

unesp 

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Metodologia de Desenvolvimento
de Equipamento para Alimentar
Deficientes Físicos**

Roberto Fedel

Ilha Solteira - SP

MESITRADO



1210001598





UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

Universidade Estadual Paulista – UNESP
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS
Departamento de Engenharia Elétrica – DEE

**Metodologia de Desenvolvimento de Equipamento para Alimentar
Deficientes Físicos**

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade
Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Elétrica, como parte dos requisitos
exigidos para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia Elétrica

Autor

Roberto Fedel

Engenheiro Eletricista – UNICAMP - 1977

Orientador

Prof. Dr. Alexandre César Rodrigues da Silva – DEE – FEIS – UNESP

Ilha Solteira
2004

BCpIS - FEIS - UNESP



FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

Fedel, Roberto
F292m Metodologia de desenvolvimento de equipamento para alimentar deficientes físicos / Roberto Fedel. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2004
xv, 157 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2004

Orientador: Alexandre César Rodrigues da Silva
Bibliografia: p. 137-139

1. Alimentadores. 2. Deficientes físicos - Reabilitação. 3. Motores de passo.

30504074

Roberto Fedel

**Metodologia de Desenvolvimento de Equipamento para
Alimentar Deficientes Físicos**

Proc. 055/05 - URD 036

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCN. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
10.03.05	30.04.05
REGISTRADO POR	TOMBO
Ailza	Te. 1558
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Wescos Autoi R\$10,00	F292m

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Automação

Orientador:
Prof. Dr. Alexandre César R. Da Silva

1210001558



Co sys 323111
sys 58865

Ilha Solteira
2004

METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA ALIMENTAR DEFICIENTES FÍSICOS

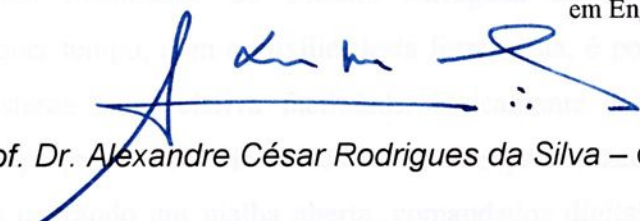
Roberto Fedel

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE
ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

COMISSÃO EXAMINADORA:

A. Carvalho

Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica


Prof. Dr. Alexandre César Rodrigues da Silva – orientador


Profa. Dra. Maria Claudia Ferrari de Castro


Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves

Ilha Solteira-SP, dezembro de 2004.

BCpIS - FEIS - UNESP

Resumo

Existem nos meios científico e comercial alimentadores para deficientes físicos, que em sua maioria, requerem alguma habilidade motora do usuário, além do que, os mais sofisticados são bastante dispendiosos. Este trabalho apresenta o projeto de um alimentador, de concepção relativamente simples e movimentos precisos, para deficientes com restrições severas de movimentos, pois a única exigência em relação ao usuário é que acione chaves, com os recursos que dispuser, como por exemplo, com movimentos da cabeça. No desenvolvimento do trabalho constatou-se que uma mesa XY, associada a um movimento rotacional, pode realizar todos os movimentos típicos da coleta do alimento, ou seja, o deslocamento da colher vazia até a superfície do alimento, a inserção com ângulo adequado, e o retorno da colher cheia a um ponto acessível ao usuário. Dessa forma, com apenas 3 graus de liberdade obtém-se a trajetória desejada. Elaborou-se então um projeto de automação para a referida mesa, contemplando esses movimentos, de forma otimizada. Utilizando o programa Excel da Microsoft, construiu-se uma planilha de cálculo integrando as diversas planilhas de cálculo velocidade *versus* tempo das várias fases do movimento, que possibilitou simular as condições de projeto, alterando os valores de velocidade, ângulo de inserção da colher no alimento, quantidade de comida carregada na colher, e outras características. A qualquer tempo, com o auxílio desta ferramenta, é possível alterar o perfil dinâmico do sistema com relativa facilidade. Fisicamente o equipamento é composto da mesa XY projetada com elementos mecânicos padronizados, e acionada por motores de passos operando em malha aberta, comandados digitalmente por um microcontrolador de oito bits, que controla os três movimentos envolvidos. Com base nos gráficos elaborados, os resultados teóricos mostraram-se satisfatórios, com coordenação e suavidade de movimentos.

Palavras-chave: alimentador, deficientes físicos, mesa XY, microcontrolador, motores de passos.



Abstract

In the scientific and commercial ways, feeders exist for disabilities people, that in the most, they request some motive ability of the user, in addition, the most sophisticated are quite costly. This work presents the project of a feeder, of conception relatively simple and accuracy movements, for users with severe restrictions of movements, because the only demand in relation to the user is that he switches with the resources that he disposes, as for instance, with movements of the head. In the development of the work it was verified that a XY table, associated to a rotational movement, can accomplish all the typical movements to pick up food, in other words, the displacement of the empty spoon to the surface of the food, the insert with appropriate angle, and the return of the full spoon to a point accessible to the user. In that way, with only 3 degrees of freedom it is obtained the wanted path. It was elaborated an automation project then for referred table, contemplating those movements, in an optimized way. Using the program Excel of Microsoft, be built a calculation plan integrating the several plans of calculation speed x time of the several phases of the movement, making possible simulations with the project conditions altering the values of speed, angle of insert of the spoon in the food, amount of food loaded in the spoon, and other characteristics. To any time, with the aid of this tool, is possible to change the dynamic profile of the system with relative easiness. Physically the system is composed of the XY table designed with standardized mechanical elements, and is driven by stepping motors operating in open loop, digitally commanded by a microcontroller of eight bits, that controls the three involved movements. With base in the elaborated graphs, the theoretical results were shown satisfactory, with coordination and softness of movements.

Keywords: disabilities people, feeder, microcontroller, stepping motors, XY table.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus, meu Pai Amado, que abençoou-me em cada dia desta jornada. Agradeço a Seu Filho, Nosso Senhor Jesus Cristo, meu Salvador, e ao Espírito Santo, consolador nos momentos mais difíceis. Que este trabalho se insira no propósito que Deus tem para a minha vida.

Agradeço ao Prof. Alexandre, que se dispôs a orientar-me, atendendo-me algumas vezes fora do expediente, e até mesmo em sua residência.

Agradeço aos meus filhos, Fernanda, Ana Paula e Leonardo, que se privaram da minha companhia nas horas em que eu me dedicava a esta dissertação.

Agradeço finalmente aos demais professores e colegas da Unesp, que se revelaram bons amigos, neste aprazível lugar.

Lista de Figuras

- 1.1 Alimentador Comercial *Beeson Automaddack*.
- 1.2 Alimentador Comercial *Mila One-Step*.
- 1.3 Alimentador *Winsford 5* – Vista em perspectiva.
- 1.4 Alimentador *Winsford 5* – Vista em operação.
- 1.5 Alimentador *Cooper Scooper* – Perspectiva 1.
- 1.6 Alimentador *Cooper Scooper* – Perspectiva 2.
- 1.7 Alimentador *Cooper Scooper* – Detalhe suporte da colher.
- 1.8 Dispositivo para cabeça – Comando do braço articulado.
- 1.9 Alimentador usando “*telethesis*”.
- 1.10 Protótipo virtual do *Maggie*.
- 1.11 *LNS Feeder* – Vista Geral.
- 1.12 *CO. Jones Feeder* – Vista Geral.
- 1.13 *CO. Jones Feeder* – Vista Frontal.
- 2.1 Motor de Relutância Variável.
- 2.2 Motor imã permanente bifásico – modo unipolar.
- 2.3 Motor imã permanente bifásico – modo bipolar.
- 2.4 Rotor de 25 dentes de motor híbrido bifásico.
- 2.5 Enrolamentos de motor híbrido bifásico.
- 2.6 Movimento em motor híbrido bifásico.
- 2.7 Curva $T \times \theta$ para motor de imã permanente ou híbrido de dois enrolamentos.
- 2.8 Curva $T \times \theta$ para meio passo em um motor de imã permanente ou híbrido de dois enrolamentos.
- 2.9 Curva $T \times \theta$ para micropasso em um motor de imã permanente ou híbrido de dois enrolamentos.
- 2.10 Zona morta para um motor de passos.
- 2.11 Fenômeno da ressonância.
- 2.12 Características dinâmicas do motor de passos.
- 3.1 Mesa XY disponível no mercado.
- 3.2 Mesa XY com movimento rotacional da colher agregado.
- 3.3 Vista em planta esquemática do sistema de coordenadas do prato.
- 3.4 Plano YZ – Giro da colher aproximando-se do alimento.



- 3.5 Plano YZ – Inserção da colher.
- 3.6 Plano YZ – Carregamento da colher.
- 3.7 Plano YZ – Colher carregada aproximando-se do usuário.
- 3.8 Mesa XY alimentadora – Vista em planta.
- 3.9 Mesa XY alimentadora – Detalhe – Elevação.
- 3.10 Mesa XY alimentadora – Detalhe – Vista Lateral.
- 3.11 Aceleração com velocidade constante no passo M.
- 3.12 Plano YZ – Desenho esquemático da inserção da colher.
- 3.13 Decomposição da velocidade tangencial V_{tang} .
- 3.14 Ângulo de inserção da colher.
- 3.15 Dimensões da colher.
- 3.16 Recolhimento do alimento.
- 3.17 Diagrama de ligações – Motor 8 fios – Catálogo Applied Motion.
- 3.18 Dimensões do motor HT23-400.
- 4.1 Conexões do motor – Dados do fabricante – Extraído do catálogo da Applied Motion.
- 4.2 Forma de onda da corrente no motor quando submetido a pulsos de tensão.
- 4.3 Forma de onda de corrente corrigida por Chopper-PWM.
- 4.4 CI SLA7026M – Unipolar – 2 fases ligadas – Circuito externo padrão.
- 4.5 Chave SLA7026M – Diagrama de blocos interno.
- 4.6 Conexões do Microcontrolador, Chaves de Potência e Motores.
- 5.1 Vetores NCLKY(I) e NPY(I)
- 5.2 Vetores NCLKX(J) e NPX(J)
- 5.3 Vetores NCLKR(K) e NPR(K)
- 5.4 Fluxograma geral do sistema.
- 5.5 Fluxograma do movimento no eixo X.
- 5.6 Fluxograma do movimento no eixo Y.
- 5.7 Fluxograma do giro da colher.
- 5.8 Sub-rotina de acomodação dos motores.
- 5.9 Fluxograma da reinicialização.
- I.1 Plano Y-Z – Inserção da colher no alimento.
- II.1 Plano Y-Z – Coordenadas Polares e Cartesianas.
- II.2 Colher aproximando-se do alimento.
- II.3 Inserção no ponto 1.

- II.4 Enchimento da colher. *Lista de Gráficos*
- II.5 Subida da colher.
- II.6 Colher carregada aproximando-se do usuário.
- II.7 Ciclos completos para inserção nos pontos 1 e 3.
- 1.1 1ª Fase – Movimento no eixo X – V_x e a_x – Aceleração, velocidade constante e deslocamento
- 1.2 2ª Fase – Movimento de Retorno – Desaceleração – V_{max} e t_{2a}
- 1.3 2ª Fase – Movimento no eixo Y – V_y e t_{2a}
- 1.4 2ª Fase – Composição de Movimentos – V_{2a} e t_{2a}
- 1.5 3ª Fase – Movimento de Posição – Aceleração – V_{3a} e t_{3a}
- 1.6 3ª Fase – Movimento no eixo Y – Velocidade constante – V_y e t_{3a}
- 1.7 3ª Fase – Composição de Movimentos – V_{3a} e t_{3a}
- 1.8 3ª Fase – Movimento de Retorno – V_{3a} e t_{3a}
- 1.9 4ª Fase – Movimento no eixo Y – V_y e t_{4a}
- 1.10 4ª Fase – Composição de Movimentos – V_{4a} e t_{4a}
- 1.11 5ª Fase – Movimento no eixo Y – Rampa de aceleração seguida de velocidade constante – V_y e t_{5a}
- 1.12 5ª Fase – Movimento no eixo X – Rampa de aceleração seguida de velocidade constante e desaceleração – V_x e t_{5a}
- 1.13 Movimento no eixo Y – Fases 1 e 2 – Injeção no ponto 0 – V_y e t_{6a}
- 1.14 Movimento rotacional – Fases 1 e 2 – V_{ang} e t_{6a}
- 1.15 Movimento rotacional – Fases 2, 3 e 4 – V_{ang} e t_{6a}
- 1.16 Movimento no eixo Y – Fases 2, 3 e 4 – V_y e t_{6a}
- 1.17 Composição de Movimentos – Fases 2, 3 e 4 – V_{2a} e t_{6a}
- 1.18 Composição de Movimentos – eixos X, Y e Z – V_{2a} e t_{6a} , V_y e t_{6a} , V_z e t_{6a}
- 1.19 Desaceleração de eixo de posição da colher – Torque e Rotação
- 1.20 Amonestimento de eixo – Movimento eixo X – Torque e Rotação
- 1.21 Desaceleração de eixo – Movimento eixo Y – Torque e Rotação
- 1.22 Carga crítica no eixo de eixos e Comprimento do sistema
- 1.23 Velocidade máxima e Comprimento
- 1.24 Carga comprimativa e Massa e Aceleração
- 1.25 Massa carga comprimiva e Comprimento do sistema

Lista de Gráficos

- 3.1 1ª Fase – Rotação – $V_{tang} \times t_m$ – Aceleração e velocidade constante.
- 3.2 1ª Fase – Movimento no eixo Y – $V_Y \times t_m$ – Aceleração e velocidade constante.
- 3.3 1ª Fase – Movimento no eixo X – $V_X \times t_m$ – Aceleração, velocidade constante e desaceleração.
- 3.4 2ª Fase – Movimento de Rotação – Desaceleração – $V_{tang} \times t_m$.
- 3.5 2ª Fase – Movimento no eixo Y – $V_Y \times t_m$.
- 3.6 2ª Fase – Composição de Movimentos – $V_{RY} \times t_m$.
- 3.7 3ª Fase – Movimento de Rotação – Aceleração – $V_{tang} \times t_m$.
- 3.8 3ª Fase – Movimento no eixo Y – Velocidade constante – $V_Y \times t_m$.
- 3.9 3ª Fase – Composição de Movimentos – $V_{RY} \times t_m$.
- 3.10 4ª Fase – Movimento de Rotação – $V_{tang} \times t_m$.
- 3.11 4ª Fase – Movimento no eixo Y – $V_Y \times t_m$.
- 3.12 4ª Fase – Composição de Movimentos – $V_{RY} \times t_m$.
- 3.13 5ª Fase – Movimento no eixo Y – Rampa de aceleração seguida de velocidade constante – $V_Y \times t_m$.
- 3.14 5ª Fase – Movimento no eixo X – Rampa de aceleração seguida de velocidade constante e desaceleração – $V_X \times t_m$.
- 3.15 Movimento no eixo Y – Fases 1 e 2 – Inserção no ponto 0 – $V_Y \times t_m$.
- 3.16 Movimento rotacional – Fases 1 e 2 – $V_{tang} \times t_m$.
- 3.17 Movimento rotacional – Fases 2, 3 e 4 – $V_{tang} \times t_m$.
- 3.18 Movimento no eixo Y – Fases 2, 3 e 4 – $V_Y \times t_m$.
- 3.19 Composição de Movimentos – Fases 2, 3 e 4 – $V_{RY} \times t_m$.
- 3.20 Composição de Movimentos – Fases 2, 3 e 4 – $V_{tang} \times t_m, V_Y \times t_m, V_{RY} \times t_m$.
- 3.21 Dimensionamento do motor de rotação da colher – Torque x Rotação.
- 3.22 Dimensionamento do motor – Movimento eixo X – Torque x Rotação.
- 3.23 Dimensionamento do motor – Movimento eixo Y – Torque x Rotação.
- 3.24 Carga estática no fuso de esferas x Comprimento do sistema.
- 3.25 Velocidade máxima x Comprimento.
- 3.26 Carga compressiva x Massa x Aceleração.
- 3.27 Máxima carga compressiva x Comprimento do sistema.



- 6.1 Composição de Movimentos – Fases 2, 3 e 4 – $V_{tang} \times t_m, V_Y \times t_m, V_{RY} \times t_m$ – Situação hipotética.
- I.1 Movimento no eixo Y – Inserção da colher – Soluções principal e alternativa – $V_Y \times t$.
- II.1 Percurso da ponta da colher, no plano YZ, visto pelo lado direito do usuário.

Lista de Planilhas de Cálculo

- 3.2.1.R 1ª Fase – Rotação – Aceleração e velocidade constante.
- 3.2.1.Y.1 1ª Fase – Movimento no eixo Y – Aceleração.
- 3.2.1.Y.2 1ª Fase – Movimento no eixo Y – Cômputo geral.
- 3.2.1.X.1 1ª Fase – Movimento no eixo X – Aceleração e desaceleração.
- 3.2.1.X.2 1ª Fase – Movimento no eixo X – Cômputo Geral.
- 3.2.2.R 2ª Fase – Movimento de Rotação – Desaceleração.
- 3.2.2.Y 2ª Fase – Movimento no eixo Y.
- 3.2.2.G 2ª Fase - Composição de Movimentos.
- 3.2.3.R 3ª Fase – Movimento de Rotação – Aceleração.
- 3.2.3.Y 3ª Fase – Movimento no eixo Y – Velocidade constante.
- 3.2.3.G 3ª Fase – Composição de Movimentos.
- 3.2.4.R 4ª Fase – Movimento de Rotação.
- 3.2.4.Y 4ª Fase – Movimento no eixo Y.
- 3.2.4.G 4ª Fase – Composição de Movimentos.
- 3.2.5.Y 5ª Fase – Movimento no eixo Y.
- 3.2.5.X 5ª Fase – Movimento no eixo X.
- 3.2.5.G.1 Movimentos nos eixos X e Y – Tempos totais para o ciclo completo do movimento da mesa.
- 3.2.5.G.2 Movimento no eixo Y – Cômputo dos tempos consumidos e das distâncias percorridas nas 1ª, 2ª, 3ª e 4ª fases.
- 3.4.1 Torque dos motores dos movimentos nos eixos X e Y.
- 3.4.2 Torque exigido do motor da rotação da colher.
- 3.4.3 Velocidade requerida dos motores.
- 6.1 Movimento no eixo Y – 1ª fase – Cálculo de V_Y .
- 6.2 Movimento no eixo Y – Cômputo geral da 1ª fase.
- 6.3 Movimento no eixo Y – 2ª fase – Cálculo de V_Y .
- 6.4 Movimento no eixo Y – 3ª fase – Cálculo de V_Y .
- 6.5 Movimento no eixo Y – 4ª fase – Cálculo de V_Y .
- 6.6 Composição de Movimentos – 2ª fase – Cálculo de V_{RY} .
- 6.7 Composição de Movimentos – 3ª fase – Cálculo de V_{RY} .
- 6.8 Composição de Movimentos – 4ª fase – Cálculo de V_{RY} .



- 6.9 Movimento rotacional – 2ª Fase – Cálculo de V_{tang} .
- 6.10 Movimento rotacional – 3ª Fase – Cálculo de V_{tang} .
- 6.11 Movimento rotacional – 4ª Fase – Cálculo de V_{tang} .
- I.1 Movimento de Rotação – Inserção da Colher – Alternativa.
- I.2 Movimento no eixo Y – Inserção da Colher – Alternativa.
- I.3 Composição de Movimentos – Inserção – Alternativa.



Lista de Tabelas

- 2.1 Seqüência de energização R1.
- 2.2 Seqüência de energização U1.
- 2.3 Seqüência de energização U2.
- 2.4 Seqüência de energização U3.
- 2.5 Seqüência de energização B1.
- 2.6 Seqüência de energização B2.
- 2.7 Seqüência de energização B3.
- 4.1 Seqüência U2 – Unipolar.
- 4.2 Seqüências para os motores dos movimentos nos eixos X e Y.
- 4.3 Seqüências para o motor do giro da colher.
- 4.4 Tabela dos terminais de entrada para o microcontrolador.
- II.1 Pontos A e B em função do tempo.
- II.2 Pontos A e B em função do tempo.
- II.3 Pontos A e B em função do tempo.
- II.4 Pontos A e B em função do tempo.
- II.5 Pontos A e B em função do tempo.

Sumário

Capítulo 1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos.....	11
Capítulo 2	Motor de Passos.....	14
2.1	Motor de relutância variável.....	15
2.2	Motor de ímã permanente.....	16
2.3	Motor híbrido.....	20
2.4	Física do motor de passos.....	23
2.5	Características dinâmicas de um motor de passos.....	27
2.6	Características específicas dos motores utilizados neste projeto.....	28
Capítulo 3	Descrição Geral, Cinemática dos Movimentos e Dimensionamento Mecânico.....	30
3.1	Descrição geral dos movimentos.....	30
3.1.1	Algoritmo de aceleração e desaceleração dos motores de passo.....	39
3.1.2	Construção das planilhas de cálculo – Aspectos gerais.....	43
3.2	Cinemática dos movimentos.....	45
3.2.1	Análise detalhada da 1ª fase.....	45
3.2.2	Análise detalhada da 2ª fase.....	52
3.2.3	Análise detalhada da 3ª fase.....	60
3.2.4	Análise detalhada da 4ª fase.....	67
3.2.5	Análise detalhada da 5ª fase.....	72
3.3	Análise do conjunto dos movimentos e da transição entre as fases.....	78
3.4	Dimensionamento mecânico.....	83
3.4.1	Cálculos de torque e velocidade dos motores.....	83
3.4.2	Aspectos exclusivamente mecânicos.....	95

Capítulo 4	Sistema de Acionamento e Controle em Malha Aberta dos Motores.....	99
	4.1 Geração da seqüência de controle nos terminais do motor.....	99
	4.2 Escolha das chaves de potência alimentadoras dos motores.....	101
	4.3 Balanço de entradas e saídas do microcontrolador.....	108
Capítulo 5	Lógica e Fluxogramas do Sistema.....	111
	5.1 Operação normal.....	111
	5.1.1 Momento de aplicação e duração dos pulsos.....	111
	5.1.2 Seqüências de controle e sentido dos movimentos.....	116
	5.1.3 Características gerais da operação normal.....	116
	5.2 Operação de reinicialização.....	122
	5.3 Características gerais do equipamento.....	124
Capítulo 6	Ferramenta de Cálculo Desenvolvida.....	126
Capítulo 7	Observações Finais e Conclusões.....	136
Capítulo 8	Referências Bibliográficas.....	138
Apêndice I	Alternativas Estudadas.....	141
Apêndice II	Simulação dos movimentos.....	145

Capítulo 1

Introdução

Neste trabalho projetou-se um equipamento com apenas três graus de liberdade de movimento, para alimentar, com a precisão necessária, uma pessoa que tenha alto grau de deficiência motora, estando impossibilitada de usar os membros superiores, ou mesmo tetraplégica. Neste capítulo buscar-se-á dar uma noção do estado da arte no desenvolvimento de alimentadores para incapacitados, com enfoque especial para os alimentadores destinados aos tetraplégicos.

