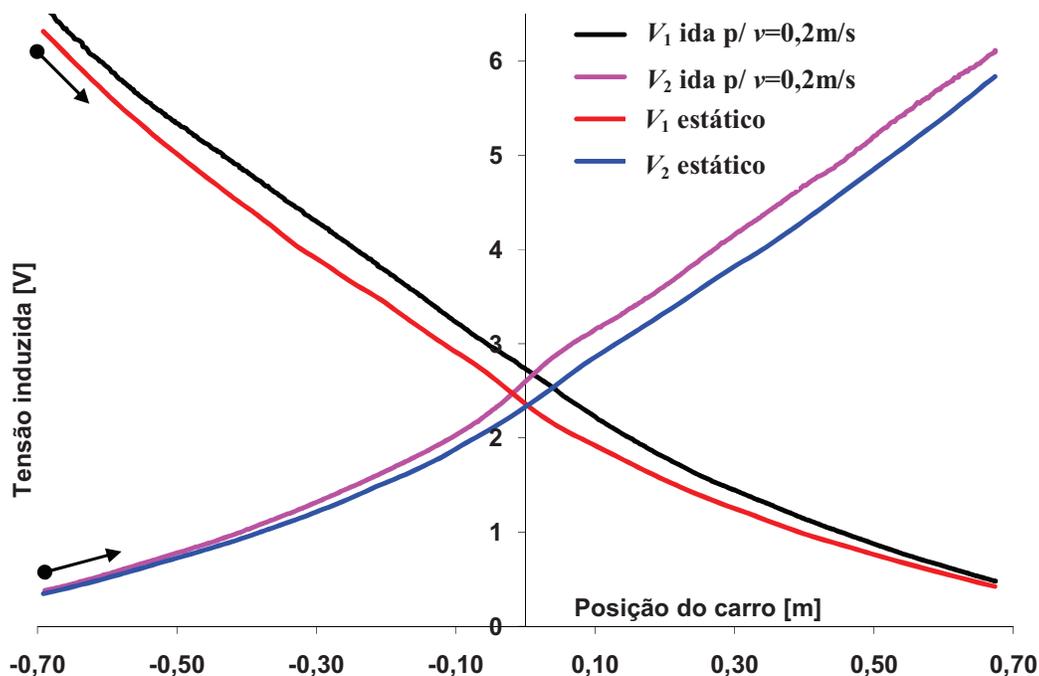


Figura 120 Comparação das tensões estáticas e dinâmica lentas de V_1 e V_2 no ciclo de ida para frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2\text{m/s}$ constante.

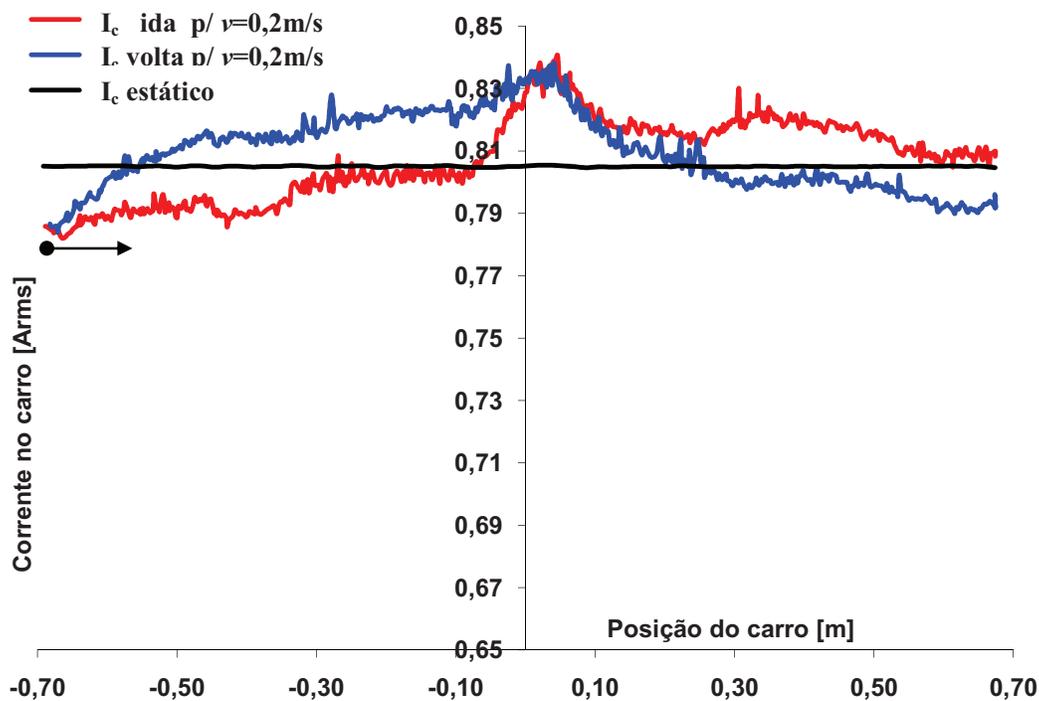


Figura 121 Comparação da corrente estática e dinâmica lenta no carro para o ciclo de ida e volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda com $v = 0,2\text{m/s}$ constante.

Analisando os gráficos das Figuras 110 a 121, vê-se que existe uma diferença no fluxo disperso quando o carro está em movimento, mesmo que muito lento, e quando ele está parado. Esta diferença é da ordem de 7 a 10% para os dois transdutores e nas três frequências estudadas, porém não há mudança significativa na força magneto-motriz e no fluxo magnético criado pelo eletroímã do carro. Isto mostra que há uma diferença entre o fluxo magnético nas culatras quando o carro está efetivamente parado e quando ele está em movimento mesmo que muito lento. Com isto não se pode comparar as curvas estáticas com as dinâmicas para observar o efeito da velocidade no sinal. Para efeitos de comparação vai ter que se usar a curva dinâmica muito lenta de 0,2 m/s como nossa curva estática e assim compará-la com as obtidas para velocidades de 1 a 5 m/s. Esta relação será então a diferença dinâmica.

8.2 COMPARAÇÃO DOS VALORES ESTÁTICOS COM OS VALORES DINÂMICOS.

Conforme descrito acima, vai-se considerar como curva estática de V_1 e V_2 para efeito de comparação a curva obtida para velocidade de 0,2 m/s e comparar esta com as obtidas para velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s. A matriz de dados obtida para estas velocidades recebe o tratamento descrito anteriormente onde se elimina os dados dos períodos de aceleração e de desaceleração, truncando a matriz entre os valores de posição de -0,55 e +0,55 m. A experiência consiste então em obter as curvas de V_1 e V_2 com o carro partindo de esquerda e depois partindo da direita e em ambos os casos com o ciclo de ida e volta para as velocidades de 0,2, 1, 2, 3, 4 e 5 m/s nas frequências de 60, 120 e 240 Hz. Em cada gráfico, uma seta indica o sentido do movimento; a seta com uma bola no seu início indica o ciclo de ida e a seta sem bola, o ciclo da volta.

8.2.1 Comparação dos valores estáticos com os valores dinâmicos do Transdutor I.

Para realização da experiência são plotadas 10 curvas da tensão induzida *rms* de V_1 e V_2 para cada velocidade, assim, por exemplo, na Figura 122 (a), para cada velocidade na frequência de 60 Hz estão plotadas 10 curvas, é feito um “Basic Fitting” de quinta ordem usando o programa MatLab para cada uma das 120 curvas do gráfico, e com as equações obtidas é feita uma curva média para cada velocidade e estas são plotadas na Figura 122 (b). Deste modo as curvas para cada velocidade em V_1 e V_2 na Figura 122 (a) representam a dispersão dos pontos medidos para cada velocidade. Este mesmo procedimento é adotado para as outras frequências com o carro partindo da esquerda para direita e vice-versa, tanto no Transdutor I como no Transdutor II. No Apêndice B nas Figuras 264 e 265 têm-se um exemplo ampliado das curvas de V_1 e V_2 e os desvios padrões dos piores casos de V_1 e V_2 para cada frequência com o carro partindo da esquerda e da direita.

Os gráficos das Figuras 122 a 145 estão dispostos de forma que se possa comparar melhor as tensões induzidas de V_1 e V_2 e suas diferenças dinâmicas com a direção do movimento; assim nos gráficos das Figuras 122 até a 127 o carro está se movendo da esquerda para direita para as frequências de 60, 120 e 240 Hz. Nas três primeiras, o carro parte da esquerda, ciclo de ida, e para as outras três o carro parte da direita, porém estão no ciclo da volta. Na legenda (a) são plotados todas as curvas medidas e em (b) suas médias. Os gráficos das diferenças dinâmicas estão nas Figuras 128 até 133, estando estes na mesma ordem dos gráficos das tensões induzidas acima mencionadas, só que na legenda (a) estão plotadas as diferenças dinâmicas de V_1 , no qual o fluxo magnético está diminuindo, e em (b) estão plotadas as diferenças dinâmicas de V_2 , no qual o fluxo magnético está aumentando.

Pode-se notar nos gráficos das tensões induzidas que, apesar do sentido do movimento ser o mesmo, há uma diferença entre eles quando o carro parte da esquerda ou da direita. Com o carro partindo da esquerda, as curvas de V_1 e V_2 tendem a ficar sobrepostas para todas as velocidades medidas nas frequências de 60 e 120 Hz. Entretanto, na frequência de 240 Hz as curvas para as velocidades de 0,2 e 1 m/s têm valores menores que as outras, tanto para V_1 quanto para V_2 . Quando o carro parte da direita, no ciclo da volta, as curvas da tensão induzida em V_1 tendem a ficar sobrepostas para todas as velocidades nas três frequências em todo o percurso, porém para V_2 as curvas das velocidades tendem a ser mais separadas nas três frequências.

A diferença dinâmica para as cinco velocidades medidas é, então, em relação à velocidade de 0,2 m/s, considerada como estática. Estas curvas estão plotadas nas Figuras 128 até 133, onde se pode ver que em V_1 , quando o fluxo magnético está diminuindo com a direção do movimento, como visto na Figura 125 e 128(a), a diferença tende a partir de valores pequenos, passando a aumentar com uma rampa mais inclinada até a metade do percurso, onde atinge um máximo. Logo após, tendem a zero ou a valores negativos muito rapidamente, para as três frequências, sendo que as curvas das diferenças dinâmicas são muito próximas umas das outras.

A diferença dinâmica para V_2 , quando o fluxo magnético está aumentando com a direção do movimento, apresenta uma diferença mais significativa em relação ao ponto de partida do carro, quando o carro parte da esquerda, Figuras 128(b); 129(b) e 130(b). Esta diferença parte de valores pequenos, oscilando em torno de um valor, geralmente com um máximo no meio do percurso, e as curvas são mais distintas entre si, aumentando com a velocidade. Quando o carro parte da direita, porém no ciclo da volta, Figuras 131(b); 132(b) e

133(b), a diferença parte de valores bem maiores e vai diminuindo em uma rampa suave. As curvas são bem mais espaçadas entre si com o aumento da velocidade.

A diferença em V_1 e V_2 para o primeiro caso tem a mesma ordem de grandeza e para o segundo caso a ordem de grandeza da diferença em V_2 é o dobro do que em V_1 , nas três frequências.

Nos gráfico das Figuras 134 até 139 têm-se as curvas das tensões induzidas em V_1 e V_2 , todavia a direção do movimento é da direita para esquerda. Nos três primeiros gráficos, o carro parte de direita, ciclo de ida, e nos outros três o carro parte de esquerda, sendo este o ciclo da volta.

Nota-se a partir destes gráficos que se tem um padrão de comportamento para a diferença dinâmica. Se comparar estes gráficos com o do sentido contrário vê-se que o comportamento de V_2 , quando o carro se desloca para direita, é igual ao comportamento de V_1 , quando o carro se desloca para esquerda, e vice-versa para a outra tensão.

Os gráficos das diferenças dinâmicas de V_1 e V_2 , Figuras 140 a 145, têm, então, um comportamento invertido em relação ao primeiro caso, ou seja, tem-se um padrão de comportamento da diferença em relação ao sentido de movimento se o fluxo magnético está diminuindo ou aumentando, também se neste sentido do movimento o carro partiu do repouso ou não.

Nos gráficos das correntes no eletroímã do carro, Figuras 146 até 151, têm-se o comportamento destas em relação ao sentido de movimento e ao tipo de partida do carro, onde também se pode sugerir um padrão de comportamento.

Para os gráficos da corrente, quando o carro parte da esquerda, tanto no ciclo de ida quanto no de volta, as curvas das correntes de todas as velocidades estão sobrepostas, principalmente para as frequências de 60 e 120 Hz, Figuras 146 e 147. Para a frequência de 240 Hz vê-se uma alteração para a velocidade de 0,2 m/s que é cerca de 3% menor que as outras, e uma variação um pouco menor para velocidade de 1 m/s, tanto no ciclo de ida como no de volta, Figura 148. Quando o carro parte da direita, no início do ciclo de ida as correntes partem de um mesmo valor nas três frequências, mas ao final do ciclo as curvas para as velocidades de 0,2 e 1 m/s são menores que as outras, chegando a ser 3% menor na frequência de 240 Hz. No ciclo da volta, as curvas das correntes para as velocidades de 2 a 5 m/s ficam em uma mesma faixa de valores de corrente, no entanto as curvas das correntes para as velocidades de 0,2 e 1 m/s ficam em uma faixa um pouco menor que as outras ao longo de todo o percurso, chegando a 3% para a velocidade de 0,2 m/s na frequência de 240Hz, Figuras 149 a 151.

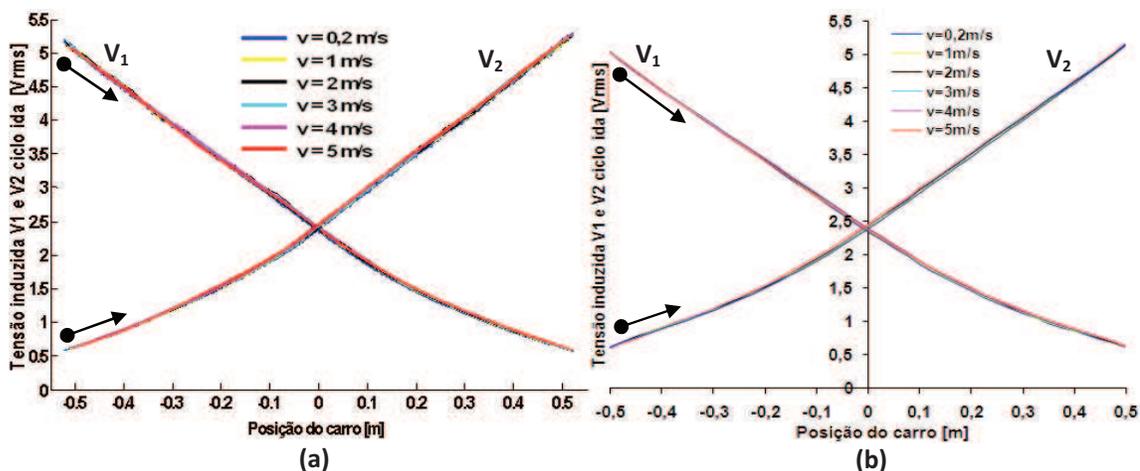


Figura 122 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

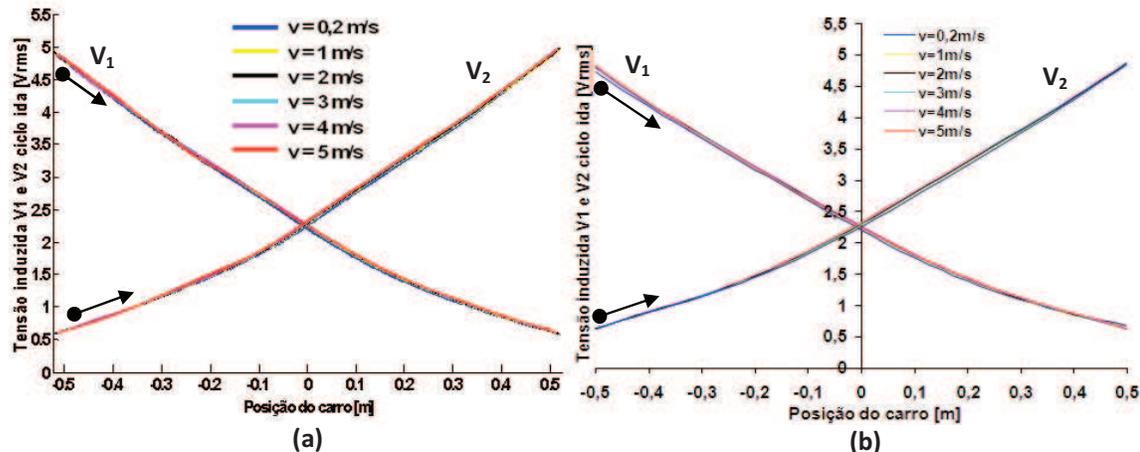


Figura 123 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

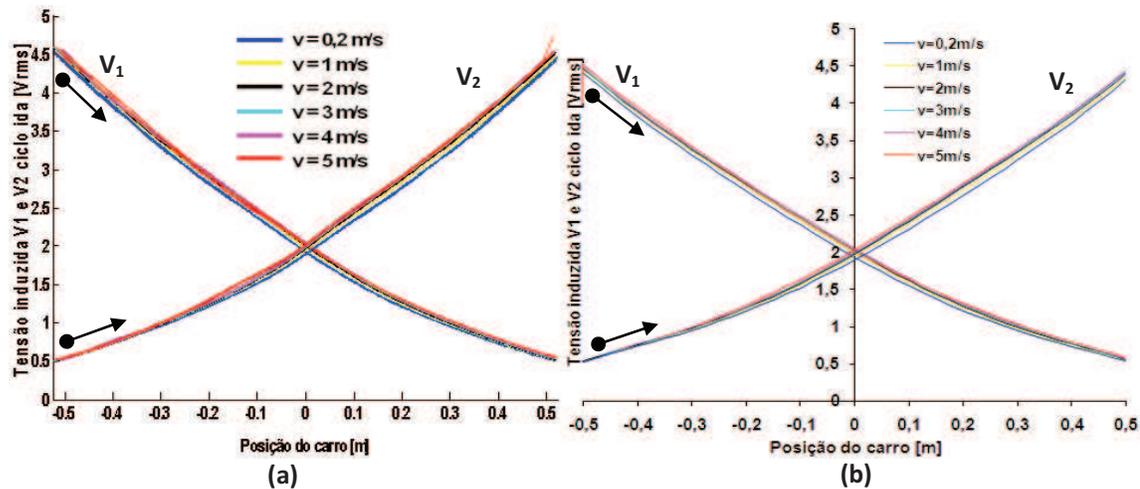


Figura 124 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

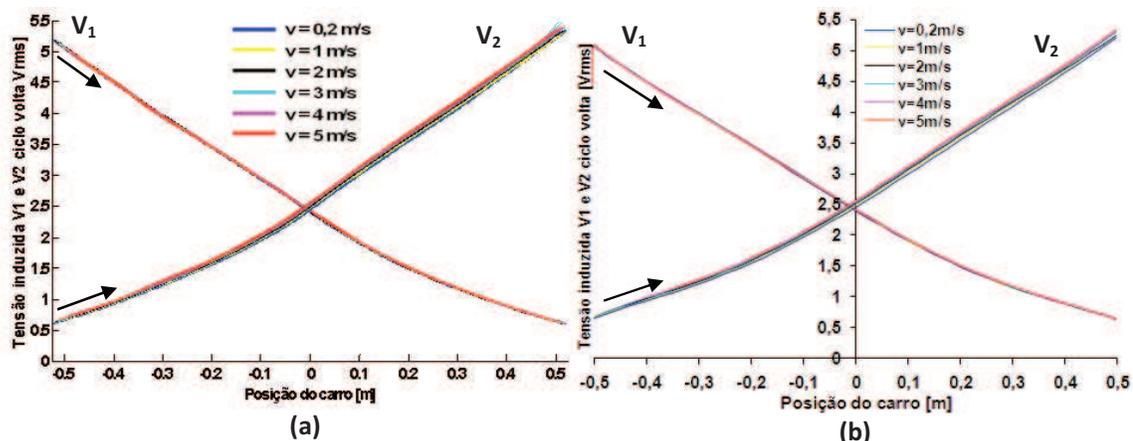


Figura 125 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

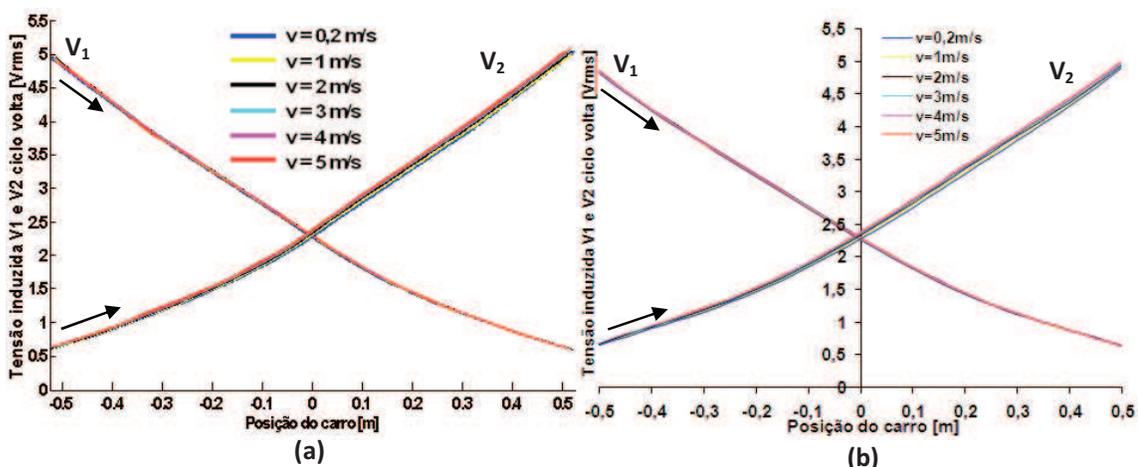


Figura 126 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

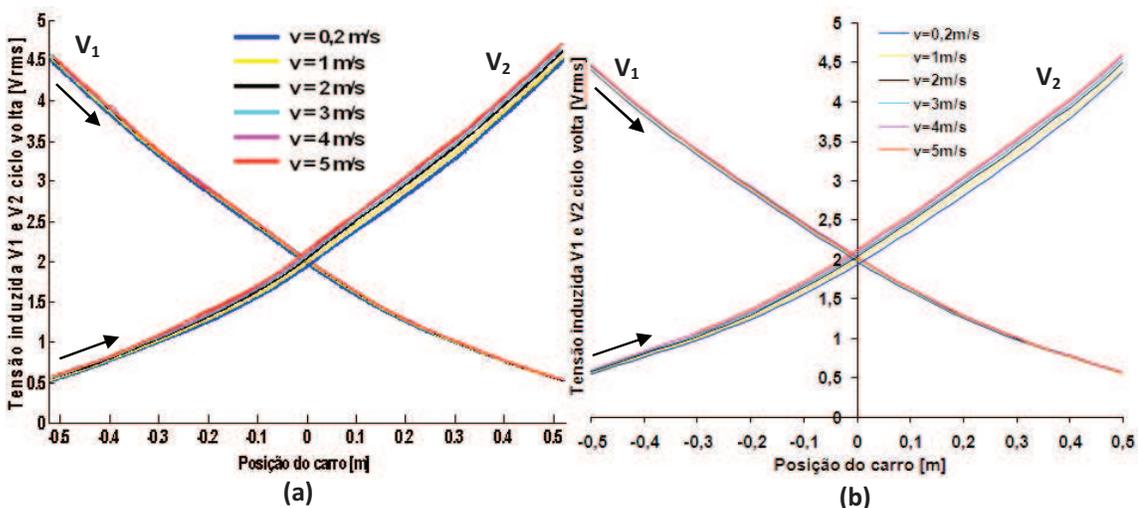


Figura 127 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

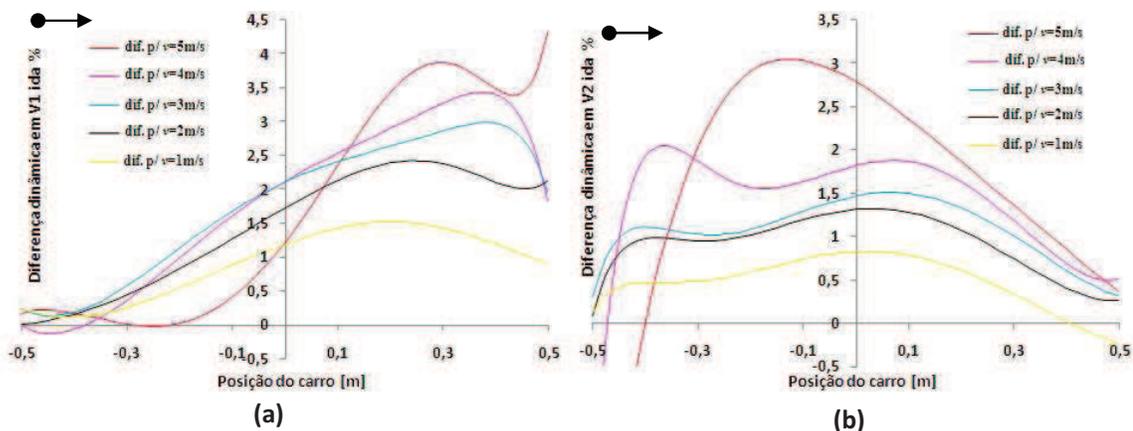


Figura 128 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.

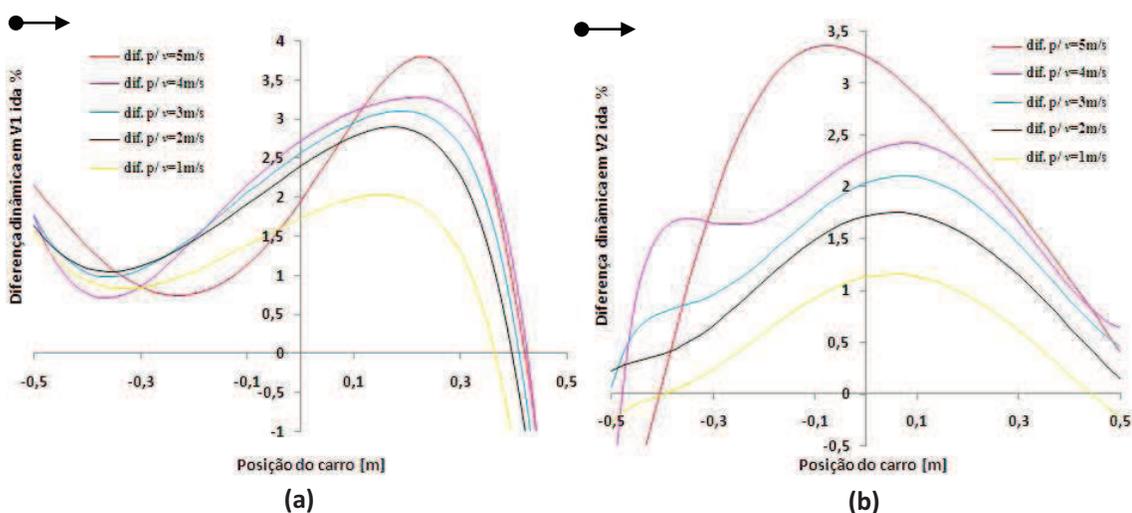


Figura 129 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.

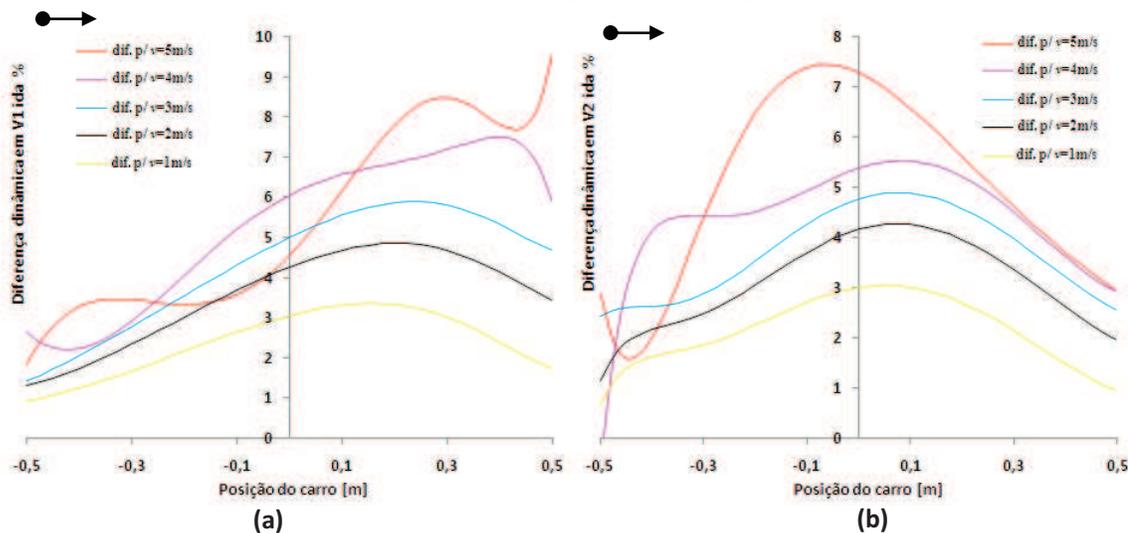


Figura 130 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda.

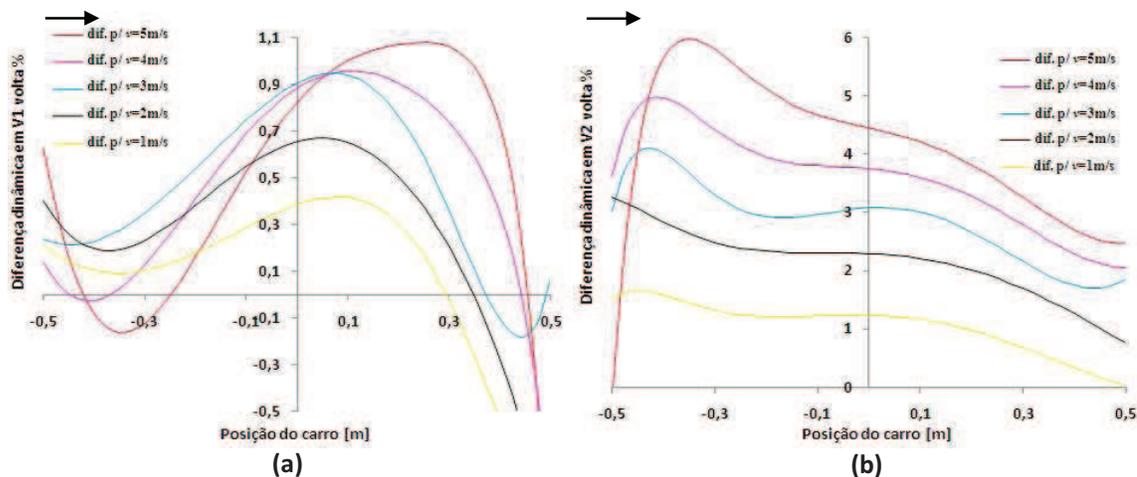


Figura 131 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.

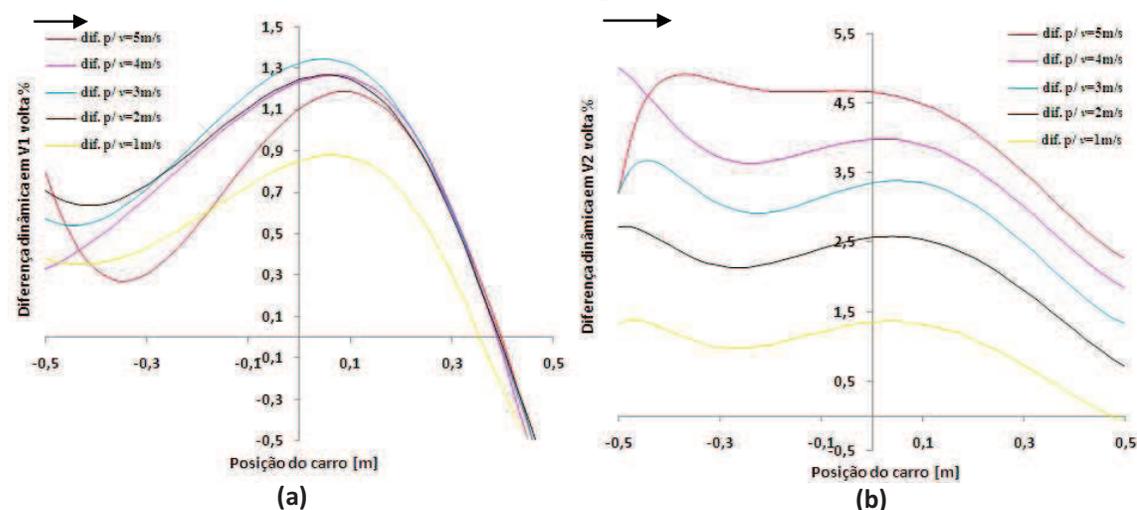


Figura 132 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita.

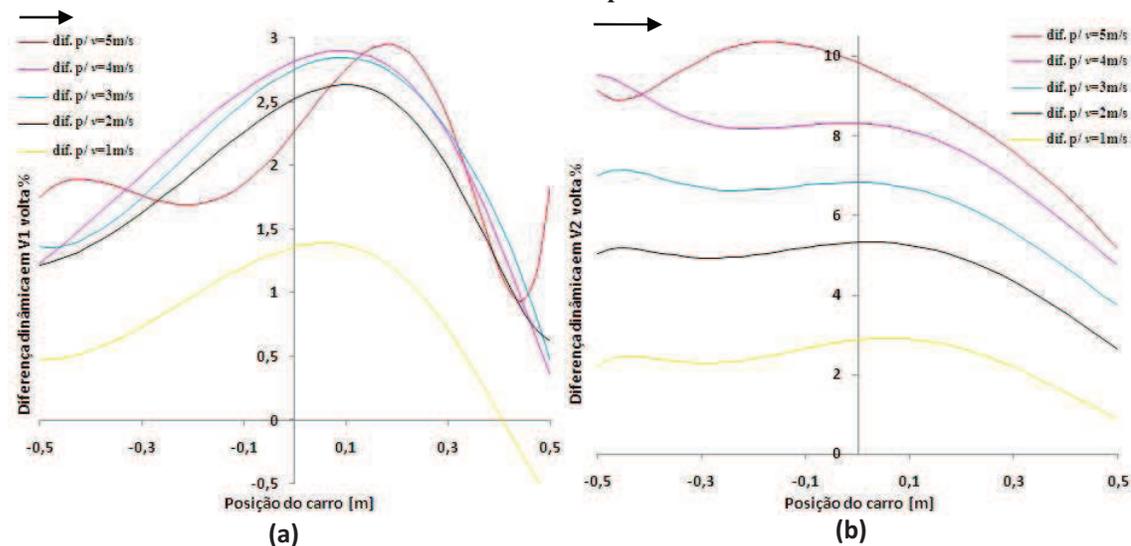


Figura 133 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita.

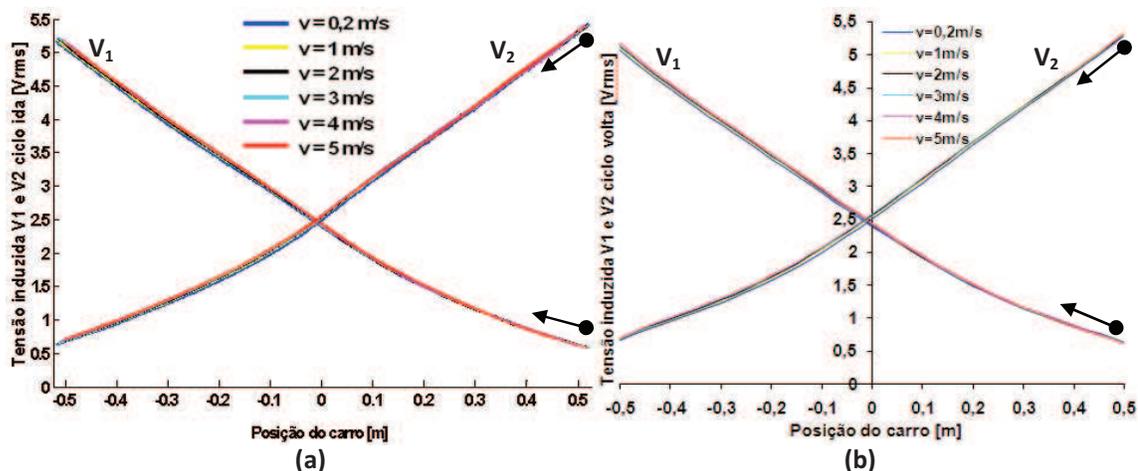


Figura 134 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

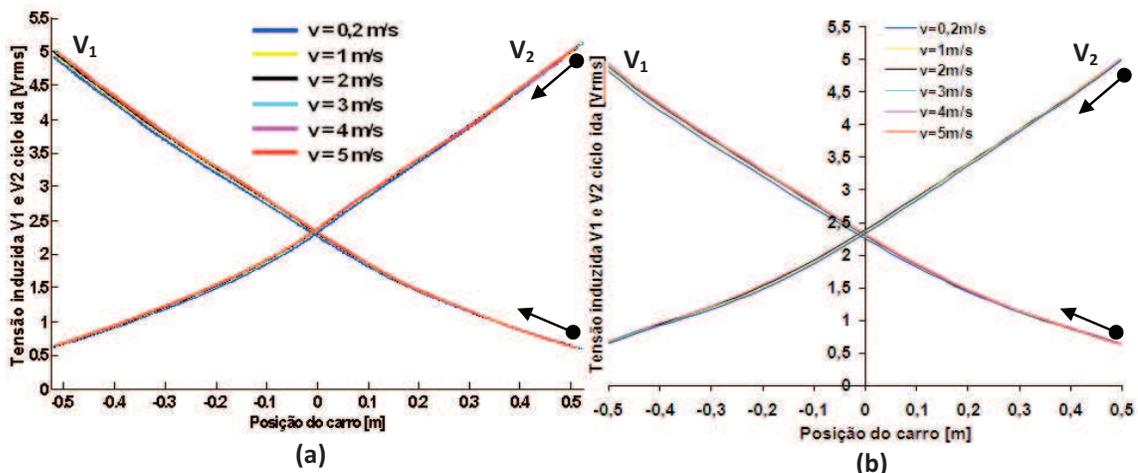


Figura 135 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

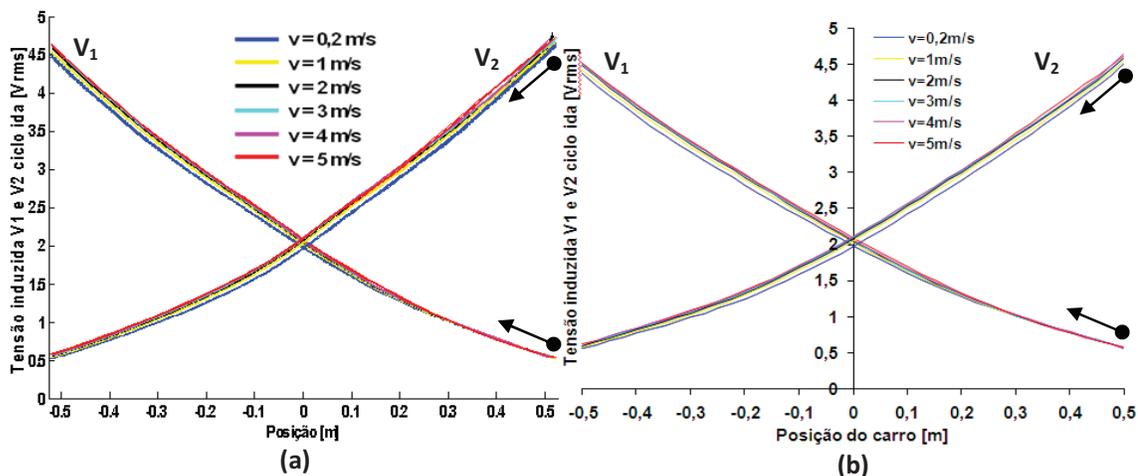


Figura 136 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

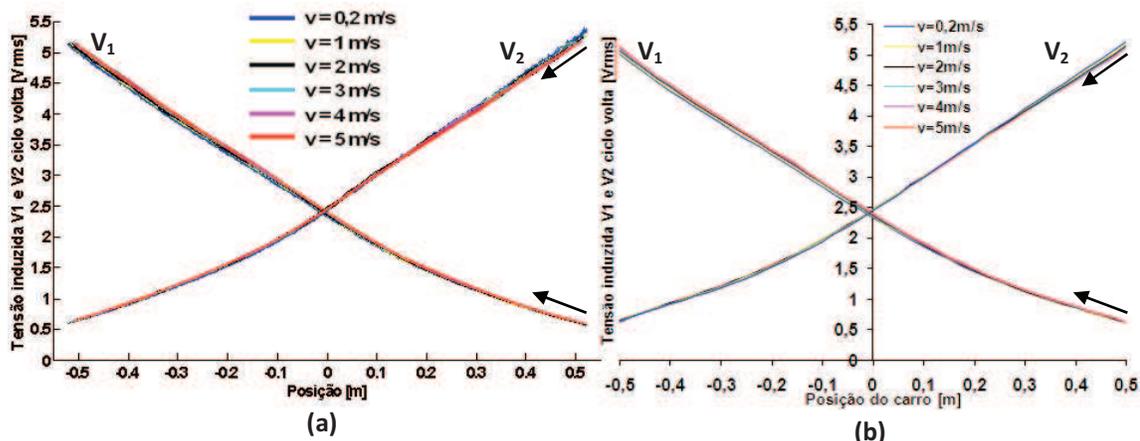


Figura 137 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

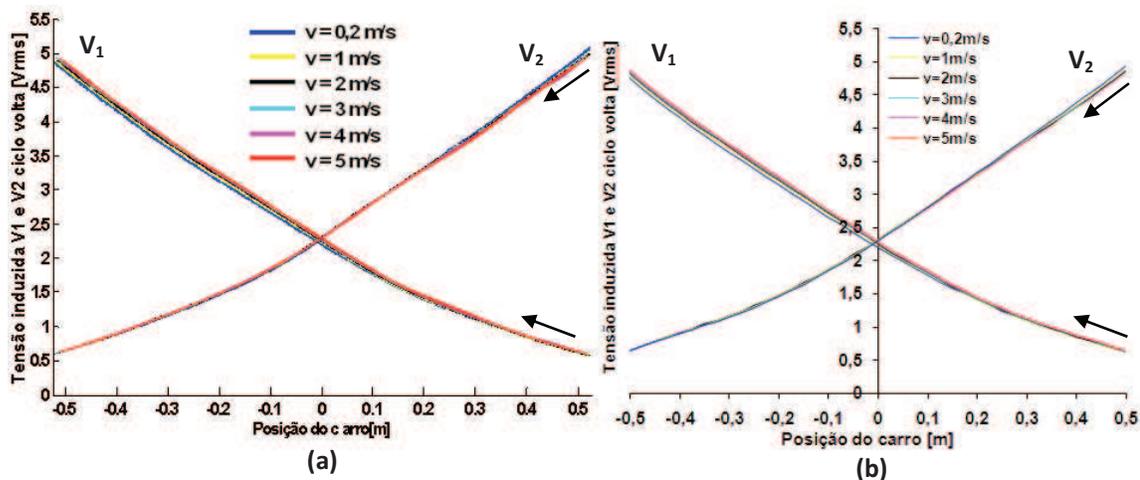


Figura 138 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

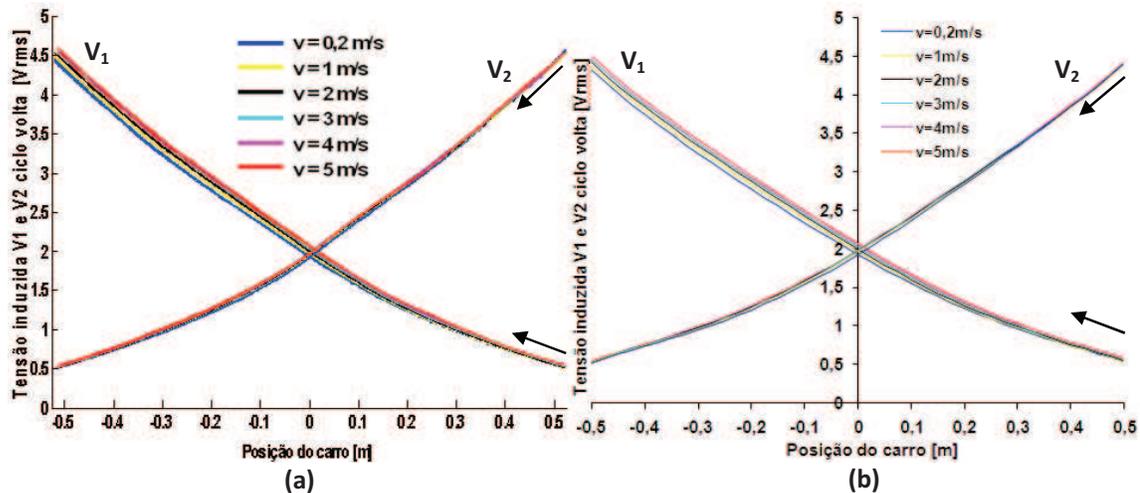


Figura 139 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

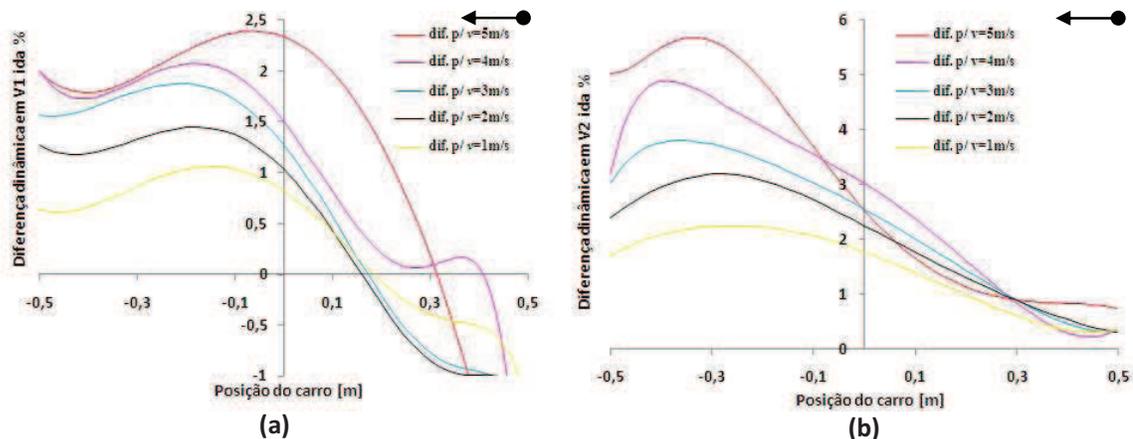


Figura 140 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.

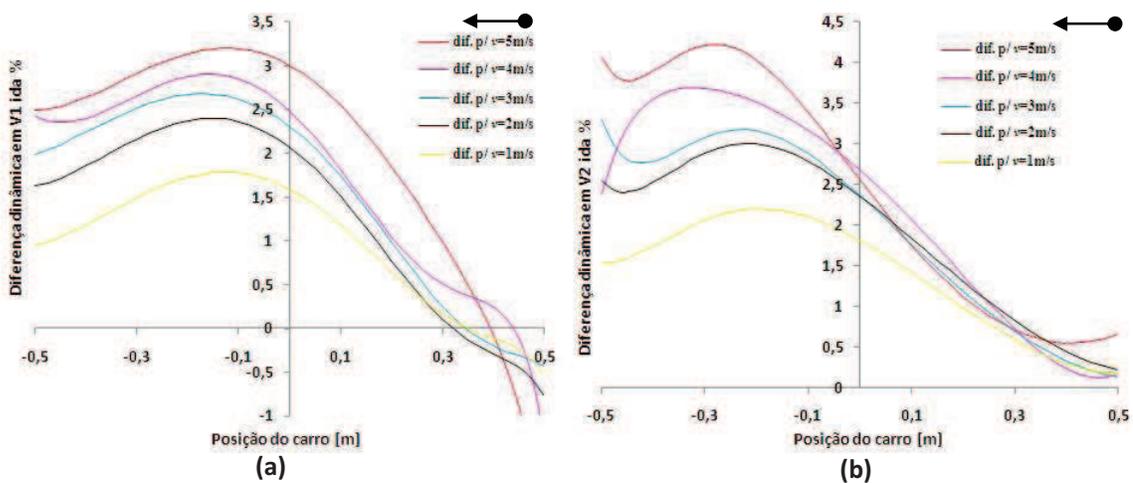


Figura 141 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita.

