



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSO
GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

JULIANA RIBEIRO TOURINHO DANTAS SARTORI

ROBÔ DE INSPEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO:
ANÁLISE GEOMÉTRICA E CINEMÁTICA

Salvador
13 de julho 2018

JULIANA RIBEIRO TOURINHO DANTAS SARTORI

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de
Pós-Graduação Stricto Sensu do Centro Universitário
SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do
título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Rodrigo Santiago Coelho
Coorientador: Prof. Me. Marco Antônio dos Reis

Salvador
2018

JULIANA RIBEIRO TOURINHO DANTAS SARTORI

ROBÔ DE INSPEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO: ANÁLISE GEOMÉTRICA E CINEMÁTICA

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial, Centro Universitário SENAI Cimatec

Aprovada em 13 de julho de 2018.

Banca Examinadora

Rodrigo Santiago Coelho– Orientador

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de Ruhr-Universität Bochum, Bochum, Alemanha

Centro Universitário SENAI CIMATEC

Marco Antônio dos Reis – Coorientador

Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

Centro Universitário SENAI CIMATEC

Membro interno da Banca: Charles Chemale Yurgel

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Centro Universitário SENAI CIMATEC

Membro externo da Banca: Gustavo Medeiros Freitas

Doutor em Engenharia Elétrica - Controle, Automação e Robótica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

Instituto Tecnológico Vale Mineração

Dedico este trabalho (e a minha melhor parte) a Livia, minha
filha.

AGRADECIMENTOS

A Deus, um farol nos momentos de tempestades, pela vida e por todas as oportunidades e pessoas colocadas em meu caminho, que se tornaram essenciais para esta conquista.

A Rodrigo, meu marido, companheiro na vida, um pilar na nossa família.

A Lívia, minha filha, um raio do sol iluminando meu coração.

Aos meus pais e avós por toda dedicação, educação e amor fundamentais para a minha formação moral e profissional.

As minhas famílias, pelo carinho e acolhimento de sempre.

Ao Instituto SENAI de Inovação em Conformação e União de Materiais, pelo suporte financeiro.

Ao Me. Marco Antônio dos Reis, pela coorientação e por acreditar em mim, me propondo novos desafios.

Ao Dr. Rodrigo Santiago Coelho, pela orientação.

Aos Dr. Charles Yurgel e Gustavo Freitas pela disponibilidade e pelas críticas construtivas.

Aos queridos colegas do BIR (Instituto Brasileiro de Robótica) do SENAI Cimatec, pelo crescimento profissional proporcionado pelo bom convívio e partilha de conhecimento; em especial a Luiz Ledezma, Tiago Souza, Pedro Xavier, Branilson Costa, Luiz Paulo e Gabriel Caldas.

É preciso que eu suporte duas ou três larvas se
quiser conhecer as borboletas.

Antoine de Saint-Exupéry, 2015.

RESUMO

O sistema elétrico brasileiro conta com milhares de quilômetros de linhas de transmissão (LT), sendo que uma quantidade considerável já ultrapassou 40 anos. Procedimentos de inspeção adequados é, então, uma necessidade permanente. A maioria das inspeções de LT, por sua vez, é realizada por profissionais especialistas (ou a bordo de helicóptero ou suspenso diretamente à linha) ou usando sensores estatísticos; soluções caras, arriscadas e que oferecem dificuldade de acesso. Desde os anos 1990, portanto, pesquisadores têm proposto robôs moveis (autônomos ou semiautônomos) para assistir ou substituir pessoas nesta atividade.

O presente trabalho faz parte do projeto do *ELIR (Electrical Inspection Robot)*, o qual tem como meta desenvolver um robô autônomo para realização de inspeção visual e térmica de LT's energizadas (138 kV) com inclinação de até 60° e para transposição de obstáculos, sendo de fácil montagem e fabricação. Para tal, nesta dissertação foram realizadas as análises geométrica e cinemática (direta e inversa) deste robô. O foco do trabalho foi: (a) avaliação da capacidade geométrica do robô em transpor grampos de suspensão; (b) as matrizes de transformação homogêneas das suas juntas e (c) o estudo da cinemática inversa no MATLAB® de três situações diferentes; gerando gráficos de variação de ângulos de juntas; da velocidade na direção do eixo x, do y e a resultante para as roldanas além de comparar os resultados simulados para posição y das roldanas e para as distâncias entre os centros das roldanas com os de referência.

Pela análise geométrica, conclui-se que o *ELIR* tem a capacidade para ultrapassagem do grampo de suspensão considerado. Entendeu-se ainda que a matriz de transformação homogênea gerada pode ser satisfatoriamente utilizada para obter a posição, orientação e velocidade das roldanas, dado os valores das variáveis das juntas.

Pelas três simulações da análise de cinemática inversa, o comportamento dos gráficos e dados obtidos mostraram que os sistemas de equações e seus códigos de solução implementados simulam de maneira satisfatória e esperada as situações propostas. Os erros relativos entre as ordenadas simuladas das roldanas e seus valores de referências encontram-se dentro da expectativa; igual a zero na primeira e terceira simulação e assumindo um comportamento justificável na segunda. Considerou-se também que a

grandeza dos erros relativos entre a distância dos centros das roldanas obtidos e os definidos não é representativa, comparada à do robô e ao caminho.

Este trabalho é uma etapa inicial do projeto do *ELIR*, que busca impactar no aumento da segurança e economia na inspeção de LT' e da eficiência da distribuição energética; na diminuição de transtornos e gastos por falta de energia elétrica e no desenvolvimento da robótica brasileira.

Palavras-chaves: *ELIR*; análise cinemática; análise geométrica; robótica; inspeção de linha de transmissão.

ABSTRACT

The Brazilian electrical system has thousands of kilometers of transmission lines (TL), such that a considerable amount has already surpassed 40 years. Inspection processes are, so, a permanent need. Most inspections, in turn, are performed by specialist professionals (either on helicopter or suspended directly to the line) or using statistical sensors; expensive and risky solutions that offer access difficulty. Since the 1990s, therefore, researchers have proposed mobile robots (autonomous or semi-autonomous) to assist or replace people in this activity.

This work is part of *ELIR (Electrical Inspection Robot)* project, which aims to develop an autonomous robot for visual and thermal inspection of energized TL's (138 kV) with inclination up to 45° and for obstacles transposition, being of easy assembly and manufacturing. For this, in this dissertation the kinematics analysis (direct and inverse) and geometric of this robot were realized. The focus of the work was: (a) evaluation of the geometric ability of the robot in transposing suspension clamps. (b) homogeneous transformation matrices of their joints and (c) the study of the inverse kinematics in MATLAB[®] of three different situations; generating graphs of variation of joint angles; the velocity in the direction of the x-axis, the y-axis and the resultant for the pulleys, in addition to comparing the simulated results for the y-position of the pulleys and the distances between the centers of the pulleys with the reference ones.

By the geometric analysis, it was concluded that the ELIR has capacity to overcome suspension clamp considered. It was also understood that homogeneous transformation matrix generated can be satisfactorily used to obtain position, orientation and velocity of pulleys, given the values of the variables of the joints.

By the three simulations of inverse kinematics analysis, the behavior of graphs and dates obtained shows that systems of equations and their implemented solutions codes simulate the proposed situations in a satisfactory and expected way.

The relative errors between pulley's simulated ordinates and their reference values are within the expectation, equal to zero at first and third simulation and assuming a justifiable behavior at second one. It was also considered that magnitude of relative errors between

the distances of pulley's center obtained and defined ones is not representative, compared to the magnitude of robot and trajectory.

This work is an initial stage of ELIR project, which aims to impact on increasing security and economy at inspection of TL's and energy distribution efficiency, in the reduction of inconvenience and spending due to lack of electric energy and in the development of Brazilian robotics.

Keywords: *ELIR*; kinematics analysis; geometric analysis; robotic; inspections of transmission lines.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo do estado da arte dos robôs para inspeção de linhas de transmissão.....	30
Tabela 2.2 - Parâmetros de DH do robô plano com dois GDL (Figura 10)	42
Tabela 3.1 - Principais obstáculos a serem transpostos pelo <i>ELIR</i> (representação no SolidWorks e suas dimensões máximas em milímetros)	50
Tabela 3.2 Dimensão (m) dos links do <i>ELIR</i>	54
Tabela 3.3 Simulações realizadas na análise da cinemática inversa do <i>ELIR</i>	55
Tabela 4.1 Etapas do processo de ultrapassagem do grampo de suspensão (continua)	69
Tabela 4.2 - Parâmetros de DH do <i>ELIR</i> , para a verificação do deslocamento das roldanas das unidades de tração.....	73
Tabela 4.3 – Valores máximos e mínimos dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) alcançados durante a ultrapassagem do obstáculo na simulação I.....	81
Tabela 4.4 - Valores máximos e mínimos dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) alcançados durante a simulação I.....	81
Tabela 4.5 – Valores máximos e mínimos da velocidade v_y e valores iniciais e finais da velocidade v (em m/s) para as cinco roldanas (D, E, L, S e T) alcançados durante a simulação I.....	90
Tabela 4.6 – Valores máximos e mínimos das velocidades v_y e v (em m/s) para as cinco roldanas (D, E, L, S e T) alcançados durante ultrapassagem do obstáculo na simulação I.....	90
Tabela 4.7 – Valores máximos e mínimos dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) alcançados durante a simulação II.....	92
Tabela 4.8 – Valores máximos e mínimos da velocidade v_y e valores iniciais e finais da velocidade v (em m/s) para as cinco roldanas (D, E, L, S e T) alcançados durante a simulação II.....	96
Tabela 4.9 – Erros máximos relativos encontrados entre os valores de ordenadas simulados e os calculados para as roldanas D, E, L e S e o intervalo de ocorrência (entre x' e x'') durante a segunda simulação.....	101

Tabela 4.10 – Diferenças máximas entre os links DE e ST simulados e reais, obtidos durante a segunda simulação.....	105
Tabela 4.11 – Valores dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) alcançados durante a simulação III.....	108
Tabela 4.12 – Valores das velocidades v_x , v_y e v (em m/s) para as cinco roldanas (D, E, L, S e T) alcançados durante a simulação III.....	112
Tabela 4.13 – Erros máximos relativos encontrados entre os valores de ordenadas simulados e os calculados para as roldanas D, E, L e S durante a terceira simulação.....	117
Tabela 4.14 – Diferenças máximas entre os links DE e ST simulados e reais, obtidos durante a terceira simulação.....	120

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1–Fluxograma das atividades de desenvolvimento de sistemas robóticos	23
Figura 2 - Inspeção de linhas de transmissão de energia feita por aeronaves tripuladas	29
Figura 3 – Linha do tempo do estado da arte dos principais robôs para inspeção de linhas de transmissão.....	30
Figura 4 - Relação dos tipos de cinemática	36
Figura 5 Esquema da Cinemática Direta.....	36
Figura 6 - Sistema de coordenadas para um manipulador planar	37
Figura 7 - Posição relativa de duas retas no espaço.....	38
Figura 8 - Convenção para membros, juntas e sistemas de coordenadas.....	39
Figura 9 - Representação DH	41
Figura 10 - Robô planar com duas articulações rotativas	42
Figura 11- Conceito mecânico do <i>ELIR</i>	47
Figura 12- Vista frontal e lateral do <i>ELIR</i> com suas principais dimensões em milímetros.....	48
Figura 13 - Peso próprio do cabo representado por função catenária.....	49
Figura 14- Etapas da análise geométrica do <i>ELIR</i>	50
Figura 15 - Etapas da análise da cinemática direta do <i>ELIR</i>	52
Figura 16 – Esquema do <i>ELIR</i> com os sistemas de coordenadas das suas articulações, para a verificação do deslocamento das roldanas das unidades de tração.....	53
Figura 17 – Duas primeiras etapas da análise cinemática inversa do <i>ELIR</i>	53
Figura 18 - Denominação das juntas e ângulos do <i>ELIR</i> para estudo da cinemática inversa.....	54
Figura 19 - Caminho planejado como percurso para a primeira simulação do <i>ELIR</i>	56
Figura 20 – Detalhe do caminho planejado como percurso para a primeira simulação do <i>ELIR</i> , união de cinco curvas (C1 a C5).	57
Figura 21 – Etapas específicas da Simulação I da análise cinemática inversa do <i>ELIR</i>	58

Figura 22 – Raio de distância entre os centro das roldanas da unidade de tração à esquerda (ponto D e E).....	59
Figura 23 – Detalhe dos pontos G , I e L.....	60
Figura 24 – Etapas específicas da Simulação II da análise cinemática inversa do <i>ELIR</i>	63
Figura 25 – Aproximação da catenária por um conjunto de retas.....	64
Figura 26 – Caminho da terceira simulação, reta em aclave	67
Figura 27 – Configuração de juntas, ângulos e links para validação da matriz homogênea obtida na análise cinemática	74
Figura 28 – Etapa inicial da movimentação do <i>ELIR</i> na simulação I.....	75
Figura 29 – Etapas de movimentação do <i>ELIR</i> durante toda a simulação I	76
Figura 30 – Etapas de 1 a 2 para ultrapassagem do grampo de suspensão durante a simulação I.....	76
Figura 31 – Etapas de 3 a 5 para ultrapassagem do grampo de suspensão durante a simulação I.....	77
Figura 32 – Etapas de 6 a 8 para ultrapassagem do grampo de suspensão durante a simulação I.....	78
Figura 33 – Etapas de 9 a 11 para ultrapassagem do grampo de suspensão durante a simulação I.....	79
Figura 34 – Etapa 12 para ultrapassagem do grampo de suspensão durante a simulação I.....	80
Figura 35 – Variações dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) em função da variação de posição x da roldana central (x_L , em metros) durante a simulação I	81
Figura 36 – Detalhe da variação dos dos ângulos ϕ_1 e ϕ_2 , durante ultrapassagem do grampo de suspensão na simulação I.....	82
Figura 37 – Detalhe da variação dos dos ângulos ϕ_3 e ϕ_4 , respectivamente, durante ultrapassagem do grampo de suspensão na simulação I.....	83
Figura 38–a) Velocidade na direção do eixo x (v_{xD}), do eixo y (v_{yD}) e a resultante (v_D) da roldana D em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a	

simulação I b) e c)Detalhe de v_D e v_{yD} , respectivamente, durante a ultrapassagem do grampo de suspensão na simulação I.....	85
Figura 39— a) Velocidade na direção do eixo x (v_{xE}), do eixo y (v_{yE}) e a resultante(v_E) da roldana E em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação I b) e c) Detalhe de v_E e v_{yE} , respectivamente, durante a ultrapassagem do grampo de suspensão na simulação I	86
Figura 40— a) Velocidade na direção do eixo x (v_{xL}), do eixo y (v_{yL}) e a resultante(v_L) da roldana L em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação I b) e c) Detalhe de v_L e v_{yL} , respectivamente, durante a ultrapassagem do grampo de suspensão na simulação I.....	87
Figura 41— a) Velocidade na direção do eixo x (v_{xS}), do eixo y (v_{yS}) e a resultante(v_S) da roldana S em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação I b) e c) Detalhe de v_S e v_{yS} , respectivamente, durante a ultrapassagem do grampo de suspensão na simulação I	88
Figura 42— a) Velocidade na direção do eixo x (v_{xT}), do eixo y (v_{yT}) e a resultante(v_T) da roldana T em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação I b) e c) Detalhe de v_T e v_{yT} , respectivamente, durante a ultrapassagem do grampo de suspensão na simulação I	89
Figura 43 – Etapa inicial da movimentação do <i>ELIR</i> na simulação II.....	91
Figura 44 – Etapas de movimentação do <i>ELIR</i> durante toda a simulação II	91
Figura 45 – Variações dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) em função da variação de posição x da roldana central (x_L , em metros) durante a simulação II	92
Figura 46— a) Velocidade na direção do eixo x (v_{xD}), do eixo y (v_{yD}) e a resultante(v_D) da roldana D em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação II b) Velocidade na direção do eixo x (v_{xE}), do eixo y (v_{yE}) e a resultante(v_E) da roldana E em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação II.....	93
Figura 47— a) Velocidade na direção do eixo x (v_{xL}), do eixo y (v_{yL}) e a resultante(v_L) da roldana L em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação	

II b) Velocidade na direção do eixo x (v_{xS}), do eixo y (v_{yS}) e a resultante (v_S) da roldana S em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação II.....	94
Figura 48– Velocidade na direção do eixo x (v_{xT}), do eixo y (v_{yT}) e a resultante (v_T) da roldana T em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação II.....	95
Figura 49 – a) Comparação entre os valores de ordenadas (y_{Dsim}) encontrados durante a simulação II e os valores calculados (y_{Dcalc}) da roldana D em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas (x_D) b) Comparação entre y_{Esim} e y_{Ecalc} da roldana E em função de x_E	97
Figura 50 – a) Comparação entre os valores de ordenadas (y_{Lsim}) encontrados durante a simulação II e os valores calculados y_{Lcalc} da roldana L em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas (x_L) b) Comparação entre y_{Ssim} e y_{Scalc} da roldana S em função de x_S	98
Figura 51 – a) Erro relativo (E_{rD}) entre os valores de ordenadas (y_{Dsim}) encontrados durante a simulação II e os valores calculados (y_{Dcalc}) da roldana D em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas (x_D).....	99
Figura 52 – a) Erro relativo (E_{rL}) entre y_{Lsim} e y_{Lcalc} da roldana L em função (x_L) b) Erro relativo (E_{rS}) entre y_{Ssim} e y_{Scalc} da roldana S em função (x_S).....	100
Figura 53 – Distância entre as retas de aproximação e a catenária (dist) em função do eixo das abscissas.....	102
Figura 54 – a) Comparação entre os valores encontrados para os segmentos DE (DE_{sim}) e os seu valor real (DE) em função da posição da roldana E em relação ao eixo das abscissas b) Comparação entre os valores encontrados para os segmentos ST (ST_{sim}) e os seu valor real (ST) em função da posição da roldana S em relação ao eixo das abscissas.....	103
Figura 55 – a) Erro relativo (E_{rDE}) entre os segmentos DE (DE_{sim}) e os seu valor real (DE) em função da posição da roldana E em relação ao eixo das abscissas b) Erro relativo (E_{rST}) entre os segmentos ST (ST_{sim}) e os seu valor real (ST) em função da posição da roldana S em relação ao eixo das abscissas.....	104
Figura 56 – Etapa inicial da movimentação do <i>ELIR</i> na simulação III.....	105

Figura 57 – Etapas de movimentação do <i>ELIR</i> durante toda a simulação III.....	106
Figura 58 – a) Variações dos ângulos ϕ_1 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) em função da variação de posição x da roldana central (x_L , em metros) b) Variação do ângulo ϕ_2 (em graus) em função da variação de posição x da roldana central (x_L , em metros) durante a simulação III	107
Figura 59 - Para a simulação III, a) Velocidade na do eixo y (v_{yD}) e a resultante(v_D) da roldana D em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas(x_D) b) Velocidade na direção do eixo y (v_{yE}) e a resultante(v_E) da roldana E em função x_E	109
Figura 60 - Para a simulação III a) Velocidade na direção do eixo y (v_{yL}) e a resultante(v_L) da roldana L em função x_L b) Velocidade na direção do eixo y (v_{yS}) e a resultante(v_S) da roldana S em função x_S	110
Figura 61 - Para a simulação III, velocidade na direção do eixo y (v_{yT}) e a resultante(v_T) da roldana T em função x_T	111
Figura 62 – Durante a simulação III a) Comparação entre os valores de ordenadas (y_{Dsim}) encontrados e os valores calculados (y_{Dcalc}) da roldana D em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas (x_D) b) Comparação entre y_{Esim} e y_{Ecalc} da roldana E em função de x_E	113
Figura 63 – Durante a simulação III a) Comparação entre os valores de ordenadas (y_{Lsim}) encontrados e os valores calculados (y_{Lcalc}) da roldana L em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas (x_L) b) Comparação entre y_{Ssim} e y_{Scalc} da roldana S em função de x_S	114
Figura 64 – Durante a simulação III a) Erro relativo (E_{rD}) entre entre os valores de ordenadas (y_{Dsim}) encontrados e os valores calculados (y_{Dcalc}) da roldana D em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas (x_D) b) Erro relativo (E_{rE}) entre entre y_{Esim} e y_{Ecalc} da roldana E em função (x_E)	115
Figura 65 – Durante a simulação III a) Erro relativo (E_{rL}) entre entre os valores de ordenadas (y_{Lsim}) encontrados e os valores calculados (y_{Lcalc}) da roldana L em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas (x_L) b) Erro relativo (E_{rS}) entre entre y_{Ssim} e y_{Scalc} da roldana S em função (x_S).....	116

Figura 66 – **a)** Comparação entre os valores encontrados para os segmentos DE (DE_{sim}) e os seu valor real (DE) em função da posição da roldana E em relação ao eixo das abscissas **b)** Comparação entre os valores encontrados para os segmentos ST (ST_{sim}) e os seu valor real (ST) em função da posição da roldana S em relação ao eixo das abscissas 118

Figura 67– a) Erro relativo ($ErDE$) entre os segmentos DE (DE_{sim}) e os seu valor real (DE) em função da posição da roldana E em relação ao eixo das abscissas b) Erro relativo ($ErST$) entre os segmentos ST (ST_{sim}) e os seu valor real (ST) em função da posição da roldana S em relação ao eixo das abscissas. 119

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS ROBÓTICOS	22
1.2	OBJETIVO.....	24
1.3	IMPORTÂNCIA DA PESQUISA	25
1.4	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	27
2	ESTADO DA ARTE.....	28
2.1	SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO	28
2.2	INSPEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	28
2.2.1	Robôs Para Inspeções de Linhas de Transmissões	29
2.2.2	Desafios Tecnológicos	33
2.3	CINEMÁTICA.....	34
2.3.1	Cinemática Direta	36
2.3.2	Cinemática Inversa	43
3	DEFINIÇÕES E METODOLOGIA	46
3.1	O PROJETO <i>ELIR</i>	46
3.2	DEFINIÇÕES	47
3.3	ANÁLISE GEOMÉTRICA DO <i>ELIR</i>	50
3.4	ANÁLISE CINEMÁTICA	51
3.4.1	Cinemática Direta	51
3.4.2	Cinemática Inversa	53
4	ANÁLISE E RESULTADOS DA PESQUISA	69
4.1	ANÁLISE GEOMÉTRICA PARA ULTRAPASSAGEM DE OBSTÁCULO	69
4.2	ANÁLISE CINEMÁTICA DIRETA DO <i>ELIR</i>	73
4.3	ANÁLISE CINEMÁTICA INVERSA DO <i>ELIR</i>	74

4.3.1	Simulação I.....	75
4.3.2	Simulação II.....	90
4.3.3	Simulação III.....	105
5	CONCLUSÕES.....	121
5.1	ANÁLISE GEOMÉTRICA.....	121
5.2	ANÁLISE CINEMÁTICA DIRETA	121
5.3	ANÁLISE CINEMÁTICA INVERSA	121
5.4	CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS DA PESQUISA.....	123
5.5	ATIVIDADES FUTURAS DE PESQUISA	124
	REFERÊNCIAS	126

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2017), conta-se no sistema brasileiro com 135.264 km de linhas de transmissão (LT) instaladas sendo 41,3% (55.885 km) da classe abaixo de 230 kV. “No Brasil, há uma quantidade considerável de linhas de transmissão que já ultrapassou os 40 anos de idade. Com o envelhecimento das linhas de transmissão, a manutenção preventiva é um fator de extrema relevância para garantir o perfeito funcionamento dos sistemas.”(RANGEL; KIENITZ; BRANDÃO, 2009).

As LT's aéreas estão sujeitas a condições adversas impostas pelo clima ou pelo local onde são instaladas, podendo sofrer com a vegetação, o vento, a erosão, o salitre, as chuvas etc. Com o objetivo de identificar e prevenir falhas, segundo Debenest et al. (2008), para inspecionar as LT's, operadores devem andar sob as linhas, muitas vezes suspensos 100 m acima do solo, exigindo-se ainda que a transmissão de eletricidade seja suspensa. Alternativas a este método, citadas por Mourão et al. (2015) e por Debenest et al. (2008), é pela utilização de aeronaves tripuladas que se deslocam ao lado de linhas de alta tensão, inspeção visual realizada do solo ou ainda pela utilização de sensores térmicos, de raios-X ou elétricos que devem ser posicionados perto dos cabos.

Todas as opções supracitadas para inspeção de LT aéreas têm desvantagens conhecidas. Pode-se citar, no caso da feita por aeronaves tripuladas e por operadores sob linha, a exposição de pessoas a risco de morte ou invalidez e a altos níveis de perigo e *stress* diante das condições meteorológicas, de altura, de campo eletromagnético e de voo além de exigirem profissionais altamente qualificados e, às vezes, suspensão do fornecimento de energia. Já as verificações feitas do solo geram resultados limitados e estão restritas às condições de inacessibilidade.

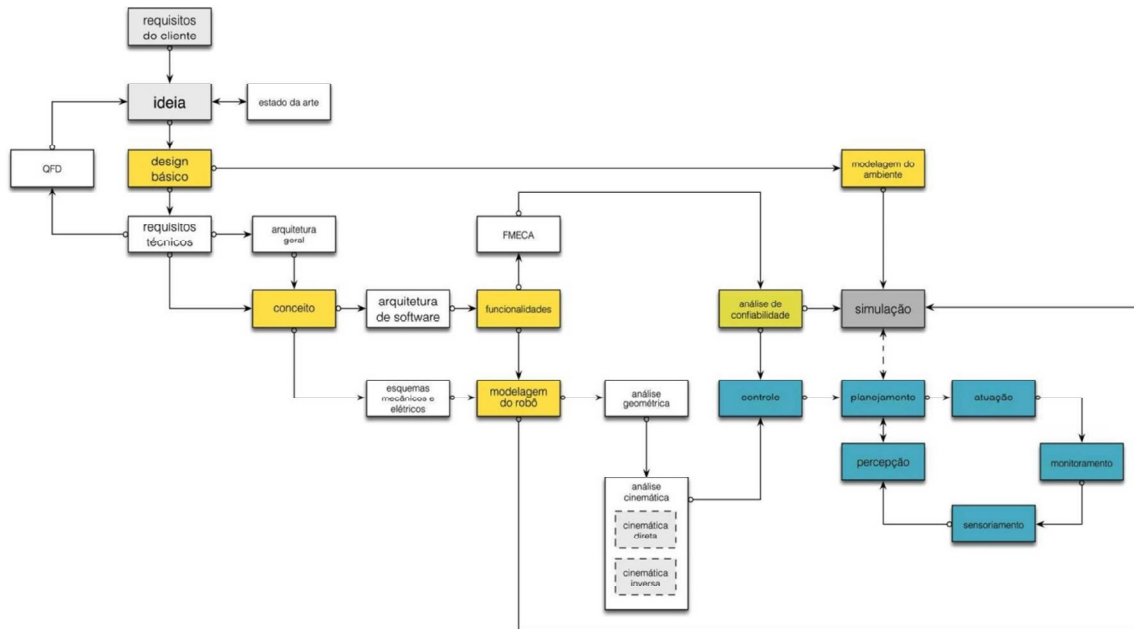
A busca da redução dos altos custos associada à diminuição dos riscos, à segurança e à confiabilidade durante a inspeção de linhas de transmissão é a grande motivadora para o desenvolvimento de robôs que executem tal tarefa, quer seja de maneira autônoma quer seja por controle de operação remota.

Como afirmado por Gonçalves e Carvalho (2013) muitos estudos teóricos e práticos vem sendo conduzidos com o objetivo de desenvolver máquinas autônomas para trafegarem ao longo das LT's realizando trabalho de inspeção e/ou de reparos. Dentro deste contexto, o presente trabalho faz parte do projeto do robô ELIR (*Electrical Inspection Robot*) desenvolvido pelo Instituto Brasileiro de Robótica (*BIR*, em inglês), vinculado ao SENAI CIMATEC. O projeto do *ELIR* visa desenvolver um robô autônomo para inspeção visual e térmicas de LT's (formadas por cabo *LINNET* com 18,3mm de diâmetro e operando a 138 kV) e para transposição de obstáculos, capaz de monitorar a linha de servidão e de transportar sensores e equipamentos; que seja de fácil montagem e fabricação e que tenha massa reduzida e potência suficiente de motores que viabilize vencer inclinações de até 60°.

1.1 DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS ROBÓTICOS

A Figura 1 apresenta as principais etapas para o desenvolvimento de um sistema robótico. Assim como qualquer desenvolvimento de um novo sistema, o de robótica também se inicia pelos requisitos do cliente, suplemento para a idealização do que se espera com o projeto. Conhecendo o meio no qual o sistema está sendo desenvolvido, deve-se abastecer de toda informação necessária para a sua elaboração. No primeiro ciclo, o estudo do estado da arte é, nesse sentido, uma ferramenta que corrobora para uma melhor definição e compreensão do que será este novo sistema; uma vez que complementar e suportará o desenvolvimento da ideia inicial. É necessária, também, uma visão do ambiente externo frente à ideia a ser desenvolvida, alcançada com o design básico. Após estas etapas, têm-se, então condições de elaborar uma série de requisitos técnicos para suportar o desenvolvimento da ideia inicial. A análise do QFD fará com que uma visão particular desta ideia se forme para a elaboração do conceito.

Figura 1—Fluxograma das atividades de desenvolvimento de sistemas robóticos



Fonte: Autora

Com a finalização deste primeiro ciclo, a compreensão entre os requisitos e suas correlações fará com que o contorno do conceito seja mais bem compreendido para que então a elaboração da arquitetura geral e o conceito da ideia sejam criados.

Com a ideia conceitual elaborada e definida, o passo seguinte será o a elaboração da arquitetura do software e dos esquemas elétricos e mecânicos. Tendo uma visão mecatrônica do sistema robótico, passa-se a definir as funcionalidades nas quais o sistema desempenhará. Nesta fase é importante conhecer os objetivos, premissas e as consequências que cada funcionalidade exercerá no sistema proposto, isso dará embasamento para a elaboração da análise de modos e efeitos de falha (FMECA, em inglês) e conseqüentemente a análise de segurança do sistema.

Por outro lado, as funcionalidades também farão com que uma modelagem do sistema robótico seja desenhada e diante de suas funções as análises geométrica e cinemática do sistema devem ser elaboradas e discutidas. A análise geométrica tem por objetivo verificar virtualmente as capacidades geométricas do robô, suas habilidades físicas, ou seja, se a sua estrutura tem flexibilidade e dimensões suficientes para realizar as manobras planejadas e necessárias no exercício das suas funções. A análise cinemática pode ser dividida entre a direta e a inversa. Com a primeira obtém-se a matriz de transformação homogênea, a qual é

utilizada na determinação do espaço de trabalho do robô. Já a análise cinemática inversa permite que se encontre a configuração dos ângulos necessária para que uma determinada missão seja cumprida.

De posse dos resultados obtidos com as análises geométricas e cinemáticas, é realizada a integração. Esta fase tem o controle como o ponto inicial para a implementação do sistema robótico, representado pelo planejamento, aquisição de sensores, percepção, atuação e monitoramento de variáveis.

Uma vez que se espera que o sistema robótico desempenhe suas respostas autonomamente, o processo de simulação é utilizado para otimizar a missão do robô, o que só é possível diante da sua modelagem e do meio no qual ele será inserido.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho de dissertação é realizar as análises cinemática (direta e inversa) e geométrica do *ELIR*. Essas atividades fazem parte das etapas de projeto deste robô, o qual tem como meta final ser capaz de realizar a inspeção visual e térmica de LT energizadas assim como a transposição de obstáculos de maneira autônoma. As metas e objetivos específicos de cada análise são descritas a seguir.

Análise geométrica:

- Elaborar um modelo geométrico do *ELIR* utilizando-se o software de *CAD (computer-aided design)* SolidWorks®.
- Simular, no SolidWorks®, cada etapa da ultrapassagem dos obstáculos: grampo de suspensão e amortecedor.
- Avaliar a capacidade geométrica do robô em transpor os obstáculos, verificando a existência de interferência física entre estes e o *ELIR*.

Análise cinemática direta:

- Determinar os parâmetros de Denavit-Hartenberg para cada junta do *ELIR*.
- Encontrar as matrizes homogêneas para cada junta do robô.
- Obter a matriz transformação homogênea do *ELIR*, para que sendo conhecidos os valores de ângulos de juntas e dimensões de membros seja possível obter a posição e orientação do efetuador do robô em relação ao seu sistema de base.

Análise cinemática inversa:

- Definir as condições das simulações a serem realizadas.
- Construir sistemas de equações não lineares com o objetivo de descrever as relações geométricas entre as juntas e os links do robô.
- Implementar e solucionar os sistemas de equações não lineares com o auxílio do MATLAB® (MATrix LABoratory), nas diferentes situações anteriormente definidas.
- Encontrar para cada simulação da cinemática inversa, gráficos de variação de ângulos de juntas e de variação da velocidade na direção do eixo y e da velocidade resultante para as cinco roldanas.
- Comparar os resultados obtidos para posição y de cada roldana durante as simulações com os resultados esperados pela equação das curvas tomadas como caminho.
- Comparar os resultados obtidos para as distâncias entre os centros das roldanas D e E (segmento DE) e entre os centros das roldanas S e T (segmento ST) com as fisicamente definidas pelos desenhos mecânicos.

1.3 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Gonçalves e Carvalho (2013) dedicaram grande parte da sua publicação para fazer uma revisão e discutir o estado da arte dos principais esforços para obtenção de solução no campo de manutenção e inspeção de linhas de transmissão realizadas por robôs móveis. A expansão econômica e o progresso dos grandes centros urbanos têm levado a uma crescente demanda por consumo de eletricidade, requerendo a transmissão de energia por uma complexa malha que devem ser inspecionadas e reparadas periodicamente. Diante deste cenário, esses autores trazem que muitos estudos teóricos e experimentais na área da robótica têm sido realizados com o objetivo de desenvolver máquinas autônomas que possam aumentar a eficiência, reduzir os custos e diminuir o risco a danos da equipe de trabalho durante essas atividades.

Os aspectos mencionados acima fundamentam a importância no cenário nacional do projeto *ELIR*. Uma vez que este tem como finalidade desenvolver um robô capaz de inspecionar LT's e ultrapassar obstáculos autonomamente, tendo potencial de impactar (a) na prevenção de acidentes, muitas vezes letais à vida humana; (b) na economia para realização de atividades

de manutenção da rede elétrica; (c) no aumento da eficiência da distribuição energética; (d) na diminuição de transtornos e gastos por falta de energia elétrica na indústria e população em geral e (e) no desenvolvimento científico e tecnológico no âmbito da robótica no país.

As análises geométrica e cinemática (direta e inversa) do *ELIR*, por sua vez, se inserem neste contexto como etapa do seu projeto, o qual objetiva-se a autonomia na inspeção visual e térmica de LT's. Através da análise geométrica é possível verificar, de maneira virtual, se o robô tem capacidade dimensional para realizar a ultrapassagem dos obstáculos; ou seja, antes da sua construção, prever se a estrutura do *ELIR* foi projetada com tamanho de membros e flexibilidade de juntas suficiente para realizar a transposição evitando interferências físicas. Desta maneira, esta análise proporciona ao projeto redução de custo e tempo assim como aumento da sua segurança, uma vez que não será necessária a construção de um protótipo físico para que a sua habilidade de ultrapassagem comece a ser avaliada.

Dentro do projeto do *ELIR*, a obtenção da sua matriz de transformação homogênea através da sua análise de cinemática direta, possibilita a previsão da posição e orientação de um determinado ponto (conhecido por efetuador) baseado em uma determinada configuração de ângulos de juntas e dimensões de membros. Dotado destes dados é possível determinar o espaço de trabalho do robô, ou seja, conhecer o volume espacial possível de ser atingido pelo seu órgão terminal, o qual depende da sua configuração geométrica e restrições físicas (limites mecânicos).

A análise da cinemática inversa do *ELIR* é uma importante etapa do projeto para que se possa encontrar a resposta para o que Molina et al (2005) consideram como problema fundamental da robótica: dada uma determinada tarefa como se deve programar o robô. Através desta avaliação, portanto, tendo-se uma posição e orientação de efetuador desejada é possível determinar a configuração de variáveis de juntas e membros necessária. Sendo assim, de posse dos resultados da análise cinemática inversa do *ELIR*, informações sobre a missão que se quer cumprir (quer seja trafegar em um determinado caminho de linha, quer seja ultrapassar um obstáculo) e das suas dimensões físicas é possível encontrar os valores de ângulos que devem ser assumidos pelas juntas para se ter sucesso.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada da maneira descrita a seguir.

O primeiro capítulo faz uma introdução ao assunto tratado durante toda esta dissertação, contextualizando e definindo do problema, descrevendo do objetivo geral e os específicos, abordando a importância desta pesquisa e expondo a organização do presente trabalho.

No capítulo 2 é apresentado um panorama sobre o sistema elétrico brasileiro, trazendo informações sobre números e categorias de unidades consumidoras e dados sobre a importância da inspeção de LT's, como é realizada atualmente e os avanços na tecnologia robótica para esse fim. Neste capítulo também é apresentados conceitos e desafios envolvendo a análise cinemática (direta e inversa).

As definições e metodologia adotadas neste trabalho estão tratadas no capítulo 3. Neste capítulo, portanto, apresenta-se: uma visão geral do projeto do ELIR; as definições de projeto levadas em consideração nas análises aqui realizadas e as metodologias utilizadas para a sua análise geométrica e cinemática (direta e inversa).

A análise e resultados da pesquisa são expostos no capítulo 4. Primeiramente exhibe as figuras resultantes da avaliação geométrica da capacidade do robô em ultrapassar grampos de suspensão. Posteriormente, são apresentadas as matrizes homogêneas do *ELIR* assim como os resultados obtidos em cada uma das três simulações da análise cinemática inversa do robô.