Uma pesquisa sobre os projetos já realizados, seja a nível comercial, seja a nível científico, revelou os seguintes equipamentos:

Alimentadores comerciais:

1. Fabricante: Maddack, Inc.

Modelo: *Beeson Automaddack Feeder* – Figura 1.1.

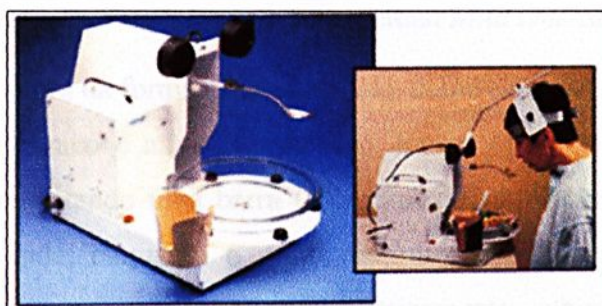


Figura 1.1 – Alimentador Comercial *Beeson Automaddack*.

Em linhas gerais, opera da forma descrita em [1], como segue.

Na cabeça do deficiente é montado um bastão, que através do movimento da cabeça para frente, pode acionar duas chaves: uma que controlará o giro do prato para posicionar o alimento em um ponto adequado, em condições de ser pego pela colher, e outra que ativará um controle que abaixará a colher até o nível do prato, coletará o alimento, e o trará ao nível da boca.

São observadas algumas restrições neste equipamento:

- Exige habilidade para pressionar com o bastão a chave desejada, durante o tempo necessário, e para colocar o alimento no ponto de coleta com precisão;

- Não há muito rigor na operação de carregamento da colher, que inclusive é bem pequena.

Diferentemente dos demais modelos que serão aqui abordados, o preço deste equipamento não está disponível, devendo tratar-se, provavelmente, de produto sob encomenda.

2. Fabricante: Mila Medical Company

Modelo: *Mila One-Step Electrical Feeder* – Figura 1.2.

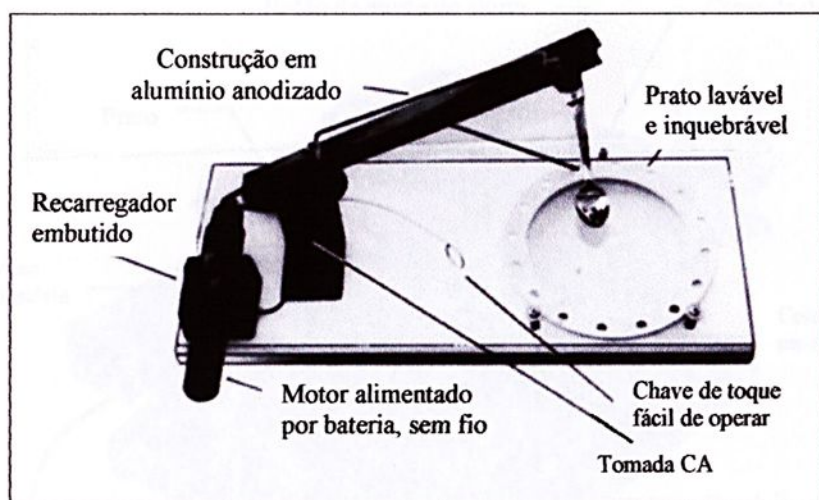


Figura 1.2 – Alimentador Comercial *Mila One-Step*.

Em linhas gerais, opera da forma descrita em [1], como segue.

O alimentador mecânico é ativado pela mão, braço, ombro ou cabeça em um movimento simples. Empurrando uma barra (não mostrada na Figura 1.2) baixa-se a colher para coletar comida, enquanto o prato mecanicamente gira para uma nova posição. O braço que segura a colher, acionado eletricamente, subirá lentamente para colocar a mesma em condições de ser abocanhada.

Este equipamento apresenta recursos bastante limitados, mas preço baixo, em torno de US\$ 330 nos EUA.

3. Fabricante: Winsford

Modelo: *Model 5 Winsford Feeder* – Figuras 1.3 e 1.4.

Trata-se de um modelo mais sofisticado que os anteriores. Em linhas gerais, opera da forma descrita em [1], como segue:

- Uma chave que é acionada com a cabeça (*chin switch*) é utilizada para controle do equipamento;
- Acionando a chave para a direita o prato girará colocando a porção de alimento desejada em frente ao empurrador (não mostrado na figura 1.3), e ao mesmo

tempo, a colher abaixa até a posição vertical, tal que sua ponta encontrará o prato próximo da borda posterior. A ponta então desliza ao longo do prato, sob o alimento, e pára em um determinado ângulo com o prato;

- Quando a chave é acionada para a esquerda, o empurrador moverá alimento adicional para dentro da colher. Em seguida o braço continuará abaixando até que a concha da colher fique horizontal. A colher é então travada neste ângulo de forma a reter alimento e líquidos durante a subida.

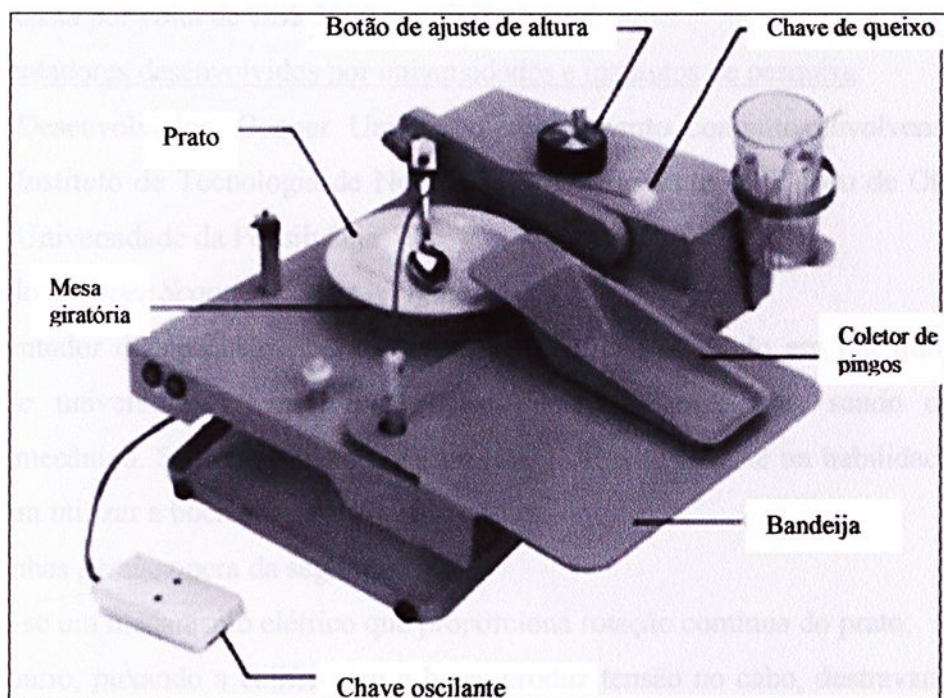


Figura 1.3 – Alimentador *Winsford 5* – Vista em perspectiva.

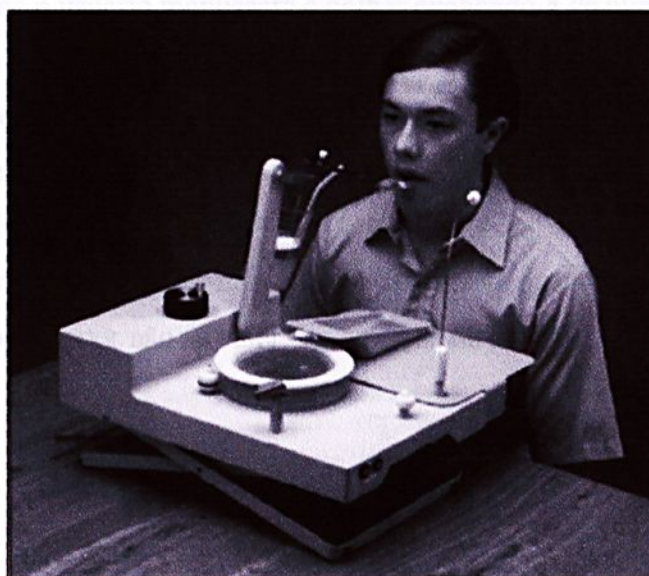


Figura 1.4 – Alimentador *Winsford 5* – Vista em operação.

Vantagens e desvantagens: A literatura consultada [11] afirma que esta máquina é morosa sendo longo o tempo total para uma refeição. Constatou-se que o alimento a ser coletado, definido em última análise pelo ponto de inserção da colher no prato (com posterior deslizamento e elevação), é estabelecido exclusivamente pelo giro e parada do prato. Isto limita as opções do usuário na escolha da porção de comida a ser colhida.

Observa-se que o prato é pequeno.

Contudo, este modelo, comparado aos outros modelos comerciais, oferece maiores recursos, e custa por volta de US\$ 3900 nos EUA.

Alimentadores desenvolvidos por universidades e institutos de pesquisa:

1. Desenvolvedor: Cooper Union: empreendimento conjunto envolvendo o Instituto de Tecnologia de New Jersey, Universidade do Estado de Ohio e Universidade da Pensilvânia.

Modelo: *Cooper Scooper* (1996) – Figuras 1.5, 1.6 e 1.7.

Alimentador denominado “*Cooper Scooper*” [1], desenvolvido em um trabalho conjunto de universidades americanas, destinado aos tetraplégicos, sendo quase totalmente mecânico. Seu princípio de funcionamento fundamenta-se na habilidade do deficiente em utilizar a boca para manipular a colher.

Em linhas gerais, opera da seguinte forma:

- ativa-se um mecanismo elétrico que proporciona rotação contínua do prato;
- o usuário, puxando a colher com a boca, produz tensão no cabo, destravando o mecanismo da Figura 1.7, soltando a bola;
- ainda com a boca o usuário manuseará a colher enchendo-a de alimento;
- o usuário solta o cabo da colher, ativando o mecanismo de travamento, e em seguida, ainda com a boca, girará a colher, por meio de uma junta rotativa. Assim, o alimento poderá ser colocado na posição mais favorável. Em seguida o usuário abocanhará o alimento;

Este equipamento apresenta inegáveis vantagens quanto à autonomia e simplicidade, contudo peca por não se valer dos avanços da automação moderna.

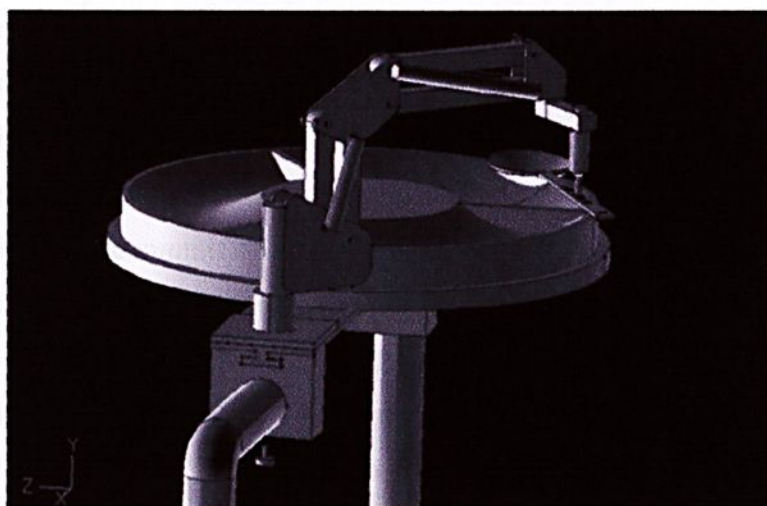


Figura 1.5 – Alimentador *Cooper Scooper* – Perspectiva 1.

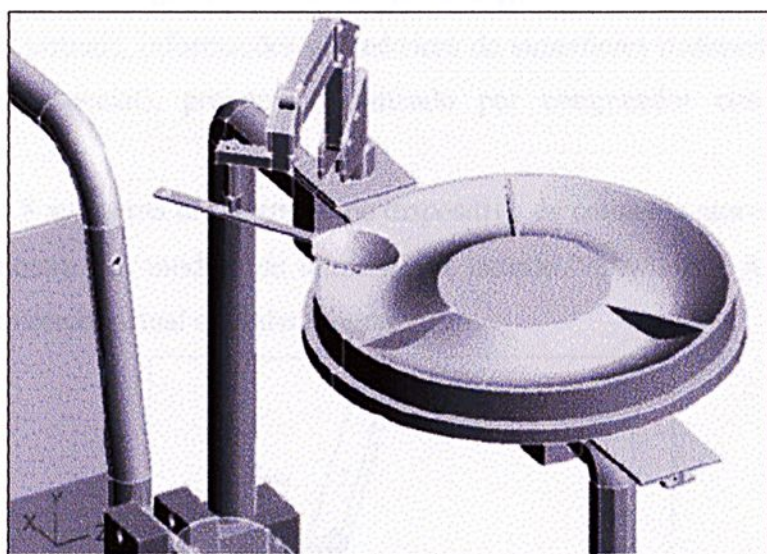


Figura 1.6 – Alimentador *Cooper Scooper* – Perspectiva 2.

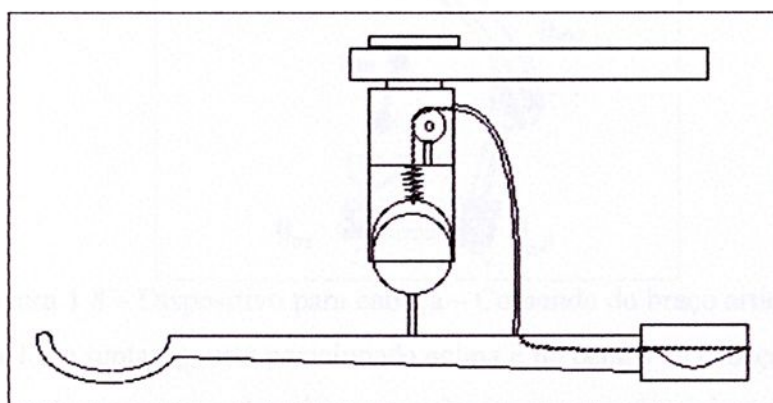


Figura 1.7 – Alimentador *Cooper Scooper* – Detalhe suporte da colher.

2. Desenvolvedor: Universidade da Pensilvânia

Modelo: *Magpie* (1997) – Figuras 1.8, 1.9 e 1.10.

Família de alimentadores desenvolvidos pela Universidade da Pensilvânia, através dos professores Vijay Kumar, Venkat Krovi, e com a participação do professor Tariq Rahman da Universidade de Delaware, entre outros pesquisadores. Esses alimentadores [2], [3] consistem de um conjunto de juntas articuladas manipuladas através da perna ou da cabeça. É criado um conjunto de mecanismos exclusivamente mecânicos, compostos de cabos e roldanas, de tal forma que, um determinado movimento da cabeça (ou da perna se for o caso), vai corresponder a um exato movimento do conjunto mecânico. Este princípio de funcionamento foi denominado por seus criadores de “*telethesis*”. São bastante engenhosos, mas necessitam serem adaptados para cada indivíduo, já que as dimensões do corpo humano variam de pessoa para pessoa. Isto obviamente constitui uma significativa desvantagem, ressaltando que a engenharia de desenvolvimento vai exigir protótipos virtuais, informações geométricas de superfícies tridimensionais (com uso de scanner especial), projeto customizado por computador com síntese de mecanismos, etc.

A Figura 1.8 apresenta um exemplo de dispositivo de comando através da cabeça. A Figura 1.9 mostra um modelo de alimentador usando “*telethesis*”. A Figura 1.10 apresenta um protótipo virtual da linha *Magpie*.

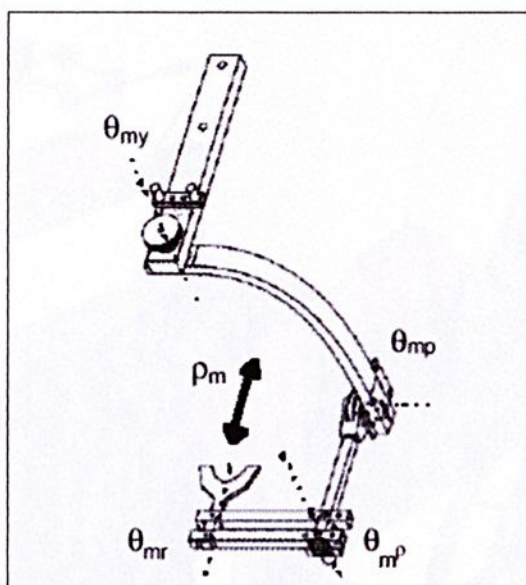


Figura 1.8 – Dispositivo para cabeça – Comando do braço articulado.

Na Figura 1.8 a junta θ_{my} está posicionada acima e no centro da cabeça do usuário. Vai estar relacionada com o giro da cabeça para direita e esquerda. A junta θ_{mp} , por sua vez, está relacionada com o giro da cabeça para a frente e para trás. O movimento da junta θ_{mp} vai refletir o deslocamento linear ρ_m da peça que constitui um mordente. A junta θ_{mr} permite o giro do mordente.



Figura 1.9 – Alimentador usando “telethesis”.

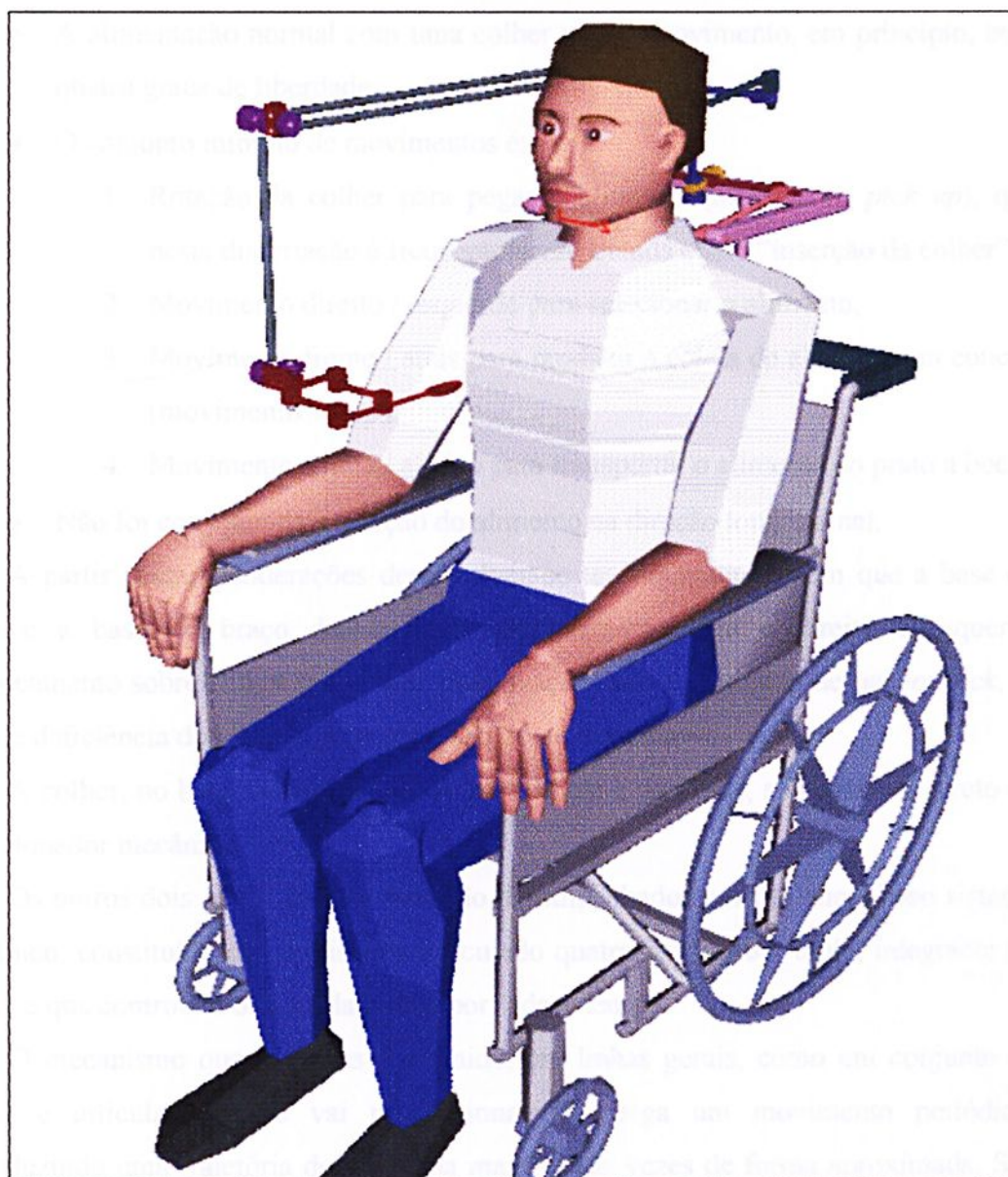


Figura 1.10 – Protótipo virtual do *Magpie*.

3. Desenvolvedor: Tulane University

Modelos: *LNS Feeder* e *CO. Jones Feeder* (1989)

A Tulane University – New Orleans – Louisiana, através dos pesquisadores David A. Rice e Ronald C. Andersen, elaborou uma coletânea de vários protótipos de alimentadores em que esta universidade esteve envolvida, sendo a maioria deles customizados e automatizados [4]. Os dois modelos citados têm muitos pontos de convergência com este trabalho, e são conceitualmente muito apurados.

3.1 – *LNS Feeder* – Figura 1.11.