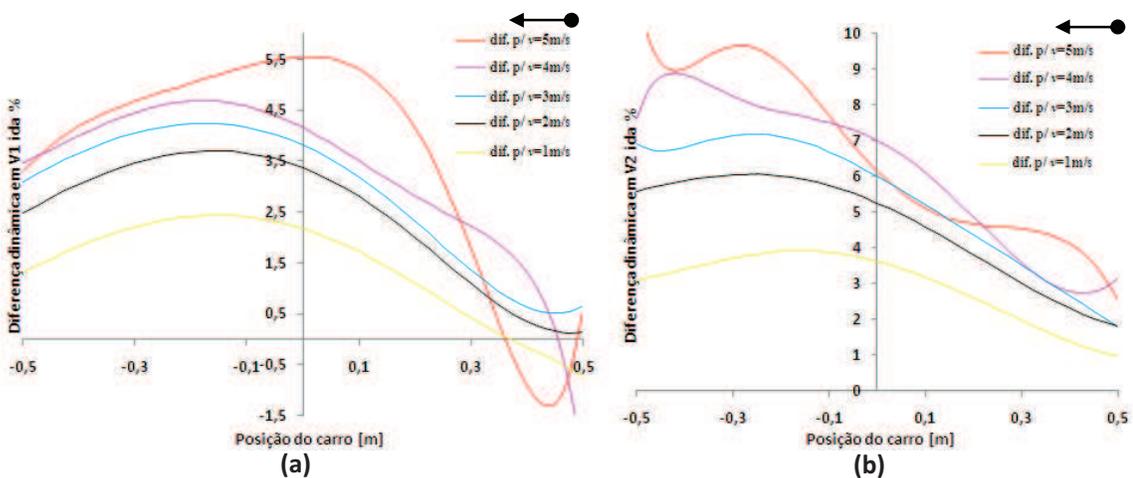


Figura 142 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita.

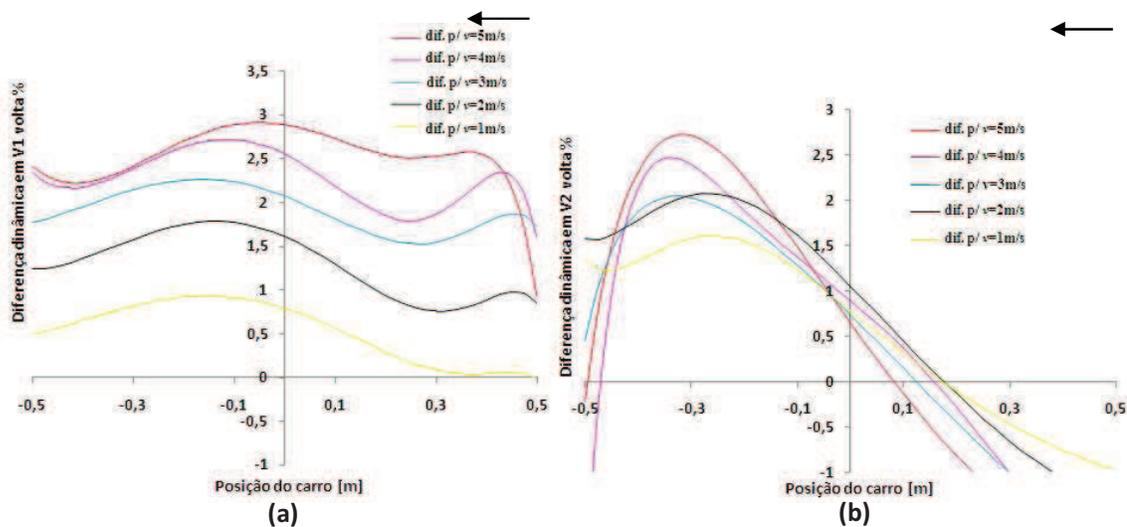


Figura 143 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.

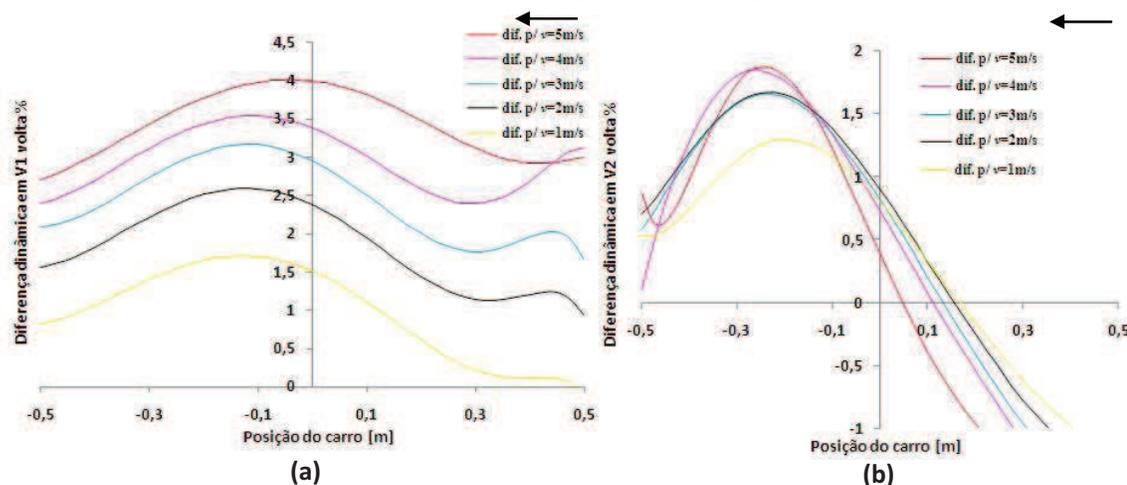


Figura 144 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.

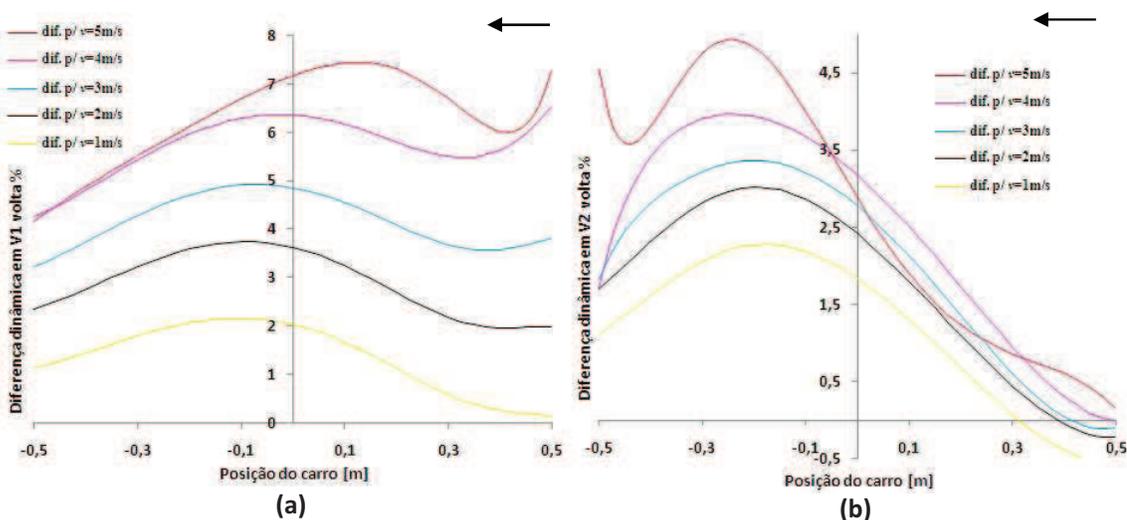


Figura 145 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.

Nos gráficos das Figuras 146 a 151 estão plotadas dez curvas de corrente do eletro-ímã para cada uma das seis velocidades estudadas, Desta forma os gráficos representam também a dispersão dos pontos medidos de cada uma das 60 curvas plotadas neles.

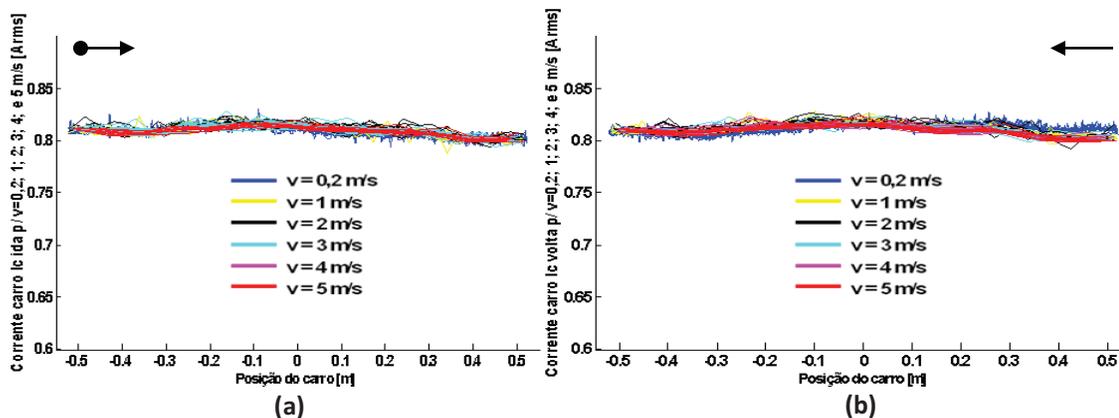


Figura 146 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.

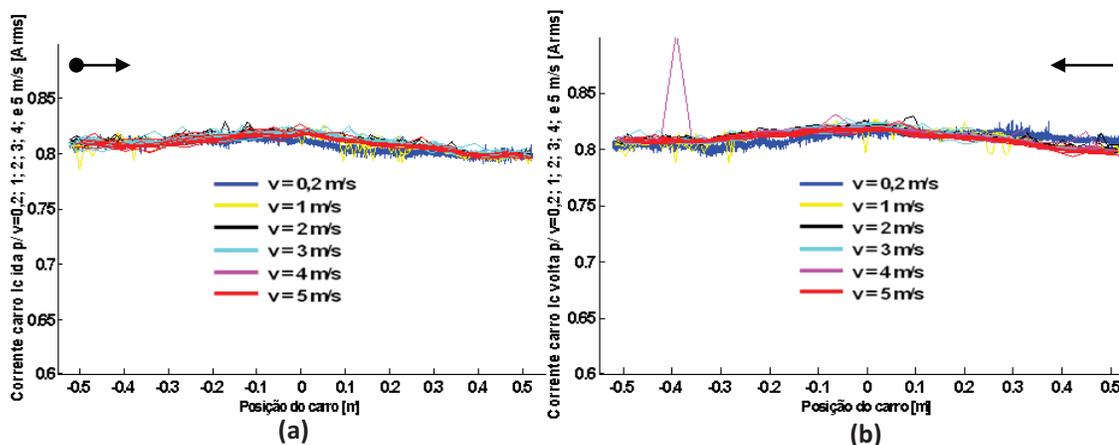


Figura 147 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.

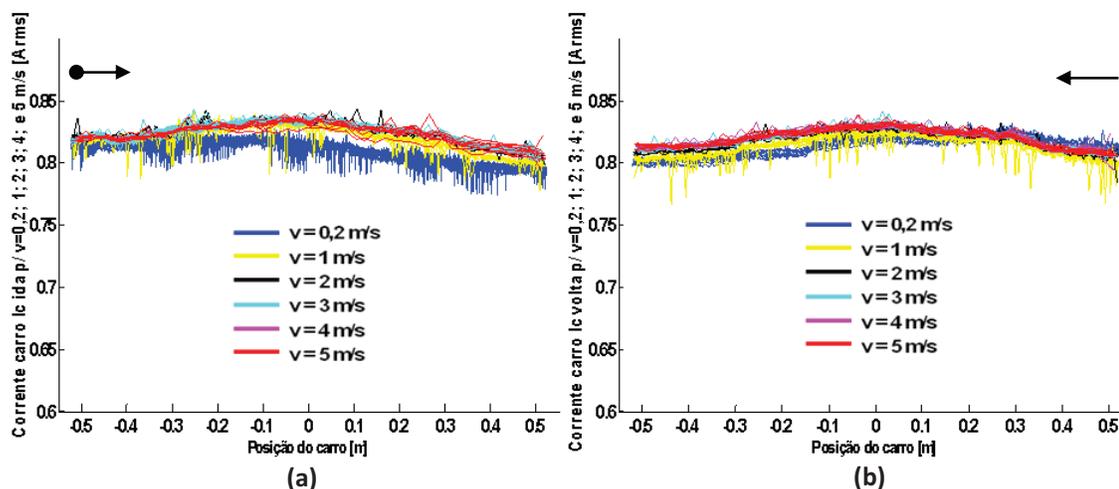


Figura 148 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda.

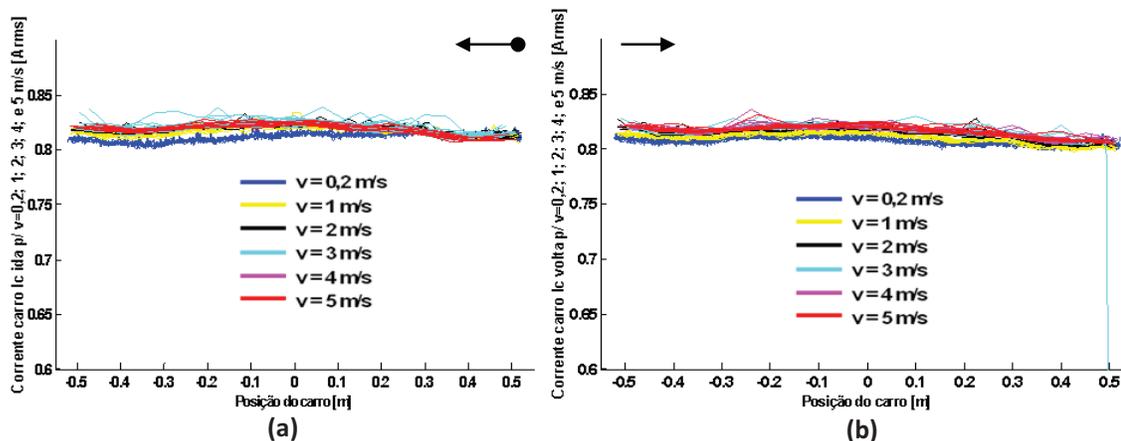


Figura 149 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.

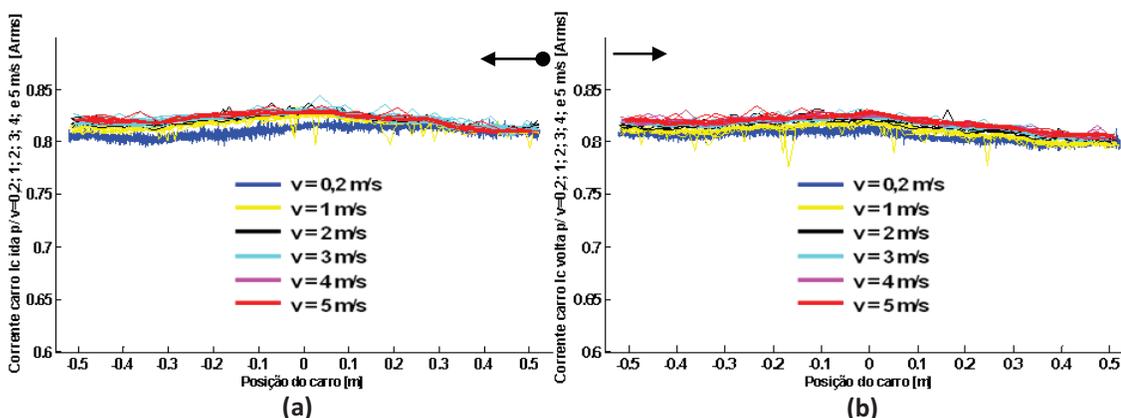


Figura 150 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita.

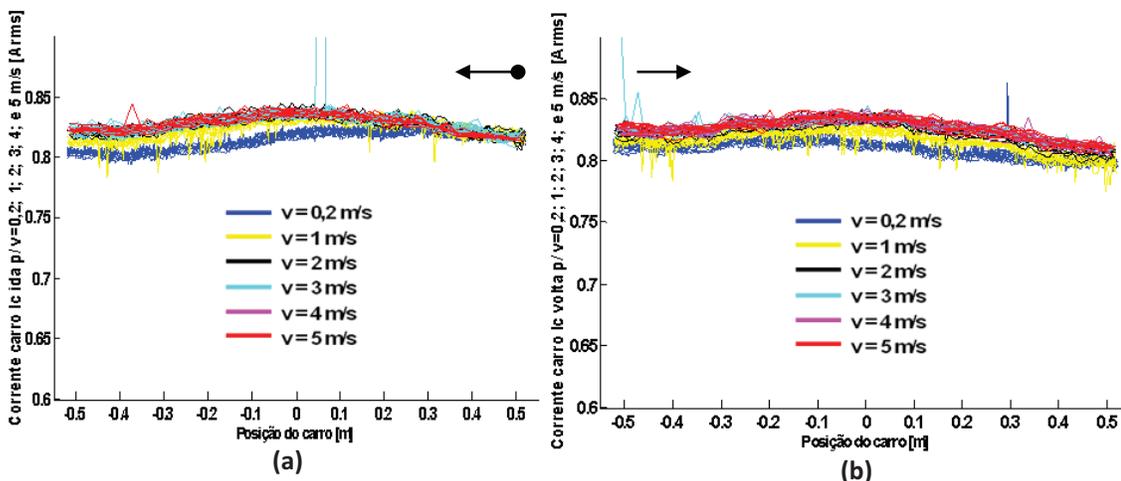


Figura 151 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita.

8.2.2 Comparação dos valores estáticos com os valores dinâmicos do Transdutor II.

Os procedimentos usados no Transdutor I para obtenção dos dados dinâmicos são os mesmos usados no Transdutor II e, comparando os dois resultados, nota-se que os dois

transdutores têm um mesmo padrão de comportamento para as curvas das tensões induzidas de V_1 e V_2 , para as seis velocidades medidas nas três frequências usadas. Assim, com o carro se deslocando da esquerda para direita tem-se dois tipos de movimento. No ciclo de ida, Figuras 152 a 154, as curvas têm o mesmo comportamento das curvas do Transdutor I, Figuras 122 a 124. No ciclo da volta, Figuras 155 a 157, as curvas apresentam comportamento igual ao das Figuras 125 a 127 do Transdutor I.

Analisando os gráficos das diferenças dinâmicas do Transdutor II, Figuras 158 a 163, quando o carro se desloca da esquerda para a direita, pode-se observar que estes seguem também o mesmo padrão da diferença dinâmica do Transdutor I, tendo assim o mesmo comportamento das Figuras 128 a 133. A mudança mais significativa está no valor da diferença para algumas frequências, por exemplo, para as frequências de 60 e 120 Hz, Figuras 158, 159, 128 e 129, a diferença dinâmica de V_1 e V_2 no Transdutor II é o dobro do que no Transdutor I. Em contrapartida, para frequência de 240 Hz, Figura 160 e 130, elas são iguais. Para o ciclo da volta com o carro partindo da direita, Figuras 161 a 163, as diferenças dinâmicas em V_1 e V_2 do Transdutor II são iguais ou menores do que no Transdutor I, Figuras 131 a 133.

Para o carro se deslocando da direita para esquerda tem-se também o mesmo padrão de comportamento para as tensões induzidas de V_1 e V_2 do Transdutor II, Figuras 164 a 169, em relação ao Transdutor I, Figuras 134 a 139. Com isto, tem-se novamente que o comportamento das curvas das diferenças dinâmicas ao longo do percurso do Transdutor II, Figuras 170 a 175, é semelhante ao do Transdutor I, Figuras 140 a 145. Neste sentido do movimento do carro, a ordem de grandeza das diferenças dinâmicas é praticamente igual nos dois transdutores; porém, no ciclo de volta, quando o carro parte da esquerda, vê-se que a diferença em V_1 no Transdutor II para as frequências de 60 e 120 Hz, Figuras 173(a) e 174(a), é praticamente o dobro do Transdutor I, Figuras 143(a) e 144(a).

As curvas das correntes do eletroímã no carro, quando o carro parte da esquerda para direita, têm um comportamento igual ao do Transdutor I para as velocidades de 2 a 5 m/s. No ciclo de ida, estão mais juntas e, no ciclo da volta, há um pequeno espaçamento entre elas. Já para velocidade de 0,2 e 1 m/s o comportamento não é o mesmo do Transdutor I. No ciclo de ida, as curvas partem do mesmo valor das curvas com velocidade de 2 a 5 m/s e, no fim, têm uma diferença que fica entre 3 e 1%, respectivamente. No ciclo da volta, esta diferença é em todo o percurso, Figuras 176 a 178. Quando o carro parte da direita, tanto no ciclo de ida quanto no de volta, no início do movimento as curvas das correntes partem do mesmo valor e

no final de cada ciclo para as velocidades de 0,2 e 1 m/s há uma diferença entre 2 e 1%,
Figuras 179 a 181.

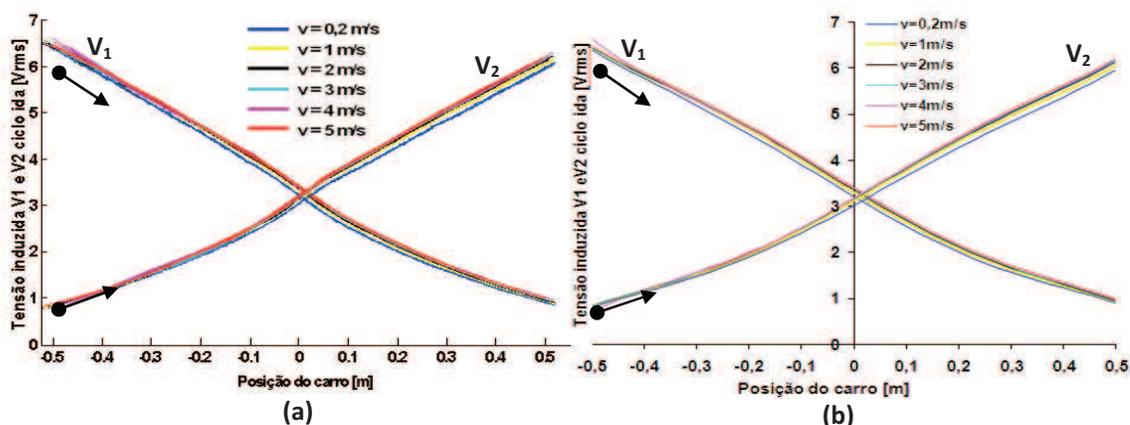


Figura 152 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as médias das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

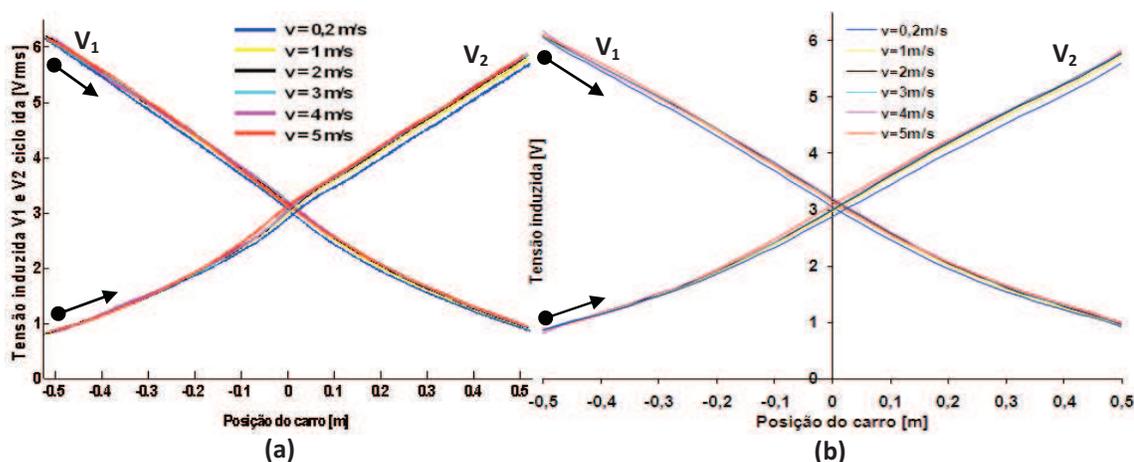


Figura 153 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as médias das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

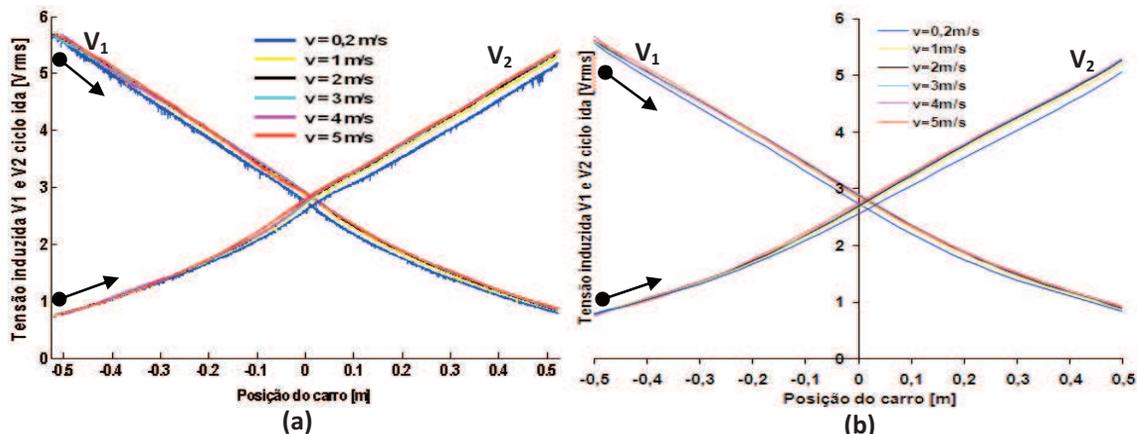


Figura 154 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as médias das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

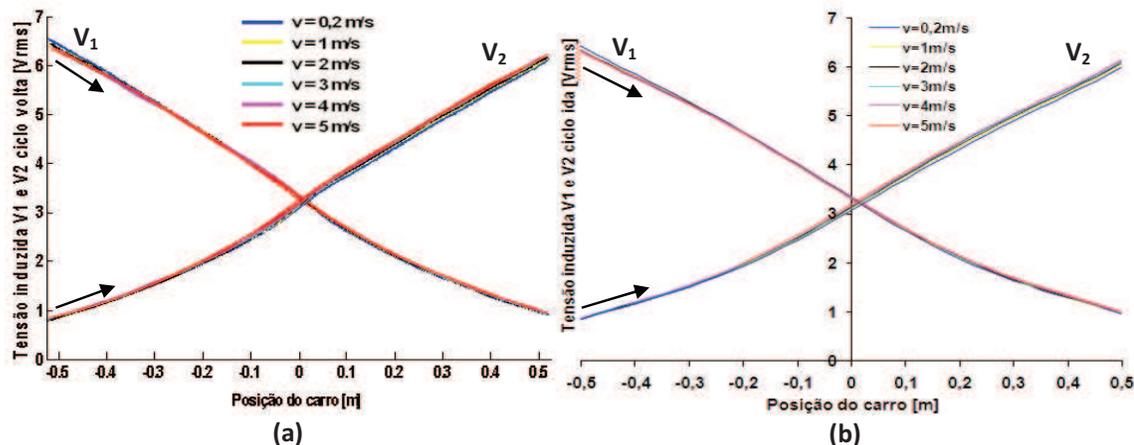


Figura 155 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

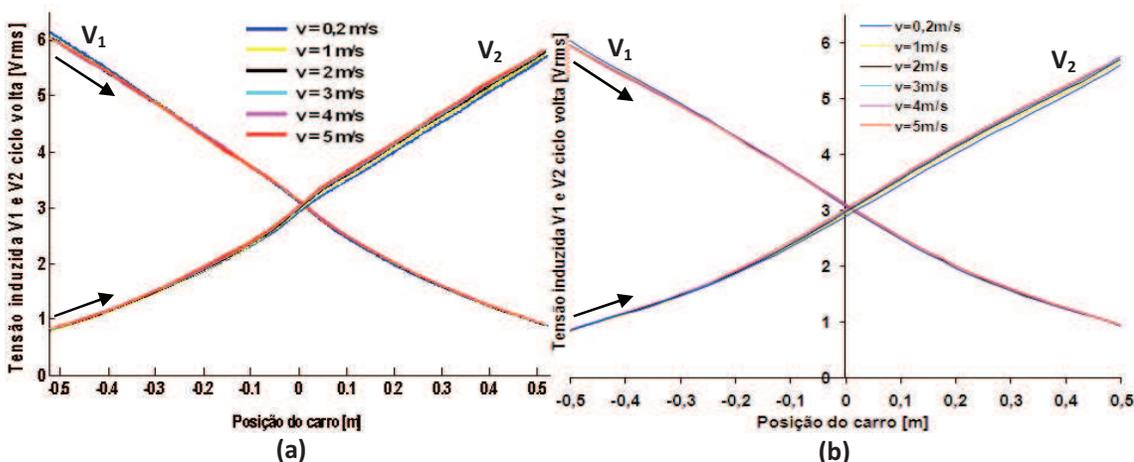


Figura 156 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

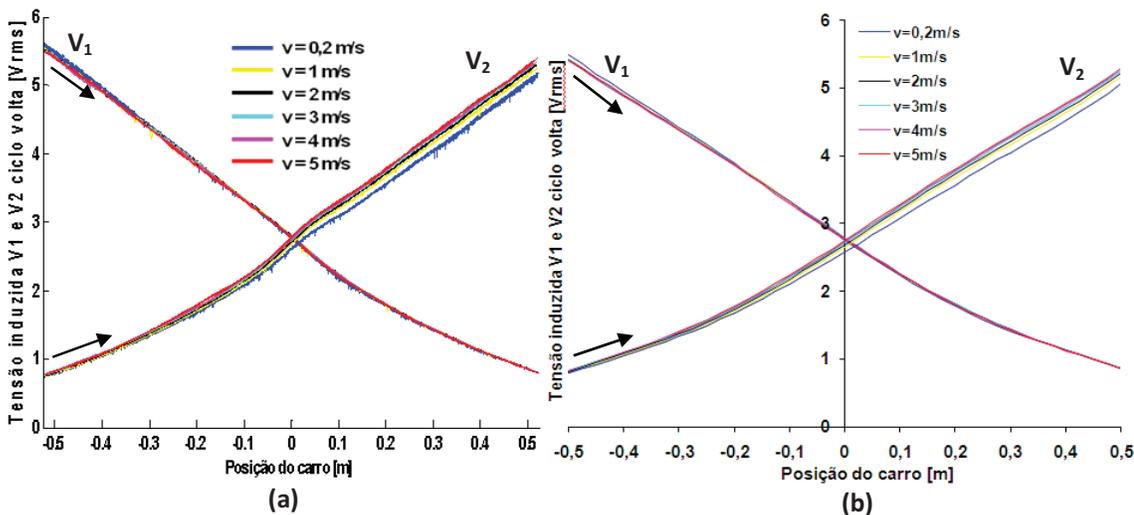


Figura 157 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

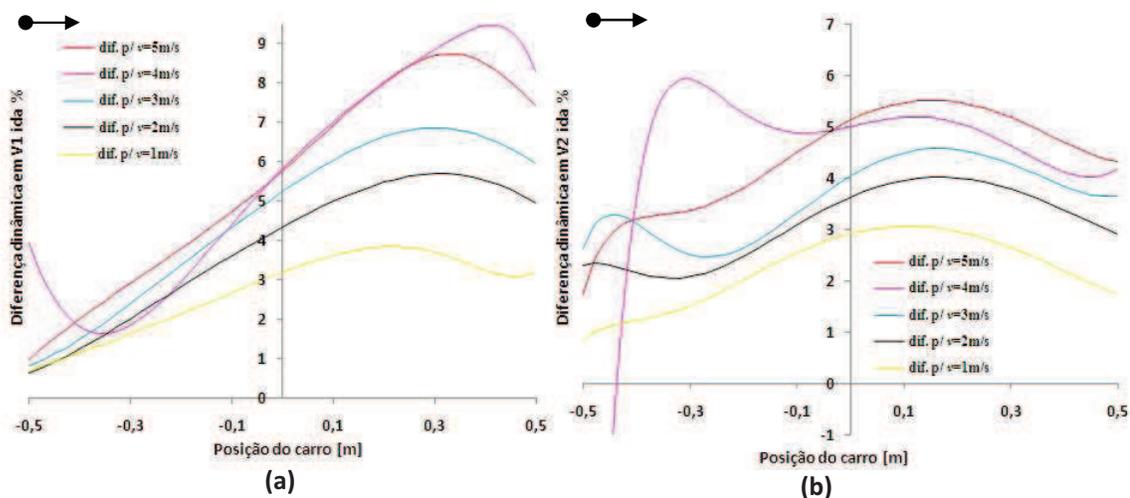


Figura 158 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.

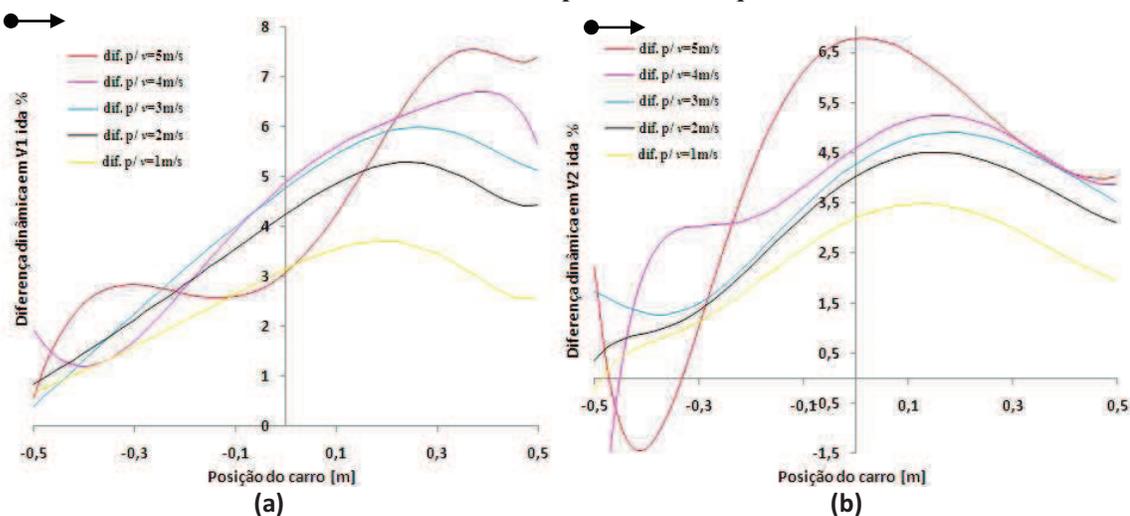


Figura 159 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.

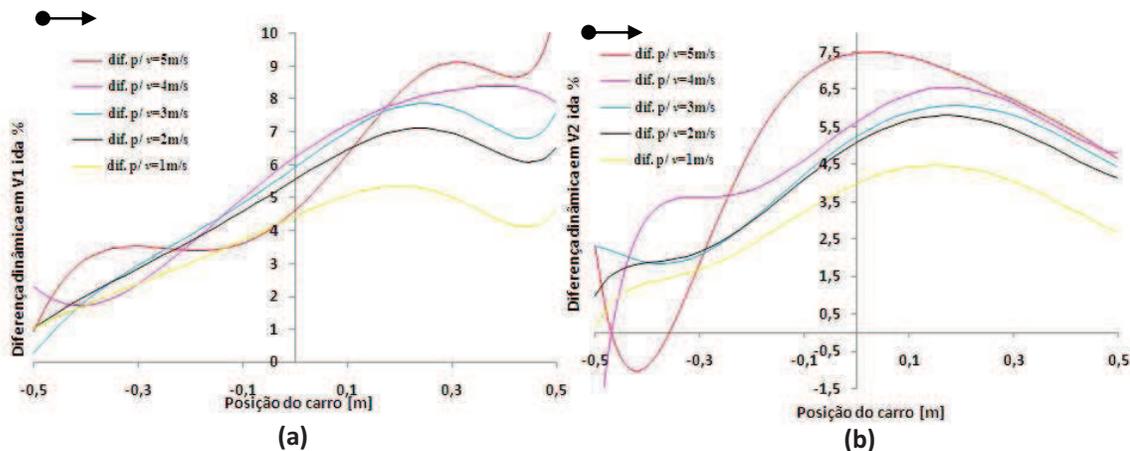


Figura 160 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda.

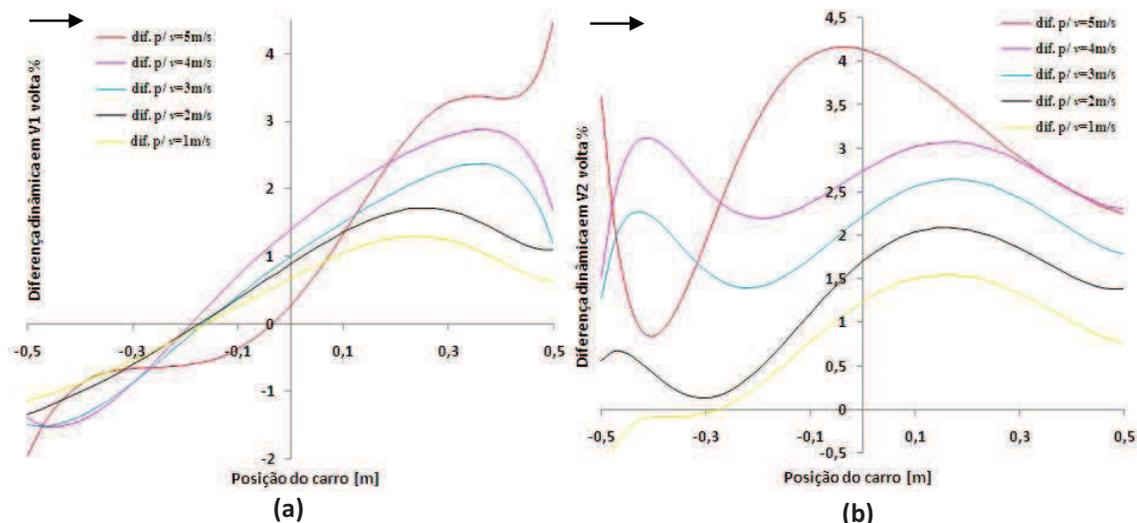


Figura 161 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.

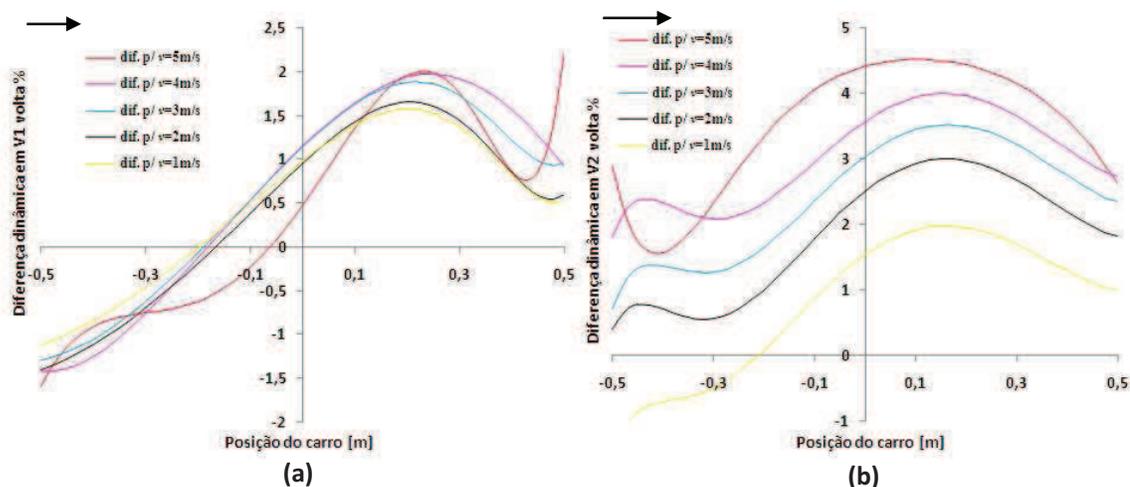


Figura 162 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita.

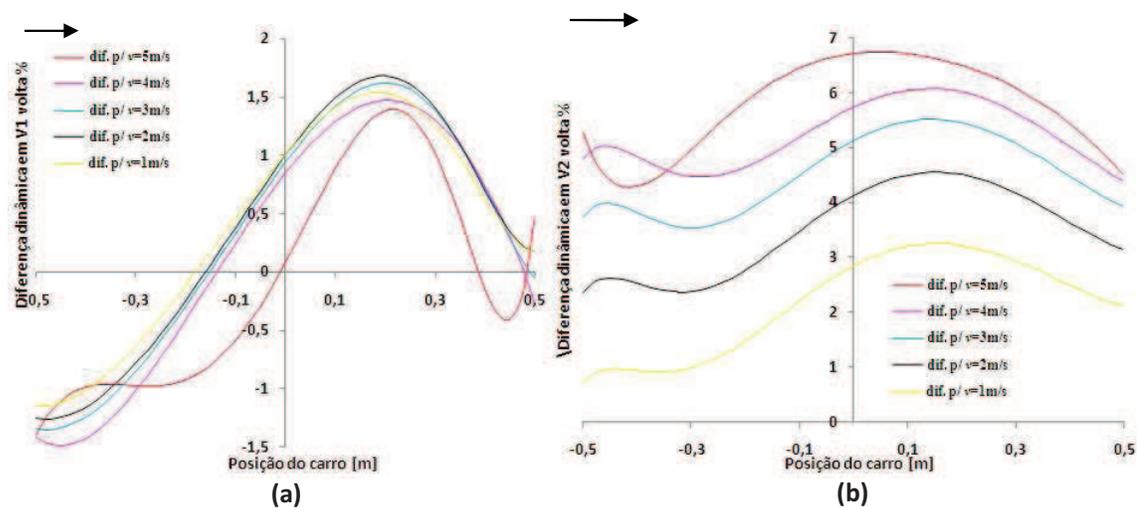


Figura 163 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita.

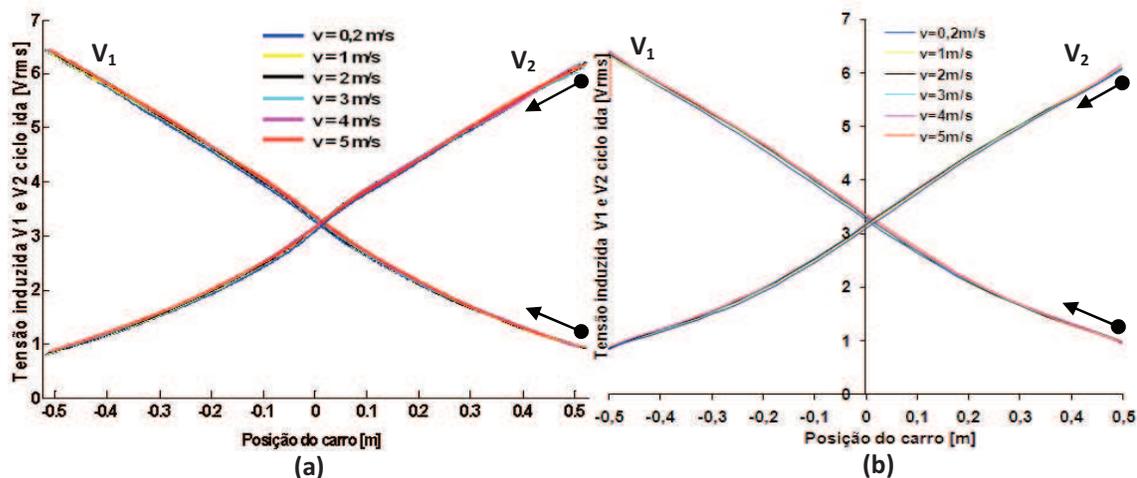


Figura 164 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

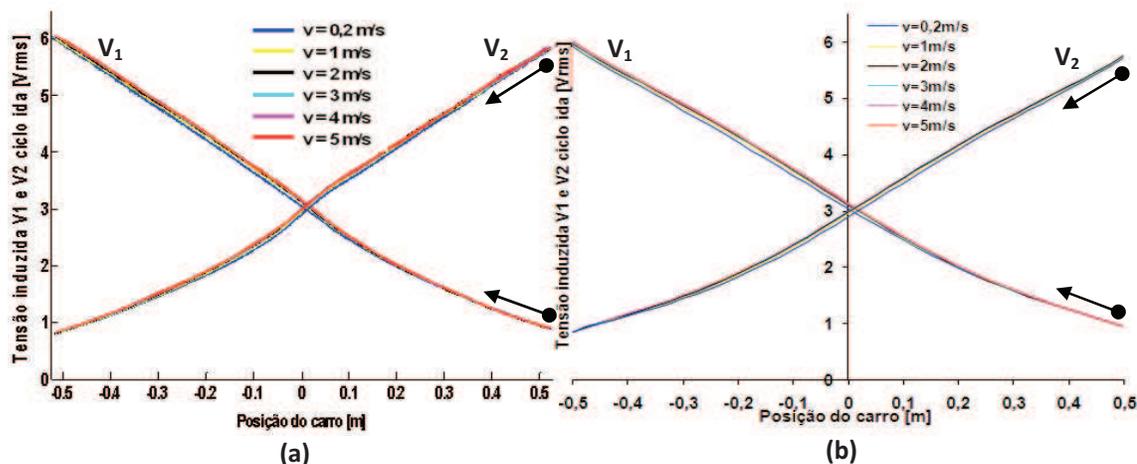


Figura 165 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

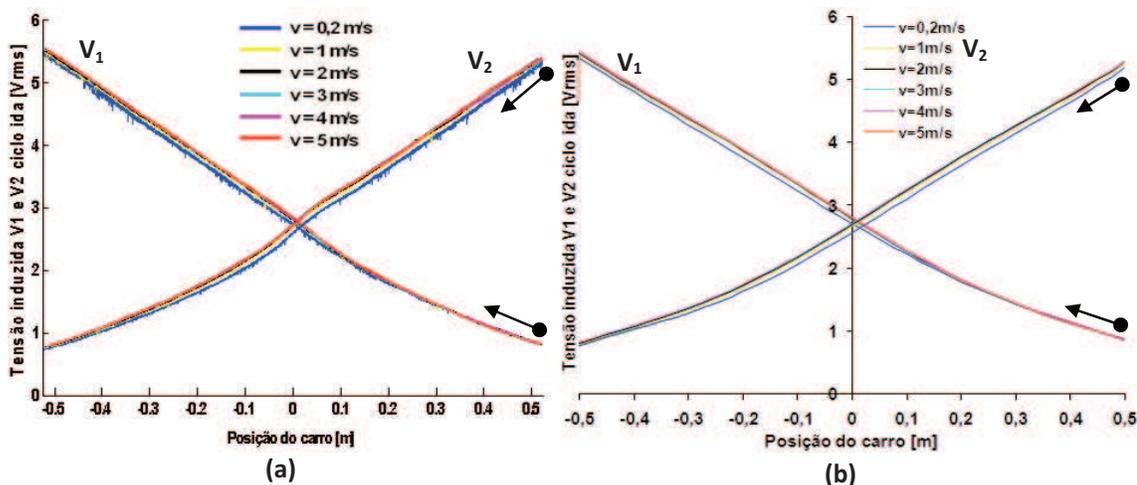


Figura 166 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as média das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

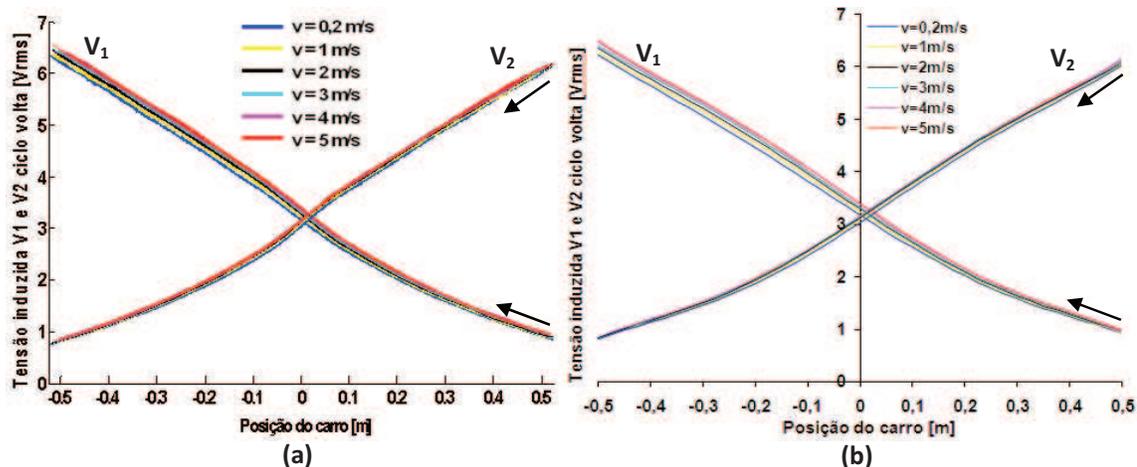


Figura 167 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as médias das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

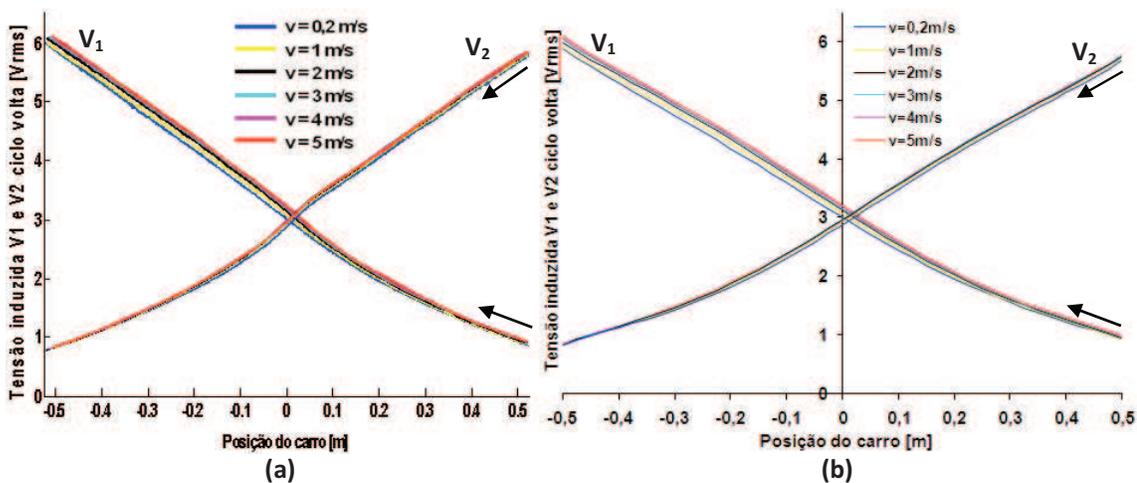


Figura 168 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as médias das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

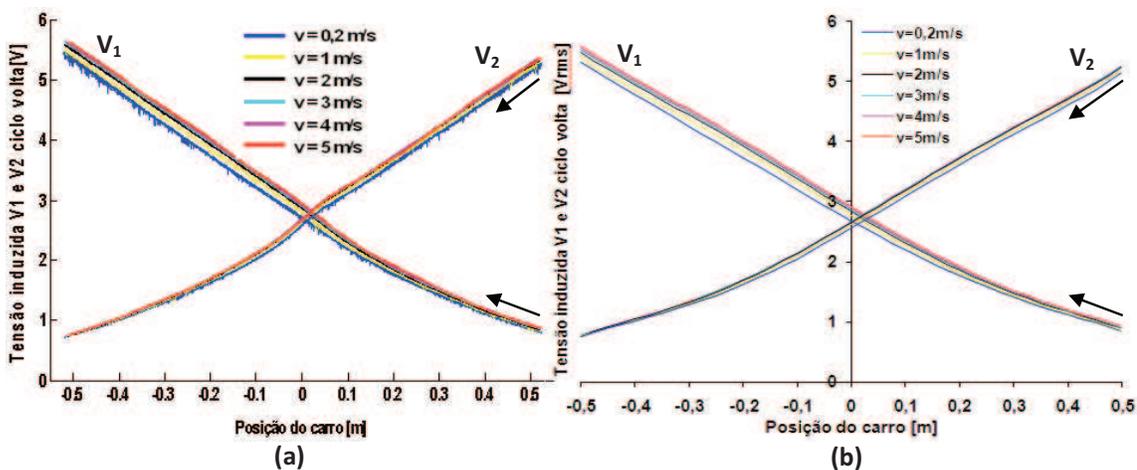


Figura 169 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de volta na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda, em (a) os pontos de dispersão gerados pelo Matlab e em (b) as médias das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

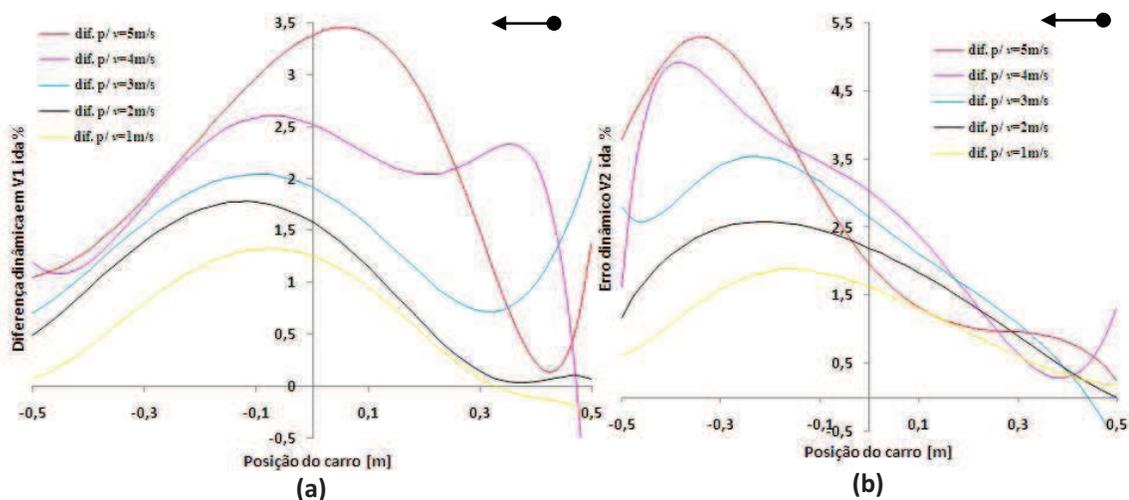


Figura 170 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.