O capítulo 5, por sua vez, é dedicado às conclusões para cada uma das três análises feitas (geométrica, cinemática direta e cinemática inversa), contribuições e impactos da pesquisa encerrando com as atividades futuras de pesquisa proposta.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

De acordo com o ministério de Minas e Energia do Brasil (2016), a geração de energia do país visa atender o consumo das 79.890.895 unidades, entre residência, indústria, comércio e zona rural; as quais demandaram em junho de 2016, um total de 46.287 GWh. Para atender este consumo, segundo o Portal Brasil (2016) em janeiro de 2016 a capacidade total instalada de geração de energia elétrica atingiu 141.684 megawatts (MW), apresentando um acréscimo de 5,7% em comparação com janeiro de 2015.

Como citado por Rangel; Kienitz; Brandão (2009), no Brasil, muitas vezes, devido a condições geográficas e de segurança, as usinas geradoras de energia estão localizadas distante dos seus consumidores finais. Há, portanto, a necessidade da utilização de linhas de transmissão (formada por cabos condutores de energia elétrica, torres e isoladores) para transportar a energia da fonte geradora (usinas) para a carga consumidora (subestações, residências ou indústrias). De acordo com MME (2016b), o Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) conta com 129.259 km de linhas de transmissão instalada que devem estar operando 24 horas por dia, sete dias por semana, 365 dias por ano e em perfeito estado.

2.2 INSPEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Em concordância com Debenest et al. (2008) as linhas de transmissão de alta voltagem, que ligam instalações de produção de energia elétrica a grandes centros urbanos, são elementos vitais da infraestrutura elétrica. Qualquer falha em tais linhas podem trazer graves consequências para a vida diária das pessoas, afetando o transporte, a saúde, a segurança e saneamento, entre outras. Portanto, a manutenção e inspeção adequada de linhas de transmissão de alta tensão são de extrema importância.

“Linhas de transmissão são expostas a uma variedade de fatores, tais como corrosão e vibrações induzidas pelo vento, que causam diferentes problemas e reduzem o seus tempos de vida” (NAYYERLOO et al., 2009). Como citado por Rangel, Kienitz e Brandão (2009) no Brasil, há uma quantidade considerável de linhas de transmissão de alta tensão que já ultrapassaram os 40 anos de idade, com o envelhecimento das LT's, a manutenção

preventiva é um fator de extrema relevância para garantir o perfeito funcionamento dos sistemas elétricos.

Ainda segundo Rangel, Kienitz e Brandão (2009), de um modo geral, as inspeções nas linhas de transmissão de alta tensão são feitas de forma preventiva, regularmente e de forma visual. “Inspeção fornece dados valiosos de estado da linha, o que ajuda os engenheiros a planejar reparos ou substituições necessárias antes de quaisquer danos que possa resultar na sua interrupção” (NAYYERLOO et al., 2009).

Gonçalves e Carvalho (2013) apontam que a inspeção, manutenção preventiva e corretiva das linhas de transmissão são geralmente realizadas por um electricista suspenso a partir de um helicóptero ou que se desloca ao longo do cabo (Figura 2). Tendo como principais desvantagens o alto risco de acidentes, alto custo, o longo ciclo da atividade e dependência climático-geográficas além da dificuldade em encontrar e formar mão-de-obra qualificada para esse tipo de serviço. Esses autores citam ainda que a execução da manutenção e inspeção enquanto as linhas estão sem tensão iria aliviar alguns dos riscos, mas também criaria outros problemas com a sociedade que exige serviço da companhia de eletricidade sem interrupção, além disso, os custos envolvidos seriam elevados.

Figura 2 - Inspeção de linhas de transmissão de energia feita por aeronaves tripuladas



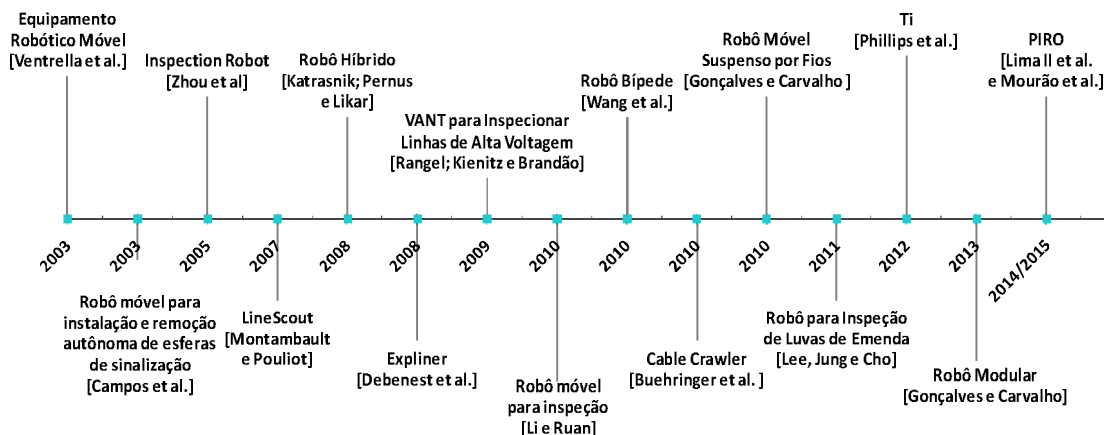
Fonte: Mourão et al. (2015)

2.2.1 Robôs Para Inspeções de Linhas de Transmissões

Estão sendo desenvolvidas pesquisas em automatização do processo de inspeção de linhas de transmissão de energia em alta tensão; impulsionadas, principalmente, pelo interesse das empresas de distribuição em dispor de uma tecnologia mais segura, confiável e barata

comparada com as técnicas tradicionalmente utilizadas. A Figura 3 e a Tabela 2.1 são dedicadas à apresentação de alguns projetos relevantes de robôs para exercer esta atividade, sendo que a tabela mostra suas principais características.


Figura 3 – Linha do tempo do estado da arte dos principais robôs para inspeção de linhas de transmissão



Fonte: Autora


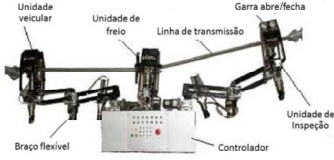
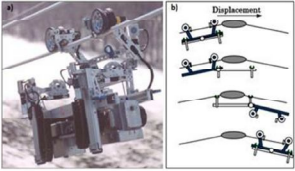
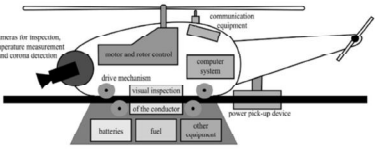
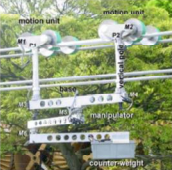

Tabela 2.1 – Resumo do estado da arte dos robôs para inspeção de linhas de transmissão

(continua)

Ano	Autor	Robô	Características
2003	Ventrella et al.	Equipamento Robótico Móvel 	Desloca-se ao longo do cabo guarda. Teleoperado. Operador em solo que coordena a transposição de grampos de suspensão.


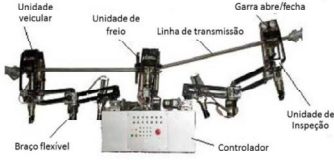
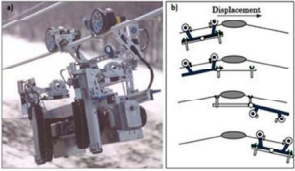
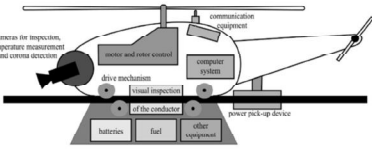
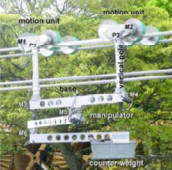

Fonte: Autora

Tabela 2.1 – Resumo do estado da arte dos robôs para inspeção de linhas de transmissão
(continuação)

Ano	Autor	Robô	Características
2003	Campos et al.	<p>Robô móvel para instalação e remoção autônoma de esferas de sinalização</p> 	<p>Instalação e remoção autônoma de esferas de sinalização. Remotamente operado. Não supera obstáculos nem navega em linhas entre duas torres.</p>
2005	Zhou et al.	<p>Robô de Inspeção</p> 	<p>Massa igual a 45 kg e 1,2 m de comprimento. A estratégia de controle é capaz de controlar e conduzir o robô para trafegar e ultrapassar vários tipos de obstáculos.</p>
2007	Montambault e Pouliot	<p>LineScout</p> 	<p>Massa igual a 100 kg. Cabo condutor como suporte. Rodas para locomoção rápida e eficiente e para permite ultrapassar alguns obstáculos.</p>
2008	Katrasnik; Pernus e Likar'	<p>Robô Híbrido</p> 	<p>Combina o uso de VANT e de um robô móvel. Baixa qualidade de inspeção e autonomia. Universalidade e a facilidade de projeto.</p>
2008	Debenest et al.	<p>Expliner</p> 	<p>Teleoperado. Manutenção preventiva de linhas de transmissão. Massa igual a 84 kg.</p>
2009	Rangel; Kienitz e Brandão	<p>VANT para Inspeccionar Linhas de Alta</p> 	<p>Integridade da linha é verificada com o auxílio de um VANT. Limitações quanto à proximidade dos veículos com a linha de transmissão (interferência eletromagnética). Identificação e diagnóstico do problema.</p>


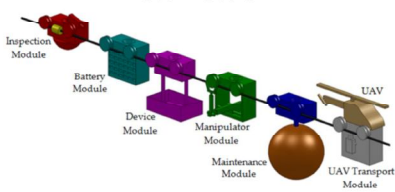
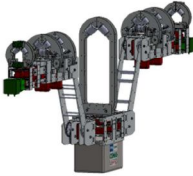
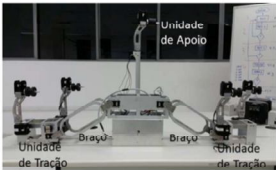
Fonte: Autora

Tabela 2.1 – Resumo do estado da arte dos robôs para inspeção de linhas de transmissão
(continuação)

Ano	Autor	Robô	Características
2003	Campos et al.	<p>Robô móvel para instalação e remoção autônoma de esferas de sinalização</p> 	<p>Instalação e remoção autônoma de esferas de sinalização. Remotamente operado. Não supera obstáculos nem navega em linhas entre duas torres.</p>
2005	Zhou et al.	<p>Robô de Inspeção</p> 	<p>Massa igual a 45 kg e 1,2 m de comprimento. A estratégia de controle é capaz de controlar e conduzir o robô para trafegar e ultrapassar vários tipos de obstáculos.</p>
2007	Montambault e Pouliot	<p>LineScout</p> 	<p>Massa igual a 100 kg. Cabo condutor como suporte. Rodas para locomoção rápida e eficiente e para permite ultrapassar alguns obstáculos.</p>
2008	Katrasnik; Pernus e Likar'	<p>Robô Híbrido</p> 	<p>Combina o uso de VANT e de um robô móvel. Baixa qualidade de inspeção e autonomia. Universalidade e a facilidade de projeto.</p>
2008	Debenest et al.	<p>Expliner</p> 	<p>Teleoperado. Manutenção preventiva de linhas de transmissão. Massa igual a 84 kg.</p>
2009	Rangel; Kienitz e Brandão	<p>VANT para Inspeccionar Linhas de Alta</p> 	<p>Integridade da linha é verificada com o auxílio de um VANT. Limitações quanto à proximidade dos veículos com a linha de transmissão (interferência eletromagnética). Identificação e diagnóstico do problema.</p>

Fonte: Autora

Tabela 2.1 – Resumo do estado da arte dos robôs para inspeção de linhas de transmissão (conclusão)

Ano	Autor	Robô	Características
2012	Phillips et al.	<p>Ti</p> 	<p>Instalado permanentemente</p> <p>Transposição de obstáculos através de sistemas de by-pass permanentes</p>
2013	Gonçalves e Carvalho	<p>Robô Modular</p> 	<p>Cada módulo possuirá sua própria movimentação, função e sistema de energia.</p> <p>UAV será responsável pelo carregamento de todos os módulos no momento da ultrapassagem de obstáculos.</p> <p>Podem ser teleoperado.</p>
2014	Lima II et al.	<p>D311</p> 	<p>Autônomo.</p> <p>Inspeção visual e térmica.</p> <p>Inspirado no movimento da lagarta para ultrapassagem de obstáculos.</p>
2015	Mourão et al.	<p>PIRO</p> 	<p>Estrutura simétrica.</p> <p>Quatro articulações.</p> <p>Fabricado em alumínio.</p> <p>Massa igual a 8,92kg.</p>

Fonte: Autora

2.2.2 Desafios Tecnológicos

De acordo com os trabalhos apresentados no capítulo 2.2.1 e segundo Gonçalves e Carvalho (2013) apesar da quantidade de projetos dedicados ao desenvolvimento de solução para manutenção e inspeção de linhas de transmissão realizadas por robôs móveis, problemas relacionados à estabilidade, controle e habilidade em ultrapassar obstáculos, autonomia e massa elevada dos robôs ainda existem. Neste contexto, o projeto do *ELIR* busca o desenvolvimento de um robô que seja autônomo tanto para inspeção térmica e visual de LT's quanto para ultrapassagem de obstáculos associado à característica de trabalhar acoplado à LT energizada e de ter massa final reduzida (estima-se 8,5kg) e potência de motores suficiente para vencer inclinações de até 60°.

Atingindo-se as metas de projeto supracitadas e em comparação com os outros robôs, o *ELIR* terá as vantagens de: (a) não ser tele operado, ou seja, não dependerá da habilidade e supervisão de operadores; (b) ser leve (em comparação aos projetos existentes) podendo ser acoplado e desacoplado da linha manualmente, (c) trabalhar em linha energizada não exigindo que a transmissão de energia seja interrompida; (d) executar a inspeção com aproximação da linha, garantindo mais exatidão na localização dos defeitos; (e) poder realizar suas atividades mesmo em linhas com alta inclinação.

2.3 CINEMÁTICA

Em 1921, o termo robô foi inicialmente introduzido pelo dramaturgo tcheco Karel Capek na peça “Os robôs Universais de Russum” de sua autoria. A partir de então, esta nomenclatura vem sendo aplicada a vários dispositivos desde que apresente algum grau de automação (SPONG et al., 2006).

A definição de robô largamente aceita é a dada pelo Instituto de Robótica da América (RIA) “Um robô é um manipulador multifuncional reprogramável projetado para mover materiais, peças, ferramentas, ou dispositivos especiais através de variáveis de movimento programadas para a realização de uma variedade de tarefas” (ZWIRTES, 2004).

De acordo com Romano e Dutra (2002), a ISO (International Organization for Standardization) 10218 define robô como “uma máquina manipuladora com vários graus de liberdade controlada automaticamente, reprogramável, multifuncional, que pode ter base fixa ou móvel para utilização em aplicações de automação industrial”. Sendo assim, o uso de robôs na indústria está diretamente associado à necessidade de redução de custos, aumento de precisão e produtividade, ampliação da flexibilidade, melhora na qualidade do produto além de garantir condições melhores de trabalho do ser humano (principalmente em meios inóspitos ou perigosos, atividades repetitivas ou perigosas).

Segundo Magril (2010), para realizar diferentes tarefas e ser capaz de repeti-las, o robô move partes, objetos, ferramentas e dispositivos especiais de acordo com movimentos e pontos pré-programados, além de efetuar interface com o “mundo externo” através de sensorização dedicada. Um robô consiste em um braço mecânico cujos atuadores das articulações são servo-controlados por um computador dedicado que guarda em sua memória um programa que detalha o curso que o braço seguirá.

Um sistema mecânico pode ser classificado de acordo com o número de graus de liberdade (GDL) que possua. O GDL do sistema é igual ao número de parâmetros independentes necessários para definir sua posição no espaço em qualquer instante de tempo (NORTON, 2004)

Os manipuladores robóticos são compostos por elos (ou membros) conectados por juntas em uma cadeia cinemática aberta. As juntas podem ser rotativas (permitem apenas rotação relativa entre dois membros) ou prismáticas (permitem apenas translação linear relativa entre dois membros).

As juntas usadas no projeto de robôs são tipicamente lineares ou rotativas. As do primeiro tipo, também conhecida como juntas prismáticas, permitem apenas o movimento de deslizamento ou translacional relativo entre os elos conectados, é referida como junta do tipo L. Já as juntas rotativas, permitem apenas a rotação relativa entre os membros (MOLINA et al., 2005).

“O problema fundamental da robótica consiste em achar a resposta à seguinte pergunta: O que deve ser feito para programar um robô com o objetivo de se executar uma determinada tarefa?” (MOLINA et al.; 2005). De acordo com Cabral ([2009?]), a cinemática de um robô manipulador é o estudo da posição e da velocidade do seu efetuador e dos seus ligamentos. No estudo da cinemática a movimentação do manipulador é descrita sem levar em consideração as forças e os torques causadores do movimento, concerne, portanto, à geometria (SPONG et al., 2006).

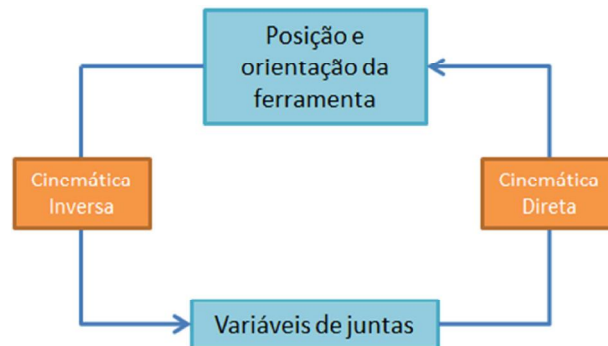
Segundo Sena (2011) a cinemática pode ser dividida em dois tipos:

- Cinemática direta, quando se deseja obter a posição, orientação e velocidade do efetuador dada os valores das variáveis das juntas.
- Cinemática inversa, quando se procura determinar o conjunto de valores das variáveis de juntas dadas as desejadas posições e orientações do efetuador. Pode ser vista como o conjunto de processos para determinar as funções inversas do sistema de expressões da cinemática direta.

A Figura 4 mostra a relação entre a cinemática direta e a inversa. Quando já se conhece a posição e a orientação finais que se deseja para a ferramenta utiliza-se da cinemática inversa para se obter as variáveis de juntas necessárias para tal configuração final. Já a cinemática

direta, por sua vez, é utilizada para quando as variáveis de juntas já são conhecidas e almeja-se então saber a configuração do efetuador. O subcapítulo 2.3.1 explica do que se consiste o problema da cinemática direta apresentando a notação de Denavit-Hartenberg (DH); já o subcapítulo 2.3.2 define o que é a cinemática inversa.

Figura 4 - Relação dos tipos de cinemática



Fonte: Autora

2.3.1 Cinemática Direta

Para Schirmer ([200-?]) o problema da cinemática direta pode ser estabelecido da seguinte maneira: dadas as variáveis das juntas de um robô (θ_i), determinar a posição e a orientação do órgão terminal, podendo ser esquematizado segundo a Figura 5 onde x_o , y_o e z_o são as coordenadas cartesianas do órgão terminal.

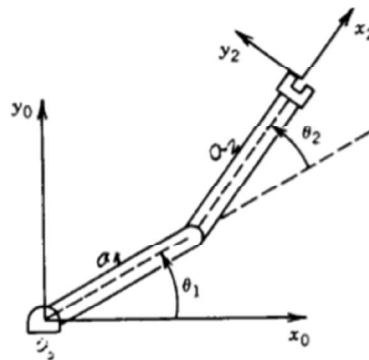
Figura 5 Esquema da Cinemática Direta



Fonte: Adaptado de Schirmer ([200-?])

Molina et al. (2005) mostram que para um robô planar (Figura 6) o problema da cinemática direta consiste em dadas as coordenadas das juntas, θ_1 e θ_2 , determinar as coordenadas do órgão terminal (x , y).

Figura 6 - Sistema de coordenadas para um manipulador planar



Fonte: Molina et al. (2005)

Sendo um sistema fixo de coordenadas $O_0x_0y_0$, a posição (x, y) pode ser obtida por:

$$x = a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.1)$$

$$y = a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.2)$$

Considerando o sistema de coordenadas $O_2x_2y_2$, a orientação da ferramenta em relação ao sistema base é dada pelos cossenos diretores dos eixos x_2 e y_2 em relação ao x_0 e y_0 ; portanto, de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_2 \cdot \hat{i}_0 & \hat{j}_2 \cdot \hat{i}_0 \\ \hat{i}_2 \cdot \hat{j}_0 & \hat{j}_2 \cdot \hat{j}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

A matriz a direita é conhecida como matriz orientação ou de rotação.

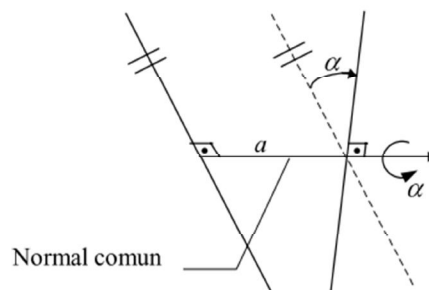
As equações de 2.1 a 2.3 explicitam a orientação da ferramenta e são conhecidas como equações da cinemática direta da posição.

As equações diretas de posição encontradas no capítulo 2.3.1, para o caso de um robô planar com dois GDL, têm sua complexidade aumentada proporcionalmente ao aumento do GDL do sistema. A notação de Denavit-Hartenberg (DH), segundo Cabral ([2009?]), é um método sistemático capaz de descrever a posição e orientação relativa entre os ligamentos consecutivos, baseados na transformação homogênea.

Cabral ([2009?]) traz que a notação DH baseia-se no fato de que para determinar a posição relativa de duas retas no espaço, são necessários somente dois parâmetros. O primeiro parâmetro é a distância medida ao longo da normal comum entre as duas retas e o segundo é o ângulo de rotação em torno da normal comum, que uma das retas deve girar, de forma

que fique paralela à outra. Observa-se que a normal comum entre duas retas no espaço é definida por uma terceira reta que intercepta as duas primeiras retas, com ângulos de 90° . Além disso, a distância medida entre as duas retas, ao longo da normal comum, é a menor distância entre as mesmas. A Figura 7 apresenta duas retas no espaço e os dois parâmetros necessários para descrever sua posição relativa.

Figura 7 - Posição relativa de duas retas no espaço



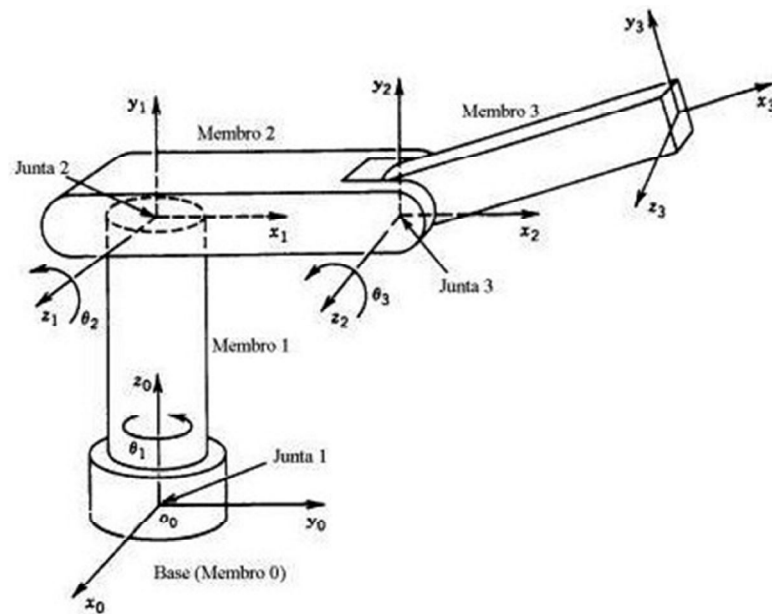
Fonte: Cabral ([2009?])

Ainda de acordo com o mesmo autor, se para definir a posição relativa de duas retas no espaço são necessários dois parâmetros e sabendo-se que conhecendo em um sistema de coordenadas dois eixos do sistema, o terceiro está automaticamente definido, então para definir a posição relativa de dois sistemas de coordenadas serão necessários quatro parâmetros. Portanto, a partir da definição da posição relativa entre dois eixos de dois sistemas de coordenadas, pode-se descrever a posição relativa entre os dois sistemas de coordenadas.

Consideraremos aqui a convenção adotada por Molina et al. (2005) em que um robô de cadeia aberta é formado por $n+1$ membros (sendo a base o membro 0) ligados por n juntas. A junta i conecta o elo $i-1$ ao i , a variável da junta (translação ou rotação) é denotada por q_i .

De acordo com a Figura 8, cada membro é associado a um sistema de coordenadas; sendo $O_0x_0y_0z_0$ é referente à base; assim como o $O_1x_1y_1z_1$ ao membro 1. Por serem corpos rígidos, qualquer ponto do elo $i+1$ têm coordenadas constantes em relação ao $O_ix_iy_iz_i$.

Figura 8 - Convenção para membros, juntas e sistemas de coordenadas



Fonte: Molina et al. (2005)

Segundo Molina et al. (2005), na representação DH a matriz A_{i-1}^i , matriz de transformação do sistema do membro i para do $i-1$, pode ser representada pelo produto das quatro transformações básicas:

$$A_{i-1}^i = R_{z,\theta} T_{z,d} T_{x,a} R_{x,\alpha} \quad (2.4)$$

Onde:

- $R_{z,\theta}$ representa a rotação θ em torno do eixo z (sinal positivo dado pela regra da mão direita).
- $T_{z,d}$ representa a translação d ao longo do eixo z (sinal positivo quando a translação concorda com o sentido do eixo).
- $T_{x,a}$ representa a translação a ao longo do eixo x (sinal positivo quando a translação concorda com o sentido do eixo)
- $R_{x,\alpha}$ representa a rotação α em torno do eixo x (sinal positivo dado pela regra da mão direita).

Desenvolvendo a Equação 2.4:

$$\mathbf{A}_{i-1}^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen } \theta_i & 0 & 0 \\ \text{sen } \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\text{sen } \alpha_i & 0 \\ 0 & \text{sen } \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

ou

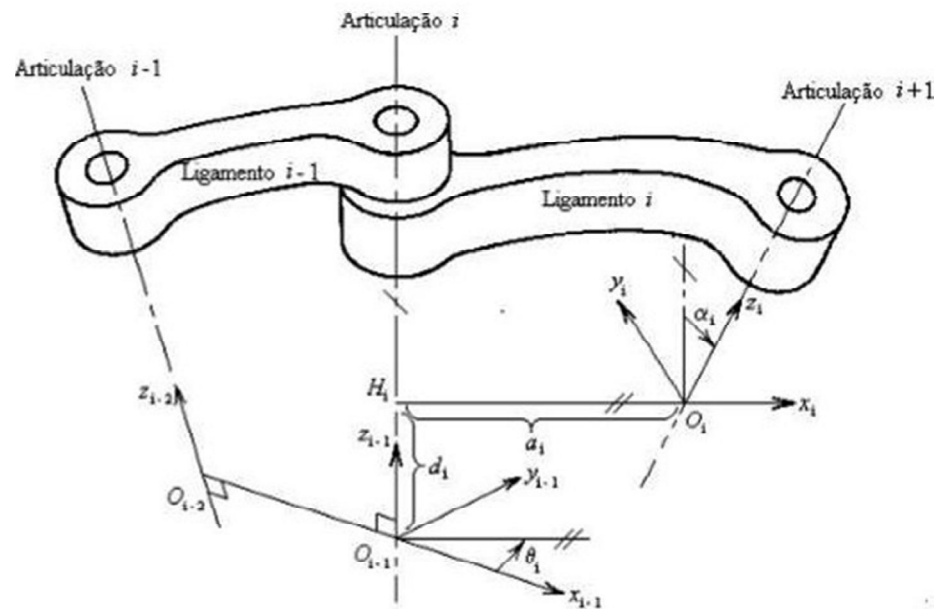
$$\mathbf{A}_{i-1}^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen } \theta_i \cos \alpha_i & \text{sen } \theta_i \text{sen } \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \text{sen } \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \text{sen } \alpha_i & a_i \text{sen } \theta_i \\ 0 & \text{sen } \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Uma vez que \mathbf{A}_{i-1}^1 é somente função do q_i da junta; três dos quatros parâmetros são constantes para cada elo. Os três primeiros elementos da última coluna da matriz da Equação 2.6 correspondem às coordenadas (x, y, z) , respectivamente, da junta i em relação à junta $i-1$.

A escolha da posição de origem e dos eixos de coordenadas do membro deve satisfazer as seguintes condições:

- O eixo z_{i-1} é o eixo da junta i ;
- O eixo x_i é perpendicular ao eixo z_{i-1} , apontando no sentido do afastamento desse último e intercepta o eixo z_{i-1}

Figura 9 - Representação DH



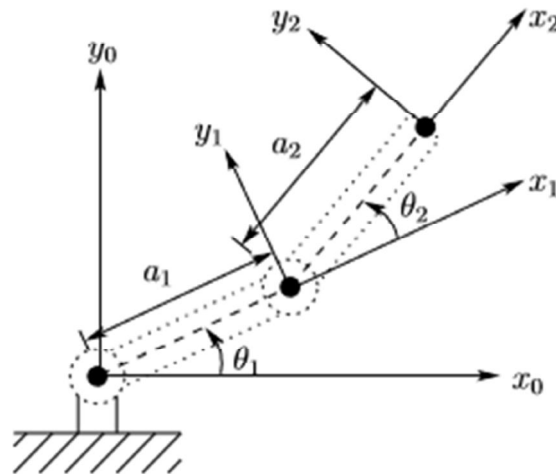
Fonte: Cabral ([2009?])

Fisicamente falando:

- a_i = distância, ao longo de x_i , de O_i à interseção dos eixos x_i e z_{i-1} (ou a distância mais curta entre os eixos z_{i-1} e z_i);
- d_i = distância, ao longo de z_{i-1} , de O_{i-1} à interseção dos eixos x_i e z_{i-1} ;
- α_i = ângulo do eixo z_{i-1} para o eixo z_i , medido em torno de x_i (sinal dado pela regra da mão direita);
- θ_i = ângulo do eixo x_{i-1} para o eixo x_i , medido em torno de z_{i-1} , (sinal dado pela regra da mão direita).

Para um robô planar de duas articulações rotativas (Figura 10) temos os parâmetros DH de acordo com a tabela 1.

Figura 10 - Robô planar com duas articulações rotativas



Fonte: Spong et al. (2006)

Tabela 2.2 - Parâmetros de DH do robô plano com dois GDL (Figura 10)

Junta	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	0	0	θ_1
2	a_2	0	0	θ_2

Fonte: Autora

Com os parâmetros da tabela 1, determina-se que:

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\text{sen} \theta_1 & 0 & a_1 \cos \theta_1 \\ \text{sen} \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & a_1 \text{sen} \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} e A_1^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\text{sen} \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \text{sen} \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \text{sen} \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Logo, a matriz transformação homogênea da base para o efetuador é:

$$A_0^2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos \theta_2 \\ \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_1 \text{sen} \theta_1 + a_2 \text{sen} \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

De maneira genérica, podemos definir a matriz transformação homogênea da base ($i=0$) até o efetuador ($i=n$) de um robô planar pela Equação 2.9.

$$A_0^n = A_0^1 \cdot A_1^2 \cdot \dots \cdot A_{n-2}^{n-1} \cdot A_{n-1}^n \quad (2.9)$$

Sendo que os três primeiros elementos da quarta coluna da matriz A_0^n correspondem às coordenadas (x, y, z) do efetuador em relação à base do robô.

Cabral ([2009?]) sugere um procedimento para obtenção da cinemática direta da posição usando a notação DH, apresentado a seguir de maneira resumida:

- Passo 1: Localizar os eixos das articulações, ou seja, os eixos z_0, z_1, \dots, z_{n-1} .
- Passo 2: Estabelecer o sistema de coordenadas da base.
- Passo 3: Localizar a origem do sistema i , ponto O_i , onde a normal comum entre os eixos z_i e z_{i-1} intercepta o eixo z_i .
- Passo 4: Estabelecer o eixo x_i ao longo da normal comum entre os eixos z_i e z_{i-1} , a partir do ponto O_i .
- Passo 5: Tendo os eixos z_i e x_i , estabelecer o eixo y_i segundo a regra da mão direita.
- Repetir os passos 3 a 5 para $i = 1, \dots, n-1$.
- Passo 6: Estabelecer o sistema de coordenadas do efetuador, sistema $O_n x_n y_n z_n$.
- Passo 7: Criar uma tabela com os parâmetros *DH* referentes a cada um dos ligamentos ou articulações.
- Passo 8: Montar as matrizes de transformação homogênea, $\mathbf{A}_{i-1}^i(q_i)$, a partir dos parâmetros DH.
- Passo 9: Obter a matriz de transformação homogênea $\mathbf{A}_0^n(q_1, \dots, q_n)$, a partir da Equação 2.9, que relaciona a posição e orientação do efetuador em relação ao sistema da base.

Os conceitos e procedimentos apresentados neste presente capítulo serão utilizados como orientação para a análise da cinemática direta do robô *ELIR*, ou seja, para a obtenção da matriz de transformação homogênea através da notação *DH*.

2.3.2 Cinemática Inversa

De acordo com Zwirnes (2004), o problema da cinemática inversa está em encontrar as variáveis das juntas (q_i) as quais satisfaçam as equações cinemáticas para uma dada posição (p) e orientação (r) da ferramenta.

“Enquanto a cinemática direta tem sempre uma única solução, a cinemática inversa pode ter ou não solução (por exemplo, quando a posição desejada cai fora do espaço de trabalho) e, no caso de existir solução, pode a mesma ser ou não única.”.

“Apesar da solução para o problema da cinemática inversa ser mais difícil (por não haver um procedimento sistemático como o DH) é mais útil do que a da direta; uma vez que o controle da posição desejada da ferramenta na cinemática inversa auxilia na escolha da melhor configuração de juntas e membros.” (ZWIRTES, 2004).

Buss (2004) traz que o tipo mais comum de juntas são as rotacionais, as quais têm suas configurações descritas por um único valor de ângulo escalar e , por simplicidade, discute em seu trabalho somente esse tipo de junta, apesar dos algoritmos e teorias apresentados serem aplicáveis aos demais tipos. Este autor admite que no corpo considerado existam n juntas e que o valor θ_j (ângulo da junta) a configura. Já cada efetuador (total de k) tem sua posição definida por s_i (em função dos ângulos de juntas e dada pelo vetor da Equação 2.10). O controle dos efetuadores é feito pela especificação da sua posição-alvo, dada pelo vetor da Equação 2.10.

$$\vec{s} = [s_1, s_2, \dots, s_k]^T \quad (2.10)$$

$$\vec{t} = [t_1, t_2, \dots, t_k]^T \quad (2.11)$$

Desta maneira, a mudança de posição (e) de cada efetuador é dada por:

$$e_i = t_i - s_i \quad (2.12)$$

$$\vec{e} = \vec{t} - \vec{s} \quad (2.13)$$

Os ângulos das juntas, por sua vez, são dados pelo vetor coluna:

$$\vec{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k]^T \quad (2.14)$$

Uma vez que a posição do efetuador é função dos ângulos das juntas, temos que:

$$\vec{s} = \vec{s}(\theta) \quad (2.15)$$

Sendo assim, a questão da cinemática inversa é encontrar os valores de θ_i tal que:

$$\vec{t}_i = \vec{s}_i(\theta) \quad (2.16)$$

De acordo com Buss (2004), infelizmente nem sempre há uma solução para a Equação 2.16 ou nem sempre há uma única e melhor solução; pode-se, porém, recorrer a métodos iterativos para se aproximar de uma boa solução.

Para a análise da cinemática inversa do *ELIR*, inicialmente as relações geométricas que definem a posição do efetuador em função dos ângulos das juntas são reunidas em sistemas

de equações não lineares. Para então, cada sistema ser implementado no software MATLAB® (MATrix LABoratory) utilizando-se a função *fsolve*. Tal função é dedicada a solucionar sistemas de equações não lineares de maneira iterativa a partir de uma estimativa inicial.

3 DEFINIÇÕES E METODOLOGIA

3.1 O PROJETO *ELIR*

O principal objetivo do projeto do *ELIR* é desenvolver um robô para realização de inspeção visual e térmica de linhas de transmissão de alta tensão (138 kV) construídas por cabo condutor de alumínio com alma de aço LINNET diâmetro 18,31 mm; sem que seja necessário o desligamento desta. O projeto do robô objetiva que este seja autônomo dependendo de operadores somente para sua instalação e remoção no trecho a ser inspecionado ou para eventuais paradas emergenciais além de que tenha um desempenho médio de inspeção de 14,4 km por dia de trabalho (oito horas).

É requerida a capacidade do robô em detectar e transpor automaticamente grampos de suspensão e amortecedores presentes na linha. Vale salientar que o projeto do *ELIR* não requer que o robô detecte, identifique ou ultrapasse amortecedor tipo festão, tento partido, associação de obstáculos, folga nos pinos ou cabo amassado; uma vez que estes tipos de obstáculos não possuem formato, tamanho ou angulações definidos.

Durante o processo de inspeção e navegação, o *ELIR* deve filmar a linha de transmissão e dos obstáculos referenciando geometricamente a posição. São requeridas também a detecção e medição de violação da faixa de servidão. Para cumprir tais requisitos, o projeto do sistema do *ELIR* conta com câmera de espectro visível, câmera de infravermelho e sensores.

Intenciona-se que o *ELIR* tenha capacidade de vencer inclinações de até 60°, para tal é necessário que se tenha uma massa final reduzida (estima-se 8,5kg da estrutura final, dividida entre estrutura e eletrônicos) assim como potência dos motores suficiente. Com a arquitetura final do *ELIR* objetivou-se, também, a sua flexibilidade, ou seja, garantir possibilidades de movimentos; assim como facilidade de montagem e fabricação através de número reduzido e mais simplicidade das peças constituintes.