Antes de descrever sua construção e funcionamento, os pesquisadores fazem uma abordagem [4] que busca a essência dos movimentos de um alimentador, já dentro de um enfoque considerando o plano XY de distribuição do alimento. Pondera-se que:

- A alimentação normal com uma colher requer movimento, em princípio, com quatro graus de liberdade;
- O conjunto mínimo de movimentos é:
 1. Rotação da colher para pegar o alimento (movimento *pick up*), que nesta dissertação é freqüentemente tratada como “inserção da colher”;
 2. Movimento direito / esquerdo para selecionar o alimento;
 3. Movimento frente / atrás para produzir a coleta do alimento em concha (movimento *scoop*);
 4. Movimento acima / abaixo para transportar o alimento do prato a boca.
- Não foi considerada a seleção do alimento na direção longitudinal.

A partir destas ponderações desenvolveu-se um equipamento em que a base do prato e a base do braço deslocam-se conjuntamente para a direita e esquerda (deslocamento sobre trilhos guia, com motorização) sob o comando de um *joystick*. O tipo de deficiência do usuário permitia o uso desse dispositivo.

A colher, no braço móvel, move-se para frente e para trás, sob controle direto de um acionador mecânico.

Os outros dois graus de liberdade são desempenhados por um engenhoso sistema mecânico, constituído de um sistema articulado quatro-barras com mola, integrante do braço, e que controlará o nível da colher por todo o tempo.

O mecanismo quatro-barras é definido, em linhas gerais, como um conjunto de barras e articulações que vai proporcionar na carga um movimento periódico, reproduzindo uma trajetória desejada, na maioria das vezes de forma aproximada. São robustos, possuem elevada capacidade de carga, e geralmente configuração geométrica

simples, mas requerem projeto individualizado, que pode ser muito complexo [5]. Como todo sistema móvel estão sujeitos a desgastes.

Com o avanço do braço, a colher é normalmente abaixada, retrocede deslizando no prato, mas quando se aproxima da borda anterior do prato uma articulação interna puxa o mecanismo, elevando automaticamente a colher à altura da boca. Ressalta-se que o formato da colher e o formato da borda anterior do prato eliminam a necessidade do movimento em concha para coletar alimento. O prato foi retrabalhado para desempenhar essa função (*tupperware* aquecido e moldado).

Entende-se que esta solução, por sua automatização, é muito mais prática e elegante que as anteriores, e segundo testemunho dos pesquisadores envolvidos, foi muito bem aceita pelo usuário (uma criança de cinco anos). Entretanto, ainda não oferece a seleção do alimento no eixo longitudinal, sendo, à primeira vista, adequada para pequenas refeições. O custo do material do protótipo foi US\$ 275 nos EUA.

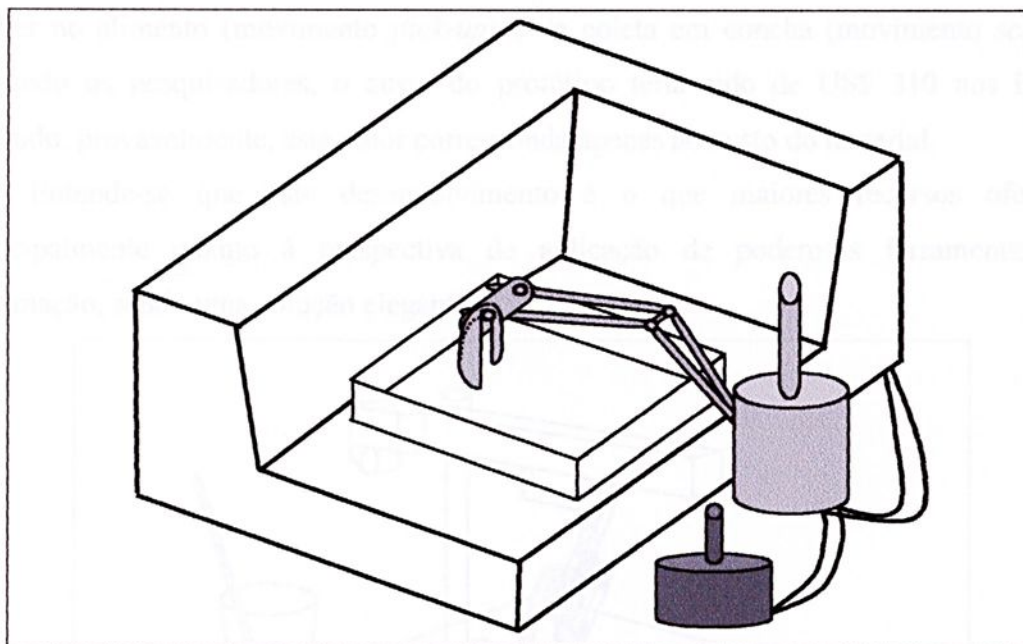


Figura 1.11 – *LNS Feeder* - Vista Geral.

3.2 – *CO. Jones Feeder* – Figuras 1.12 e 1.13.

Neste alimentador a colher move-se nos três eixos ortogonais independentemente [4]. Os deslocamentos nos sentidos transversal e longitudinal ocorrem de forma convencional. O movimento de descida e elevação da colher é realizado, por um braço, constituído por um mecanismo quatro-barras acionado por um motor elétrico DC. Os movimentos do alimentador são comandados por movimentos de cabeça do usuário (para os lados, para frente e atrás), e para isso foi desenvolvido um conjunto constituído de diversas chaves adaptável à cabeça do usuário.

A colher pode ser movida em todas as três direções (frente / atrás, direita / esquerda, acima / abaixo) por três sistemas de acionamento separados, conforme figura 1.13, assim fisicamente constituídos:

O acionamento longitudinal compõe-se de duas roscas sem fim paralelas, cada uma das roscas com uma roda dentada em uma das extremidades. Na posição central existe um motor DC, e a transmissão é feita através de corrente, acionando as duas roscas sem fim, com sincronismo. Esse sistema faz correr um carro (E) onde estão montados um suporte vertical (D) e um braço transversal (C).

O acionamento transversal é feito por um motor DC, associado a um sistema de polias e correia, que movimenta um carro (B).

O acionamento de elevação é feito através de um sistema, constituído de motor DC e mecanismo quatro-barras, montado no referido carro (B).

Os autores do projeto, em seu artigo [4], não abordam os aspectos da inserção da colher no alimento (movimento *pick-up*) e da coleta em concha (movimento *scoop*). Segundo os pesquisadores, o custo do protótipo teria sido de US\$ 310 nos EUA, contudo, provavelmente, este valor corresponda apenas ao custo do material.

Entende-se que este desenvolvimento é o que maiores recursos oferece, principalmente quanto à perspectiva de aplicação de poderosas ferramentas de automação, sendo uma solução elegante.

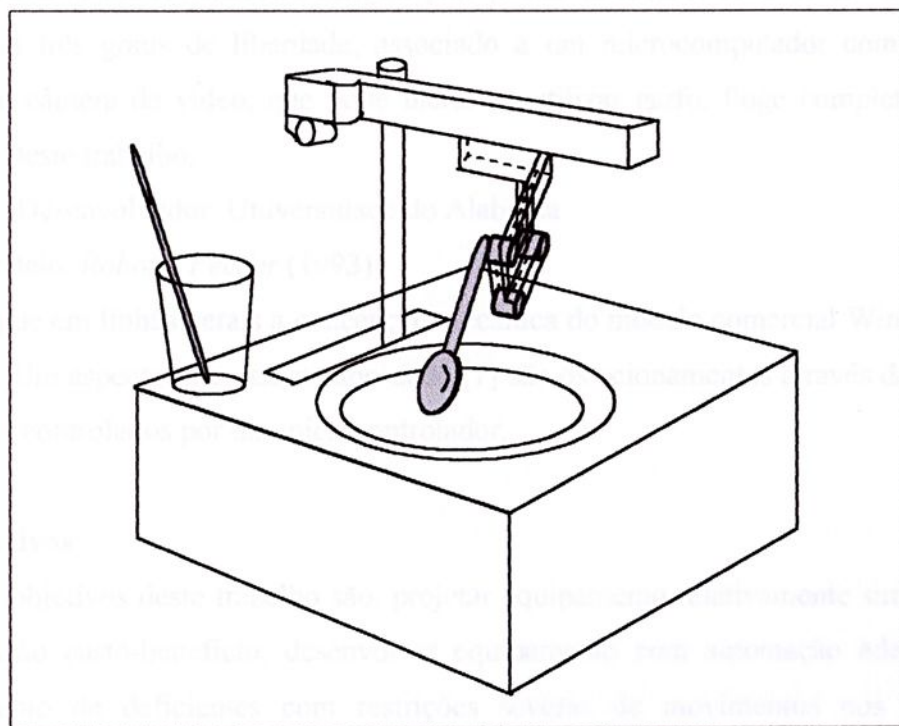


Figura 1.12 – CO. Jones Feeder – Vista Geral.

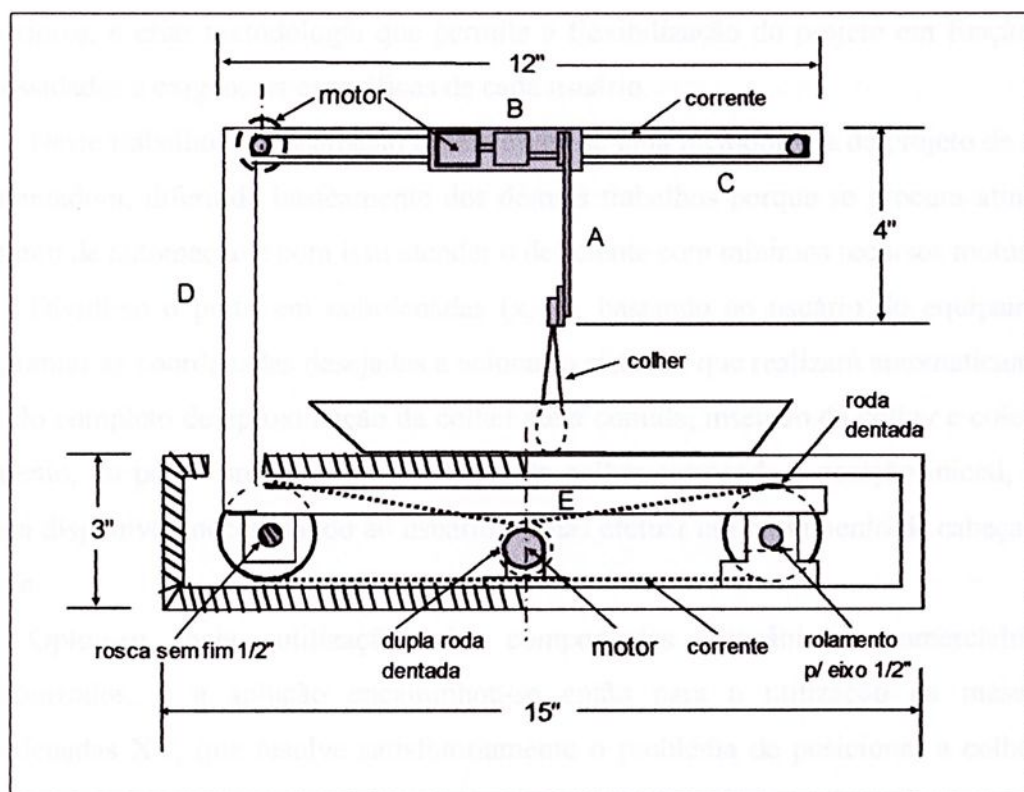


Figura 1.13 – CO. Jones Feeder – Vista Frontal.

4. Desenvolvedor: Kanakawa Institute of Technology

Modelo: *Robotic Food Feeder* (1999)

A solução apresentada pelos pesquisadores da Kanakawa Institute of Technology [6] é extremamente sofisticada e dirigida para pacientes idosos. Trata-se de um braço de robô com três graus de liberdade, associado a um microcomputador com monitor, mouse, e câmera de vídeo, que pode inclusive utilizar garfo. Foge completamente à temática deste trabalho.

5. Desenvolvedor: Universidade do Alabama

Modelo: *Robotic Feeder* (1993)

Segue em linhas gerais a concepção mecânica do modelo comercial Winsford 5 já descrito. Um aspecto interessante abordado [7] são os acionamentos através de motores de passos controlados por um microcontrolador.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são: projetar equipamento relativamente simples com boa relação custo-benefício, desenvolver equipamento com automação adequada ao atendimento de deficientes com restrições severas de movimentos nos membros

superiores, e criar metodologia que permita a flexibilização do projeto em função das necessidades e exigências específicas de cada usuário.

Neste trabalho de dissertação desenvolveu-se uma metodologia de projeto de mesa alimentadora, diferindo basicamente dos demais trabalhos porque se procura atingir o máximo de automação e com isso atender o deficiente com mínimos recursos motores.

Dividi-se o prato em coordenadas (x, y), bastando ao usuário do equipamento programar as coordenadas desejadas e acionar o sistema, que realizará automaticamente o ciclo completo de aproximação da colher até a comida, inserção da colher e coleta do alimento, no ponto programado, e retorno da colher carregada à posição inicial, onde estará disponível, necessitando ao usuário apenas efetuar um movimento de cabeça para frente.

Optou-se pela utilização de componentes mecânicos comercialmente padronizados, e a solução encaminhou-se então para a utilização da mesa em coordenadas XY, que resolve satisfatoriamente o problema de posicionar a colher no ponto desejado. A reflexão de como normalmente se dá a inserção da colher, e a coleta do alimento em quantidade compatível com a capacidade da colher, levou à associação dos movimentos da mesa XY com um movimento rotacional no plano YZ.

Para mesas XY é típico o emprego de motores de passos nos acionamentos, e neste caso em particular, os referidos motores revelaram-se bastante adequados, pois se tornou mais fácil programar a trajetória que é bastante específica na fase de enchimento da colher.

Ressalta-se ainda que, a programação das coordenadas de recolhimento da comida (e a partida do sistema) vai depender dos recursos disponíveis do deficiente. No caso da amputação dos membros superiores, o acionamento poderia ser executado, por exemplo, através de pedais, ou mesmo através de eventuais remanescentes dos braços. Para usuários tetraplégicos, existiriam outras possibilidades já utilizadas em equipamentos dedicados a esses deficientes como, por exemplo, chaves acionadas por movimentos de cabeça, ou mesmo, em casos extremos, reconhecimento de voz.

Cumprе ressaltar que o trabalho do usuário resume-se em identificar as coordenadas desejadas, em função do que deseja comer no momento, e dar partida no sistema, ou seja, ao contrário de todos os outros alimentadores aqui abordados, este alimentador não exige praticamente nenhuma habilidade de manuseio. Isto permite atender deficiências mais graves.

Uma preocupação foi com os custos do projeto, por exemplo, com a utilização dos motores em malha aberta, componentes mecânicos e motores padronizados, controle e operação digitalizada, etc. Conseguiu-se então um custo de protótipo em torno de US\$ 1800, e em face dos benefícios que este projeto oferece, entende-se que a relação custo/benefício é adequada.

Desenvolveu-se uma ferramenta computacional, que é uma planilha de cálculo geral, elaborada empregando o programa Excel da Microsoft, e que integra as planilhas de cálculo de velocidade *versus* tempo das diversas fases do movimento, permitindo simulações de projeto com alterações de velocidade, ângulo de inserção da colher no alimento, quantidade de alimento recolhida pela colher ou outros parâmetros. Através desta planilha foi possível plotar os gráficos das velocidades de translação nos eixos X e Y e da velocidade tangencial no movimento rotacional, assim como as velocidades resultantes da composição de movimentos, e avaliar a suavidade e coordenação dos movimentos, consideradas satisfatórias inclusive na transição entre fases.

O texto deste trabalho foi dividido em capítulos; no Capítulo 2 apresenta-se a teoria básica de motores de passos para dar respaldo aos demais capítulos onde esses motores são empregados; no Capítulo 3 é efetuada inicialmente uma descrição do movimento nas diversas fases, sob o aspecto qualitativo, para a compreensão do sistema, e em seguida é feito o aprofundamento do estudo de cada fase do movimento, com a formulação matemática, planilhas de cálculos, gráficos e algoritmos, sendo que posteriormente são apresentados os gráficos gerais dos movimentos onde se pode avaliar a transição entre fases, velocidades e acelerações, e por último o dimensionamento mecânico do sistema; no Capítulo 4 descreve-se o sistema de acionamento e controle em malha aberta dos motores, com dados e critério de escolha dos componentes elétricos e suas conexões; no Capítulo 5 apresenta-se a lógica e os fluxogramas do sistema, inclusive com os vetores dos tempos dos passos; no Capítulo 6 apresenta-se a ferramenta computacional desenvolvida especificamente para este trabalho, que é uma planilha geral de cálculos integrada, sendo efetuada a descrição de um exemplo onde as condições iniciais de projeto são diferentes, procurando mostrar as potencialidades da ferramenta em questão; no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões do trabalho; no Apêndice I discute-se sobre uma alternativa de operação da mesa, que foi interpretada como menos eficiente do que a solução adotada, e por isso descartada; no Apêndice II faz-se simulação computacional dos movimentos.

Capítulo 2

Motor de Passos

Os motores de passos são tradicionalmente utilizados em mesas XY, e são facilmente encontrados no mercado, em geral a preços menos onerosos que os motores DC, tendo ampla utilização em equipamentos de informática, tais como impressoras, unidades de disco rígido, *drivers* de disco flexível, *scanners*, etc.

Possuem ainda as seguintes vantagens:

- Precisão e repetibilidade no posicionamento, sendo que os erros de posição não são cumulativos;
- Podem operar em malha aberta;
- São acionados digitalmente;
- São robustos e dispensam manutenção.

Suas desvantagens são:

- Apresentam limitações de torque;
- Operando em malha aberta, uma vez sobrecarregados podem perder passos, e com isso o conhecimento da posição do rotor, necessitando serem reinicializados.

Neste capítulo apresenta-se, de maneira resumida, conceitos sobre motores de passos, principais tipos e princípios de funcionamento. Os tópicos abordados são os considerados necessários para a compreensão dos itens de projeto subsequentes.

Um motor de passos pode ser definido como um motor elétrico sem comutadores, cujo rotor gira com incrementos de posição bem definidos (passos), giro este resultante das alternâncias de excitação nos enrolamentos do estator, sendo o rotor constituído, ou por um ímã permanente, ou por um bloco dentado de algum material magnetizável, ou ainda pela combinação dessas possibilidades. O motor de passos pode ser mantido energizado e fixo em uma determinada posição, ou girar em ambos os sentidos, e é considerado como um dispositivo que converte uma entrada elétrica digital em um movimento mecânico. Os motores de passos dividem-se em 3 tipos principais:

- Motor de relutância variável;
- Motor de ímã permanente;
- Motor híbrido.

2.1. Motor de relutância variável

No motor de relutância variável cada enrolamento do estator é bobinado em torno de dois pólos opostos e o rotor é constituído de um bloco dentado de material magnetizável. Os fluxos magnéticos resultantes produzidos pelas correntes nas bobinas energizadas do estator exercem uma força sobre o rotor, que atua para minimizar a relutância no percurso do fluxo, e então o rotor gira até o ponto de equilíbrio de relutância mínima. A mudança na seleção das bobinas energizadas definirá um novo percurso mínimo do fluxo magnético e um novo ponto de equilíbrio, e o rotor girará até esse novo ponto de equilíbrio, perfazendo um novo passo, e assim sucessivamente.

O número de dentes do rotor combinado com o número de enrolamentos do estator vai definir o tamanho do passo, sendo que passos menores podem ser obtidos com maior número de dentes no rotor. A concepção mais simples possível é a da Figura 2.1, com três enrolamentos no estator e quatro dentes no rotor, o que proporcionará passo de 30° , e se adotada a seqüência de energização R1 dos enrolamentos, apresentada na Tabela 2.1, obter-se-á rotação no sentido horário. A designação R1 e as demais designações de seqüências de energização deste capítulo são arbitrárias e mnemônicas.

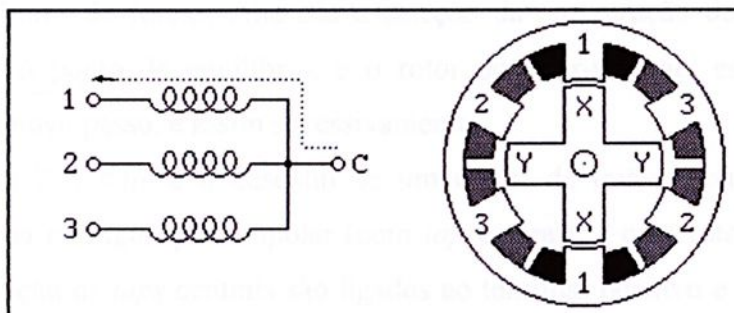


Figura 2.1 – Motor de relutância variável.

Tabela 2.1 – Seqüência de energização R1.

Posição	Enrolamento		
	1	2	3
1	1	0	0
2	0	1	0
3	0	0	1
4	1	0	0
5	0	1	0
6	0	0	1

Observa-se que, na Tabela 2.1, a seqüência de energização fica definida até a posição 4, contudo são colocadas mais algumas posições para melhor entendimento. As demais seqüências de energização deste capítulo também são apresentadas com algumas posições adicionais. Embora o período elétrico complete-se com 3 passos, o período mecânico só será completado com 12 passos.

Motores de relutância variável também são disponíveis com quatro enrolamentos (cinco fios) e cinco enrolamentos (seis fios).

Este tipo de motor permite construções com passos bastante pequenos (frações de grau), contudo possui torque significativamente inferior ao motor de imã permanente.

2.2. Motor de imã permanente

No motor de imã permanente o enrolamento do estator é também bobinado em torno de dois pólos opostos, mas os terminais das bobinas de cada pólo podem estar disponíveis, permitindo flexibilidade no modo de ligação. O imã permanente do rotor é magnetizado axialmente, possuindo saliências ou pólos na parte anterior e na parte posterior. Haverá atração magnética entre pólos do estator e do rotor de polaridades opostas e repulsão entre os pólos de mesma polaridade. Então o rotor se deslocará até o ponto de equilíbrio de forças. Alterada a seleção da energização dos enrolamentos, haverá um novo ponto de equilíbrio, e o rotor deslocar-se-á até esse novo ponto, perfazendo um novo passo, e assim sucessivamente.