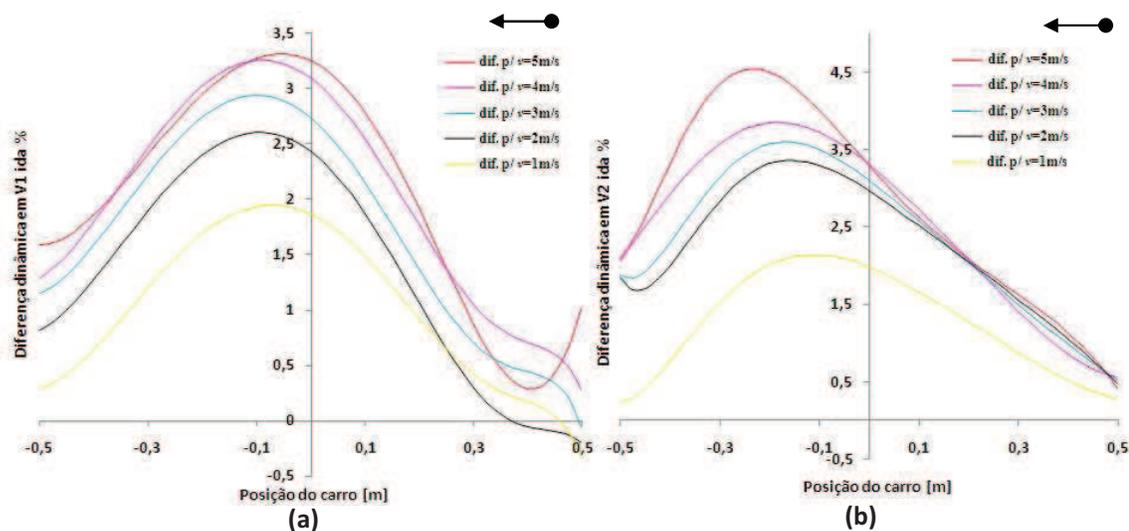


Figura 171 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita.

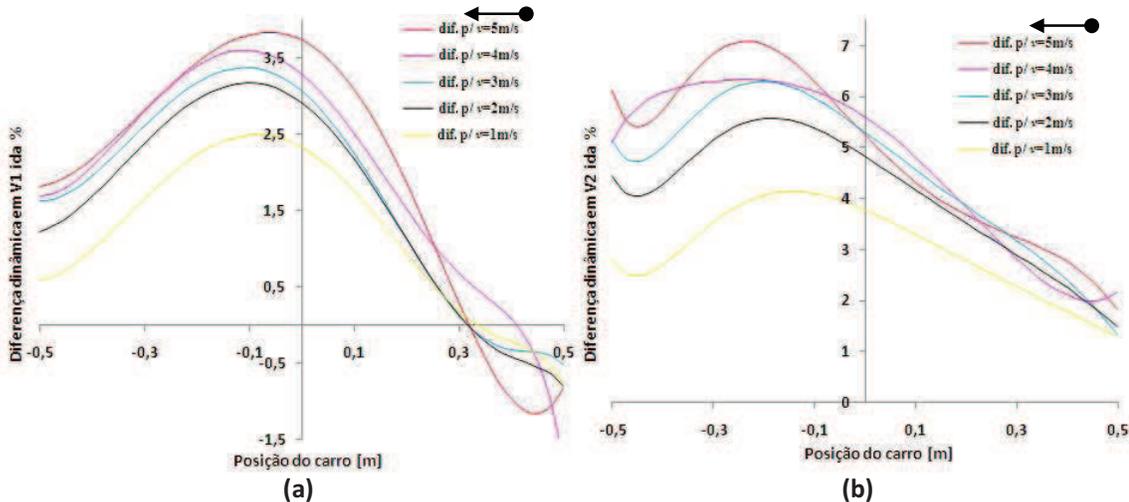
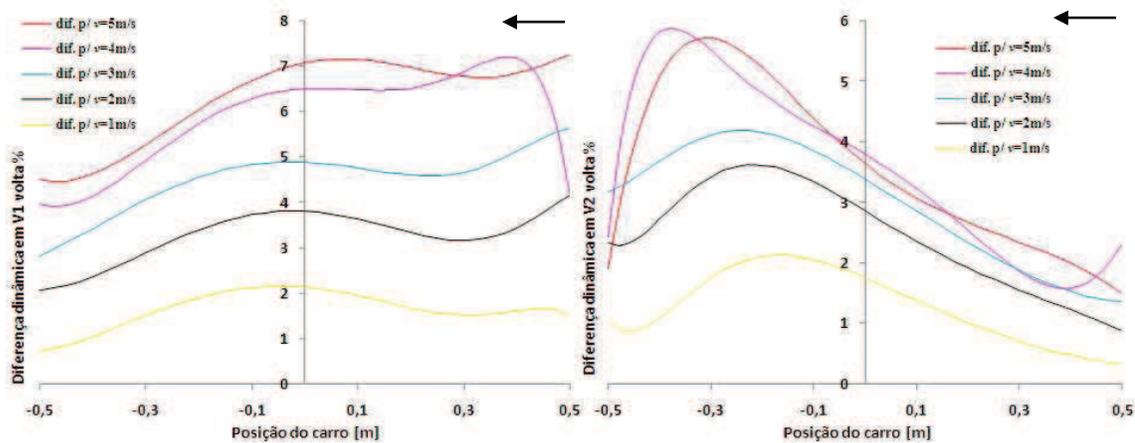
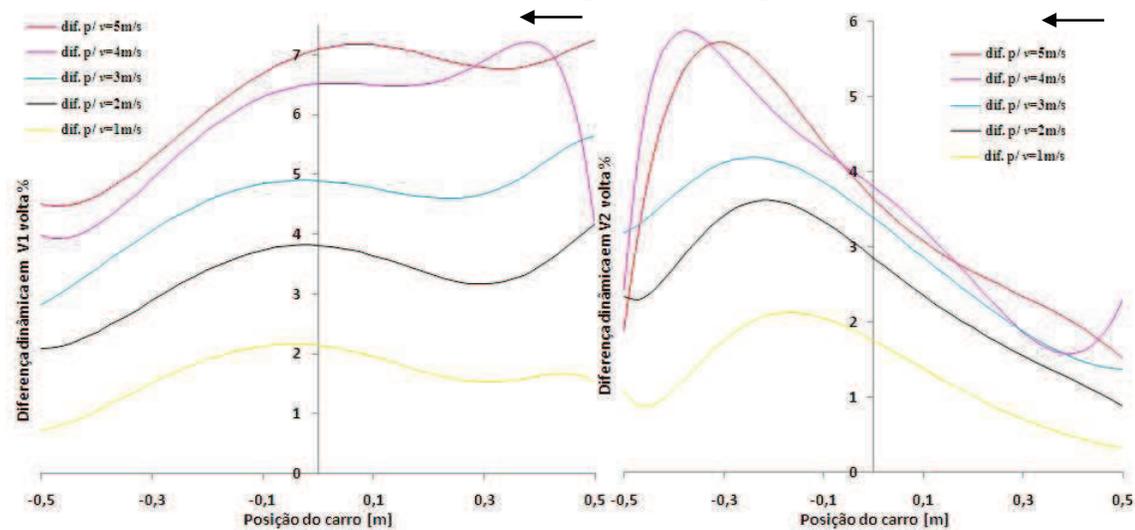


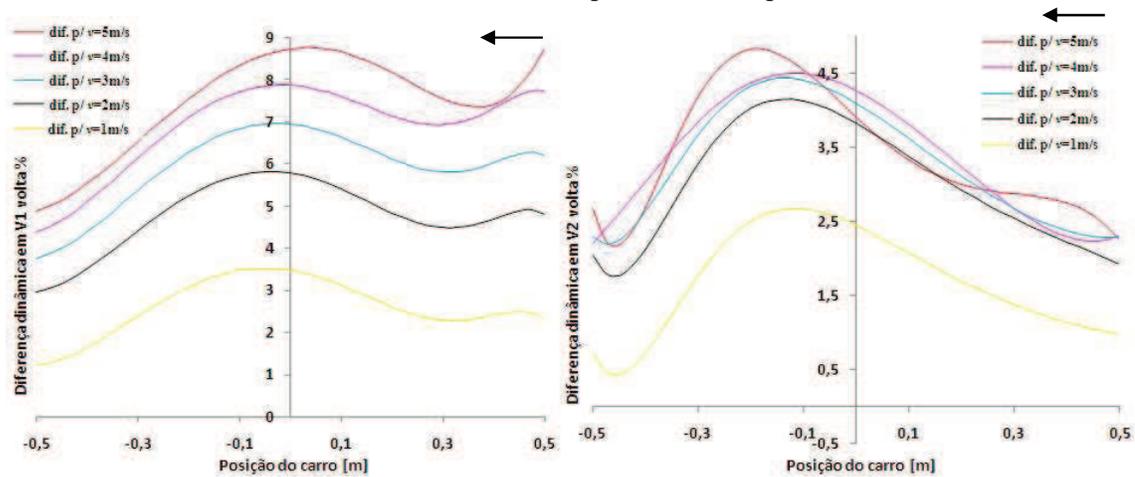
Figura 172 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de ida na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita.



(a) (b)
 Figura 173 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.



(a) (b)
 Figura 174 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.



(a) (b)
 Figura 175 Comparação da diferença dinâmica de V_1 (a) e V_2 (b) no ciclo de volta na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.

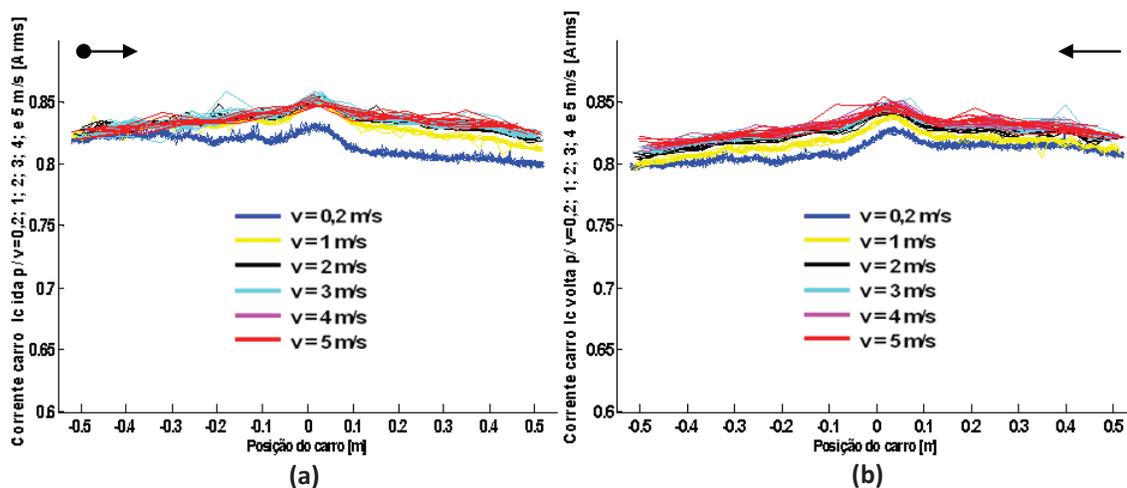


Figura 176 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.

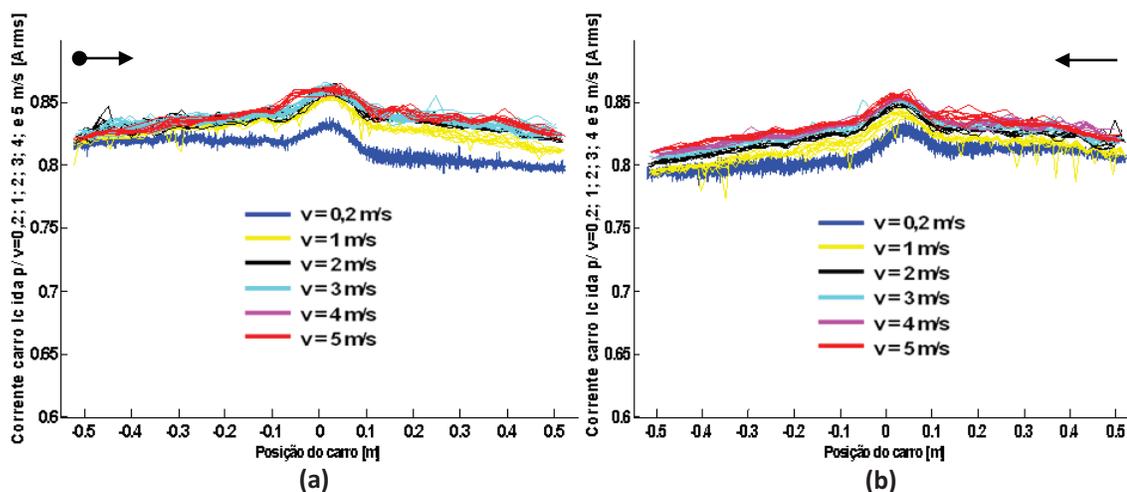


Figura 177 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 120 Hz com o carro partindo da esquerda.

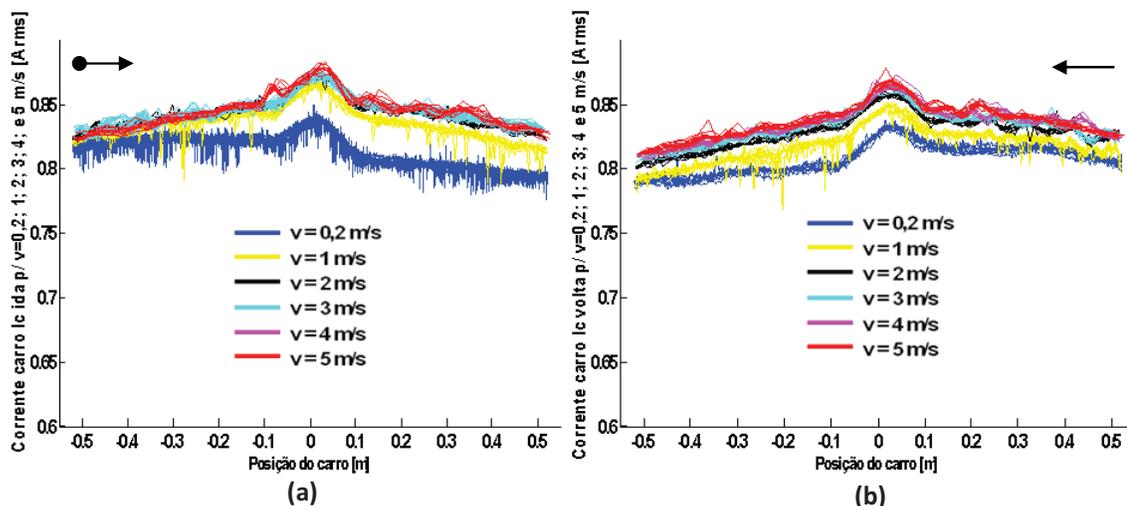


Figura 178 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda.

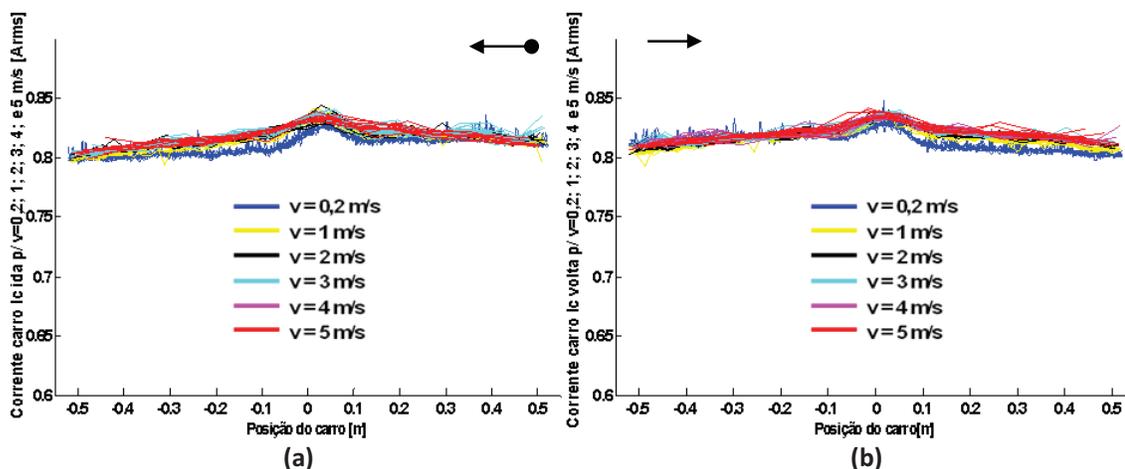


Figura 179 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.

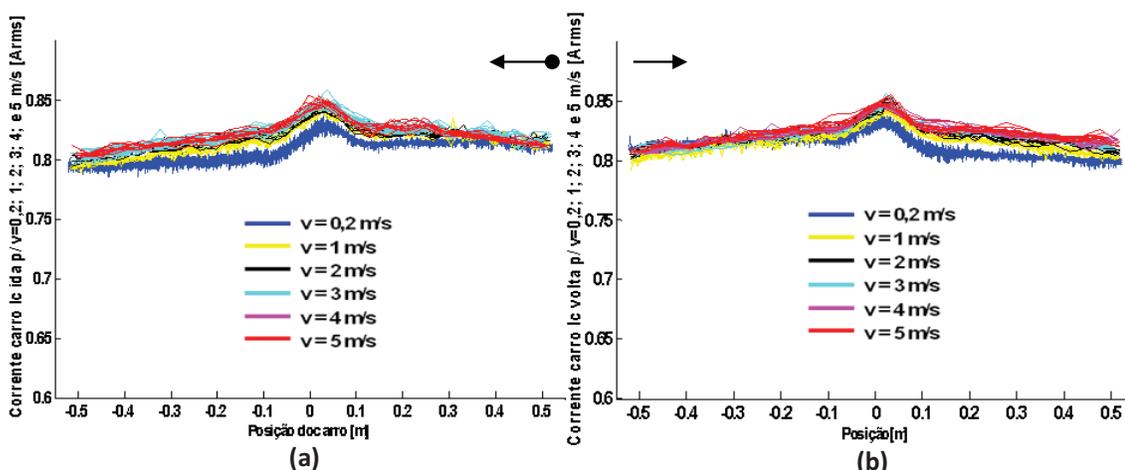


Figura 180 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 120 Hz com o carro partindo da direita.

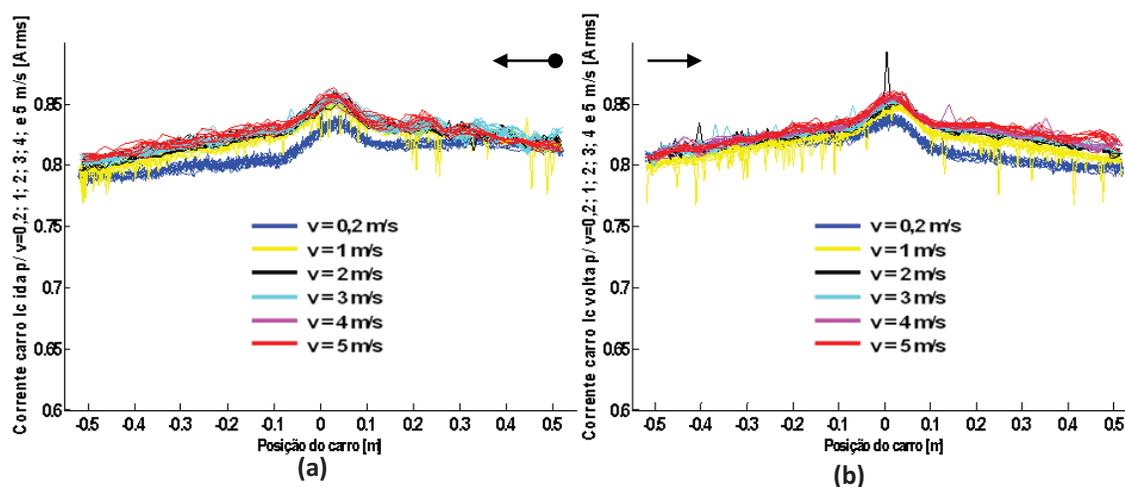


Figura 181 Comparação entre os valores dinâmicos da corrente no eletroímã do carro no ciclo de ida (a) e volta (b) na frequência de 240 Hz com o carro partindo da direita.

No apêndice B estão mostrados os gráficos para os piores casos do desvio padrão das curvas de V_1 e V_2 tanto para o Transdutor I como para o Transdutor II.

8.3 COMPARAÇÃO DOS VALORES ESTÁTICOS COM OS VALORES DINÂMICOS LENTOS DE $S(x)$

Pode-se também comparar os valores das curvas estáticas de $S(x)$ com os valores das curvas dinâmicas muito lentas, que, no caso, é a curva para velocidade de 0,2 m/s e vai-se fazer isto somente para a frequência de 60 Hz para os Transdutores I e II. Isto é feito usando as equações dinâmicas médias de V_1 e V_2 e usadas para calcular a diferença dinâmica nas seções anteriores. Com o carro partindo da esquerda, faz-se a curva média dos dez ciclos de ida e volta e compara-se com a curva estática média do ciclo de ida e volta com o carro partindo da esquerda e a mesma coisa com o carro partindo da direita.

Na Figura 182 tem-se, então, a comparação do sinal de saída $S(x)$ médio de ida e volta do transdutor I com o carro partindo da esquerda para direita para velocidade de 0,2 m/s e a curva estática onde se vê que, apesar das tensões induzidas em V_1 e V_2 para velocidade de 0,2 m/s serem 10% maior do que na curva estática, Figura 110, os sinais de saída são coincidentes.

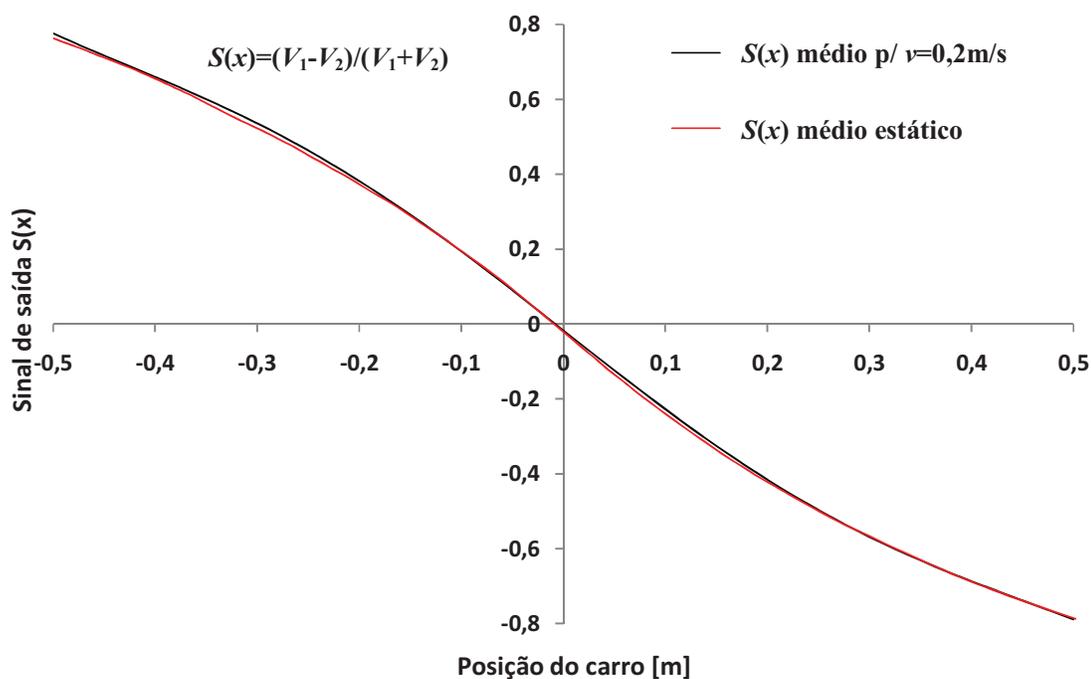


Figura 182 Comparação entre o valor dinâmico de $S(x)$ para $v=0,2\text{m/s}$ e o valor estático do Transdutor I para o ciclo de ida e volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.

Na Figura 183 tem-se a comparação do sinal de saída $S(x)$ médio de ida e volta do Transdutor I com o carro partindo da direita para esquerda para velocidade de 0,2 m/s e a curva estática, onde se vê que, apesar das tensões induzidas em V_1 e V_2 para velocidade de

0,2 m/s serem 10% maior do que na curva estática, Figura 110, os sinais de saída são coincidentes.

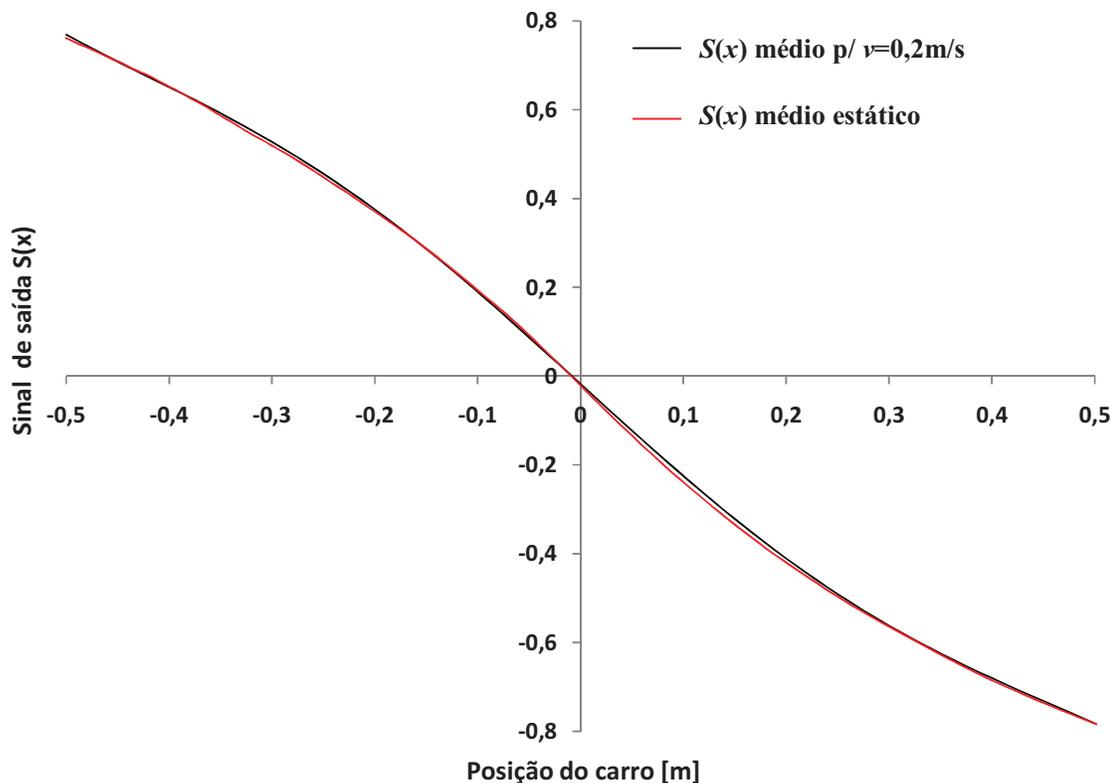


Figura 183 Comparação entre o valor dinâmico de $S(x)$ para $v=0,2\text{m/s}$ e o valor estático do Transdutor I para o ciclo de ida e volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.

O mesmo é feito para o Transdutor II, com o carro partindo de esquerda, Figura 184, e com o carro partindo da direita, Figura 185. Pode-se observar que a diferença entre as curvas é um pouco maior, entre 1 e 2% no Transdutor II do que no Transdutor I, mesmo assim seus valores são muito próximos, levando em conta que a diferença das tensões induzidas que geram as curvas é de 10%.

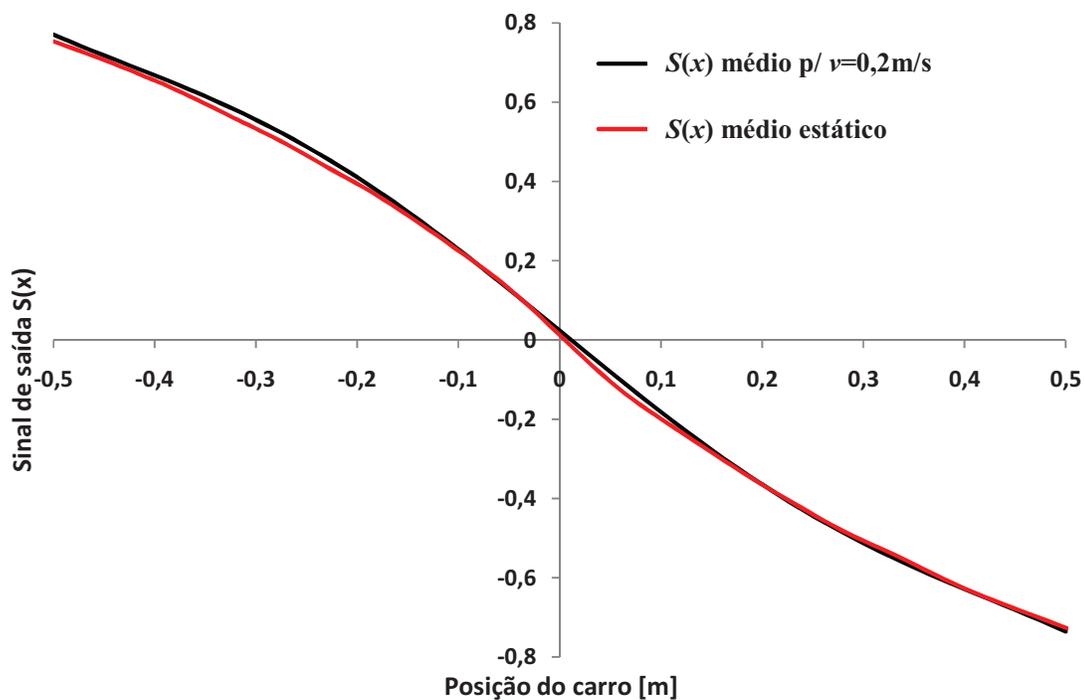


Figura 184 Comparação entre o valor dinâmico de $S(x)$ para $v=0,2\text{m/s}$ e o valor estático do Transdutor II para o ciclo de ida e volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.

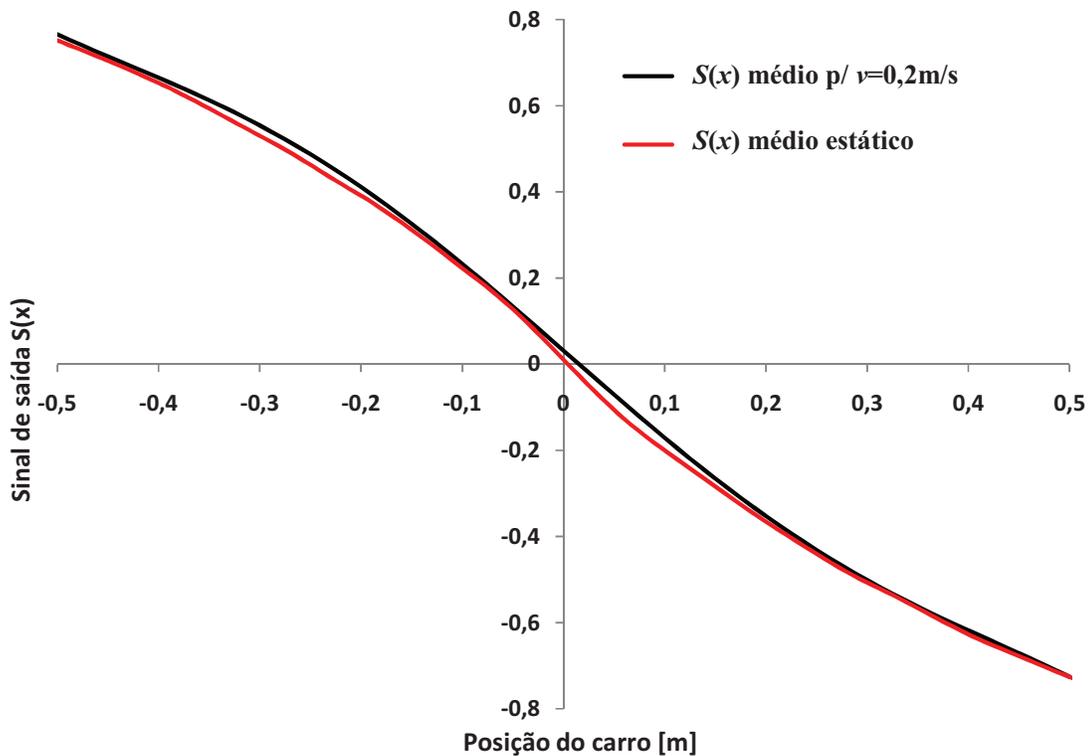


Figura 185 Comparação entre o valor dinâmico de $S(x)$ para $v=0,2\text{m/s}$ e o valor estático do Transdutor II para o ciclo de ida e volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.

8.4 COMPARAÇÃO DAS DIFERENÇAS DINÂMICAS DE $S(x)$.

Compara-se agora os sinais de saída calculados pelas equações médias de V_1 e V_2 obtidas pelo “Basic Fitting” do MatLab para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s para os ciclos de ida e volta com o carro partindo da esquerda e da direita em relação à curva média para $v=0,2$ m/s que vai se considerar como estática, ou seja, a curva estática do Transdutor I é a média das curva das Figuras 182 e 183 e para o Transdutor II é a média das curva das Figuras 184 e 185. Estas curvas é que seriam o valor esperado ou a escala que será comparada com os valores das outras velocidades, referenciadas ao fundo de escala (FS). No Apêndice B têm-se os desvios padrões dos piores casos de $S(x)$ para as cinco velocidades estudadas na frequência de 60 Hz.

Assim, para o Transdutor I o $FS = 0,7857$ e as diferenças dinâmicas de $S(x)$ com o carro partindo da esquerda para o ciclo de ida, Figura 186, são relativamente pequenos, oscilando entre 0,8 e 1,4 % para as velocidade de 1 a 4 m/s; na velocidade de 5 m/s o valor oscila entre 2,2 e -1,2 %. Para o ciclo da volta, Figura 187, os valores também são pequenos ficando entre uma faixa de -0,6 a +0,6 % para todas as velocidades.

Para o ciclo de ida, Figura 188, com o carro partindo da direita as diferenças são todas negativas, as curvas são muito próximas uma das outras com uma variação de 3% ao longo do percurso.

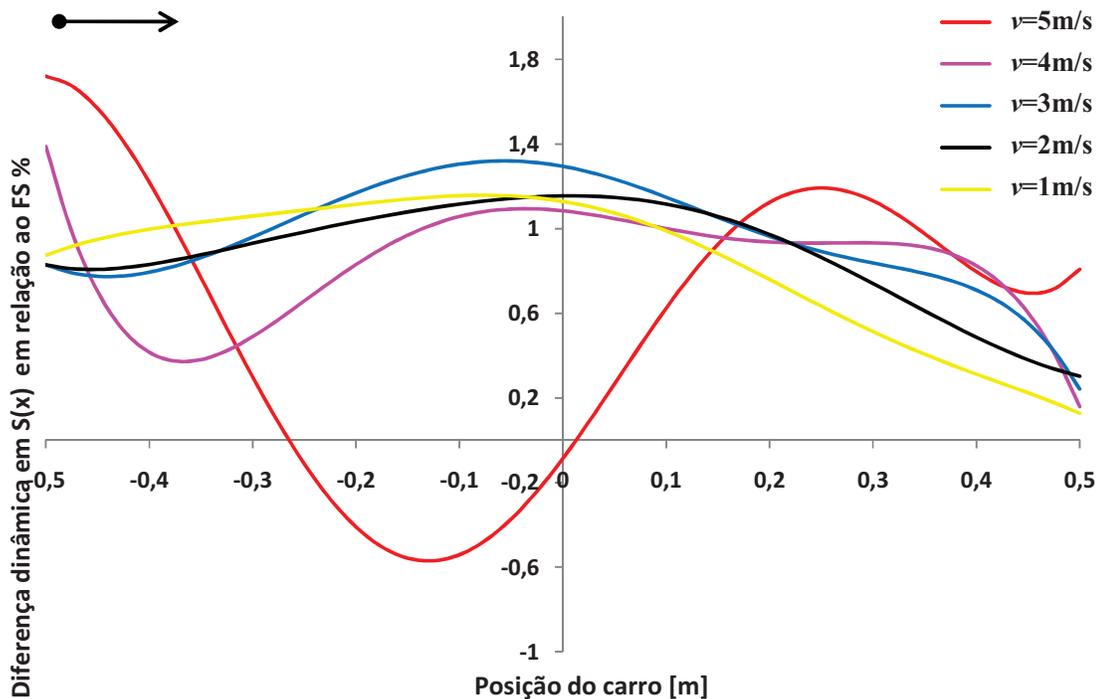


Figura 186 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor I para o ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.

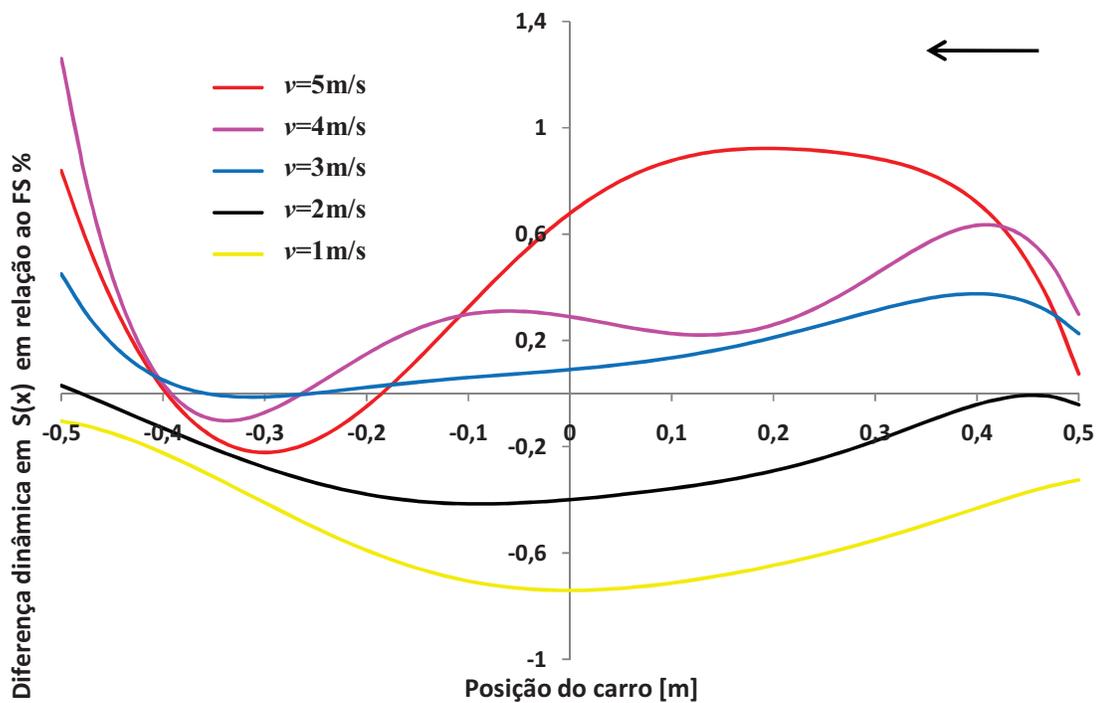


Figura 187 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor I para o ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.

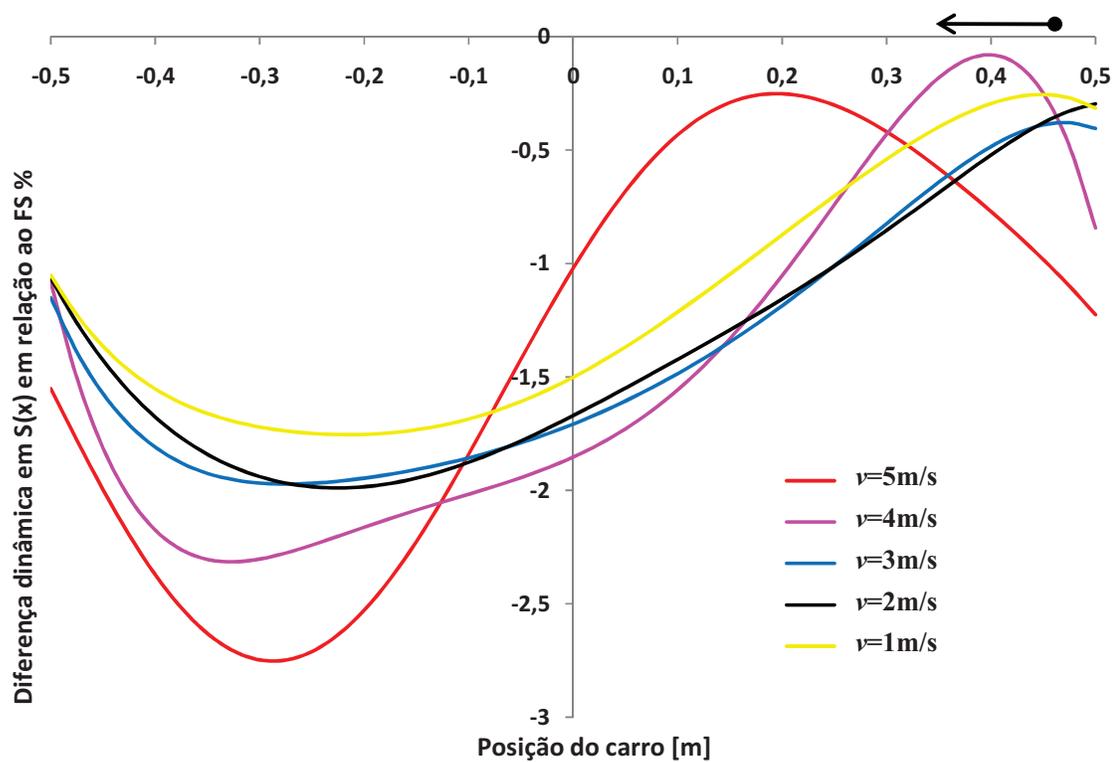


Figura 188 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor I para o ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.

Para o ciclo de volta, Figura 189, com o carro partindo da direita os valores das diferenças também são pequenas e diminuem com a velocidade; para $v = 5 \text{ m/s}$ a variação é da ordem de 3 % e para $v = 1 \text{ m/s}$ da ordem de 1 %.

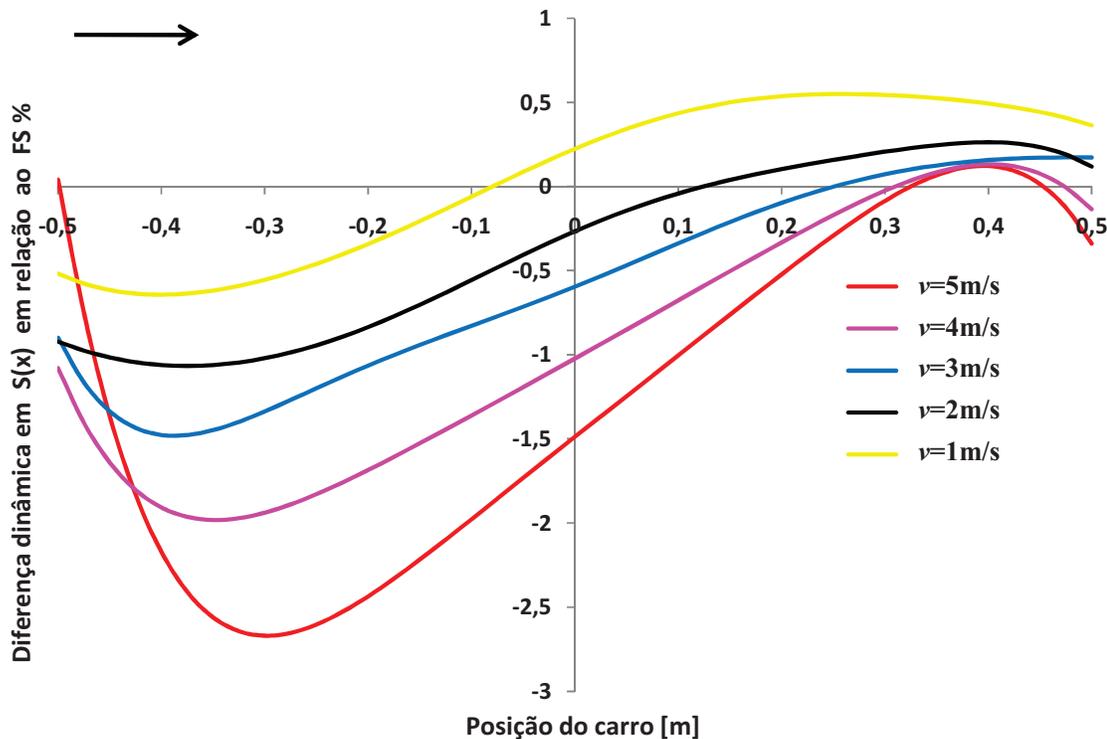


Figura 189 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor I para o ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.