Para tanto se considerou como pré-requisitos que o robô deve:

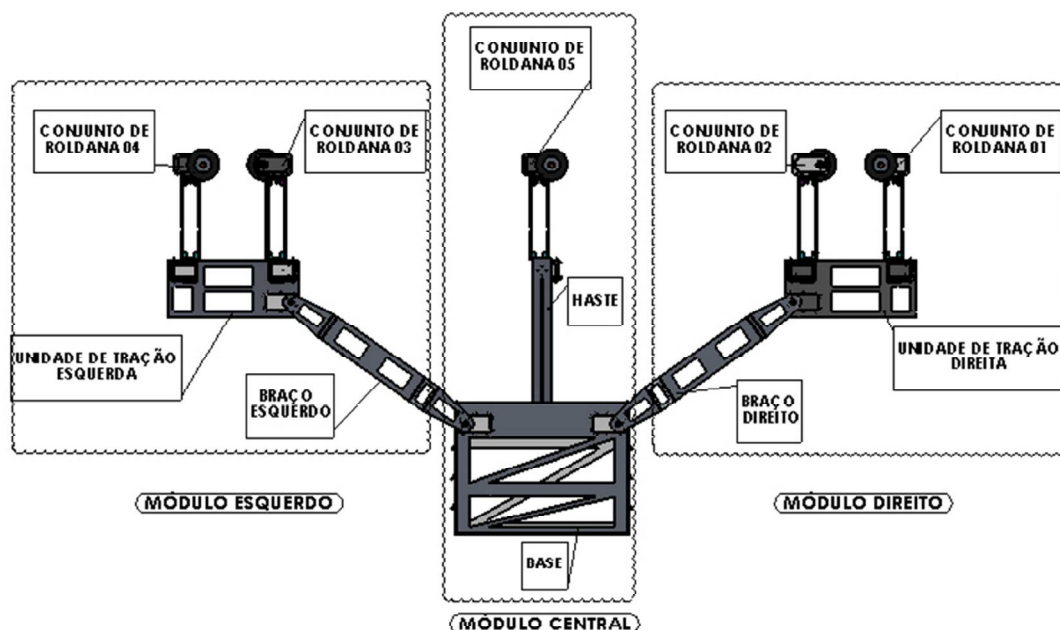
- Realizar inspeção visual e térmica da linha de transmissão e ultrapassagem de obstáculos (grampo de ancoragem e grampo de suspensão) de maneira autônoma.
- Monitorar a linha de servidão.

- Trafegar em linha de transmissão energizada a 138 kV, formada por cabo condutor LINNET com diâmetro de 18,3 mm.
- Dependem de operadores somente para instalação e desacoplamento à linha.
- Ter massa menor ou igual a 14 kg, permitindo a instalação em campo com a utilização de hastes por apenas dois operadores.
- Ter estrutura capaz de suportar e transportar os equipamentos e sensores necessários para a realização da inspeção.
- Ter blindagem elétrica e magnética, para que os campos eletromagnéticos gerados pelas linhas de transmissão energizadas não danifiquem seus componentes.

3.2 DEFINIÇÕES

Para que o robô de inspeção de linhas de transmissão de 138 kV, *ELIR*, cumpra com os requisitos de projeto descritos no capítulo 3.1, o seu conceito mecânico geométrico proposto pode ser dividido em três grandes módulos: o esquerdo, o central e o direito (como mostrado na Figura 11).

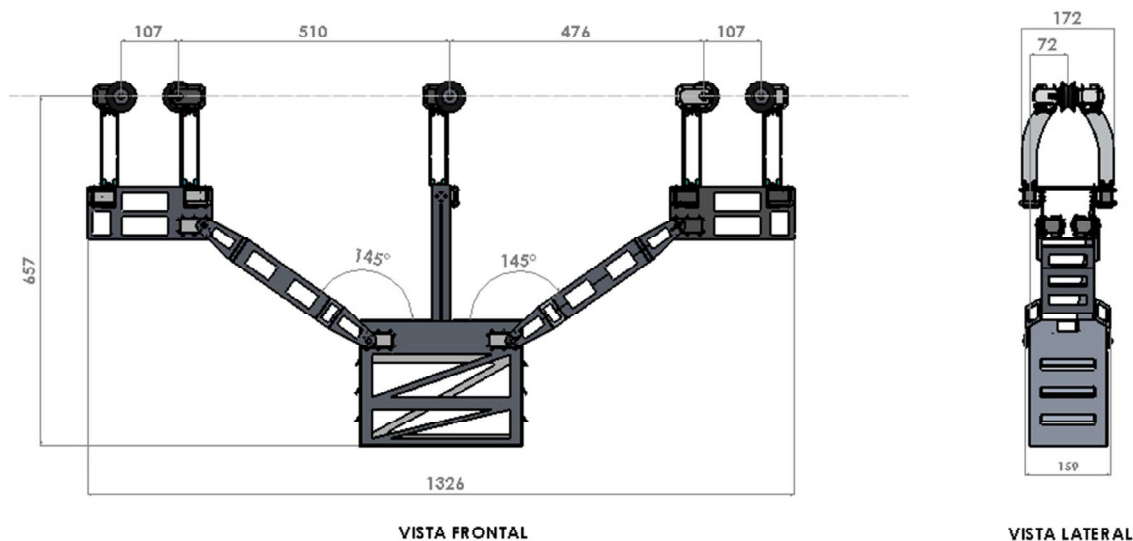
Figura 11- Conceito mecânico do *ELIR*



Fonte: Autora

No presente trabalho, para a realização da análise geométrica e cinemática, utilizou-se as dimensões e desenhos mecânicos dos componentes e conjuntos do *ELIR* de acordo com o disponibilizado por Sartori (2017). A Figura 12 mostra as principais dimensões do robô.

Figura 12- Vista frontal e lateral do *ELIR* com suas principais dimensões em milímetros

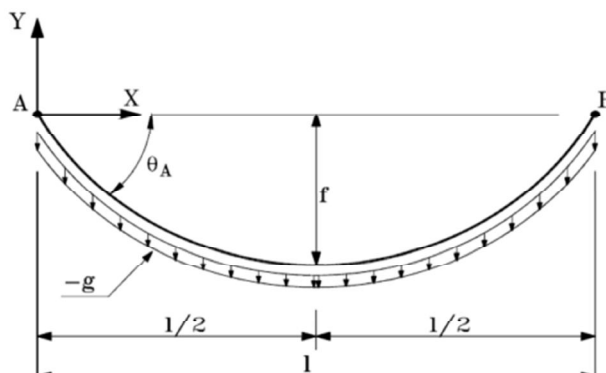


Fonte: Autora

O conjunto de roldana encarrega-se pela força motriz de todo o robô ao longo da linha de transmissão, funcionando também como ponto de apoio durante a sua movimentação. Já os braços são responsáveis pela ligação entre as unidades de tração e a base do robô; cada braço é acoplado a quatro motores *MX-106T-31* (dois em cada extremidade) garantindo, assim, os graus de liberdades desejados em cada junta. A base do *ELIR* tem como principal função comportar os equipamentos eletrônicos (baterias, fiações, sensores, etc.) responsáveis pelo funcionamento autônomo do robô, além de servir como suporte para os quatro motores *MX-106T-31* a serem acoplados também aos dois braços

Para a primeira e segunda simulação realizada durante a análise cinemática inversa do *ELIR* foi considerado que o robô percorre uma catenária. Segundo Burin (2010), a deformada de um cabo suspenso, fixado em dois pontos, como no caso de linhas aéreas de transmissão, apresenta a forma de uma curva que é mais bem descrita por uma função conhecida como catenária, Figura 13.

Figura 13 - Peso próprio do cabo representado por função catenária



Fonte: Pereira Junior, 2002 (apud BURIN 2010)

Burin (2010) expõe que a função da catenária pode ser encontrada por:

$$y = C_0 * \cosh\left(\frac{x}{C_0}\right) \quad (3.1)$$

Sendo:

y = posição vertical do cabo;

x = posição horizontal do cabo;

C_0 = parâmetro da catenária.

O parâmetro C_0 pode, por sua vez, ser calculado por:

$$C_0 = \frac{T_0}{p} \quad (3.2)$$

Onde:

T_0 = componente horizontal da força axial do cabo;

p = peso unitário do cabo.

No caso estudado, foi considerado um cabo condutor de alumínio com alma de aço, Linnet com diâmetro igual a 18,31mm, massa linear de 689,9 kg/km (de acordo com catálogo da ALUBAR, 2010) e comprimento igual a 10 metros (variando a sua coordenada da abscissa entre -5 e 5), obtendo, portanto a seguinte equação da catenária (no sistema métrico):

$$y = 5,7735 * \cosh\left(\frac{x}{5,7735}\right) \quad (3.3)$$

De acordo com o capítulo 3.1 um dos pré-requisitos do ELIR é que este tenha capacidade de detectar e transpor grampos de suspensão e amortecedores que estejam na linha de transmissão. Na Tabela 3.1 consta a representação no SolidWorks e as dimensões máximas em milímetros destes obstáculos como considerado nas análises feitas no presente trabalho.

Tabela 3.1 - Principais obstáculos a serem transpostos pelo *ELIR* (representação no SolidWorks e suas dimensões máximas em milímetros)

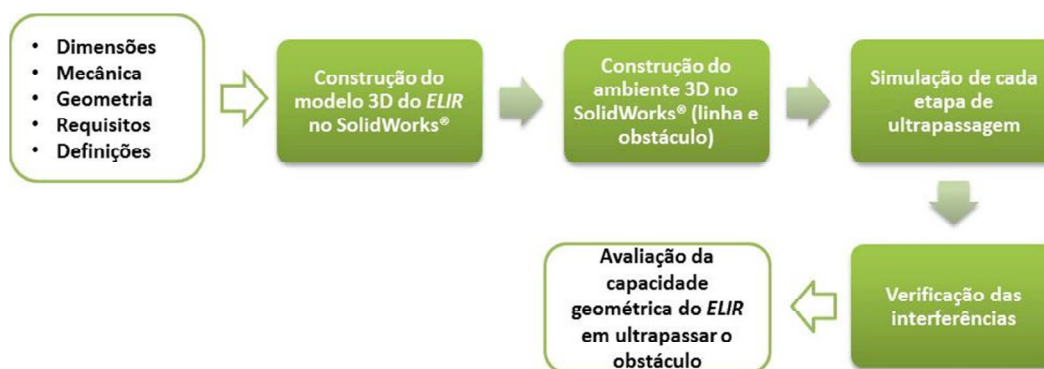
OBSTÁCULO	DIMENSÕES MÁXIMAS
GRAMPO DE SUSPENSÃO 	ALTURA : 148mm COMPRIMENTO: 205 mm LARGURA: 120 mm
AMORTECEDOR 	ALTURA : 165 mm COMPRIMENTO: 535 mm LARGURA: 90 mm

Fonte: Autora

3.3 ANÁLISE GEOMÉTRICA DO *ELIR*

Para a verificação da capacidade geométrica do *ELIR* em ultrapassar o grampo de suspensão foi realizada a análise geométrica seguindo as etapas descritas na Figura 14.

Figura 14- Etapas da análise geométrica do *ELIR*



Fonte: Autora

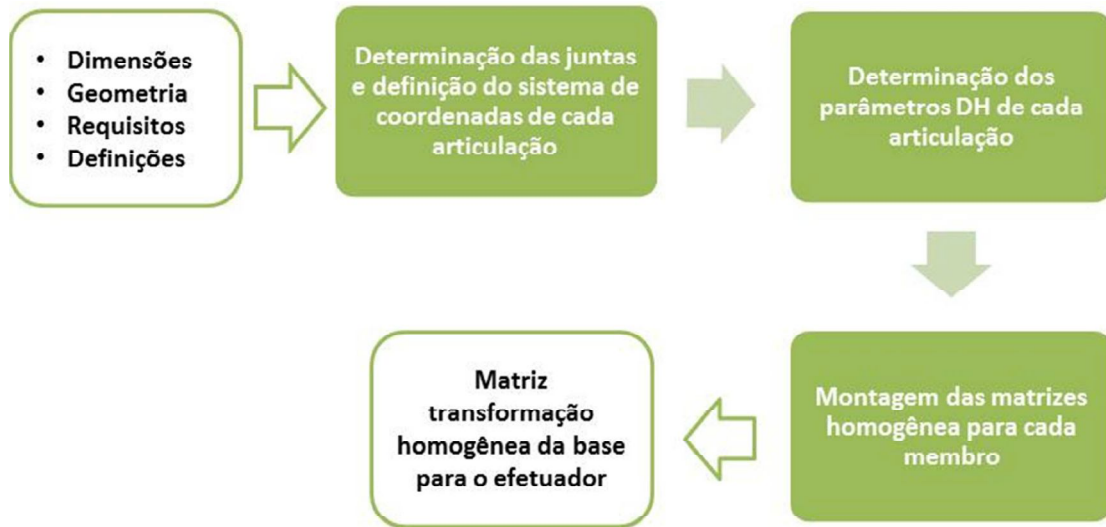
Como representado na Figura 14, conhecendo os requisitos e os conceitos mecânicos e geométricos do projeto *ELIR* (item 3.1) assim como adotando as definições abordadas no capítulo 3.2 foi possível inicializar a análise geométrica do robô pela confecção do seu modelo tridimensional utilizando-se o software de CAD (computer-aided design) SolidWorks®. Neste mesmo software foi criado um ambiente 3D composto pela linha de transmissão (comportando-se como a catenária descrita no capítulo 3.2) e contendo o obstáculo grampo de suspensão (dimensões de acordo com a Tabela 3.1) e com centro localizado em $x=-3,00\text{m}$.

Uma vez que o objetivo principal da análise geométrica é avaliar a capacidade dimensional do *ELIR* em ultrapassar o obstáculo definido; a fase final desta análise foi a simulação de cada etapa de transposição do grampo de suspensão, ainda no SolidWorks®. Desta maneira foi possível verificar se haveria alguma interferência mecânica, choque, entre qualquer parte do robô e do obstáculo ou da linha durante o processo de ultrapassagem.

3.4 ANÁLISE CINEMÁTICA

3.4.1 Cinemática Direta

Para a análise da cinemática direta do *ELIR* utilizou-se os parâmetros de DH, abordado no capítulo 2.3.1, com o intuito de encontrar as matrizes de transformação homogêneas para as juntas deste robô; as análises seguiram a rotina listada na Figura 15.

Figura 15 - Etapas da análise da cinemática direta do *ELIR*

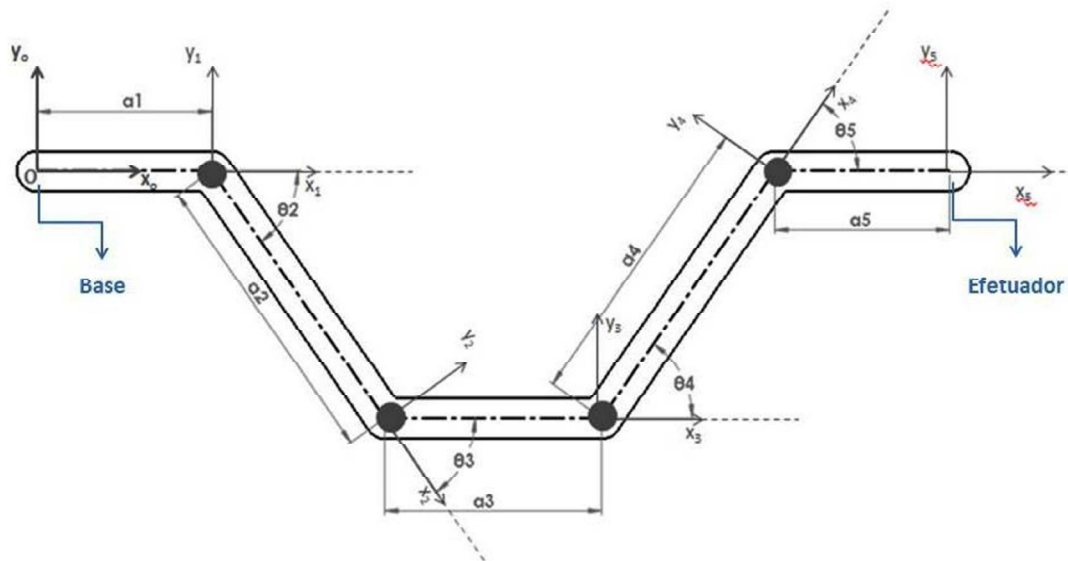
Fonte: Autora

Como representado na Figura 15, sabendo-se das dimensões, geometria e requisitos do projeto *ELIR* (item 3.1) assim como das definições abordadas no capítulo 3.2; para a análise da cinemática direta do robô inicialmente, denominou-se cada junta e definiu-se os sistemas de coordenadas das articulações do robô de acordo com o mostrado na Figura 16. Como pode ser observado considerou-se a base do robô na sua extremidade esquerda e o efetuador na extremidade direita; o objetivo foi, portanto verificar o deslocamento das duas roldanas da unidade de tração direita.

O próximo passo foi determinar os parâmetros DH de cada uma das articulações do *ELIR*, para então ser possível montar as matrizes homogêneas de cada um dos seus membros. Uma vez de posse destas matrizes, foi possível obter, através da Equação 2.9, a matriz de transformação homogênea. Como tratado no capítulo 2.3.2, dados certos valores de ângulo e de dimensões de junta, através dos três primeiros elementos da quarta coluna desta matriz é possível obter a posição e orientação do efetuador em relação ao sistema de base e assim fazer uma previsão do seu espaço de trabalho.

Uma vez que há simetria na geometria do *ELIR*, quando for necessário verificar a posição das duas roldanas fixadas à unidade de tração esquerda, basta permutar o ponto da base e da ferramenta além de, conseqüentemente, renomear as juntas para que os mesmos parâmetros e matrizes de cinemática direta sejam válidos.

Figura 16 – Esquema do *ELIR* com os sistemas de coordenadas das suas articulações, para a verificação do deslocamento das roldanas das unidades de tração



Fonte: Autora

3.4.2 Cinemática Inversa

Para a análise da cinemática inversa do *ELIR* realizada no presente trabalho teve-se como dados de entrada as informações do seu projeto, abordadas no capítulo 3.1 (dimensões, geometria e requisitos) além das definições descritas no capítulo 3.2. A Figura 17 mostra as duas primeiras etapas da análise cinemática inversa do *ELIR*.

Figura 17 – Duas primeiras etapas da análise cinemática inversa do *ELIR*

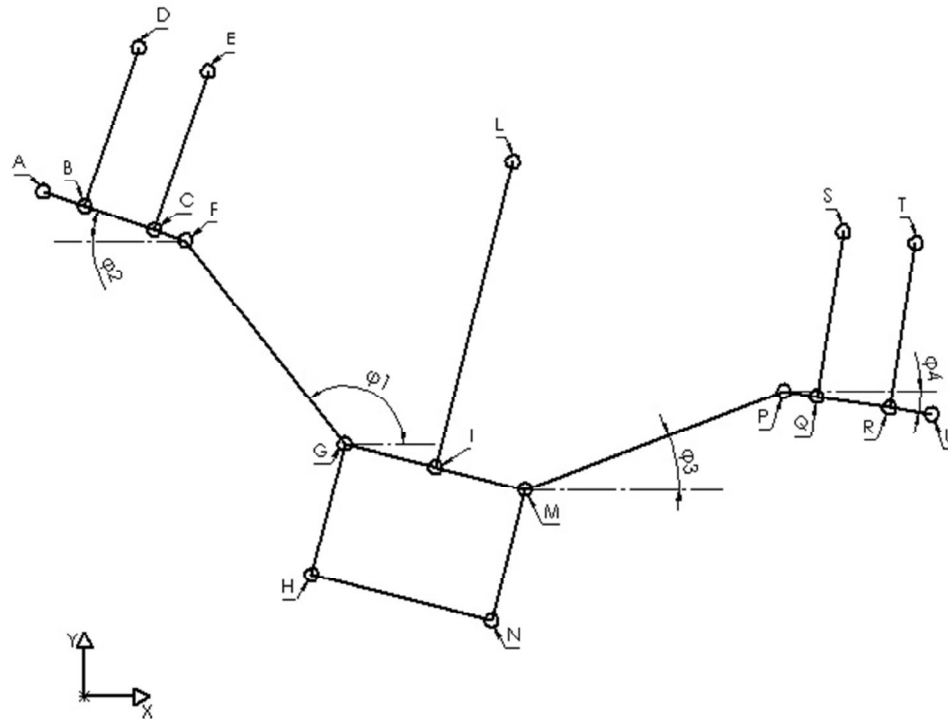


Fonte: Autora

De acordo com a Figura 17, a etapa inicial para o estudo da cinemática inversa foi a denominação das juntas e ângulos do *ELIR* como mostrado na Figura 18. A unidade de tração esquerda é formada pelos links AB, BC, CF, BD e CE; o módulo central pelos GI, GH, IM, IL, MN e HN; já a unidade de tração da direita pelos PQ, QR, QS, RT e RU. Os pontos D, E, L, S e T

representam as roldanas. As dimensões (em metro) de cada link, de acordo com o protótipo projetado (item 3.1), estão expostas na Tabela 3.2.

Figura 18 - Denominação das juntas e ângulos do *ELIR* para estudo da cinemática inversa



Fonte: Autora

Tabela 3.2 Dimensão (m) dos links do *ELIR*

Link	Dimensão	Link	Dimensão
AB=	0,0630 m	IM=	0,1525 m
BC=	0,1070 m	IL=	0,4405 m
AC=	0,1700 m	MN=	0,1972 m
CE=	0,0485 m	HN=	0,2710 m
BD=	0,2243 m	PQ=	0,0485 m
DE=	0,1700 m	QR=	0,1070 m
FG=	0,3770 m	QS=	0,2243 m
GH=	0,1972 m	RT=	0,2243 m
GL=	0,4662 m	RU=	0,0630 m
		ST=	0,1070 m
		PT=	0,2729 m
		MP=	0,2243 m

Fonte: Autora

A segunda etapa para análise cinemática inversa foi a determinação das condições das três simulações a serem realizadas. Para tal definiu-se a existência ou não de um obstáculo (em caso positivo a sua dimensão e posição na linha); assim como a equação do caminho a ser percorrido pelo robô (representando a linha) além da velocidade na direção do eixo x. As definições das três simulações realizadas estão resumidas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Simulações realizadas na análise da cinemática inversa do ELIR

Simulação	Caminho	Dados de entrada	Obstáculo
I	Catenária	Função que rege os pontos da catenária	Grampo de suspensão
II	Catenária	Trajectoria percorrida por uma roldana	Sem obstáculo
III	Aclive	Trajectoria percorrida por uma roldana	Sem obstáculo

Fonte: Autora

De acordo com os requisitos de projeto do *ELIR* (item 3.1) é demandado que o robô tenha a capacidade de inspecionar 14,4 km de linha de transmissão por dia de trabalho (oito horas); desta maneira podemos adotar, para a simulação realizada, a velocidade constante na direção do eixo x (v_x) de cada ponto igual a 1,8 km/h ou 0,50 m/s.

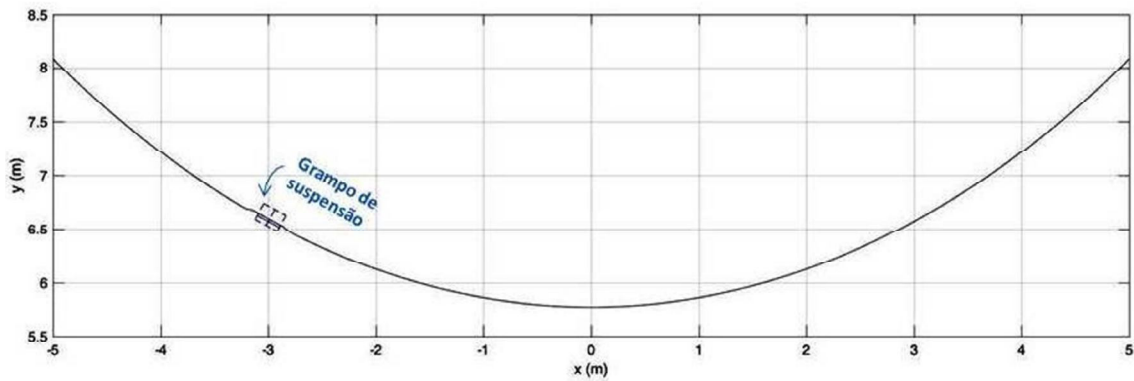
Para a análise da cinemática inversa do *ELIR* foram construídos sistemas de equações não lineares com o objetivo de descrever as relações geométricas entre às juntas e os links do robô. Posteriormente estes sistemas foram solucionados com o auxílio do MATLAB®, um software interativo de alto desempenho voltado para o cálculo numérico. Os itens a seguir são dedicados a descrever as etapas cumpridas para cada uma das três simulações realizadas.

Simulação I

Cumprindo a segunda etapa descrita na Figura 17, para a Simulação I, considerou-se como obstáculo o grampo de suspensão mostrado na Tabela 3.1, cujas dimensões são: comprimento igual a 205 mm, altura 148 mm e largura de 120 mm. Sendo que quando este grampo encontra-se no cabo, está a 37 mm abaixo da linha de centro deste e 111 mm acima. Para efeito de simulação, supomos que o centro longitudinal deste obstáculo está localizado na coordenada $x=-3,00$ m.

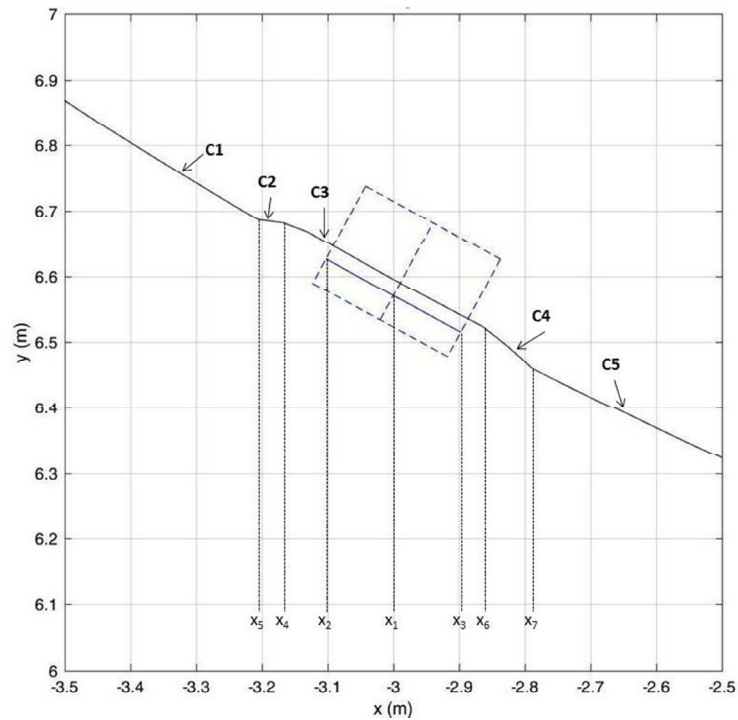
Ainda na segunda etapa da Figura 17, levando-se em conta as inferências feitas, o caminho planejado como percurso para a primeira simulação do *ELIR* é formado pela união das cinco curvas, mostradas na Figura 19 e em detalhe na Figura 20, na cor preta. Nestas figuras, o grampo de suspensão é representado pelo conjunto de retas tracejadas em azul.

Figura 19 - Caminho planejado como percurso para a primeira simulação do *ELIR*



Fonte: Autora

Figura 20 – Detalhe do caminho planejado como percurso para a primeira simulação do *ELIR*, união de cinco curvas (C1 a C5).



Fonte: Autora

As curvas identificadas na Figura 20 são definidas por:

$$C1: y = 5,7735 * \cosh\left(\frac{x}{5,7735}\right); -5 < x < x_5 \quad (3.4)$$

$$C2: y = a_1 * x + b_1; x_5 < x < x_4 \quad (3.5)$$

$$C3: y = 5,7735 * \cosh\left(\frac{x}{5,7735}\right) + 0,025; x_4 < x < x_6 \quad (3.6)$$

$$C4: y = a_2 * x + b_2; x_6 < x < x_7 \quad (3.7)$$

$$C5: y = 5,7735 * \cosh\left(\frac{x}{5,7735}\right); x > x_7 \quad (3.8)$$

Sendo que:

$$a_1 = \frac{5,7735 * (\cosh\left(\frac{x_5}{5,7735}\right) - \cosh\left(\frac{x_4}{5,7735}\right) - 0,025)}{(x_5 - x_4)} \quad (3.9)$$

$$b_1 = 5,7735 * \cosh\left(\frac{x_5}{5,7735}\right) - x_5 * a_1 \quad (3.10)$$

$$a_2 = \frac{(5,7735 * \cosh\left(\frac{x_7}{5,7735}\right) - \cosh\left(\frac{x_6}{5,7735}\right) + 0,025)}{(x_7 - x_6)} \quad (3.11)$$

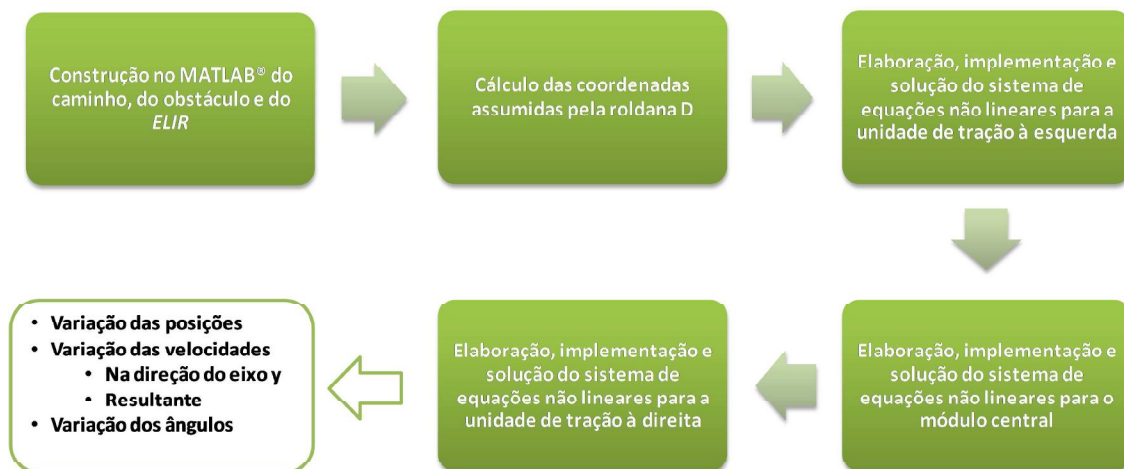
$$b_2 = 5,7735 * \cosh\left(\frac{x_6}{5,7735}\right) - x_6 * a_2 \quad (3.12)$$

Onde:

- $x_1 = -3,000$ (valor da abscissa do centro do obstáculo no cabo);
- $x_2 = -3,1025$ (valor da abscissa da extremidade esquerda do obstáculo no cabo);
- $x_3 = -2,8975$ (valor da abscissa da extremidade direita do obstáculo no cabo);
- $x_4 = -3,1525$ (valor da abscissa do ponto da extrema esquerda da curva C3);
- $x_5 = -3,2025$ (valor da abscissa do ponto da extrema esquerda da curva C2);
- $x_6 = -2,8475$ (valor da abscissa do ponto da extrema direita da curva C3);
- $x_7 = -2,7975$ (valor da abscissa do ponto da extrema direita da curva C4);

Uma vez cumpridas as duas etapas descritas na Figura 17, a próximos passos dados para a realização desta simulação estão exibidos na Figura 21. A primeira etapa específica desta simulação é a construção no MATLAB® do caminho, do obstáculo e do robô após as definições já tratadas no presente capítulo e no capítulo 3.4.2.

Figura 21 – Etapas específicas da Simulação I da análise cinemática inversa do ELIR



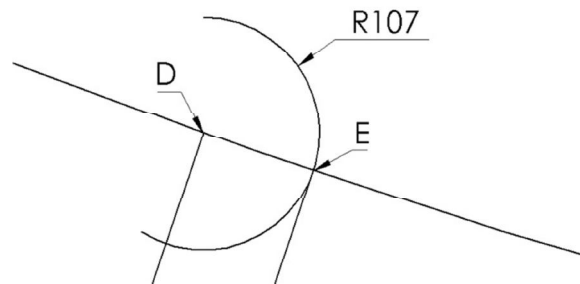
Fonte: Autora

De acordo com a Figura 21, uma vez definido o caminho a ser seguido pelo robô, nesta simulação calculou-se o caminho (x_D, y_D) percorrida pela roldana D através das funções definidas da Equação 3.4 a 3.12 (segunda etapa específica, Figura 21), sabendo-se que existe

uma distância entre o centro do cabo e o ponto da roldana tangente à linha (cabo condutor LINNET com diâmetro de 18,3mm) igual a 9,15mm. Variou-se o x_D de -5 a 5, com diferença entre o valor da abscissa de um ponto e o seu sucessor igual a 9,5 mm (metade do raio da roldana).

As etapas seguintes dizem respeito à elaboração, implementação e solução dos sistemas de equações não lineares para cada uma das três unidades. Para determinar a cinemática inversa da unidade de tração à esquerda, procurou-se primeiramente as coordenadas do ponto E; sabendo-se que este está a um raio de 107 mm de distância do ponto D e é coincidente ao caminho planejado (Figura 22); gerando o conjunto de equações (Equação 3.13).

Figura 22 – Raio de distância entre os centro das roldanas da unidade de tração à esquerda (ponto D e E)



Fonte: Autora

$$DE^2 = \begin{cases} (x_E - x_D)^2 + (5.7735 * \cosh(x_E/5.7735) + 0.00915 - y_D)^2; & x_E < x_5 \text{ e } x_E > x_7 \\ (x_E - x_D)^2 + ((a_1 * x_E + b_1 + 0.00915) - y_D)^2; & x_5 < x_E < x_4 \\ (x_E - x_D)^2 + (5.7735 * \cosh(x_E/5.7735) + 0.03415 - y_D)^2; & x_4 < x_E < x_6 \\ (x_E - x_D)^2 + ((a_2 * x_E + b_2 + 0.00915) - y_D)^2; & x_6 < x_E < x_7 \end{cases} \quad (3.13)$$

Pelas definições geométricas do *ELIR*, os links BD e CE são perpendiculares aos AB, BC e CF, desta maneira o ângulo formado por esses três segmentos com a horizontal (φ_2) assume o mesmo valor do ângulo formado entre reta imaginária traçada entre os pontos D e E e a horizontal, sendo válida a Equação 3.14.

$$\varphi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{(y_E - y_D)}{(x_E - x_D)} \right) \quad (3.14)$$

Pôde-se, então, determinar as coordenadas dos pontos A, B, C e F:

$$x_B = x_D - BD * \sin(\varphi_2) \quad (3.15)$$

$$y_B = y_D - BD * \cos(\varphi_2) \quad (3.16)$$

$$x_C = x_E - CE * \sin(\varphi_2) \quad (3.17)$$

$$y_C = y_E - CE * \cos(\varphi_2) \quad (3.18)$$

$$x_A = x_B - AB * \cos(\varphi_2) \quad (3.19)$$

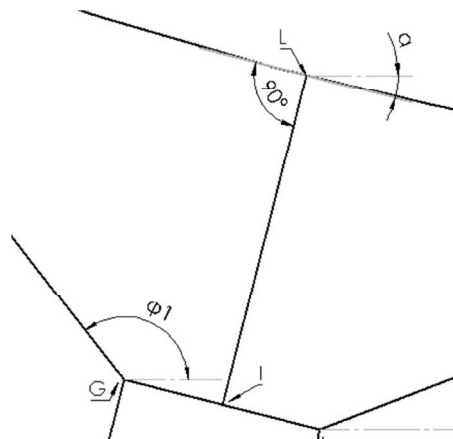
$$y_A = y_B + AB * \sin(\varphi_2) \quad (3.20)$$

$$x_F = x_C + CF * \cos(\varphi_2) \quad (3.21)$$

$$y_F = y_C - CF * \sin(\varphi_2) \quad (3.22)$$

Na quarta etapa específica (Figura 21), para o cálculo das coordenadas dos pontos I, L e G da unidade central buscou-se encontrar a solução do sistema de equações não lineares (3.23) para cada par (x_F, y_F) anteriormente calculado. Para tal, tomou-se como premissa que o link IL é perpendicular à reta tangente à catenária (que forma o ângulo α com a horizontal) coincidente ao ponto L, centro da roldana central (Figura 23).