Na Figura 2.2, têm-se o desenho de um motor de imã permanente com dois enrolamentos, na configuração unipolar (com *tap* central), e com rotor de seis pólos. Nesta configuração os *taps* centrais são ligados ao terminal positivo e os terminais 1a, 1b, 2a, 2b, são ligados ao terminal terra, de forma alternada, revertendo a direção do campo no enrolamento. Passos menores podem ser obtidos com maior número de pólos no rotor.

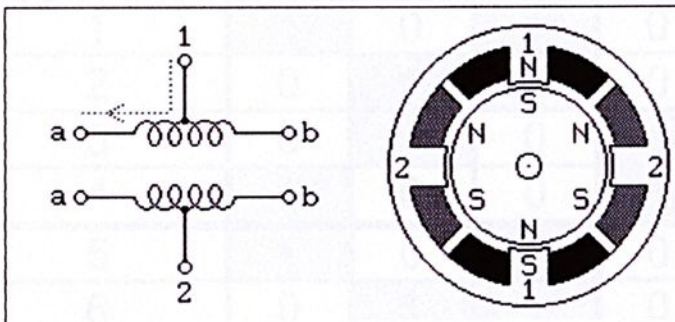


Figura 2.2 – Motor ímã permanente bifásico - modo unipolar.

Nas Tabelas 2.2, 2.3 e 2.4, tem-se as seqüências U1, U2 e U3 respectivamente, sendo adotadas as seguintes convenções referidas a Figura 2.2.1: segmento de enrolamento correspondente ao terminal 1a no lado superior, segmento de enrolamento correspondente ao terminal 2a no lado esquerdo, segmento de enrolamento energizado assume a polaridade norte, e o motor é visto pela parte posterior.

- Na seqüência U1, um segmento de cada enrolamento é energizado independentemente, com passo de 30° . Proporciona rotação no sentido horário;
- Na seqüência U2 têm-se dois segmentos de enrolamento energizados simultaneamente, também com passo de 30° , mas com torque aproximadamente 40% maior do que na seqüência U1. A rotação também é no sentido horário;
- A seqüência U3 alterna as seqüências U1 e U2, e proporciona meio passo de 15° , com rotação também no sentido horário.

Tabela 2.2 – Seqüência de energização U1.

Posição	1a	1b	2a	2b
1	1	0	0	0
2	0	0	1	0
3	0	1	0	0
4	0	0	0	1
5	1	0	0	0
6	0	0	1	0
7	0	1	0	0
8	0	0	0	1

Tabela 2.3 – Seqüência de energização U2.

Posição	1a	1b	2a	2b
1	1	0	1	0
2	0	1	1	0
3	0	1	0	1
4	1	0	0	1
5	1	0	1	0
6	0	1	1	0
7	0	1	0	1
8	1	0	0	1

Tabela 2.4 – Sequência de energização U3.

Posição	1a	1b	2a	2b
1	1	0	0	0
2	1	0	1	0
3	0	0	1	0
4	0	1	1	0
5	0	1	0	0
6	0	1	0	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1
9	1	0	0	0
10	1	0	1	0
11	0	0	1	0
12	0	1	1	0
13	0	1	0	0
14	0	1	0	1
15	0	0	0	1
16	1	0	0	1

Na Figura 2.3, têm-se o desenho de um motor de imã permanente com dois enrolamentos, na configuração bipolar, e com rotor de seis pólos. Esta configuração possui as seguintes características:

- Fiação mais simples;
- Tensão de alimentação mais elevada;
- Maior torque em relação à configuração unipolar;
- Circuito de acionamento mais complexo e mais caro.

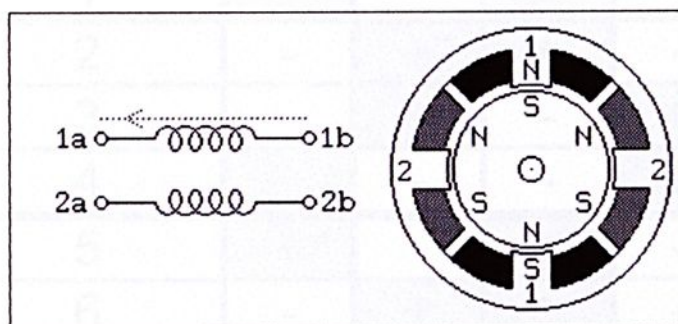


Figura 2.3 – Motor ímã permanente bifásico – modo bipolar.

Nas Tabelas 2.5, 2.6 e 2.7, têm-se as seqüências B1, B2 e B3 respectivamente, sendo adotadas convenções semelhantes as das seqüências U1, U2 e U3:

- Na seqüência B1, cada enrolamento é energizado independentemente, com passo de 30°. A seqüência apresentada proporciona rotação no sentido horário;
- Na seqüência B2 têm-se dois enrolamentos energizados, também com passo de 30°, mas com torque aproximadamente 40% maior do que na seqüência B1. A rotação também é no sentido horário;
- A seqüência B3 alterna as seqüências B1 e B2, e proporciona meio passo de 15°, com rotação também no sentido horário.

Tabela 2.5 – Seqüência de energização B1.

Posição	1a	1b	2a	2b
1	+	-	-	-
2	-	-	+	-
3	-	+	-	-
4	-	-	-	+
5	+	-	-	-
6	-	-	+	-
7	-	+	-	-
8	-	-	-	+

Tabela 2.6 – Seqüência de energização B2.

Posição	1a	1b	2a	2b
1	+	-	+	-
2	-	+	+	-
3	-	+	-	+
4	+	-	-	+
5	+	-	+	-
6	-	+	+	-
7	-	+	-	+
8	+	-	-	+

Tabela 2.7 – Sequência de energização B3.

Posição	1a	1b	2a	2b
1	+	-	-	-
2	+	-	+	-
3	-	-	+	-
4	-	+	+	-
5	-	+	-	-
6	-	+	-	+
7	-	-	-	+
8	+	-	-	+
9	+	-	-	-
10	+	-	+	-
11	-	-	+	-
12	-	+	+	-
13	-	+	-	-
14	-	+	-	+
15	-	-	-	+
16	+	-	-	+

Embora os exemplos aqui apresentados sejam bifásicos, existem motores de imã permanente com maior número de fases. Existem também motores de imã permanente, onde os enrolamentos do estator ao invés de dispostos longitudinalmente, são transversais em relação ao eixo do motor, por exemplo: motor *claw-tooth* ou *can-stack*, [8] e [9], bastante usados em aplicações não industriais pelo seu preço muito baixo.

Os motores de imã permanente possuem torque superior aos motores de relutância variável, mas a necessidade de passos menores levou ao desenvolvimento dos motores híbridos.

2.3 Motor híbrido

O motor híbrido combina as vantagens do motor de relutância variável e do motor de imã permanente, alcançando pequeno ângulo de passo e alto torque, e hoje prevalece em quase todas as aplicações onde se requer um motor de passos. O tipo mais comum é com dois enrolamentos (seis fios), mas existem no mercado motores com três enrolamentos, cinco enrolamentos, etc.

O projeto do motor híbrido é uma mescla do projeto do motor de imã permanente e do motor de relutância variável. O rotor possui imã permanente norte-sul, que se

estende ao longo do eixo e que constitui o núcleo do rotor. Sobre esse núcleo são montados dois cilindros dentados (eventualmente podem ser mais do que dois) de material magnetizável, um sobre cada pólo do imã. Os dentes da fileira sul estão defasados com os dentes da fileira norte pela metade da distância entre dentes. Os pólos do estator também possuem dentes normalmente da mesma largura dos dentes do rotor.

Dentro da concepção construtiva em que os enrolamentos do estator estão dispostos longitudinalmente em relação ao eixo do motor, tem-se que enquanto os dentes da fileira norte estão sendo atraídos pelo pólo energizado do estator, por exemplo, e portanto se alinham com os dentes desse pólo, os dentes da fileira sul são repelidos e as ranhuras entre esses dentes alinham-se com os dentes do pólo.

Para o caso do motor de dois enrolamentos, os dentes da fileira sul estão defasados de $\frac{1}{4}$ da distância entre dentes, em relação ao próximo pólo a ser energizado (a 90°) e com o qual se alinham em seguida. Portanto, neste caso, se o cilindro dentado tiver 50 dentes, a distância entre dentes é $360^\circ / 50 = 7,2^\circ$. A cada mudança na energização dos enrolamentos, o rotor avança $\frac{1}{4}$ de $7,2^\circ = 1,8^\circ$.

Uma outra maneira de raciocinar, no caso de dentes de seção retangular, e ainda dentro deste exemplo, é imaginar que os dentes da fileira sul estão defasados de $\frac{1}{2}$ dente em relação ao próximo pólo a ser energizado (a 90°). Como cada dente corresponde a $3,6^\circ$ (e cada ranhura também a $3,6^\circ$), o avanço de $\frac{1}{2}$ dente, quando da próxima mudança na excitação dos enrolamentos, implica em um passo de $1,8^\circ$. Este motor, portanto, é um motor híbrido de 200 passos por volta, um dos mais populares existentes, e que é utilizado em todos os movimentos desse projeto. As figuras 2.4, 2.5 e 2.6 constituem em exemplo [10] da geometria de um motor híbrido de duas fases com passo de $3,6^\circ$.

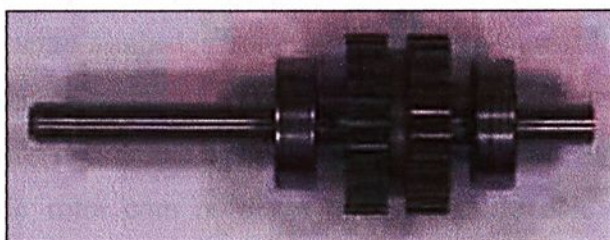


Figura 2.4 – Rotor de 25 dentes de motor híbrido bifásico.

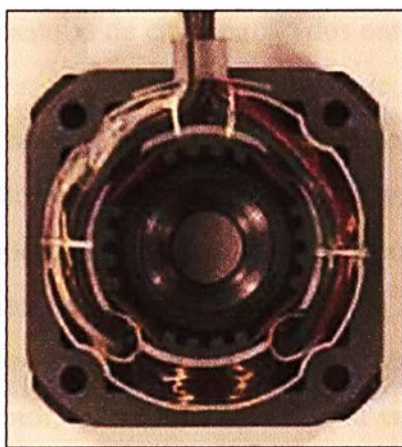


Figura 2.5 – Enrolamentos de motor híbrido bifásico.

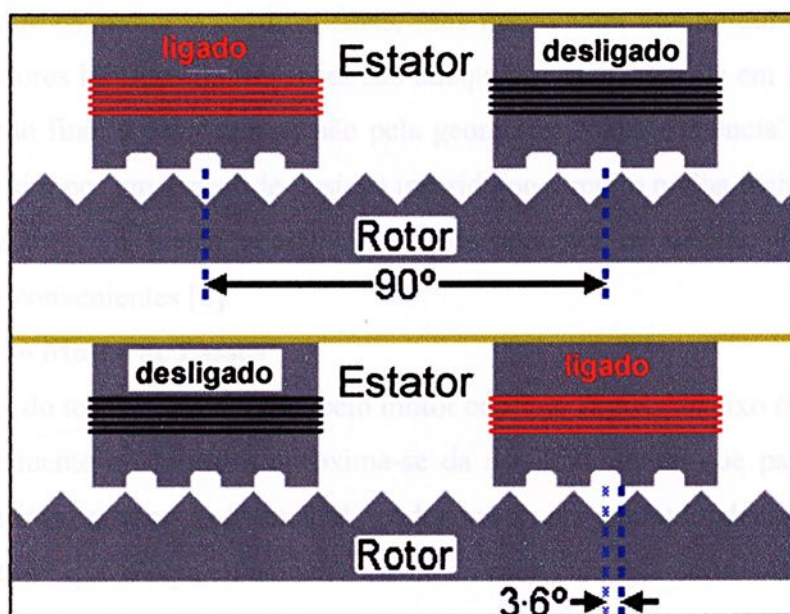


Figura 2.6 – Movimento em motor híbrido bifásico.

Na Figura 2.6, na parte superior, pode-se verificar que os dentes e ranhuras do rotor estão perfeitamente alinhados com os dentes e ranhuras do pólo energizado, e desalinhados de $\frac{1}{4}$ da distância entre dentes em relação aos dentes e ranhuras do pólo desenergizado. Quando o 1º pólo é desligado e ligado o 2º pólo, há o realinhamento dos dentes e ranhuras do rotor com os dentes e ranhuras do pólo agora energizado, e portanto, avanço de $\frac{1}{4}$ da distância entre dentes. A linha tracejada, no centro da ranhura do pólo desenergizado da parte superior da figura, tomada como referência, ilustra o avanço. O processo repete-se com os sucessivos polos a 90° e o rotor gira. Como no exemplo o rotor tem 25 dentes, uma volta é completada em 100 avanços (passos), ou seja, cada passo terá $3,6^\circ$.

Ressalte-se que as seqüências de energização dos enrolamentos U1, U2, U3 e B1, B2, B3, inicialmente apresentadas para motores de imã permanente de dois enrolamentos, aplicam-se também a motores híbridos de dois enrolamentos.

Apenas por uma questão de melhor simetria de forças em relação ao eixo, o motor híbrido de duas fases, geralmente é construído com oito pólos no estator [8], sendo que os pólos alternadamente pertencem a uma e a outra fase. A relação entre o número de passos do motor e o número de dentes do rotor mantém-se a mesma, ou seja, no exemplo com 50 dentes no rotor, ter-se-ia 200 passos por volta, portanto passo de $1,8^\circ$.

Motores híbridos de três fases e de cinco fases também são produzidos, porém em menor escala. A título ilustrativo pode-se dizer que motores híbridos de cinco fases são mais caros que os motores de duas fases, mas apresentam comportamento dinâmico superior. Motores híbridos de três fases são adequados para controle em malha fechada onde a posição final é determinada não pela geometria “dupla saliência” de um motor híbrido, mas sim por um sensor de posição inserido no circuito malha fechada. Por outro lado, no controle em malha aberta tem-se desvantagem na divisão do círculo nos inteiros mais convenientes [8].

2.4 – Física do Motor de Passos

A curva do torque T produzido pelo motor contra o ângulo do eixo θ , para motores de imã permanente ou híbridos aproxima-se da senoidal, sendo que para motores de relutância variável raramente é senoidal, podendo ser, por exemplo, dente de serra.

Ressalta-se que o equacionamento físico do motor de imã permanente e do motor híbrido é praticamente o mesmo [11], e aqui será tratado indistintamente.

Seja S o passo do motor (S de *step*). Para motores de relutância variável de 3, 4 e 5 enrolamentos, os períodos na curva $T \times \theta$ são respectivamente $3S$, $4S$ e $5S$, e para motores de imã permanente ou híbridos de 2 enrolamentos (utilizados neste projeto) o período é $4S$.

Defini-se torque de retenção [8] como o máximo torque estático que pode ser aplicado ao eixo de um motor energizado sem causar rotação continuada. Seja H o torque de retenção (H de *holding*). Então o torque para um enrolamento, em um motor de imã permanente ou híbrido de dois enrolamentos, é dado aproximadamente por:

$$T = -H \operatorname{sen}\left(\frac{\pi \theta}{2S}\right) \quad (2.1)$$

Observa-se que na Figura 2.7 o torque de retenção aparece como o ponto máximo na curva $T \times \theta$.

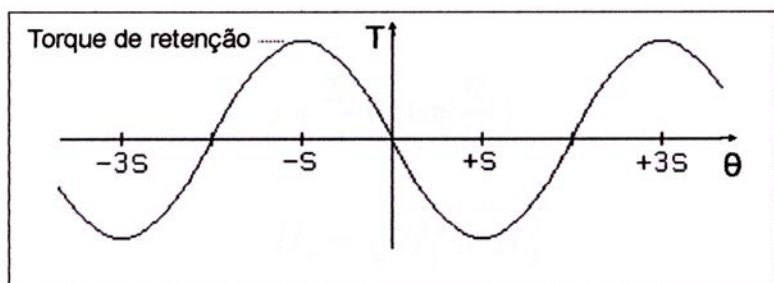


Figura 2.7 - Curva $T \times \theta$ para motor de imã permanente ou híbrido de dois enrolamentos.

Para o motor de imã permanente ou híbrido de dois enrolamentos, ocorre o meio passo quando se têm dois enrolamentos energizados ao mesmo tempo. A Figura 2.8 mostra a curva aproximada $T \times \theta$ para cada um dos enrolamentos e para a combinação dos dois enrolamentos, supondo que não haja saturação magnética.

Seja H_1 o torque de retenção para um enrolamento e H_r o torque de retenção resultante para dois enrolamentos, então:

$$H_r = \sqrt{2}H_1 \quad (2.2)$$

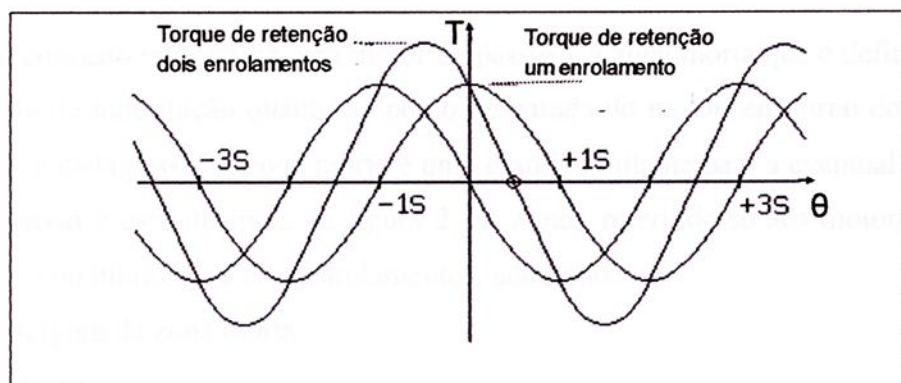


Figura 2.8 - Curva $T \times \theta$ para meio passo em um motor de imã permanente ou híbrido de dois enrolamentos.

Outra técnica importante na aplicação do motor de passo é o micropasso. Embora não tenha se revelado necessária neste projeto, oferece a possibilidade de um passo ainda menor e principalmente partidas e acelerações mais suaves pela limitação de torque. A Figura 2.9 apresenta as curvas aproximadas $T \times \theta$ de um motor de imã permanente ou híbrido de dois enrolamentos, supondo que não haja saturação magnética. Nota-se as curvas para cada um dos enrolamentos e para os dois enrolamentos combinados. Seja H_1 o torque de retenção para o enrolamento com equilíbrio em 0 radianos, H_2 o torque de retenção do enrolamento com equilíbrio em S

radianos, H_r o torque resultante e x a posição de equilíbrio resultante em radianos, então:

$$x = \frac{2S}{\pi} \arctan\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \quad (2.3)$$

$$H_r = \sqrt{H_1^2 + H_2^2} \quad (2.4)$$

Observa-se que nesta técnica será necessário adotar-se limitadores de corrente nos enrolamentos, por exemplo, através de PWM (*Pulse Width Modulation*).

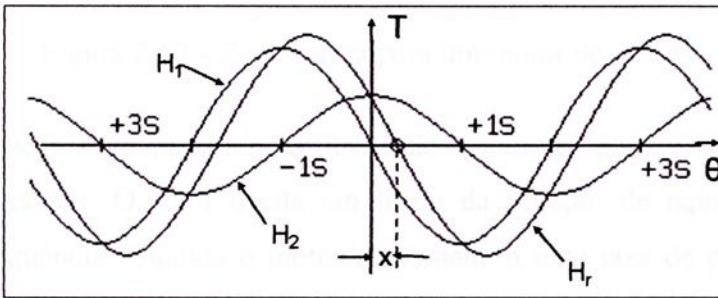


Figura 2.9 - Curva $T \times \theta$ para micropasso em um motor de ímã permanente ou híbrido de dois enrolamentos.

Um conceito importante para motor de passos é a zona morta que é definida como uma região de indefinição quanto ao ponto de parada do motor, em torno do ponto de equilíbrio, a cada passo. A zona morta é uma grande limitante para a eventual aplicação de micropasso e está ilustrada na figura 2.10. Ainda referindo-se aos motores de ímã permanente ou híbridos de dois enrolamentos, adotando:

d = largura da zona morta;

S = passo;

T_a = torque para vencer o atrito estático;

H = torque de retenção.

Tem-se:

$$d = \frac{4S}{\pi} \arcsen\left(\frac{T_a}{H}\right) \quad (2.5)$$

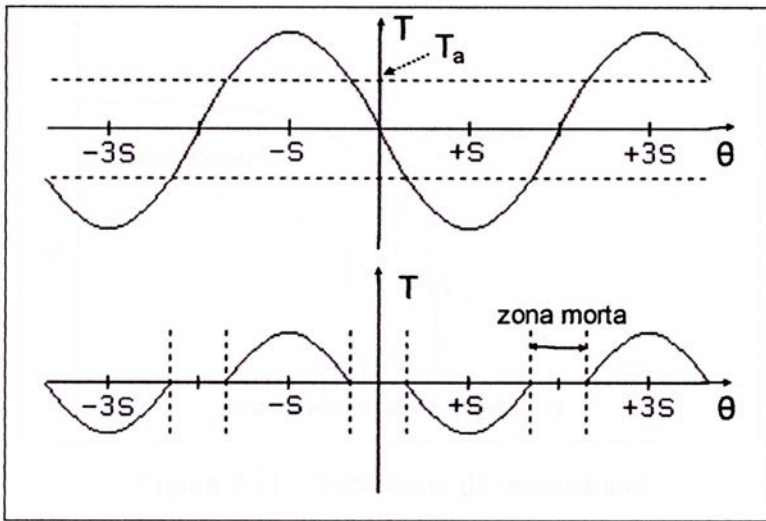


Figura 2.10 – Zona morta para um motor de passos

Outro aspecto a se ressaltar na física do motor de passos é o fenômeno da ressonância mecânica. O rotor oscila em torno da posição de equilíbrio com uma determinada frequência. Quando o motor é acionado a uma taxa de passos próxima a essa frequência, pode ocorrer o fenômeno da ressonância mecânica com o motor descontrolando-se, perdendo passos e parando. A frequência em questão é chamada frequência de ressonância e depende do momento de inércia do conjunto rotor e carga, e da constante “de mola” do sistema.