Para o Transdutor II o FS é 0,7682 e pode-se notar também que as curvas do sinal de saída seguem um padrão em relação ao Transdutor I na forma como se comporta a diferença dinâmica ao longo do percurso; para qualquer um dos casos do movimento a variação da diferença dinâmica fica entre 2 e 3%, com exceção do erro inicial para velocidade de 4 m/s quando o carro parte da esquerda, ciclo de ida Figura 190, que começa em 5 % e cai rapidamente a zero. O gráfico das diferenças dinâmicas das curvas do ciclo da volta, Figura 191, além de ter a mesma forma, os valores também são muito próximos em relação ao Transdutor I. Para os gráficos das diferenças dinâmicas de $S(x)$, quando o carro parte da direita, tanto no ciclo de ida como no da volta, Figuras 192 e 193, apesar das curvas serem semelhantes elas tem um *shift* no valor da diferença em relação ao Transdutor I.

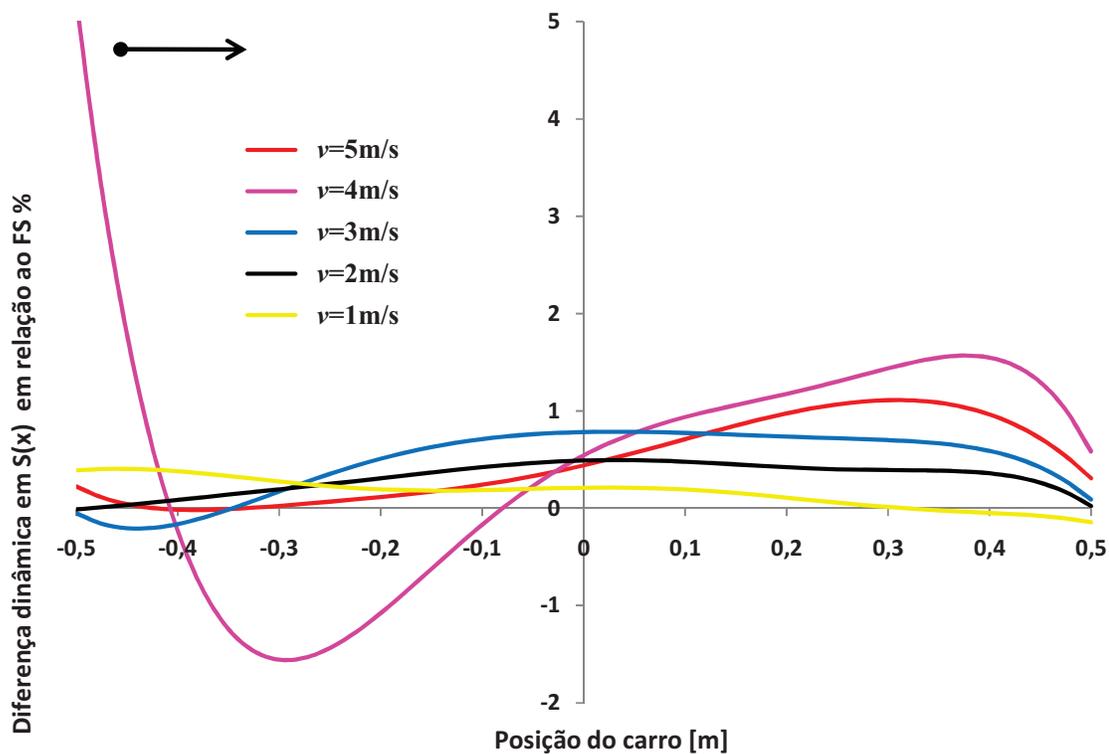


Figura 190 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor II para o ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.

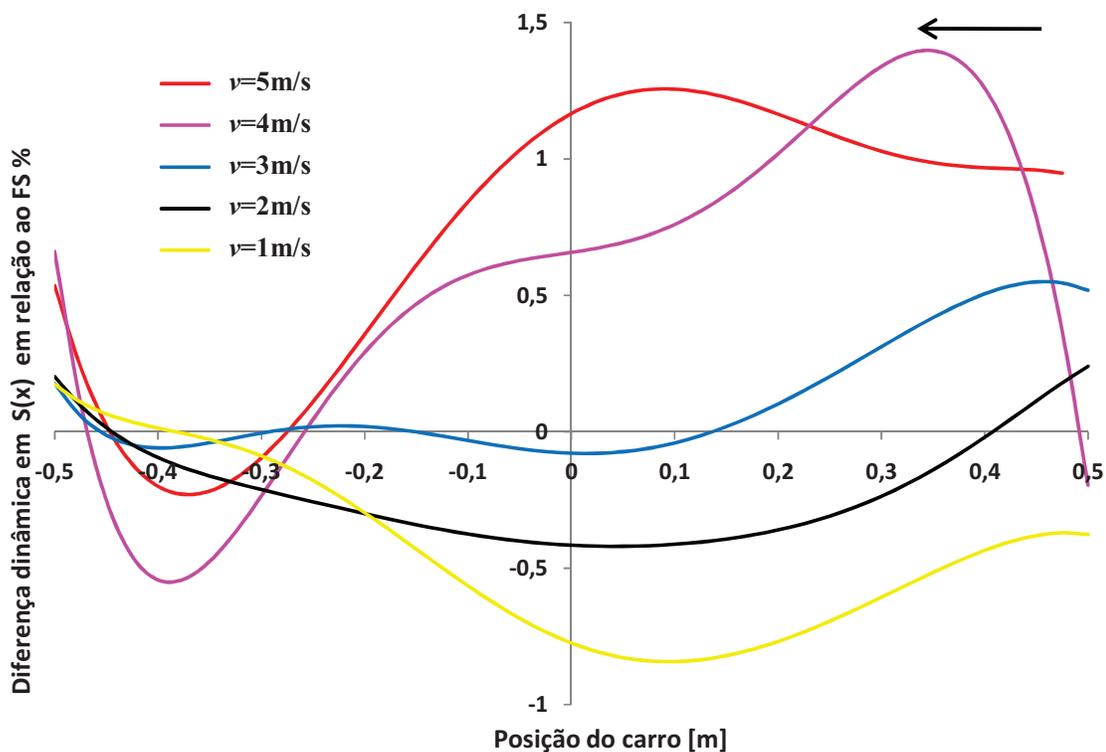


Figura 191 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor II para o ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da esquerda.

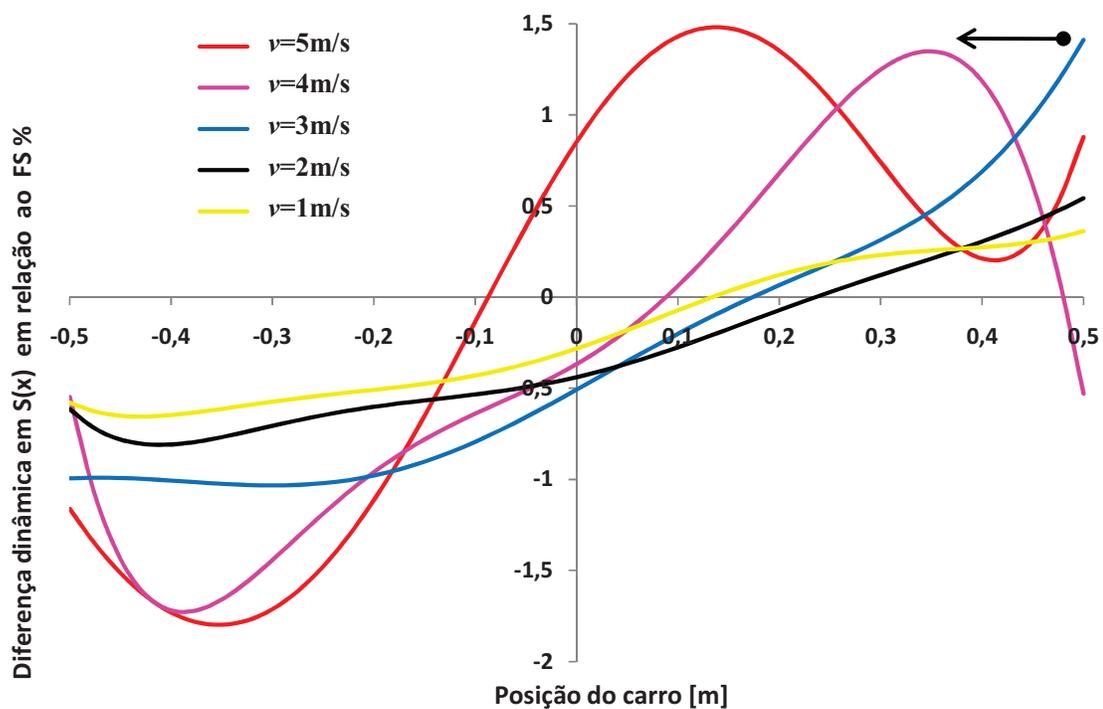


Figura 192 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor II para o ciclo de ida na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.

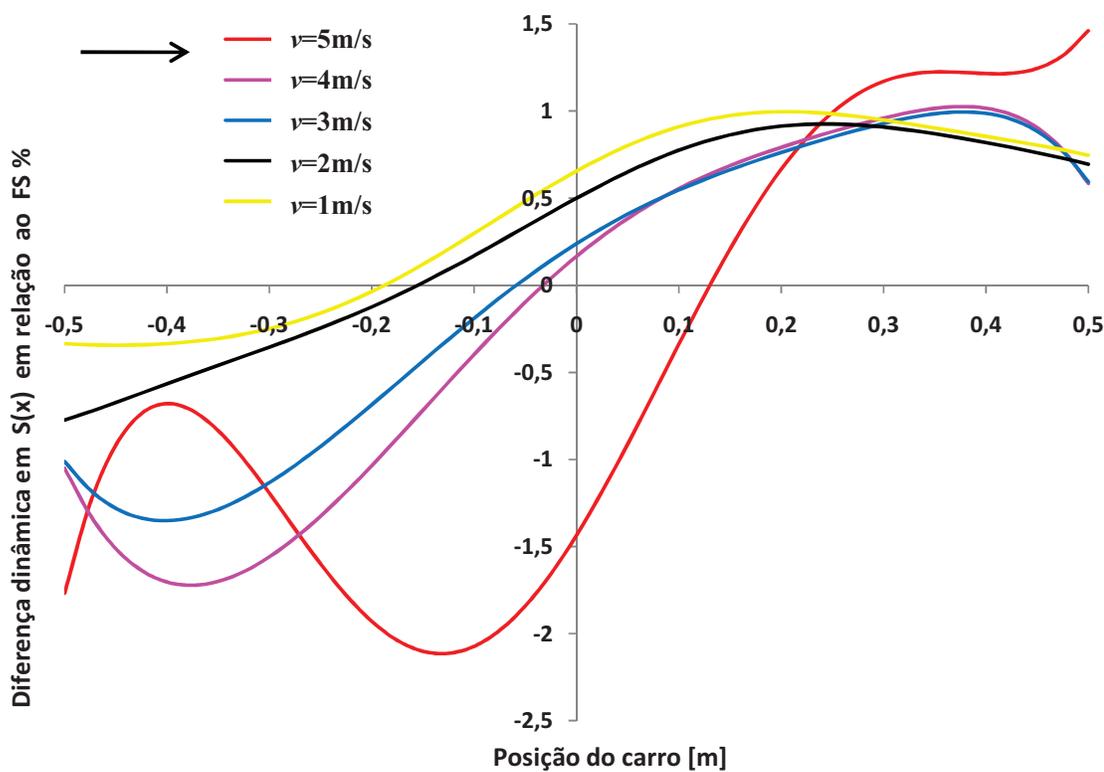


Figura 193 Comparação da diferença dinâmica de $S(x)$ do Transdutor II para o ciclo de volta na frequência de 60 Hz com o carro partindo da direita.

9. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo faz-se uma análise dos resultados obtidos das medidas com fluxo magnético c.a., tanto no caso estático como no caso dinâmico e com fluxo magnético c.c. Também se comenta os problemas enfrentados para obter os resultados.

9.1. RESULTADOS ESTÁTICOS

Os resultados das curvas estáticas medidas das tensões induzidas nas culatras laterais V_1 e V_2 comparados com os valores teóricos dos Transdutores I e II são aproximados, Figuras 63 e 68, quando se leva em conta nas equações teóricas as não linearidades do fluxo magnético disperso e da permeabilidade magnética do aço Fe-Si GO das culatras com a posição do carro. Estas não linearidades podem ser melhor observadas, por exemplo, nas Figuras 59 e 65, onde se vê a soma das tensões induzidas nas culatras laterais V_1 e V_2 que nos dá o fluxo magnético efetivo através nas culatras dos transdutores e onde se pode observar que o valor não é constante com a posição: há um mínimo na posição central e um aumento à medida que se aproxima das extremidades. A variação da permeabilidade magnética em cada ramo do circuito magnético pode ser observada na Figura 60, onde se tem os limites de variação do campo magnético em que operam os transdutores e, em consequência disto, sugere-se haver considerável variação da permeabilidade magnética em cada ramo do circuito magnético.

Analisando as curvas estáticas de tensão induzida nas culatras laterais dos Transdutores I e II e comparando estas com as curvas dinâmicas, porém com velocidade muito baixa, por exemplo, 0,2 m/s, pois para esta velocidade qualquer efeito da ação da velocidade no módulo do sinal seria desprezível, as duas curvas deveriam ser iguais. Mas conforme pode ser visto nas Figuras 110, 112, 114, 116, 118 e 120, as curvas das tensões induzidas V_1 e V_2 apresentam valores da ordem de 10% maior que os valores da curva estática para a frequência de 60 Hz e de 7% para as frequências de 120 e 240 Hz. Entretanto, a força magneto-motriz ou ainda, a corrente no eletroímã e o fluxo magnético criado no eletroímã têm uma variação de 1% a 2% em relação às curvas estáticas, Figuras 111, 113, 115, 117 e 119. Isto mostra que, de alguma forma, o fluxo magnético disperso nas culatras horizontais diminui quando o carro está em um movimento constante, e com isto há uma mudança da permeabilidade magnética nas culatras em relação ao caso estático; ou seja, quando o carro está parado e o fluxo magnético estabelecido, as imperfeições nas lâminas ao longo de seu

comprimento, provavelmente devido ao corte a laser, facilitam a dispersão do fluxo magnético e, quando o carro está em movimento, este efeito é menor.

9.2. RESULTADOS DINÂMICOS C.C.

Na análise da variação do fluxo magnético contínuo, os valores dos sinais gerados nas bobinas exploradoras que seriam a parcela dinâmica a ser adicionada aos valores da curva estática para o Transdutor I, Figura 71, são aproximadamente a metade do valor teórico. No equacionamento do valor teórico leva-se em conta que a permeabilidade magnética c.a. é igual à permeabilidade c.c., mas isto de fato não ocorre, pois a permeabilidade magnética c.c. é sempre menor que a c.a, e essa diferença depende do campo aplicado. Fazendo uma rápida inversão da corrente tem-se um aumento em módulo na tensão gerada na bobina, onde o fluxo magnético está aumentando, quando o carro parte da esquerda ou da direita.

No Transdutor II os sinais gerados nas bobinas exploradoras têm seus valores próximos ao valor teórico. Neste caso, quando o carro parte da esquerda e se realiza uma rápida inversão da corrente no eletro-ímã, há uma diminuição em módulo do sinal gerado na bobina onde o fluxo está crescendo. Já quando o carro parte da direita e havendo a inversão da corrente, o sinal gerado na bobina onde o fluxo cresce, tem um aumento em módulo no sinal.

Como os dois transdutores têm a mesma força magneto-motriz aplicada, o que os diferencia é que, devido à maior janela entre as culatras horizontais no Transdutor II, o fluxo magnético efetivo que circula nas culatras é maior, apesar da relação de fluxo magnético produzido e fluxo magnético disperso ser quase igual nos dois transdutores, Figuras 55 e 56. Tem-se aí, então, uma indicação de que a permeabilidade magnética do material é determinante para seu funcionamento.

9.3. RESULTADOS DAS DIFERENÇAS DINÂMICAS C.A.

Como visto anteriormente, a análise dos resultados para os erros dinâmicos em velocidades altas tem de ser feita em relação à curva obtida para velocidades muito lentas, no caso 0,2 m/s, e não em relação à curva estática.

Para o tipo de transdutor estudado, pode-se notar um padrão para a diferença dinâmica nas situações das três frequências aplicadas, quando o fluxo magnético está diminuindo ou aumentando e quanto ao ciclo do movimento e sua posição de partida.

Por exemplo, para o Transdutor I, nas Figuras 128, 129, 130, 140, 141 e 142, quando o carro parte do repouso seja da esquerda ou da direita, e o fluxo magnético está diminuindo, a diferença inicia pequena e aumenta como uma rampa mais inclinada, e as curvas das diferenças dinâmicas para as velocidades medidas são muito próximas uma das outras. Quando o fluxo magnético está aumentando, a diferença dinâmica, para as várias velocidades, também começa muito pequeno ou negativo, crescendo de maneira mais suave até um máximo no meio do percurso e diminuindo um pouco a partir daí, sendo estas curvas mais espaçadas entre si. As variações da diferença dinâmica tanto em V_1 como em V_2 para cada frequência são da mesma ordem de grandeza.

Quando o carro faz o ciclo de volta, seja partindo da esquerda ou da direita, Figuras 131, 132, 133, 143, 144 e 145, o fluxo magnético inicia de um valor diferente de que quando parte do repouso. Quando o fluxo magnético está diminuindo, a diferença dinâmica parte de valores geralmente negativos, aumentando em uma rampa mais inclinada com uma tendência a diminuir no final do percurso, ficando neste caso as curvas das diferenças dinâmicas bem mais próximas para as várias velocidades de que no caso anterior. Quando o fluxo magnético está aumentando, a diferença dinâmica tende a ter um comportamento mais constante ao longo do percurso das curvas das diferenças dinâmicas para as várias velocidades, sendo estas bem mais escalonadas entre si. Outra diferença com o caso anterior é que, quando o fluxo magnético está aumentando, a ordem de grandeza da diferença dinâmica é maior do que quando o fluxo magnético está diminuindo.

Analisando as diferenças dinâmicas de V_1 e de V_2 do Transdutor II, pode-se notar que há um mesmo padrão nas curvas das diferenças dinâmicas relativo ao sentido do movimento e de quando o fluxo magnético está crescendo ou diminuindo. Assim, pode-se notar que as curvas do Transdutor II, Figuras 158, 159, 160, 170, 171 e 172, seguem o mesmo padrão de diferença dinâmica das curvas, Figuras 128, 129, 130, 140, 141 e 142, do Transdutor I. Do mesmo modo, as curvas das Figuras 161, 162, 163, 173, 174 e 175, do Transdutor II, têm o mesmo padrão de diferença dinâmica que as Figuras 131, 132, 133, 143, 144 e 145, do Transdutor I.

Isto nos mostra que há uma diferença significativa do fluxo magnético através da culatra do transdutor no ciclo de ida, em que o carro parte do repouso, e do ciclo da volta, onde o fluxo magnético não tem tempo de se estabelecer estaticamente. Como os dois transdutores apresentaram o mesmo tipo de padrão de diferença dinâmica para V_1 e V_2 , esta variação pode ser resultado de problemas causados por imperfeições resultantes do tipo de

corte usado nas lâminas do material ou de alguma propriedade física do material em relação à passagem do fluxo magnético de forma dinâmica.

A diferença no sinal dinâmico medido aqui não é devido a uma lei da geral da física (Lei de Faraday-Lenz) sobre a variação do módulo do fluxo magnético causado pelo deslocamento rápido do carro que provoca uma rápida variação do módulo do fluxo magnético nas bobinas exploradoras, mas sim por uma variação do fluxo magnético disperso, que muda o fluxo magnético líquido dentro do circuito magnético, modificando a permeabilidade magnética ao longo das culatras horizontais e, como se está usando uma fonte de corrente, a força magneto-motriz não se altera, e com isto observa-se uma variação da relutância do circuito magnético.

9.4. PROBLEMAS ENFRENTADOS

O corte a Laser da chapa de Fe-Si GO trouxe alguns problemas:

- a) A largura da culatra horizontal não foi uma escolha de projeto, pois para larguras menores a lâmina cortada ficava repuxada.
- b) O corte no comprimento da lâmina da culatra não ficou perfeitamente reto, apresenta uma leve curvatura.
- c) A chapa de Fe-Si GO quando cortada a Laser apresenta rebarbas, que tiveram que ser limadas, assim como para os furos feitos na chapa para os parafusos de fixação e aperto. Isto certamente causa curto-circuito magnético e conseqüentemente aparecem correntes de Foucault, pois a película isolante da lâmina é retirada nesta região com este processo, diferentemente do ocorre no processo de estampagem ou corte com jato d'água, onde a película isolante fica intacta.
- d) O aquecimento resultante do corte na borda das lâminas deve modificar as características físicas do material no entorno do corte, introduzindo defeitos como alterações nos domínios magnéticos que podem aumentar o fluxo magnético disperso.
- e) A baixa permeabilidade magnética encontrada na chapa de Fe-Si GO utilizada, Figura 35, aumenta o fluxo magnético disperso e diminui a linearidade do sinal.
- f) As guias do movimentador não são perfeitamente retas, apresentando uma leve flecha no meio de 1 mm em relação às pontas e, como o carro está firmemente ligado ao movimentador, este pressiona as culatras horizontais.

- g) Ruído na régua potenciométrica causado pelo servo-conversor. Neste caso o uso de um filtro funciona bem para a medição estática da posição, mas, quando o carro está em movimento, o filtro introduz um erro na medição da posição, por isto optou-se por fazer um tratamento matemático dos dados da posição com o MATLAB.

9.4.1. Estabilidade térmica do transdutor

O transdutor apresenta uma variação do sinal das bobinas exploradoras quando este é ligado e depois de decorrido algum tempo, ou seja, o transdutor precisa atingir a estabilidade térmica, conforme pode ser visto na Figura 194 e 195 abaixo, onde se vê o sinal de tensão das bobinas exploradoras com o passar do tempo com o carro partindo da esquerda na frequência de 60 Hz.

Tanto para V_1 como para V_2 a tensão induzida é menor ao ligar-se o Transdutor I, depois de algum tempo as curvas têm um aumento no sinal até atingir a estabilidade, e pode-se notar que em V_1 as curvas apresentam uma variação gradual, mas em V_2 as curvas têm uma variação muito pequena no início, dando um salto no final.

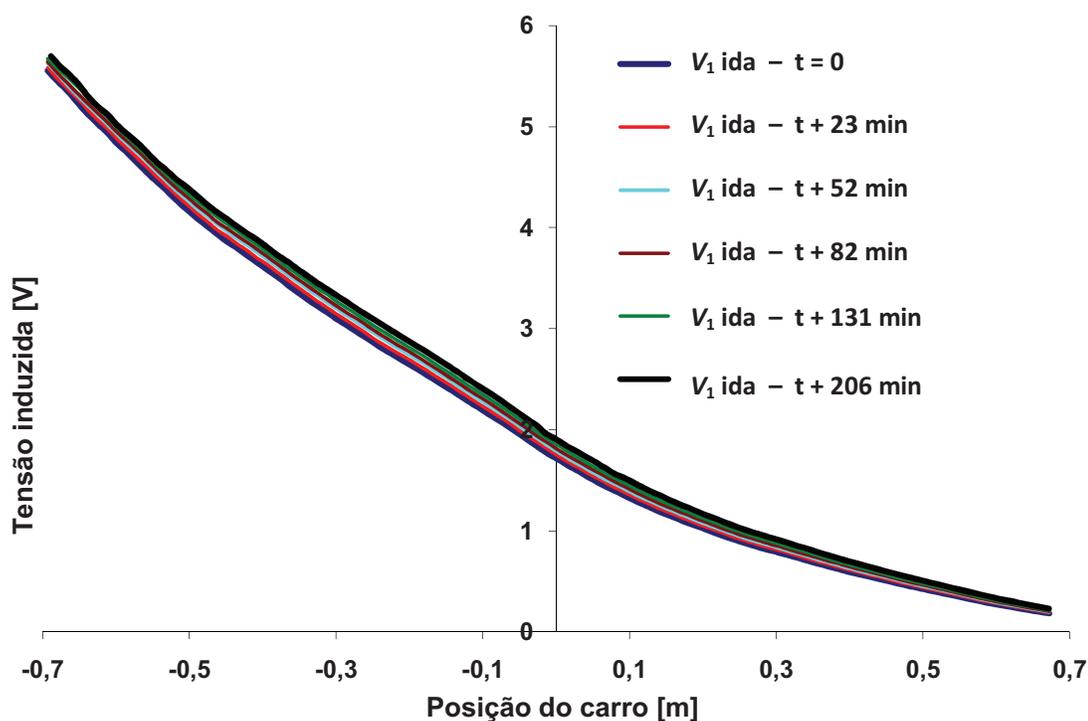


Figura 194 Variação do sinal em V_1 com o tempo até atingir a estabilização do Transdutor I com o carro partindo da esquerda para frequência de 60 Hz.

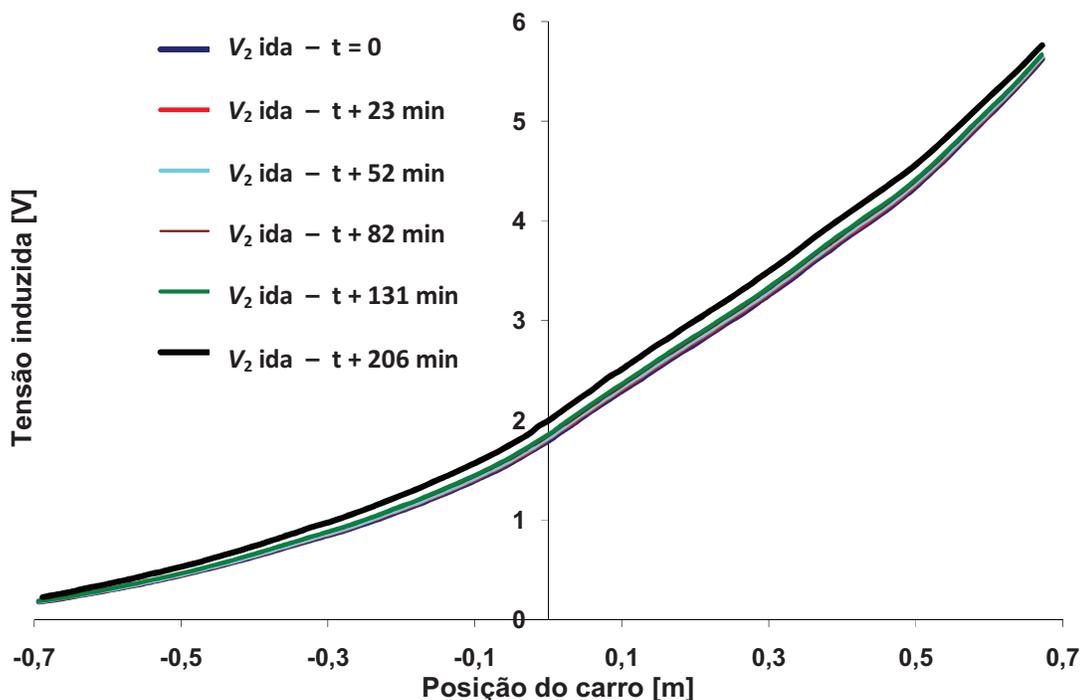


Figura 195 Variação do sinal em V_2 com o tempo até atingir a estabilização do Transdutor I com o carro partindo da esquerda para frequência de 60 Hz.

Uma explicação para este fato pode ser um processo físico que ocorre no material chamado magnetoestricção, que é a propriedade dos materiais ferromagnéticos de se deformarem pela presença de um campo magnético externo, ou o seu contrário, o efeito Villari, quando um material ferromagnético sofre uma deformação, este induz um campo magnético [SOMMER].

No nosso caso, as lâminas das cultras horizontais de Fe-Si GO estão firmemente prensadas via parafusos de latão ao longo de seu comprimento a duas cantoneiras de alumínio, o material pode sofrer dilatação devido à presença do campo magnético ou devido ao aquecimento resultante das perdas no núcleo e, como está firmemente prensada, sofre tensões mecânicas ou deformações. Em qualquer um dos casos há uma mudança da permeabilidade magnética do material que resulta em uma variação do sinal.

10. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento do estudo para o caso dinâmico do transdutor de posição magnético mostrou que se têm condições de analisar os sinais do transdutor tanto para o caso estático como dinâmico, sendo desenvolvidos para o estudo técnicas de montagem, usinagem de peças, acoplamentos mecânicos, *software* de automação entre outros. O maior problema enfrentado foi a confecção das lâminas, a escolha do material ferromagnético e a disponibilidade deste no mercado para compra do que se precisava.

10.1. CONCLUSÃO

Apesar de não se conseguir demonstrar experimentalmente a parcela da diferença do sinal gerado pela variação do módulo do fluxo magnético nos sinais das bobinas exploradoras V_1 e V_2 , que seria causado pela velocidade com que o carro se desloca, e o sinal gerado pelo fluxo magnético senoidal estático nesta bobinas, pois apesar do fluxo magnético criado no eletro-ímã ser constante, tanto com o carro parado ou quando em movimento, o mesmo não acontece com o fluxo magnético disperso que diminuiu com a velocidade do carro, não se podendo assim comparar os dois casos. Esta diferença deveria ser muito pequena como demonstrado no desenvolvimento teórico, onde a soma dos dois sinais é feita de maneira vetorial e ortogonal, ficando este aqui sobrepujado por outro sinal nas bobinas exploradoras V_1 e V_2 causado pela variação entre o fluxo disperso estático e o dinâmico. Esta diferença é bem provável que venha de defeitos nas bordas das lâminas nos domínios magnéticos causados pelo tipo de corte usado, porém, se o material utilizado tiver uma alta permeabilidade, e o corte for feito por estampagem ou jato d'água, essa diferença deve ser bem reduzido.

A comparação da diferença dinâmica feita entre curvas de V_1 e V_2 com velocidade muito lenta e curvas de V_1 e V_2 com velocidades altas mostram um comportamento diferente para o ciclo de ida e de volta e simétricas em relação ao ponto de partida, se à esquerda ou à direita, evidenciando um padrão de comportamento dessa diferença para estes dois transdutores.

A diferença dinâmica do sinal de saída $S(x)$ é relativamente menor que as diferenças dinâmicas de V_1 e V_2 pelo fato do sinal de saída ser diferencial. Isto compensa as diferenças maiores nas bobinas exploradoras, como visto para os Transdutores I e II para frequência de 60 Hz. Aqui não está incluído o erro da resposta de um condicionador de sinais que faria a

conversão das tensões c.a. das bobinas em c.c. e realizaria a operação de divisão da subtração pela soma dos sinais de V_1 e V_2 .

O estudo dinâmico do transdutor de posição magnético mostrou que usando o modo diferencial para medir a posição, o efeito da velocidade e da diferença do fluxo magnético disperso entre o caso estático e o dinâmico afetaria de forma marginal o resultado.

Um aspecto importante do trabalho foi o desenvolvimento da bancada para ensaio e aferição de transdutores de posição lineares com o emprego de um transdutor de posição resistivo para a referência de posição, um sistema de aquisição de sinais para a medição das grandezas envolvidas no processo e um conjunto movimentador e servo-motor para controle da velocidade e posição da parte móvel do transdutor e o desenvolvimento de um programa na plataforma do Labview para controlar todo o processo de medição e movimentação.

10.2. RECOMENDAÇÕES

Uma recomendação que se pode fazer é confeccionar um outro transdutor com as mesmas medidas, mas com o corte das lâminas feitas por estampagem ou jato d'água, evitando assim curtos circuitos magnéticos também com outro tipo de aço, que possibilita trabalhar com frequências altas, para comparar a influência das propriedades físicas e construtivas dos materiais usados e assim ter parâmetros para determinar de fato o que ocorre com o fluxo magnético disperso quando o carro está parado e quando está em movimento.

Fazer um estudo para confecção de um condicionador de sinais para o modo diferencial, pois como se viu no capítulo 8 a diferença dinâmica calculada para o sinal diferencial foi muito menor do que as diferenças dinâmicas medidas nas bobinas exploradoras. O ideal seria que o condicionador e o material utilizado na confecção do transdutor operassem numa frequência mais alta que as usadas para se ter uma melhor resolução na medição e de modo a se poder adaptar o condicionador de sinais do LVTD. Quando se utiliza um material tipo Fe-Si, que opera em 60 Hz, e o carro percorre uma distância de um metro à velocidade de 5 m/s, haverá neste percurso somente 12 períodos de senóide o que é muito pouco para se obter uma boa resolução na medida.

Sugere-se que seja analisada a influência dos aspectos magnéticos do material empregado no transdutor sobre os resultados. Para tanto e dada as dimensões dos transdutores testados, o efeito de magnetoestricção deve ser avaliado assim como a utilização das curvas de magnetização

do material numa análise não linear. Outra alternativa é estudar o uso de ferrite como meio magnético numa régua magnética de menores dimensões, dado a possibilidade de se usar frequências elevadas.

Outra recomendação é fazer um estudo da incerteza combinada dos equipamentos de medição, dos pontos medidos e do tratamento matemático destes pontos. No nosso sistema de medição, por exemplo, o transdutor de posição resistivo, que dá a referência de posição, tem uma incerteza dada pelo fabricante e o DAQ, que mede os outros valores, tem outra incerteza e esta muda conforme a escala usada. O conjunto de pontos medidos e tratados matematicamente também tem outra incerteza, com isto, tem-se que equacionar a soma de cada incerteza, cada uma com seu peso a fim de se obter uma incerteza combinada final.

REFERÊNCIAS

- ADENOT, S.; YONNET, Y.P.; FOGGIA, A. Angular position sensor with permanent magnets. In: WORKSHOP ON RARE EARTH MAGNETS, 14., 1996, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: World Scientific, 1996. p. 624-631.
- ADENOT, S. **Étude de capteurs magnétiques de position angulaire.** 1996, f. 105, Thèse de Doctorat de l'INPG. Université de Soutenance, Grenoble, 1996.
- ASCH, G. **Les capteurs en instrumentation industrielle.** Dunod : 1991. 328 p.
- BASAK, A.; FLORES FILHO, A.F.; BASTOS, J.P.A. Computation of magnetic flux density in a PM DC linear motor by 3d edge elements method. In: THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NON-LINEAR ELECTROMAGNETIC SYSTEMS, 1995, Cardiff, **Proceedings...** Cardiff: Wales, 1995, p.63
- BASAK, A.; et al. Three dimensional computation of force in a novel brushless dc linear motor. **IEEE Transaction on Magnetics**, New York, v.33, n. 2, p. 2030-2032, 1997
- BASTOS, J.P.A.; BASAK, A.; FLORES FILHO, A.F. Evaluation of Nd-Fe-B magnet inductions in a slotless linear stepping motor by a 3d edge elements method. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON ELECTROMAGNETISM, Cbmag95, 1995, Florianópolis, **Proceedings...** Florianópolis: UFSC, 1995. p.351-353.
- BASTOS, J.P.A. **Eletromagnetismo e cálculos de campos.** 3 ed. Florianópolis: UFSC, 1996.
- BINNS, K.J.; LAWRENSON, P.J.; TROWBRIDGE, C.W. **The analytical and numerical solution of electric and magnetic fields.** New York: John Wiley & Sons, 1992.
- BOZORTH, R.M. **Ferromagnetism.** Piscataway: IEEE, 1993.
- BRUSAMARELLO, V., J., **Tecnologia LVTD** (linear variable differential transforme) Disponível em: <<http://hermes.ucs.br/ccet/demc/vjbrusam/inst/lvdt20062.pdf>> Acesso em: 1 jun. de 2011
- CAPTEUR de Position Angulaire. Disponível em: < <http://www.esiee.fr/~amendolg/capt-angl.html> >. Acesso em: 10 maio 2003.
- CHAI, HI-DONG. **Electromechanical motion devices.** Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.
- DELLA TORRE, E. **Magnetic material.** Piscatawa: IEEE, 1999.
- FIZTGERALD, A.E.; KINGSLEY, C.; KUSKO JR, A. **Máquinas elétricas.** São Paulo: MacGraw Hill, 1975.

- FLORES FILHO, Á.F. **Aplicação do método dos elementos finitos à análise de dispositivos eletromagnéticos.** Porto Alegre: UFRGS, 1997.
- FLORES FILHO, Á.F., MÜLLER, R. **Sensor magnético de posição linear (régua magnética)**, BR n. PI 0105970-0, 2001, 2003.
- FLORES FILHO, A.F. **Ímãs permanentes de terras raras: utilização industrial.** Porto Alegre, Delet/EE/UFRGS,1997. Apostila de curso.
- FLORES FILHO Á.F.; MÜLLER, R.. Analysis and test of an eletromagnetic linear position sensor. In: INTERNATIONAL MAGNETICS CONFERENCE – INTERMAG, 2003, Boston. **Proceedings...** Boston: IEEE, 2003.
- FLORES FILHO Á. F.; MÜLLER, R. Análise e Teste de um Sensor Magnético de Posição linear. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO – CBMAG, 5., 2002, Gramado. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Eletromagnetismo, 2002.
- FLORES FILHO, Á. F.; BASAK, A. The use of Nd-Fe-B-type magnets in a novel brushless dc linear motor. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON RARE-EARTH MAGNETS AND THEIR APPLICATIONS, 13., 1994, Birmingham. **Proceedings...** Birmingham: University of Birmingham, 1994. p. 137-143.
- FLORES FILHO, Á. F.; et al. Three dimensional computation of force in a novel brushless dc linear motor. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 33, n. 2, p. 2030-2032, 1997.
- FLORES FILHO, A. F. **Investigation of a double armature homopolar brushless d.c. Linear Motor**, 1996, 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), - University of Wales, Cardiff, 1996.
- GONÇALVES L. M. G. **Sensores.** Disponível em:< <http://www.dca.ufrn/~lmarcos/visão>>. Acesso em: 10 nov. 2008.
- IDA, N.; BASTOS, J.P.A. **Electromagnetics and fields.** 2 ed. New York: Springer Verlag, 1997.
- HADJIPANAYIS, G. C. **Magnetic hysteresis in novel magnetic materials.** Dordrecht: Kluwer, 1997.
- HOOLE, S.R.H. **Computer-aided analysis and design of electromagnetic devices.** Oxford: Elsevier, 1989.
- KILLIAN, C. T. **Modern control technology: components and systems.** Disponível em: <http://www.ime.eb.br/~aecc/Automacao/Sensores_Parte_1.pdf>. Acesso em: 1 jun. de 2011.
- KRAUSE, P.; WASYNCZUK, O. **Electromechanical motion devices.** New York: Mcgraw Hill, 1989.
- LEMARQUAND, G.; LEMARQUAND, V. Annular magnet sensor. **IEEE Transaction on Magnetics**, v. 26, n 4, p. 2041, Sept. 1990.
- LOWTHER, D.A.; SILVESTER, P.P. **Computer-aided design in magnetics.** Mishawaka: Springer-Verlag, 1986.

MAGNÉTOMETRE Piézorésistif. Disponível em: <<http://www.esiee.fr/~amendolg/magnet.html>>. Acesso em: 10 maio 2003.

MCCURRIE, R.A. **Ferromagnetic material: structure and properties**. London: Academic Press, 1994.

MEASURING Position and Displacement with LVDTs. Disponível em: <http://zone.ni.com/devzone/preticehall.nsf/webmain/E0323D0E70085C6B8625680F005CAC2D?opendocument&node=DZ52538_US>. Acesso em 10 maio 2003.

MMTs documentation. **Magnet analog rotary position**. MMTs French patent FR19900015223. France, 1990.

MÜLLER, R. ; FLORES FILHO, Á. F. . A new differential magnetic flux position transducer: analysis, simulation and test results. **Journal of Applied Physics**, Boston, v. 99, p. 318-1-318-3, June 2006

MÜLLER, R. ; FLORES FILHO, Á. F. . Desenvolvimento de um Novo Sensor Eletromagnético de Posição Linear. **Ciência & Engenharia**, Uberlândia, ano 12, n. 3, p. 37-41, dez. 2003.

MÜLLER, R. ; FLORES FILHO, Á. F. Análise e Teste de um Sensor Magnético de Posição Linear. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, 5., 2002, Gramado, 2002.

MÜLLER, R. ; FLORES FILHO, Á. F. . A new differential magnetic flux position transducer: Analysis, simulation and test results. In: ANNUAL CONFERENCE ON MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, 50., 2005, San José. **Abstracts...** San Jose, 2005, v. 1, p. 28.

MÜLLER, R. ; FLORES FILHO, Á. F. . Analysis and Test of an Eletromagnetic Linear Position Sensor. In: INTERNATIONAL MAGNETICS CONFERENCE, 2003, Boston. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2003. p. CQ091-CQ092.

MÜLLER R.. Estudo e desenvolvimento de um transdutor de posição linear magnético diferencial. 2003. 165 f. Tese (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003

NOGUEIRA, A.F.L. **Computation of cogging torques in permanent-magnet machines using the finite element method**. 1992, f. 106, Ph.D. thesis.,- University of Wales, Cardiff, 1992.

OPERA 3D: reference manual.Oxford: Vector Fields Limited, 1994.

PIATON, J.; ADENOT, S.; YONNET, J.P.; FOGGIA, A. **Capteur magnétique de position**. F. patent FR199603990, 1996.

SILVESTER, P.P.; FERRARI, R.L. **Finite elements for electrical engineers**. 2.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

SOMMER, R. L. ; LIVI, F. P. Barkhausen noise measurements in small (110)[001] Silicon-Iron samples. *Physica Status Solidi A*, v. 120, p. 609-615, 1990.

TECHNICAL documentation Philips semiconductor. KM110BH/2390, nov. 1990.
Disponível em: < http://semiconductors.philips.com/acrobat/datasheets/KM110BH/2430_70_3.pdf >. Acesso em: 10 maio 2003.

YONNET, Y.P.; FOGGIA, A.; ADENOT, S. A differential magnetic position sensor.
Sensors and Actuators: Part A Physical, v. 81, n. 1-3, p. 340-342, Apr. 2000.

YONNET, J.P.; FOGGIA, A.; ADENOT, S. Permanent magnet position sensor. In:
WORKSHOP ON RARE EARTH MAGNETS AND THEIR APPLICATIONS, 15, 1998
Dresden. **Proceedings...**Dresden, 1998, p. 847-852.

YONNET, J.P.; TUR, M.; VOYANT, J.Y. Permanent magnet for large linear displacement.
In: WORKSHOP ON RARE EARTH MAGNETS AND THEIR APPLICATION, 16.,
2000, Sendai. **Proceedings...** Sendai: The Japan Institute of Metal, 2000. p. 1155-1161.