Figura 23 – Detalhe dos pontos G, I e L



Fonte: Autora

$$S1 = \begin{cases} x_F = x_G + FG * \cos(\varphi_1) \\ y_F = y_G + FG * \sin(\varphi_1) \\ \alpha = \tan^{-1}\left(\sinh\left(\frac{x_L}{5,7735}\right)\right) \\ x_I = x_G + GI * \cos(\varphi_1) \\ y_I = y_G + GI * \sin(\varphi_1) \\ (x_L - x_G) = \sqrt{GI^2 - (y_L - y_G)^2} \\ y_I - y_L = \left(\frac{-1}{\sinh\left(\frac{x_L}{5,7735}\right)}\right) * (x_I - x_L) \end{cases} \quad (3.23)$$

Tal que:

$$y_L = \begin{cases} 5.7735 * \cosh\left(\frac{x_L}{5,7735}\right) + 0.00915; & x_L < x_5 \text{ e } x_L > x_7 \\ a_1 * x_L + b_1 + 0.00915; & x_5 < x_L < x_4 \\ 5.7735 * \cosh\left(\frac{x_L}{5,7735}\right) + 0,03415; & x_4 < x_L < x_6 \\ a_2 * x_L + b_2 + 0.00915; & x_6 < x_L < x_7 \end{cases} \quad (3.24)$$

Como o link IL é perpendicular ao GI, IM e HN além de ser paralelo ao GH e MN (pelas condições construtivas do robô); os demais pontos da unidade central foram calculados pelas equações de 3.25a 3.30.

$$x_M = x_I + IM * \cos(\alpha) \quad (3.25)$$

$$y_M = y_I + IM * \sin(\alpha) \quad (3.26)$$

$$x_H = x_G + GH * \sin(\alpha) \quad (3.27)$$

$$y_H = y_G - GH * \cos(\alpha) \quad (3.28)$$

$$x_N = x_M + MN * \sin(\alpha) \quad (3.29)$$

$$y_N = y_M - MN * \cos(\alpha) \quad (3.30)$$

Conhecendo-se os pontos P, Q, R, S e T da unidade à esquerda e da unidade central, os pontos e ângulos da unidade à direita, por sua vez, são calculados pela solução de um segundo sistema de equações não lineares 3.31.

$$S2 = \begin{cases} x_M = x_P - MP * \cos(\varphi_3) \\ y_M = y_P - MP * \sin(\varphi_3) \\ x_P = x_Q - PQ * \cos(\varphi_4) \\ y_Q = x_P + PQ * \sin(\varphi_4) \\ x_S = x_Q - QS * \sin(\varphi_4) \\ x_P = x_R - PR * \cos(\varphi_4) \\ y_R = y_P + PR * \sin(\varphi_4) \\ x_R = x_T + RT * \sin(\varphi_4) \\ (x_P - x_T) = \sqrt{PT^2 - (y_P - y_T)^2} \\ (x_T - x_S) = \sqrt{ST^2 - (y_S - y_T)^2} \end{cases} \quad (3.31)$$

Tal que:

$$y_S = \begin{cases} 5.7735 * \cosh\left(\frac{x_S}{5.7735}\right) + 0.00915; & x_5 < x_S < x_4 \\ a_1 * x_S + b_1 + 0.00915; & x_5 < x_S < x_4 \\ 5.7735 * \cosh\left(\frac{x_S}{5.7735}\right) + 0,03415; & x_4 < x_S < x_6 \\ a_2 * x_S + b_2 + 0.00915; & x_6 < x_S < x_7 \end{cases} \quad (3.32)$$

$$y_T = \begin{cases} 5.7735 * \cosh\left(\frac{x_T}{5.7735}\right) + 0.00915; & x_5 < x_T < x_4 \\ a_1 * x_T + b_1 + 0.00915; & x_5 < x_T < x_4 \\ 5.7735 * \cosh\left(\frac{x_T}{5.7735}\right) + 0,03415; & x_4 < x_T < x_6 \\ a_2 * x_T + b_2 + 0.00915; & x_6 < x_T < x_7 \end{cases} \quad (3.33)$$

As coordenadas do ponto U são encontradas por:

$$x_U = x_R + RU * \cos(\varphi_4) \quad (3.34)$$

$$y_U = y_R + RU * \sin(\varphi_4) \quad (3.35)$$

Para cumprir as etapas finais desta primeira simulação, os sistemas de equações não lineares elaborados para descrever geometricamente as unidades de tração e o módulo central foram implementados e solucionados no software MATLAB® utilizando-se a função *fsolve*, de acordo com os códigos disponibilizados por Sartori (2017).

Como resultado da primeira simulação da análise de cinemática inversa obteve-se as variações de posição de cada ponto assim como a variação dos ângulos, sendo possível calcular através das equações de 3.36 a 3.40. a velocidade na direção do eixo y (v_y) e a velocidade resultante (v) para um ponto qualquer do *ELIR*.

$$\Delta x = x_n - x_{(n-1)} \quad (3.36)$$

$$\Delta t = \Delta x / v_x \quad (3.37)$$

$$\Delta y = y_n - y_{(n-1)} \quad (3.38)$$

$$v_y = \Delta y / \Delta t \quad (3.39)$$

$$v = \sqrt{v_y^2 + v_x^2} \quad (3.40)$$

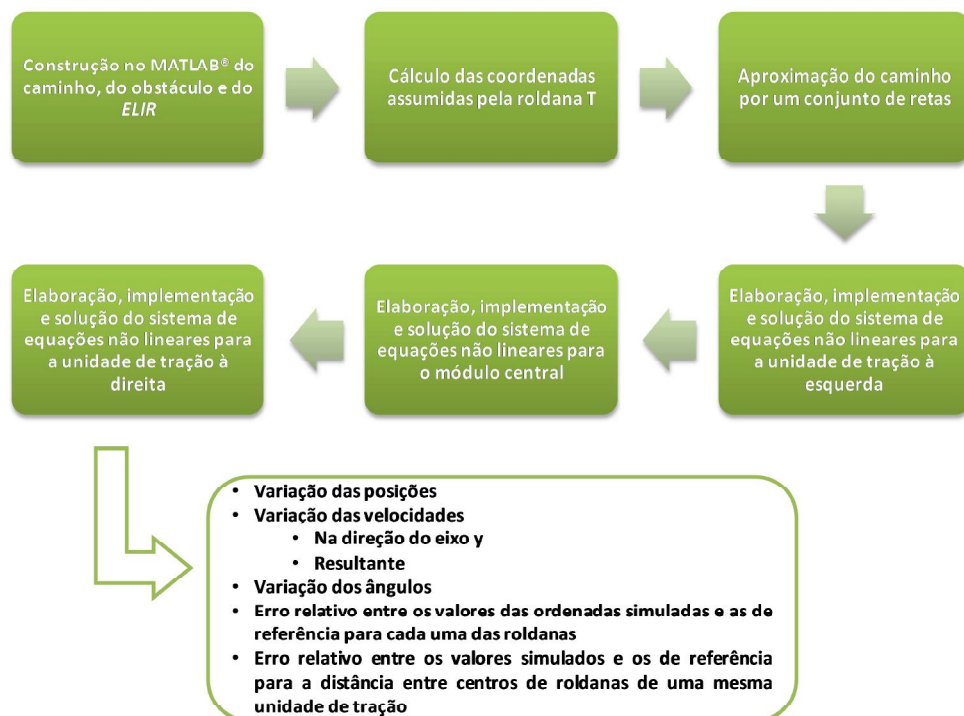
Simulação II

De acordo com a Tabela 3.3, na Simulação II o caminho utilizado é uma catenária, sem obstáculo. Cumprindo ainda a segunda etapa da Figura 17, a Equação 3.41 foi escolhida para definir o comportamento da linha.

$$y = 5,7735 * \cosh\left(\frac{x}{5,7735}\right) + 0.00915; -5 < x < 5 \quad (3.41)$$

Para esta segunda simulação, as etapas específicas a serem cumpridas estão descritas na Figura 24.

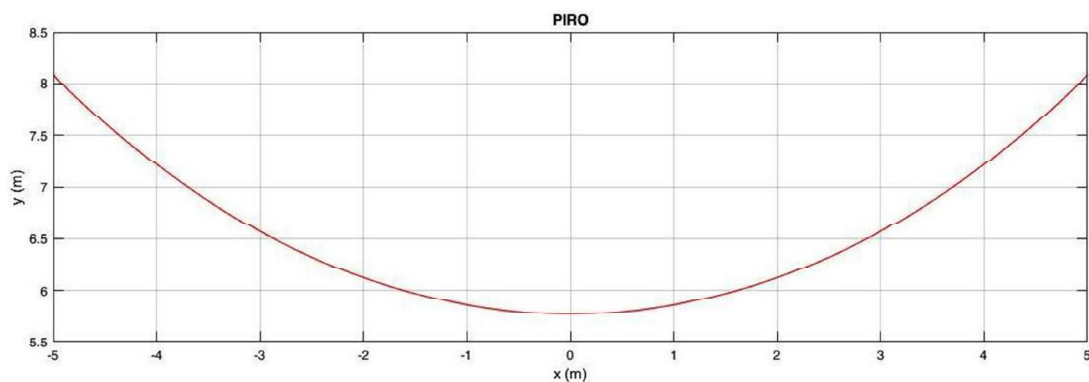
Figura 24 – Etapas específicas da Simulação II da análise cinemática inversa do *ELIR*



Fonte: Autora

De acordo com a Figura 24, após construção no MATLAB® do caminho e do robô; através função da Equação 3.41 calculou-se inicialmente as coordenadas (x_T, y_T) assumidas pelo ponto T centro da roldana da extremidade direita da unidade de tração á direita; fazendo com que x_T varie de -5 a 5, com diferença entre o valor da abscissa de um ponto e o seu sucessor igual a 9,5 mm (metade do raio da roldana), segunda etapa específica desta simulação. Uma vez de posse deste conjunto de pontos, a catenária foi aproximada por um conjunto de retas, R1 (Figura 25), definidas pela Equação 3.42.

Figura 25 – Aproximação da catenária por um conjunto de retas



Fonte: Autora

$$R1: y = zx + w \quad (3.42)$$

Tal que:

$$z = \frac{(y_{T_n} - y_{T_{n-1}})}{(x_{T_n} - x_{T_{n-1}})} \quad (3.43)$$

$$w = y_{T_n} - z_n * x_{T_n} \quad (3.44)$$

Para cada ponto (x_T, y_T) foi relacionada, portanto, uma reta R1 (logo um valor de z e um de w). A roldana S teve suas coordenadas definidas pela reta percorrida (para aproximação do caminho) quando o valor da abscissa do ponto T assumiu um valor aproximadamente igual ao agora assumido pelo ponto S. Desta maneira buscou-se pelo histórico do caminho percorrido pela primeira roldana (T) em contato com o caminho (que agora pode ser genérico) determinar o caminho que os demais pontos devem cumprir. Na prática, supondo-se ser conhecido o histórico de posições da roldana T, x_T, y_T , pode-se pelos sistemas de equações apresentados a seguir determinar as posições e ângulos desejáveis das juntas do ELIR.

Os demais pontos da unidade de tração à direita tiveram sua posição calculada pela solução do sistema de equações 3.45,

$$S3 = \begin{cases} x_T - x_S = \sqrt{ST^2 - (y_T - y_S)^2} \\ \tan(\varphi_4) = (y_T - y_S) / (x_S - x_T) \\ y_S = z \cdot x_S + w \\ x_R = x_T - RT \sin(\varphi_4) \\ y_R = y_T - RT \cos(\varphi_4) \\ x_Q = x_S - QS \sin(\varphi_4) \\ y_Q = y_S - QS \cos(\varphi_4) \\ x_P = x_Q - PQ \cos(\varphi_4) \\ y_P = y_Q + PQ \sin(\varphi_4) \end{cases} \quad (3.45)$$

Assim como a roldana representada pelo ponto S, a roldana central (ponto L), quinta etapa da Figura 24, teve cada coordenada calculada pela reta definida pelo histórico de comportamento da roldana T. Partiu-se da premissa, também, que o link IL é perpendicular a essa reta. Uma vez conhecidas as coordenadas do ponto P, o sistema de equações Equação 3.46 foi utilizado para calcular a posição dos pontos I, L, M.

$$S4 = \begin{cases} y_I - (z \cdot x_L + w) = (-1/z) \cdot (x_L - x_I) \\ x_P = x_M + MP \cos(\varphi_3) \\ y_P = y_M + MP \sin(\varphi_3) \\ x_M = x_I + IM \cos(\alpha_1) \\ z = (y_M - y_I) / (x_M - x_I) \\ (z \cdot x_L + w) - y_M = \sqrt{LM^2 - (x_L - x_M)^2} \\ \tan(\alpha_1) = z \end{cases} \quad (3.46)$$

Os demais pontos da unidade central foram calculados pelas equações de 3.47 a 3.52.

$$x_G = x_I - GI \cos(\alpha_1) \quad (3.47)$$

$$y_G = y_I - GI \sin(\alpha_1) \quad (3.48)$$

$$x_H = x_G + GH \sin(\alpha_1) \quad (3.49)$$

$$y_H = y_G - GH \cos(\alpha_1) \quad (3.50)$$

$$x_N = x_M + MN \sin(\alpha_1) \quad (3.51)$$

$$y_N = y_M - MN \cos(\alpha_1) \quad (3.52)$$

Respeitando a mesma premissa das roldanas S e L e já conhecendo a posição da junta G; as coordenadas das juntas que compõem a unidade de tração à esquerda, sexta etapa da Figura 24, foram encontradas solucionando-se o sistema de equação (Equação 3.53).

$$S5 = \begin{cases} x_D - x_E = \sqrt{DE^2 - (z' \cdot x_D + w' - z'' \cdot x_E - w'')^2} \\ x_G = x_F - FG \cos(\varphi_1) \\ y_G = y_F - FG \sin(\varphi_1) \\ x_F = x_C + CF \cos(\varphi_2) \\ y_F = y_C - CF \sin(\varphi_2) \\ x_F = x_B + BF \cos(\varphi_2) \\ z'' \cdot x_E + w'' - y_C = \sqrt{CE^2 - (x_E - x_C)^2} \\ z' \cdot x_D + w' - y_F = \sqrt{DF^2 - (x_D - x_F)^2} \\ x_D = x_B + BD \sin(\varphi_2) \\ y_B = y_F + BF \sin(\varphi_2) \end{cases} \quad (3.53)$$

As coordenadas do ponto A são encontradas por:

$$x_A = x_B - AB * \cos(\varphi_2) \quad (3.54)$$

$$y_A = y_B + AB \sin(\varphi_2) \quad (3.55)$$

Assim como na primeira simulação, tivemos como resultado da segunda simulação da análise de cinemática inversa as variações de posição de cada ponto assim como a variação dos ângulos, podendo utilizar as equações de 3.36 a 3.40 para calcular a velocidade na direção do eixo y (v_y) e a velocidade resultante (v).

Uma vez que na segunda simulação as quatro roldanas D, E, L e S tiveram seus valores de ordenadas (y_D , y_E , y_L e y_S) calculados por relação com o conjunto de retas R1 (Equação 3.42), pôde-se comparar os valores de ordenadas (y_{Dsim} , y_{Esim} , y_{Lsim} e y_{Ssim}) encontrados durante esta simulação e os valores obtidos segundo a equação da catenária definida pela Equação 3.41, valor de referência, (y_{Dcalc} , y_{Ecalc} , y_{Lcalc} e y_{Scalc}). Para tal, calcularam-se os erros relativos (E_r) entre esses valores usando a Equação 3.56, com cinco casas decimais como precisão.

$$E_r = \left| \frac{y_{calc} - y_{sim}}{y_{sim}} \right| \quad (3.56)$$

De acordo com o capítulo 3.3 e da Tabela 3.2, pela geometria do *ELIR*, as distâncias entre os centros das roldanas D e E (DE) e entre os centros das roldanas S e T (ST) são igual a 107 mm. Diante da metodologia utilizada na simulação II para encontrar os valores de ordenas roldanas D, E e S (y_D , y_E e y_S), julgou-se válido comparar os valores encontrados para os

segmentos DE e ST (DE_{sim} e ST_{sim}) e os seus valores reais (DE e ST). Os erros relativos (E_r) entre os valores reais dos segmentos DE e ST e seus valores simulados foram calculados pela Equação 3.57.

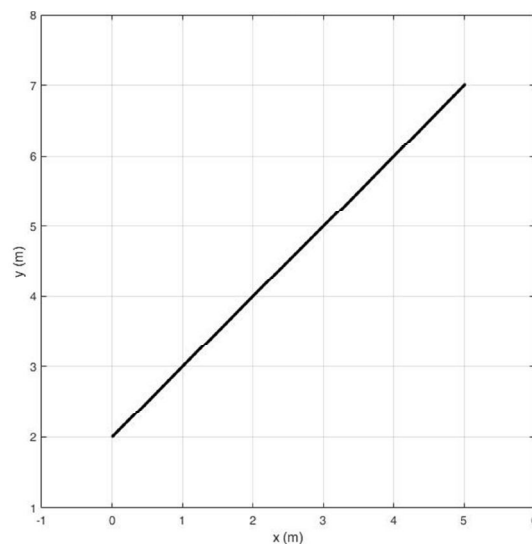
$$E_r = \left| \frac{ST - ST_{sim}}{ST_{sim}} \right| \quad (3.57)$$

Simulação III

Na terceira simulação o caminho a ser percorrida pelo *ELIR* é uma reta em sem obstáculo (Tabela 3.3 e Figura 26), formando 45graus com a horizontal e seguindo a Equação 3.58, definição tomada ainda na segunda etapa da Figura 17.

$$y = x + 2 ; 0 \leq x \leq 5 \quad (3.58)$$

Figura 26 – Caminho da terceira simulação, reta em active



Fonte: Autora

Assim como na segunda simulação, as etapas específicas adotadas estão de acordo com a Figura 24. Portanto o caminho foi seccionada por diversos segmentos de retas de acordo com as coordenadas (x_T , y_T) assumidas pela primeira roldana em contato com a linha (T). De posse deste histórico, foi possível determinar as coordenadas dos demais pontos e ângulos das juntas utilizando-se novamente as equações de 3.42 a 3.55.

Nesta simulação as velocidades dos pontos do *ELIR* foram calculadas, também, segundo as equações de 3.36 a 3.40.

Na terceira simulação, igualmente à segunda (item 0), as ordenadas simuladas para o centro das roldanas D, E, L e S (y_{Dsim} , y_{Esim} , y_{Lsim} , e y_{Ssim}) foram comparadas aos seus valores de referências (y_{Dcalc} , y_{Ecalc} , y_{Lcalc} , e y_{Scalc} calculadas pela Equação 3.58) e seus erros relativos calculados pela Equação 3.56. Da mesma forma, as distâncias simuladas entre os centros das roldanas D e E (DE_{sim}) e entre os das roldanas S e T (ST_{sim}) foram comparadas aos seus valores geometricamente definidos (DE e ST iguais a 107 mm, de acordo com Tabela 3.2), tendo os erros relativos (Er) calculados pela Equação 3.57.




4 ANÁLISE E RESULTADOS DA PESQUISA

4.1 ANÁLISE GEOMÉTRICA PARA ULTRAPASSAGEM DE OBSTÁCULO

De acordo com o capítulo 3.3, a análise da capacidade geométrica do *ELIR* em ultrapassagem de obstáculo foi realizada no software SolidWorks®. Na Tabela 4.1 constam as principais etapas e suas descrições da análise geométrica do *ELIR* transpondo um grampo de suspensão (Tabela 3.1) localizado em um cabo, em uma configuração como a definida no capítulo 3.3. As nomenclaturas das roldanas e das curvas estão de acordo com o capítulo 3.4.2.

Tabela 4.1 Etapas do processo de ultrapassagem do grampo de suspensão (continua)

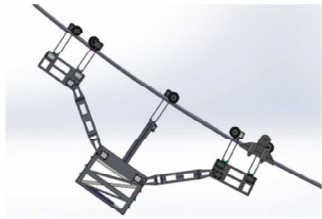



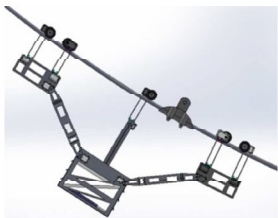
(continua)

ETAPA		POSIÇÃO DAS ROLDANAS				
		D	E	L	S	T
I		C1	C1	C1	C1	C1
II		C1	C1	C1	C1	C1
III		C1	C1	C1	C1	C2

Fonte: Autora

Tabela 4.1 Etapas do processo de ultrapassagem do grampo de suspensão (continuação)


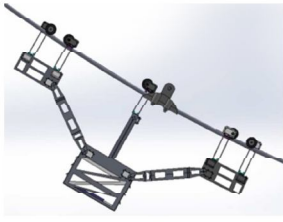


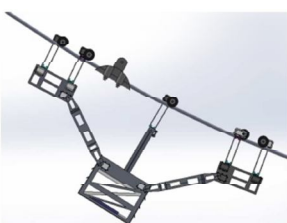
(continuação)

ETAPA		POSIÇÃO DAS ROLDANAS				
		D	E	L	S	T
IV		C1	C1	C1	C2	C3
V		C1	C1	C1	C3	C4
VI		C1	C1	C1	C3	C4
VII		C1	C1	C1	C4	C5
VIII		C1	C1	C1	C4	C5

Fonte: Autora






Tabela 4.1 Etapas do processo de ultrapassagem do grampo de suspensão (continuação)

(continuação)

ETAPA		POSIÇÃO DAS ROLDANAS				
		D	E	L	S	T
IX		C1	C1	C2	C5	C5
X		C1	C1	C3	C5	C5
XI		C1	C1	C4	C5	C5
XII		C1	C1	C4	C5	C5
XIII		C1	C2	C5	C5	C5

Fonte: Autora

Tabela 4.1 Etapas do processo de ultrapassagem do grampo de suspensão (conclusão)

ETAPA		POSIÇÃO DAS ROLDANAS				
		D	E	L	S	T
XIV		C2	C3	C5	C5	C5
XV		C2	C3	C5	C5	C5
XVI		C3	C4	C5	C5	C5
XVII		C4	C5	C5	C5	C5
XVIII		C5	C5	C5	C5	C5

Fonte: Autora

Diante da análise geométrica, é possível verificar que não há interferência entre o *ELIR* e o grampo de suspensão durante a ultrapassagem deste. Pode-se afirmar assim que o robô possui capacidade dimensional para realizar tal manobra sem que haja qualquer dano físico.

4.2 ANÁLISE CINEMÁTICA DIRETA DO ELIR

Como explicado no capítulo 3.4.1 para obtermos as matrizes homogêneas do *ELIR* utilizou-se os parâmetros de DH (Tabela 4.2) considerando a estrutura do robô e os sistemas de coordenadas das suas articulações de acordo com a Figura 16.

Tabela 4.2 - Parâmetros de DH do *ELIR*, para a verificação do deslocamento das roldanas das unidades de tração

Junta	a_j	d_j	α_j	θ_j
1	a_1	0	0	θ_1
2	a_2	0	0	θ_2
3	a_3	0	0	θ_3
4	a_4	0	0	θ_4
5	a_5	0	0	θ_5

Fonte: Autora

Logo para cada membro entre as juntas $n-1$ e n temos a seguinte matriz homogênea:

$$A_{n-1}^n = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\text{sen } \theta_n & 0 & a_n \cos \theta_n \\ \text{sen } \theta_n & \cos \theta_n & 0 & a_n \text{sen } \theta_n \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Utilizando a Equação 2.9, concluímos que a matriz transformação homogênea da base para o efetuador no robô considerado é determinada por:

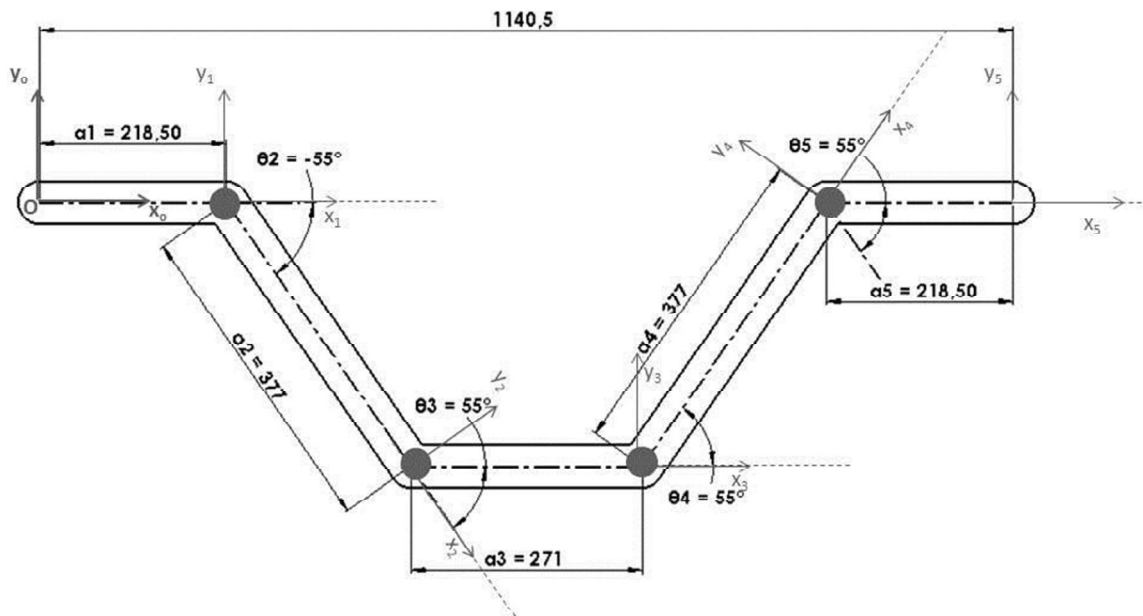
$$A_0^5 = A_0^1 \cdot A_1^2 \cdot A_2^3 \cdot A_3^4 \cdot A_4^5 = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & x_0^5 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & y_0^5 \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} & z_0^5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Onde os elementos desta matriz estão definidos no Apêndice A.

Utilizando-se a matriz da Equação 4.2 é possível prever a posição do efetuador (x_5 , y_5), no caso as roldanas da unidade de tração direita, conhecendo-se os valores dos ângulos (θ_n) e os comprimentos dos membros (a_n). Por exemplo, substituindo-se as dimensões dos links (em mm e de acordo com a Tabela 3.2) e os valores de ângulos, mostrados na Figura 27, na matriz da Equação 4.2 temos numericamente a matriz da Equação 4.3.

$$A_0^5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1140,5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Figura 27 – Configuração de juntas, ângulos e links para validação da matriz homogênea obtida na análise cinemática



Fonte: Autora

Pela matriz da Equação 4.3, as coordenadas da junta 5 (x_5, y_5) são igual a (1140,5; 0), valores que estão de acordo com o medido fisicamente (Figura 27).

De posse da matriz homogênea da base para o efetuador é possível prever qualquer posição e limitações de movimento do *ELIR*. Essa análise é fundamental para a definição do seu espaço de trabalho.

4.3 ANÁLISE CINEMÁTICA INVERSA DO *ELIR*

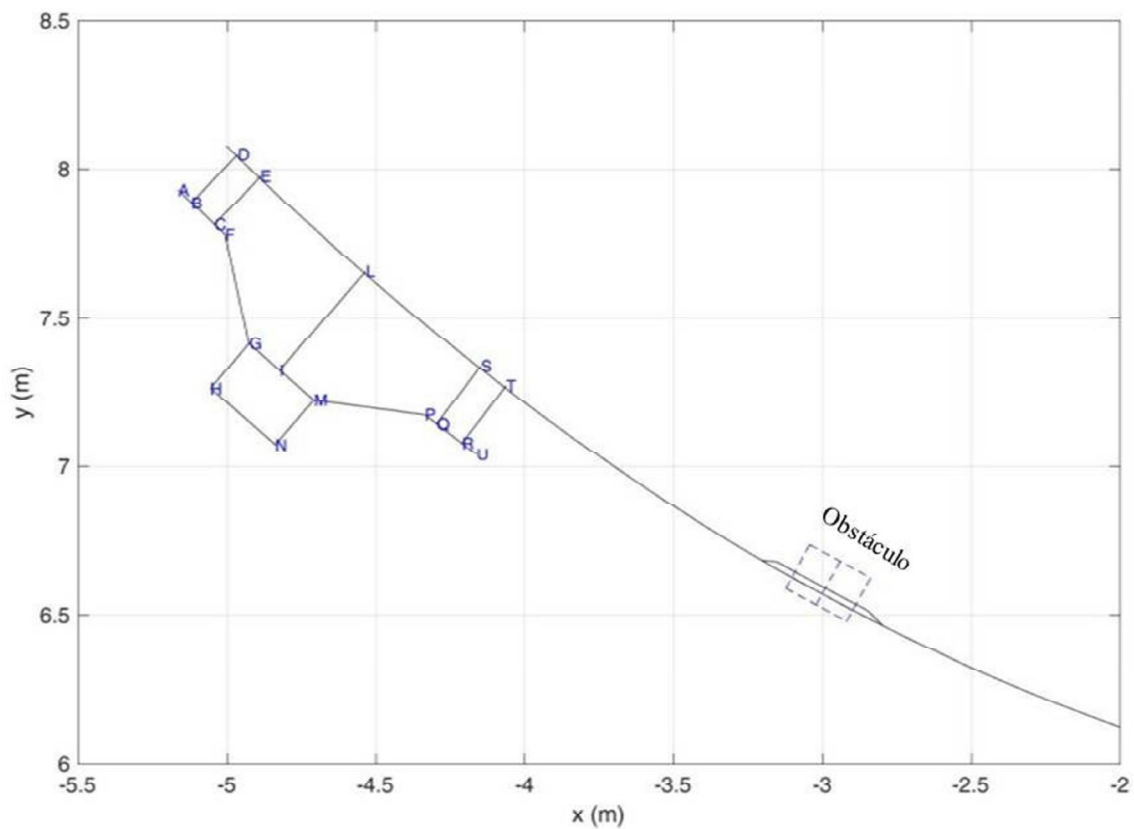
O presente capítulo é dedicado a mostrar os resultados obtidos para a análise de cinemática inversa do *ELIR*, após as três simulações (Tabela 3.3). Para cada simulação teremos os gráficos de: variação dos ângulos ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 e ϕ_4 ; variação da velocidade na direção do eixo x, variação da velocidade na direção do eixo y e variação da velocidade resultante para cada uma das cinco roldanas. Esses resultados poderão ser utilizados como parte

fundamental para o controle e garantia da autonomia do robô em estudos futuros. As denominações de juntas e ângulos estão de acordo com a Figura 18.

4.3.1 Simulação I

Como exposto no capítulo 0, foi utilizada como caminho a catenária contendo como obstáculo um grampo de suspensão (Figura 19 e Figura 20). A Figura 28 apresenta a etapa inicial da primeira simulação, mostrando também a nomenclatura adotada para as juntas.

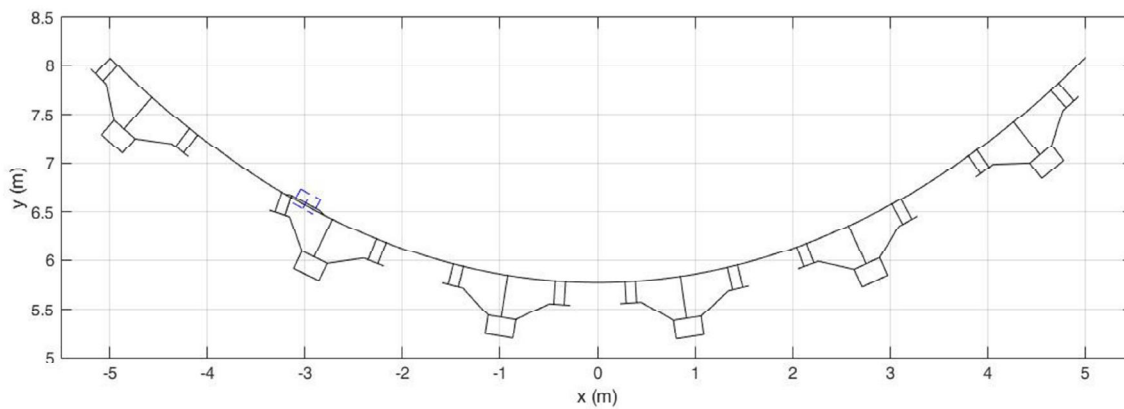
Figura 28 – Etapa inicial da movimentação do *ELIR* na simulação I



Fonte: Autora

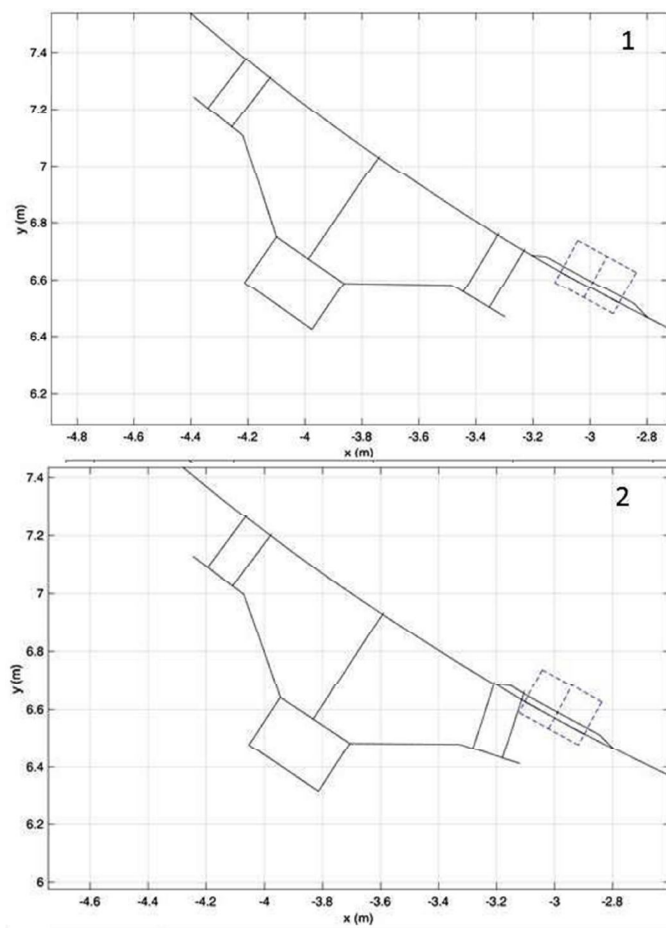
A Figura 29 mostra algumas das etapas de movimentação do *ELIR* durante essa simulação; já as Figura 30 e Figura 32 apresentam em doze etapas a ultrapassagem do grampo de suspensão.