Existem muitas maneiras de superar esse indesejável efeito, seja através de correções mecânicas (mancais amortecedores, acoplamentos flexíveis, etc) seja através do controle elétrico.

Neste projeto em particular evitou-se operar próximo a frequência de ressonância indicada pelo fabricante dos motores. Um aspecto interessante é que a frequência de ressonância f_r (em Hz) é facilmente medível e através dela é possível obter-se a máxima aceleração A_{max} que o conjunto rotor mais carga pode atingir, por exemplo, em passos/s².

$$A_{max} = \frac{8\pi f_r^2}{\sqrt{2}} \quad (2.6)$$

A Figura 2.11 ilustra o fenômeno da ressonância, que ocorre para velocidades diferentes, se o motor atua com dois enrolamentos simultaneamente energizados, ou com um enrolamento energizado de cada vez. É possível desenvolver um controle que alterne estes dois modos de operação evitando as regiões de instabilidade.

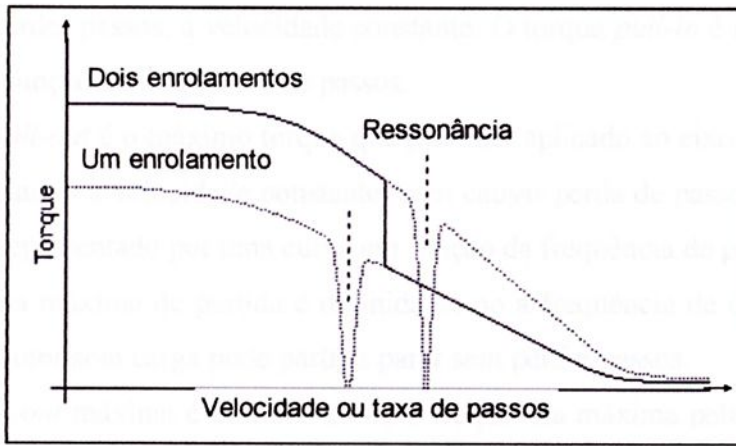


Figura 2.11 – Fenômeno da ressonância

2.5. Características dinâmicas de um motor de passos

Entende-se por características dinâmicas de um motor de passos as características relativas à partida e ao movimento, graficamente representadas na Figura 2.12.

Esclarece-se que não foram traduzidas as expressões *pull-in* e *pull-out* por entender-se que se tratam de expressões consagradas pelo uso, sem correspondentes perfeitos na língua portuguesa.

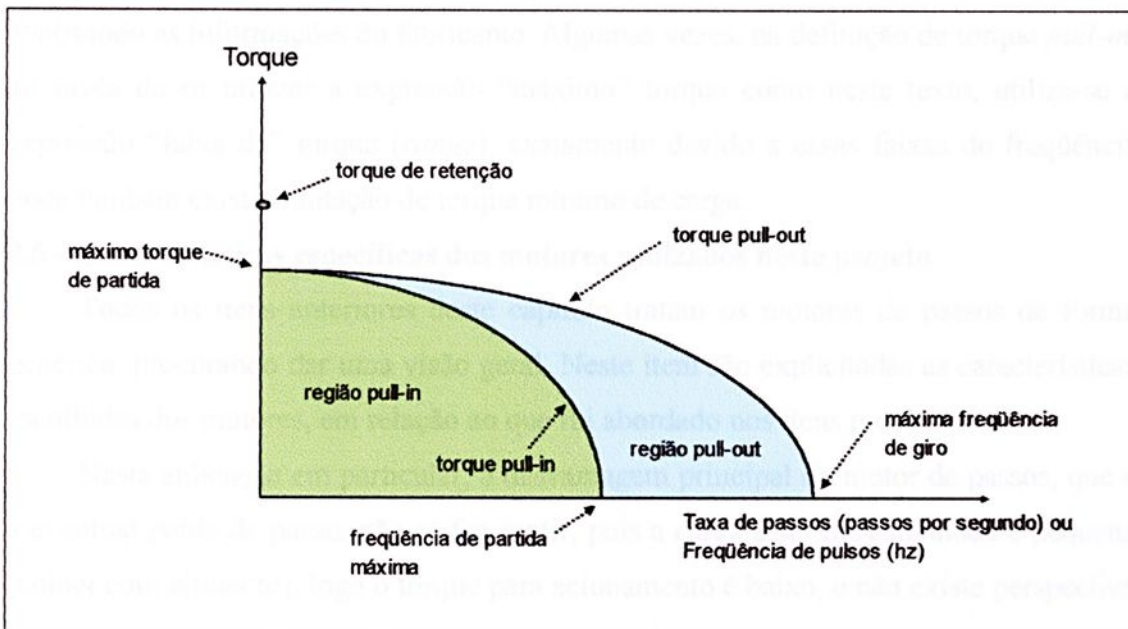


Figura 2.12 – Características dinâmicas do motor de passos.

Torque *pull-in* é o máximo torque pelo qual um motor de passos pode partir, parar e reverter o sentido de rotação sem perder passos. É também o máximo torque pelo qual um motor de passos energizado partirá e funcionará em sincronismo com os pulsos de

entrada, sem perder passos, à velocidade constante. O torque *pull-in* é representado por uma curva em função da frequência de passos.

Torque *pull-out* é o máximo torque que pode ser aplicado ao eixo de um motor de passos (funcionando a velocidade constante) sem causar perda de passo. O torque *pull-out* também é representado por uma curva em função da frequência de passos.

Frequência máxima de partida é definida como a frequência de controle máxima pela qual um motor sem carga pode partir e parar sem perder passos.

Taxa *pull-out* máxima é definida como a frequência máxima pela qual um motor sem carga pode funcionar sem perder passos, e é também conhecida como frequência máxima de giro.

Máximo torque de partida, também conhecido como máximo torque *pull-in* é definido como o torque de carga máximo com o qual o motor pode partir e sincronizar com um trem de pulsos de frequência muito baixa, como por exemplo, 10Hz.

Nas definições acima sempre que se faz referência ao torque exercido pela carga, considera-se um torque representado por um atrito não viscoso [8].

Existem faixas de frequência onde, para pequenas cargas, o motor não consegue partir ou pára de girar. Estas faixas e cargas indesejáveis foram evitadas no projeto analisando as informações do fabricante. Algumas vezes, na definição de torque *pull-in*, ao invés de se utilizar a expressão “máximo” torque como neste texto, utiliza-se a expressão “faixa de” torque (*range*), exatamente devido a essas faixas de frequência onde também existe limitação de torque mínimo de carga.

2.6 – Características específicas dos motores utilizados neste projeto

Todos os itens anteriores deste capítulo tratam os motores de passos de forma genérica, procurando dar uma visão geral. Neste item são explicitadas as características escolhidas dos motores, em relação ao que foi abordado nos itens precedentes.

Nesta aplicação em particular, a desvantagem principal do motor de passos, que é a eventual perda de passo, não se faz sentir, pois a carga a ser movimentada é pequena (colher com alimento), logo o torque para acionamento é baixo, e não existe perspectiva de perda de passo. Não obstante, na improvável hipótese disto ocorrer, reinicializar o sistema é simples e rápido.

Optou-se pelo motor híbrido de dois enrolamentos para todos os movimentos, que como já exposto anteriormente, é o tipo mais comum. Escolheu-se um modelo com 8 fios (2 para cada segmento de enrolamento) com configuração final de 6 fios, para todos os motores, o que permitiu a utilização da seqüência de controle U2, que oferece torque

adequado e controle menos oneroso. A escolha com base nas características dinâmicas de torque *versus* velocidade é feita no Capítulo 3.

Optou-se pelo passo de $1,8^\circ$, pela grande disponibilidade no mercado de motores com este passo, nada havendo que restringisse seu uso. O estudo da cinemática dos movimentos, realizada no Capítulo 3, não revelou a necessidade do uso de meio passo ou micropasso.

As faixas de velocidade utilizadas (velocidade máxima de 600 r.p.m.), conforme discriminadas no Capítulo 3, estão bem abaixo da máxima velocidade de giro (em torno de 2400 r.p.m.), diminuindo as possibilidades de se atingir regiões de ressonância do sistema.

A precisão de posicionamento, definida como a diferença entre a posição teórica e real do rotor, informada pelo fabricante, é $\pm 5\%$ do valor do passo, que é um valor típico de mercado, e que resulta em uma zona morta que não afeta este projeto. Ressalta-se que, em motores de passos, erros de posicionamento não são cumulativos.

Capítulo 3

Descrição Geral, Cinemática dos Movimentos e Dimensionamento Mecânico

3.1 Descrição Geral dos Movimentos

A idéia básica do projeto é utilizar uma mesa XY, construída com elementos padronizados disponíveis no mercado, ou seja, fusos de esferas, guias lineares, correias dentadas, etc, e associá-la a um movimento rotacional.

Foi concebida uma colher girando solidária ao eixo de rotação através de um sistema de polias, e pela combinação do movimento rotacional da colher com o movimento de translação ao longo do eixo longitudinal (em relação ao usuário), eixo este que se convencionou chamar de Y, procurou-se obter os movimentos típicos de coleta de alimento. Estes movimentos típicos de coleta de alimento já foram citados no Capítulo 1, para projetos anteriores em universidades norte-americanas, onde os referidos movimentos eram obtidos através do sistema mecânico quatro-barras.

O movimento ao longo do eixo X (transversal) é apenas para posicionar a colher no ponto programado de inserção no alimento, e posterior retorno ao ponto inicial onde a mesma fica acessível ao usuário.

Optou-se pela utilização de motores de passo, pelo conjunto de razões expostas no Capítulo 2, mas pode-se acrescentar ainda que a composição vetorial dos movimentos ficou muito facilitada com esta opção.

Um exemplo de mesa XY disponível no mercado é o da Figura 3.1.

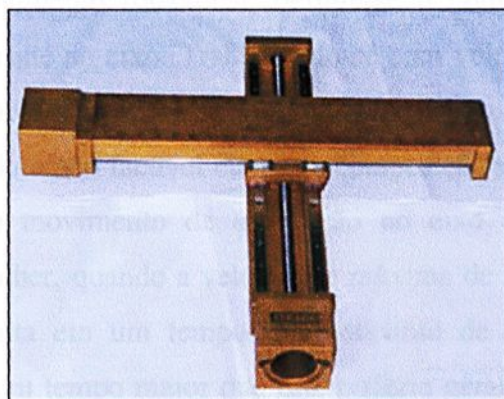


Figura 3.1 - Mesa XY disponível no mercado.

Na Figura 3.2 é esquematicamente mostrada, no plano XZ, a posição da colher, para a mesa alimentadora proposta.

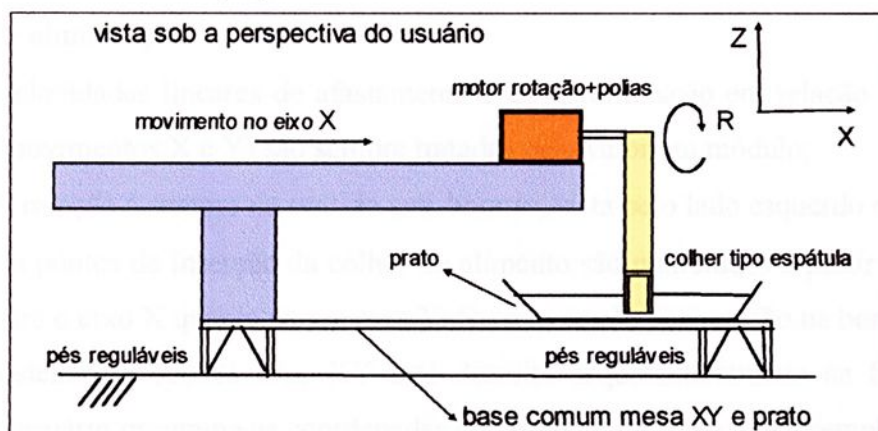


Figura 3.2 – Mesa XY com movimento rotacional da colher agregado.

O movimento total compreende o deslocamento da colher vazia, de uma posição próxima ao usuário do equipamento até a superfície da comida, atingindo um ponto pré-determinado, sendo em seguida inserida no alimento com ângulo adequado, colhendo-o em quantidade estabelecida, e retornando carregada à posição inicial, acessível ao usuário através de um movimento de cabeça para frente.

Os acionamentos dos movimentos são feitos através de fuso de esferas para o movimento Y, engrenagem e correia dentada para o movimento X, e através de polias e correia para o movimento rotacional R. Alguns aspectos quantitativos, justificados no item 3.5, serão aqui enfatizados para melhor compreensão:

- O passo da rosca sem fim do movimento Y é de 10mm, e o motor que produz este movimento possui passo de $1,8^\circ$, obtendo-se assim passo na carga de 0,05mm;
- Para o movimento X, o motor tem passo de $1,8^\circ$, e o passo na carga é de 0,5mm;
- Quanto ao movimento rotacional, definiu-se o comprimento de 240mm da ponta da colher até ao eixo. Trabalhando-se com velocidade máxima na carga de 15 r.p.m., obtém-se velocidade tangencial máxima na ponta da colher de 0,377 m/s, sendo então factível efetuar a composição vetorial do movimento de rotação com o movimento de translação no eixo Y. Nota-se que o ciclo completo da colher, quando a velocidade máxima de rotação durante o ciclo é 15 r.p.m., resulta em um tempo total máximo de aproximadamente 9,88s. Avalia-se que um tempo maior que este poderia gerar impaciência no usuário. Para o motor da rotação também foi escolhido passo de $1,8^\circ$.

São adotadas as seguintes convenções:

- Ponto de referência para medida das distâncias envolvidas como sendo o ponto de alimentação;
- Velocidades lineares de afastamento e de aproximação em relação ao usuário (movimentos X e Y) são sempre tratadas pelo valor em módulo;
- A rotação é sempre no sentido anti-horário, vista pelo lado esquerdo do usuário;
- Os pontos de inserção da colher no alimento são numerados a partir do 0 tanto para o eixo X quanto para o eixo Y. O prato recebe numeração na borda.

O sistema de coordenadas XY está descrito esquematicamente na Figura 3.3.

Quando o usuário programa as coordenadas do ponto de inserção, por exemplo, $X = 4$ e $Y = 2$, o alimento que será colhido será o do retângulo que é limitado em sua borda esquerda pela abscissa 4 e em sua borda superior pela ordenada 2.

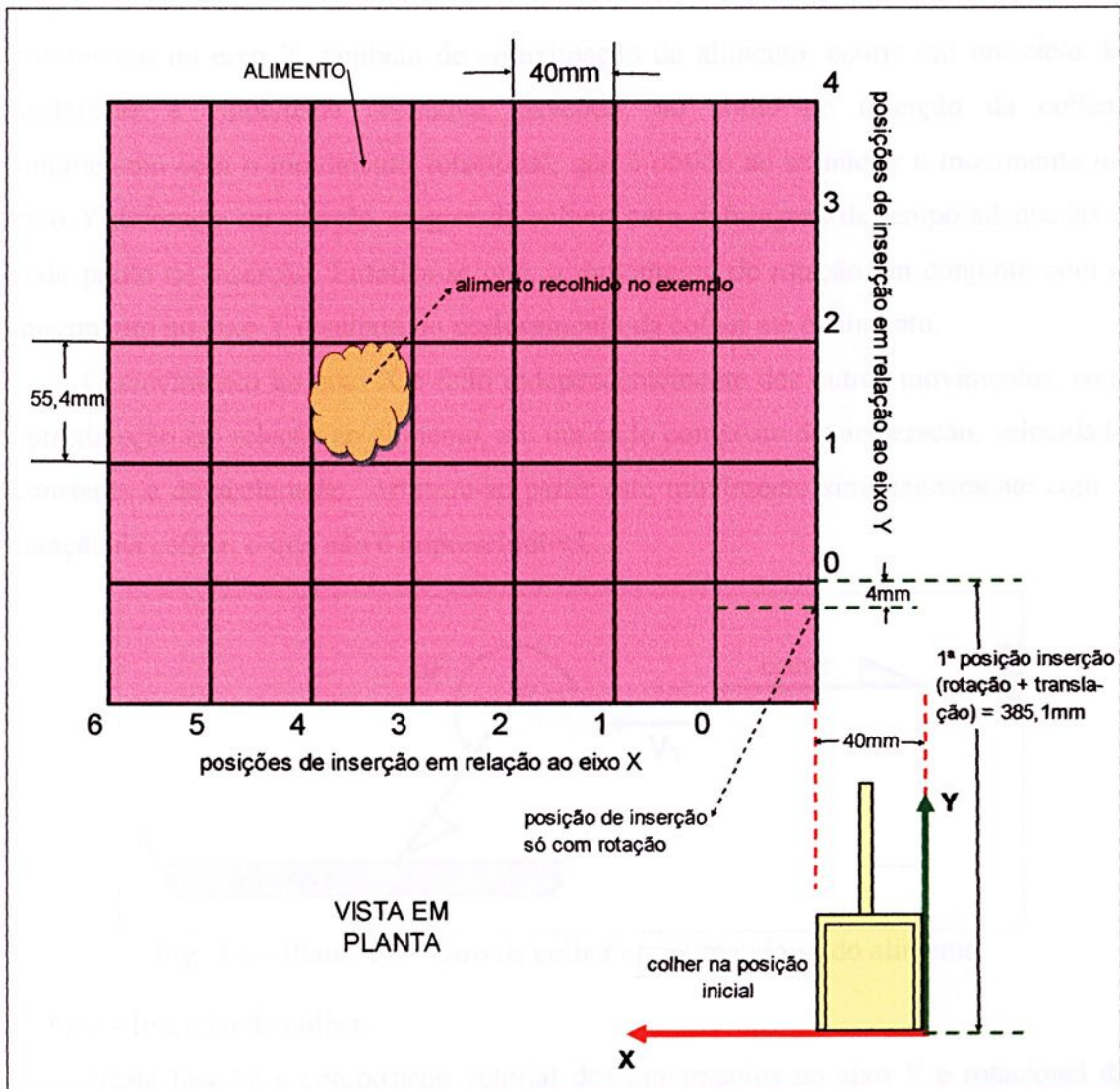


Figura 3.3 – Vista em planta esquemática do sistema de coordenadas do prato.

A análise do movimento é feita de forma mais fácil separando-o em 5 fases:

- 1ª Fase - Deslocamento da colher vazia até a superfície do alimento com o posicionamento nas coordenadas desejadas;
- 2ª Fase - Inserção da colher;
- 3ª Fase - Carregamento da colher;
- 4ª Fase - Colher carregada subindo até atingir a posição horizontal;
- 5ª Fase - Deslocamento da colher carregada aproximando-se do usuário.

As descrições sucintas desses movimentos são apresentadas a seguir:

1ª Fase - Deslocamento da colher vazia até a superfície do alimento.

O primeiro movimento é a rotação da colher, que perfaz um giro de 234° até tocar a comida, e possui as fases de aceleração e velocidade constante, estando esquematicamente mostrado na Figura 3.4. O giro é de 234° , pois se estabeleceu que o ângulo da colher, em relação a vertical, no início da inserção no alimento, é de 36° . O movimento no eixo Y, também de aproximação do alimento, ocorre em um ciclo de aceleração e velocidade constante, havendo, no ponto de inserção da colher, sincronismo com o movimento rotacional, que é obtido ao se iniciar o movimento no eixo Y defasado em relação ao giro da colher, com defasagens de tempo adequadas a cada ponto de inserção. Enfatiza-se que, o movimento de rotação em conjunto com o movimento no eixo Y resultam no deslocamento da colher até o alimento.

O movimento no eixo X é feito independentemente dos outros movimentos, com aproximação em relação ao alimento, em um ciclo composto de: aceleração, velocidade constante e desaceleração. Arbitrou-se partir este movimento simultaneamente com a rotação da colher, o que não é imprescindível.

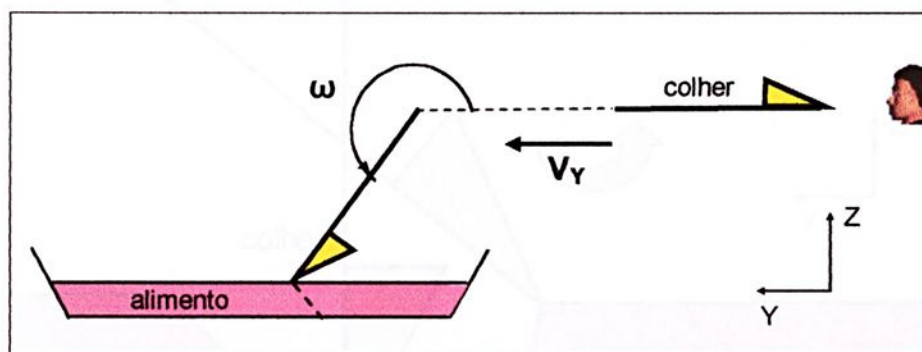


Fig. 3.4 – Plano YZ - Giro da colher aproximando-se do alimento.

2ª Fase - Inserção da colher.

Nesta fase há a composição vetorial dos movimentos no eixo Y e rotacional da colher no plano YZ, para que a ponta da colher descreva um movimento retilíneo, com

inserção no alimento da forma mais favorável possível, conforme esquematicamente mostrado na Figura 3.5. A velocidade no eixo Y necessita ter o sentido de afastamento do usuário.

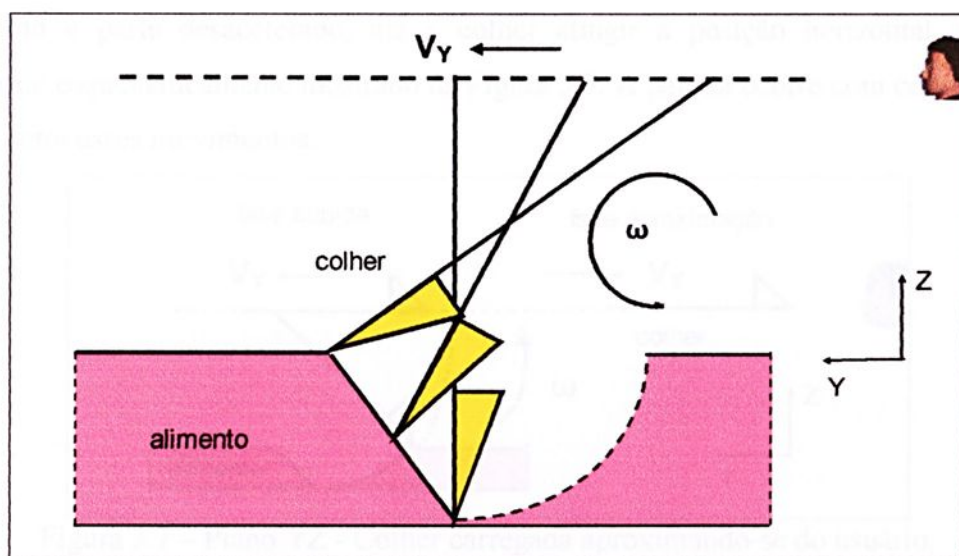


Figura 3.5 – Plano YZ - Inserção da colher.