APÊNDICE A

Os gráficos das Figuras 169 a 219 mostram as curvas estáticas médias de um total de dez curvas para cada ciclo de ida e volta de V_1 e V_2 para o Transdutor I quando o carro parte da esquerda e depois da direita para cada frequência e os desvios padrões dos piores casos de V_1 e/ou V_2 para cada frequência do carro partindo da esquerda e da direita com os desvios padrões das outras grandezas medidas, $S(x)$ e seu desvio padrão. E nas Figuras 220 a 222, estão as médias das curvas de ida e volta de V_1 e V_2 . Nos gráficos das médias de ida e volta de V_1 e V_2 são mostrados os níveis de histerese definida como o máximo desvio entre as curvas médias do ciclo de ida e volta dividido pelo fundo de escala, assim

$$Histerese\% = 100 \text{Hist}_{\max} / FS_s \quad (200)$$

onde o Fundo de Escala (FS) é dado por:

FS_s de V_1 é 5,51 V para 60 Hz

FS_s de V_2 é 5,60 V para 60 Hz

FS_s de V_1 é 5,46 V para 120 Hz

FS_s de V_2 é 5,52 V para 120 Hz

FS_s de V_1 é 5,27 V para 240 Hz

FS_s de V_2 é 5,24 V para 240 Hz

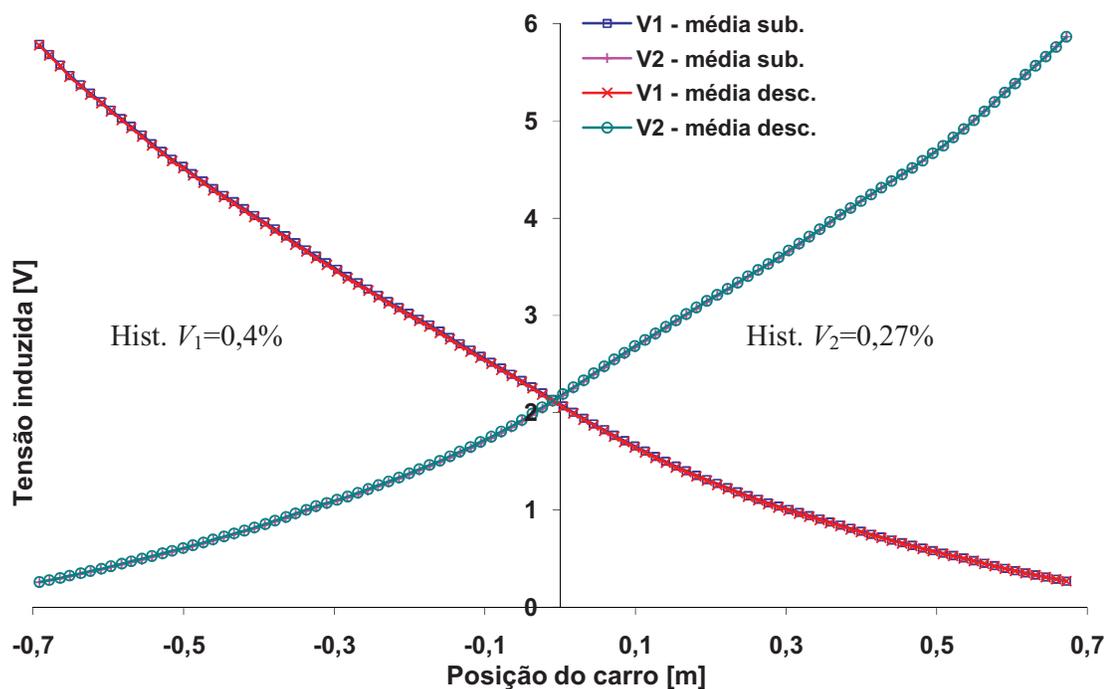


Figura 196 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 60$ Hz

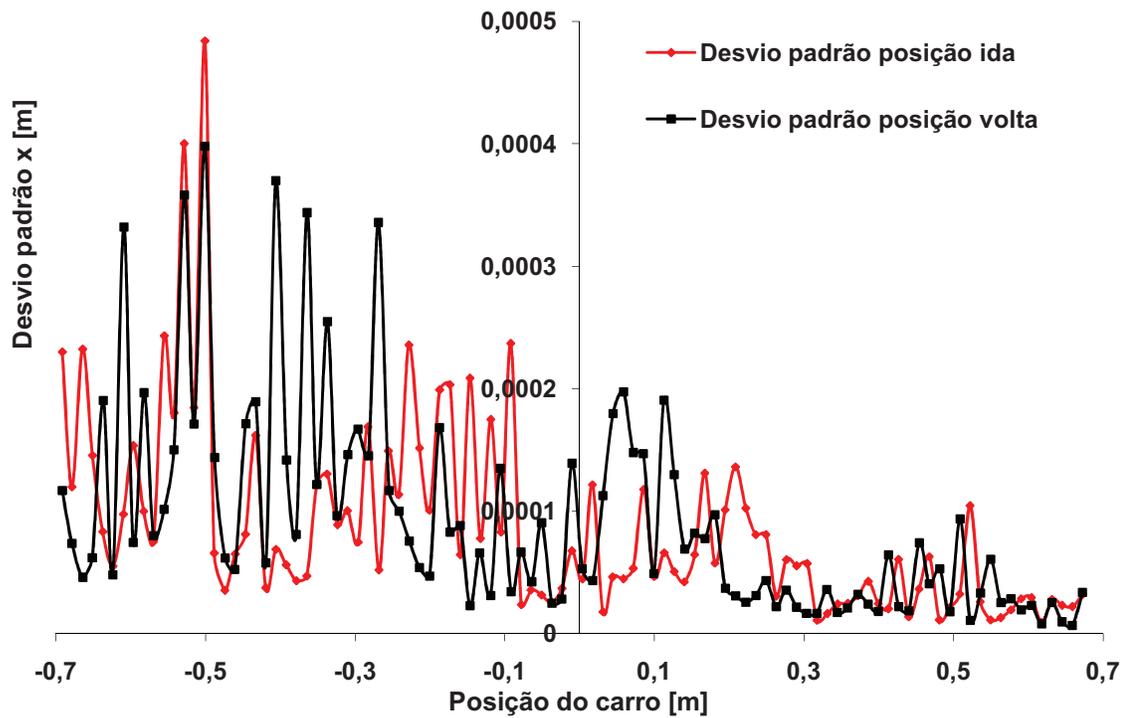


Figura 197 Gráfico dos desvios padrões da posição x para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 60$ Hz

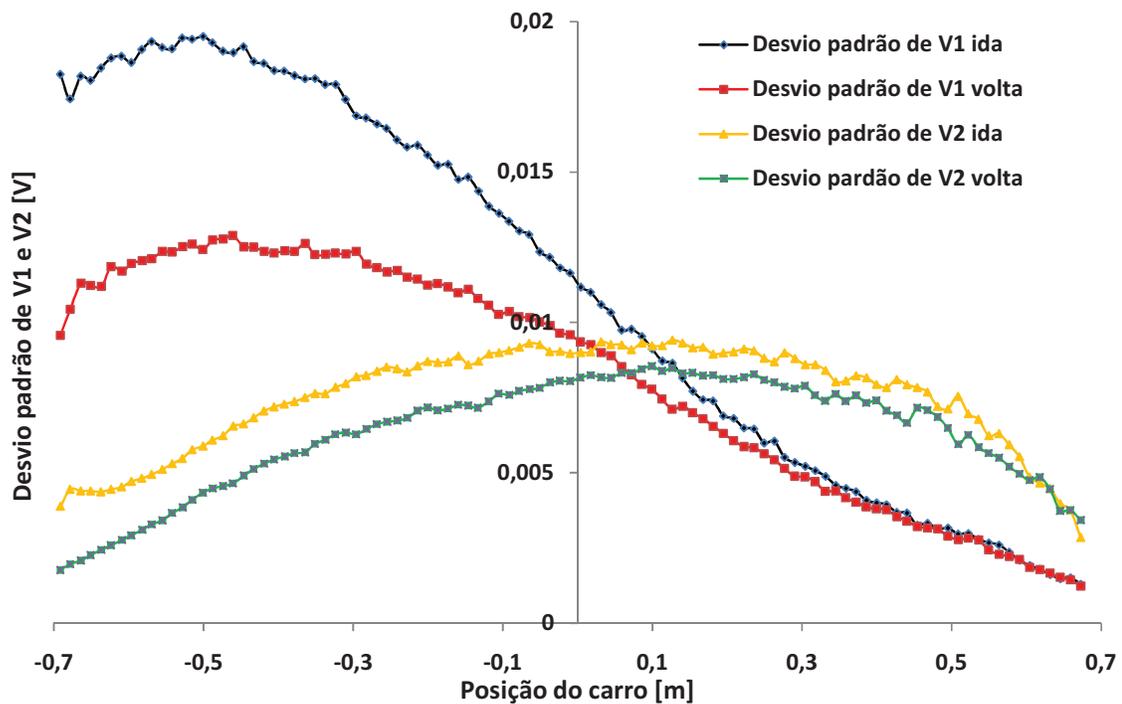


Figura 198 Gráfico do pior caso dos desvios padrões de V_1 e V_2 para o ciclo de ida e volta com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 60$ Hz

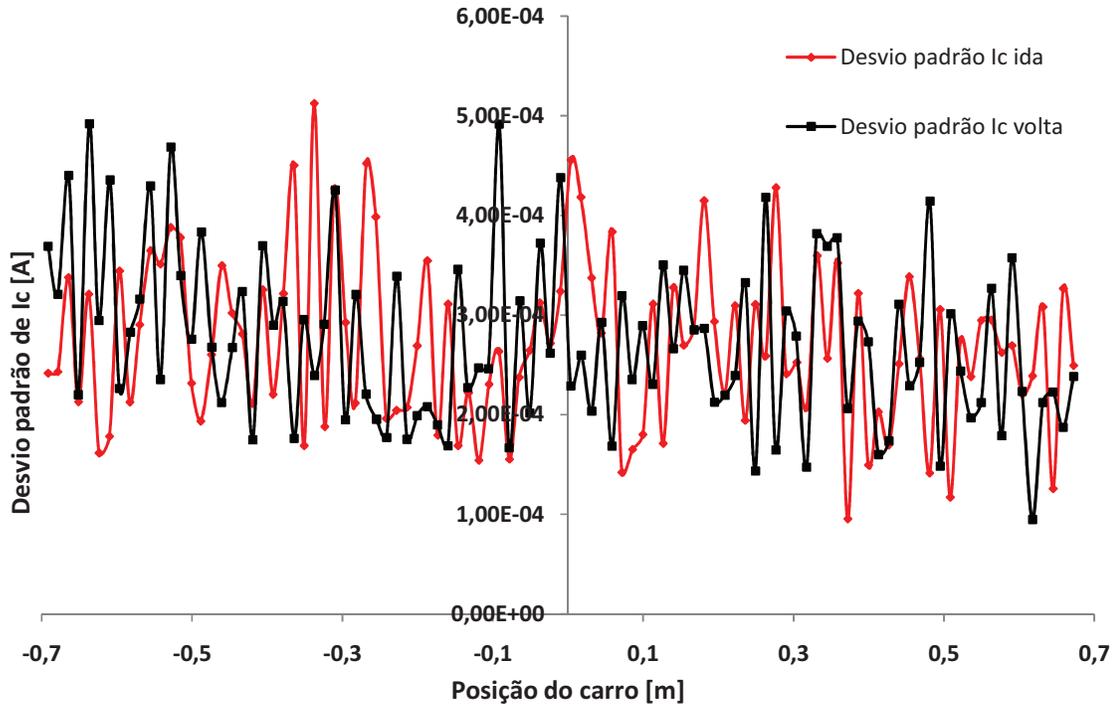


Figura 199 Gráfico dos desvios padrões da corrente I_c para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 60$ Hz

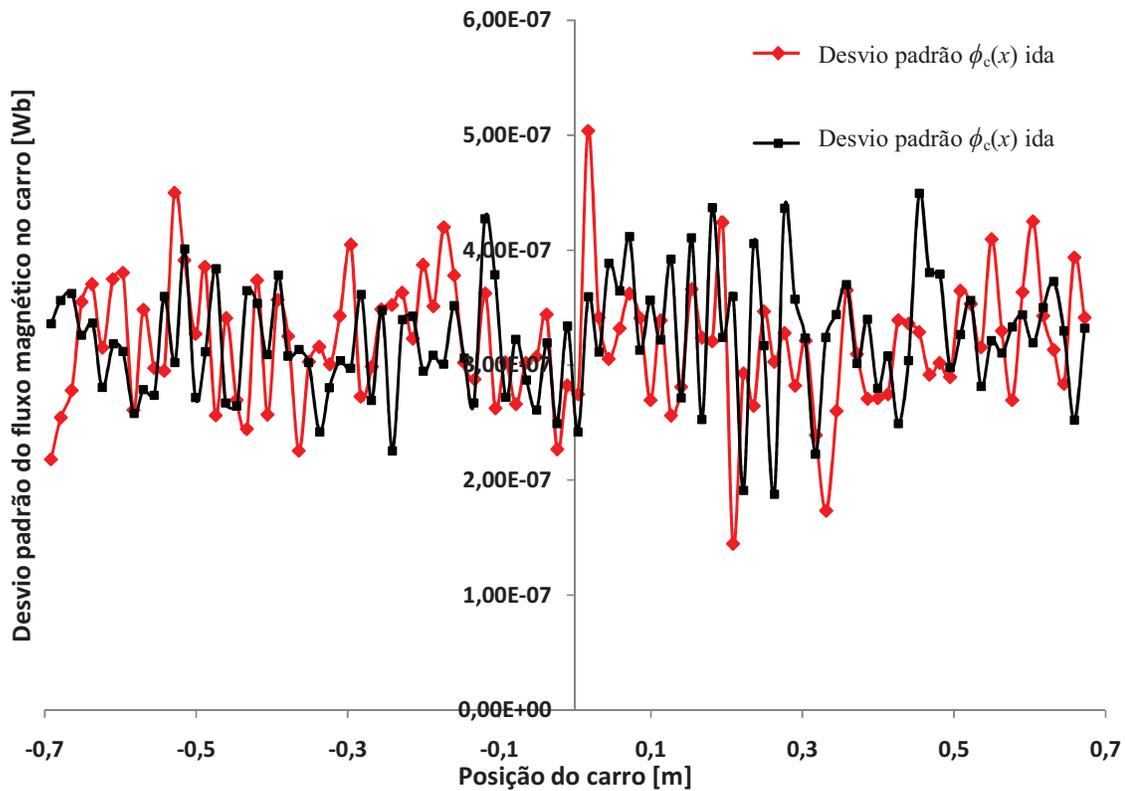


Figura 200 Gráfico dos desvios padrões do fluxo magnético no carro $\phi_c(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 60$ Hz

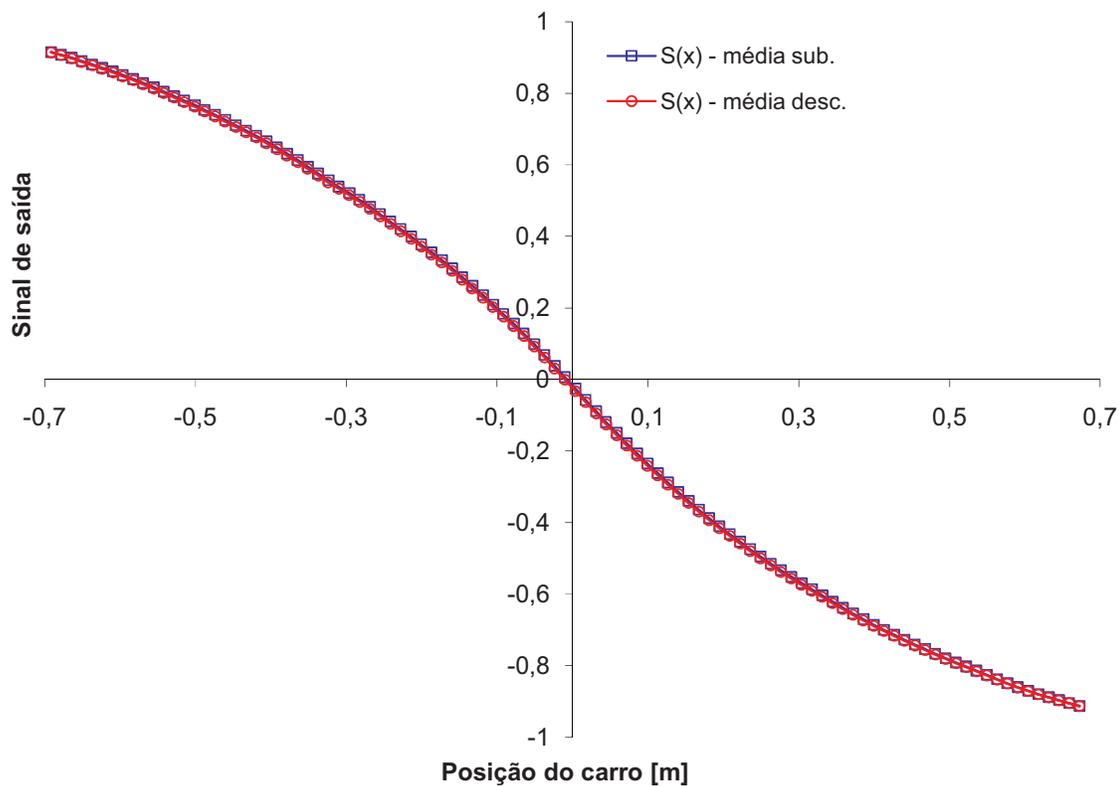


Figura 201 Curva média de subida e descida de $S(x)$ com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz

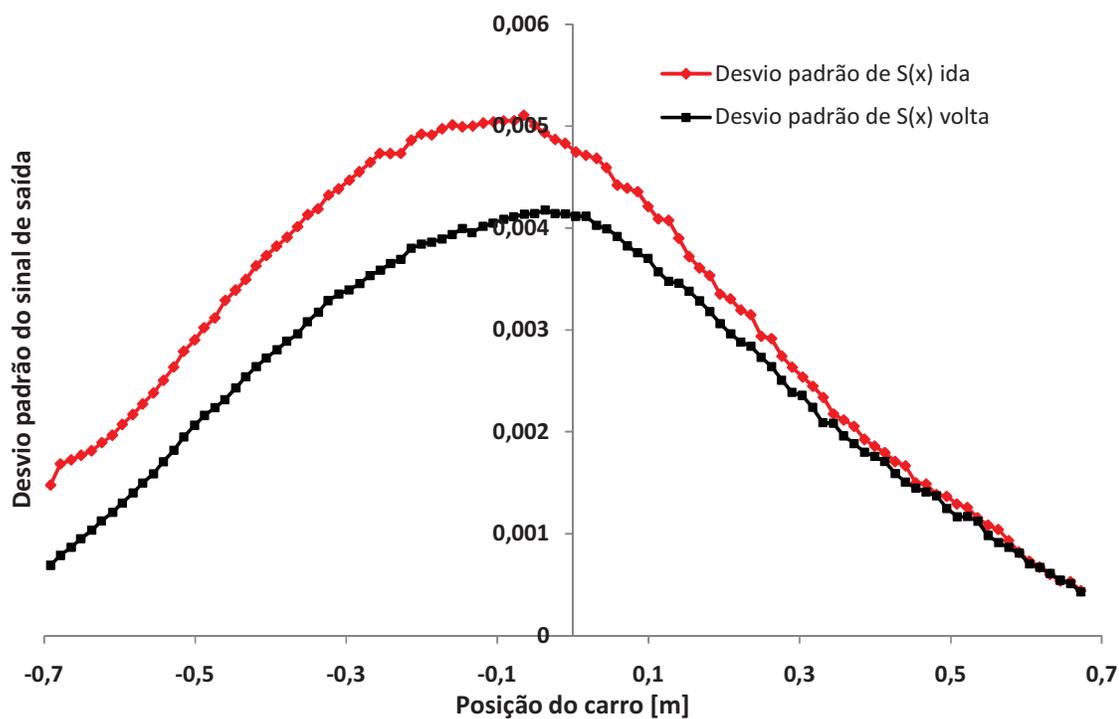


Figura 202 Gráfico dos desvios padrões $S(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz

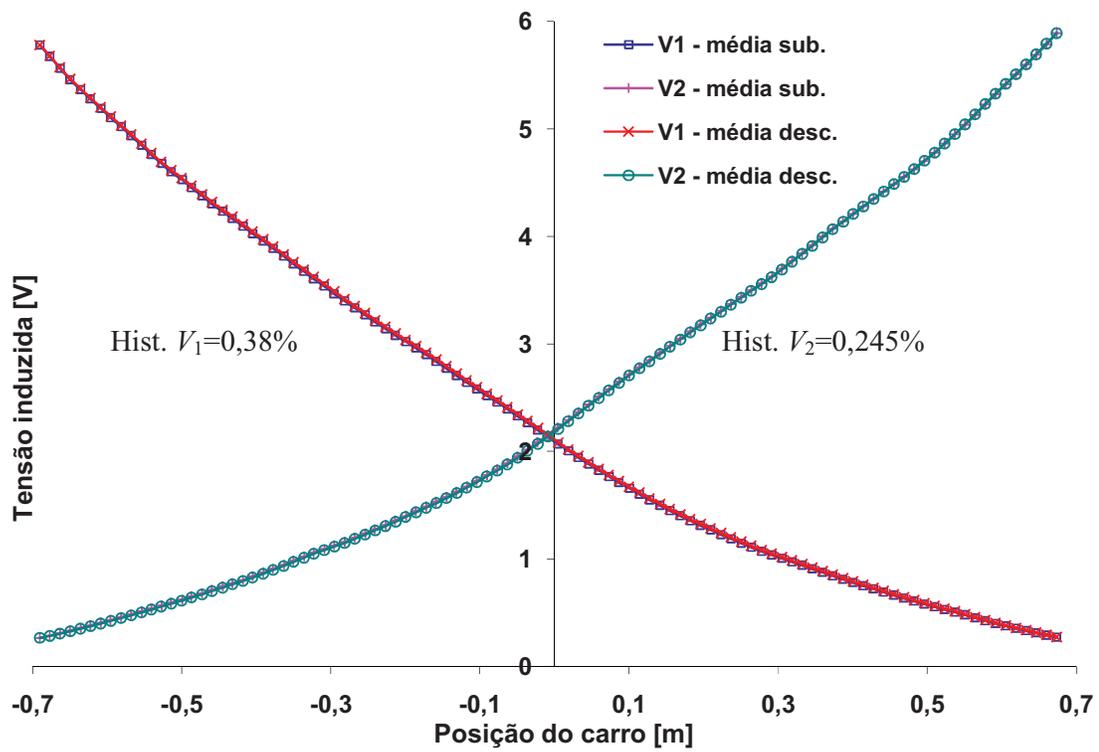


Figura 203 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=60$ Hz

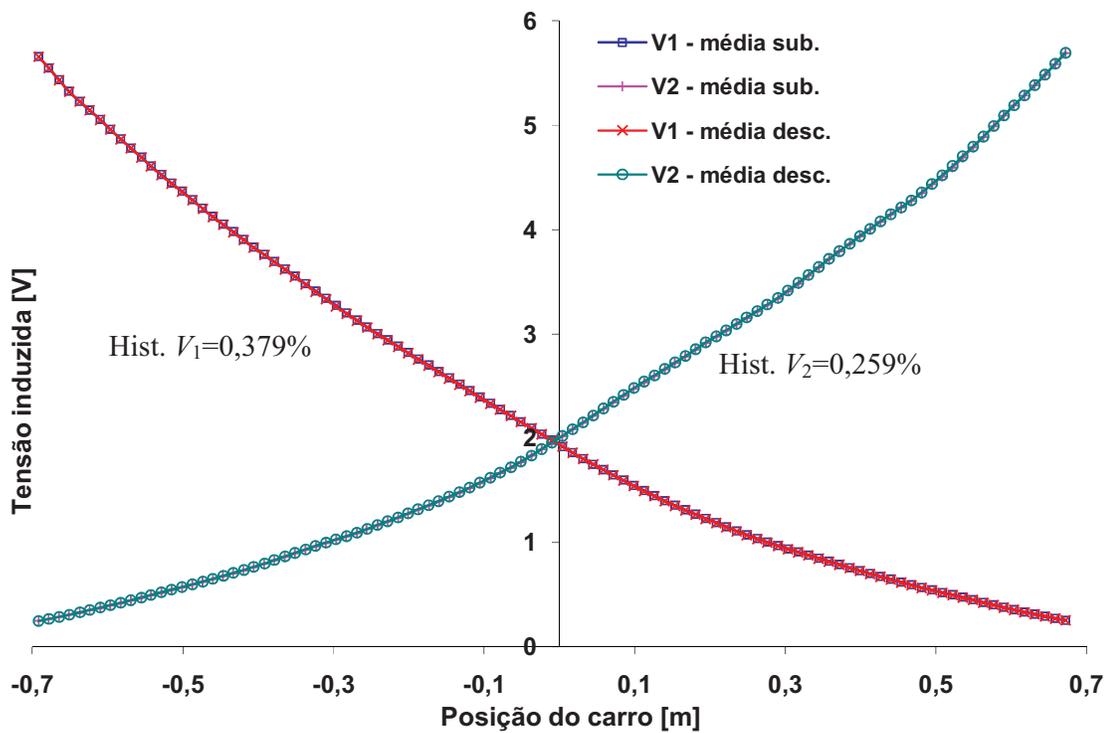


Figura 204 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=120$ Hz

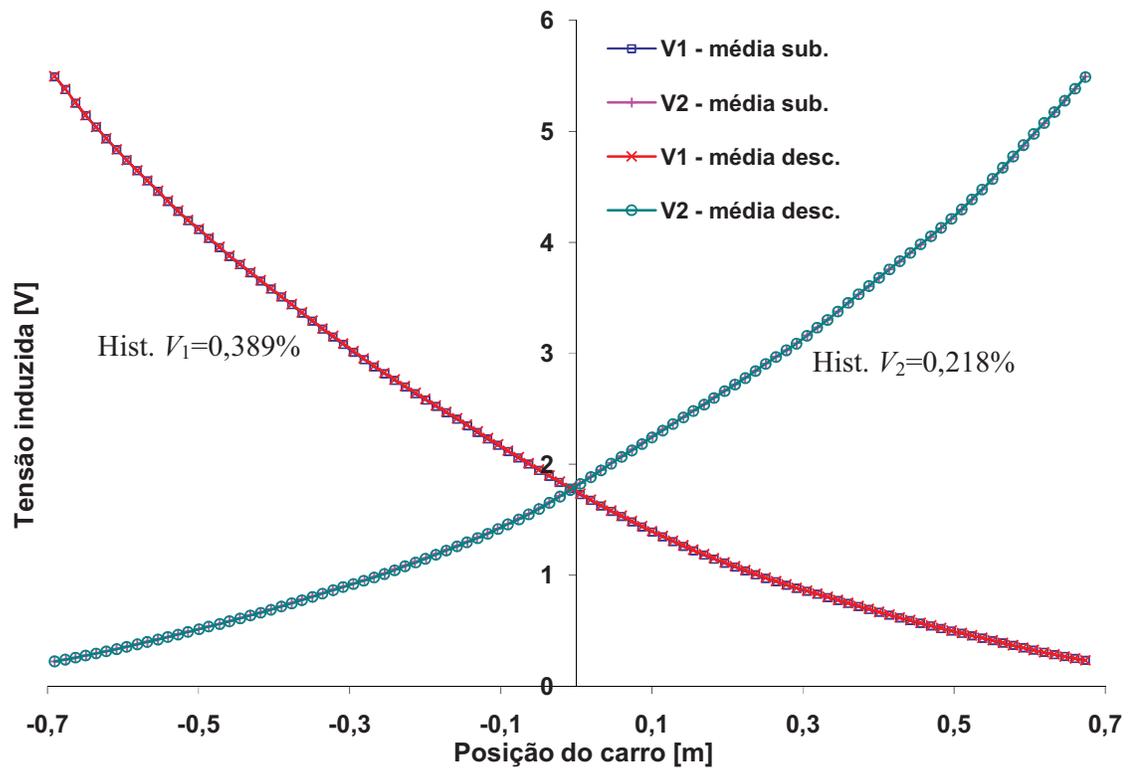


Figura 205 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=120$ Hz

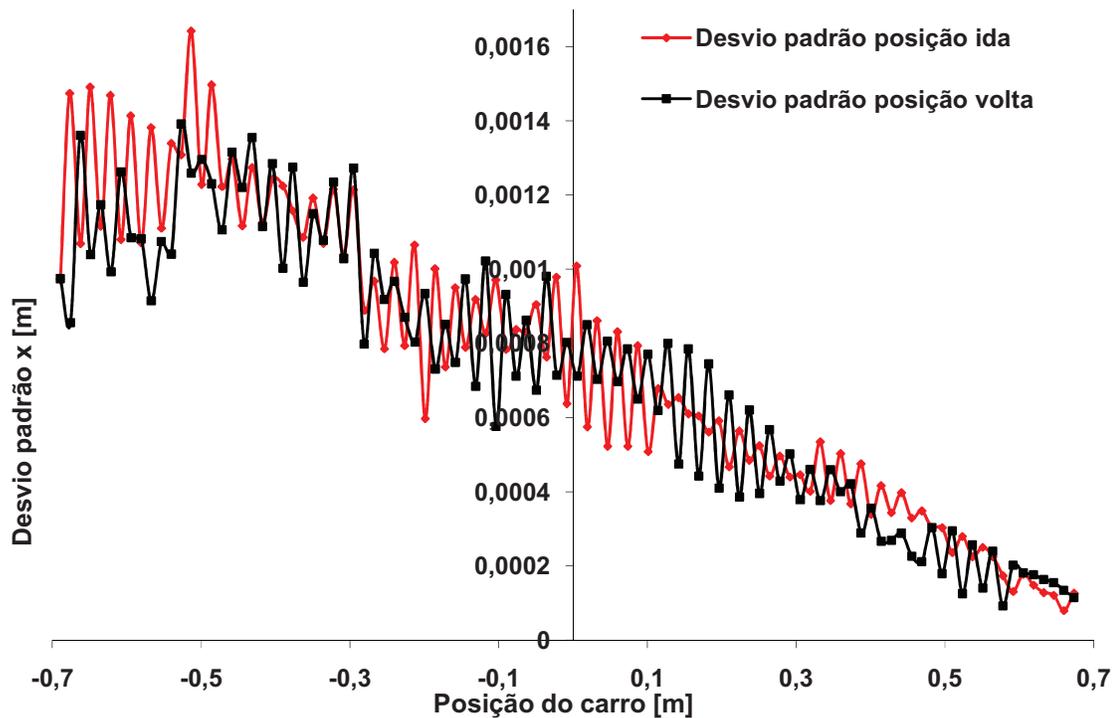


Figura 206 Gráfico dos desvios padrões da posição x para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=120$ Hz

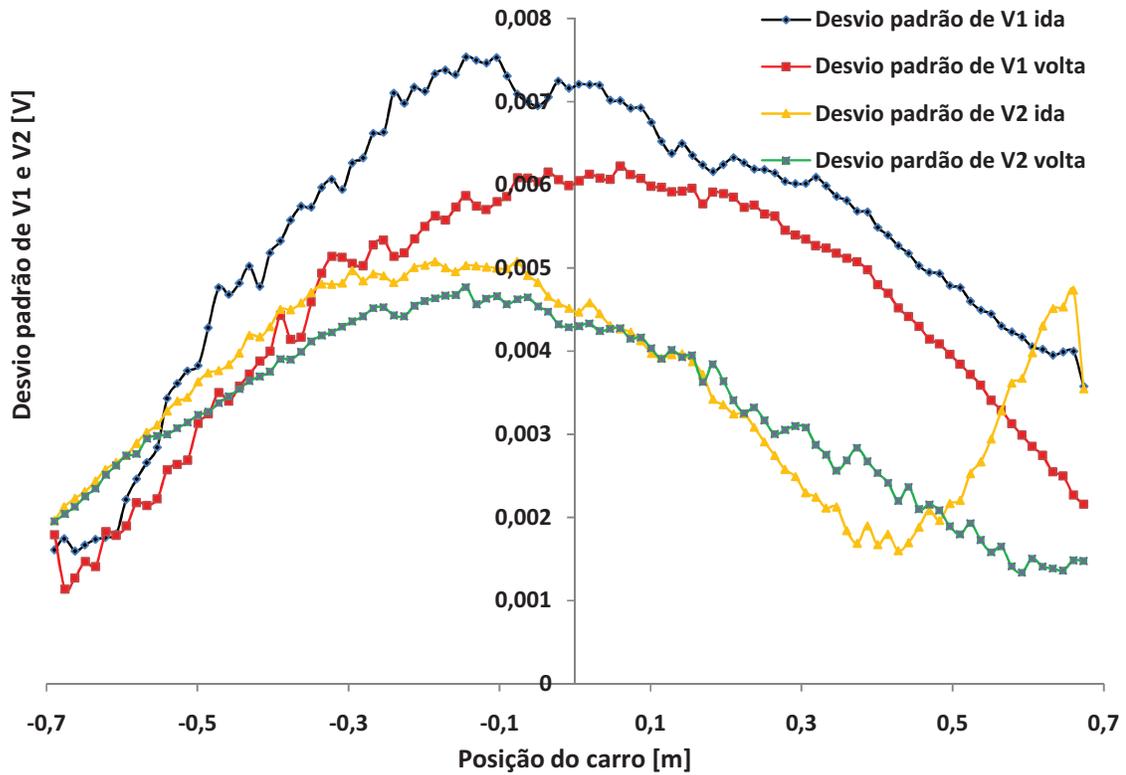


Figura 207 Gráfico do pior caso dos desvios padrões de V_1 e V_2 para o ciclo de ida e volta com o carro partindo da direita para esquerda com $f=120$ Hz

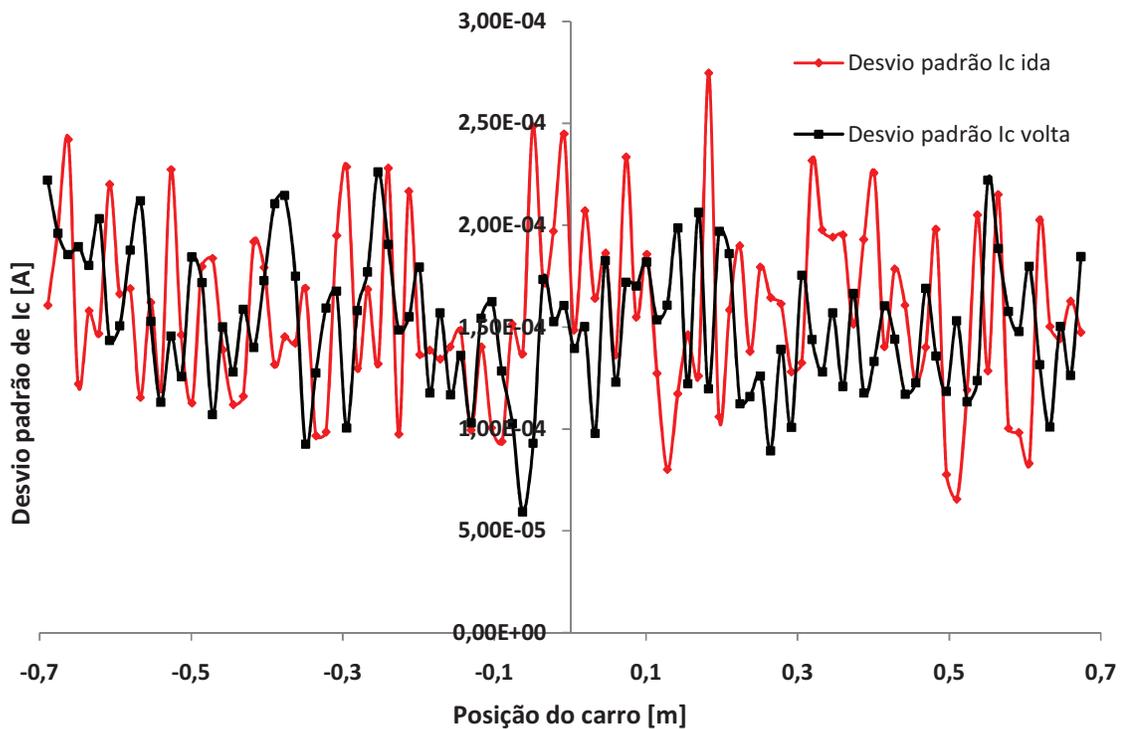


Figura 208 Gráfico dos desvios padrões da corrente I_c para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=120$ Hz

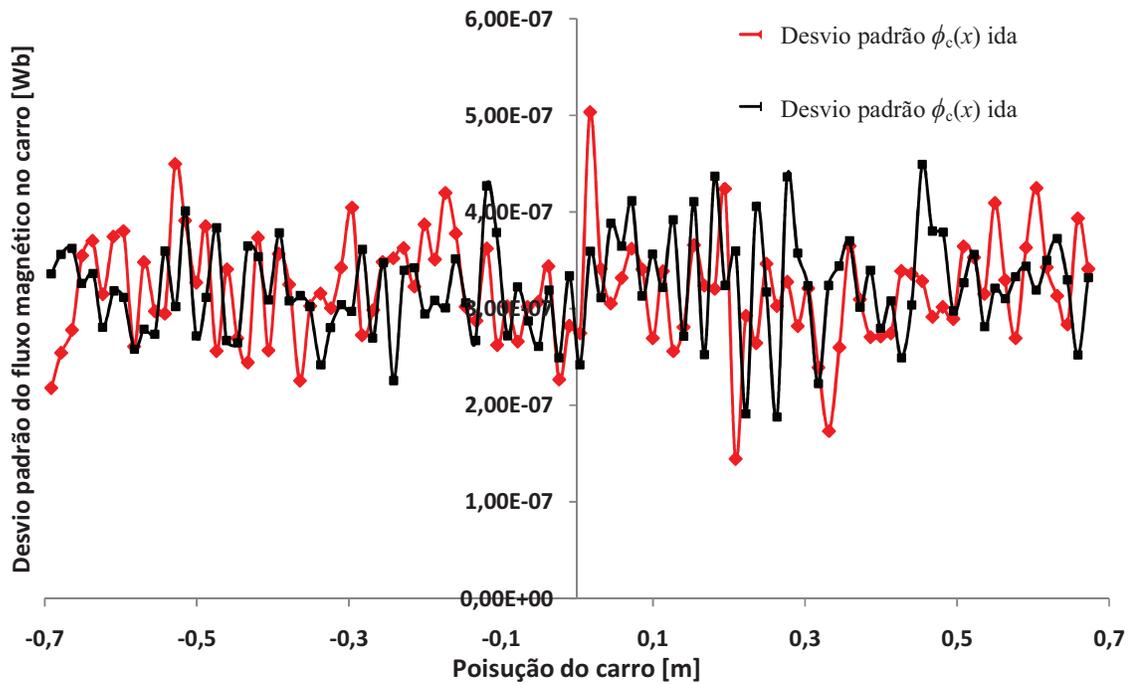


Figura 209 Gráfico dos desvios padrões do fluxo magnético no carro $\phi_c(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f = 120$ Hz

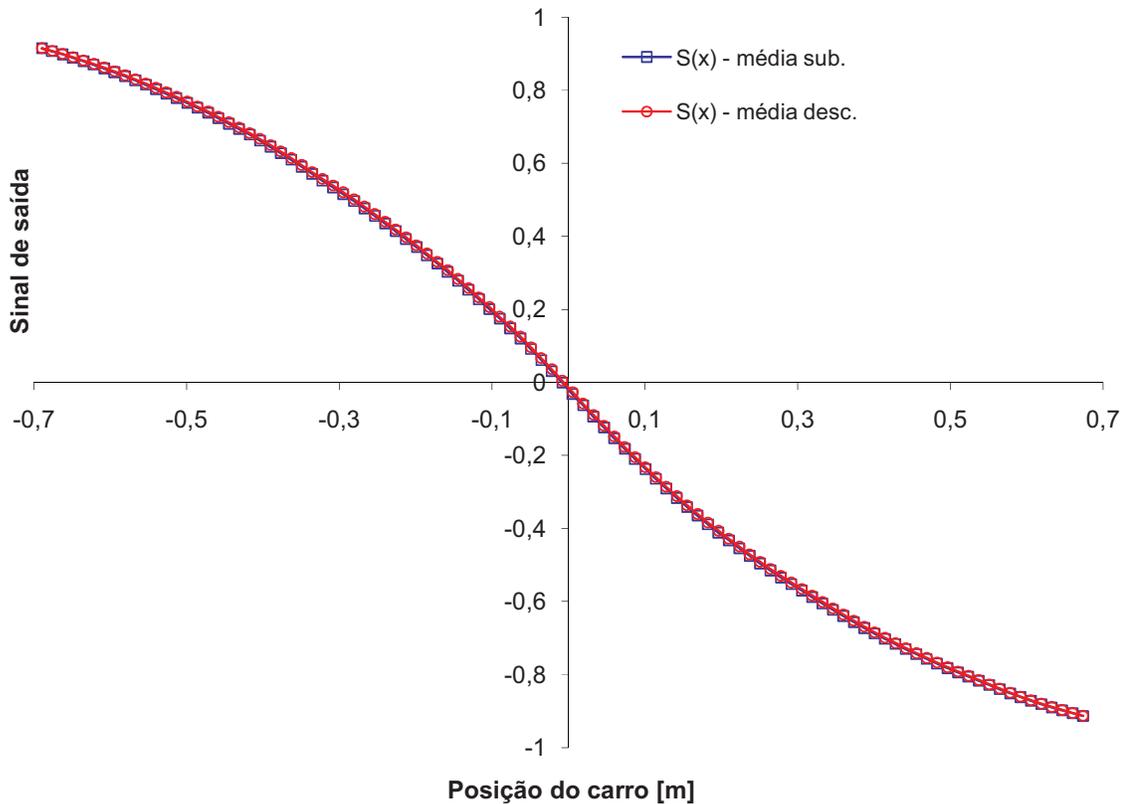


Figura 210 Curva média de subida e descida de $S(x)$ com o carro partindo da direita para esquerda com $f = 120$ Hz

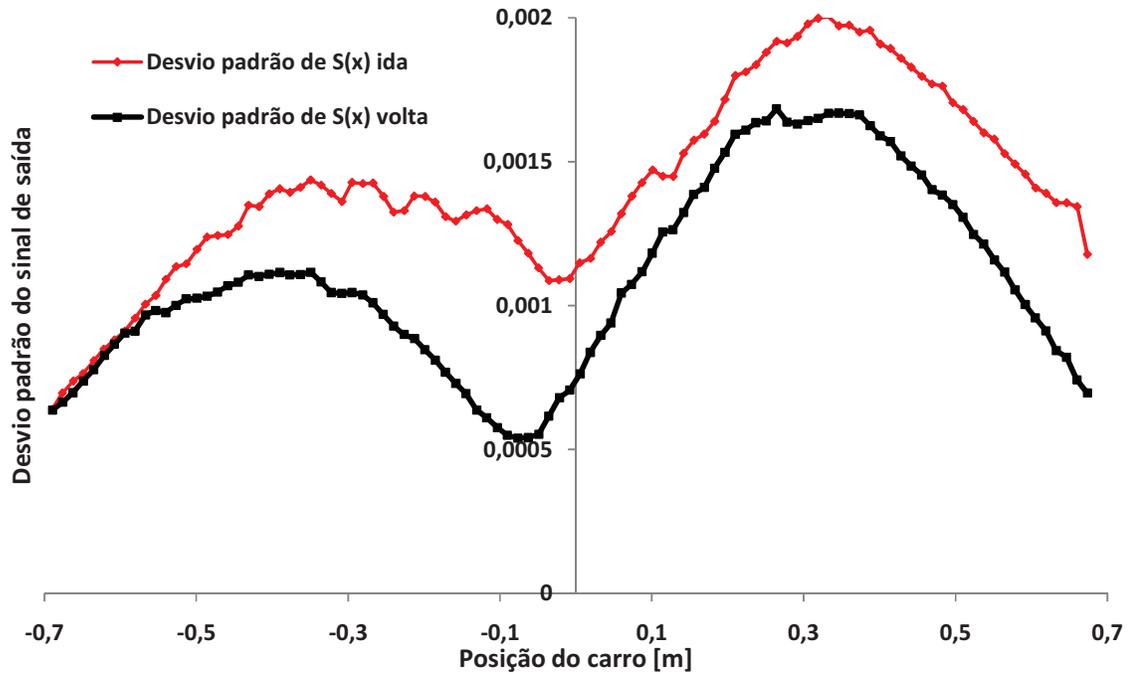


Figura 211 Gráfico dos desvios padrões $S(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e /ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=120$ Hz

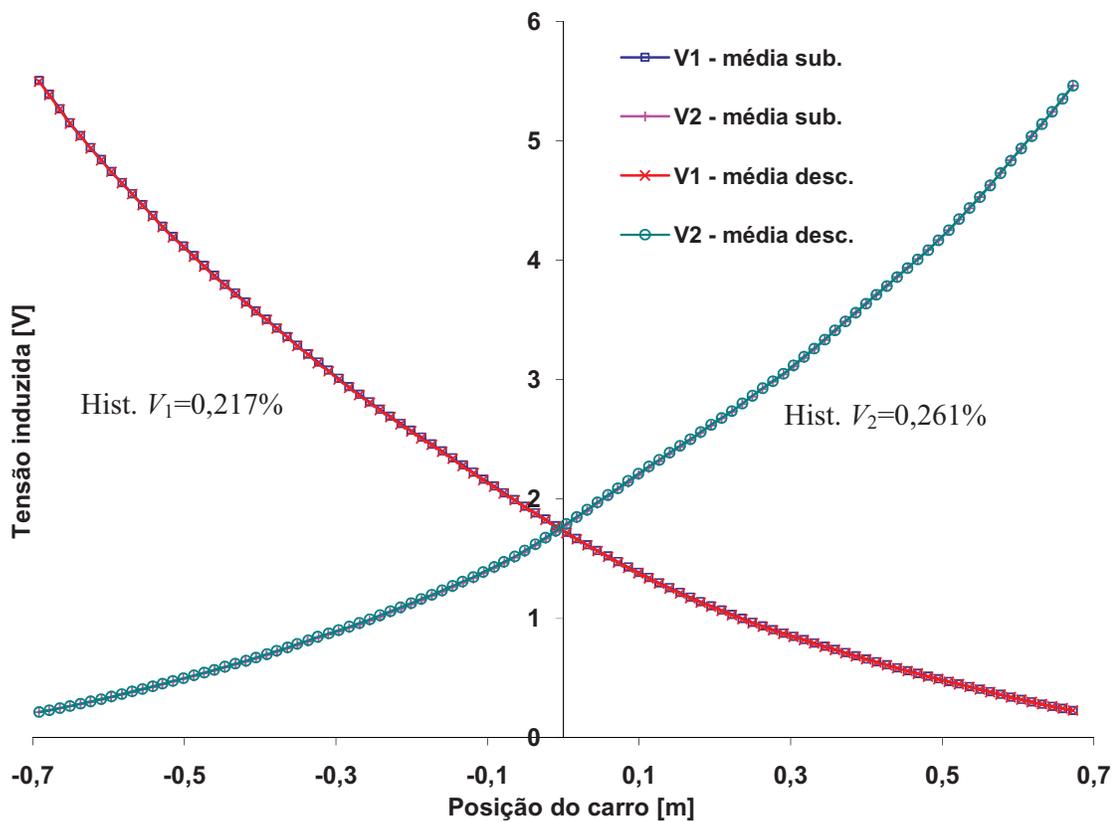


Figura 212 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=240$ Hz

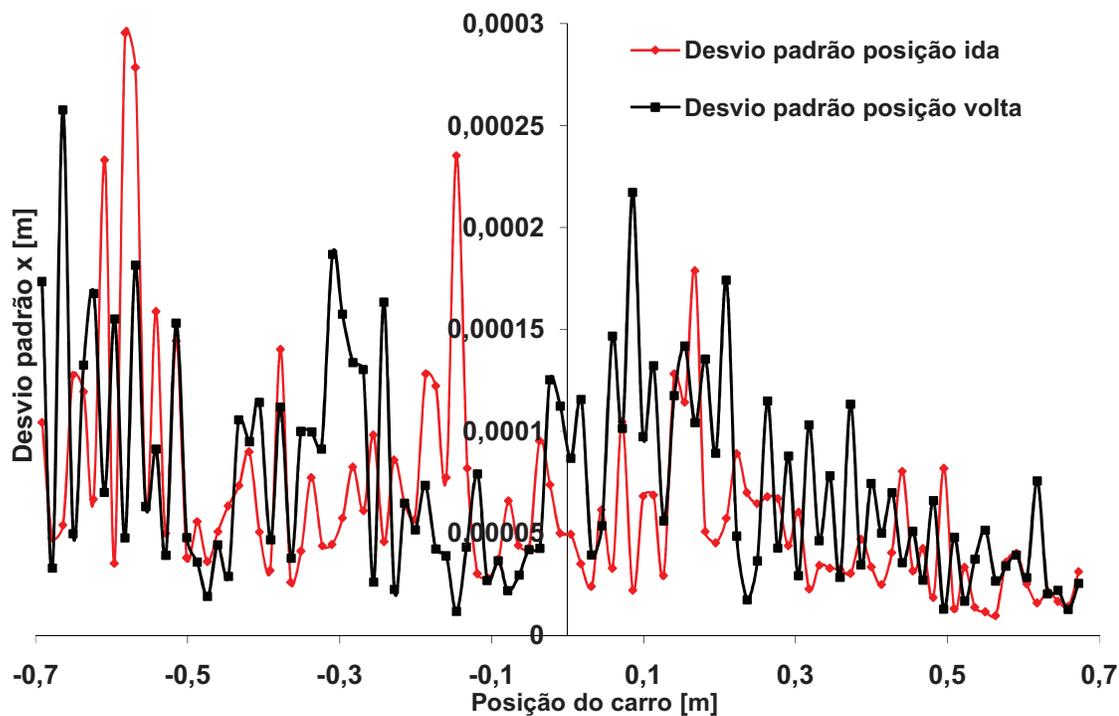


Figura 213 Gráfico dos desvios padrões da posição x para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=240$ Hz

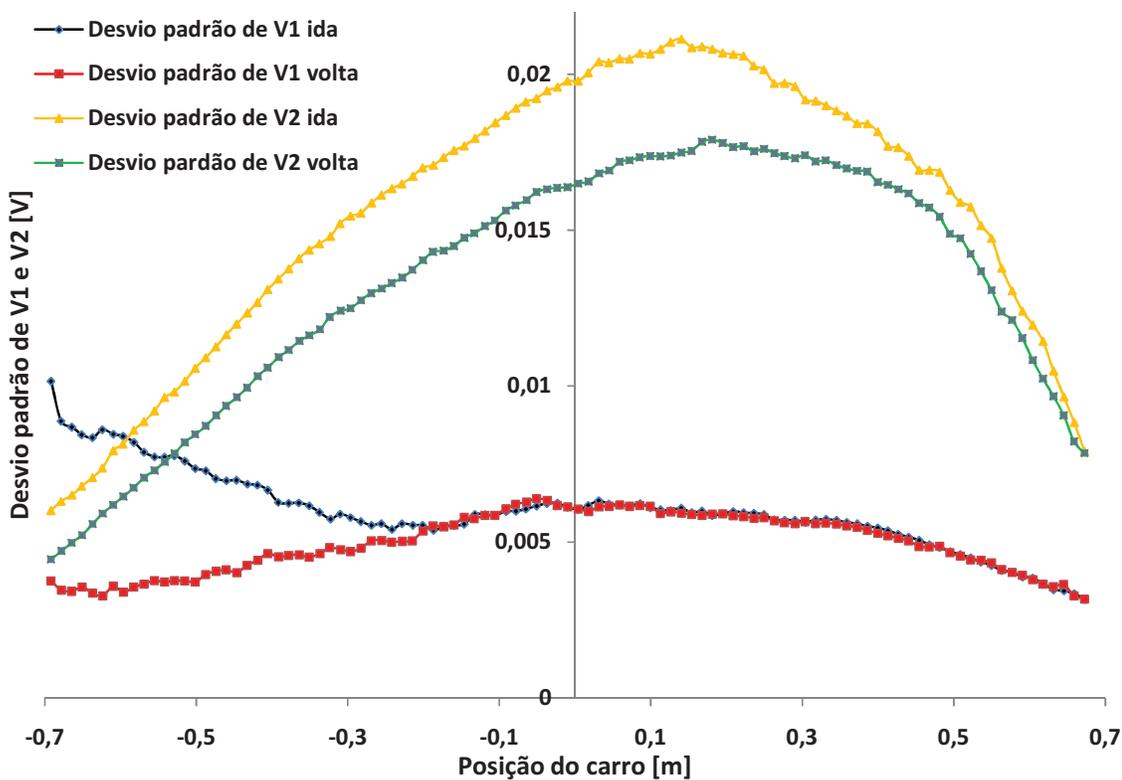


Figura 214 Gráfico do pior caso dos desvios padrões de V_1 e V_2 para o ciclo de ida e volta com o carro partindo da esquerda para direita com $f=240$ Hz

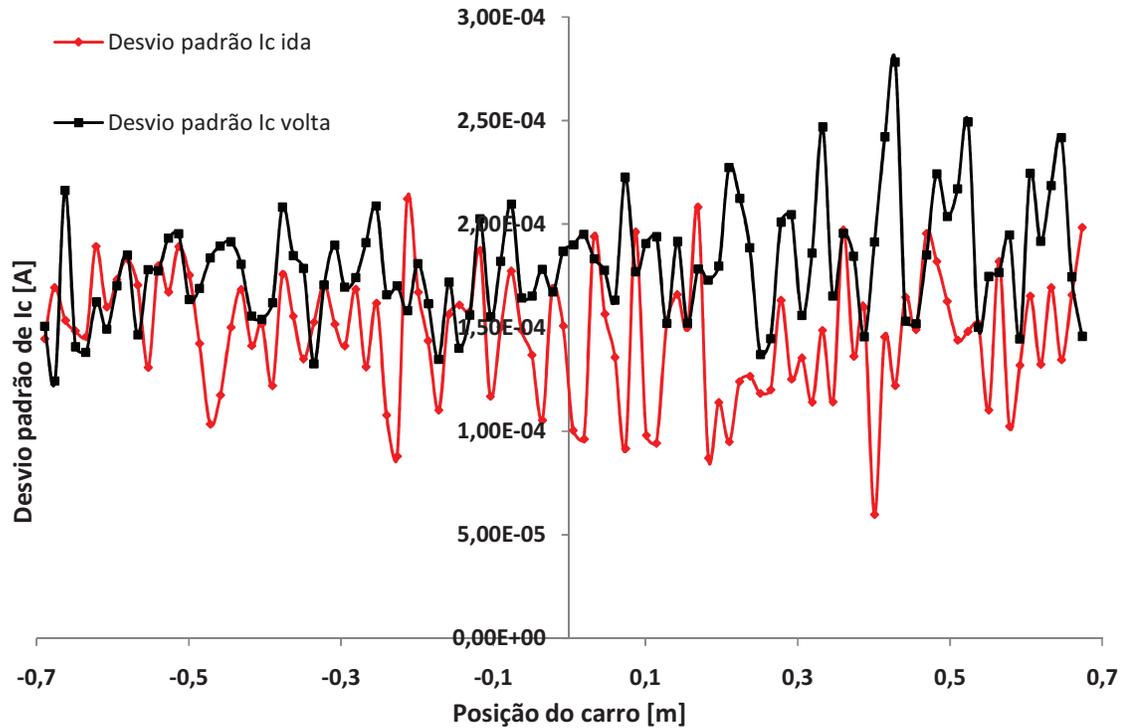


Figura 215 Gráfico dos desvios padrões da corrente I_c para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=240$ Hz