Figura 29 – Etapas de movimentação do *ELIR* durante toda a simulação I



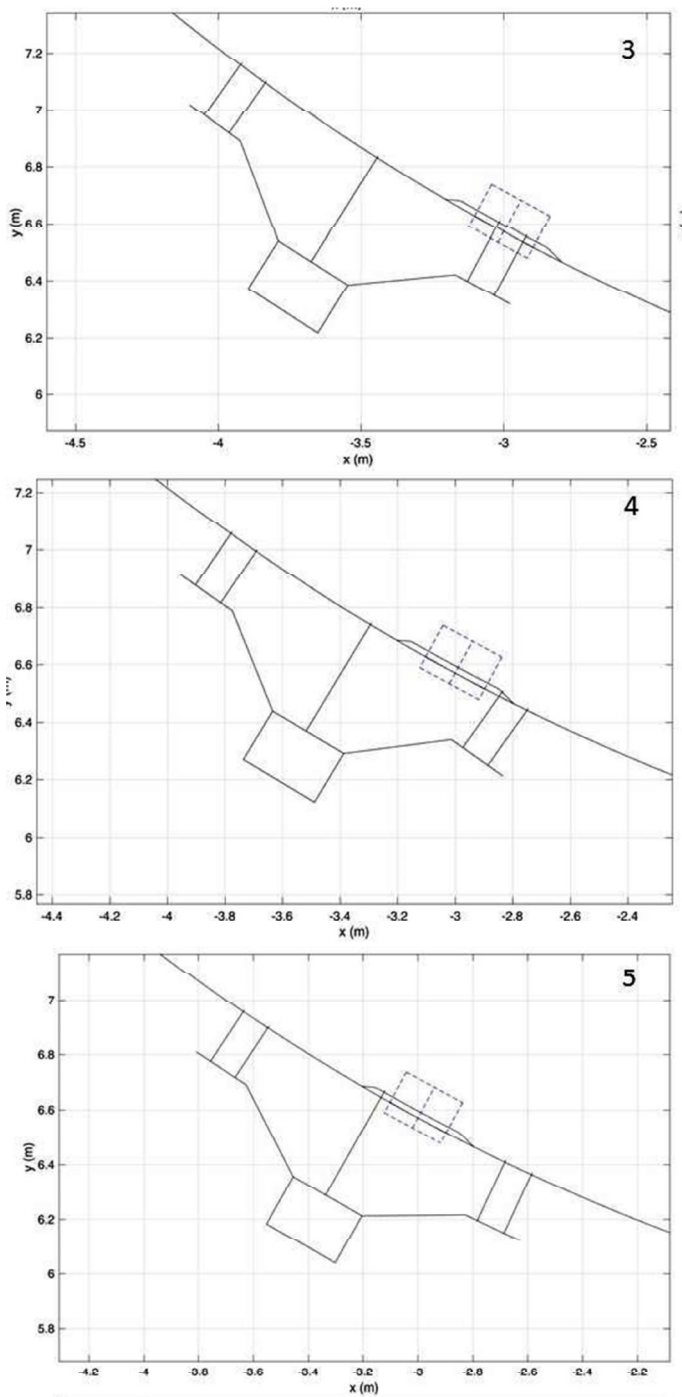
Fonte: Autora

Figura 30 – Etapas de 1 a 2 para ultrapassagem do grupo de suspensão durante a simulação I



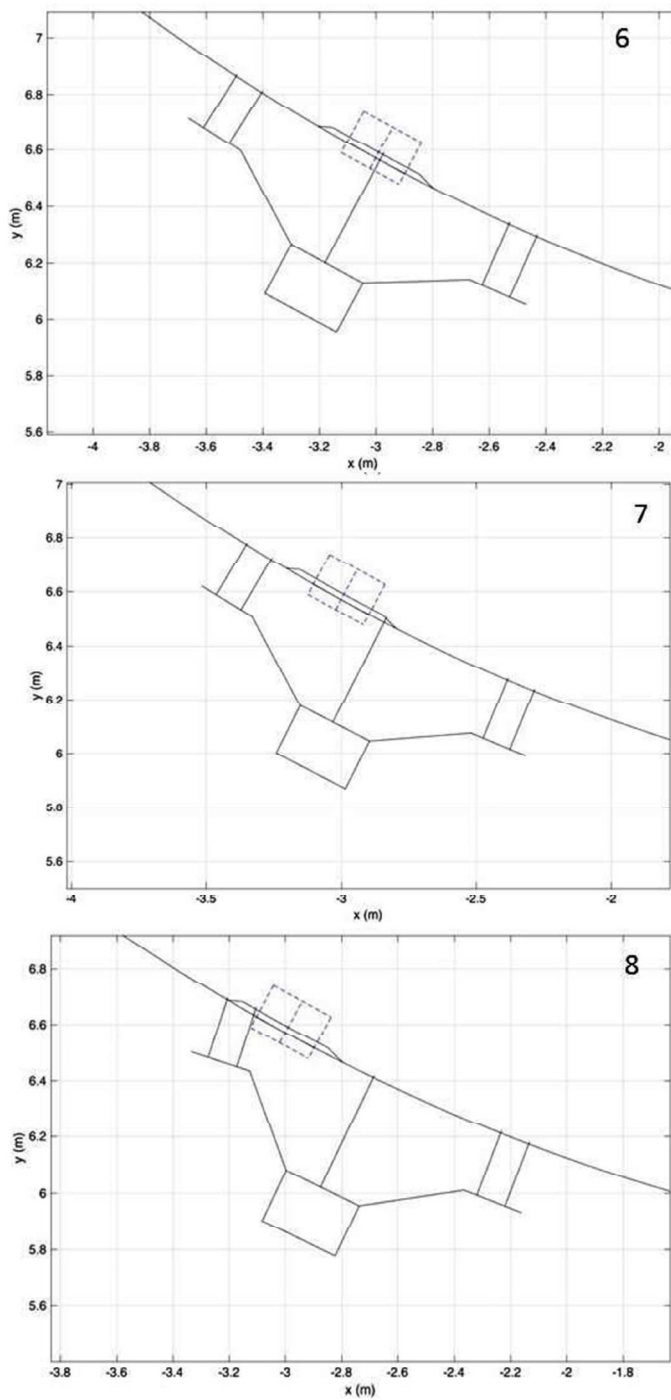
Fonte: Autora

Figura 31 – Etapas de 3 a 5 para ultrapassagem do grupo de suspensão durante a simulação I



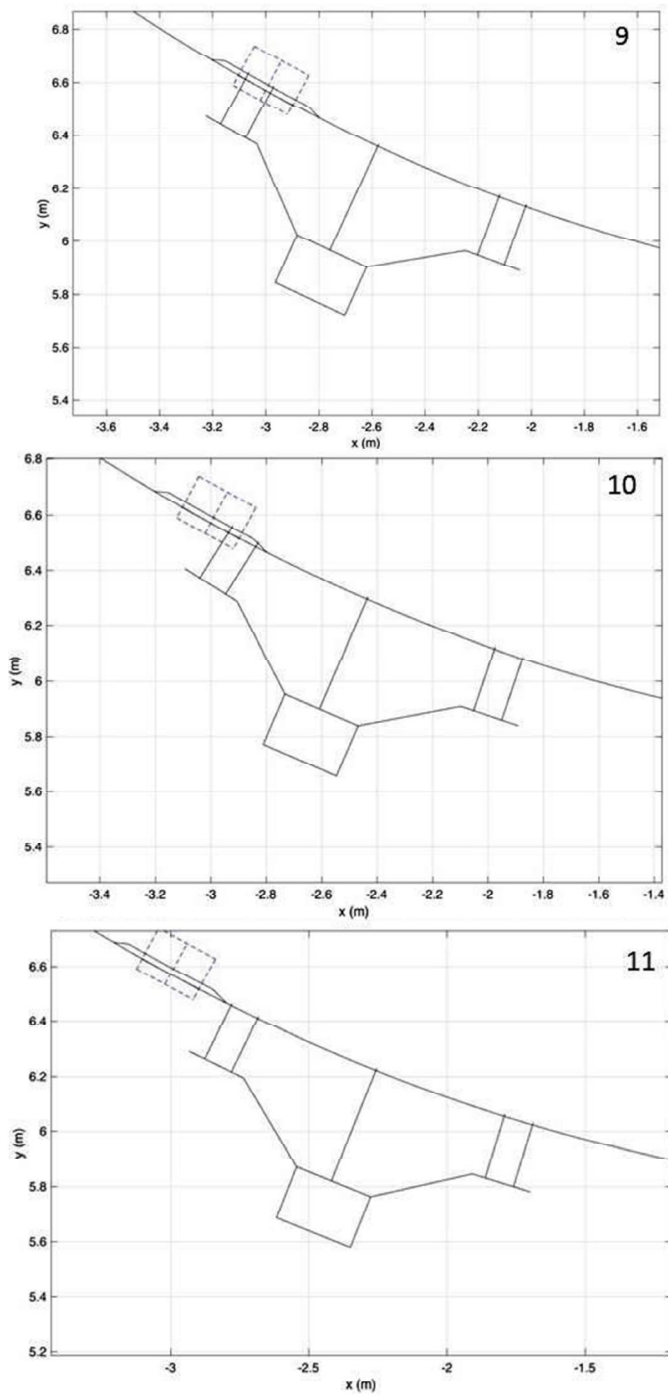
Fonte: Autora

Figura 32 – Etapas de 6 a 8 para ultrapassagem do grampo de suspensão durante a simulação I



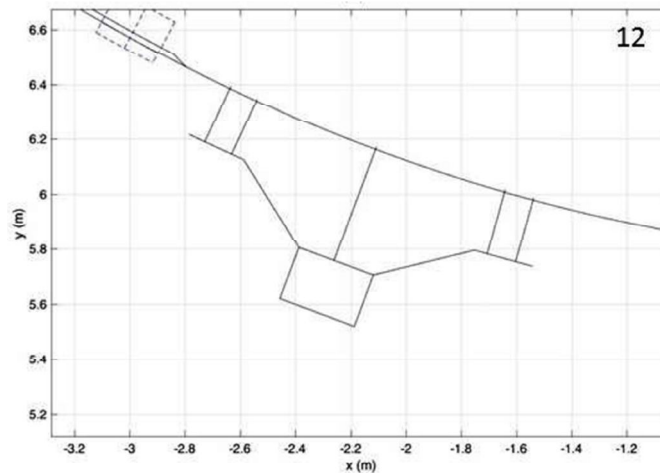
Fonte: Autora

Figura 33 – Etapas de 9 a 11 para ultrapassagem do grampo de suspensão durante a simulação I



Fonte: Autora

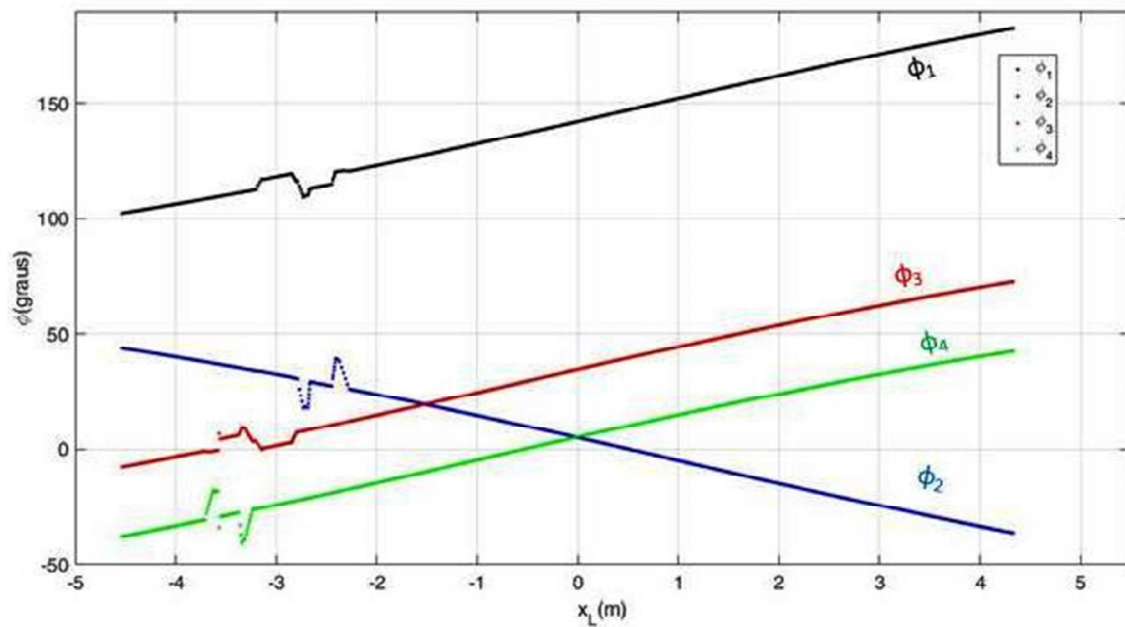
Figura 34 – Etapa 12 para ultrapassagem do grampo de suspensão durante a simulação I



Fonte: Autora

O gráfico da Figura 35 mostra as variações dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) em função da variação de posição x da roldana central (x_L , em metros). Pode-se notar, que para os pontos das curvas entre x_L maior que $-4,0$ m e menor que $-2,0$ m não há linearidade das curvas de variação dos ângulos, pois é neste momento que o *ELIR* está ultrapassando o obstáculo. Assim, é necessária uma mudança mais expressiva de angulação nas suas juntas para que seja possível percorrer o caminho planejado de acordo com o capítulo 0. Os outros gráficos da Figura 36 e Figura 37 são dedicados a mostrar em detalhes a variação destes ângulos durante a transposição do grampo de suspensão, os valores máximos e mínimos assumidos no momento da manobra estão expostos na Tabela 4.3. Para os demais trechos da simulação I, os valores máximos e mínimos dos ângulos de juntas estão compilados na Tabela 4.4.

Figura 35 – Variações dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) em função da variação de posição x da roldana central (x_L , em metros) durante a simulação I



Fonte: Autora

Tabela 4.3 – Valores máximos e mínimos dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) alcançados durante a ultrapassagem do obstáculo na simulação I

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo
ϕ_1	120,8°	109,4°
ϕ_2	39,2°	18,1°
ϕ_3	-1,1°	9,6°
ϕ_4	-17,5°	-40,4°

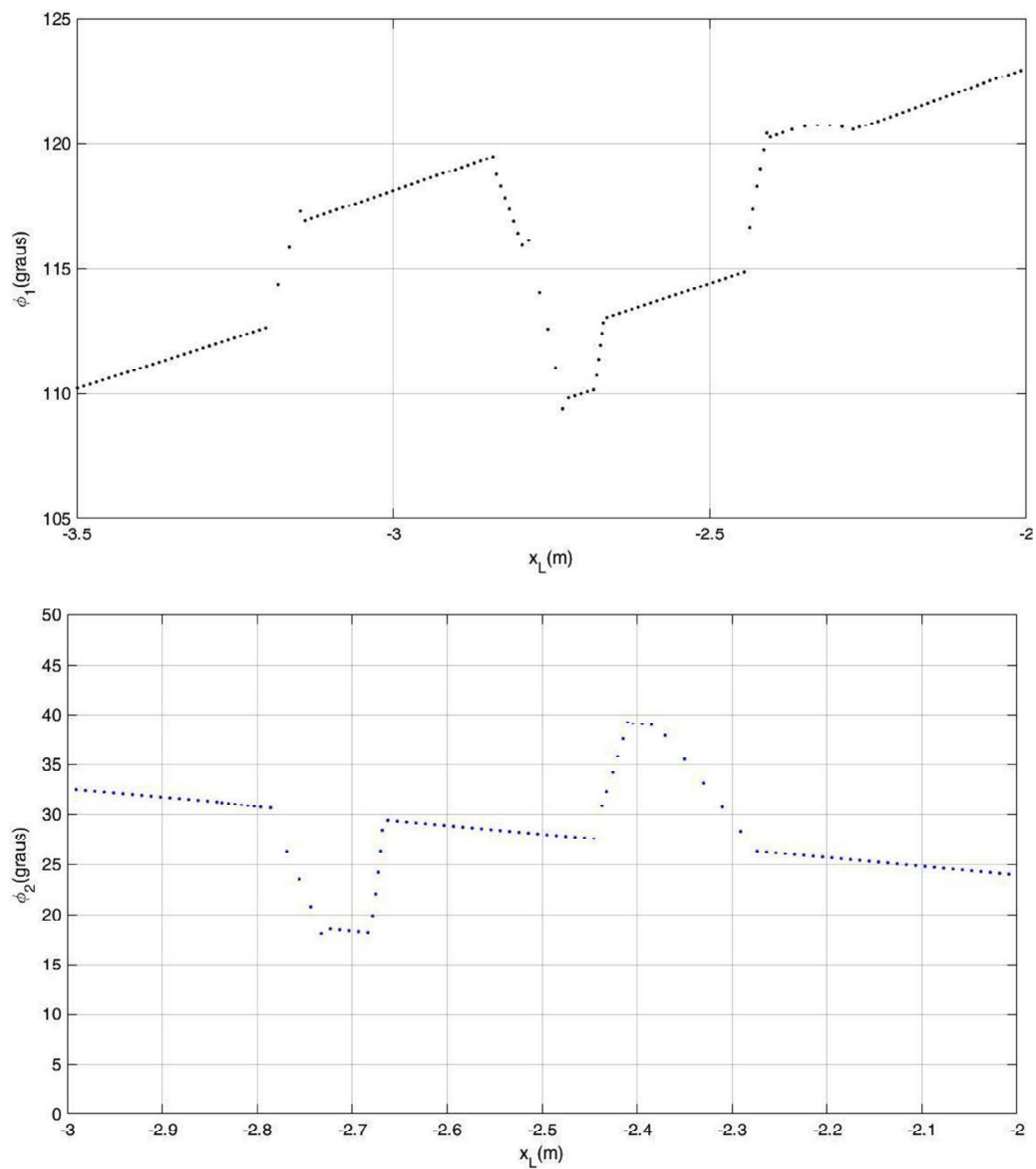
Fonte: Autora

Tabela 4.4 - Valores máximos e mínimos dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) alcançados durante a simulação I

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo
ϕ_1	102,1°	182,7°
ϕ_2	-36,2°	44,0°
ϕ_3	-4,7°	72,9°
ϕ_4	-38,2°	42,6°

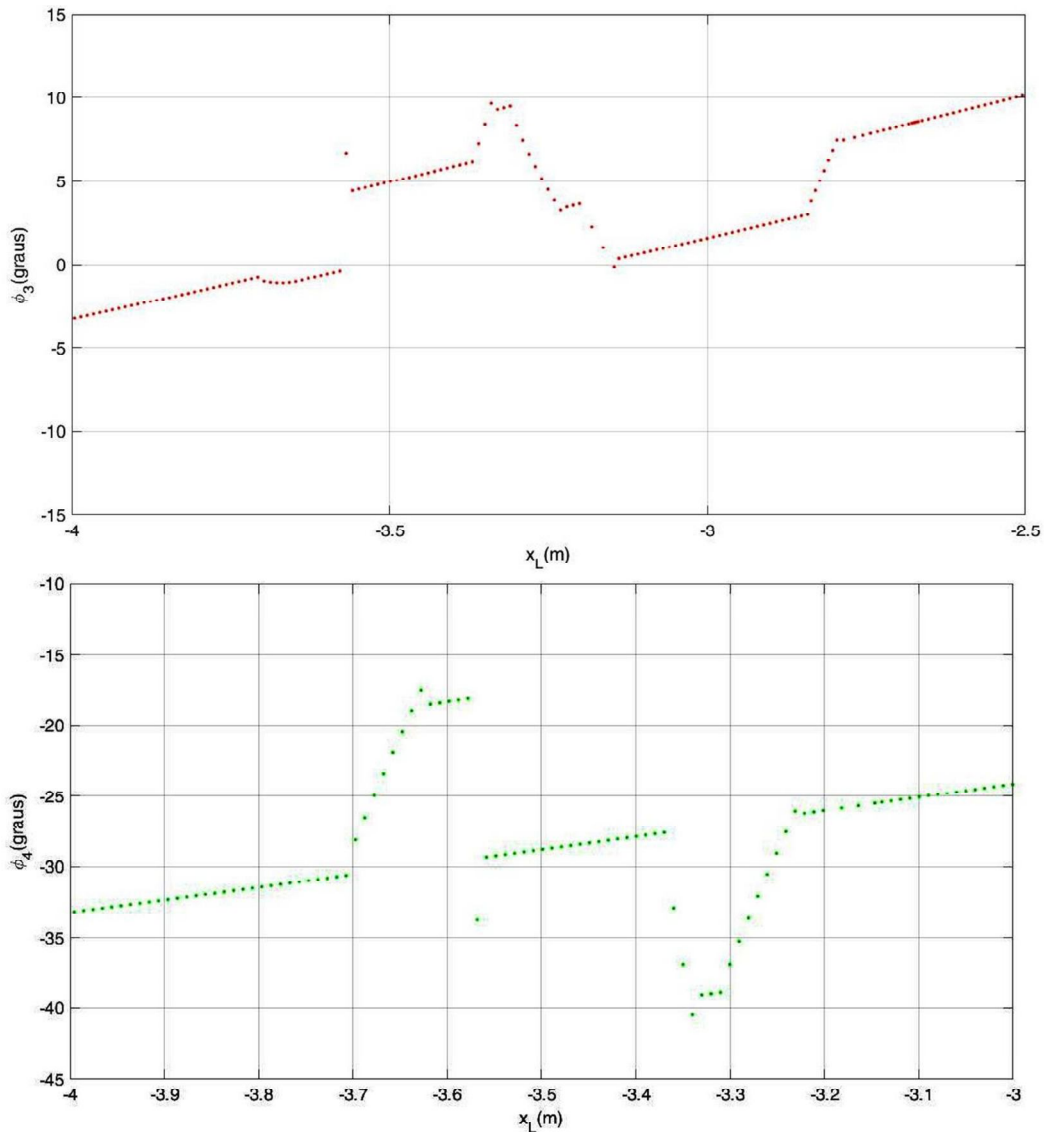
Fonte: Autora

Figura 36 – Detalhe da variação dos dos ângulos ϕ_1 e ϕ_2 , durante ultrapassagem do grampo de suspensão na simulação I



Fonte: Autora

Figura 37 –Detalhe da variação dos dos ângulos ϕ_3 e ϕ_4 , respectivamente, durante ultrapassagem do grupo de suspensão na simulação I



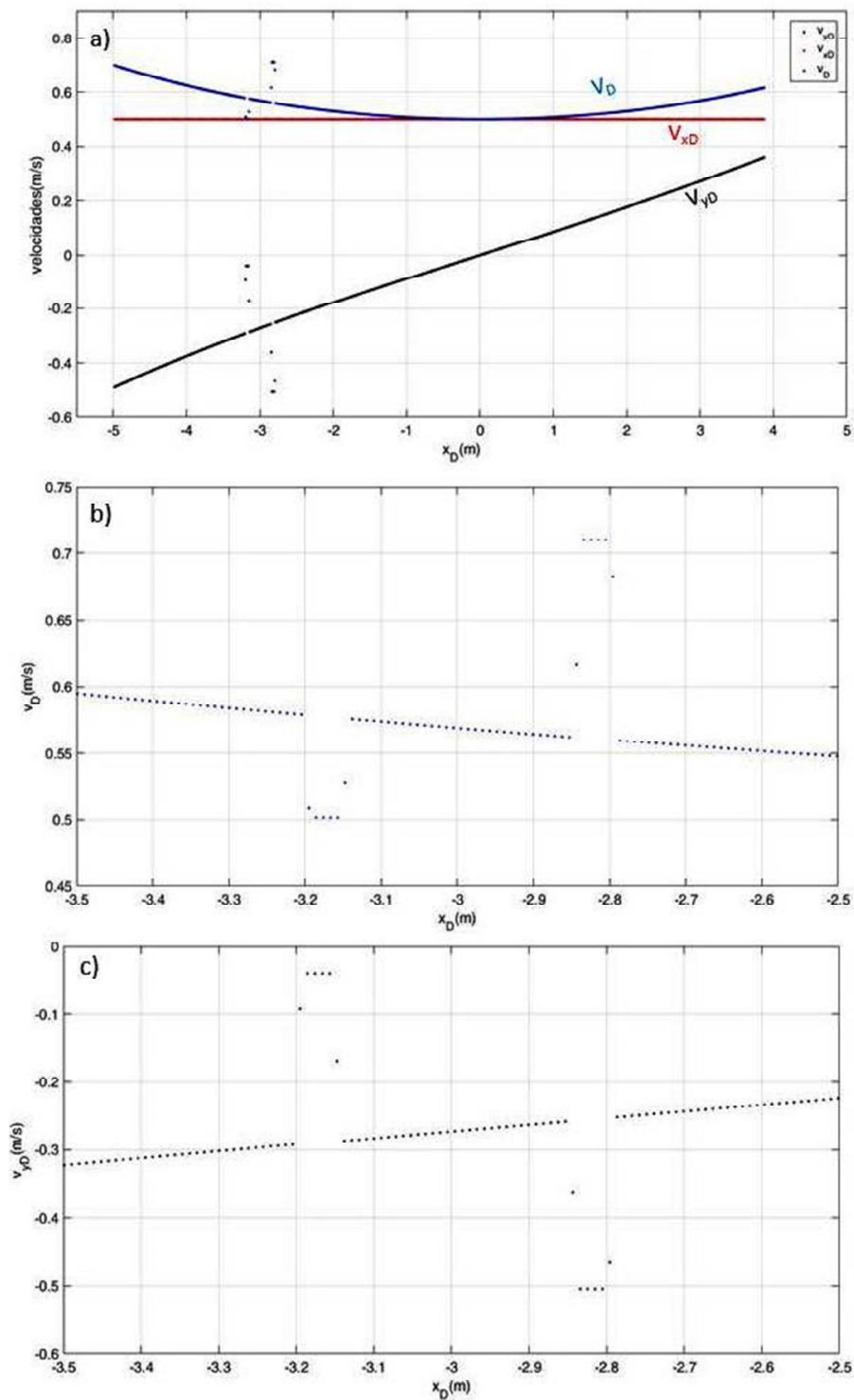
Fonte: Autora

As variações das velocidades (na direção do eixo x, do eixo y e a resultante) de cada uma das cinco roldanas em função da sua posição em relação ao eixo x durante a inspeção da catenária definida como percurso para a primeira simulação estão apresentadas nos primeiros gráficos (a) da Figura 38 a Figura 42. Os outros dois gráficos (b e c) de cada figura mostram em detalhes a velocidade resultante (v) e a na direção do eixo y (v_y), respectivamente, durante a transposição do obstáculo. Percebe-se que em todos os gráficos,

a velocidade na direção do eixo x (v_x) é constante e igual a 0,50 m/s (como definido no capítulo 3.4.2). Já a v_y , para todos os casos, assume um valor nulo quando a roldana analisada encontra-se no ponto mais baixo da catenária ($x=0$). As velocidades resultantes, por suas vezes, iniciam com um valor positivo que diminui até 0,50 m/s (quando v_y é nula) e aumenta posteriormente.

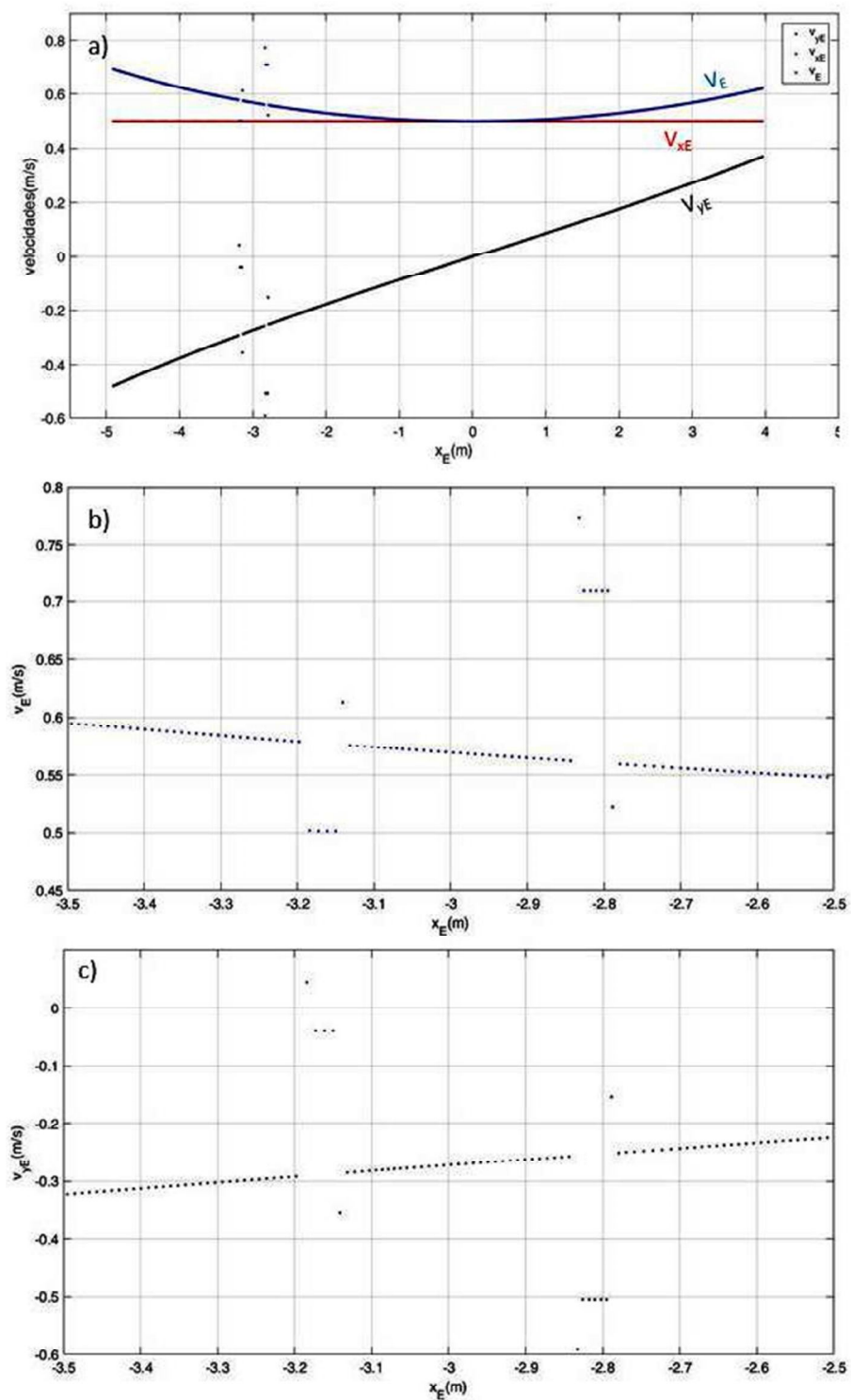
A Tabela 4.5 compila os valores máximos e mínimos da velocidade v_y e os valores iniciais e finais das velocidades v (em m/s) para as cinco roldanas (D, E, L, S e T) alcançadas durante a simulação I. Já a Tabela 4.6 mostra os valores máximos e mínimos da velocidade v_y e v durante a ultrapassagem do obstáculo nesta simulação.

Figura 38–a) Velocidade na direção do eixo x (v_{xD}), do eixo y (v_{yD}) e a resultante (v_D) da roldana D em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação I b) e c) Detalhe de v_D e v_{yD} , respectivamente, durante a ultrapassagem do grampo de suspensão na simulação I



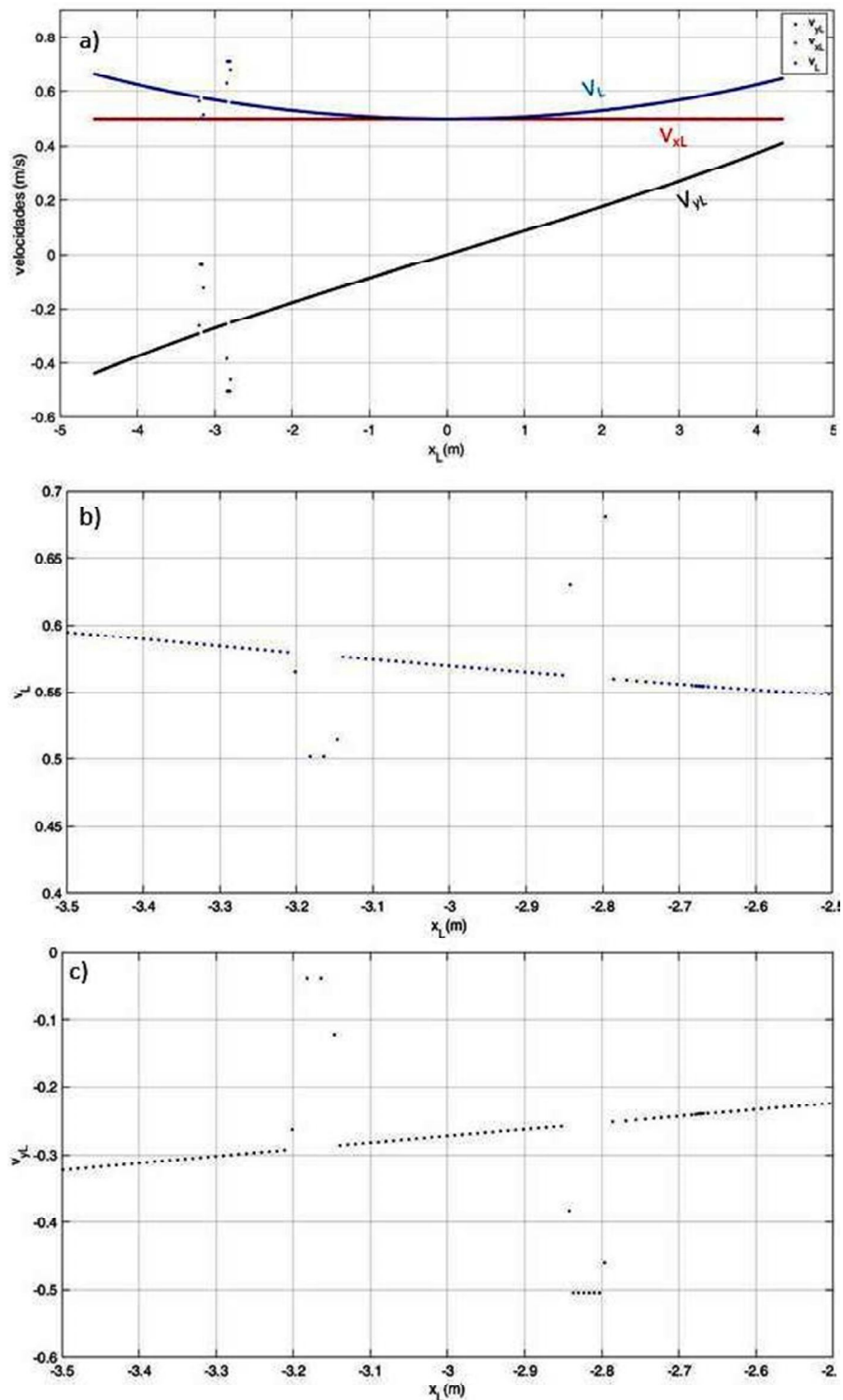
Fonte: Autora

Figura 39–a) Velocidade na direção do eixo x (v_{xE}), do eixo y (v_{yE}) e a resultante (v_E) da roldana E em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação I b) e c) Detalhe de v_E respectivamente, durante a ultrapassagem do grampo de suspensão na simulação I



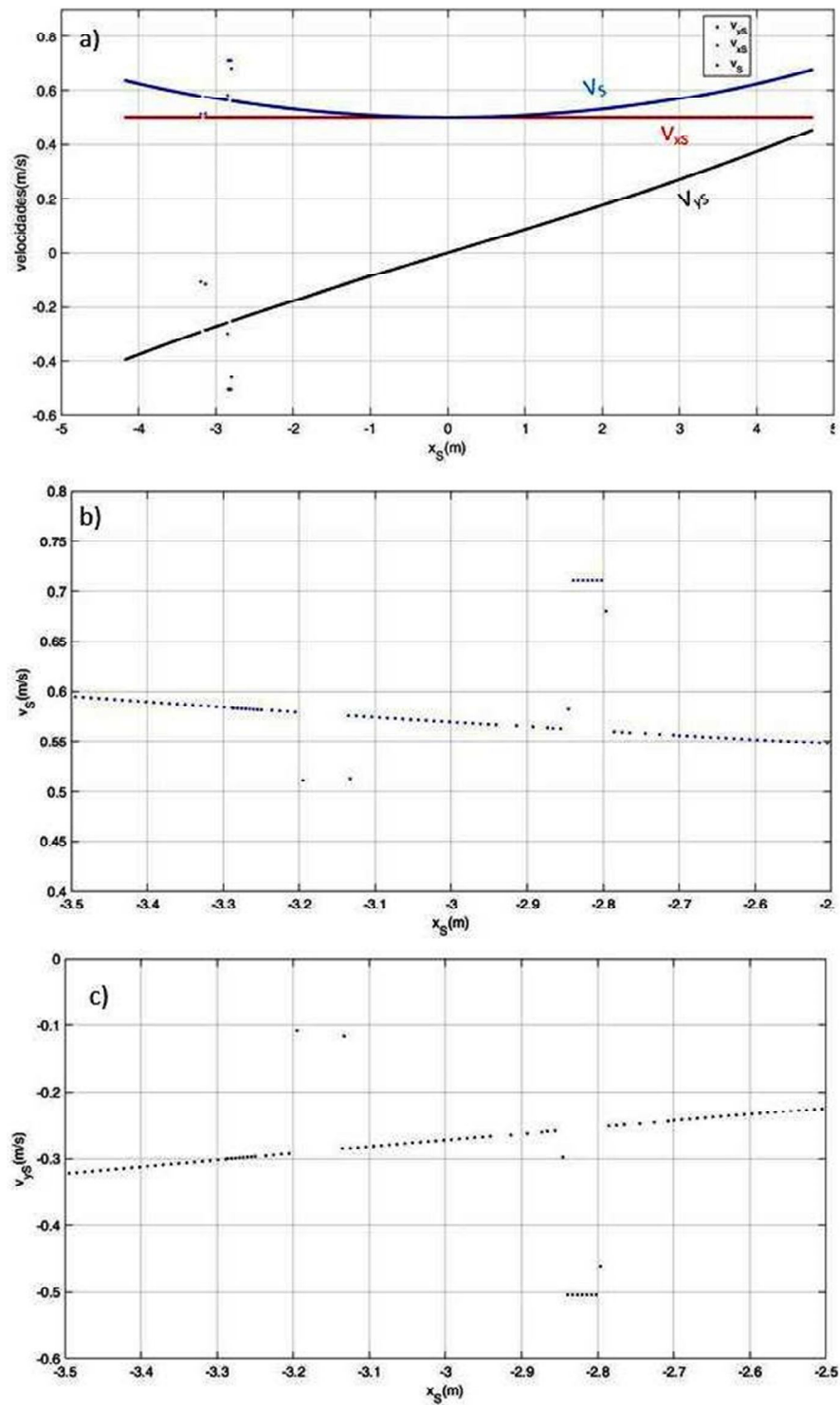
Fonte: Autora

Figura 40–a) Velocidade na direção do eixo x (v_{xL}), do eixo y (v_{yL}) e a resultante (v_L) da roldana L em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação I b) e c) Detalhe de v_L e v_{yL} , respectivamente, durante a ultrapassagem do grampo de suspensão na simulação I



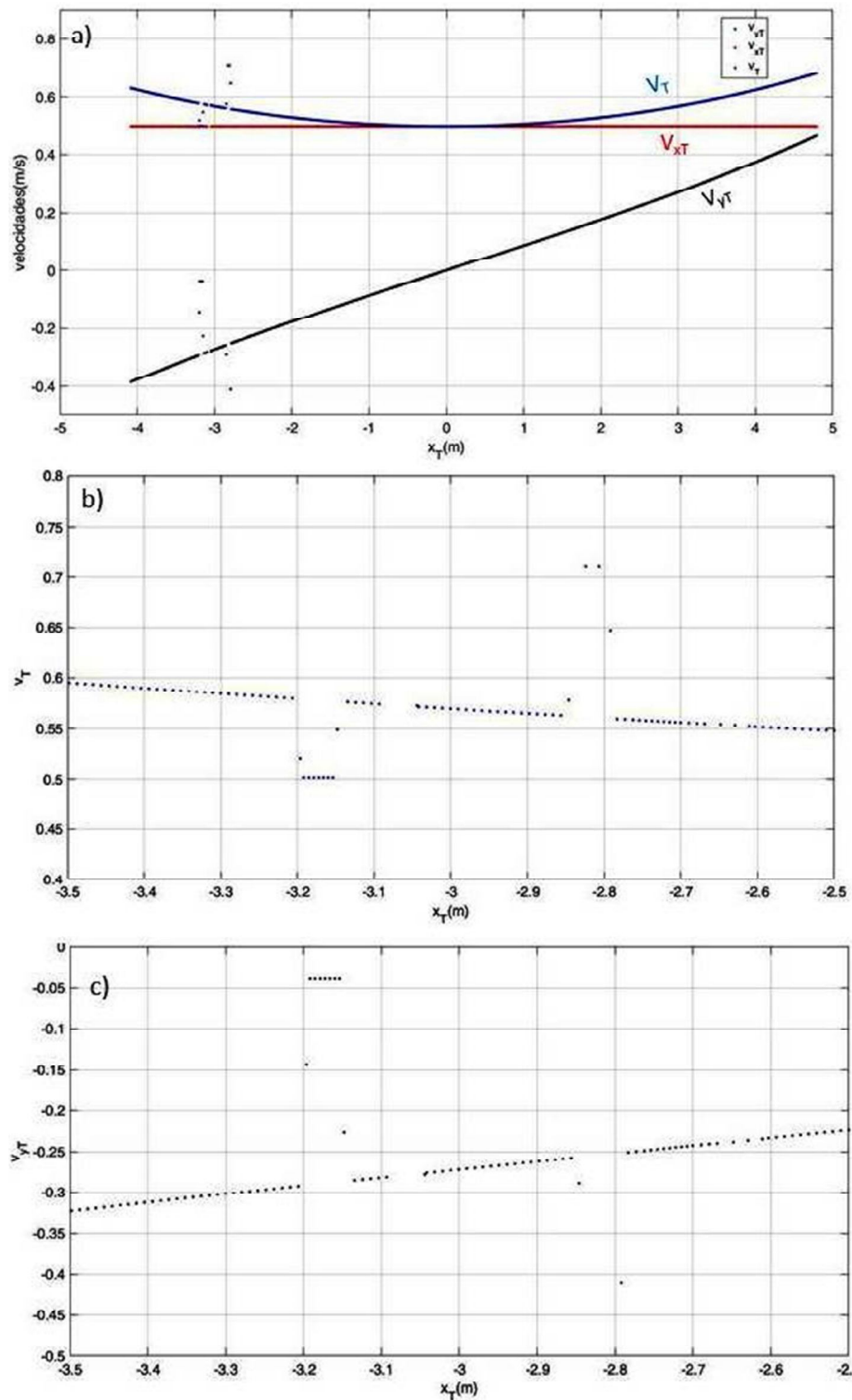
Fonte: Autora

Figura 41–a) Velocidade na direção do eixo x (v_{xS}), do eixo y (v_{yS}) e a resultante (v_S) da roldana S em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação I b) e c) Detalhe de v_S e v_{yS} , respectivamente, durante a ultrapassagem do grampo de suspensão na simulação I



Fonte: Autora

Figura 42–a) Velocidade na direção do eixo x (v_{xT}), do eixo y (v_{yT}) e a resultante (v_T) da roldana T em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação I b) e c) Detalhe de v_T e v_{yT} , respectivamente, durante a ultrapassagem do grampo de suspensão na simulação I



Fonte: Autora

Tabela 4.5 – Valores máximos e mínimos da velocidade v_y e valores iniciais e finais da velocidade v (em m/s) para as cinco roldanas (D, E, L, S e T) alcançados durante a simulação I.