3ª Fase - Carregamento da colher.

Nesta fase há a composição vetorial do movimento linear no eixo Y e rotacional da colher no plano YZ, para que a mesma possa emergir com quantidade limitada de alimento, conforme esquematicamente mostrado na Figura 3.6. A velocidade no eixo Y tem o sentido de afastamento do usuário, como na 2ª fase, mas aqui difere fundamentalmente, pois é mantida constante, e a velocidade da rotação da colher é ajustada para controlar a quantidade de alimento coletada.

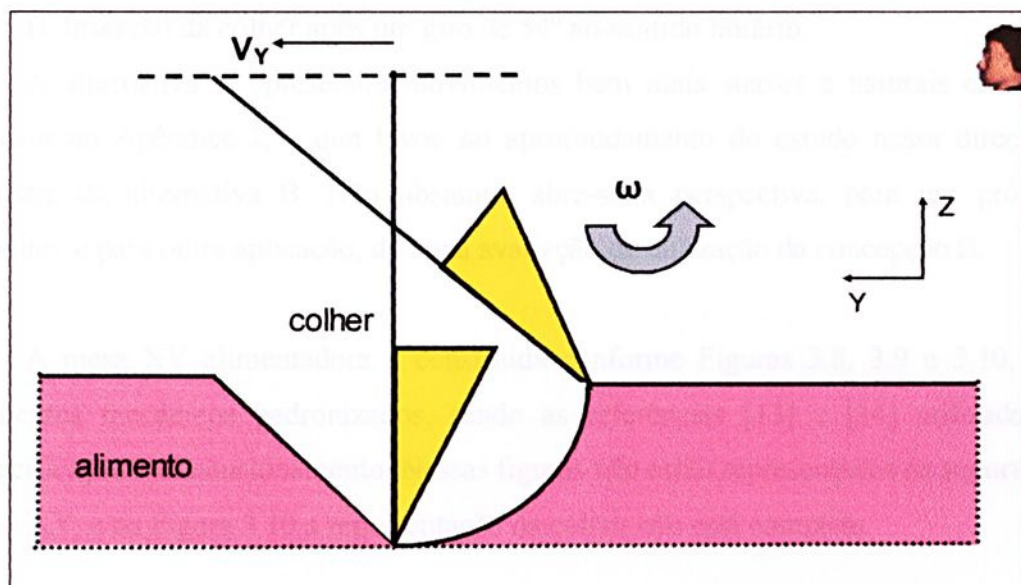


Figura 3.6 – Plano YZ - Carregamento da colher.

4ª Fase - Colher carregada sobe até atingir a posição horizontal.

Tem-se a composição do movimento desacelerado no eixo Y (ainda de afastamento do usuário) com o movimento rotacional ascendente no plano YZ, parte acelerado e parte desacelerado, até a colher atingir a posição horizontal e parar, conforme esquematicamente mostrado na Figura 3.7. A parada ocorre com coordenação suave entre esses movimentos.

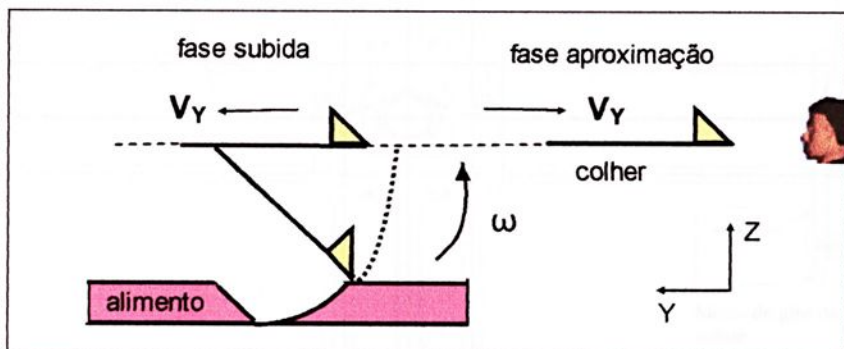


Figura 3.7 – Plano YZ - Colher carregada aproximando-se do usuário.

5ª Fase – Deslocamento da colher aproximando-se do usuário.

Os movimentos lineares no eixo X e Y, em ciclos de aceleração, velocidade constante e desaceleração, proporcionarão a chegada da colher ao ponto em que ficará acessível ao usuário, conforme esquematicamente mostrado na Figura 3.7.

Quando do início dos estudos, foram consideradas duas possibilidades [12], referenciadas ao lado esquerdo do usuário:

- A. Inserção da colher após um giro de 234° no sentido anti-horário;
- B. Inserção da colher após um giro de 54° no sentido horário.

A alternativa A apresentou movimentos bem mais suaves e naturais conforme exposto no Apêndice I, o que levou ao aprofundamento do estudo nessa direção, e descarte da alternativa B. Não obstante, abre-se a perspectiva, para um próximo trabalho, e para outra aplicação, de nova avaliação da utilização da concepção B.

A mesa XY alimentadora é construída conforme Figuras 3.8, 3.9 e 3.10, com elementos mecânicos padronizados, sendo as referências [13] e [14] utilizadas na especificação e dimensionamento. Nessas figuras não estão representados os suportes da mesa XY, e na Figura 3.10 a representação da colher não está completa.

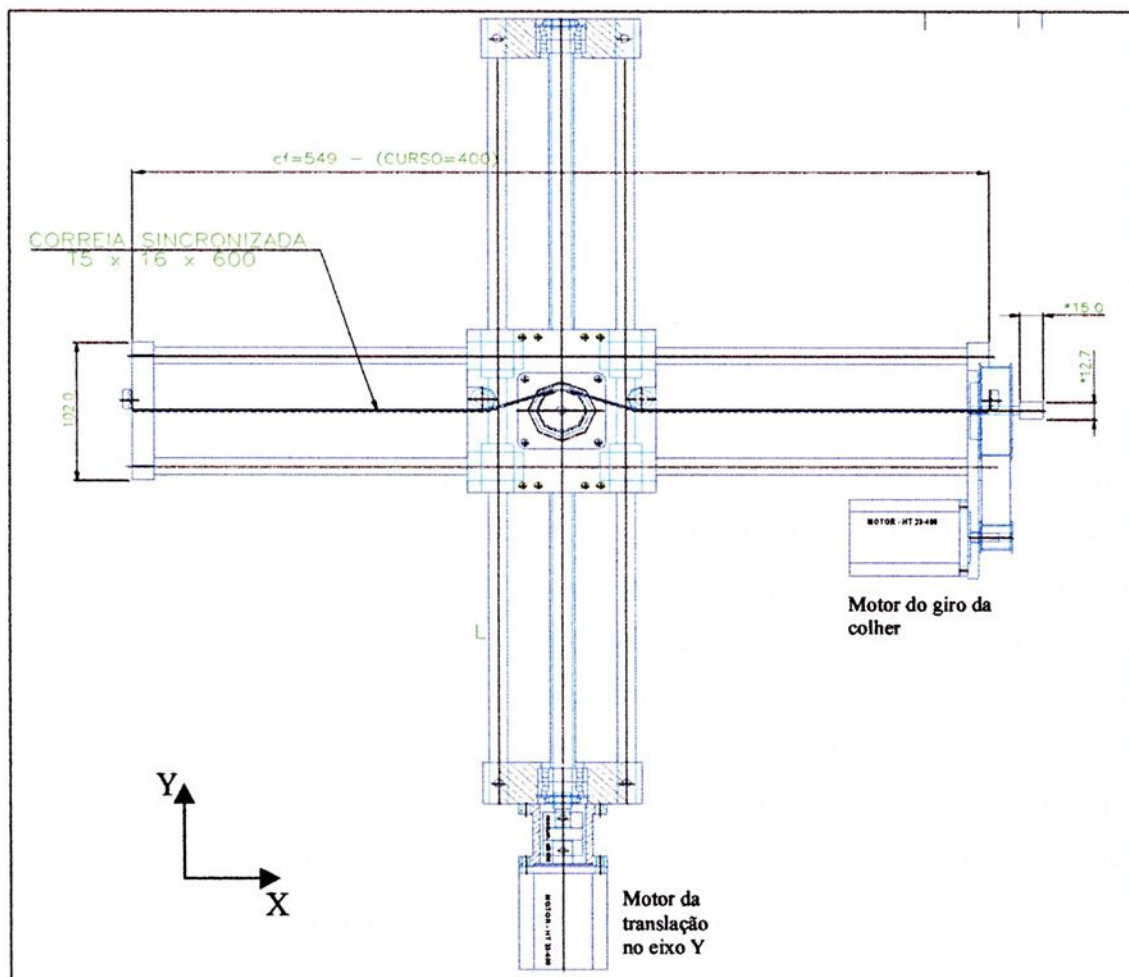


Figura 3.8 – Mesa XY alimentadora – Vista em planta.

A mesa XY é constituída basicamente de:

Movimento no eixo Y – Compreende um sistema de fuso de esferas, que se compõe de uma rosca sem fim, neste caso com passo de 10mm e diâmetro de 16mm, associada a uma castanha de esferas recirculantes, atuando com dois eixos lisos em paralelo (diâmetro 16mm), que garantem estabilidade ao movimento em questão, movimento este que têm um percurso máximo de até 480mm. Sobre o conjunto fuso de esferas e eixos lisos, é montado um carro com quatro rolamentos lineares embutidos (dois por eixo liso), que permitem o deslizamento do mesmo, ao longo do eixo Y, com mínimo de atrito. Este carro é fixado na castanha (tipo simples), que por sua vez, se desloca pela ação da rosca sem fim, que gira acionada por um motor de passos, através de um acoplamento flexível sem folga.

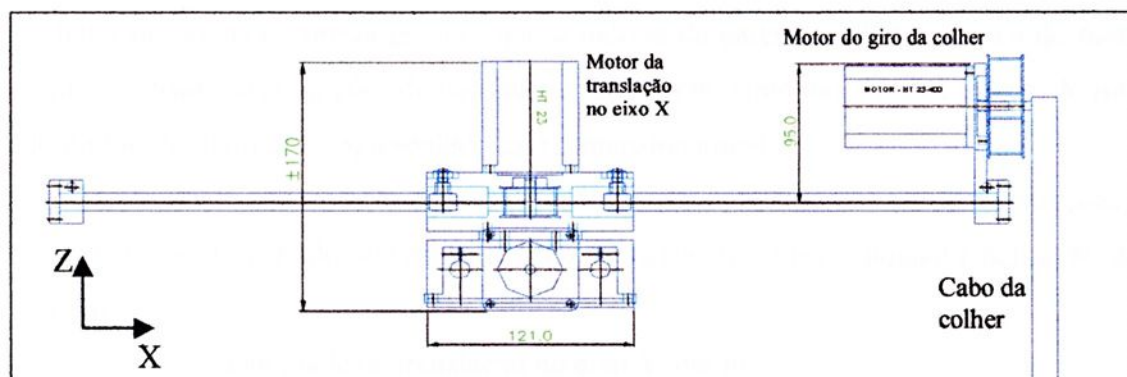


Figura 3.9 – Mesa XY alimentadora – Detalhe – Elevação.

Movimento no eixo X - No referido carro é montado um sistema, que compreende uma engrenagem e uma correia dentada, desempenhando o papel de um sistema “pinhão-cremalheira”, e é acionado por um motor de passos, obtendo-se assim o movimento ao longo do eixo X, de uma “plataforma” solidária a correia dentada, com um percurso máximo de até 400mm. A plataforma citada é composta por dois eixos lisos paralelos (diâmetro 16mm), com peças de fechamento unindo os eixos em ambas as extremidades. Esses eixos deslizarão juntos, através de quatro rolamentos lineares embutidos no carro (dois para cada eixo). Estão sendo utilizadas: engrenagem com diâmetro primitivo 31,83mm e 20 dentes, e correia com passo 5mm e largura 16mm.

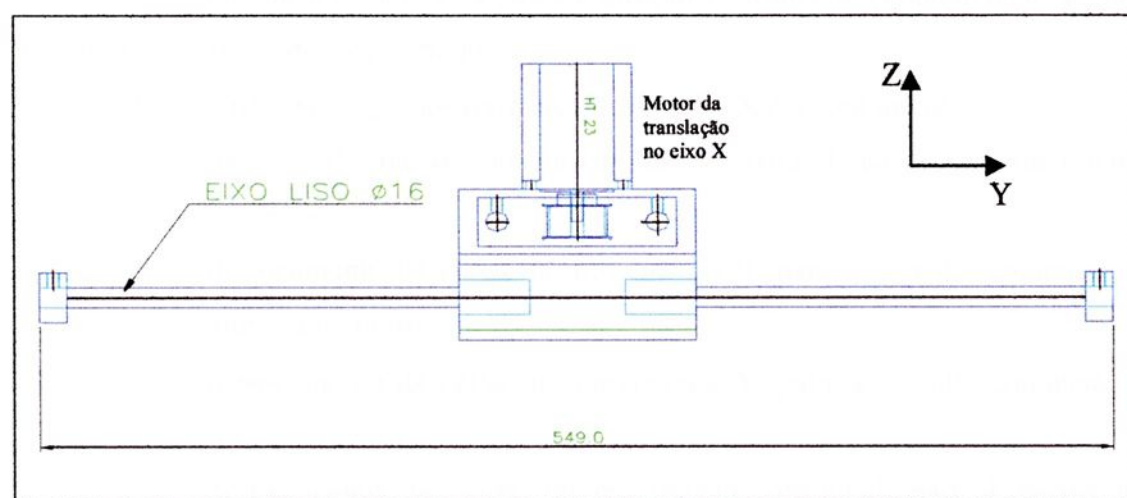


Figura 3.10 – Mesa XY alimentadora – Detalhe – Vista Lateral.

Movimento de rotação da colher – Foi previsto um conjunto composto de um motor de passos que aciona um sistema com duas polias e correia, e que vai girar o suporte da colher, proporcionando uma redução de velocidade 4:1. Todo este conjunto está montado em uma das extremidades da plataforma do movimento no eixo X. O

sistema de polias e correia garante que a inércia da carga acoplada ao eixo do motor fique adequada às condições de partida, ou seja, no máximo dez vezes a inércia do rotor do motor. No item 3.4 é apresentado este dimensionamento.

Face ao grande número de variáveis envolvidas nas figuras, nas demonstrações, e nas planilhas de cálculo subseqüentes, faz-se necessária uma cuidadosa definição das mesmas:

V_Y	velocidade de translação no eixo Y, em m/s;
V_X	velocidade de translação no eixo X, em m/s;
V_{tang}	velocidade tangencial no movimento de rotação, em m/s;
V_{tangy}	componente da velocidade tangencial da rotação, na direção Y, em m/s;
V_{tangz}	componente da velocidade tangencial da rotação, na direção Z, em m/s;
V_{RY}	composição (resultante) da velocidade V_Y de translação, no eixo Y, com a componente V_{tangy} da velocidade tangencial da rotação na direção Y, em m/s;
Θ	ângulo entre a vertical e a colher na inserção, variando de 36° a 0° ;
Ψ	ângulo entre a vertical e a colher, na fase de enchimento (0° a 36°), e na fase posterior de subida (36° a 90°);
α	ângulo da colher em relação a sua posição inicial (na horizontal), na fase em que a colher vazia gira em direção ao alimento, variando de 0° a 234° ;
$Passo(^{\circ})$	passo do motor em graus;
$Passo(m)$	passo na carga, nos movimentos lineares X e Y, em metros;
n_{pas}	número de passos no movimento Y para 1 passo no movimento rotacional;
$P_{sistema}$	deslocamento da carga, no movimento X, para uma volta completa do motor, em metros;
P_{rosca}	deslocamento da carga, no movimento Y, para uma volta completa da rosca, em metros;
P_{carga}	deslocamento da carga, no movimento rotacional, para 4 passos do motor, em metros;
f_{clock}	freqüência de relógio do microcontrolador, em MHz;
t_{clock}	período de relógio do microcontrolador, em nanossegundos;
N_{clock}	número de ciclos de relógio para 1 passo;

N_x	coordenada de inserção, no eixo X, numerada a partir do zero;
N_y	coordenada de inserção, no eixo Y, numerada a partir do zero;
ΔY	distância entre pontos de inserção adjacentes, no eixo Y, em mm;
ΔX	distância entre pontos de inserção adjacentes, no eixo X, em mm;
R	comprimento da colher, da ponta ao centro do eixo de rotação, em metros;
n	redução do sistema de polias;
K_1	cotangente de δ , onde δ é o ângulo entre a superfície horizontal e a reta descrita pela ponta da colher na inserção;
K_2	relação entre o deslocamento no eixo Y na fase de carregamento e o ângulo ψ da colher com a vertical, em m/rad;
A	área da seção transversal da colher carregada, em m^2 .

As variáveis m , M , f_s , g_s , β , f_m , Δt_m , t_m , que aparecem nas planilhas, são definidas no item 3.1.1, quando da descrição do algoritmo utilizado. Eventualmente, para maior clareza, variáveis já aqui definidas, voltam a ser explicadas no texto. Todas as variáveis de velocidade são utilizadas em módulo. As expressões onde estão relacionadas já prevêm os sinais necessários referentes aos sentidos.

Excepcionalmente neste capítulo, as planilhas de cálculo são numeradas indicando em primeiro lugar o capítulo (3), em seguida o item (1, 2, 3), depois qual fase do movimento se referem (1, 2, 3, 4, 5), e finalmente a qual movimento se aplicam (X, Y, R, G), onde G envolve, ou composição de movimentos, ou totalização de várias fases. Eventualmente, dentro de uma mesma fase e movimento, poderá haver mais de uma planilha, recebendo então numeração seqüencial (1, 2,...).

Com relação aos gráficos, para cada caso, procurou-se adotar escala que, na medida do possível, evitasse a sobreposição dos pontos e proporcionasse melhor visualização. Com isso sacrificou-se a uniformidade de escalas.

3.1.1 – Algoritmo de aceleração e desaceleração dos motores de passo

Algoritmos pesquisados

Foram pesquisados vários algoritmos para cálculo dos tempos de passo nas acelerações e desacelerações, dentre os quais destacam-se:

- Algoritmo para aceleração linear [8] onde a taxa de passos ou frequência de pulsos para a fase de velocidade constante, a ser alcançada, já é a frequência de pulsos no último passo da fase de aceleração, lembrando que a frequência de pulsos no último passo é o inverso do tempo de duração desse passo. Além da

rampa de aceleração desse algoritmo ser mais íngreme do que a do algoritmo escolhido (descrito no final deste item), ele exige que se estabeleça a aceleração, sendo que se têm as velocidades inicial e final, e deseja-se, entre outras coisas, calcular a aceleração;

- Algoritmo para aceleração ótima [15] que garante que a carga será transferida de um lugar para o outro tão rapidamente quanto possível, ou seja, o motor será acelerado a taxa mais alta possível até que a velocidade desejada seja alcançada. O tempo de desaceleração também é tão pequeno quanto possível. Com a colher carregada este algoritmo é indesejável, pois o alimento poderia cair, e com a colher vazia a necessidade de otimização da aceleração não é tão imperiosa que justifique sua utilização.

O algoritmo escolhido, descrito a seguir, mostrou-se, através dos cálculos efetuados nas planilhas apresentadas, ser adequado a esta aplicação.

Cálculo dos intervalos de pulso e da aceleração linear de motores de passo (algoritmo escolhido)

A análise parte do conceito de variação contínua da taxa de passos f [8], que é a frequência dos pulsos de comando do motor de passos, e é dada por:

$$f = g_s + \beta t \quad (3.1)$$

Os tempos de aplicação dos pulsos são designados por:

$$t_1 = 0, t_2, t_3, t_4, \dots, t_m, \dots$$

Sendo que, na verdade, a taxa de passos f_1 para o passo 1, é:

$$f_1 = \frac{1}{2}(f(t_1) + f(t_2)) \quad (3.2)$$

Onde $f(t_1) = g_s$;

A taxa de passos f_2 para o passo 2 é:

$$f_2 = \frac{1}{2}(f(t_2) + f(t_3)) \quad (3.3)$$

e assim sucessivamente.

As seguintes premissas deverão ser atendidas:

- no caso da aceleração a partir do repouso, o motor é capaz de partir à taxa de passos f_1 ;
- o motor de passos pode ser acelerado a β passos/s² até a taxa f_s correspondente a velocidade contínua do motor.

Para o algoritmo escolhido a taxa de passos f_s só é alcançada no passo M.

A Figura 3.11 mostra a curva da taxa de passos ou frequência dos pulsos de comando do motor de passos, contra os tempos de aplicação de pulso.

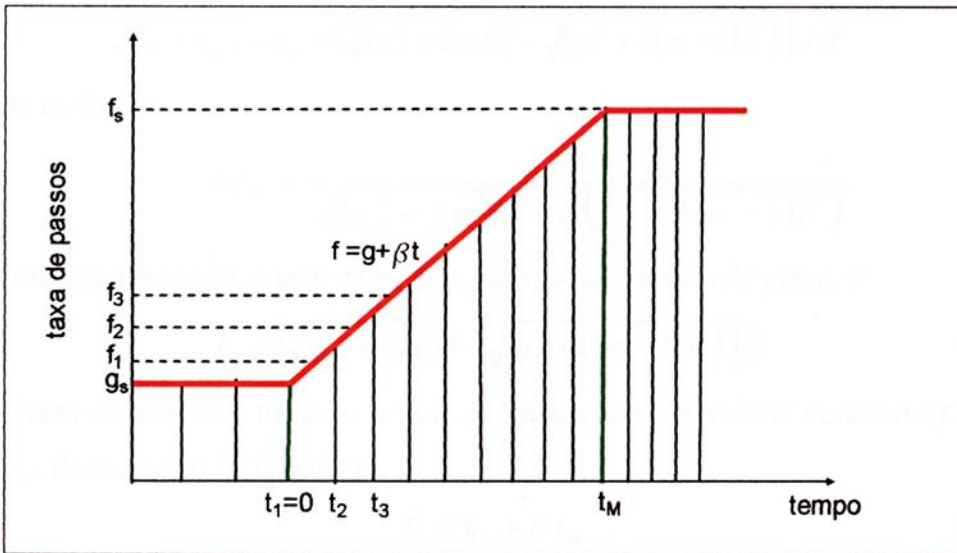


Figura 3.11 – Aceleração com velocidade constante no passo M.