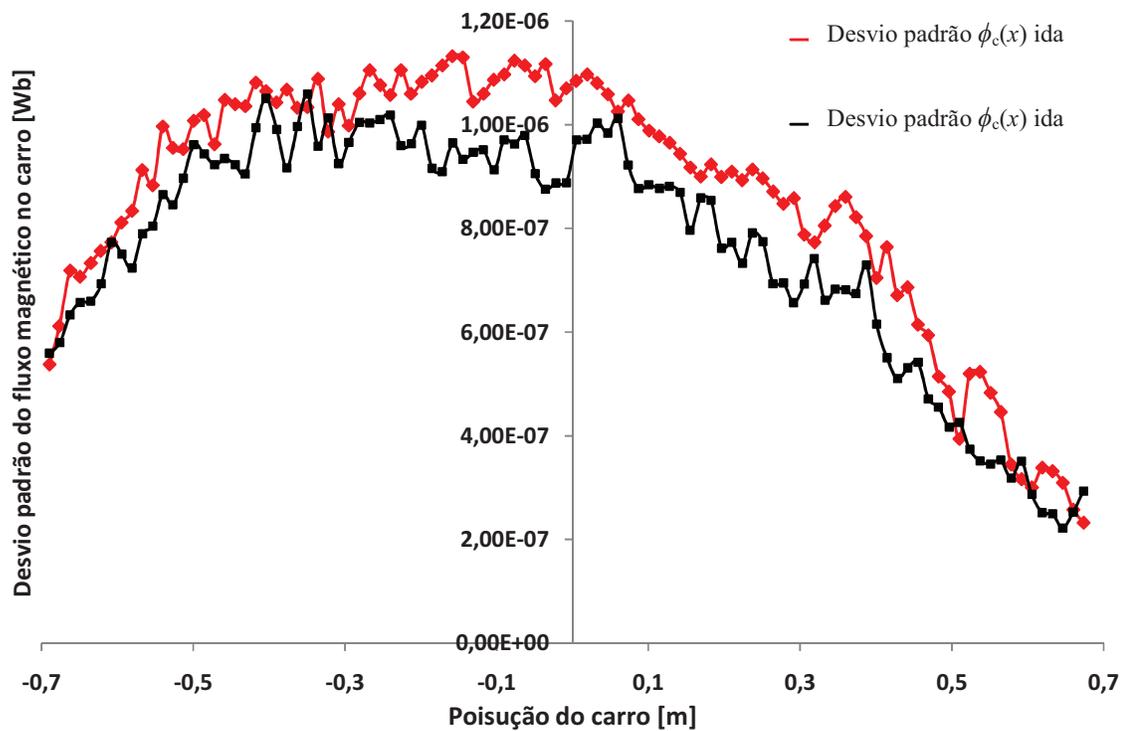


Figura 216 Gráfico dos desvios padrões do fluxo magnético no carro $\phi_c(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=240$ Hz

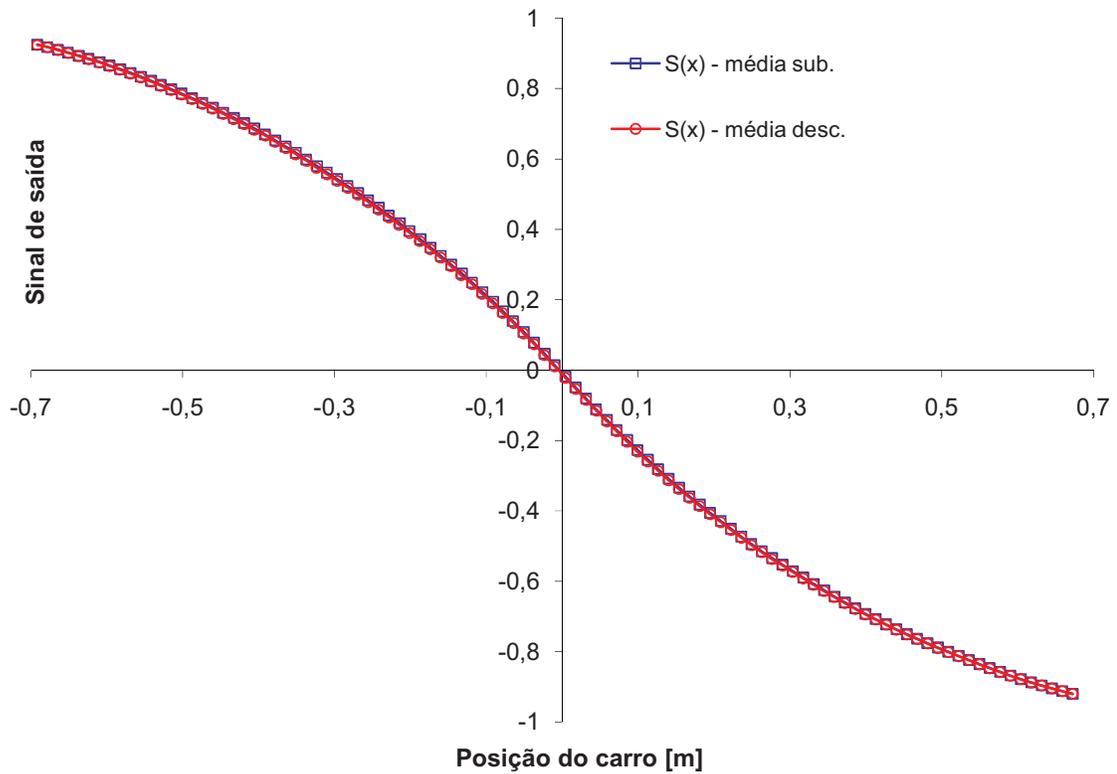


Figura 217 Curva média de subida e descida de $S(x)$ com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 240$ Hz

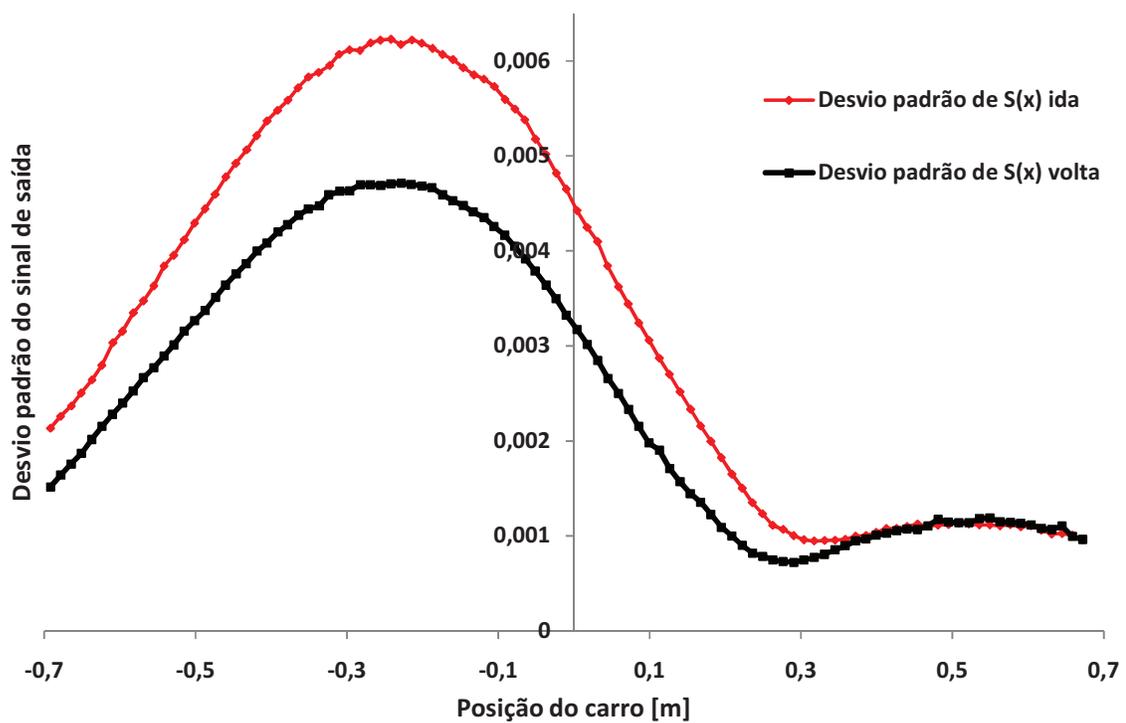


Figura 218 Gráfico dos desvios padrões $S(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 240$ Hz

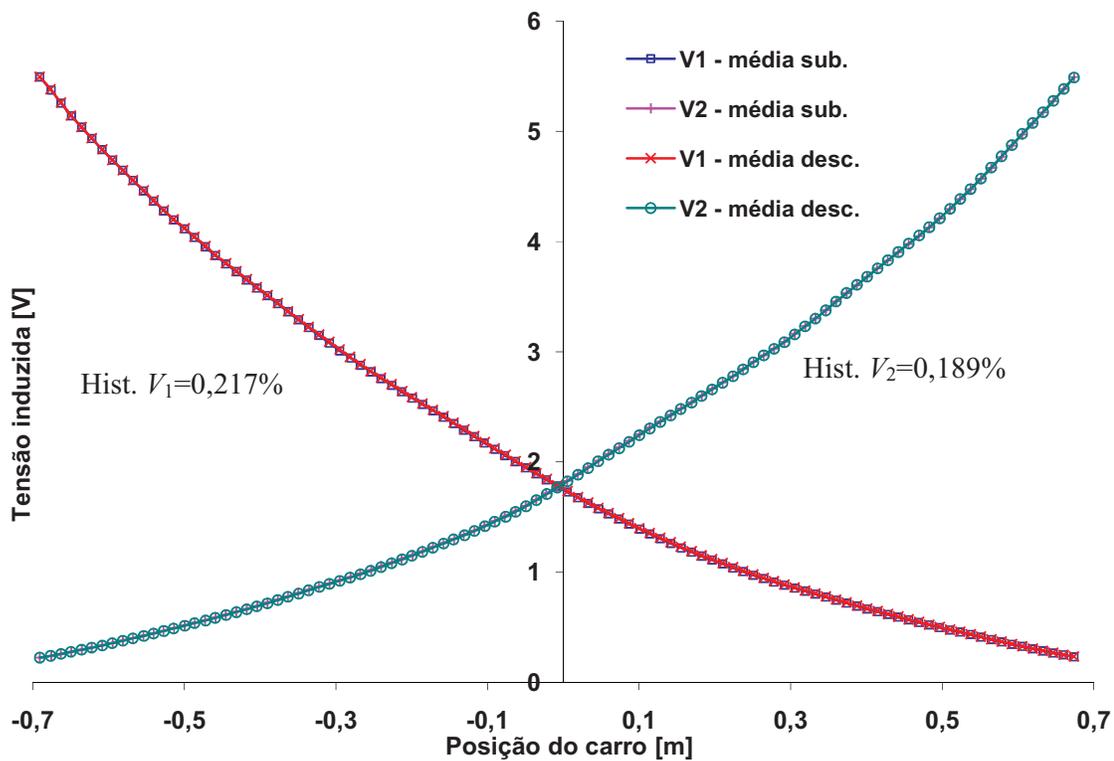


Figura 219 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f = 240$ Hz

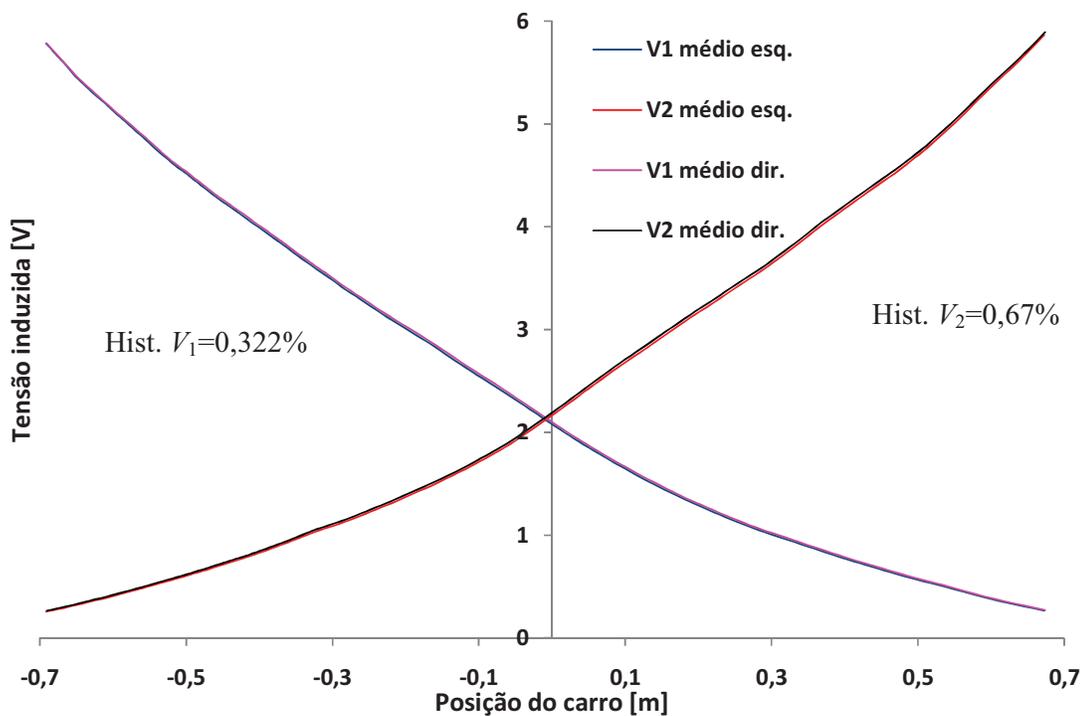


Figura 220 Curva média V_1 e V_2 com o carro partindo da direita e da esquerda com $f = 60$ Hz

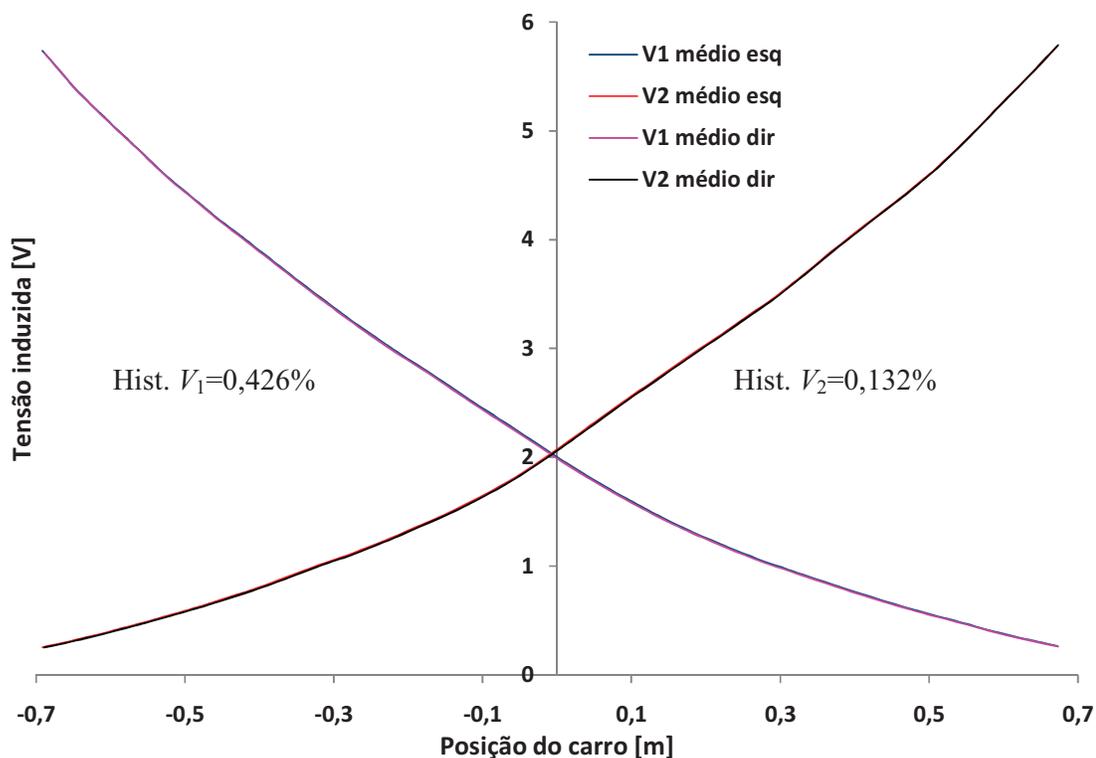


Figura 221 Curva média V_1 e V_2 com o carro partindo da direita e da esquerda com $f=120$ Hz

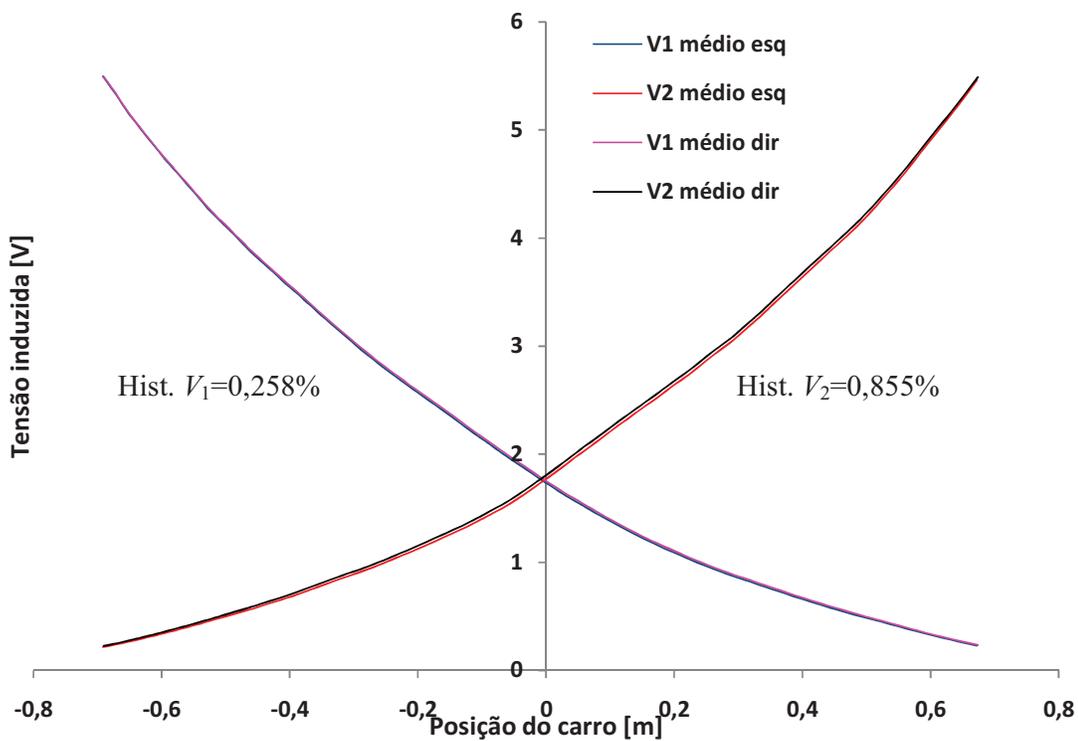


Figura 222 Curva média V_1 e V_2 com o carro partindo da direita e da esquerda com $f=240$ Hz

Os gráficos das Figuras 223 a 246 mostram as curvas estáticas médias de um total de dez curvas para cada ciclo de ida e volta de V_1 e V_2 para o Transdutor II quando o carro parte da esquerda e depois da direita para cada frequência e os desvios padrões dos piores casos de V_1 e/ou V_2 para cada frequência do carro partindo da esquerda e da direita com os desvios padrões das outras grandezas medidas, $S(x)$ e seu desvio padrão e nas Figuras 247 a 249, estão as médias das curvas de ida e volta de V_1 e V_2 . Nos gráficos das médias de ida e volta de V_1 e V_2 são mostrados os níveis de histerese. De modo geral o nível de histerese do Transdutor II ficou um pouco acima dos níveis de histerese do Transdutor I, nas três frequências medidas.

Considere-se que:

FS_s de V_1 é 6,68 V para 60 Hz

FS_s de V_2 é 6,21 V para 60 Hz

FS_s de V_1 é 6,41 V para 120 Hz

FS_s de V_2 é 5,96 V para 120 Hz

FS_s de V_1 é 5,90 V para 240 Hz

FS_s de V_1 é 5,48 V para 240 Hz

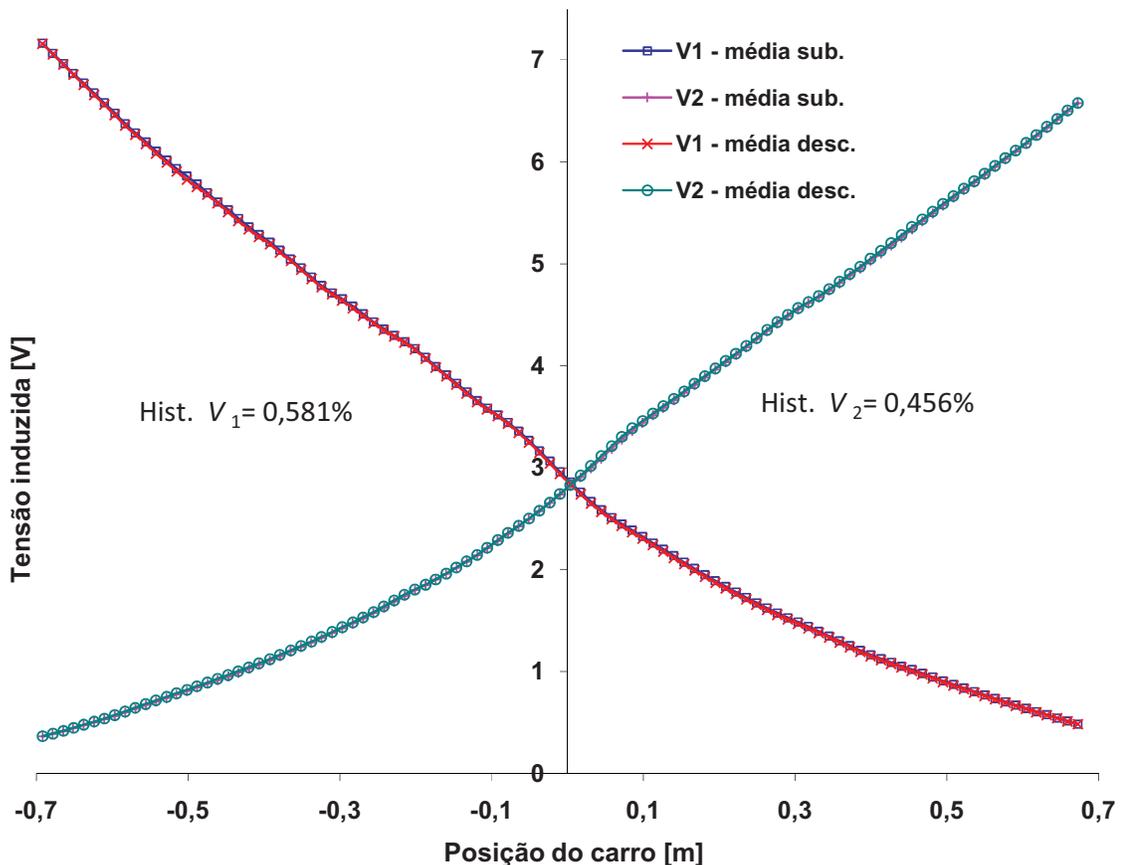


Figura 223 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 60$ Hz

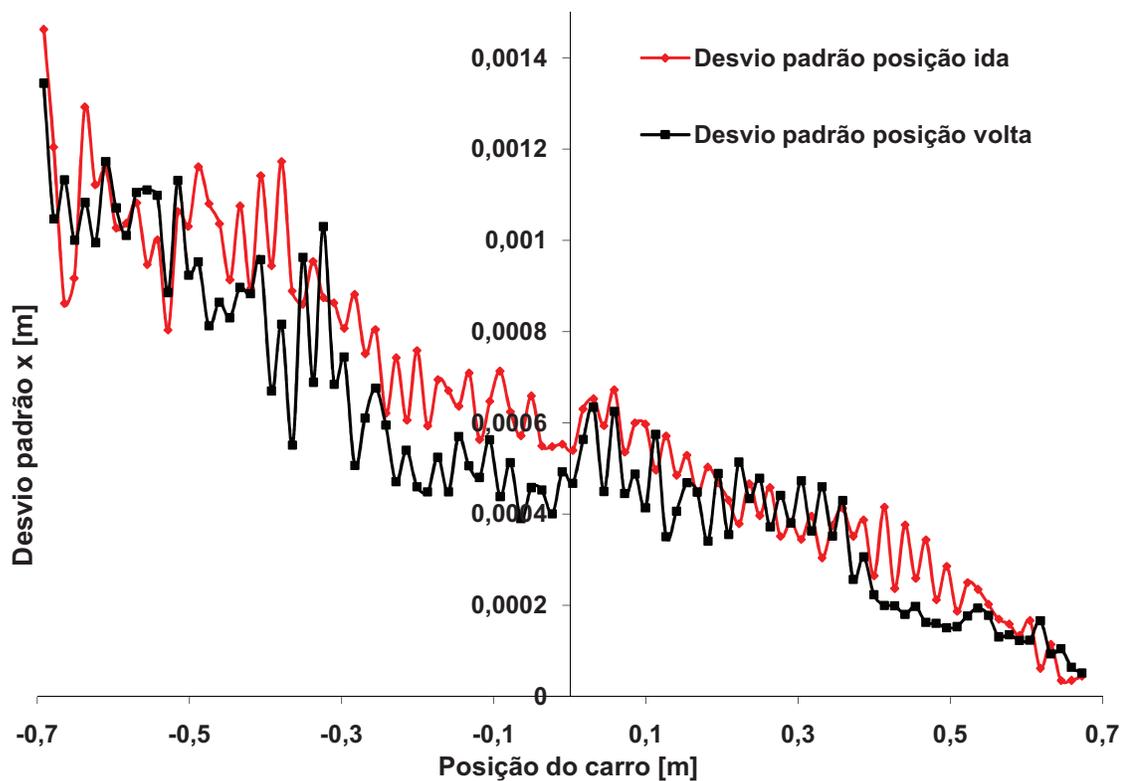


Figura 224 Gráfico dos desvios padrões da posição x para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz

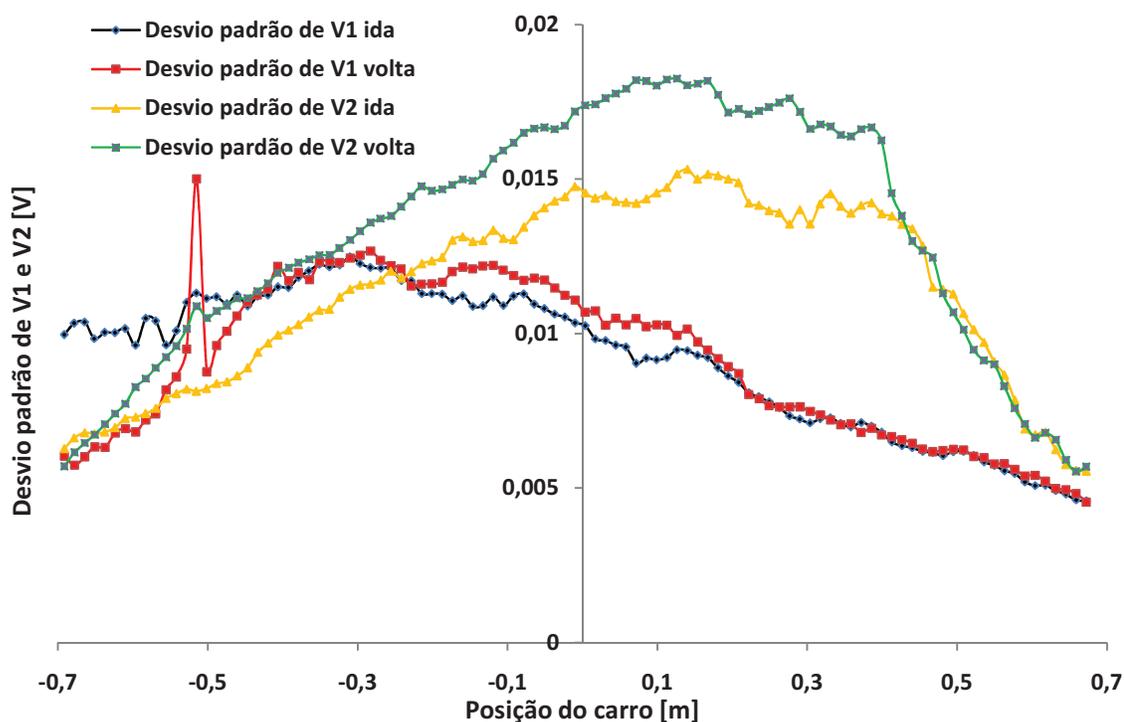


Figura 225 Gráfico do pior caso dos desvios padrões de V_1 e V_2 para o ciclo de ida e volta com o carro partindo da esquerda para direita com $f=60$ Hz

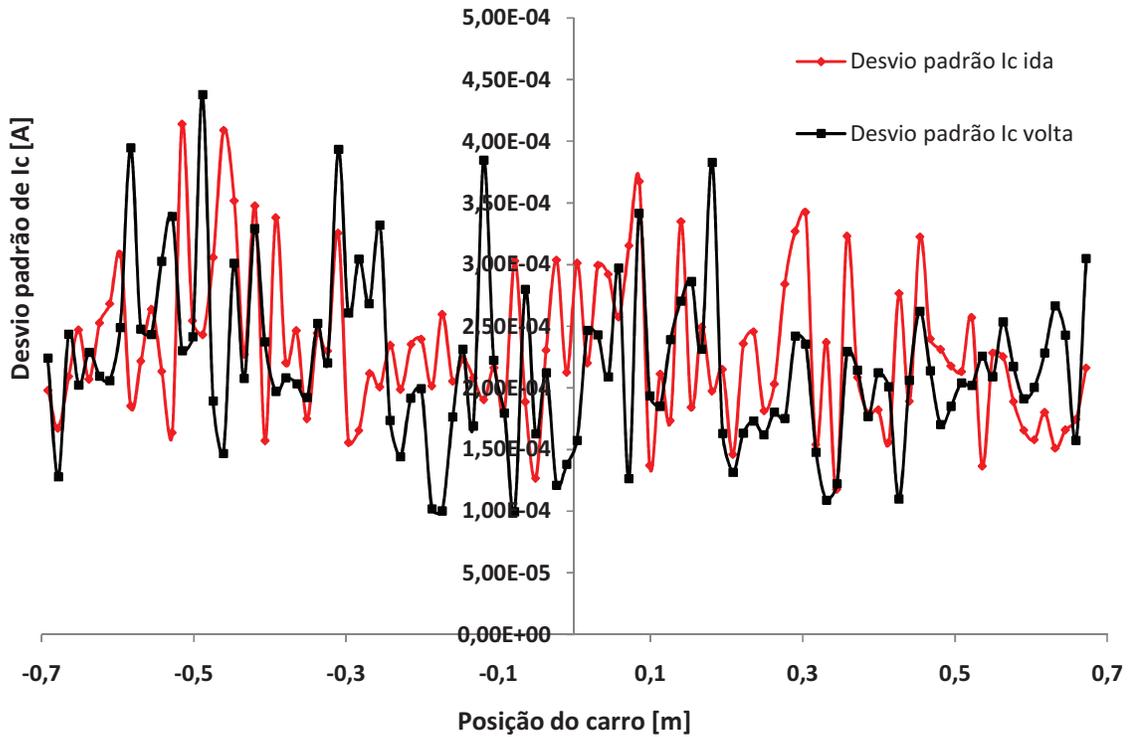


Figura 226 Gráfico dos desvios padrões da corrente I_c para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 60$ Hz

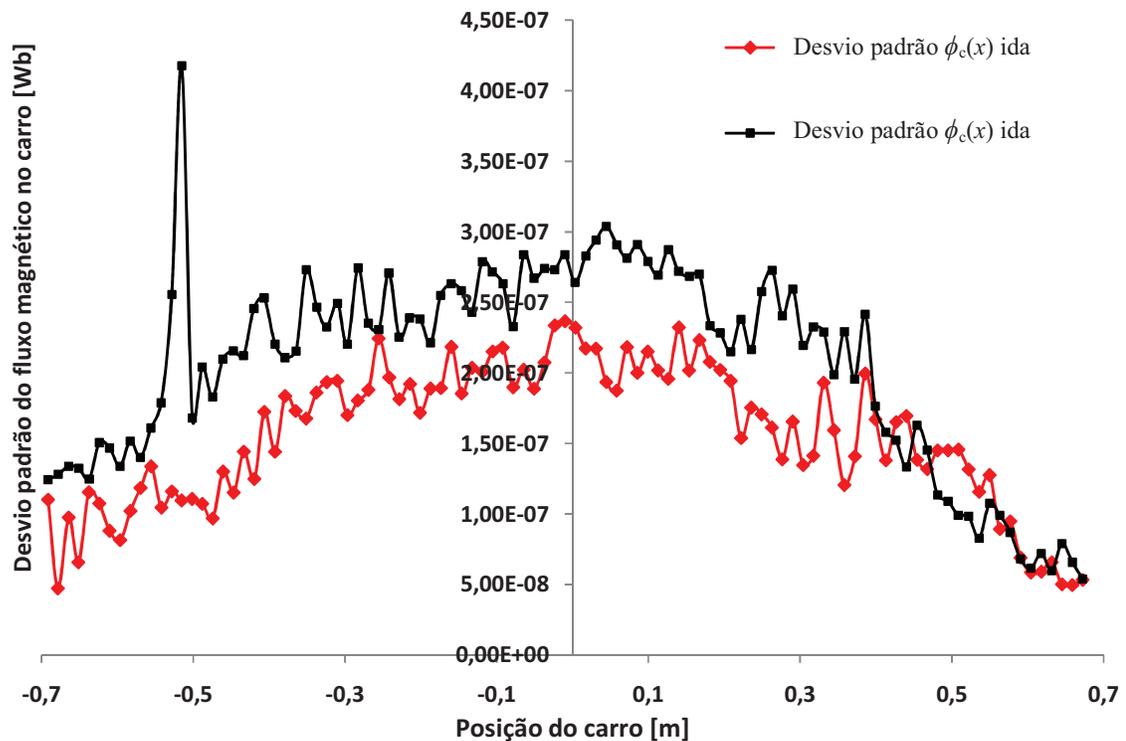


Figura 227 Gráfico dos desvios padrões do fluxo magnético no carro $\phi_c(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 60$ Hz

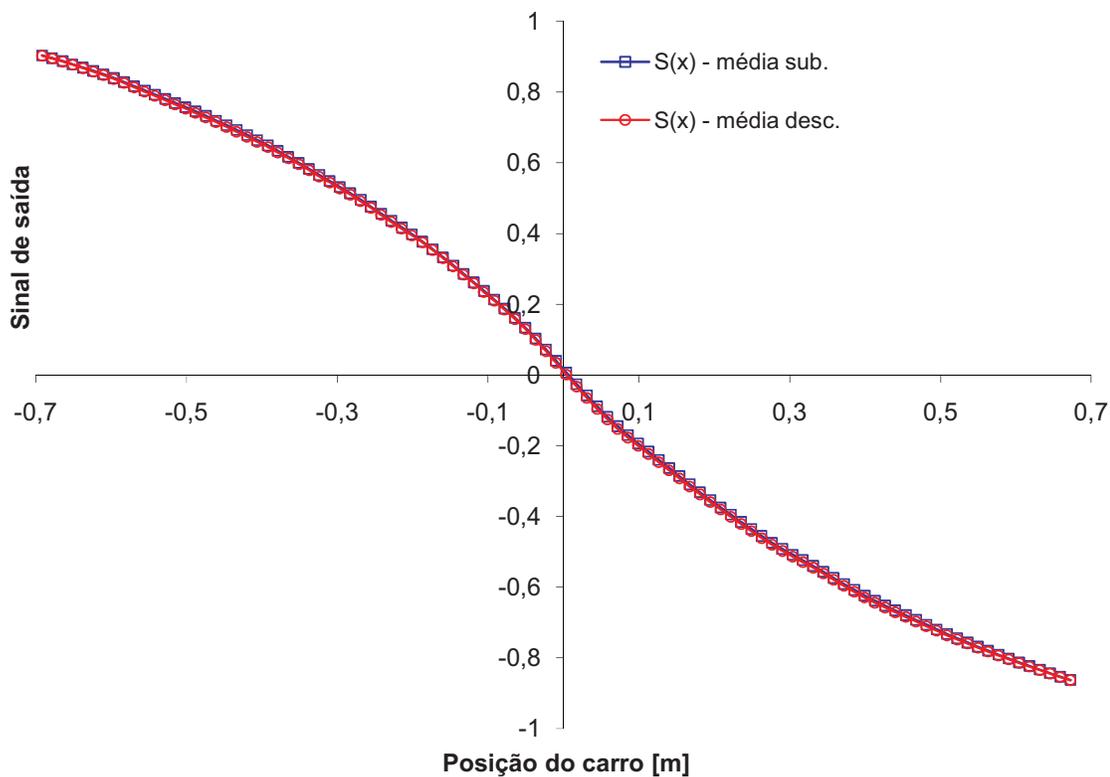


Figura 228 Curva média de subida e descida de $S(x)$ com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 60$ Hz

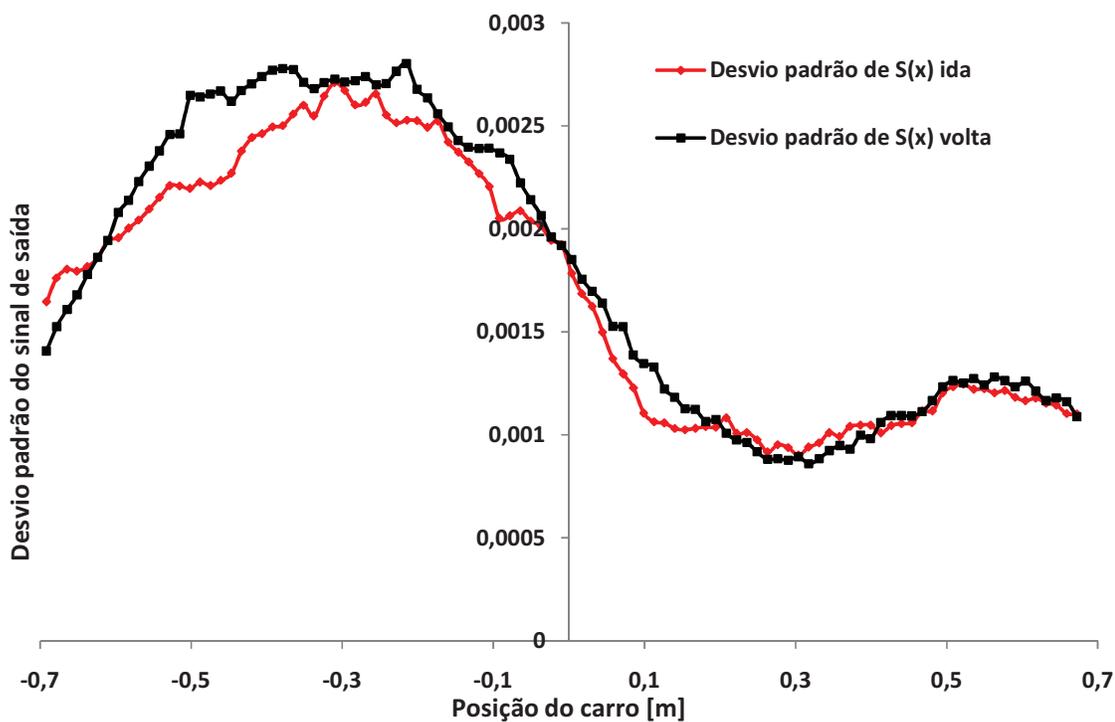


Figura 229 Gráfico dos desvios padrões $S(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 60$ Hz

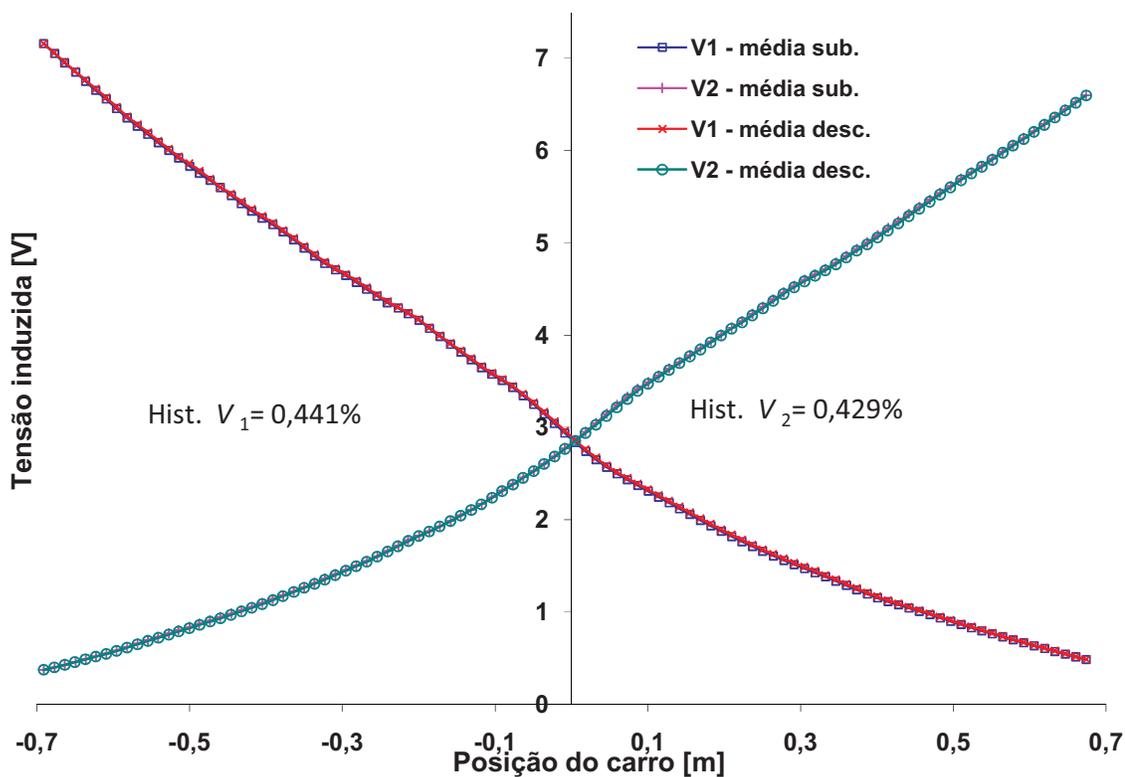


Figura 230 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f = 60$ Hz

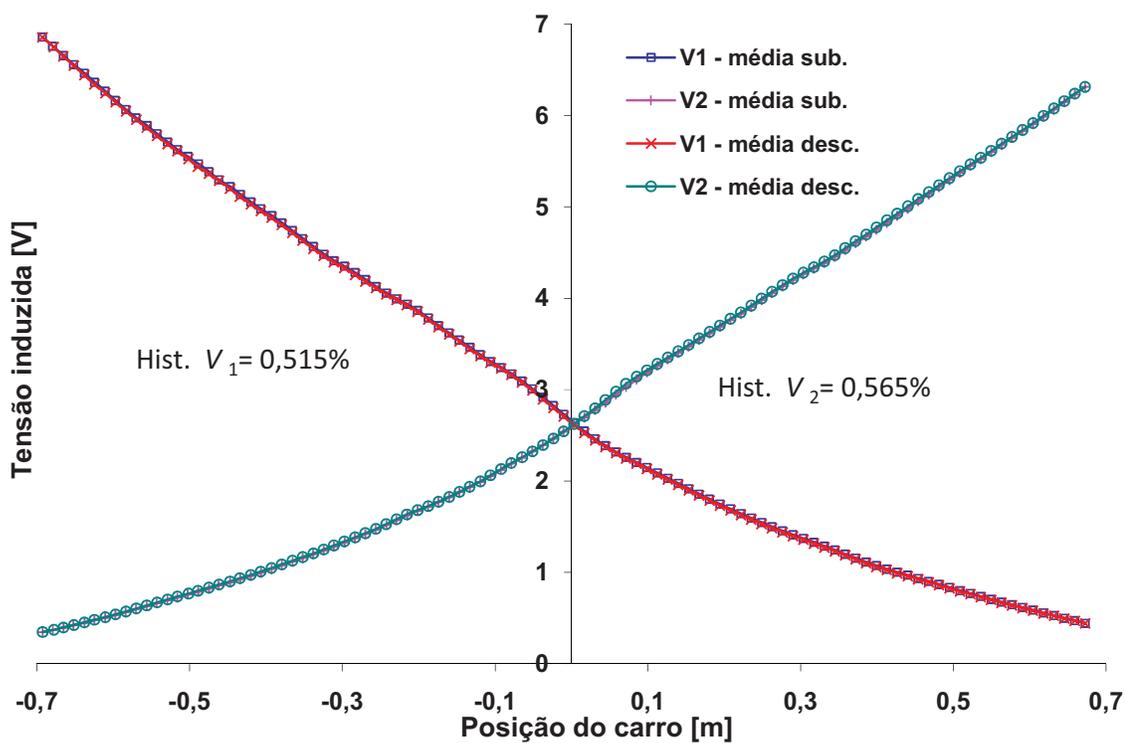


Figura 231 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 120$ Hz

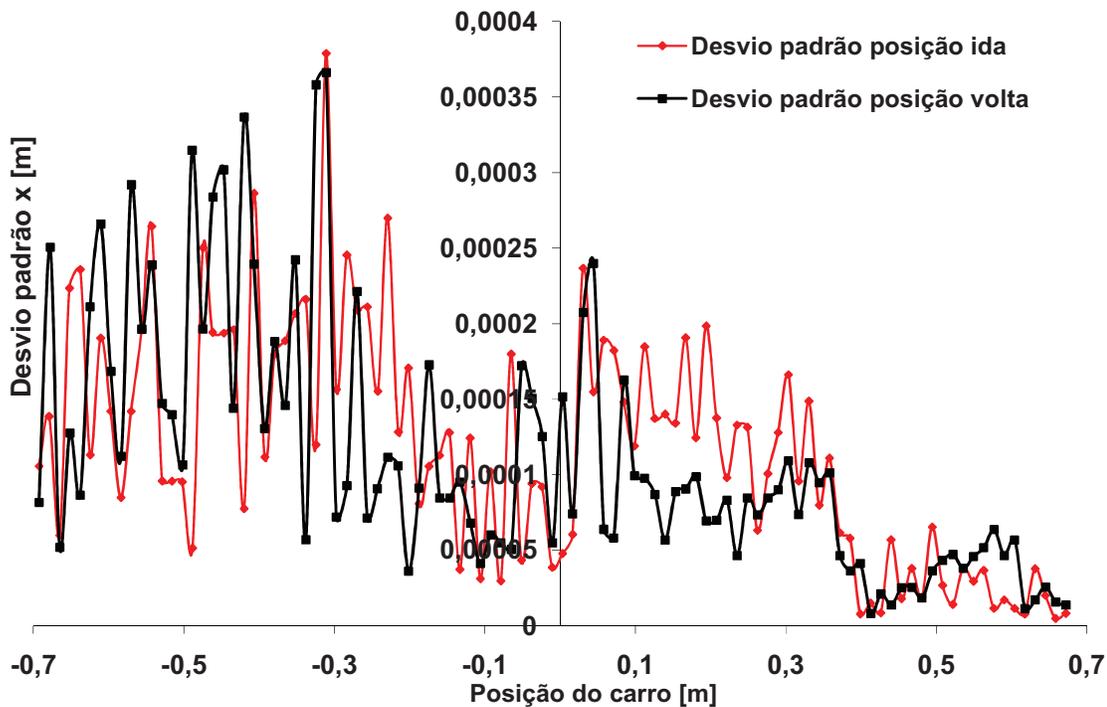


Figura 232 Gráfico dos desvios padrões da posição x para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=120$ Hz