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo
v_{yD}	-0,49	0,36
v_{yE}	-0,48	0,37
v_{yL}	-0,44	0,41
v_{yS}	-0,39	0,45
v_{yT}	-0,38	0,46
Parâmetro	Valor inicial (m/s)	Valor final (m/s)
v_D	0,70	0,62
v_E	0,69	0,62
v_L	0,67	0,65
v_S	0,64	0,68
v_T	0,63	0,68

Fonte: Autora

Tabela 4.6 – Valores máximos e mínimos das velocidades v_y e v (em m/s) para as cinco roldanas (D, E, L, S e T) alcançados durante ultrapassagem do obstáculo na simulação I

Parâmetro	Valor mínimo (m/s)	Valor máximo (m/s)
v_{yD}	-0,51	-0,04
v_D	0,50	0,71
v_{yE}	-0,59	0,04
v_E	0,50	0,77
v_{yL}	-0,50	-0,04
v_L	0,50	0,71
v_{yS}	-0,50	-0,12
v_S	0,50	0,71
v_{yT}	-0,50	-0,04
v_T	0,50	0,71

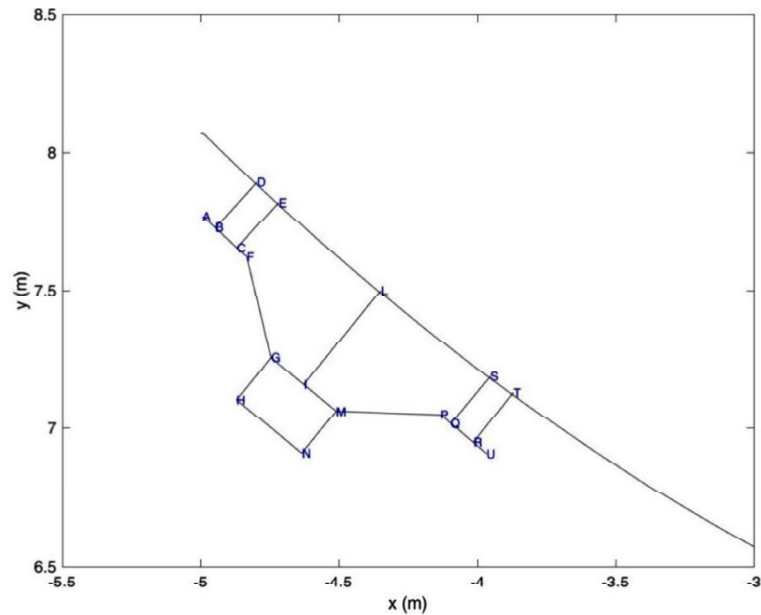
Fonte: Autora

4.3.2 Simulação II

De acordo com o capítulo 0 para a segunda simulação utilizou-se como caminho uma catenária sem obstáculos definida pela Equação 3.41. A Figura 43 mostra a etapa inicial da

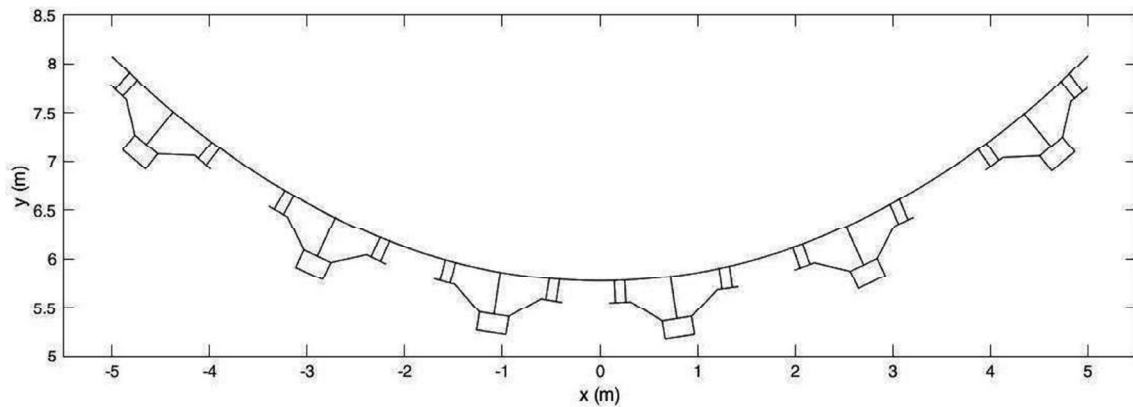
movimentação do *ELIR*, com a denominação adotada para cada ponto. Já a Figura 44 apresenta alguns dos passos seguidos pelo robô durante toda essa simulação.

Figura 43 – Etapa inicial da movimentação do *ELIR* na simulação II



Fonte: Autora

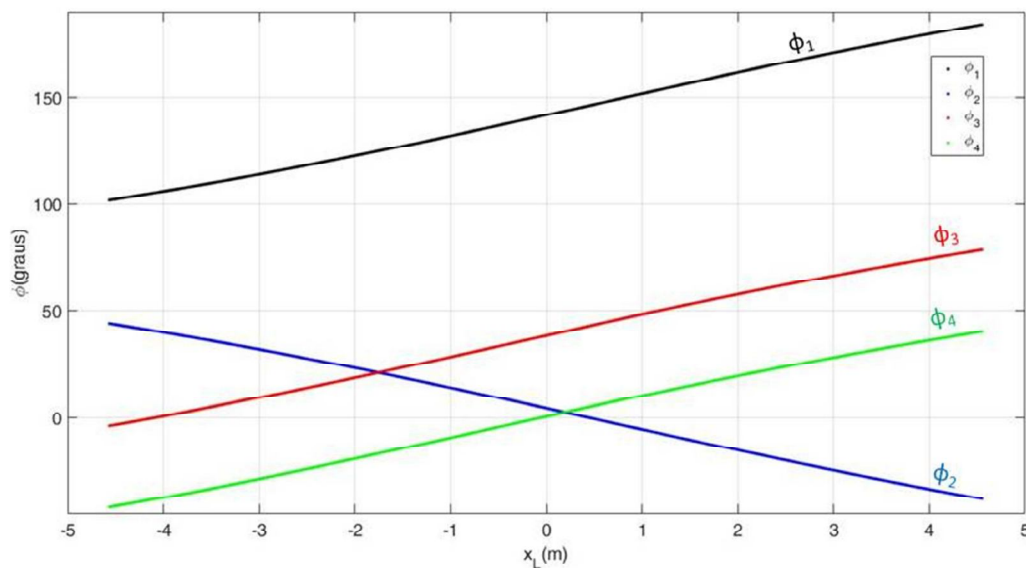
Figura 44 – Etapas de movimentação do *ELIR* durante toda a simulação II



Fonte: Autora

A seguir serão apresentados os resultados de variação de ângulos e velocidades das roldanas, obtidos após esta simulação.

Figura 45 – Variações dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) em função da variação de posição x da roldana central (x_L , em metros) durante a simulação II



Fonte: Autora

O gráfico da Figura 45 mostra as variações dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) em função da variação de posição x da roldana central (x_L , em metros). Já a Tabela 4.7 reúne os valores máximos e mínimos dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) alcançando durante a simulação II. Como pode ser observado, os ângulos ϕ_1 , ϕ_3 e ϕ_4 aumentam linearmente durante esta simulação enquanto o ϕ_2 diminui.

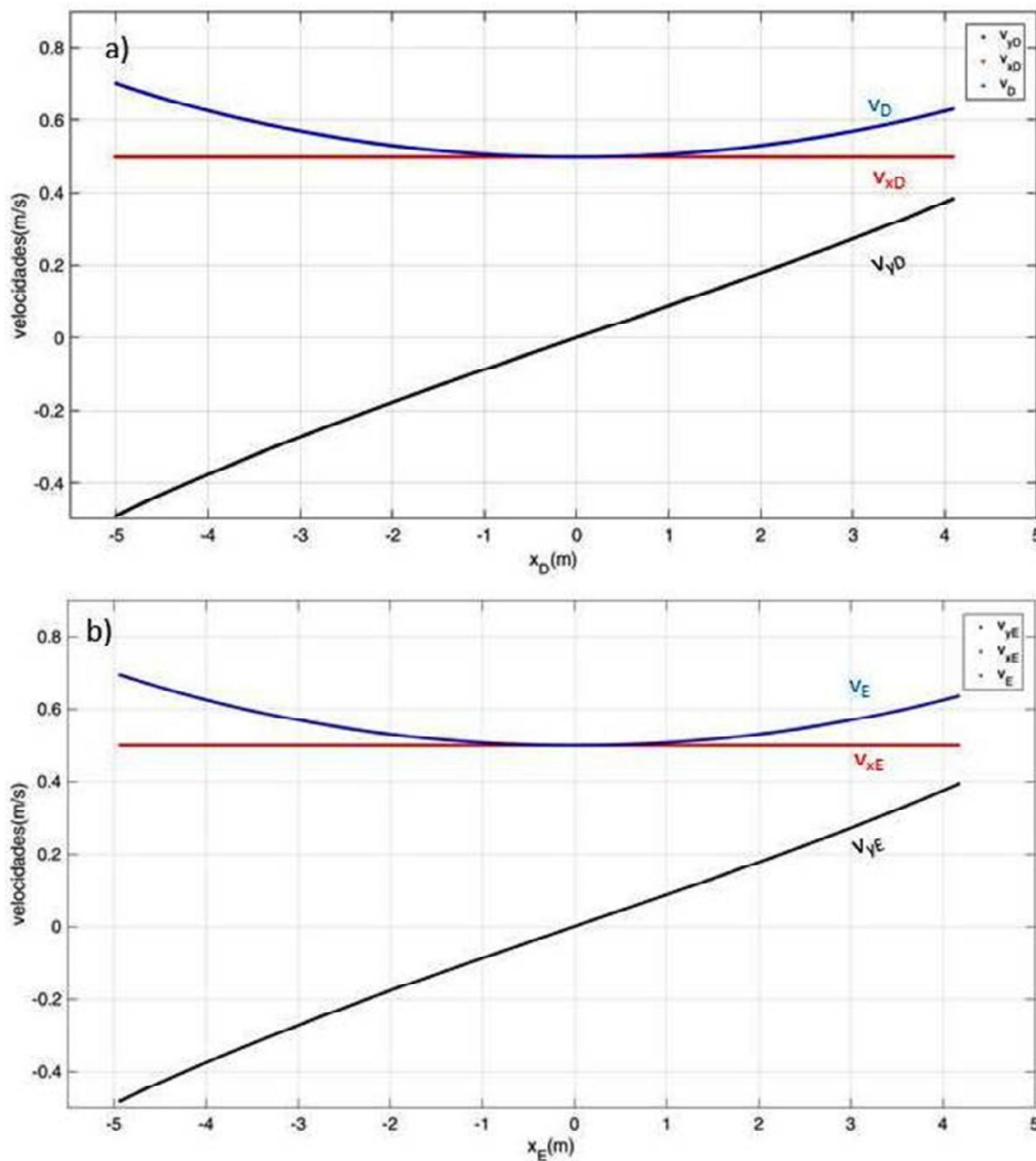
Tabela 4.7 – Valores máximos e mínimos dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) alcançados durante a simulação II

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo
ϕ_1	101,9°	184,2°
ϕ_2	-37,8°	44,2°
ϕ_3	-3,8°	78,5°
ϕ_4	-41,8°	40,6°

Fonte: Autora

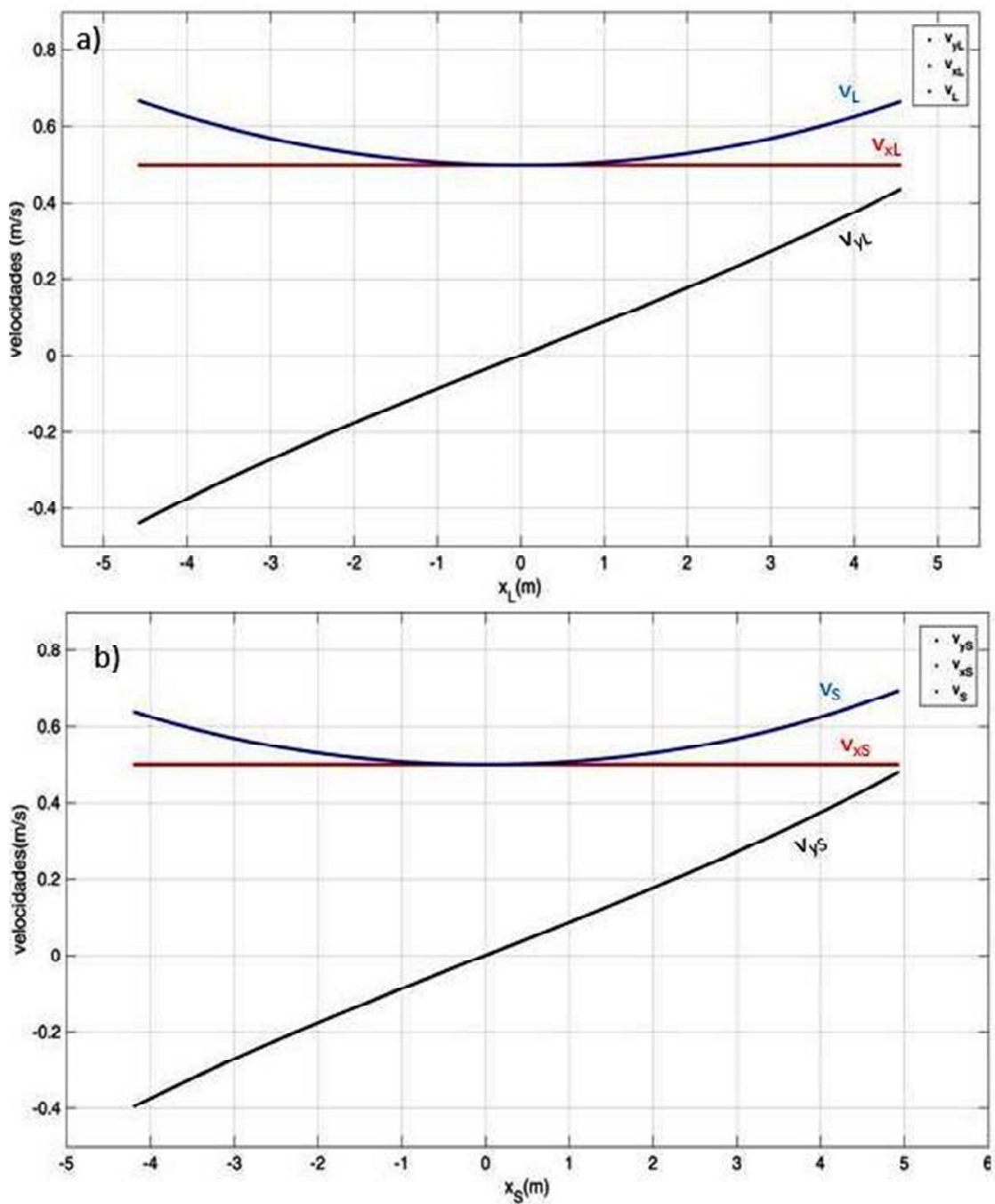
Os gráficos da variação das velocidades (na direção do eixo x , do eixo y e a resultante) de cada uma das cinco roldanas em função da sua posição em relação ao eixo x durante a inspeção da catenária definida como percurso para a segunda simulação estão apresentados da Figura 46 a Figura 48.

Figura 46– **a)** Velocidade na direção do eixo x (v_{xD}), do eixo y (v_{yD}) e a resultante(v_D) da roldana D em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação **II****b)** Velocidade na direção do eixo x (v_{xE}), do eixo y (v_{yE}) e a resultante(v_E) da roldana E em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação II



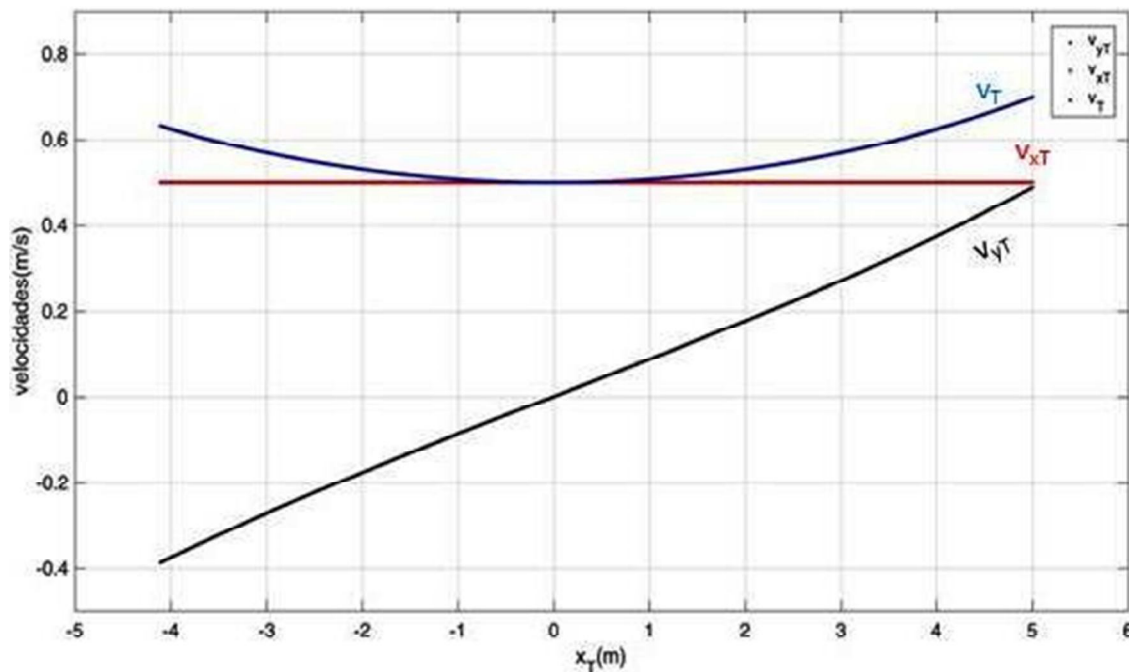
Fonte: Autora

Figura 47– **a)** Velocidade na direção do eixo x (v_{xL}), do eixo y (v_{yL}) e a resultante(v_L) da roldana L em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação II **b)** Velocidade na direção do eixo x (v_{xS}), do eixo y (v_{yS}) e a resultante(v_S) da roldana S em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação II



Fonte: Autora

Figura 48– Velocidade na direção do eixo x (v_{xT}), do eixo y (v_{yT}) e a resultante (v_T) da roldana T em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas durante a simulação II



Fonte: Autora

Percebe-se que em todos os gráficos da Figura 46 a Figura 48, a velocidade na direção do eixo x (v_x) é constante e igual a 0,50 m/s (como definido no capítulo 3.4.2). Já a v_y , para todos os casos, assume um valor nulo quando a roldana analisada encontra-se no ponto mais baixo da catenária ($x=0$). As velocidades resultantes, por suas vezes, iniciam com um valor positivo que diminui até 0,50 m/s (quando v_y é nula) e aumenta posteriormente.

A Tabela 4.8 compila os valores máximos e mínimos da velocidade v_y e os valores iniciais e finais das velocidades v (em m/s) para as cinco roldanas (D, E, L, S e T) alcançadas durante a simulação II.

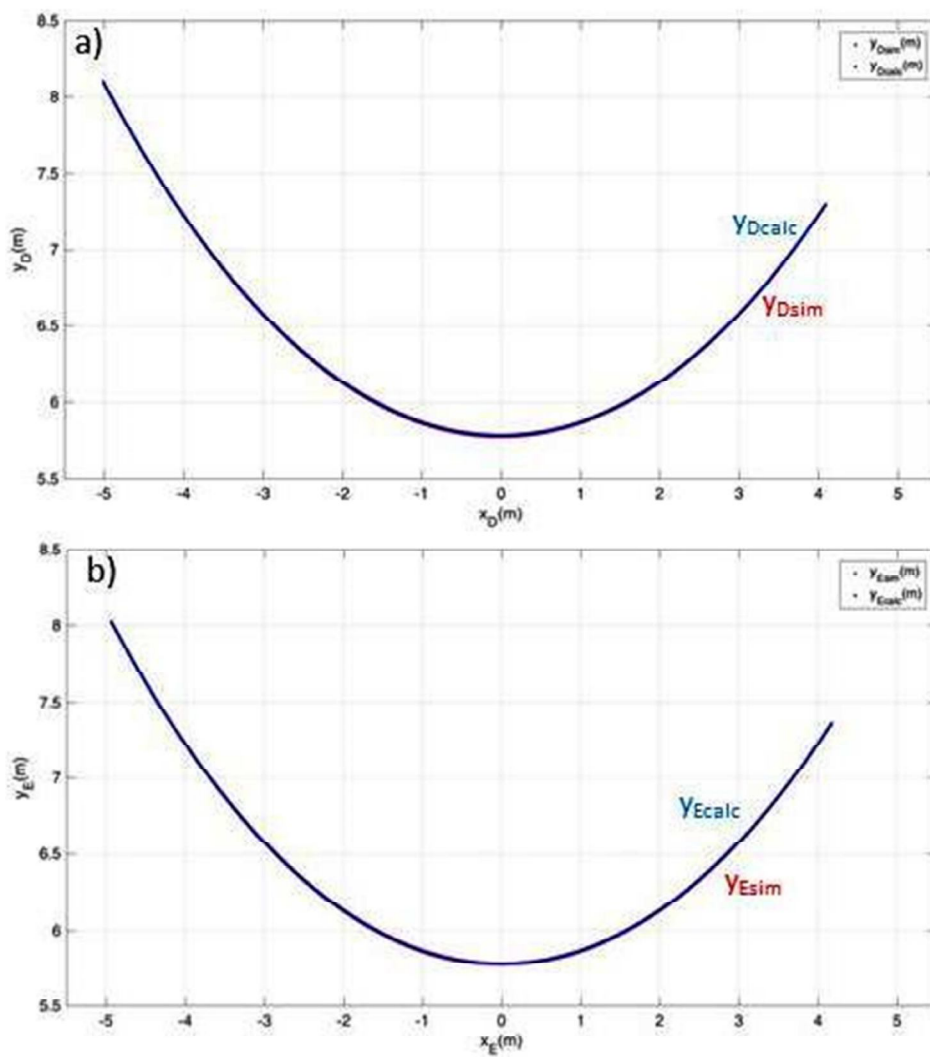
Tabela 4.8 – Valores máximos e mínimos da velocidade v_y e valores iniciais e finais da velocidade v (em m/s) para as cinco roldanas (D, E, L, S e T) alcançados durante a simulação II.

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo
v_{yD}	-0,49	0,38
v_{yE}	-0,48	0,39
v_{yL}	-0,44	0,44
v_{yS}	-0,40	0,48
v_{yT}	-0,39	0,49
Parâmetro	Valor inicial (m/s)	Valor final (m/s)
v_D	0,70	0,63
v_E	0,69	0,64
v_L	0,67	0,66
v_S	0,64	0,69
v_T	0,63	0,70

Fonte: Autora

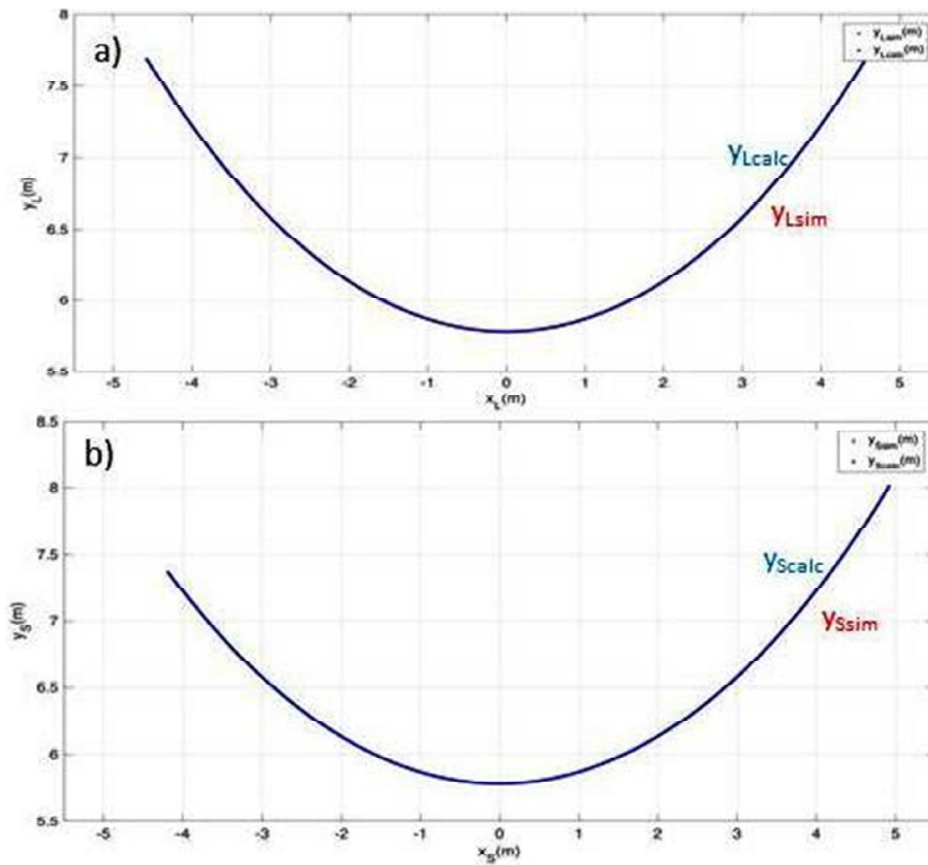
Na segunda simulação, como dito no capítulo 0, as quatro roldanas D, E, L e S tiveram seus valores de ordenadas (y_D , y_E , y_L e y_S) calculados por relação com o conjunto de retas R1 (Equação 3.42) definido pela aproximação da catenária de acordo com o caminho já percorrido pela roldana T, primeira em contato com a linha. Desta maneira, os gráficos da Figura 49 e Figura 50 comparam os valores de ordenadas (y_{Dsim} , y_{Esim} , y_{Lsim} e y_{Ssim}) encontrados durante esta simulação e os valores calculados segundo a equação da catenária definida pela Equação 3.41, valor de referência, (y_{Dcalc} , y_{Ecalc} , y_{Lcalc} e y_{Scalc}); já as Figura 51 e Figura 52 mostram os erros relativos encontrados para cada caso, Equação 3.56.

Figura 49 – **a)** Comparação entre os valores de ordenadas (y_{Dsim}) encontrados durante a simulação II e os valores calculados (y_{Dcalc}) da roldana D em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas (x_D) **b)** Comparação entre y_{Esim} e y_{Ecalc} da roldana E em função de x_E



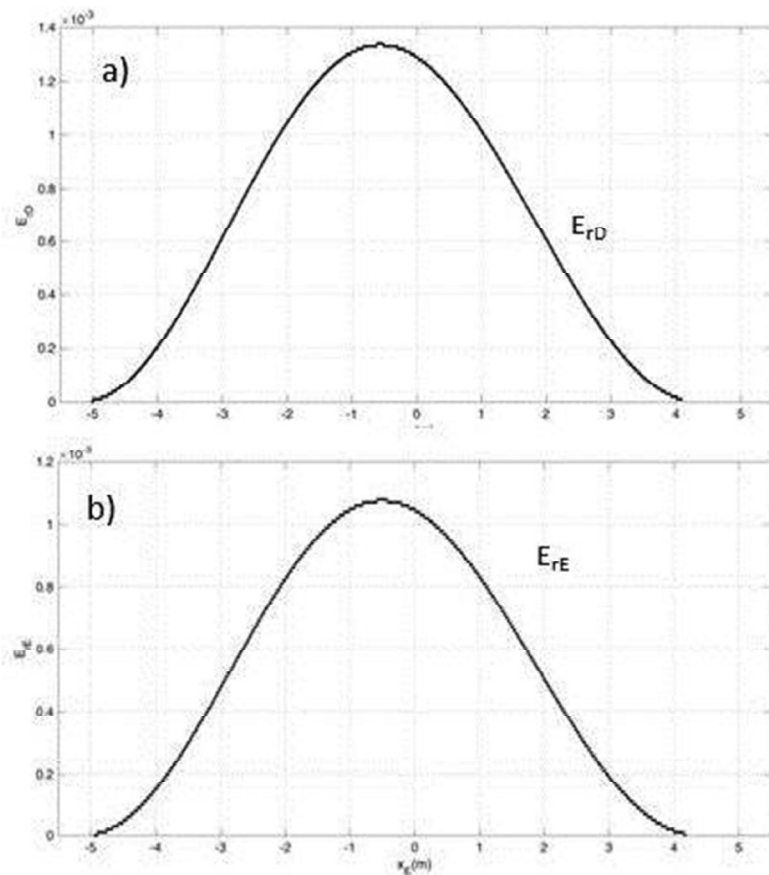
Fonte: Autora

Figura 50 – **a)** Comparação entre os valores de ordenadas (y_{Lsim}) encontrados durante a simulação e os valores calculados y_{Lcalc} da roldana L em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas (x_L) **b)** Comparação entre y_{Ssim} e y_{Scalc} da roldana S em função de x_S



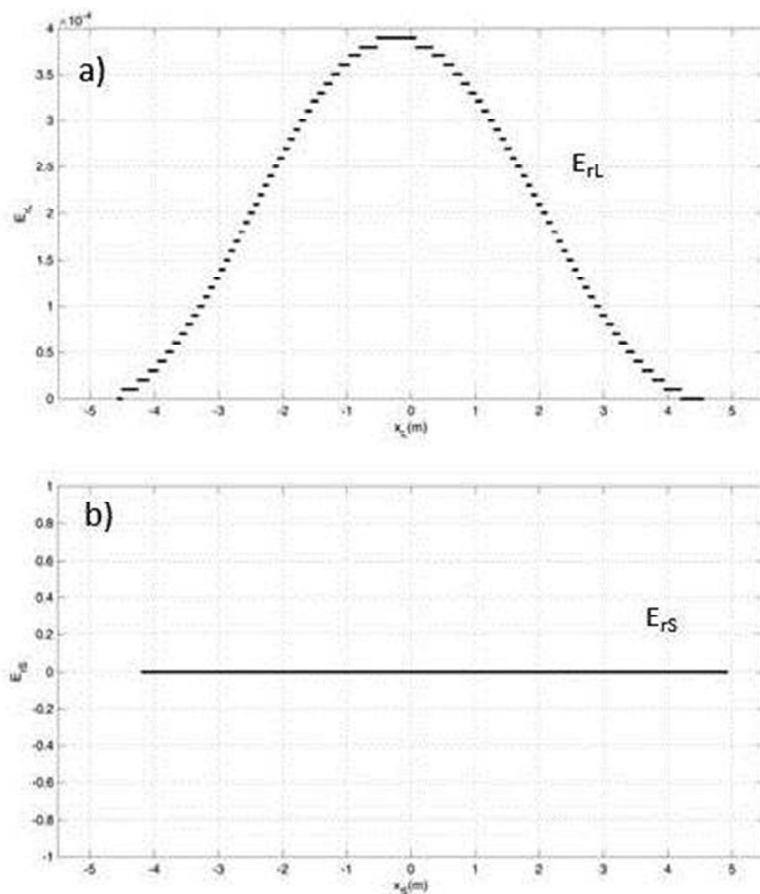
Fonte: Autora

Figura 51 – **a)** Erro relativo (E_{rD}) entre os valores de ordenadas (y_{Dsim}) encontrados durante a simulação II e os valores calculados (y_{Dcalc}) da roldana D em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas (x_D)



Fonte: Autora

Figura 52 – **a)** Erro relativo (E_{rL}) entre y_{Lsim} e y_{Lcalc} da roldana L em função (x_L) **b)** Erro relativo (E_{rS}) entre y_{Ssim} e y_{Scalc} da roldana S em função (x_S)



Fonte: Autora

Na Tabela 4.9 constam os erros máximos relativos (E_r) encontrados entre os valores de ordenadas simulados (y_{sim}) e os calculados (y_{calc}) para as roldanas D, E, L e S e o seu intervalo de ocorrência (entre as abscissas x' e x'') para a Simulação II.

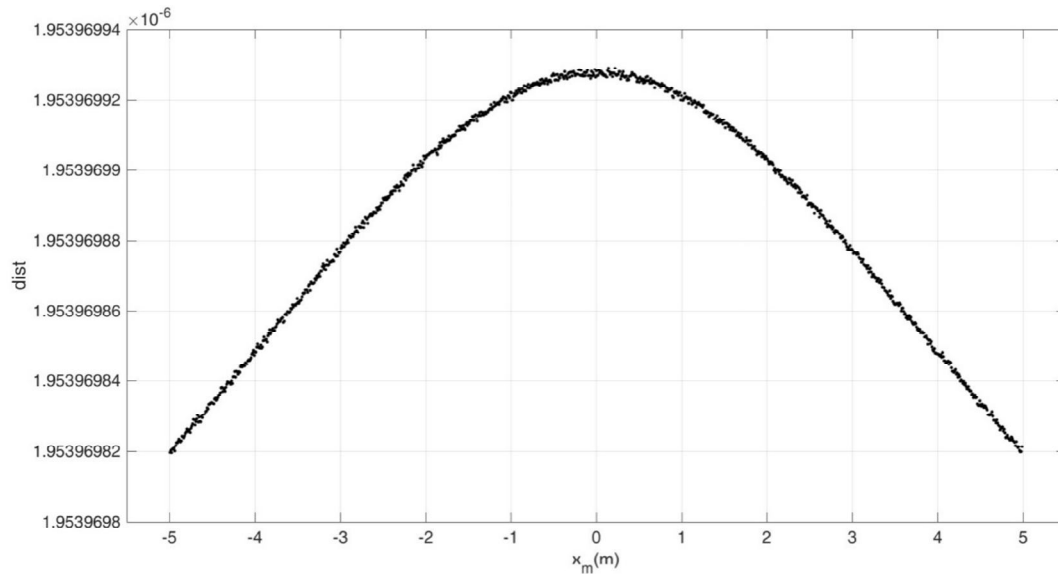
Tabela 4.9 – Erros máximos relativos encontrados entre os valores de ordenadas simulados e os calculados para as roldanas D, E, L e S e o intervalo de ocorrência (entre x' e x'') durante a segunda simulação.

Parâmetro	Valor máximo	x' (m)	x'' (m)
E_{rD}	0,00134	-0,61	0,52
E_{rE}	0,00108	-0,58	-0,48
E_{rL}	0,00039	-0,56	0,07
E_{rS}	0,00000	--	--

Fonte: Autora

De acordo com o gráfico b) da Figura 52, o erro relativo entre y_{Sim} e y_{Calc} é nulo durante todo o caminho; esse comportamento é esperado e justificado pela proximidade da roldana S com a roldana de referência (T), pois estão na mesma unidade de tração. Para as demais roldanas (gráfico a), b) da Figura 51 e a) da Figura 52 o erro relativo começa próximo a zero sendo crescente e atingindo o valor máximo próximo ao ponto central. Percebe-se que o valor máximo do erro é maior quanto mais distante a roldana considerada está da roldana de referência (Tabela 4.9). O comportamento dessas curvas de erro relativo está dentro da expectativa e é justificado diante da aproximação feita da catenária por um conjunto de retas. Na situação simulada, quanto mais próxima do ponto central, maior a curvatura do caminho, logo maior a diferença entre os pontos da catenária real e das retas de aproximação. Pela Figura 53 pode-se perceber que a disposição da distância (dist , calculada pela Equação 4.4) entre as retas de aproximação e os pontos catenária (x_m, y_m) tem a mesma forma da curva do erro relativo.