O intervalo de pulso Δt_m é estabelecido como:

$$\Delta t_m = t_{m+1} - t_m \quad (3.4)$$

A frequência de pulsos ou taxa de passos f_m para o período Δt_m é definida como:

$$f_m = 1/\Delta t_m \quad (3.5)$$

Este valor é idêntico ao valor de f na equação (3.1) para $t = t_m + \Delta t_m/2$

Determina-se a quantidade g_s na equação (3.1) de tal forma que f para $t = \Delta t_1/2$ é igual a f_1 . Uma vez que o primeiro intervalo de pulso Δt_1 deve ser igual a $1/f_1$, a equação (3.1) resulta em:

$$f_1 = g_s + \beta \frac{\Delta t_1}{2} = g_s + \beta \frac{1}{2f_1} \quad (3.6)$$

Conseqüentemente g_s é determinada por:

$$g_s = f_1 - \frac{\beta}{2f_1} \quad (3.7)$$

O tempo de pulso t_m é calculado com base na área sob a rampa:

$$[g_s + (g_s + \beta t_m)]t_m = 2(m-1) \quad (3.8)$$

Isto resulta na equação quadrática:

$$\beta t_m^2 + 2g_s t_m - 2(m-1) = 0 \quad (3.9)$$

Portanto:

$$t_m = \left(\sqrt{(g_s^2 + 2(m-1)\beta)} - g_s \right) / \beta \quad (3.10)$$

O intervalo de pulso Δt_m é:

$$\Delta t_m = t_{m+1} - t_m = \left(\sqrt{g_s^2 + 2m\beta} - \sqrt{g_s^2 + 2(m-1)\beta} \right) / \beta \quad (3.11)$$

Ou na forma:

$$\Delta t_m = \frac{2}{\sqrt{g_s^2 + 2m\beta} - \sqrt{g_s^2 + 2(m-1)\beta}} \quad (3.12)$$

Conseqüentemente, a taxa de passos, para cada intervalo de pulso, é:

$$f_m = \left(\sqrt{g_s^2 + 2m\beta} - \sqrt{g_s^2 + 2(m-1)\beta} \right) / 2 \quad (3.13)$$

A taxa de passos f torna-se a taxa de passos em velocidade constante f_s para o tempo t_M . Portanto em (3.1) tem-se:

$$f_s = g_s + \beta t_M \quad (3.14)$$

Da equação (3.10) tem-se:

$$\beta t_M = \sqrt{g_s^2 + 2(M-1)\beta} - g_s \quad (3.15)$$

Portanto:

$$f_s = \sqrt{g_s^2 + 2(M-1)\beta} \quad (3.16)$$

Sendo que a partir dessa relação chega-se a aceleração requerida, ou seja, para $m < M$, a aceleração em passos/s² é dada por:

$$\beta = \frac{f_s^2 - g_s^2}{2(M-1)} \quad (3.17)$$

A partir da relação (3.16) obtêm-se:

$$g_s^2 = f_s^2 - 2(M-1)\beta \quad (3.18)$$

Substituindo a equação (3.18) nas equações (3.10), (3.12) e (3.13) chega-se às seguintes equações finais.

Os tempos em que são aplicados os pulsos, em segundos, são dados por:

$$t_m = \frac{2(m-1)}{\sqrt{(f_s^2 - 2(M-m)\beta)} + \sqrt{(f_s^2 - 2(M-1)\beta)}} \quad (3.19)$$

A duração dos pulsos, em segundos, é dada por:

$$\Delta t_m = \frac{2}{\sqrt{(f_s^2 - 2(M-m-1)\beta)} + \sqrt{(f_s^2 - 2(M-m)\beta)}} \quad (3.20)$$

A taxa de passos, em passos/s, é dada por:

$$f_m = \frac{1}{\Delta t_m} = (\sqrt{(f_s^2 - 2(M - m - 1)\beta)} + \sqrt{(f_s^2 - 2(M - m)\beta)})/2 \quad (3.21)$$

Na fase de velocidade contínua, ou seja, $f_m = f_s$, para $m \geq M$, têm-se:

$$t_m = t_M + (m - M)/f_s \quad (3.22)$$

$$\Delta t_m = 1/f_s \quad (3.23)$$

3.1.2 Construção das Planilhas de Cálculo – Aspectos Gerais

As planilhas de cálculo foram construídas utilizando a seguinte metodologia:

- Nas rampas de aceleração e desaceleração lineares utilizou-se irrestritamente o algoritmo descrito no item 3.1.1, para o cálculo dos tempos, duração e frequência de passos, ou seja, as colunas t_m , Δt_m e f_m foram calculadas empregando as expressões (3.19), (3.20), (3.21), respectivamente. O cálculo auxiliar da aceleração β é feito através da relação (3.17);
- A velocidade linear V_X é calculada nas planilhas, através da expressão:

$$V_X = \frac{\text{Passo}}{\Delta t_m} \quad (3.24)$$

Sendo:

$$\text{Passo} = P_{\text{sistema}} (\text{Passo}^\circ)/360 \quad (3.25)$$

- A velocidade linear V_Y é calculada nas planilhas, através da expressão:

$$V_Y = \frac{\text{Passo}}{\Delta t_m} \quad (3.26)$$

Sendo:

$$\text{Passo} = P_{\text{rosca}} (\text{Passo}^\circ)/360 \quad (3.27)$$

- A velocidade tangencial V_{tang} é calculada nas planilhas, através da expressão:

$$V_{\text{tang}} = \frac{P_{\text{carga}}}{n \cdot \Delta t_m} \quad (3.28)$$

Sendo n a relação de transmissão do sistema de polias e correia da rotação da colher, e P_{carga} = distância percorrida sobre a trajetória circular para 4 passos do motor, dada por:

$$P_{\text{carga}} = \frac{\pi R \text{Passo}^\circ}{180} \quad (3.29)$$

- Nos trechos de velocidade constante, a partir da velocidade desejada, e através das relações 3.24, 3.26, 3.28, obteve-se o tempo de duração dos pulsos, coluna

Δt_m , e através da relação 3.23 do algoritmo, calculou-se a frequência de pulsos, coluna f_m , designação genérica uma vez que se trata da frequência de pulsos constante f_s . Os tempos totais nesses trechos, coluna Tempo nas planilhas de cômputo geral, são calculados através da expressão 3.22 do algoritmo;

- Nas fases em que as velocidades V_Y e V_{tang} são determinadas pelos aspectos próprios da fase (Ex.: no carregamento), obteve-se o tempo de duração dos pulsos, coluna Δt_m , através das relações 3.26 e 3.28, e calculou-se a frequência de pulsos, coluna f_m , através da relação 3.21 do algoritmo. Os tempos de aplicação de pulsos t_m são obtidos pela soma dos tempos de duração dos pulsos anteriormente aplicados.
- Como se pode verificar, a velocidade tangencial, calculada nas planilhas através das expressões 3.28 e 3.29, é aproximada, utilizando-se a velocidade média em um arco correspondente a quatro passos do motor;
- Calcula-se o número de ciclos de relógio dos passos, coluna N_{clock} , pela divisão da duração do passo Δt_m pelo período de relógio $t_{clock} = 125\text{ns}$. O período de relógio é função da frequência de relógio do microcontrolador escolhido, no caso 8MHz. O número de ciclos de relógio dos passos é necessário para a programação do sistema.

3.2 Cinemática dos movimentos

Introdução

Para o cálculo de todas as rampas lineares de aceleração e desaceleração, com seus respectivos tempos e durações de passos, será utilizado o algoritmo descrito no item 3.1.1, para os três graus de liberdade. Portanto, evitar-se-á citar o algoritmo a cada aplicação. Existem, na composição de movimentos, ciclos de aceleração e desaceleração não lineares, para os quais as formas de cálculo dos tempos e durações de passos serão devidamente estabelecidas e explicitadas. As rampas de aceleração e desaceleração linear, com a colher vazia, para os movimentos X e Y, estão previstas em 20 passos de $1,8^\circ$. As rampas de aceleração e desaceleração linear, com a colher cheia, para os movimentos X e Y, foram estabelecidas com 40 passos de $1,8^\circ$, para maior suavidade.

Para o movimento rotacional, as rampas lineares estão definidas em 20 degraus, cada degrau constituído de 4 passos iguais de $1,8^\circ$. Isto atende ao propósito de se manter a composição de movimentos como estabelecida no início do projeto, mesmo em face da necessidade de utilização do sistema de polias com redução de velocidade 4:1.

Ao longo deste capítulo serão calculadas as acelerações e dado para cada caso um parecer. Como não há referências de valores de aceleração em equipamentos similares, estes pareceres podem ser interpretados como subjetivos. Contudo, no Capítulo 6, mostra-se que qualquer detalhe pode ser aprimorado e adaptado às exigências do usuário, a qualquer tempo, pois o projeto é bastante flexível.

Para os movimentos X e Y, o cálculo da distância percorrida é feito através do número de passos, levando em consideração a redução proporcionada pelo sistema mecânico de transmissão envolvido.

Para cada fase e movimento é apresentado um gráfico da velocidade respectiva contra o tempo. Os gráficos do conjunto geral de movimentos são apresentados em 3.4.

3.2.1 Análise detalhada da 1ª fase - Deslocamento da colher vazia do ponto inicial até a superfície do alimento com posicionamento nas coordenadas desejadas

O ciclo começa com a colher vazia, no ponto inicial do movimento, junto ao usuário, sendo feita a programação das coordenadas (N_x , N_y) de inserção da colher no alimento, $N_x = 0$ a 6; $N_y = 0$ a 4, conforme figura 3.3. Em seguida é dada a partida no sistema. Inicia-se imediatamente o movimento de rotação da colher vazia, no sentido anti-horário (visto pelo lado esquerdo do usuário), em um ciclo composto de aceleração (angular) linear e velocidade constante, até atingir o ponto N_y , velocidade esta definida compatível com a velocidade de rotação de inserção da colher no referido ponto, de

acordo com o algoritmo utilizado, para que a transição entre as fases seja suave. O tempo total da 1ª fase é dado pelo tempo despendido neste deslocamento. Os cálculos relativos a este movimento estão na Planilha de Cálculo 3.2.1.R e os valores da velocidade tangencial em função do tempo são apresentados no Gráfico 3.1, sendo que na fase de velocidade constante estão apenas representados alguns pontos a título ilustrativo e na fase de aceleração estão representados os degraus que equivalem a quatro passos.

PLANILHA 3.2.1.R - MOVIMENTO DE ROTAÇÃO - 1ª FASE							
ACELERAÇÃO							
m	$\alpha_i(^{\circ})$	$\alpha_f(^{\circ})$	$\Delta t_m(s)$	$t_m(s)$ cada 4 passos	$f_m(pps)$	$v_{tang}(m/s)$	N_{clock}
1	0,0	1,8	0,044721	0,000000	22,4	0,0422	357.768
2	1,8	3,6	0,018524	0,178884	54,0	0,1018	148.192
3	3,6	5,4	0,014214	0,252980	70,4	0,1326	113.712
4	5,4	7,2	0,011983	0,309836	83,5	0,1573	95.864
5	7,2	9,0	0,010557	0,357768	94,7	0,1786	84.456
6	9,0	10,8	0,009545	0,399996	104,8	0,1975	76.360
7	10,8	12,6	0,008777	0,438176	113,9	0,2148	70.216
8	12,6	14,4	0,008170	0,473284	122,4	0,2307	65.360
9	14,4	16,2	0,007673	0,505964	130,3	0,2457	61.384
10	16,2	18,0	0,007257	0,536656	137,8	0,2597	58.056
11	18,0	19,8	0,006903	0,565684	144,9	0,2731	55.224
12	19,8	21,6	0,006595	0,593296	151,6	0,2858	52.760
13	21,6	23,4	0,006326	0,619676	158,1	0,2980	50.608
14	23,4	25,2	0,006087	0,644980	164,3	0,3097	48.696
15	25,2	27,0	0,005873	0,669328	170,3	0,3210	46.984
16	27,0	28,8	0,005680	0,692820	176,1	0,3319	45.440
17	28,8	30,6	0,005505	0,715540	181,7	0,3424	44.040
18	30,6	32,4	0,005346	0,737560	187,1	0,3526	42.768
19	32,4	34,2	0,005199	0,758944	192,3	0,3626	41.592
20	34,2	36,0	0,005064	0,779740	197,5	0,3722	40.512
VELOCIDADE CONSTANTE							
m	$\alpha_i(^{\circ})$	$\alpha_f(^{\circ})$	$\Delta t_m(s)$	$t_m(s)$ inicial	$f_m(pps)$	$v_{tang}(m/s)$	N_{clock}
(*)	36,0	234,0	0,005000	0,799996	200,0	0,3770	40.000
Tempo total movimento =				2,999996	(*) 440 passos iguais		

DADOS	
Passo($^{\circ}$)	1,8
$R(m)$	0,24
$f_{clock}(MHz)$	8
$f_s(pps)$	200
$g_s(pps)$	0
M	21
n	4

CÁLCULO AUXILIAR	
$\beta(pps/s^2)$	1000
$P_{carga}(m)$ a cada 4 passos	0,00754
$t_{clock}(ns)$	125

Planilha de Cálculo 3.2.1.R – 1ª Fase – Rotação – Aceleração e velocidade constante.

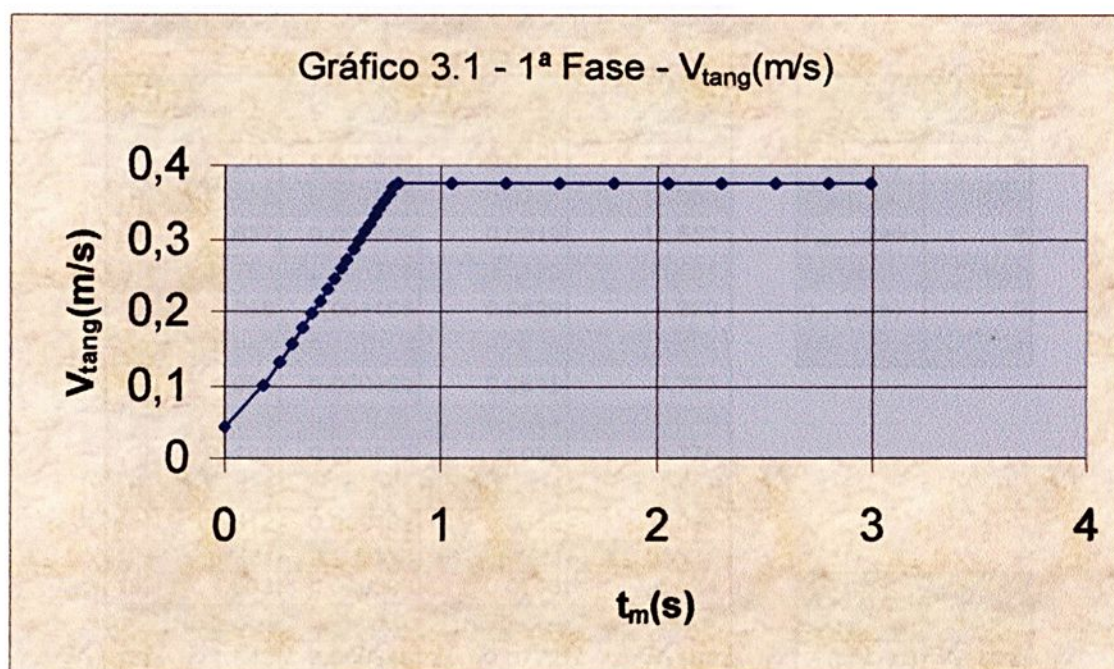


Gráfico 3.1 – 1ª Fase – Rotação – $V_{tang} \times t_m$ – Aceleração e velocidade constante.

Na Planilha de Cálculo 3.2.1.R e no Gráfico 3.1 pode-se observar a rampa de aceleração gerada pelo algoritmo utilizado. Este algoritmo calcula a aceleração, e conseqüentemente o tempo de aceleração e a declividade da curva, em função dos valores definidos para as velocidades inicial e final da rampa e para o número de degraus, sendo no caso 20 degraus. O tempo de aceleração é de aproximadamente 0,8s, para uma variação de velocidade aproximada de 0,38m/s, chegando-se, portanto, a uma aceleração em torno de $0,48m/s^2$, valor que se entende ser adequado. Lembra-se que este perfil mais favorável de velocidade foi obtido ao adotar-se 4 passos iguais para cada degrau da rampa. O tempo total do movimento nesta fase é de 2,99s, obtido da planilha 3.2.1.R.

Após uma defasagem de tempo, que é função do ponto N_y , escolhido, iniciar-se-á o deslocamento da colher vazia no eixo Y, em um ciclo composto de aceleração e velocidade constante até atingir o ponto N_y , velocidade esta definida igual à velocidade de inserção da colher no alimento no referido ponto, para que a transição entre as fases seja suave. A defasagem de tempo adequada é que vai permitir a sincronização deste movimento com o movimento rotacional, no ponto em que a colher toca o alimento. Na Figura 3.4 vê-se a interação entre o movimento Y e o movimento de giro da colher. Os cálculos deste movimento estão nas Planilhas de Cálculo 3.2.1.Y.1 e 3.2.1.Y.2.

PLANILHA 3.2.1.Y.1 - MOVIMENTO Y - 1ª FASE				
ACELERAÇÃO				
m	$f_m(\text{pps})$	$\Delta t_m(\text{s})$	$V_Y(\text{m/s})$	N_{clock}
1	203	0,004936	0,0101	39.488
2	489	0,002045	0,0244	16.360
3	637	0,001569	0,0319	12.552
4	756	0,001323	0,0378	10.584
5	858	0,001165	0,0429	9.320
6	950	0,001053	0,0475	8.424
7	1.032	0,000969	0,0516	7.752
8	1.109	0,000902	0,0554	7.216
9	1.181	0,000847	0,059	6.776
10	1.248	0,000801	0,0624	6.408
11	1.312	0,000762	0,0656	6.096
12	1.374	0,000728	0,0687	5.824
13	1.433	0,000698	0,0716	5.584
14	1.488	0,000672	0,0744	5.376
15	1.543	0,000648	0,0772	5.184
16	1.595	0,000627	0,0797	5.016
17	1.645	0,000608	0,0822	4.864
18	1.695	0,00059	0,0847	4.720
19	1.742	0,000574	0,0871	4.592
20	1.789	0,000559	0,0894	4.472
Tempo total =		0,022076		

DADOS	
Passo(°)	1,8
$P_{\text{rosca}}(\text{m})$	0,01
$f_{\text{clock}}(\text{MHz})$	8
$f_{s1}(\text{pps})$	1.812
$g_{s1}(\text{pps})$	0
$M1$	21

CÁLCULO AUXILIAR	
$\beta(\text{pps/s}^2)$	82.084
Passo(m)	0,00005
$t_{\text{clock}}(\text{ns})$	125

Planilha de Cálculo 3.2.1.Y.1 – 1ª Fase – Movimento no eixo Y – Aceleração.

PLANILHA 3.2.1.Y.2 - MOVIMENTO Y - 1ª FASE - POSICIONAMENTO											
VELOCIDADE CONSTANTE								ACELERA		CÔMPUTO - 1ª FASE	
f_m (pps)	$\Delta t_m(\text{s})$	$V_Y(\text{m/s})$	N_{clock}	55,4 = ΔY		Transl. (mm)	Tempo (s)	Passos aceleração	Passos totais	Translação total (mm)	Tempo total (s)
				Passos	N_Y						
1.812	0,000552	0,0906	4416	60	0	3	0,033120	20	80	4	0,055196
1.812	0,000552	0,0906	4416	1168	1	58,4	0,644736	20	1188	59,4	0,666812
1.812	0,000552	0,0906	4416	2276	2	113,8	1,256352	20	2296	114,8	1,278428
1.812	0,000552	0,0906	4416	3384	3	169,2	1,867968	20	3404	170,2	1,890044
1.812	0,000552	0,0906	4416	4492	4	224,6	2,479584	20	4512	225,6	2,501660

Planilha de Cálculo 3.2.1.Y.2 – 1ª Fase – Movimento no eixo Y – Cômputo geral .

O valor adotado na Planilha de Cálculo 3.2.1.Y.1, $f_{s1} = 1812\text{pps}$, é o patamar final de taxa de passos, utilizado pelo algoritmo, e vai corresponder à velocidade constante de $0,0906\text{m/s}$ que se seguirá à fase de aceleração, conforme planilha 3.2.1.Y.2.

Os valores da velocidade do movimento no eixo Y em função do tempo estão representados no Gráfico 3.2, sendo adotado na construção do gráfico o ponto de inserção $N_Y = 0$. Na fase de velocidade constante estão representados apenas alguns pontos a título ilustrativo.