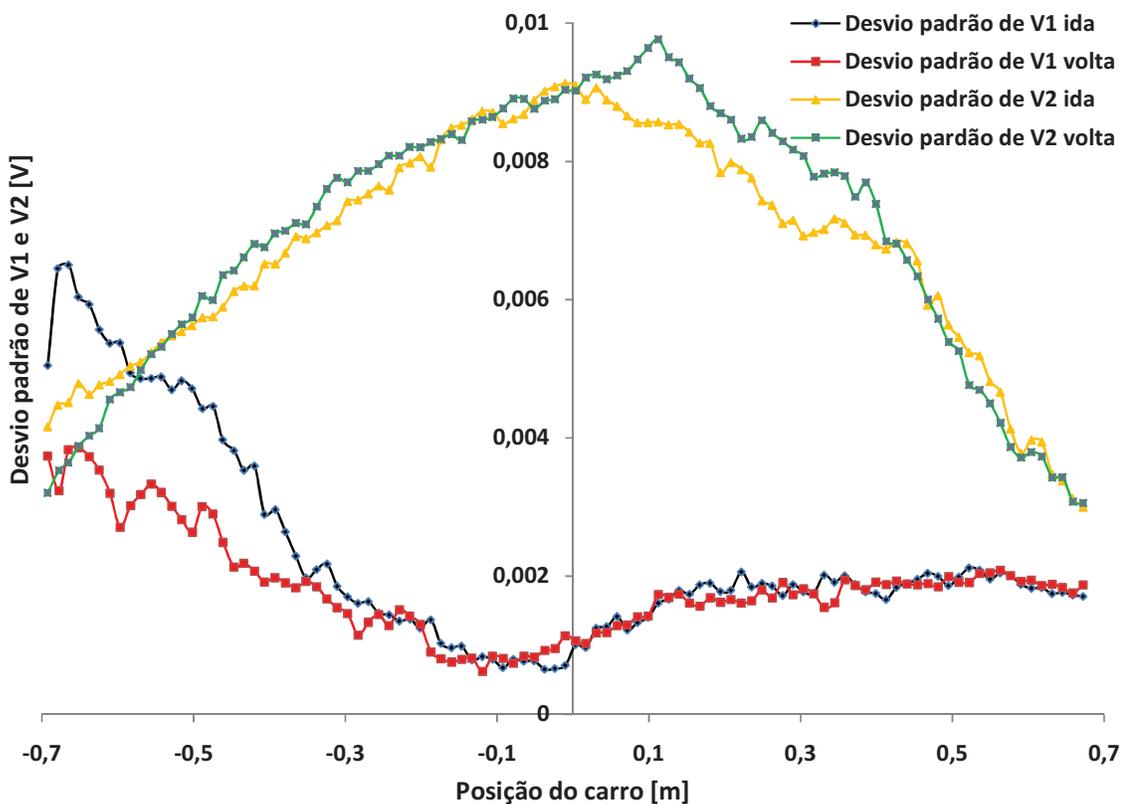


Figura 233 Gráfico do pior caso dos desvios padrões de V_1 e V_2 para o ciclo de ida e volta com o carro partindo da esquerda para direita com $f=120$ Hz

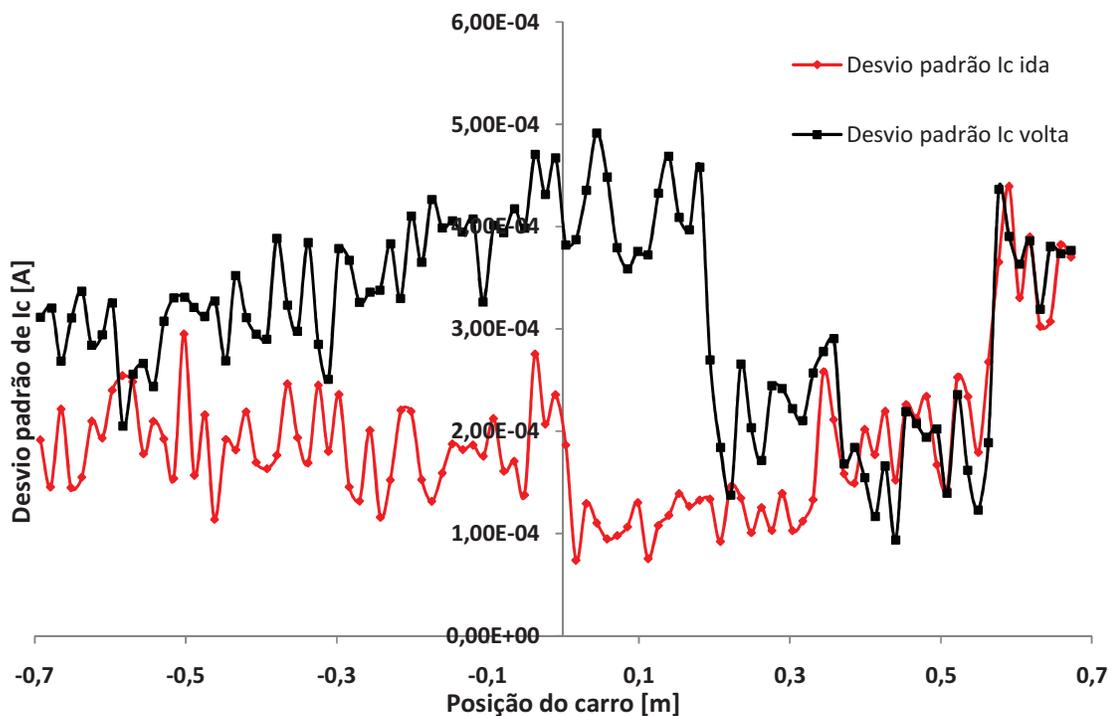


Figura 234 Gráfico dos desvios padrões da corrente I_c para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=120$ Hz

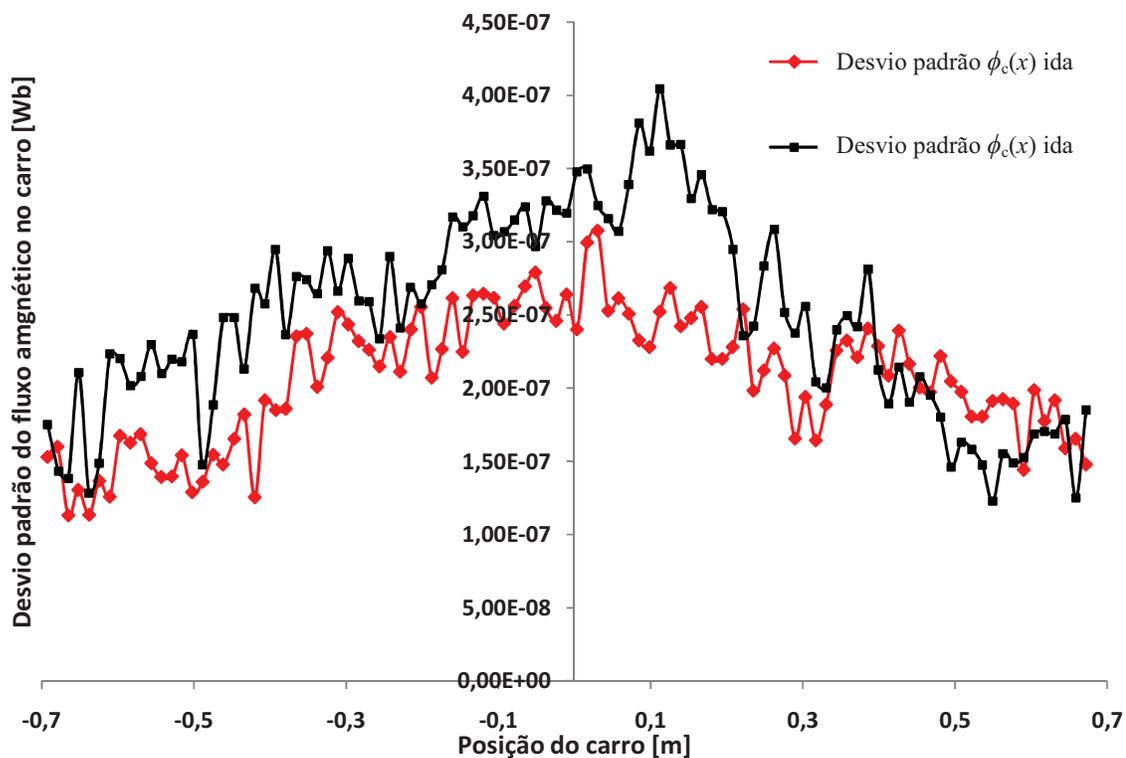


Figura 235 Gráfico dos desvios padrões do fluxo magnético no carro $\phi_c(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f=120$ Hz

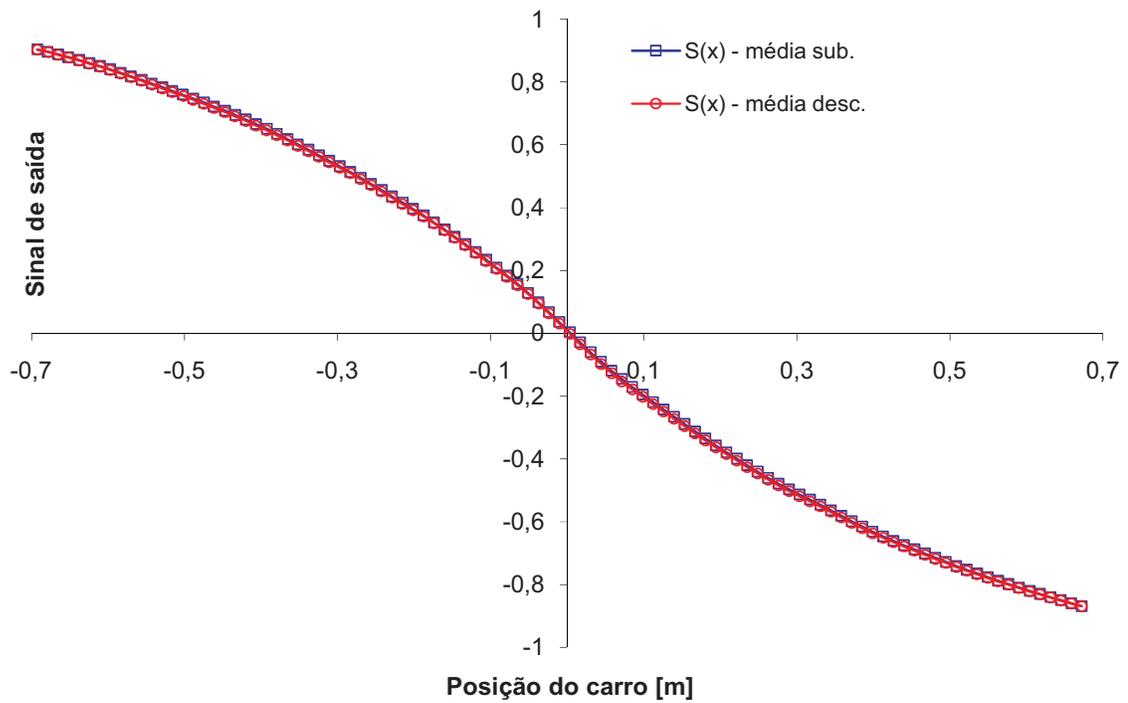


Figura 236 Curva média de subida e descida de $S(x)$ com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 120$ Hz

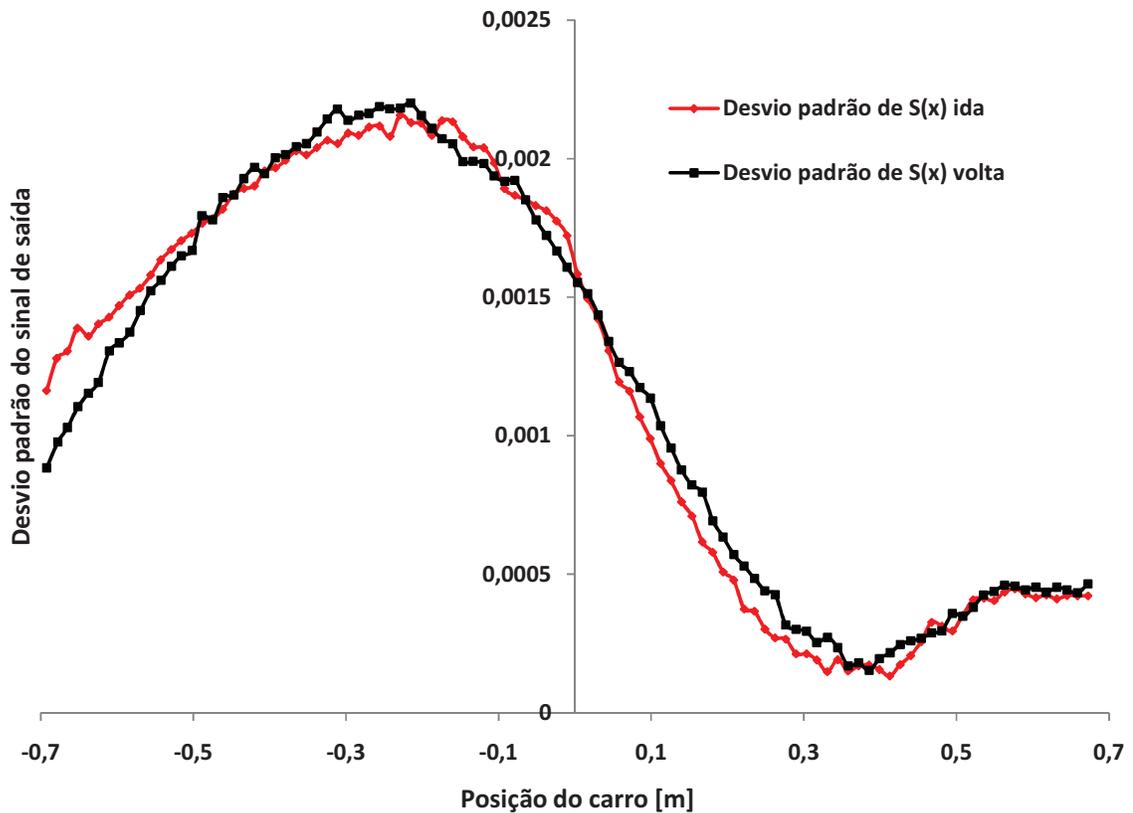


Figura 237 Gráfico dos desvios padrões $S(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 60$ Hz

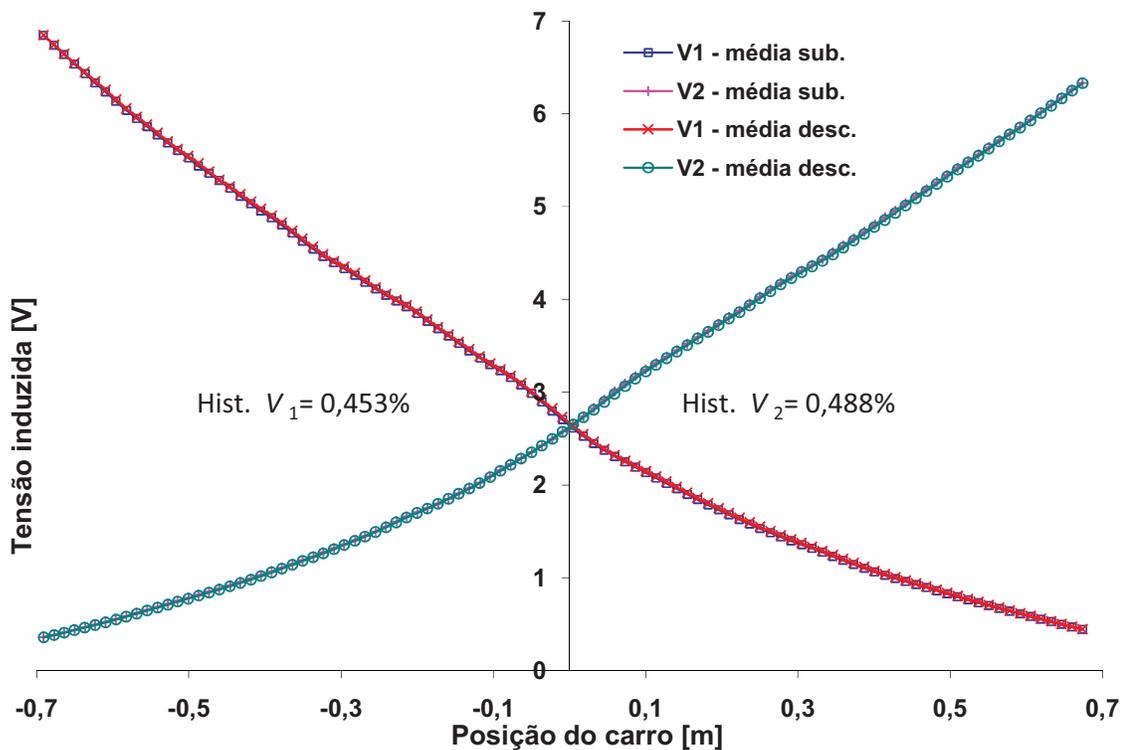


Figura 238 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f = 120$ Hz

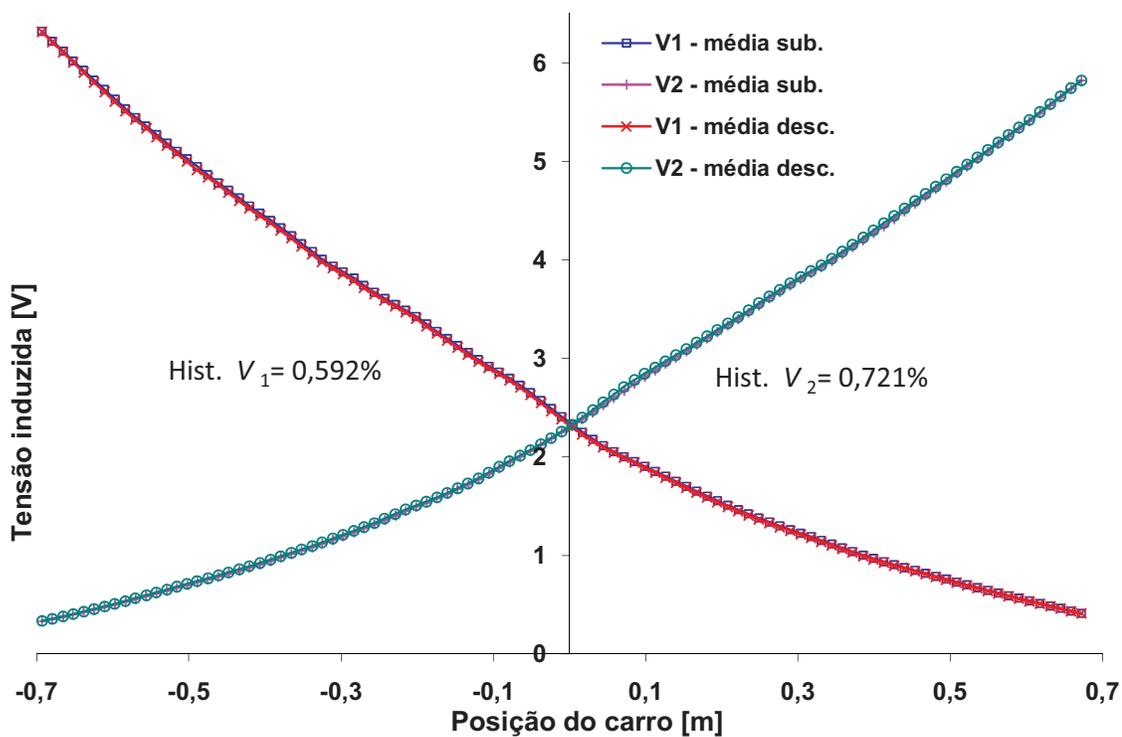


Figura 239 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para direita com $f = 240$ Hz

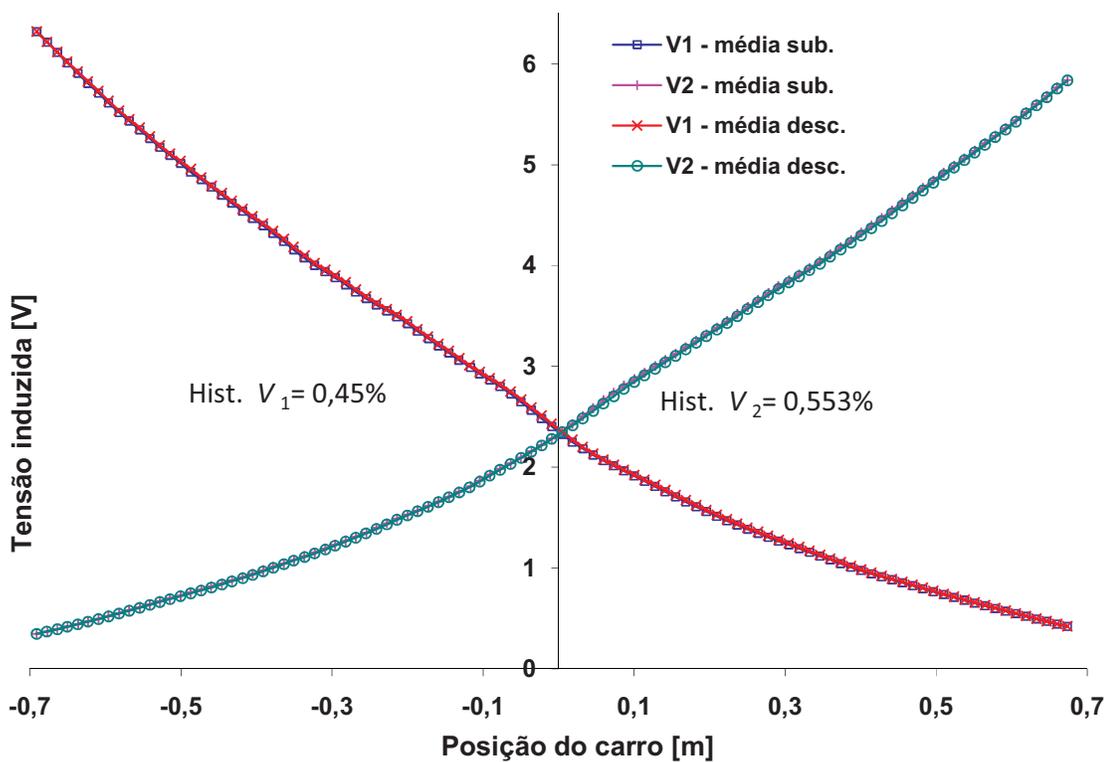


Figura 240 Curva média de subida e descida de V_1 e V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f = 240$ Hz

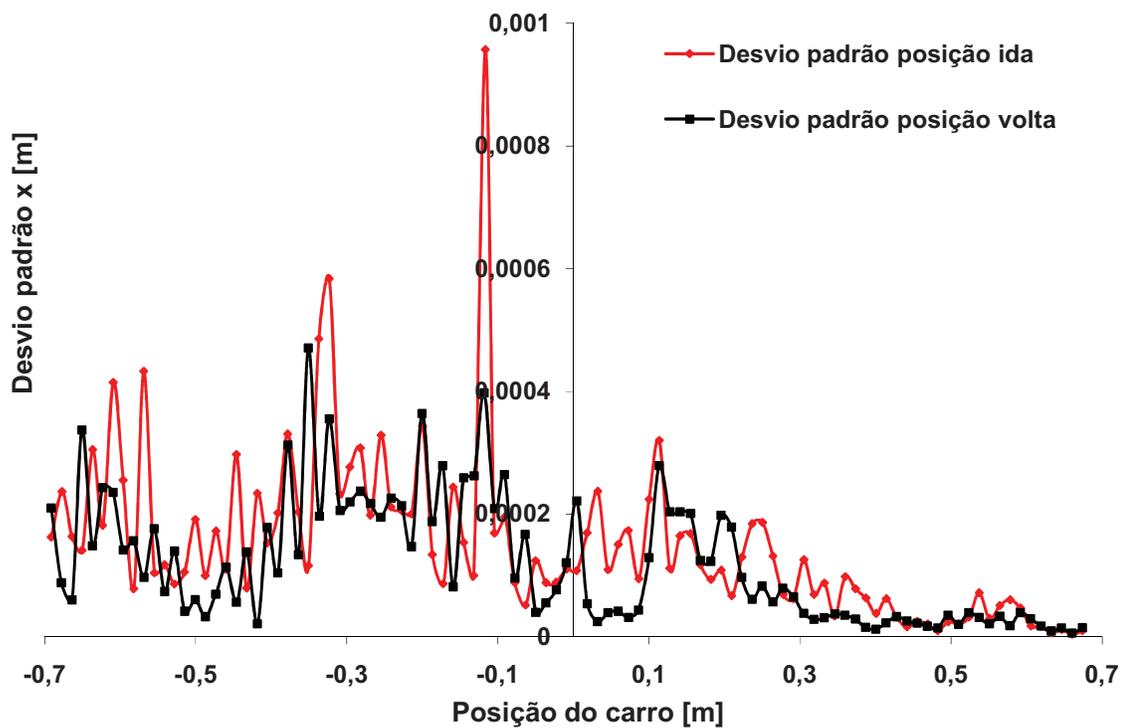


Figura 241 Gráfico dos desvios padrões da posição x para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f = 240$ Hz

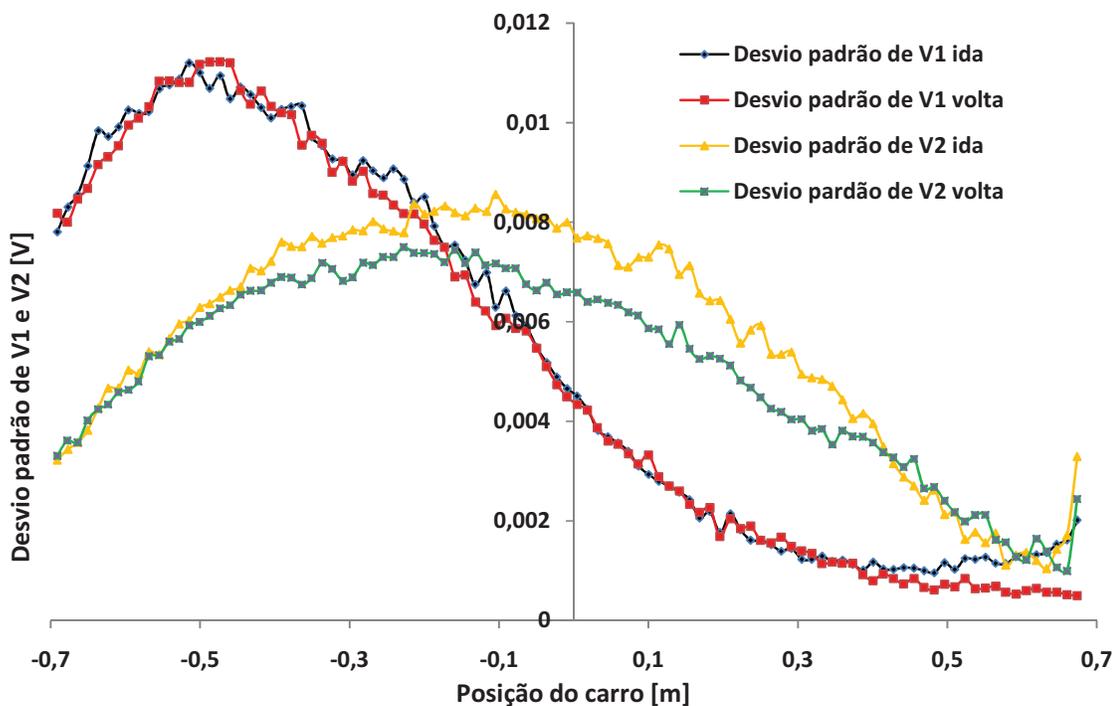


Figura 242 Gráfico do pior caso dos desvios padrões de V_1 e V_2 para o ciclo de ida e volta com o carro partindo da direita para esquerda com $f=240$ Hz

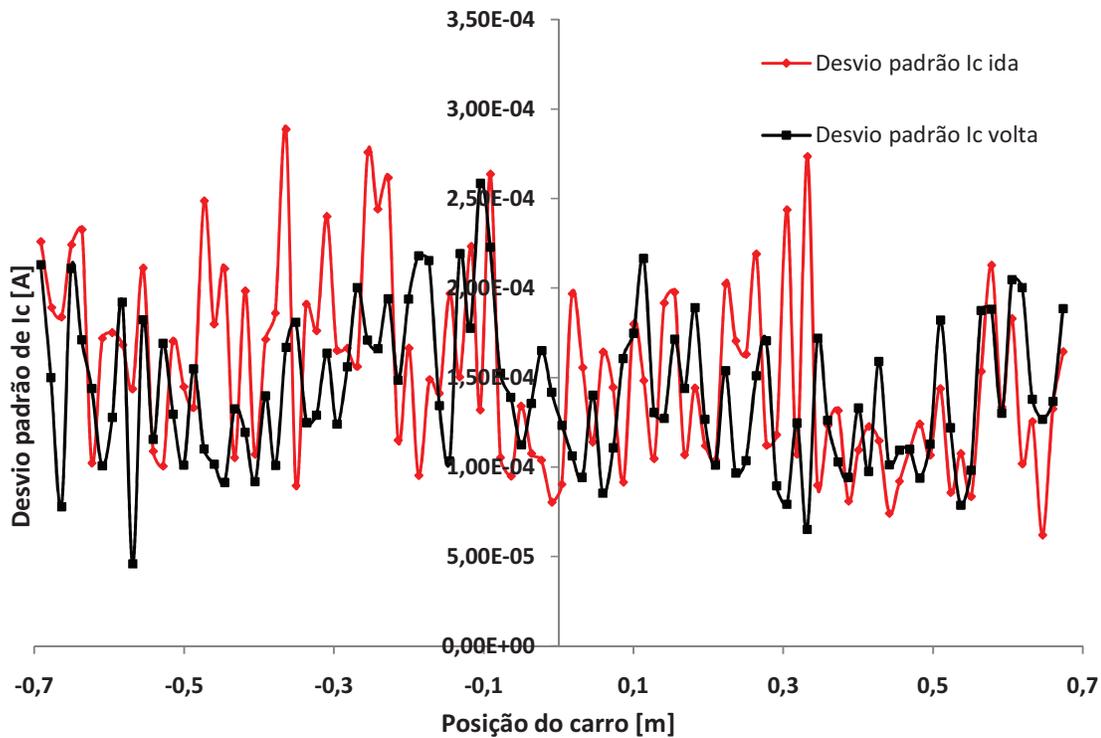


Figura 243 Gráfico dos desvios padrões da corrente I_c para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=240$ Hz

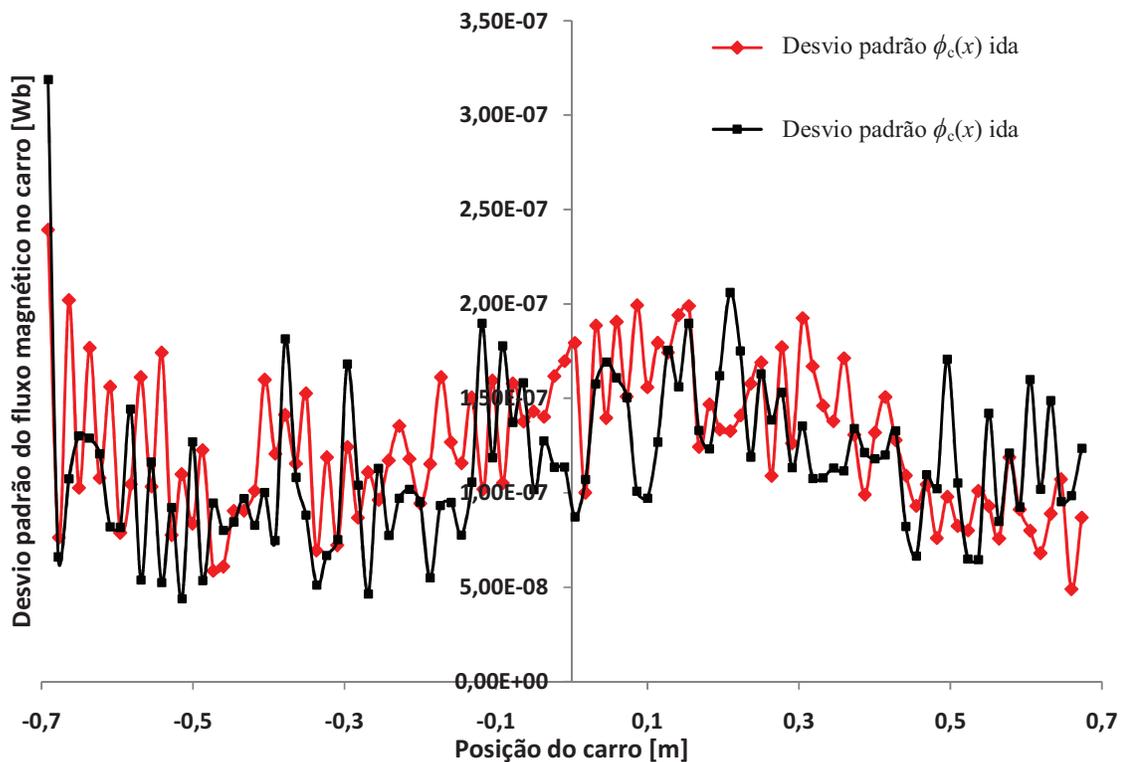


Figura 244 Gráfico dos desvios padrões do fluxo magnético no carro $\phi_c(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f = 240$ Hz

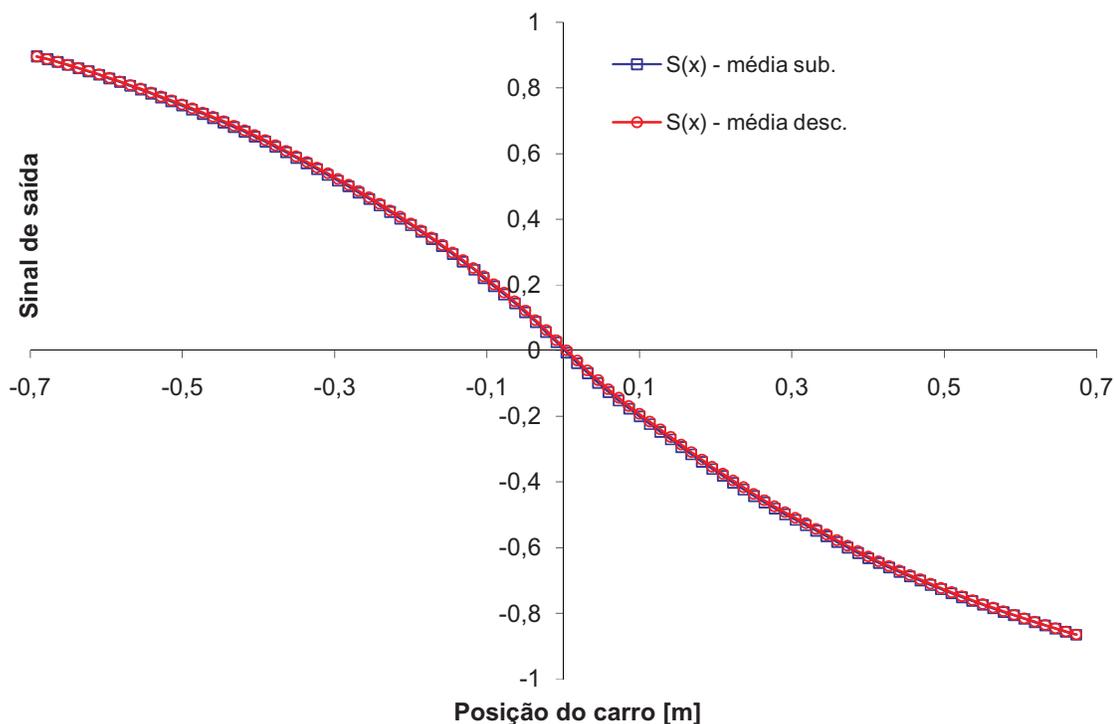


Figura 245 Curva média de subida e descida de $S(x)$ com o carro partindo da direita para esquerda com $f = 240$ Hz

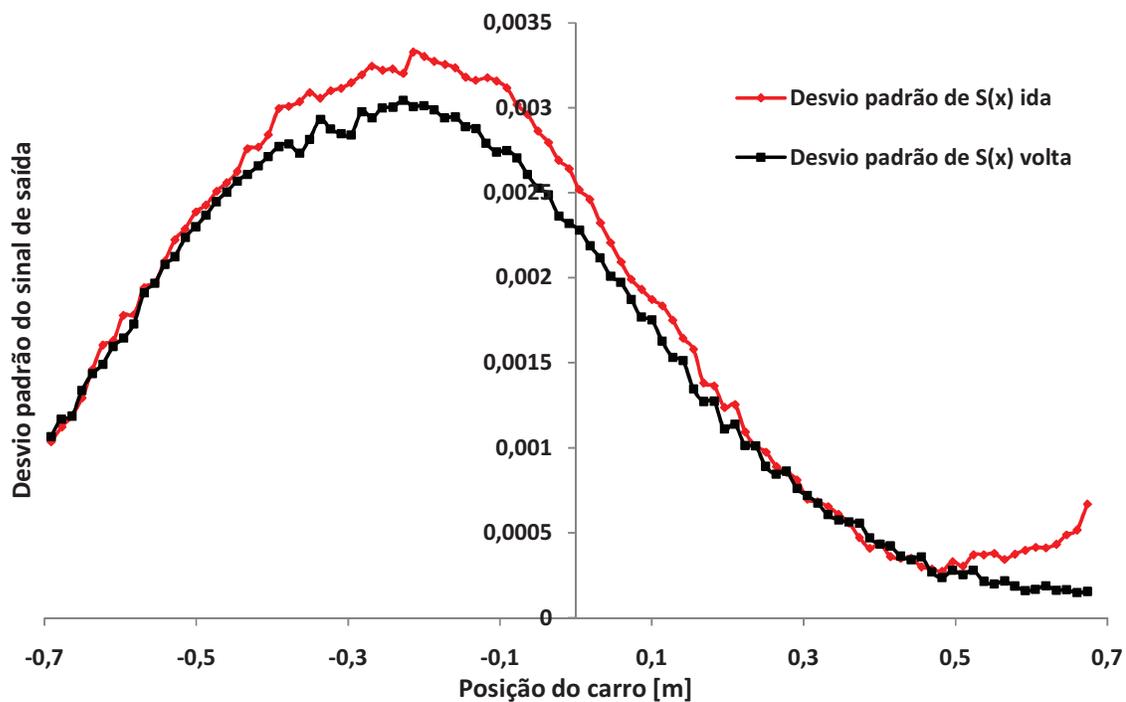


Figura 246 Gráfico dos desvios padrões $S(x)$ para o ciclo de ida e volta do pior caso de V_1 e/ou V_2 com o carro partindo da direita para esquerda com $f=240$ Hz

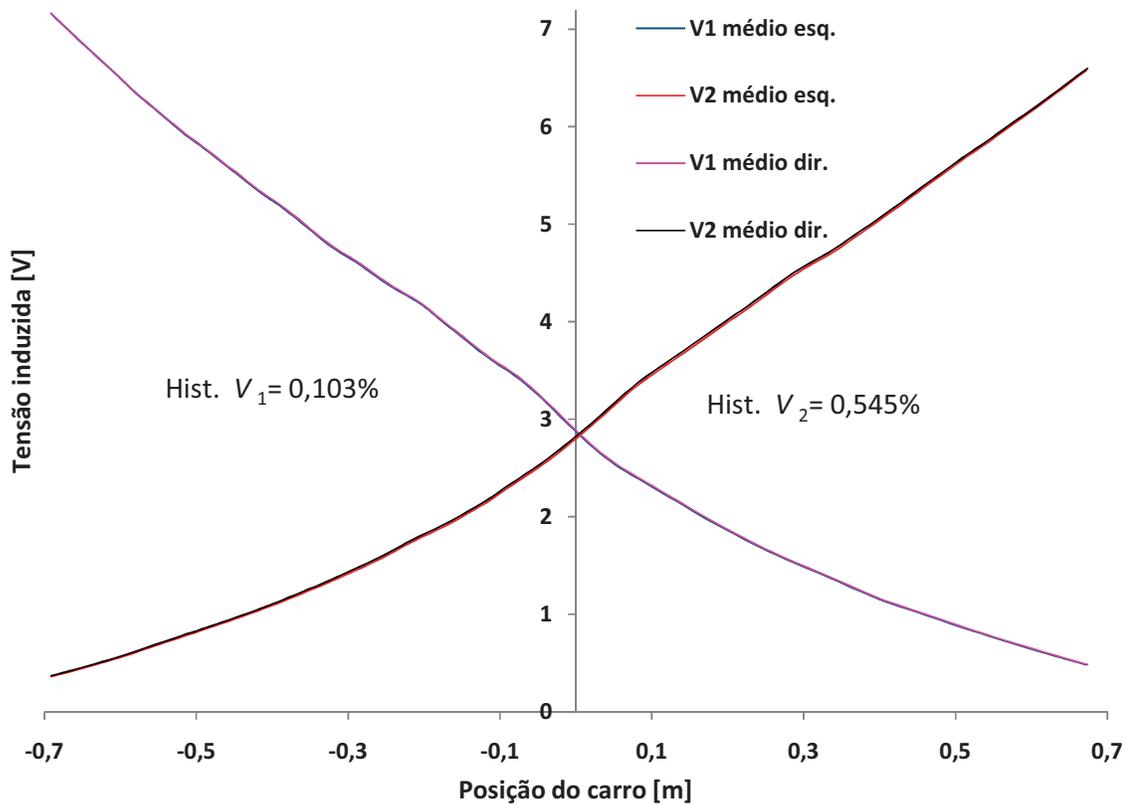


Figura 247 Curva média V_1 e V_2 com o carro partindo da direita e da esquerda com $f=60$ Hz

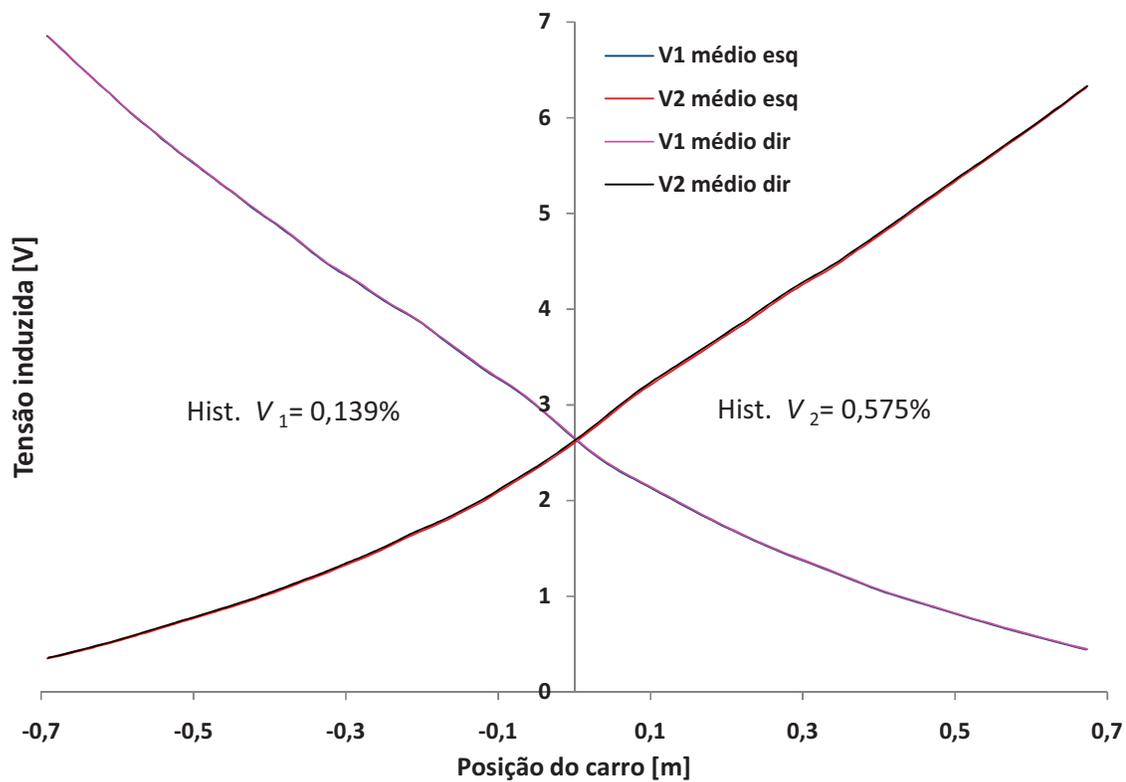


Figura 248 Curva média V_1 e V_2 com o carro partindo da direita e da esquerda com $f = 120$ Hz

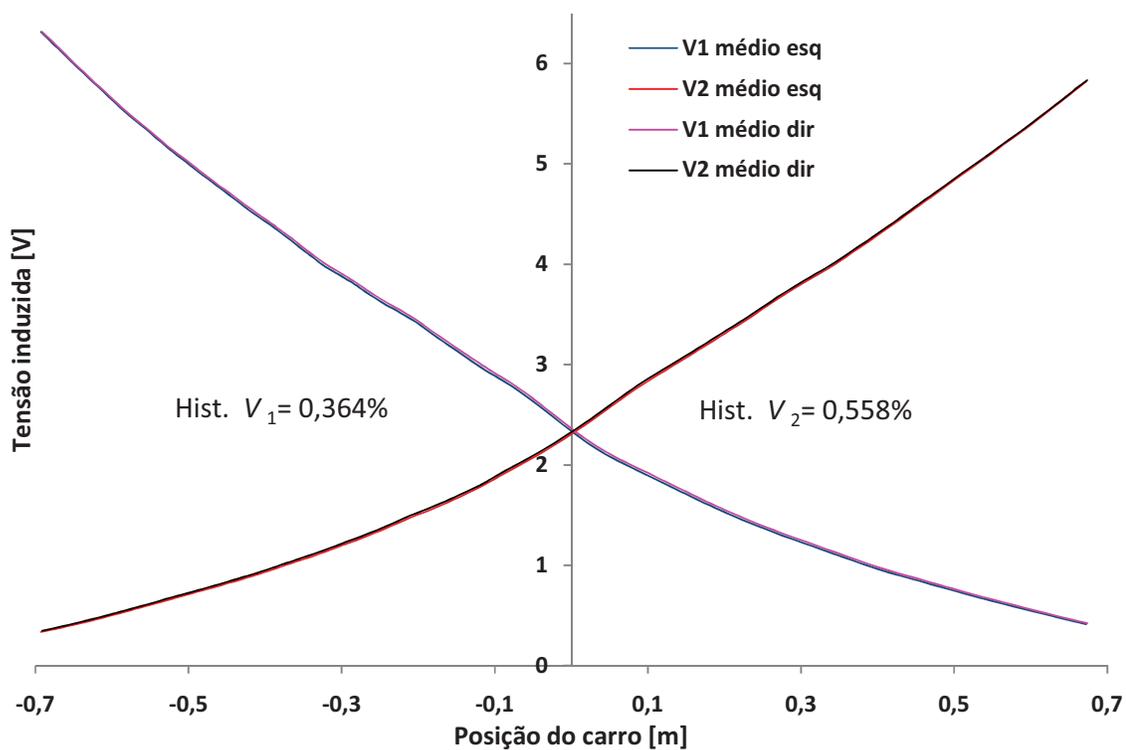


Figura 249 Curva média V_1 e V_2 com o carro partindo da direita e da esquerda com $f = 240$ Hz

APÊNDICE B

Os gráficos das Figuras 250 a 252 mostram apenas o pior caso dinâmico dos desvios padrões dos gráficos de V_1 e/ou V_2 do ciclo de ida e volta com o carro partindo da esquerda e ou da direita para as três frequências estudadas no Transdutor I.

Da mesma forma os gráficos das Figuras 253 a 255 mostram apenas o pior caso dos desvios padrões dos gráficos de V_1 e/ou V_2 do ciclo de ida e volta com o carro partindo da esquerda e ou da direita para as três frequências estudadas no Transdutor II.

Os gráficos das Figuras 256 a 259 mostram os desvios padrões dos ciclos de ida e volta de $S(x)$ dinâmico para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da esquerda e da direita apenas para frequência de 60 Hz do Transdutor I. As setas com bola nos gráficos indicam o ciclo de ida e as setas sem a bola indicam o ciclo de volta.

Da mesma forma os gráficos das Figuras 260 a 263 mostram os desvios padrões dos ciclos de ida e volta de $S(x)$ dinâmico para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da esquerda e da direita apenas para frequência de 60 Hz do Transdutor II.

Na Figura 264 tem-se um exemplo ampliado dos gráficos dinâmicos da Figura 124(a) e (b).