Figura 53 – Distância entre as retas de aproximação e a catenária (dist) em função do eixo das abscissas



Fonte: Autora

$$dist = \frac{|z \cdot x_m - y_m + w|}{\sqrt{z^2 - 1}} \quad (4.4)$$

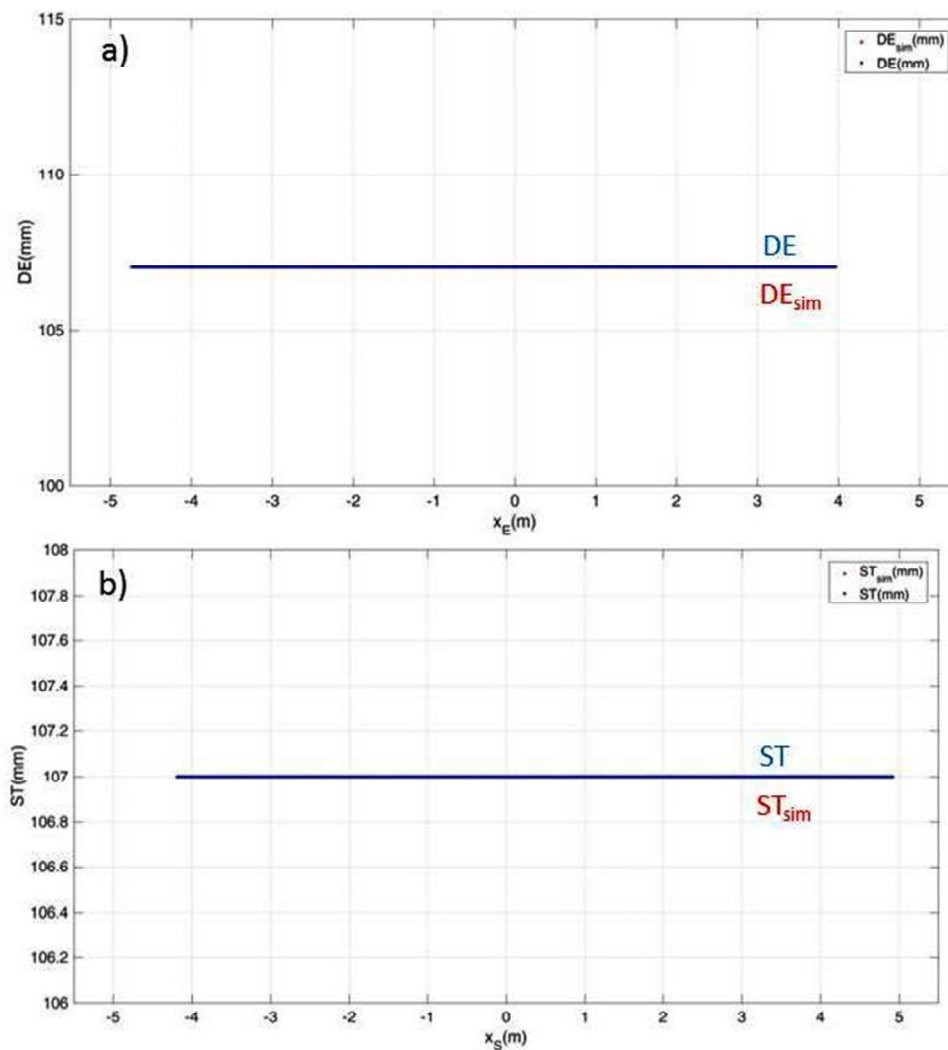
Tal que, z é definido pela Equação 3.44, w pela Equação 3.43, x_m pela Equação 4.5 e y_m pela Equação 4.6.

$$x_m = (x_{T_n} - x_{T_{n-1}}) / 2 \quad (4.5)$$

$$y_m = (y_{T_n} - y_{T_{n-1}}) / 2 \quad (4.6)$$

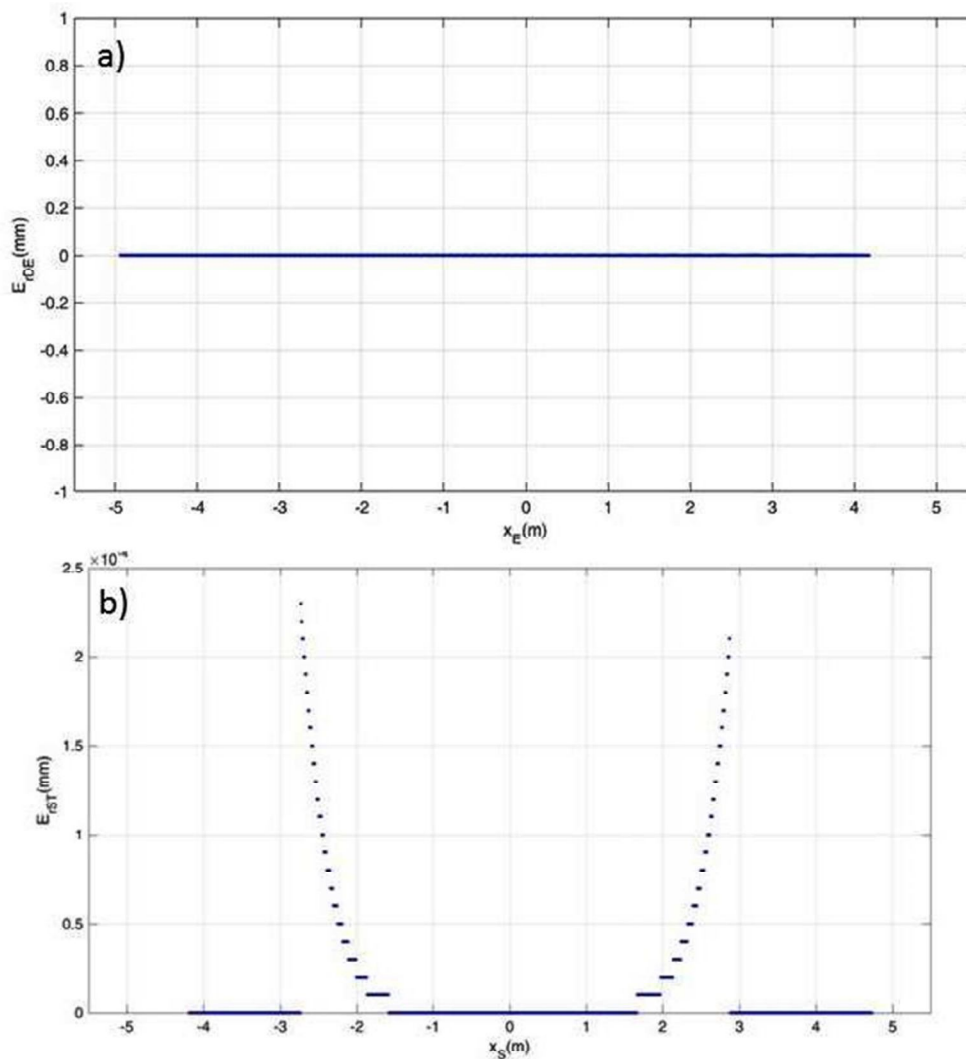
De posse das coordenadas simuladas dos pontos, foi possível calcular a distância entre centro das roldanas das unidades de tração de acordo com esta simulação. Os resultados obtidos foram comparados com os tamanhos definidos pelo modelo físico, utilizando-se a metodologia exposta no capítulo 0, ou seja, os erros relativos entre esses valores foram calculados usando a Equação 3.57.

Figura 54 – a) Comparação entre os valores encontrados para os segmentos DE (DE_{sim}) e os seu valor real (DE) em função da posição da roldana E em relação ao eixo das abscissas b) Comparação entre os valores encontrados para os segmentos ST (ST_{sim}) e os seu valor real (ST) em função da posição da roldana S em relação ao eixo das abscissas



Fonte: Autora

Figura 55 – **a)** Erro relativo (E_{rDE}) entre os segmentos DE (DE_{sim}) e os seu valor real (DE) em função da posição da roldana E em relação ao eixo das abscissas **b)** Erro relativo (E_{rST}) entre os segmentos ST (ST_{sim}) e os seu valor real (ST) em função da posição da roldana S em relação ao eixo das abscissas.



Fonte: Autora

Os valores encontrados para os segmentos DE (DE_{sim}) e ST (ST_{sim}) durante a segunda simulação e os seus valores reais (DE e ST iguais a 107 mm) estão retratados no gráfico da Figura 54. De acordo com a Figura 55, o erro máximo relativo (E_{rDE}) entre os segmentos DE (DE_{sim}) e os seu valor real (DE) se mantém igual a zero durante toda a simulação; já o erro máximo relativo (E_{rST}) entre os segmentos ST (ST_{sim}) e os seu valor real (ST) tem valor máximo igual a 0,00023 quando x_S é igual a -1,84 m. A Tabela 4.10 expõe os valores supracitados.

Tabela 4.10 – Diferenças máximas entre os links DE e ST simulados e reais, obtidos durante a segunda simulação.

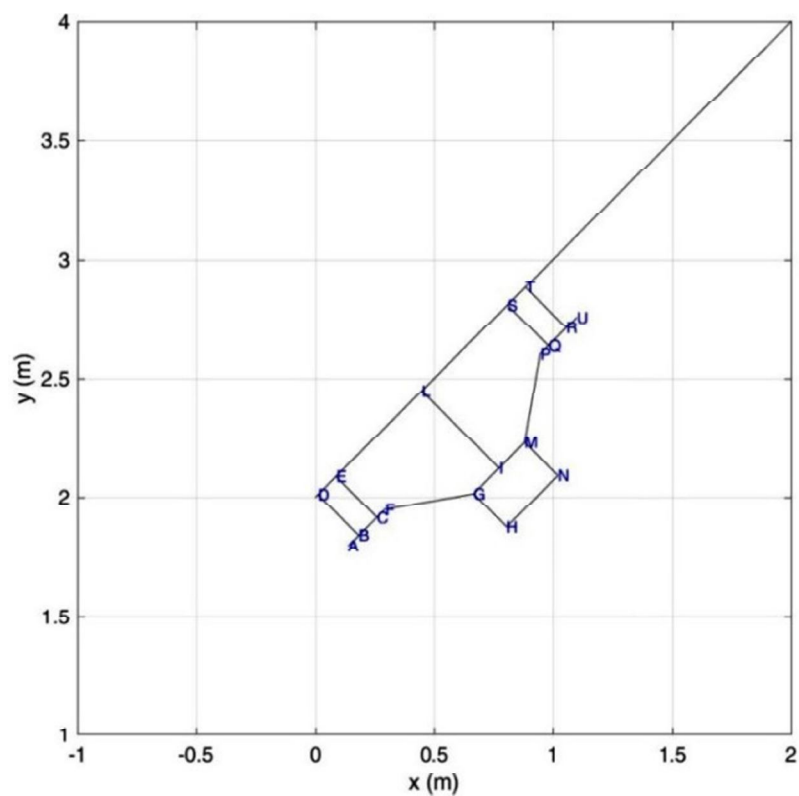
Parâmetro	Valor máximo	x (m)
E_{rDE}	0,00000	--
E_{rST}	0,00023	1,84

Fonte: Autora

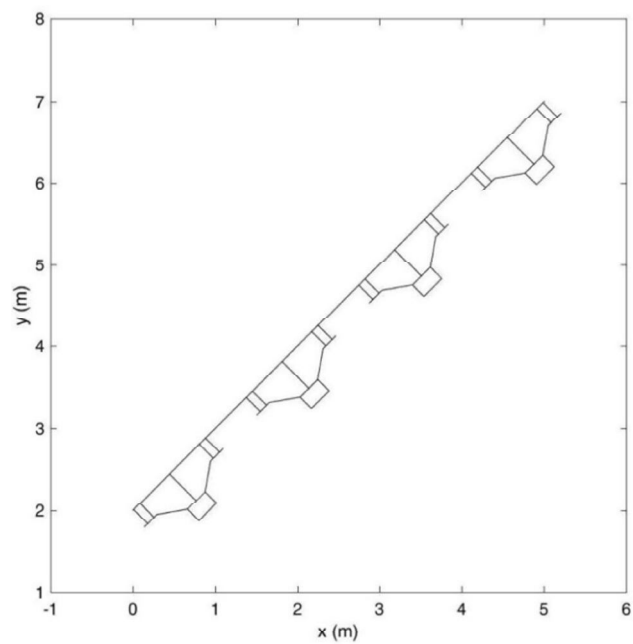
4.3.3 Simulação III

Na terceira simulação, de acordo com o capítulo 0, o caminho tomado como caminho é uma reta em active (Figura 26), formando 45 graus com a horizontal e seguindo a Equação 3.58. A Figura 56 mostra a etapa inicial da movimentação do *ELIR*, com a denominação adotada para cada junta; já a Figura 57 apresenta alguns dos passos seguidos pelo robô durante toda essa simulação.

Figura 56 – Etapa inicial da movimentação do *ELIR* na simulação III



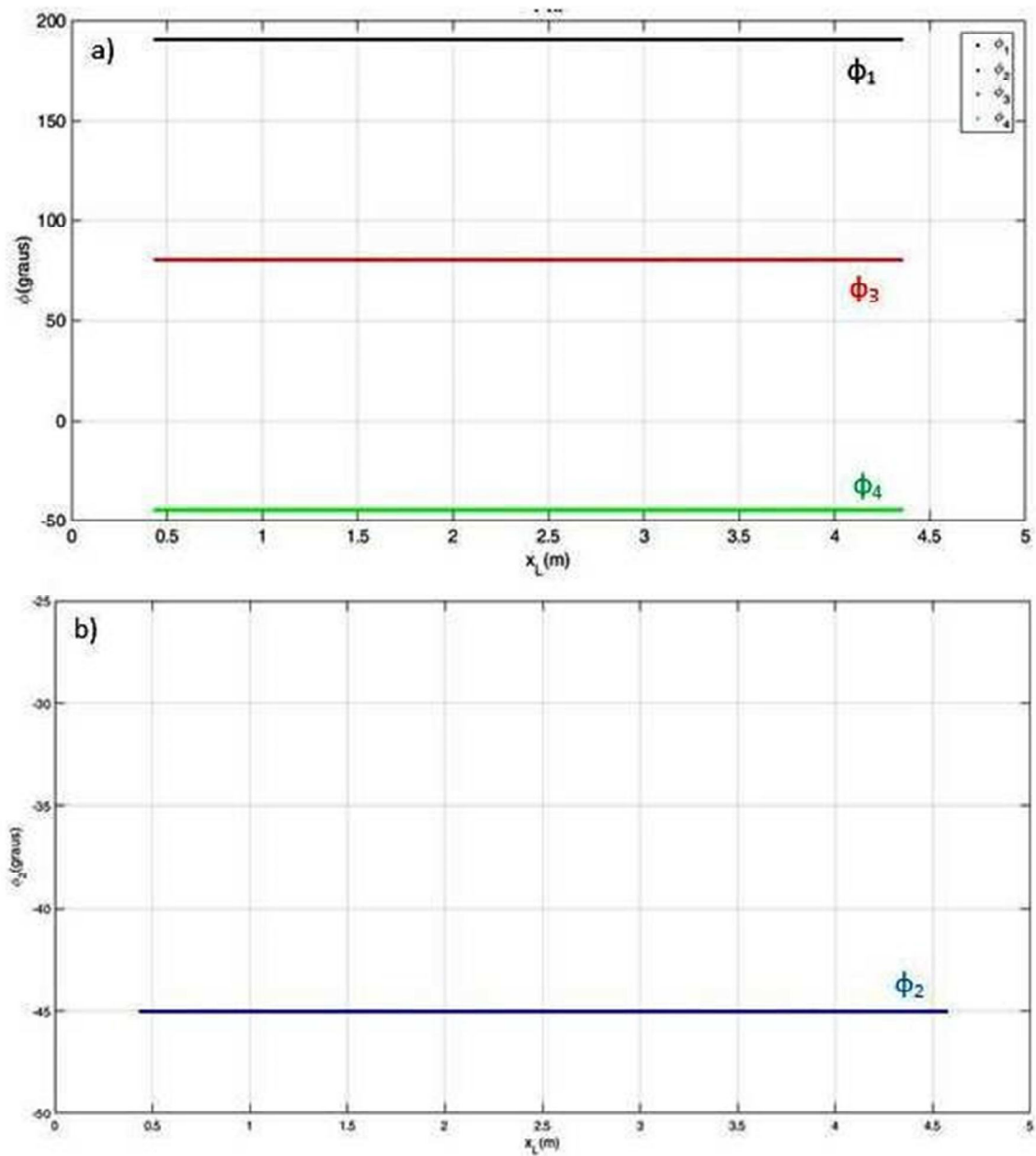
Fonte: Autora

Figura 57 – Etapas de movimentação do *ELIR* durante toda a simulação III

Fonte: Autora

A seguir serão apresentados os resultados de variação de ângulos e velocidades das roldanas, obtidos após esta simulação.

Figura 58 – a) Variações dos ângulos ϕ_1 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) em função da variação de posição x da roldana central (x_L , em metros) b) Variação do ângulo ϕ_2 (em graus) em função da variação de posição x da roldana central (x_L , em metros) durante a simulação III



Fonte: Autora

Os gráficos das Figura 58 mostram as variações dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) em função da variação de posição x da roldana central (x_L , em metros). A Tabela 4.11 compila os valores dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) alcançando durante a simulação III; pode-se observar que os quatros ângulos se mantêm. constante durante toda o caminho.

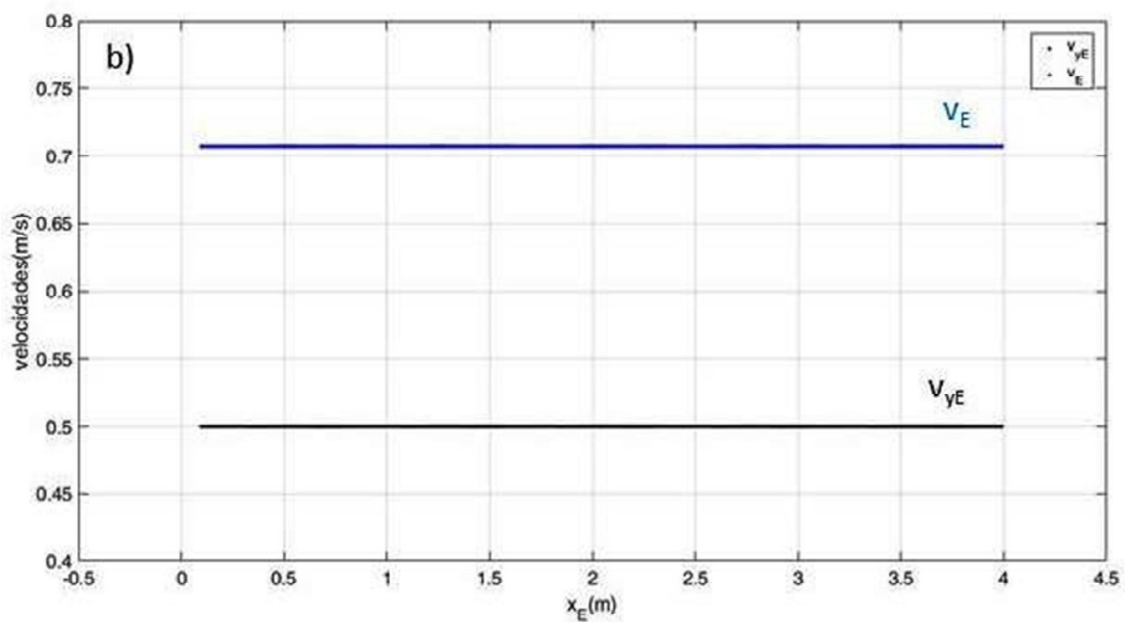
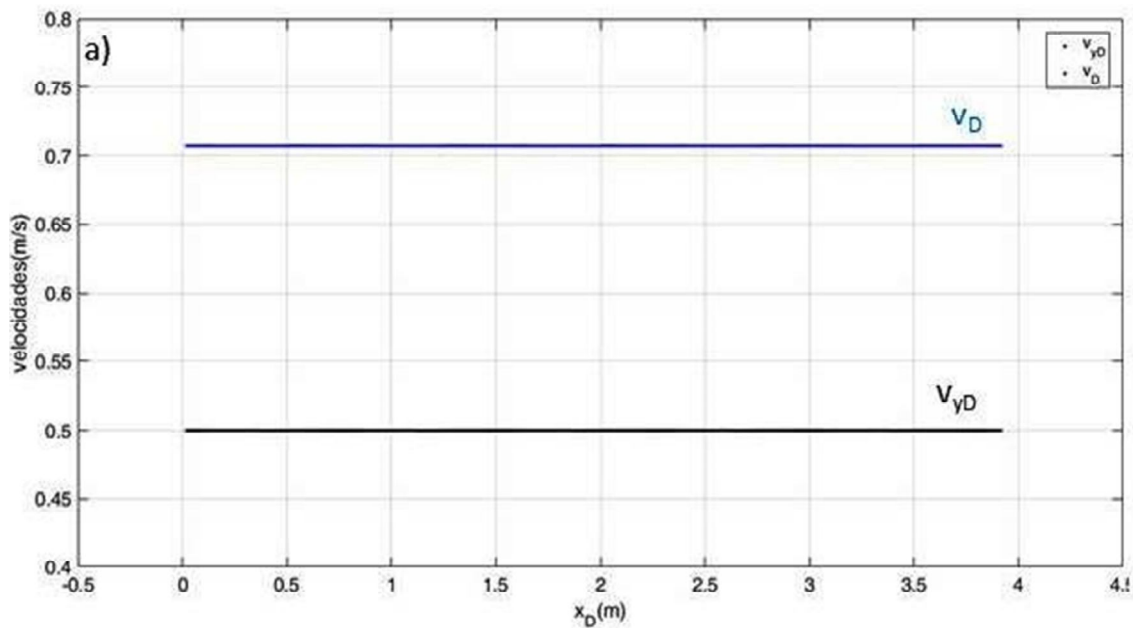
Tabela 4.11 – Valores dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) alcançados durante a simulação III

Parâmetro	Valor
ϕ_1	190°
ϕ_2	-45,0°
ϕ_3	80,0°
ϕ_4	-45,0°

Fonte: Autora

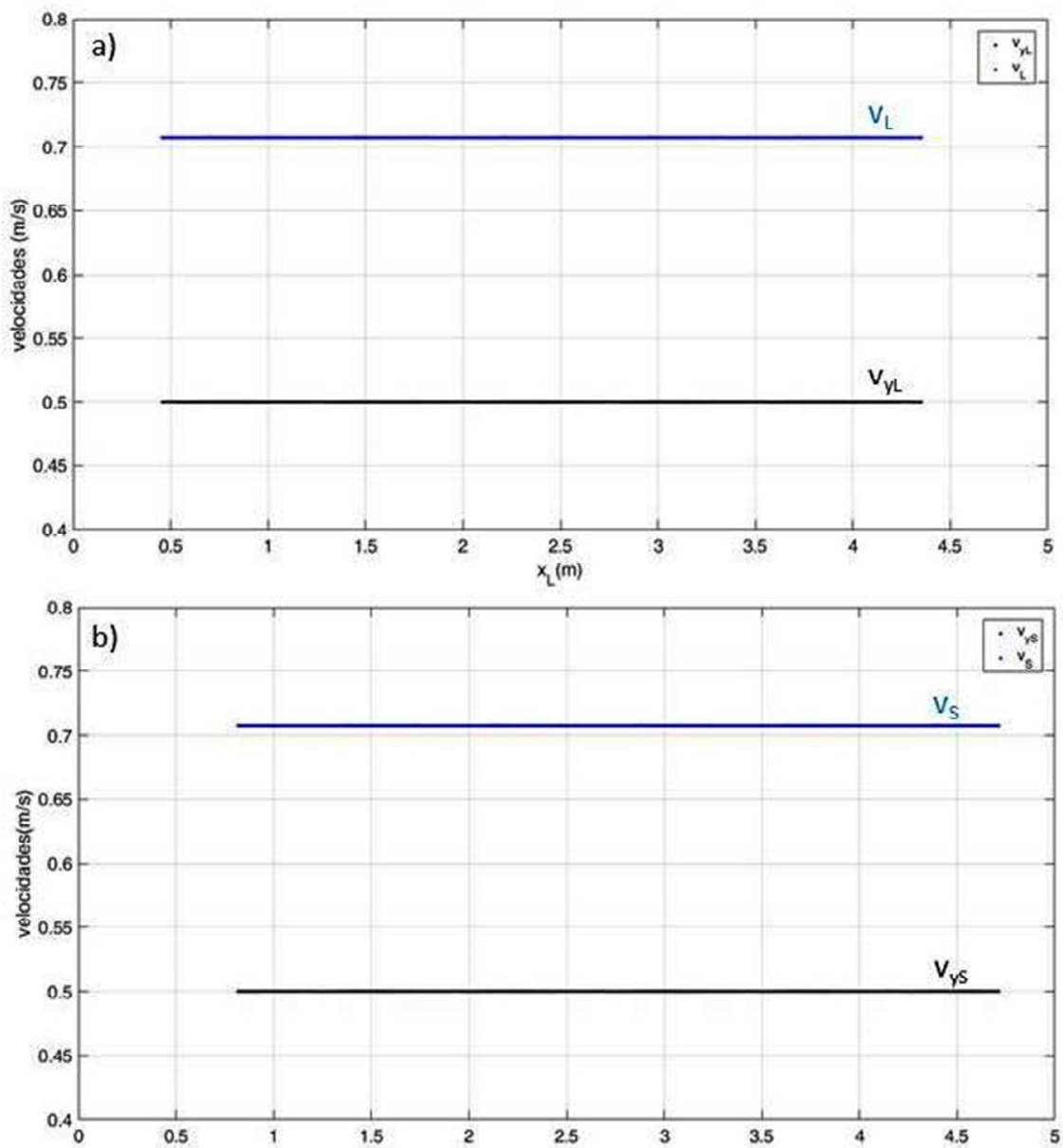
Os gráficos da variação das velocidades (do eixo y e a resultante) de cada uma das cinco roldanas em função da sua posição em relação ao eixo x durante a inspeção da catenária definida como percurso para a segunda simulação estão apresentados da Figura 59 a Figura 61.

Figura 59 - Para a simulação III, **a)** Velocidade na do eixo y (v_{yD}) e a resultante(v_D) da roldana D em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas(x_D) **b)** Velocidade na direção do eixo y (v_{yE}) e a resultante(v_E) da roldana E em função x_E



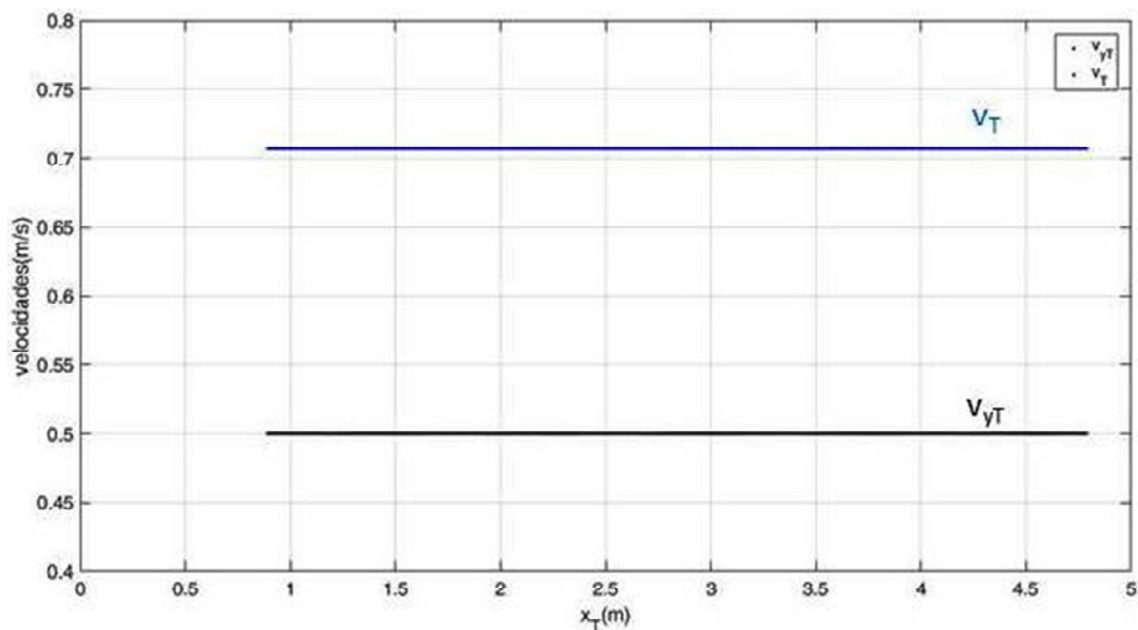
Fonte: Autora

Figura 60 - Para a simulação III **a)** Velocidade na direção do eixo y (v_{yL}) e a resultante (v_L) da roldana L em função x_L **b)** Velocidade na direção do eixo y (v_{yS}) e a resultante (v_S) da roldana S em função x_S



Fonte: Autora

Figura 61 - Para a simulação III, velocidade na direção do eixo y (v_{yT}) e a resultante (v_T) da roldana T em função x_T .



Fonte: Autora

Pelos gráficos da Figura 59 a Figura 61, durante toda a terceira simulação para as cinco roldanas (D, E, L, S e T) a velocidade na direção do eixo y (v_y) permanece igual a 0,50 m/s e a velocidade resultante (v) igual a 0,71 m/s. A velocidade na direção do eixo x (v_x), não mostrada nos gráficos supracitados, é constante e igual a 0,50 m/s (como definido nos requisitos de projeto).

A Tabela 4.12 compila os valores das velocidades v_x , v_y e v (em m/s) para as cinco roldanas (D, E, L, S e T) alcançando durante a simulação III.

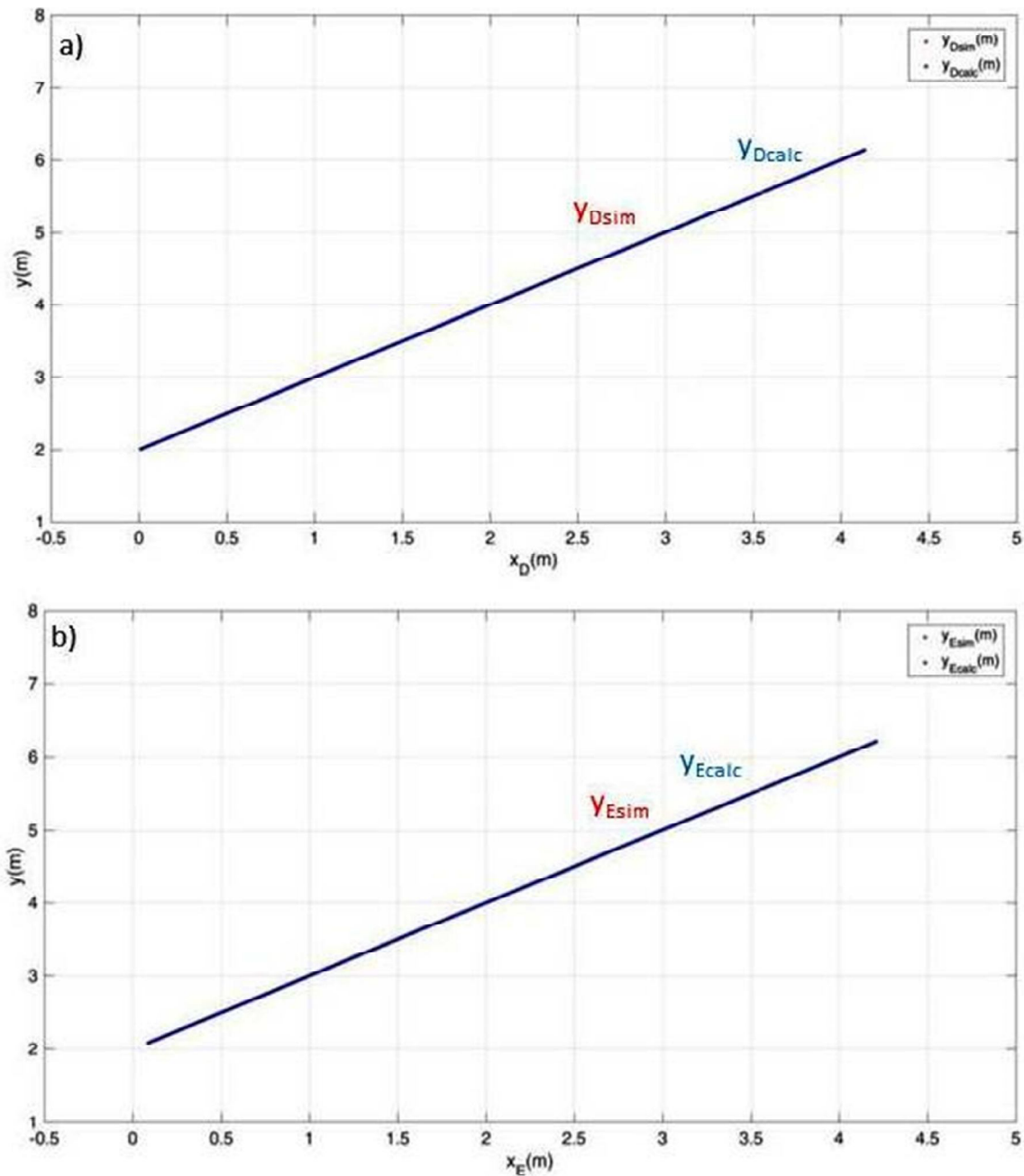
Tabela 4.12 – Valores das velocidades v_x , v_y e v (em m/s) para as cinco roldanas (D, E, L, S e T) alcançados durante a simulação III.

Parâmetro	Valor (m/s)
v_{xD}	0,50
v_{yD}	0,50
v_D	0,71
v_{xE}	0,50
v_{yE}	0,50
v_E	0,71
v_{xL}	0,50
v_{yL}	0,50
v_L	0,71
v_{xS}	0,50
v_{yS}	0,50
v_S	0,71
v_{xT}	0,50
v_{yT}	0,50
v_T	0,71

Fonte: Autora

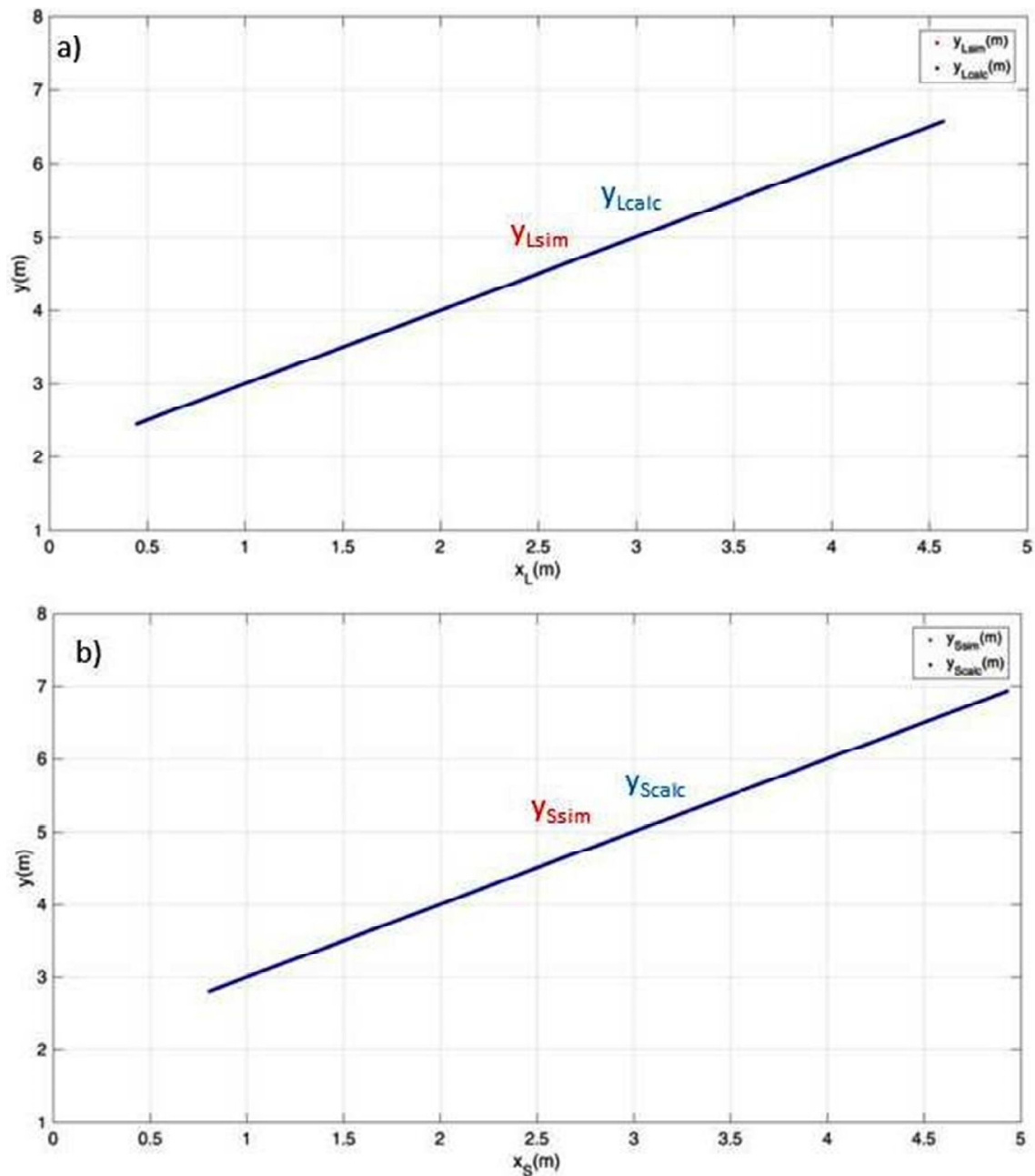
Na terceira simulação, como dito no capítulo 0, as quatro roldanas D, E, L e S tiveram seus valores de ordenadas (y_D , y_E , y_L e y_S) calculados por relação com o conjunto de retas R1 (Equação 3.42) definido pela aproximação da reta em aclive de acordo com o caminho já percorrido pela roldana T, primeira em contato com a linha. Desta maneira, os gráficos da Figura 62 e da Figura 63 comparam os valores de ordenadas (y_{Dsim} , y_{Esim} , y_{Lsim} e y_{Ssim}) encontrados durante esta simulação e os valores calculados segundo a equação da reta definida pela Equação 3.58, valor ideal, (y_{Dcalc} , y_{Ecalc} , y_{Lcalc} e y_{Scalc}). Os erros relativos (E_r), Figura 64 e Figura 65, entre os valores de ordenada encontrados pela simulação e os calculados mostrados nos gráficos supracitados, são calculados de acordo com a Equação 3.56, utilizando cinco casas decimais como precisão.