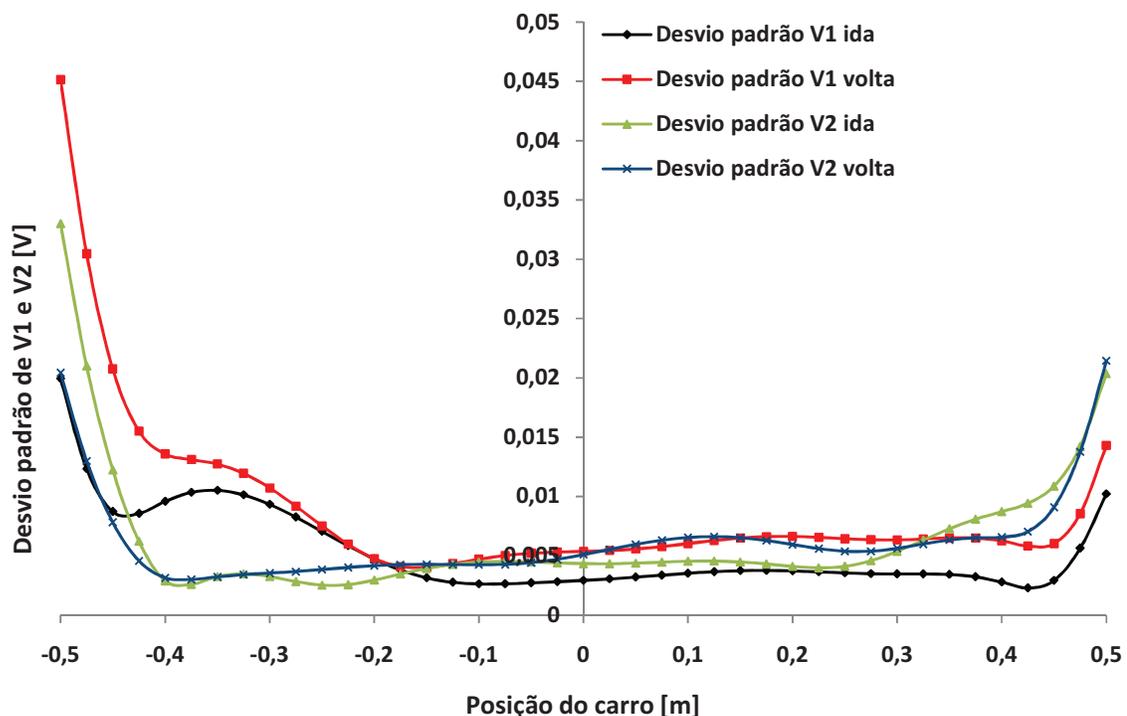


Figura 250 Gráfico das curvas do pior caso na frequência de 60 Hz do Transdutor I dos desvios padrões de V_1 e/ou V_2 dinâmicos do ciclo de ida e volta que ocorre na velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.

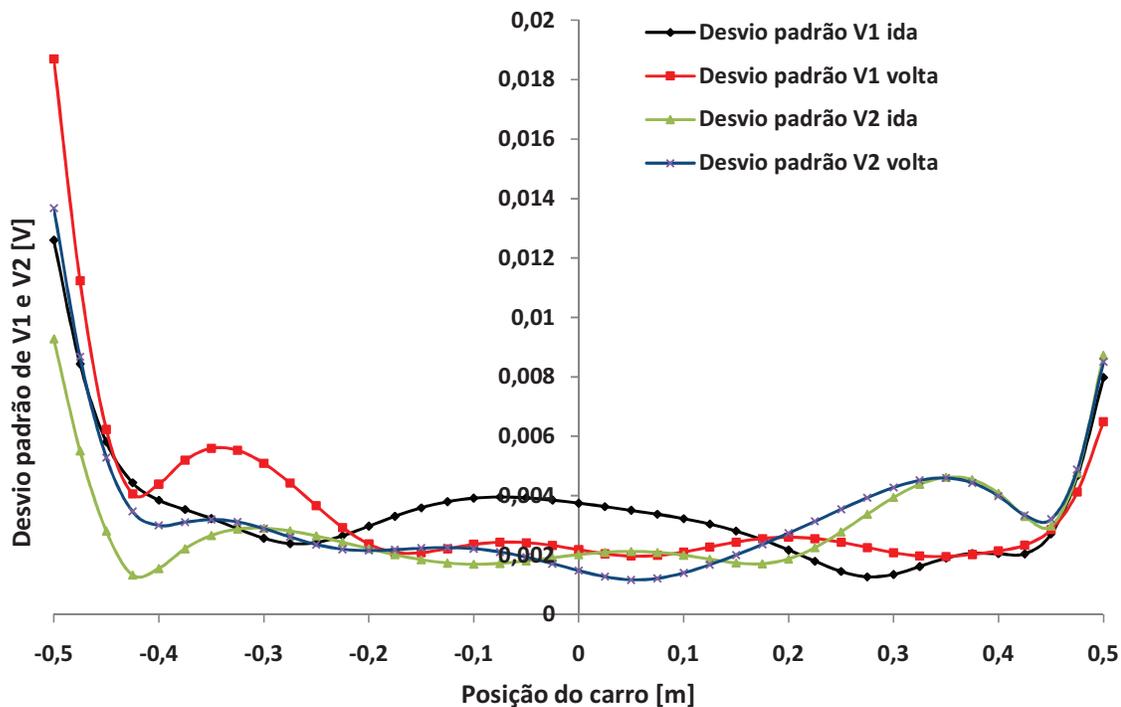


Figura 251 Gráfico das curvas do pior caso na frequência de 120 Hz do Transdutor I dos desvios padrões de V_1 e/ou V_2 dinâmicos do ciclo de ida e volta que ocorre na velocidade de 5 m/s com o carro partindo da direita

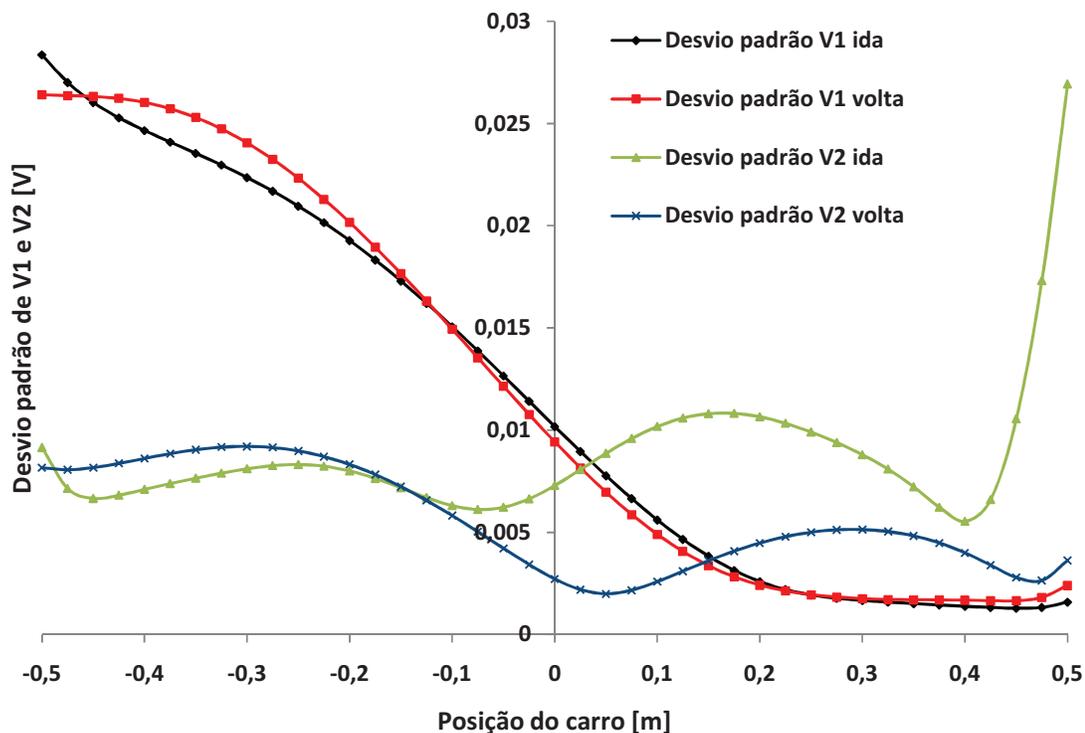


Figura 252 Gráfico das curvas do pior caso na frequência de 240 Hz do Transdutor I dos desvios padrões de V_1 e/ou V_2 dinâmicos do ciclo de ida e volta que ocorre na velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda

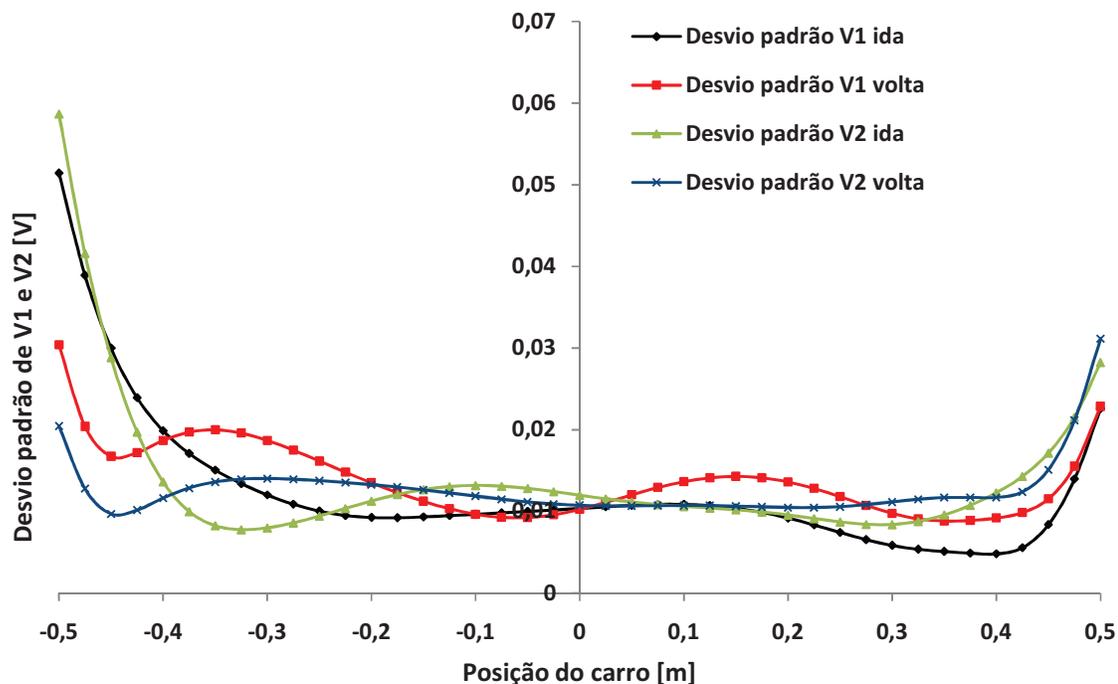


Figura 253 Gráfico das curvas do pior caso na frequência de 60 Hz do Transdutor II dos desvios padrões de V_1 e/ou V_2 dinâmicos do ciclo de ida e volta que ocorre na velocidade de 4 m/s com o carro partindo da esquerda.

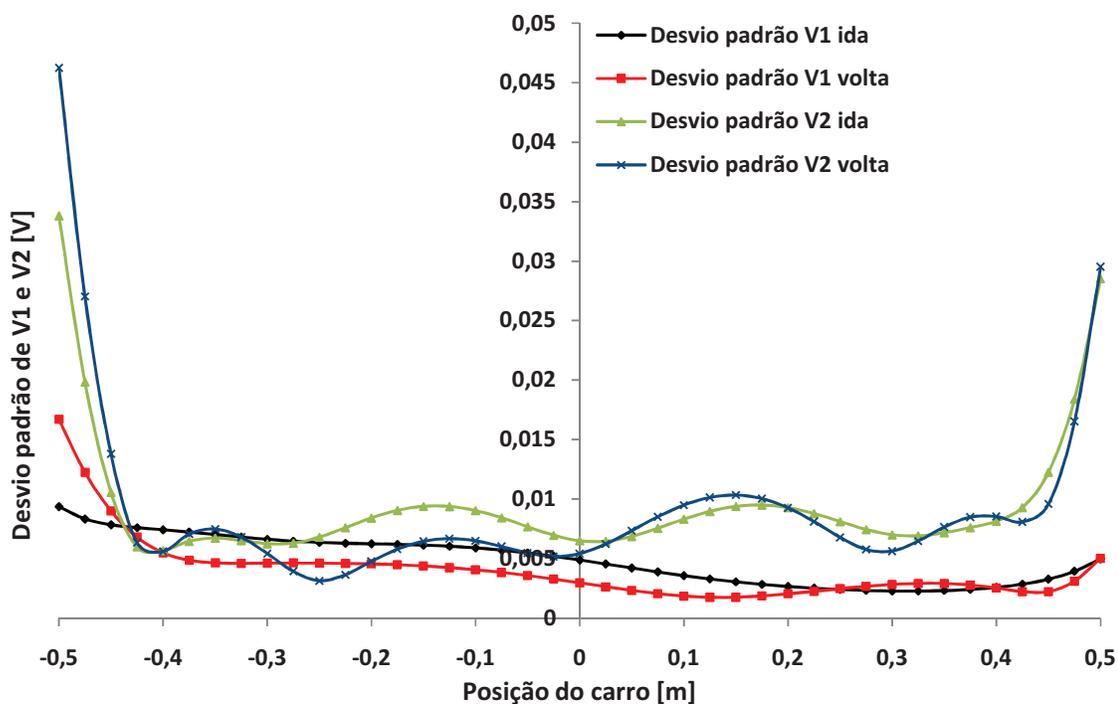


Figura 254 Gráfico das curvas do pior caso na frequência de 120 Hz do Transdutor II dos desvios padrões de V_1 e/ou V_2 dinâmicos do ciclo de ida e volta que ocorre na velocidade de 5 m/s com o carro partindo da esquerda.

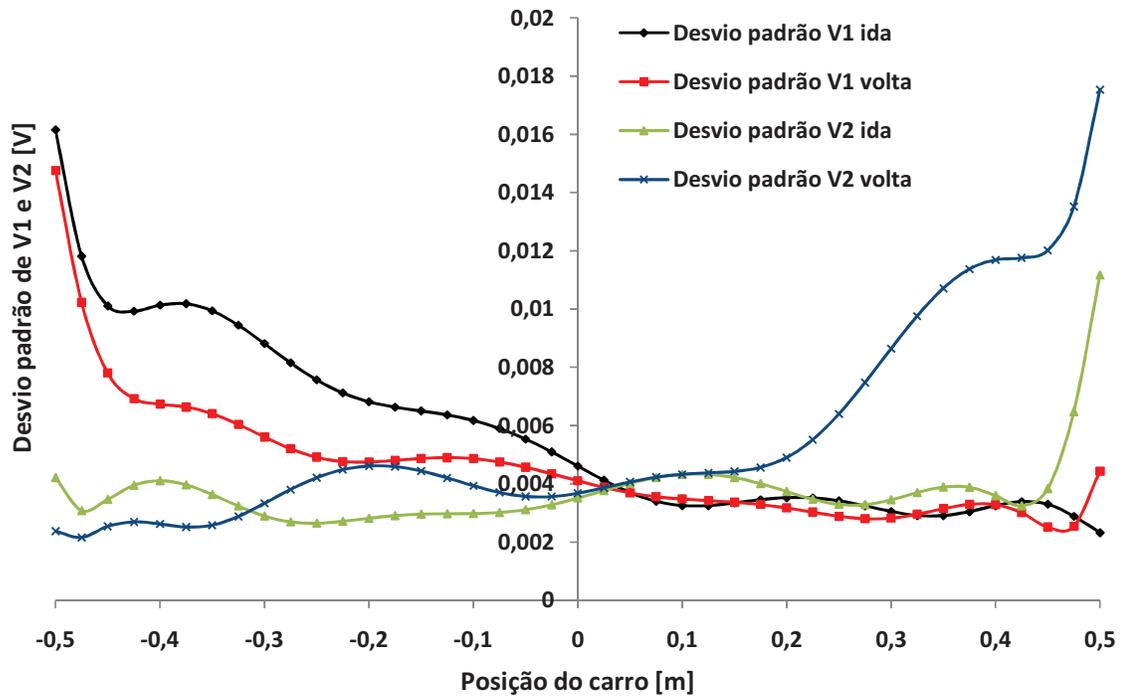


Figura 255 Gráfico das curvas do pior caso na frequência de 240 Hz do Transdutor II dos desvios padrões de V_1 e/ou V_2 dinâmicos do ciclo de ida e volta que ocorre na velocidade de 0,2 m/s com o carro partindo da direita.

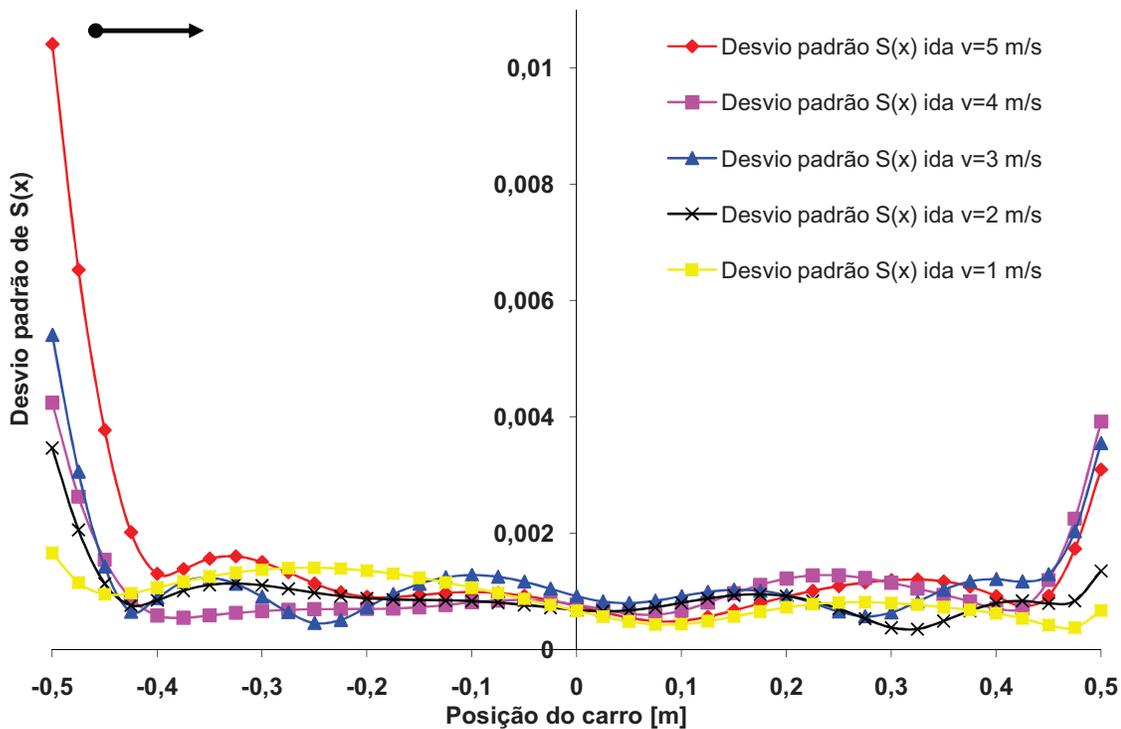


Figura 256 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de ida de $S(x)$ dinâmico no Transdutor I para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da esquerda para $f = 60$ Hz

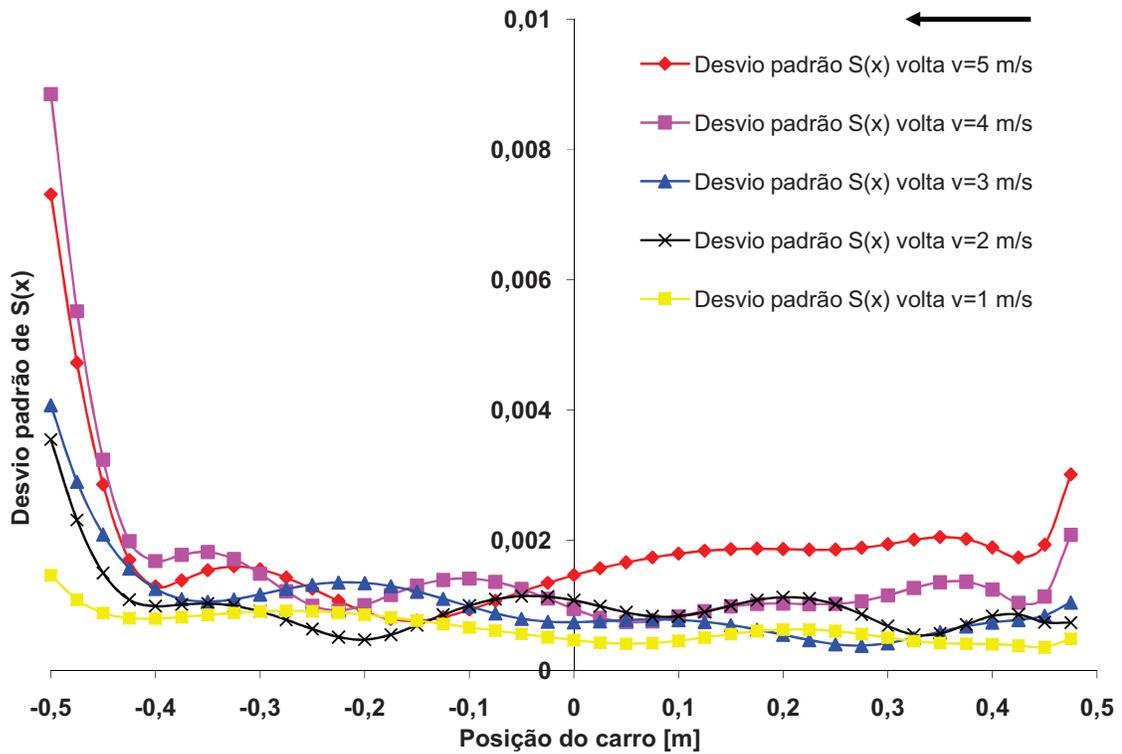


Figura 257 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de volta de $S(x)$ dinâmico no Transdutor I para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da esquerda para $f = 60$ Hz

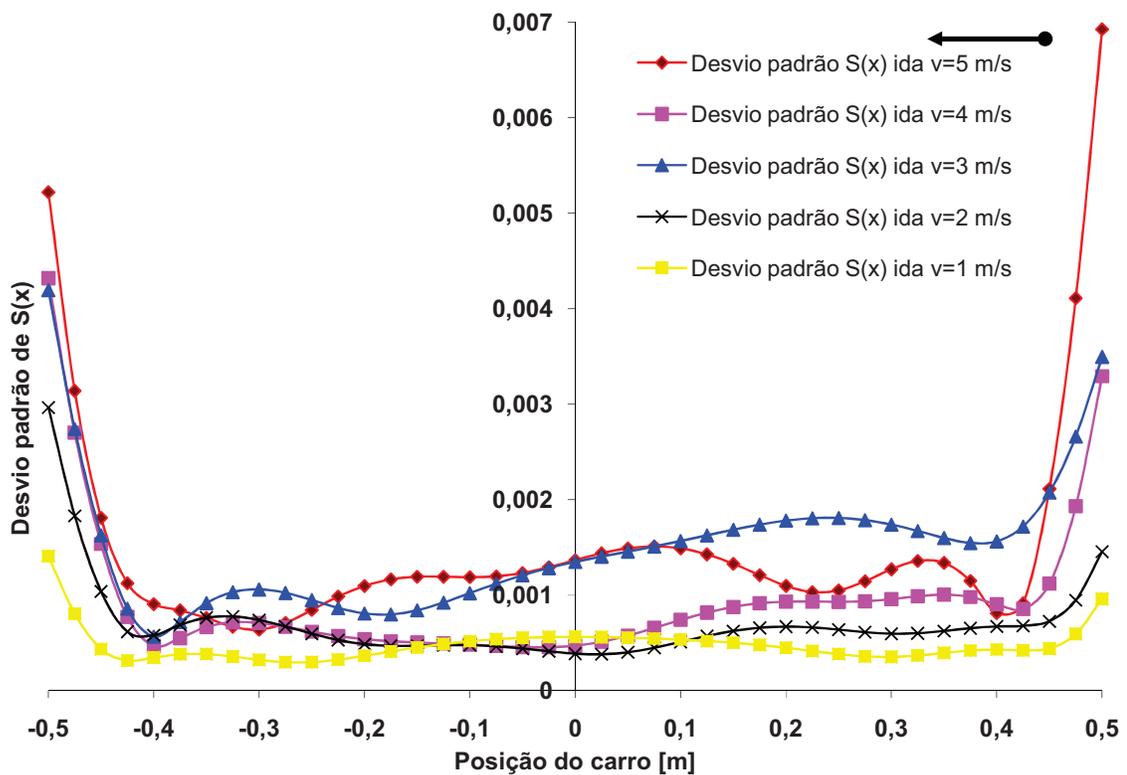


Figura 258 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de ida de $S(x)$ dinâmico no Transdutor I para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da direita para $f = 60$ Hz

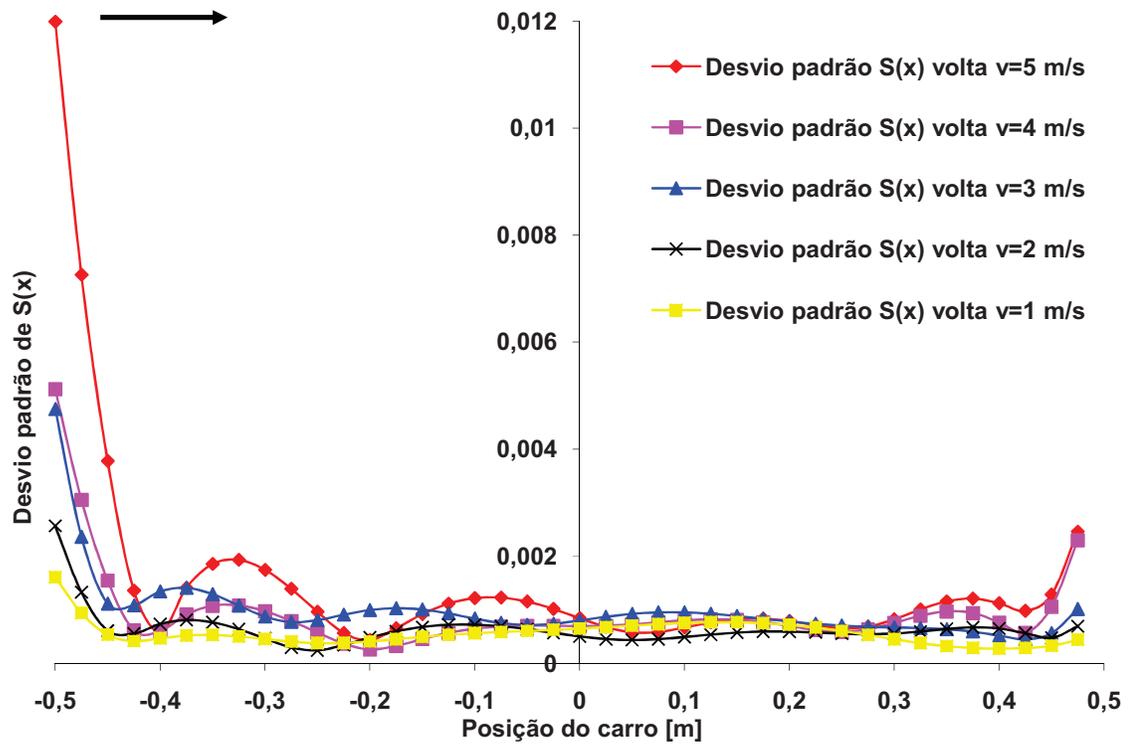


Figura 259 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de volta de $S(x)$ dinâmico no Transdutor I para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da direita para $f = 60$ Hz

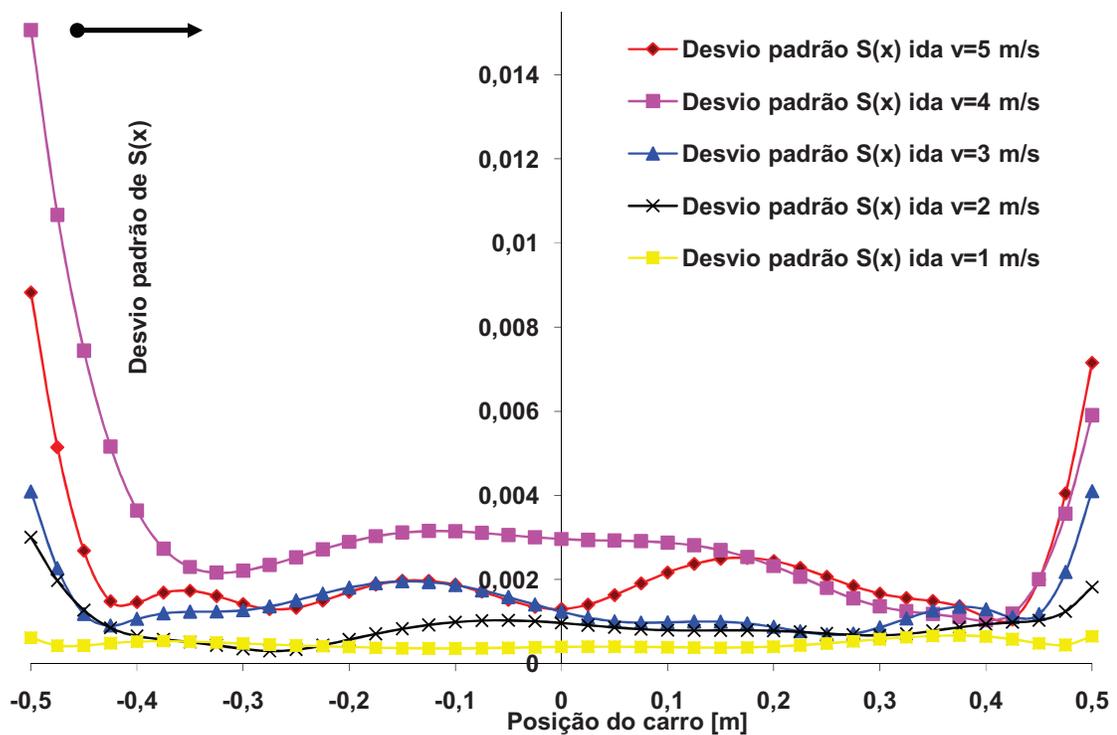


Figura 260 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de ida de $S(x)$ dinâmico no Transdutor II para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da esquerda para $f = 60$ Hz

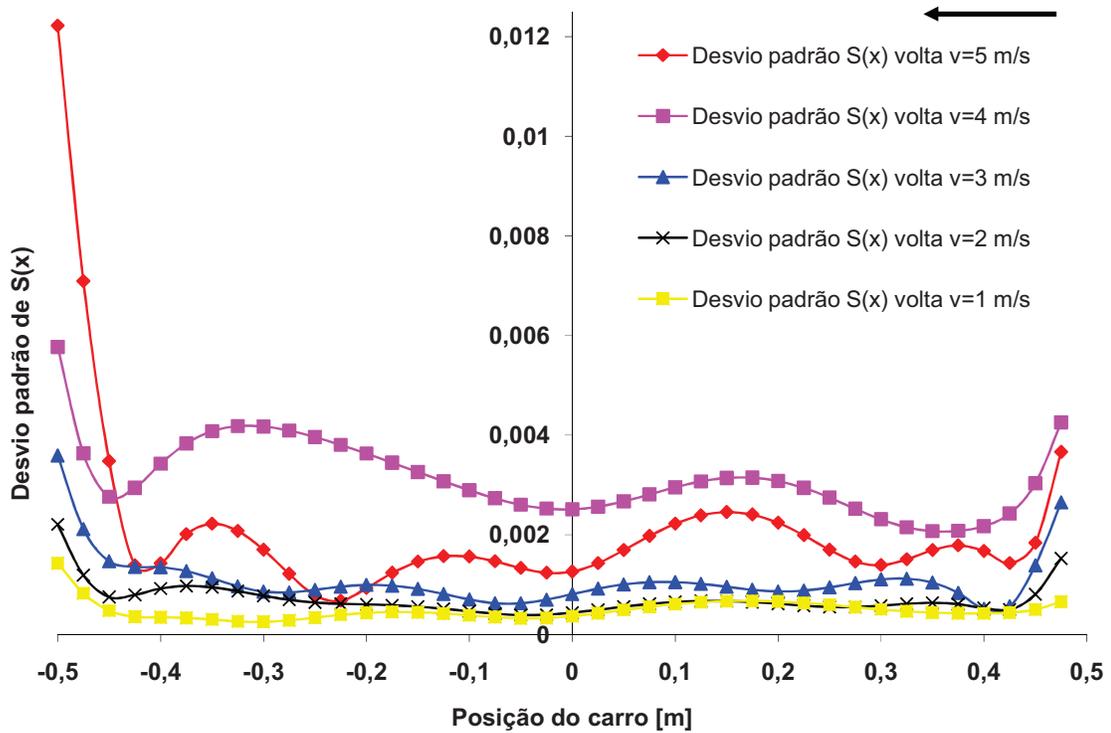


Figura 261 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de volta de $S(x)$ dinâmico no Transdutor II para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da esquerda para $f = 60$ Hz

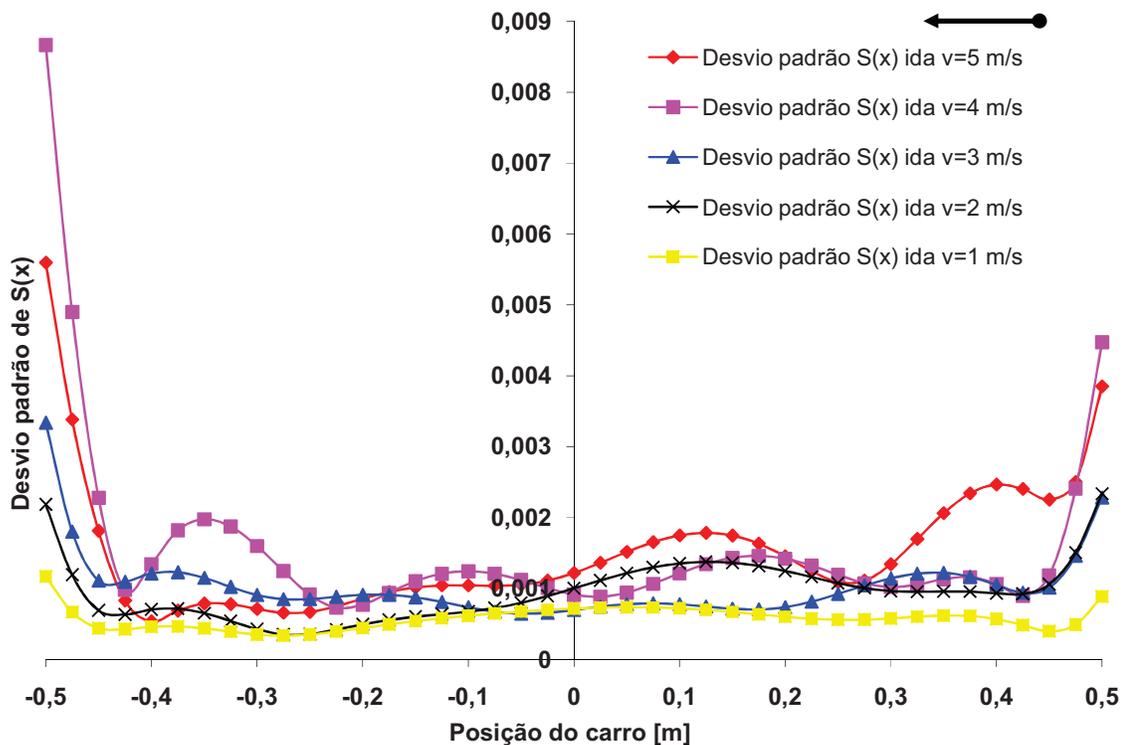


Figura 262 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de ida de $S(x)$ dinâmico no Transdutor II para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da direita para $f = 60$ Hz

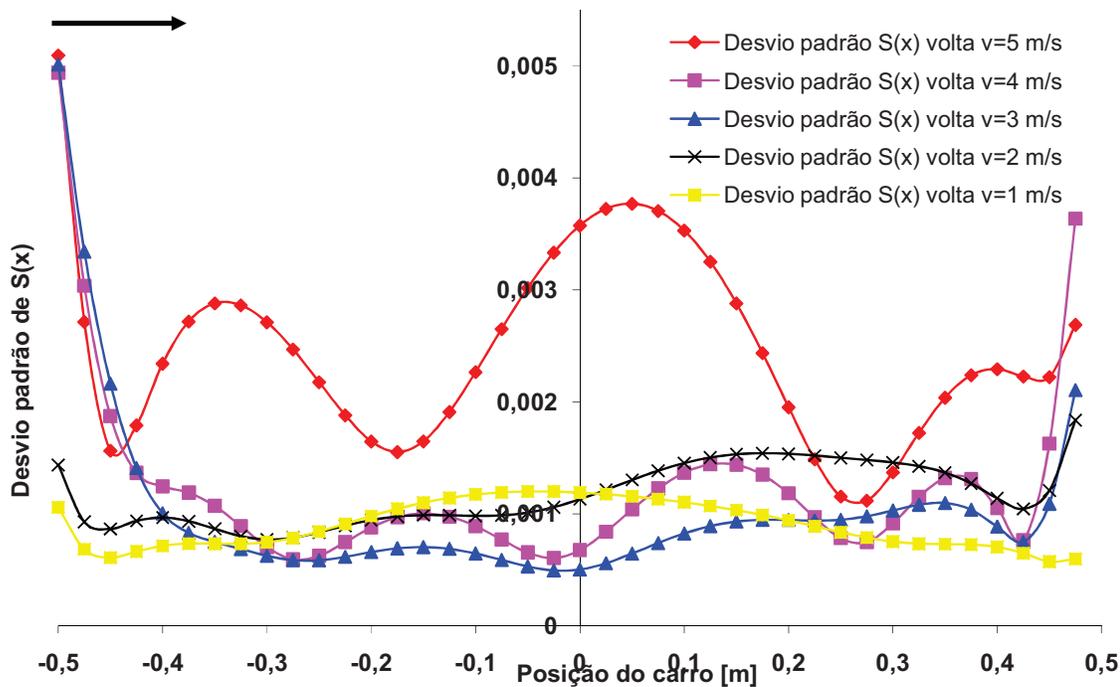


Figura 263 Gráfico dos desvios padrões do ciclo de volta de $S(x)$ dinâmico no Transdutor II para as velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s com o carro partindo da direita para $f=60$ Hz.

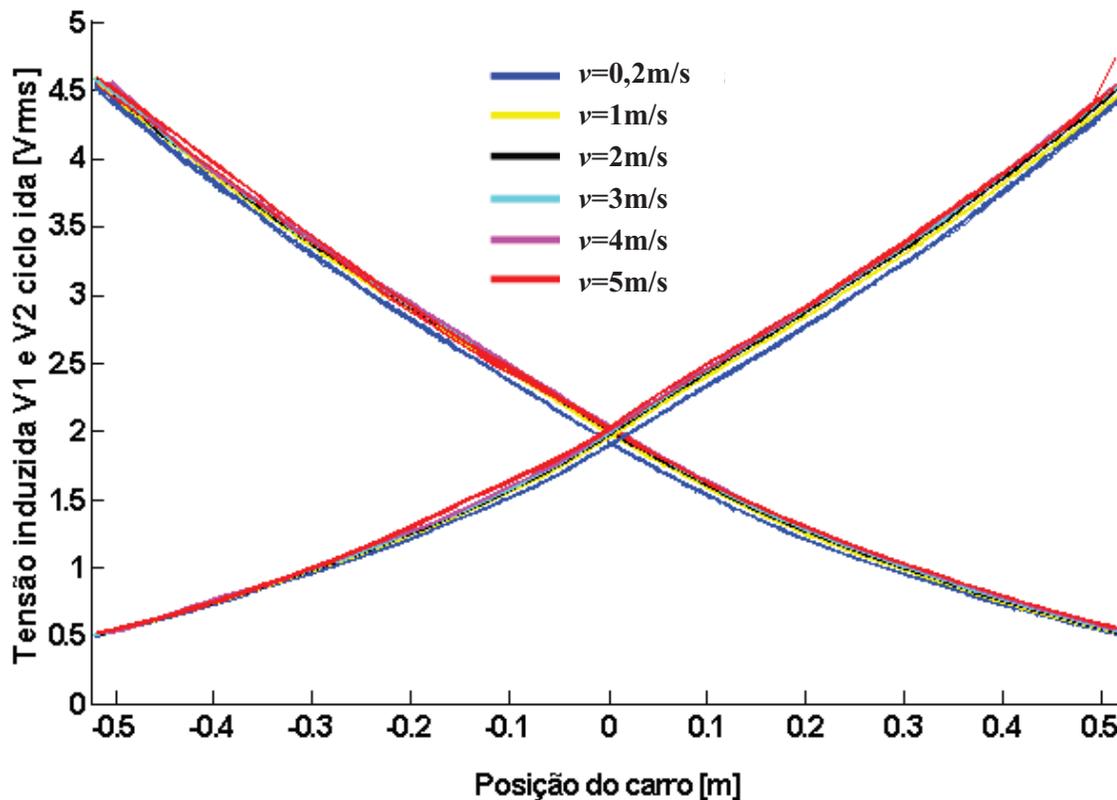


Figura 264 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida do Transdutor I na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda com os pontos de dispersão gerados pelo Matlab para $v=0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

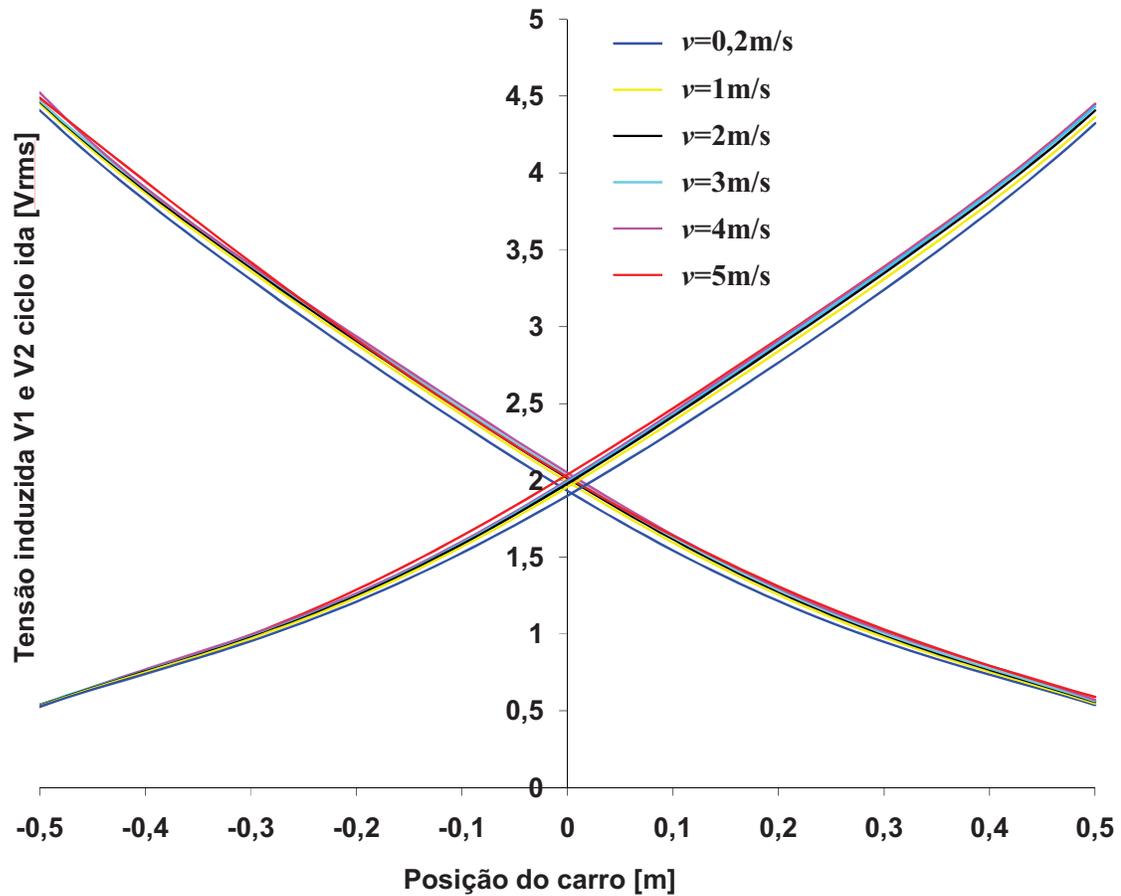


Figura 265 Comparação entre os valores dinâmicos de V_1 e V_2 no ciclo de ida do Transdutor I na frequência de 240 Hz com o carro partindo da esquerda com as médias das curvas geradas pelo Excel para $v = 0,2; 1; 2; 3; 4$ e 5 m/s.

APÊNDICE C

O sistema de aquisição de sinais usado tanto para a obtenção dos valores dinâmicos como estáticos foi o DAQ (*Data Acquisition*) modelo NI USB 6210, 16 Inputs, 16-bits, 250 KS/s, da National Instruments, que na escala de 10 V usada nas medições tem uma resolução de 320 μV com uma incerteza nesta escala de 2,69 mV.

O sistema de referência de posição é dado pelo transdutor de posição do tipo resistivo THL, da Novotechnik, com 1750 mm de curso, resolução menor do que 0,01 mm, linearidade de $\pm 0,03\%$, velocidade máxima do carro de 10 m/s e incerteza da ordem de 0,01 mm.

Os multímetros Agilent são de 6 $\frac{1}{2}$ dígitos com uma exatidão de $\pm (0,06\%$ da leitura + 0,03 % da escala) para tensão c.a. *rms*, $\pm (0,3\%$ da leitura + 0,04 % da escala) para corrente c.a. *rms* e com uma resolução de 0,000001 vezes o fundo da escala.

Para a obtenção dos dados estáticos bem como os dinâmicos o programa do Labview usa um drive da National Instruments para o DAQ, o “DAQ Assistant”, este drive fornece uma matriz de dados onde a primeira coluna é o vetor tempo e nas demais colunas o valor de tensão naquele instante de tempo em cada uma entrada digital utilizada. Deste modo a primeira coluna é o vetor de tempo, a segunda os valores de tensão da bobina exploradora da culatra lateral esquerda, a terceira coluna os valores de tensão da bobina exploradora da culatra lateral direita, a quarta coluna os valores de tensão do transdutor de posição resistivo, na quinta coluna os valores de tensão do “shunt” usado para medir a corrente no eletro-ímã do carro e na sexta coluna os valores de tensão da bobina exploradora no carro. Depois de feita a aquisição dos dados a matriz pode ser salva pelo programa tanto na forma de um arquivo eletrônico para o MatLab como para o Excel.

No caso dos valores estáticos de tensão medidos com o DAQ, foi usada uma função do Labview para calcular os valores *rms*, que faz uma integração do sinal senoidal por um período determinado e devolve a média *rms* dos valores lidos no período. O período usado foi de 1 segundo, pois assim pode-se fazer uma comparação com medidas feitas substituindo o DAQ por 4 multímetros Agilent e estes forneciam uma média dos valores lidos em aproximadamente 1 segundo. No gráfico da Figura 264 se pode ver os resultados das tensões médias de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda para frequência de 60 Hz e, como se pode observar, os valores calculados pelo DAQ são iguais aos valores dos multímetros Agilent.

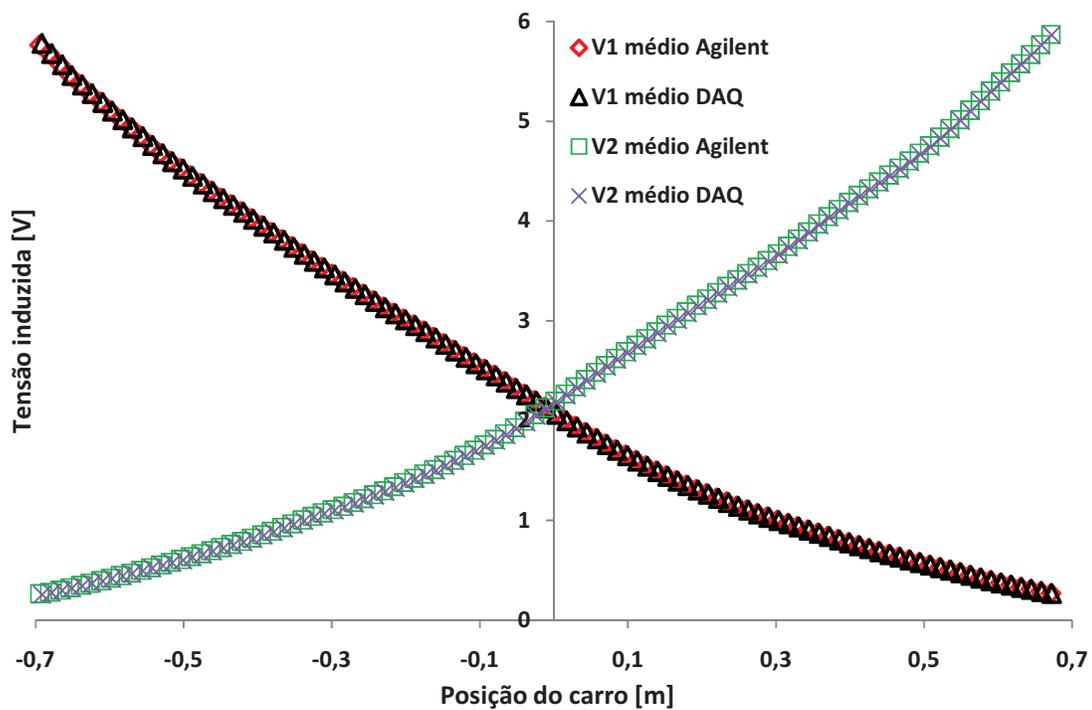


Figura 264 Curva média comparativa dos valores de tensão *rms* dos multímetros Agilent e o DAQ de V_1 e V_2 com o carro partindo da esquerda com $f=60$ Hz