Figura 62 – Durante a simulação III **a)** Comparação entre os valores de ordenadas (y_{Dsim}) encontrados e os valores calculados (y_{Dcalc}) da roldana D em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas (x_D) **b)** Comparação entre y_{Esim} e y_{Ecalc} da roldana E em função de x_E



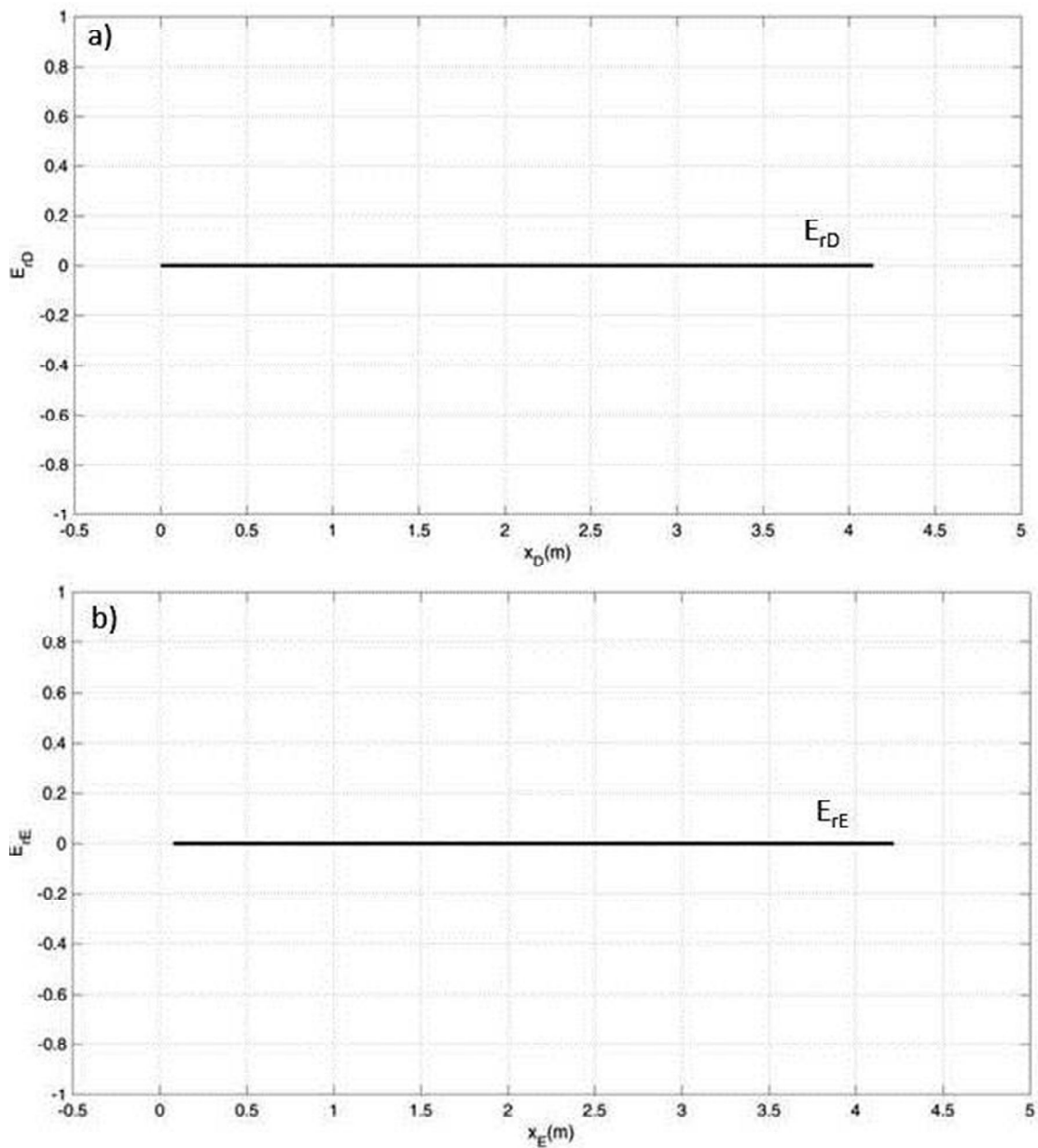
Fonte: Autora

Figura 63 – Durante a simulação III **a)** Comparação entre os valores de ordenadas (y_{Lsim}) encontrados e os valores calculados (y_{Lcalc}) da roldana L em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas (x_L) **b)** Comparação entre y_{Ssim} e y_{Scalc} da roldana S em função de x_S



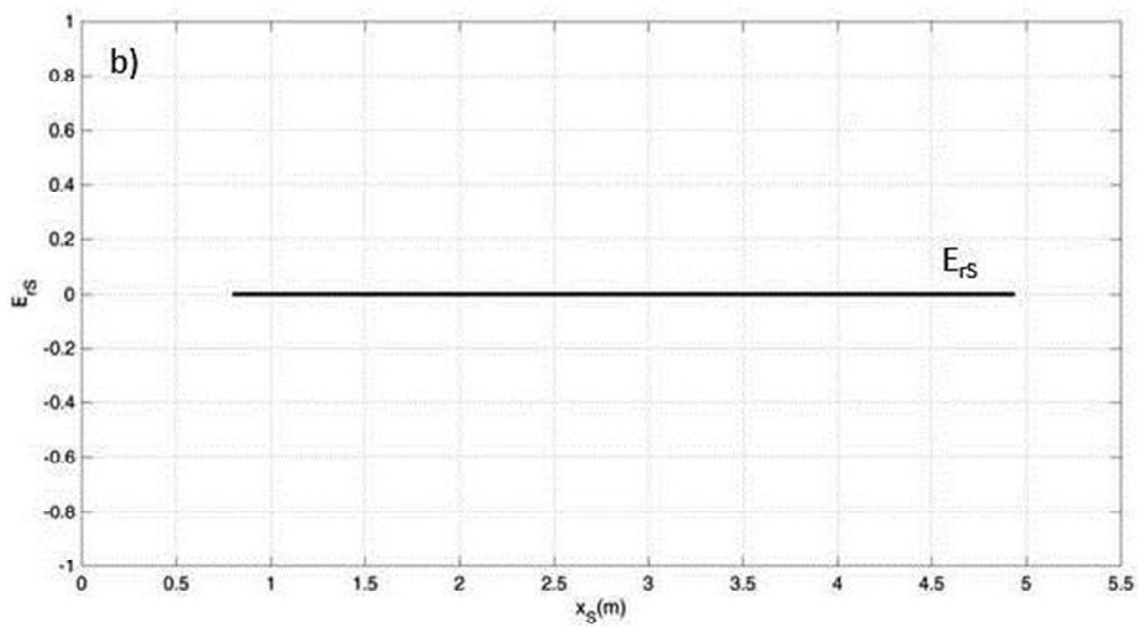
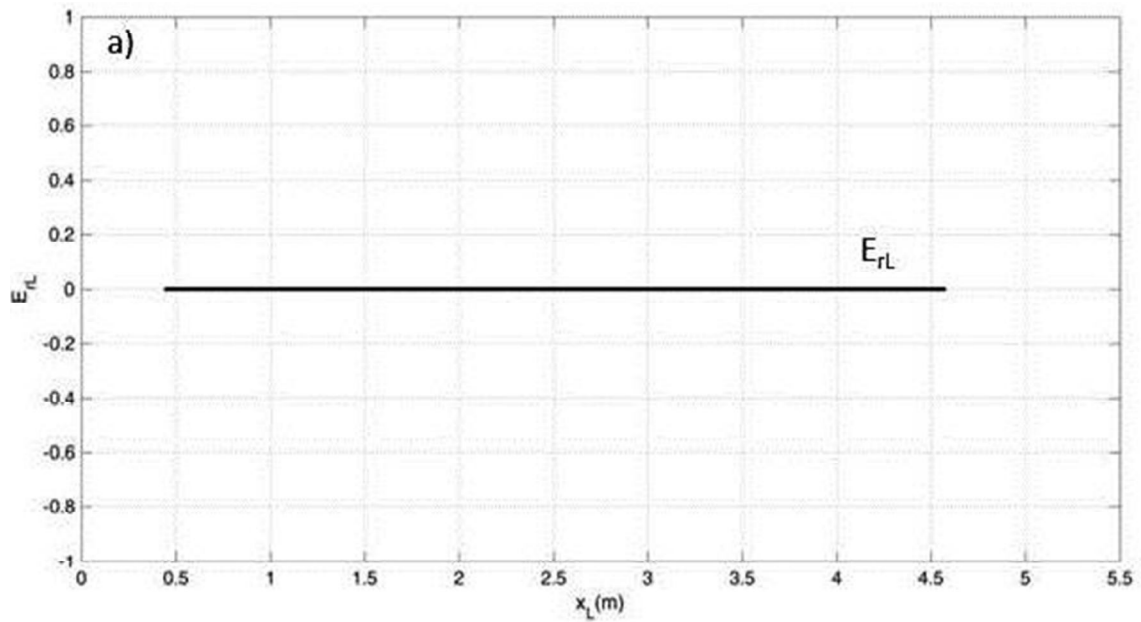
Fonte: Autora

Figura 64 – Durante a simulação III **a)** Erro relativo (E_{rD}) entre entre os valores de ordenadas (y_{Dsim}) encontrados e os valores calculados (y_{Dcalc}) da roldana D em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas (x_D) **b)** Erro relativo (E_{rE}) entre entre y_{Esim} e y_{Ecalc} da roldana E em função (x_E)



Fonte: Autora

Figura 65 – Durante a simulação III **a)** Erro relativo (E_{rL}) entre os valores de ordenadas (y_{Lsim}) encontrados e os valores calculados (y_{Lcalc}) da roldana L em função da sua posição em relação ao eixo das abscissas (x_L) **b)** Erro relativo (E_{rS}) entre y_{Ssim} e y_{Scalc} da roldana S em função (x_S)



Fonte: Autora

Na Tabela 4.13 constam os erros máximos relativos (E_r) encontrados entre os valores de ordenadas simulados (y_{sim}) e os calculados (y_{calc}) para as roldanas D, E, L e S para a Simulação III.

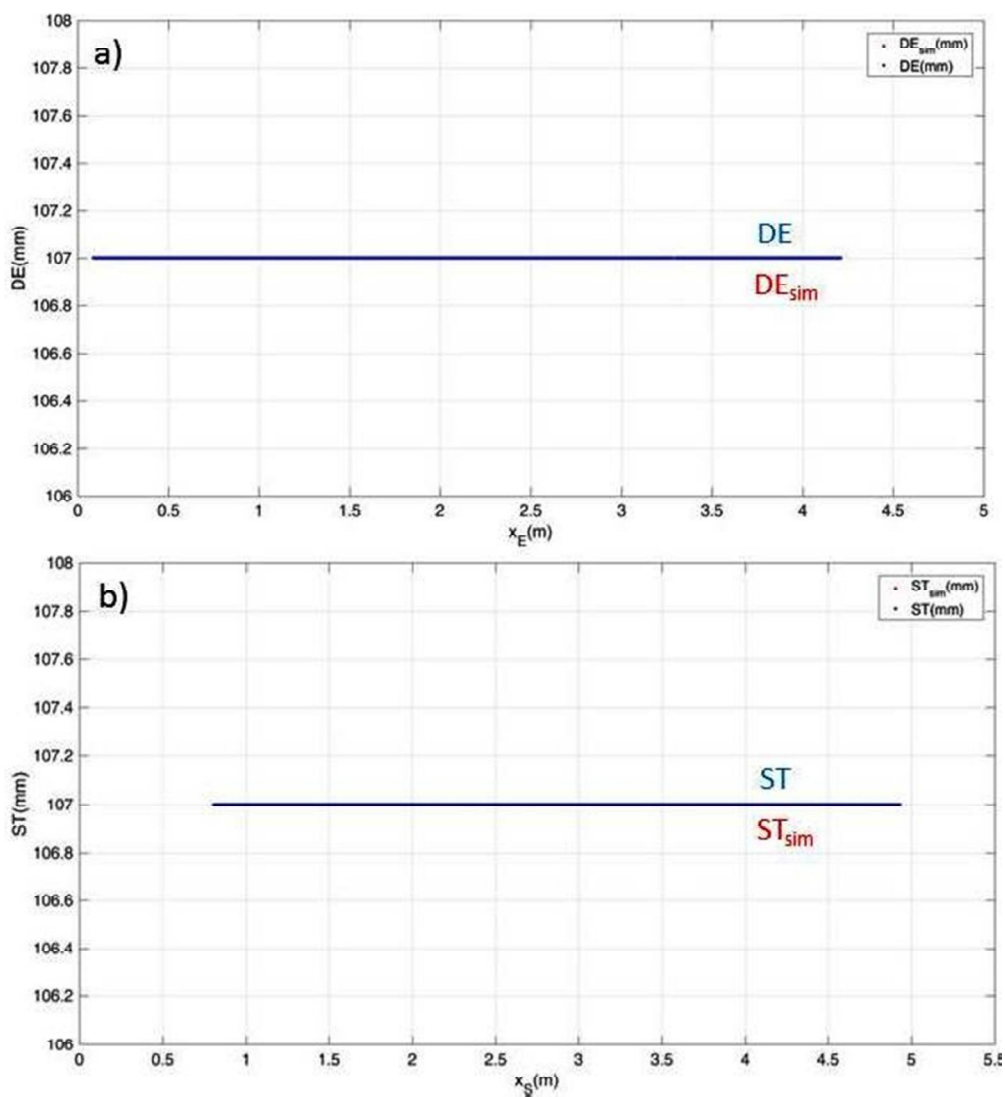
Tabela 4.13 – Erros máximos relativos encontrados entre os valores de ordenadas simulados e os calculados para as roldanas D, E, L e S durante a terceira simulação.

Parâmetro	Valor máximo
E_{rD}	0,00
E_{rE}	0,00
E_{rL}	0,00
E_{rS}	0,00

Fonte: Autora

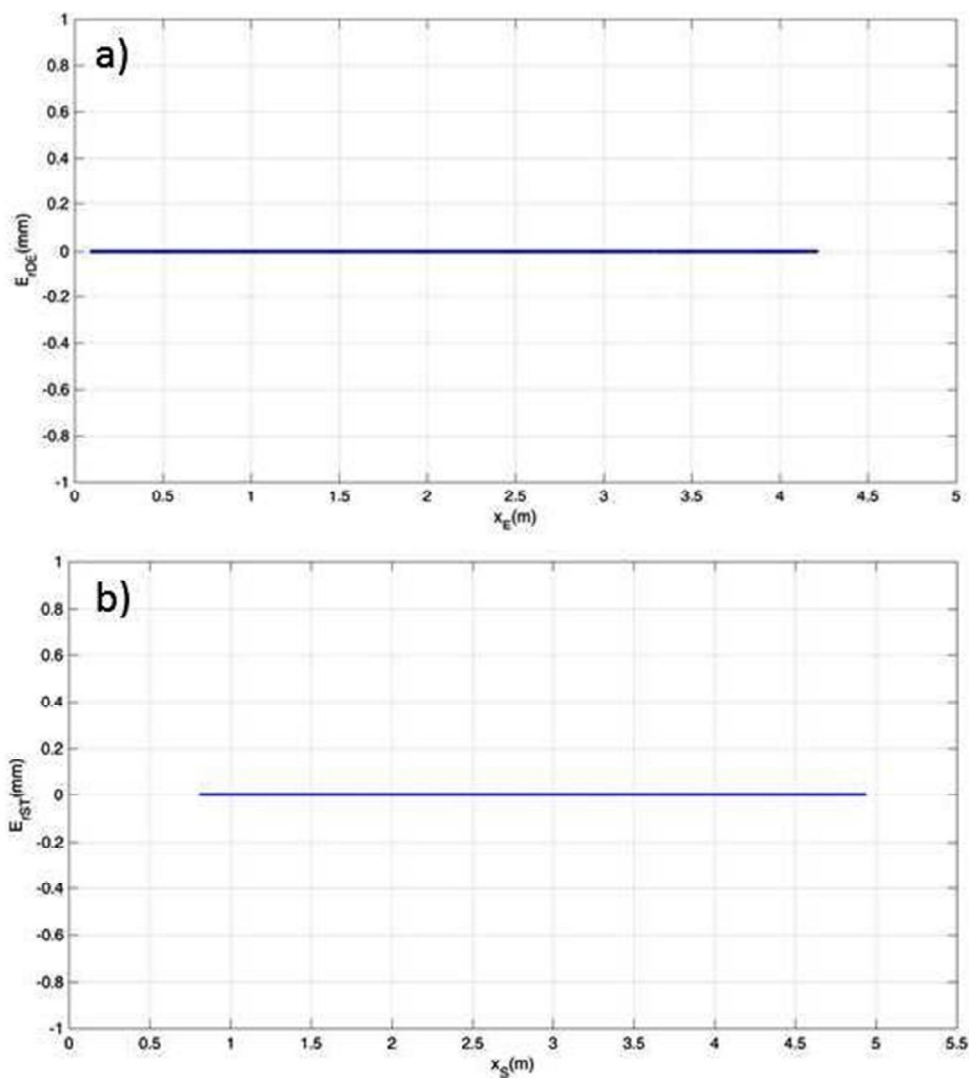
De posse das coordenadas simuladas dos pontos, foi possível calcular a distância entre centro das roldanas das unidades de tração de acordo com esta simulação. Os resultados obtidos foram comparados com os tamanhos definidos pelo modelo físico, utilizando-se a metodologia exposta no 0, ou seja, os erros relativos entre esses valores foram calculados usando a Equação 3.57.

Figura 66 – a) Comparação entre os valores encontrados para os segmentos DE (DE_{sim}) e os seu valor real (DE) em função da posição da roldana E em relação ao eixo das abscissas b) Comparação entre os valores encontrados para os segmentos ST (ST_{sim}) e os seu valor real (ST) em função da posição da roldana S em relação ao eixo das abscissas



Fonte: Autora

Figura 67– a) Erro relativo (E_{rDE}) entre os segmentos DE (DE_{sim}) e os seu valor real (DE) em função da posição da roldana E em relação ao eixo das abscissas b) Erro relativo (E_{rST}) entre os segmentos ST (ST_{sim}) e os seu valor real (ST) em função da posição da roldana S em relação ao eixo das abscissas.



Fonte: Autora

Os valores encontrados para os segmentos DE (DE_{sim}) e ST (ST_{sim}) durante a terceira simulação e os seus valores reais (DE e ST iguais a 107 mm) estão retratados nos gráficos da Figura 66. De acordo com a Figura 67, o erro máximo relativo (E_{rDE}) entre os segmentos DE (DE_{sim}) e os seu valor real (DE) se mantem igual a zero durante toda a simulação, assim como o erro máximo relativo (E_{rST}) entre os segmentos ST (ST_{sim}) e os seu valor real (ST). A Tabela 4.14 expõe os valores supracitados.

Tabela 4.14 – Diferenças máximas entre os links DE e ST simulados e reais, obtidos durante a terceira simulação.

Parâmetro	Valor máximo
E_{rDE}	0,00
E_{rST}	0,00

Fonte: Autora

5 CONCLUSÕES

5.1 ANÁLISE GEOMÉTRICA

Pelo exposto no capítulo 4.1, pode-se concluir que o projeto estrutural do *ELIR* confere a capacidade geométrica de ultrapassagem de um grampo de suspensão quando este realiza a inspeção de uma linha de transmissão que forma uma catenária, sem que haja interferência física entre o *ELIR* e o obstáculo ou a linha. Este resultado é satisfatório para o andamento do projeto do *ELIR*, uma vez que a ultrapassagem de determinados obstáculos (com dimensões de acordo com Tabela 3.1) é um pré-requisito.

5.2 ANÁLISE CINEMÁTICA DIRETA

A matriz de transformação homogênea para as juntas do *ELIR*, estudo da cinemática direta, foi elaborada considerando a base do robô na sua extremidade esquerda e a ferramenta na extremidade direita. Como há simetria na estrutura do *ELIR*, a matriz de transformação homogênea obtida pode ser utilizada tomando como ferramenta as roldanas unidade de tração à esquerda fazendo inversão entre os pontos da base e da ferramenta e renomeando as juntas.

O resultado pode ser utilizado satisfatoriamente quando se desejar obter a posição e orientação da ferramenta (no caso, as roldanas) dada os valores das variáveis das juntas assim como as limitações de movimento do *ELIR*. Este recurso poderá ser usado, futuramente, para a determinação do espaço de trabalho do robô, análise da sua capacidade de ultrapassagem de obstáculo ou de inspeção de um determinado trecho da linha.

5.3 ANÁLISE CINEMÁTICA INVERSA

Na primeira simulação da análise cinemática inversa, podemos concluir que o sistema de equações elaborado para descrever as juntas do *ELIR* e a sua solução pelo código elaborado no MATLAB® tornaram possível a geração dos movimentos necessários (ângulos de juntas e posições) para que o robô siga as curvas definidas pelas Equações 3.4 a 3.12 e assim ultrapasse o grampo de suspensão na posição especificada. Como consequência das coordenadas das posições e da definição de que o robô trafega a uma velocidade constante em relação ao eixo da abcissa (v_x) igual a 0,5 m/s; podemos obter como resultado ainda as velocidades em relação ao eixo da ordenada (v_y) e a resultante (v) assumida pelas cinco

roldanas durante todo o caminho. O comportamento destas curvas encontrou-se dentro do esperado para todas as roldanas: v_x constante; v_y decrescente em valor absoluto antes do x igual a zero e crescente após, sendo que assume valor nulo do ponto central do percurso e a velocidade resultante, desta forma, teve valor decrescente antes do x igual a zero e crescente após, sendo que assume valor igual à v_x no x igual a zero; além de apresentar a variação esperada decorrente da mudança de caminho por conta da presença do grampo de suspensão.

Como resultado da Simulação II obtivemos o gráfico das variações dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) assim como da variação das velocidades (na direção do eixo x , do eixo y e a resultante) de cada uma das cinco roldanas em função da sua posição em relação ao eixo x , quando o *ELIR* translada sob uma catenária sem obstáculo. O comportamento destes gráficos e os dados de posição, velocidade e variação de ângulos gerados mostram que o sistema de equações elaborado e o seu código de solução simula de maneira satisfatória e esperada a situação proposta. Todas as curvas de variação de velocidades das roldanas resultaram em v_x constante e igual a 0,5 m/s; v_y e velocidade resultante decrescente em valor absoluto antes do x igual a zero e crescente após, sendo que v_y assume valor nulo e consequentemente a resultante torna-se igual à v_x no ponto central da catenária.

Uma vez que na segunda simulação as roldanas D, E, L e S tiveram seus valores de ordenadas (y_D , y_E , y_L e y_S) calculados por relação com o conjunto de retas R1 (Equação 3.42), entendeu-se a necessidade de verificação e comparação dos valores de ordenadas simulados (y_{Dsim} , y_{Esim} , y_{Lsim} e y_{Ssim}) e os valores de referência (y_{Dcalc} , y_{Ecalc} , y_{Lcalc} e y_{Scalc}); para então calcular os erros relativos entre esses valores, considerando cinco casas decimais como precisão (E_{rD} , E_{rE} , E_{rL} e E_{rS}). As configurações das curvas obtidas para os erros relativos encontram-se dentro do esperado; sendo explicadas pelo comportamento da curva de distância entre o caminho considerado e as retas adotadas para aproximação da catenária (Figura 53).

Ainda na Simulação II, foram obtidos os erros relativos entre os valores reais dos segmentos DE e ST e seus valores simulados. Observou-se que a distância entre os centros da unidade de tração à esquerda (D e E) se mantém constante e igual a 107 mm, sendo seu erro relativo nulo durante todo o caminho. Já a distância entre os centros das roldanas S e T apresentam erro relativo máximo igual a 0,0023 e em muitos momentos apresenta valor igual a zero. Considerou-se que este erro relativo tem dimensão não representativa diante da sua

grandeza comparada à do robô e ao caminho; além de ser muito menor do que a tolerância de fabricação possível de ser adotada. Ademais, sabe-se que as coordenadas dos centros das roldanas D e E são calculadas dentro da solução de um mesmo sistema de equações (Equação 3.53) enquanto que as da roldana S são calculadas posteriormente às da roldana T, o que aumenta a probabilidade de erro da distância entre elas.

Para a Simulação III também obtivemos os gráficos da variação dos ângulos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 (em graus) assim como da variação das velocidades para cada uma das cinco roldanas (na direção do eixo x, do eixo y e a resultante); sendo que neste caso essas grandezas se mantiveram constante durante todo o caminho, como era de se esperar diante da natureza do caminho (reta em active). Ainda pela característica adotada para o cabo, a aproximação por um conjunto de segmento de retas retrata com fidelidade o caminho o que reduz os erros relativos entre os valores de referência e os simulados das ordenadas y_D , y_E , y_L e y_S dos segmentos DE e ST a zero.

Na Simulação II tem-se somente como dado de entrada para o código de solução do sistema de equações não lineares implementado no MATLAB® a função do caminho percorrida pela primeira roldana em contato com a linha (roldana T), sendo que o histórico do seu caminho assumido serviu como base para cálculo das ordenadas das demais roldanas. Desta maneira, obteve-se com a segunda simulação uma abrangência na sua aplicabilidade em relação à primeira simulação, sendo mais fácil de ser adaptadas a diferentes caminhos; o que foi validado com a terceira simulação.

Diante de todos os aspectos expostos no presente capítulo, considera-se válida as análises geométricas, de cinemática direta assim como o sistema de equações não lineares e os códigos elaborados para as três simulações da análise de cinemática inversa do *ELIR*.

5.4 CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS DA PESQUISA

O fornecimento de energia elétrica de maneira confiável e abrangente, atendendo a demanda crescente da sociedade, está diretamente ligado à inspeção visual e térmica das linhas de transmissão. Motivado por esta necessidade, vem sendo realizado o projeto do robô *ELIR*.

Desenvolver a pesquisa no âmbito da robótica autônoma para inspeção visual e térmica de LT's dentro de um instituto nacional como é o BIR, é uma importante tentativa brasileira de

diminuição dos custos, redução da necessidade de profissionais altamente qualificados, aumento da confiabilidade, restrição da suspensão do fornecimento de energia elétrica e, principalmente, acréscimo da segurança (salvando vidas, inclusive) na realização de uma atividade tão onerosa, arriscada e necessária quanto esta. Desta maneira, almeja-se que quando o *ELIR* puder ser implementado na indústria e comercializado atue como uma alternativa à utilização de aeronaves tripuladas, à inspeção realizada do solo e à feita por operadores sob linha.

Dentro do projeto do *ELIR*, as análises cinemática e geométrica aqui realizadas servirão de suporte para a sua avaliação estrutural; fabricação do protótipo; elaboração de uma solução de reconhecimento e classificação de obstáculos e desenvolvimento da sua navegação autônoma. Planeja-se ainda que este projeto gere uma dissertação até então denominada “Reconhecimento e Classificação de Obstáculos para Robô de Inspeção de Linha de Transmissão” assim como para um trabalho de doutorado até então denominado “Navegação Autônoma para Robô de Inspeção de Linhas de Transmissão de 138 kV Utilizando Aprendizagem de Redes Bayesiana e Q-Learning para Detecção e Transposição de Objetos”.

5.5 ATIVIDADES FUTURAS DE PESQUISA

Dentro do projeto do *ELIR* há ainda algumas etapas a serem cumpridas para que os requisitos sejam alcançados. Relacionado à análise geométrica, sugere-se que seja avaliado a resistência mecânica da estrutura do robô utilizando o Método dos Elementos Finitos; em diferentes circunstâncias, principalmente no momento de ultrapassagem de obstáculo, quando diminuem os seus pontos de apoio.

Há a possibilidade de atividades futuras relacionadas também a análise de cinemática inversa:

- Utilização do sistema de equações e códigos aqui gerados para a simulação de outras situações quer seja alterando o caminho (usando parábolas, outras catenárias, declives) quer seja com a alteração da localização ou do tipo e da quantidade de obstáculo.
- Análise da otimização do erro relativo encontrado na segunda simulação com o tempo para o processamento do código; uma vez conhecido que quanto menor

forem as retas de aproximação da catenária, menores serão os erros e maior será, porém, o tempo de processamento.

- Análise da significância dos erros obtidos.
- Obtenção de dados de aceleração para posteriores análise dinâmica do robô quando em movimento e dimensionamento dos motores.

6 REFERÊNCIAS

- ALSINA; Pablo Javier. Controle de Manipuladores. Rio Grande do Norte, 2011. Disponível em: <<http://www.dca.ufrn.br/~pablo/FTP/robotica/cap5.pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2016.
- ALUBAR. Catálogo Técnico - Condutores Elétricos de Alumínio. 2010.
- BURIN, F. DE S. **Modelagem do comportamento mecânico de cabos suspensos através de métodos analíticos e numéricos**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2010.
- BUSS, S. R. S. Introduction to inverse kinematics with jacobian transpose, pseudoinverse and damped least squares methods. **University of California, San Diego, Typeset manuscript ...**, v. 132, n. 4, p. 1–19, 2004.
- CABRAL, E. L. L. Cinemática Direta de Robôs Manipuladores. In: **Análise de Robôs**. [s.l: s.n.]. p. 1–25.
- DEBENEST, P. et al. Expliner - Robot for inspection of transmission lines. **Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation**, p. 3978–3984, 2008.
- ESTRADA, E. et al. SISTEMA DE NAVEGAÇÃO PARA UM ROBÔ DE INSPEÇÃO DE LINHAS SUBTERRÂNEAS DE DISTRIBUIÇÃO. **XVIII Congresso Brasileiro de Automática**, p. 2698–2705, 2010.
- GONÇALVES, R. S.; CARVALHO, J. C. M. Review and latest trends in mobile robots used on power transmission lines. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 10, p. 1–14, 2013.
- KATRASNIK, J.; PERCUS, F.; LIKAR, B. A Climbing-Flying Robot for Power Line Inspection. p. 1195–1200, 2008.
- KHOKAR, K.; BEESON, P.; BURRIDGE, R. Implementation of KDL inverse kinematics routine on the atlas humanoid robot. **Procedia Computer Science**, v. 46, n. Iccit 2014, p. 1441–1448, 2015.
- MAGRIL, F. C. **MODELAGEM CINEMÁTICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM ROBO DE 7 GRAUS DE LIBERDADE**. SÃO JOÃO DA BOA VISTA: Faculdades Associadas de Ensino – UNIFAE, 2010.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA DO BRASIL - MME. Boletim mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro. p. 65–900, 2016.
- MME, M. D. M. E. E. Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro do Sistema Elétrico Brasileiro. 2017.
- MOLINA ET AL., R. **Introdução à dinâmica e ao controle de manipuladores robóticos**. [s.l: s.n.].
- MOURÃO, M. A. M. et al. **Robô de Inspeção de Linha – D311**. Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL. **Anais...**2015
- NAYYERLOO, M. et al. Cable-Climbing Robots for Power Transmission Lines Inspection. In **XiaoQi**

Chen (Ed.). Mobile Robots – State of the Art in Land, Sea, Air, and Collaborative Missions, p. 63–84, 2009.

NORTON, R. L. **Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines**. 3. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2004.

RANGEL, R. K.; KIENITZ, K. H.; BRANDÃO, M. Sistema de inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica utilizando veículos aéreos não-tripulados. **3ª CTA-DLR Workshop on Data Analysis & Flight Control**, p. 9, 2009.

ROMANO, V. F.; DUTRA, M. S. Introdução à Robótica Industrial. **Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos**, p. 280, 2002.

SCIAVICCO, L.; SICILIANO, B. A Solution Algorithm to the Inverse Kinematic Problem for Redundant Manipulators. v. 4, n. 4, p. 403–410, 1988.

SENA, H. J. DA S. **CONTROLE ROBÓTICO REFERENCIADO POR SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL**. Cascavel: FACULDADE ASSIS GURGACZ HAMILTON, 2011.

SPONG, M. W. et al. **Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar**, [s.l.] John Wiley & Sons, 2006.

WAMPLER, C. W. Manipulator Inverse Kinematic Solutions Based on Vector Formulations and Damped Least-Squares Methods. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 16, n. 1, p. 93–101, 1986.

ZWIRTES, R. A. Cinemática inversa para controle da abordagem de órgãos terminais de robôs manipuladores. 2004.

BÜHRINGER, Maleachi et al. Cable-crawler-robot for the inspection of high-voltage power lines that can passively roll over mast tops. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 37, n. 3, p. 256-262, 2010.

SCHLOTZHAUER, Sandra. **Elementary Statistics Using JMP**. 1.ed. Carolina do Norte: SAS, 2007. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=5JYM1WxGDz8C&oi=fnd&pg=PR3&dq=Schlotzhauer,+Sandra+\(2007\).+Elementary+Statistics+Using+JMP+\(SAS+Press\)+PAP/CDR+ed.+Cary,+NC:+SAS+Institute.+pp.+166%E2%80%93169.+ISBN+1-599-94375-1+6.&ots=M_KIbC2PM&sig=k_k5SF3M1u_3FKvuj0VZ1d2sItw#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=5JYM1WxGDz8C&oi=fnd&pg=PR3&dq=Schlotzhauer,+Sandra+(2007).+Elementary+Statistics+Using+JMP+(SAS+Press)+PAP/CDR+ed.+Cary,+NC:+SAS+Institute.+pp.+166%E2%80%93169.+ISBN+1-599-94375-1+6.&ots=M_KIbC2PM&sig=k_k5SF3M1u_3FKvuj0VZ1d2sItw#v=onepage&q&f=false)>. Acesso em 19 de set 2017.

ANEEL. Tema para Investimento em P&D, 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d/-/asset_publisher/ahiml6B12kvf/content/temas-para-investimentos-em-p-1/656831?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fprograma-de-p-d/>

%3Fp\ p\ id\%3D101\ INSTANCE\ ahiml6B12kVf\%26p\ p\ lifecycle\%3D0\%26p\p\ state\%3Dnormal\ %26p\ p\ mode\%3Dview\%26p\ p\ col\ id\%3Dcolumn-2\%26p\ p\ col\ pos\%3D1\%26p\p\col\ count\%3Di>. Acesso em: 17 de jul. 2017

PORTAL BRASIL. Capacidade instalada de geração de energia elétrica atinge 141.684 MW em janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/02/capacidade-instalada-de-geracao-de-energia-eletrica-atinge-141-684-mw-em-janeiro>>. Acesso em: 13 de set. 2016

PORTAL ACTION. Teste de Normalidade, [2015?]. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/content/6-testes-de-normalidade>>. Acesso em: 13 de set. 2016

CAMPOS, Pereira et al. A Mobile Manipulator for Installation and Removal Of Aircraft Warning Spheres On Aerial Power Transmission Lines . IEEE Transactions on Power Delivery , v. 18, n. 4, p. 1581–1582, 2003.

CABRAL, E. L. L. Cinemática Direta de Robôs Manipuladores. In: Análise de Robôs. [2009?]. cap. 5, p. 1–25. Disponível em: < <http://sites.poli.usp.br/Cinem%E1tica%20Direta.pdf>> Acesso em: 08 de ago. 2016.

CARRARA, V. Introdução à Robótica Industrial. INPE – INSTITUO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, São José dos Campos, 2015. Disponível em: < https://www.researchgate.net/profile/Valdemir_Carrara/publication/282651875_Introducao_a_robotica_industrial/links/5615ebed08ae4ce3cc657269.pdf> . Acesso em 05 de ago. 2016.

DE SAINT-EXUPÉRY, Antoine. O Pequeno Príncipe. Zahar, 2015. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-R&lr=&id=U9CcGAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT6&dq=o+pequeno+principe&ots=xl2CenBk2A&sig=qFcOJCPsdzgvNDKaGWqmlv6yhXU#v=onepage&q&f=false>>

SARTORI, Juliana R. T. D. Códigos e Desenhos Mecânicos do ELIR, 2017. Disponível em: <<https://app.box.com/folder/43595411369>>. Acesso em 21 de dez 2017.

SCHIRMER, Leo. Capítulo 3 - Cinemática Direta de Posição. Representação de Denavit-Hartenberg, 200-? Disponível em:< <http://www.joinville.ifsc.edu.br/~leo.schirmer/ROB74/dh/CAP3 - Cinemática Direta.pdf>>. Acesso em 08 de ago 2016.

GONÇALVES, R. S.; CARVALHO, J. C. M. Graphical simulations of a mobile robot suspended on transmission lines using multibody systems software. Proceedings - 2010 Latin American Robotics Symposium and Intelligent Robotics Meeting, LARS 2010, p. 1–6, 2010.

GONÇALVES, R. S.; CARVALHO, J. C. M. Review and latest trends in mobile robots used on power transmission lines. International Journal of Advanced Robotic Systems, v. 10, p. 1–14, 2013.

- KATRASNIK, J.; PERNUS, F.; LIKAR, B. A Climbing-Flying Robot for Power Line Inspection. p. 1195–1200, 2008.
- LEE, J.; JUNG, N.; CHO, B. Development of Transmission Line Sleeve Inspection Robot. v. 5, n. 10, p. 195–199, 2011.
- LI, Z.; RUAN, Y. Autonomous Inspection Robot for Power Transmission Lines Maintenance While Operating on the Overhead Ground Wires. 2010.
- LIMA II, E. J. et al. ROBÔ AUTÔNOMO PARA INSPEÇÃO DE LINHAS DE ALTA TENSÃO. Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática, p. 1466–1473, 2014.
- MONTAMBAULT, S.; POULIOT, N. Design and Validation of a Mobile Robot for Power Line Inspection and Maintenance. 6th International Conference on Field and Service Robotics, p. 495–504, 2007.
- PHILLIPS, A. et al. Autonomous overhead transmission line inspection robot (TI) development and demonstration. Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2012 2nd International Conference on, p. 94–95, 2012.
- VENTRELLA, A. G. et al. Robô Móvel Aplicado à Inspeção em Linhas de Transmissão. p. 1015–1019, 2003.
- WANG, L. et al. Design , Modeling and Control of a Biped Line-Walking Robot. v. 7, n. 4, p. 39–47, 2010.
- ZHOU, F. Y. et al. Control of an inspection robot for 110KV power transmission lines based on expert system design methods. Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications, 2005. CCA 2005., p. 1563–1568, 2005.
- BÜHRINGER, Maleachi et al. Cable-crawler-robot for the inspection of high-voltage power lines that can passively roll over mast tops. Industrial Robot: An International Journal, v. 37, n. 3, p. 256-262, 2010.

$$\begin{array}{rcl}
 \cos\theta_1 \cdot \text{sen}\theta_2 \cdot \text{sen}\theta_3 \cdot \cos\theta_4 \cdot \text{sen}\theta_5 \cdot a_5 & - & \text{sen}\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3 \cdot \text{sen}\theta_4 \cdot \text{sen}\theta_5 \cdot a_5 & - \\
 \cos\theta_1 \cdot \text{sen}\theta_2 \cdot \cos\theta_3 \cdot \text{sen}\theta_4 \cdot \text{sen}\theta_5 \cdot a_5 & - & \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \text{sen}\theta_3 \cdot \text{sen}\theta_4 \cdot \text{sen}\theta_5 \cdot a_5 & + \\
 \text{sen}\theta_1 \cdot \text{sen}\theta_2 \cdot \text{sen}\theta_3 \cdot \text{sen}\theta_4 \cdot \text{sen}\theta_5 \cdot a_5 & & &
 \end{array}$$

$$\mathbf{r}_{3,1} = 0$$

$$\mathbf{r}_{3,2} = 0$$

$$\mathbf{r}_{3,3} = 1$$

$$\mathbf{z}_{0,5} = 0'$$