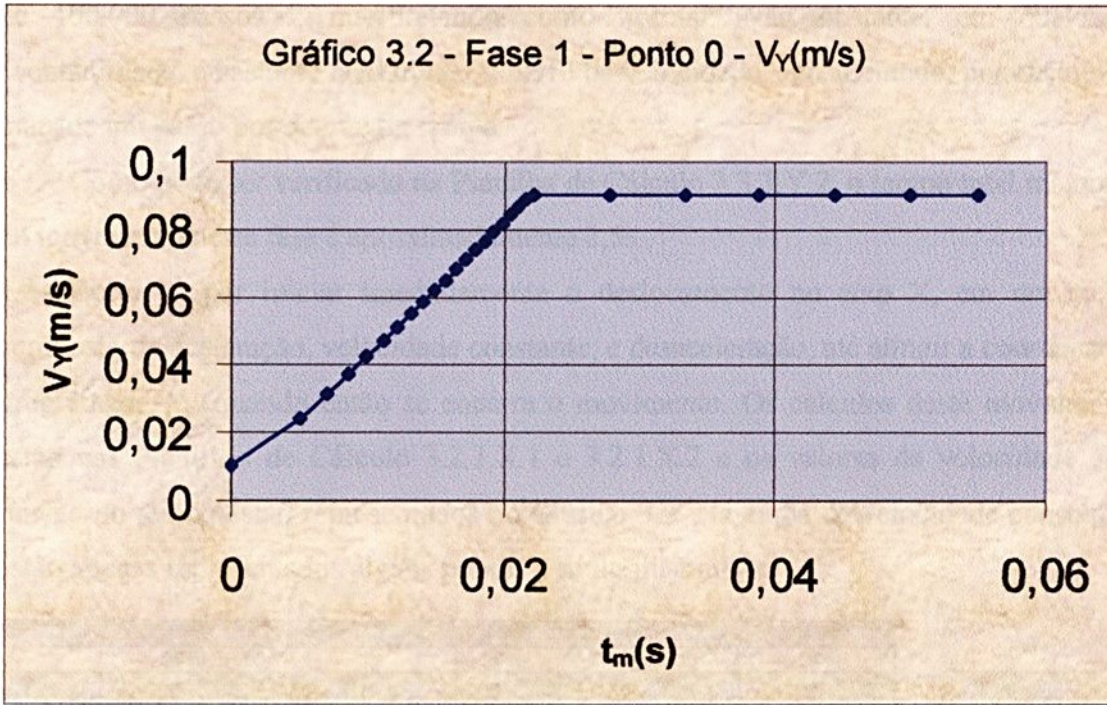


Gráfico 3.2 – 1ª Fase - Movimento no eixo Y – $V_Y \times t_m$ - Aceleração e velocidade constante.

Na Planilha de Cálculo 3.2.1.Y.1 e no Gráfico 3.2 pode-se observar a rampa de aceleração gerada pelo algoritmo utilizado. Têm-se tempo de aceleração de 0,022s para uma variação de velocidade de 0,09m/s, o que corresponde a uma aceleração de aproximadamente 4m/s^2 , que mesmo sendo relativamente alta (aproximadamente 40% da aceleração da gravidade), não deve representar problemas, pois a colher está vazia.

Para se avaliar o cálculo deste valor de aceleração, reproduz-se aqui a expressão 3.17, através da qual se obtém a aceleração β em passos/ s^2 , para o algoritmo empregado:

$$\beta = \frac{f_s^2 - g_s^2}{2(M - 1)}$$

Neste caso $g_s = 0$ (taxa de passos inicial), e a aceleração é diretamente proporcional ao quadrado da taxa de passos final f_s . Em função da relação de transmissão do sistema de fuso de esferas, tem-se que para um passo do motor a carga avança apenas 0,05mm. Portanto, para ter-se a velocidade na carga de 0,0906m/s necessita-se de uma taxa de passos de 1812pps. O motor trabalha confortavelmente com essa taxa de passos, que está dentro da região *pull-in*, mas a aceleração para $M = 21$, ou seja, em 20 passos, será 82.084 passos/ s^2 , que vai corresponder a aproximadamente 4m/s^2 . A literatura consultada [8] cita exemplo, também para 20 passos, com aceleração

de 100.000 passos/s², interpretando como normal. Não obstante, em qualquer eventualidade, é bastante fácil mudar o perfil da velocidade, considerando, por exemplo, mais de um passo por degrau da rampa.

Como pode ser verificado na Planilha de Cálculo 3.2.1.Y.2, o tempo total máximo do movimento nesta fase é aproximadamente 2,5s.

Optou-se por iniciar imediatamente o deslocamento no eixo X, em um ciclo composto de aceleração, velocidade constante, e desaceleração, até atingir a coordenada programada N_x , quando então se encerra o movimento. Os cálculos deste movimento estão nas Planilhas de Cálculo 3.2.1.X.1 e 3.2.1.X.2 e os valores da velocidade em função do tempo estão representados no Gráfico 3.3. Na etapa de velocidade constante estão apenas representados alguns pontos a título ilustrativo.

PLANILHA 3.2.1.X.1 - MOVIMENTO X - 1ª FASE - DESLOCAMENTO DA COLHER VAZIA											
ACELERAÇÃO						DESACELERAÇÃO					
m	f_m (pps)	Δt_m (s)	t_m (s)	V_x (m/s)	N_{clock}	m	f_m (pps)	Δt_m (s)	t_m (s)	V_x (m/s)	N_{clock}
1	22	0,044721	0,000000	0,0112	357.768	1	197	0,005064	0,000000	0,0987	40512
2	54	0,018524	0,044721	0,0270	148.192	2	192	0,005199	0,005064	0,0962	41592
3	70	0,014214	0,063245	0,0352	113.712	3	187	0,005346	0,010263	0,0935	42768
4	83	0,011983	0,077459	0,0417	95.864	4	182	0,005505	0,015609	0,0908	44040
5	95	0,010557	0,089442	0,0474	84.456	5	176	0,005680	0,021114	0,0880	45440
6	105	0,009545	0,099999	0,0524	76.360	6	170	0,005873	0,026794	0,0851	46984
7	114	0,008777	0,109544	0,0570	70.216	7	164	0,006087	0,032667	0,0821	48696
8	122	0,008170	0,118321	0,0612	65.360	8	158	0,006326	0,038754	0,0790	50608
9	130	0,007673	0,126491	0,0652	61.384	9	152	0,006595	0,045080	0,0758	52760
10	138	0,007257	0,134164	0,0689	58.056	10	145	0,006903	0,051675	0,0724	55224
11	145	0,006903	0,141421	0,0724	55.224	11	138	0,007257	0,058578	0,0689	58056
12	152	0,006595	0,148324	0,0758	52.760	12	130	0,007673	0,065835	0,0652	61384
13	158	0,006326	0,154919	0,0790	50.608	13	122	0,008170	0,073508	0,0612	65360
14	164	0,006087	0,161245	0,0821	48.696	14	114	0,008777	0,081678	0,0570	70216
15	170	0,005873	0,167332	0,0851	46.984	15	105	0,009545	0,090455	0,0524	76360
16	176	0,005680	0,173205	0,0880	45.440	16	95	0,010557	0,100000	0,0474	84456
17	182	0,005505	0,178885	0,0908	44.040	17	83	0,011983	0,110557	0,0417	95864
18	187	0,005346	0,184390	0,0935	42.768	18	70	0,014214	0,122540	0,0352	113712
19	192	0,005199	0,189736	0,0962	41.592	19	54	0,018524	0,136754	0,0270	148192
20	197	0,005064	0,194935	0,0987	40.512	20	22	0,044721	0,155278	0,0112	357768
Tempo total = 0,199999						Tempo total = 0,199999					

DADOS	
Passo(°)	1,8
$P_{sistema}$ (m)	0,1
f_{clock} (MHz)	8
f_{s1} (pps)	200
G_{s1} (pps)	0
$M1$	21

CÁLCULO AUXILIAR	
β (pps/s ²)	1.000
Passo(m)	0,0005
t_{clock} (ns)	125

Planilha de Cálculo 3.2.1.X.1 – 1ª Fase - Movimento no eixo X – Aceleração e desaceleração.

PLANILHA 3.2.1.X.2 - MOVIMENTO X - 1ª FASE - DESLOCAMENTO DA COLHER VAZIA ATÉ O ALIMENTO											
VELOCIDADE CONSTANTE						CÔMPUTO GERAL					
f_m (pps)	Δt_m (s)	V_x (m/s)	N_{clock}	ΔY (mm) = 40		Desloca- mento (mm)	Tempo (s)	Passos Acel/Decel	Total geral de passos	Translação total (mm)	Tempo total (s)
				Passos	N_x						
200	0,005000	0,1000	40000	40	0	20	0,200000	40	80	40	0,599998
200	0,005000	0,1000	40000	120	1	60	0,600000	40	160	80	0,999998
200	0,005000	0,1000	40000	200	2	100	1,000000	40	240	120	1,399998
200	0,005000	0,1000	40000	280	3	140	1,400000	40	320	160	1,799998
200	0,005000	0,1000	40000	360	4	180	1,800000	40	400	200	2,199998
200	0,005000	0,1000	40000	440	5	220	2,200000	40	480	240	2,599998
200	0,005000	0,1000	40000	520	6	260	2,600000	40	560	280	2,999998

Planilha de Cálculo 3.2.1.X.2 – 1ª Fase – Movimento no eixo X – Cômputo geral.



Na Planilha de Cálculo 3.2.1.X.1 e no Gráfico 3.3 pode-se observar a rampa de aceleração gerada pelo algoritmo utilizado. Como se pode verificar, tem-se tempo de aceleração de 0,2s para uma variação de velocidade de 0,1m/s, o que implica em aceleração de $0,5\text{m/s}^2$, o que analogamente ao movimento de rotação, entende-se como satisfatório. O tempo total máximo desse movimento é aproximadamente 3,0s, conforme planilha de 3.2.1.X.2.

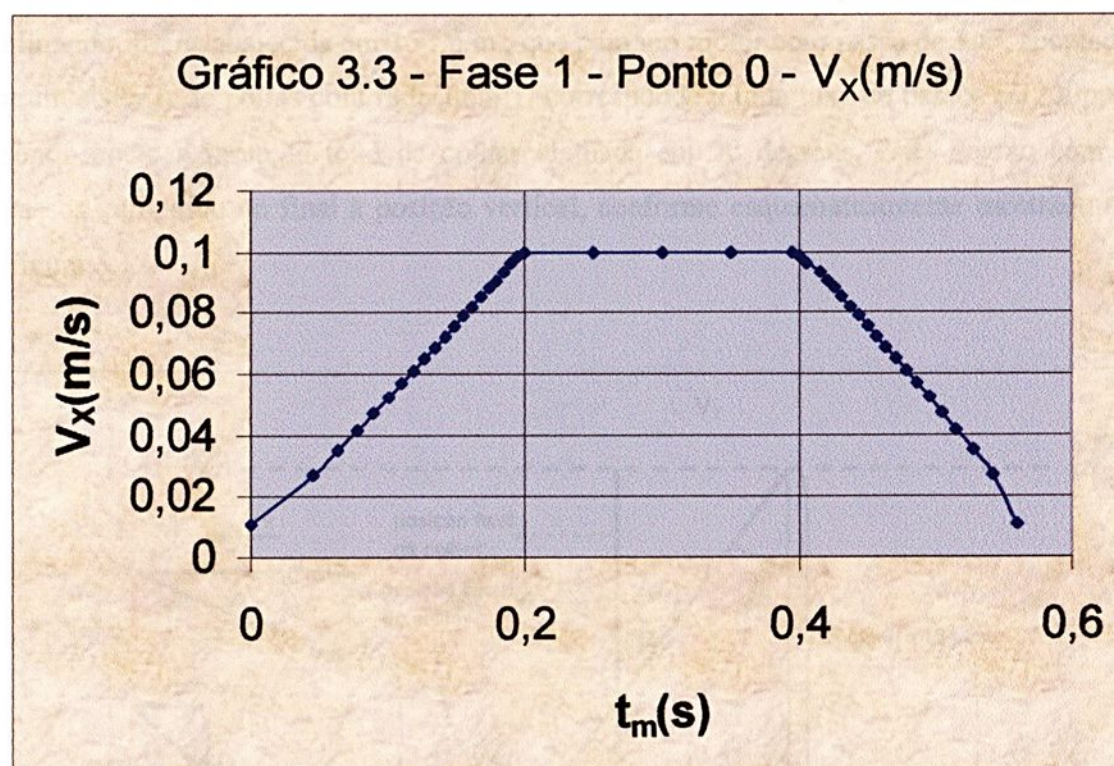


Gráfico 3.3 – Movimento no eixo X – $V_x \times t_m$ – Aceleração, velocidade constante e desaceleração.

R o comprimento da ponta da colher até o centro do eixo de giro da colher, $R = 0,240\text{m}$; n a redução proporcionada pelo sistema de polias, no caso $n = 4$.

Portanto, para o passo imediatamente antes do início da inserção $V_{tang} = 0,377\text{ m/s}$.

Analisando o movimento rotacional na inserção, pode-se decompor a velocidade tangencial na ponta da colher, nas componentes vertical e horizontal, V_{tangz} e V_{tangy} , dadas por:

$$V_{tangz} = V_{tang} \text{sen}\theta \quad (3.31)$$

$$V_{tangy} = V_{tang} \text{cos}\theta \quad (3.32)$$

A figura 3.13 ilustra essa decomposição.

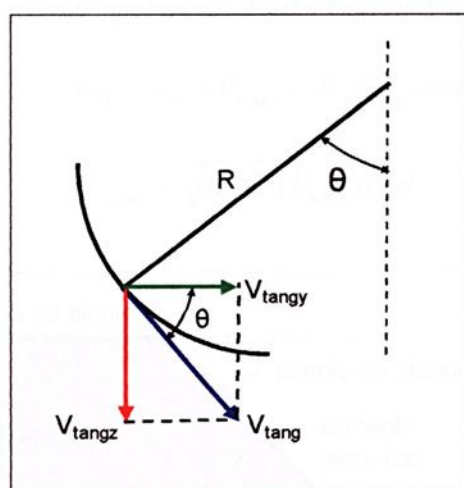


Figura 3.13 – Decomposição da velocidade tangencial V_{tang} .

A composição vetorial do movimento rotacional da colher (interessando no caso sua componente V_{tangy}), com o movimento de translação no eixo Y, que possui velocidade V_Y de sentido contrário a V_{tangy} , resultará em uma componente V_{RY} , ainda com o sentido de V_{tangy} . A referida componente V_{RY} , com valor convenientemente ajustado (indiretamente através do valor de V_Y), compor-se-á agora com V_{tangz} , criando um ângulo de ataque (ângulo de inserção da colher no alimento), que para este projeto foi escolhido como sendo 45° , e a inserção será linear. Para melhor ilustração veja detalhe da composição vetorial na Figura 3.12. Ajusta-se então V_Y para:

$$V_Y = V_{tang} \text{sen}\theta - V_{tang} \text{cos}\theta \quad (3.33)$$

Observa-se o artifício utilizado em que a segunda parcela é V_{tangy} com o sinal negativo, e a primeira parcela é igual a V_{tangz} .

Tem-se então:

$$V_{RY} = V_Y + V_{tangy} = (V_{tang} \operatorname{sen} \theta - V_{tang} \operatorname{cos} \theta) + V_{tang} \operatorname{cos} \theta$$

$$V_{RY} = V_{tang} \operatorname{sen} \theta \quad (3.34)$$

Compondo-se V_{RY} e V_{tangz} que possuem o mesmo valor e são ortogonais tem-se:

$$V_{ataque} = \sqrt{2} V_{tang} \operatorname{sen} \theta \quad (3.35)$$

Genericamente, pode-se adotar um ângulo de ataque δ , conforme Figura 3.14, definindo-se K_I como a cotangente de δ . Tem-se então:

$$V_Y = K_I V_{tang} \operatorname{sen} \theta - V_{tang} \operatorname{cos} \theta \quad (3.36)$$

$$V_{RY} = V_Y + V_{tangy} = K_I V_{tang} \operatorname{sen} \theta \quad (3.37)$$

$$V_{ataque} = \sqrt{K_I^2 + 1} V_{tang} \operatorname{sen} \theta \quad (3.38)$$

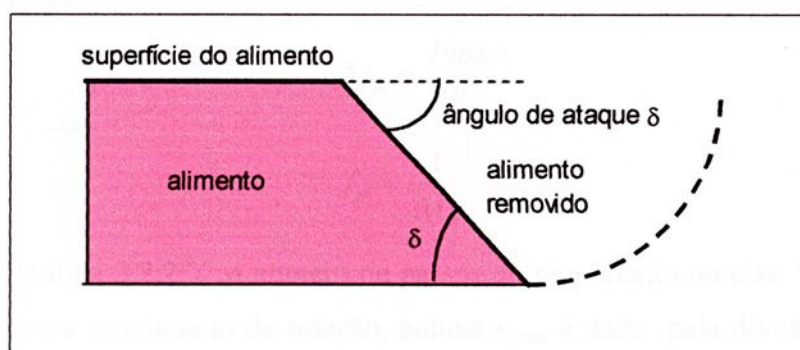


Figura 3.14 – Ângulo de inserção da colher.

O ângulo de ataque δ , representado na Figura 3.14, fica limitado em $36^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$.

O limite mínimo ocorre quando a inserção se inicia com $V_Y = 0$, que depois se ajusta para garantir a linearidade da inserção, ou seja, se inicia com V_{RY} máximo. Como $\delta = \operatorname{arccotang} (V_{RY} / V_{tangz})$, e no ponto de inserção tem-se $\theta = 36^\circ$ e $V_Y = 0$, então neste ponto $\delta = \operatorname{arccotang} (V_{tangy} / V_{tangz})$ ou $\delta = \operatorname{arccotang} (V_{tang} \operatorname{cos} \theta / V_{tang} \operatorname{sen} \theta)$ e portanto $\delta = \theta = 36^\circ$.

O limite máximo $\delta = 90^\circ$, ou $K_I = 0$, ocorre com $V_{RY} = 0$ (mínimo) e significa que a inserção ocorre apenas sob a ação de V_{tangz} . Portanto, $V_Y = -V_{tangy}$ ou $V_Y = -V_{tang} \operatorname{cos} \theta$.

Neste projeto adotou-se como alternativa básica $\delta = 45^\circ$ ou $K_I = 1$.

Construção das Planilhas de Cálculo – Aspectos Específicos

A elaboração das planilhas de cálculo segue a seguinte metodologia:

- A Planilha de Cálculo 3.2.2.R é construída utilizando o algoritmo descrito em 3.1.1, que gera uma rampa de desaceleração.
- Nas Planilhas 3.2.2.Y e 3.2.2.G são calculados os valores de V_Y , V_{RY} e V_{ataque} , através das expressões (3.36), (3.37) e (3.38), respectivamente, utilizando para θ os valores médios de cada degrau, ou seja $\theta = \theta_m$, obtido por:

$$\theta_m = \frac{\theta_i + \theta_f}{2} \quad (3.39)$$

θ_i = ângulo inicial do passo mecânico na carga no movimento de rotação;

θ_f = ângulo final do passo mecânico na carga no movimento de rotação.

Lembra-se que 4 passos de $1,8^\circ$ no motor correspondem a 1 passo de $1,8^\circ$ na carga;

- Na Planilha 3.2.2.Y, do movimento no eixo Y, a duração de passos, coluna Δt_m , e a frequência de passos, coluna f_m , são calculadas através das seguintes expressões:

$$\Delta t_m = \frac{Passo}{V_Y} \quad (3.40)$$

$$f_m = \frac{1}{\Delta t_m} \quad (3.41)$$

- Na Planilha 3.2.2.Y, o número de passos do movimento no eixo Y para cada 4 passos no movimento de rotação, coluna n_{pas} , é dado pela divisão da duração dos 4 passos da rotação, coluna 4. $\Delta t_m(\text{rotação})$, pela duração do passo no movimento Y, coluna Δt_m ;

Com base na teoria aqui desenvolvida foram elaboradas as Planilhas de Cálculo 3.2.2.R, 3.2.2.Y e 3.2.2.G onde são calculadas todas as frequências de passos, tempos de passos, velocidades, acelerações e desacelerações na fase de inserção, inclusive composição de movimentos. Utilizando os valores gerados nessas planilhas foram traçados os Gráficos 3.4, 3.5 e 3.6 das velocidades tangencial (V_{tang}), no eixo Y (V_Y) e de composição de movimentos (V_{RY}) em função do tempo.

Na Planilha de Cálculo 3.2.2.R são efetuados os cálculos do movimento rotacional nesta fase e no Gráfico 3.4 é apresentada a curva da velocidade tangencial em função do tempo.

PLANILHA 3.2.2.R - MOVIMENTO DE ROTAÇÃO - 2ª FASE - INSERÇÃO DA COLHER

m	$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_f(^{\circ})$	$\Delta t_m(s)$	$t_m(s)$ cada 4 passos	$f_m(pps)$	$V_{tang}(m/s)$	N_{clock}
1	36,0	34,2	0,005061	0,000000	197,6	0,3725	40.488
2	34,2	32,4	0,005191	0,020244	192,6	0,3631	41.528
3	32,4	30,6	0,005331	0,041008	187,6	0,3536	42.648
4	30,6	28,8	0,005482	0,062332	182,4	0,3439	43.856
5	28,8	27,0	0,005648	0,084260	177,1	0,3337	45.184
6	27,0	25,2	0,005829	0,106852	171,6	0,3234	46.632
7	25,2	23,4	0,006029	0,130168	165,9	0,3127	48.232
8	23,4	21,6	0,006251	0,154284	160,0	0,3016	50.008
9	21,6	19,8	0,006500	0,179288	153,8	0,2900	52.000
10	19,8	18,0	0,006781	0,205288	147,5	0,2780	54.248
11	18,0	16,2	0,007102	0,232412	140,8	0,2654	56.816
12	16,2	14,4	0,007473	0,260820	133,8	0,2522	59.784
13	14,4	12,6	0,007909	0,290712	126,4	0,2383	63.272
14	12,6	10,8	0,008432	0,322348	118,6	0,2236	67.456
15	10,8	9,0	0,009076	0,356076	110,2	0,2077	72.608
16	9,0	7,2	0,009893	0,392380	101,1	0,1905	79.144
17	7,2	5,4	0,010982	0,431952	91,1	0,1716	87.856
18	5,4	3,6	0,012536	0,475880	79,8	0,1504	100.288
19	3,6	1,8	0,015028	0,526024	66,5	0,1254	120.224
20	1,8	0,0	0,020135	0,586136	49,7	0,0936	161.080

Tempo total movimento = 0,666676

DADOS	
Passo($^{\circ}$)	1,8
R(m)	0,24
f_{clock} (MHz)	8
f_s (pps)	40
g_s (pps)	200
M	21
n	4

CÁLCULO AUXILIAR	
$\beta(pps/s^2)$	-960
P_{carga} (m) a cada 4 passos	0,00754
t_{clock} (ns)	125

Planilha de Cálculo 3.2.2.R – 2ª Fase – Movimento de Rotação – Desaceleração.

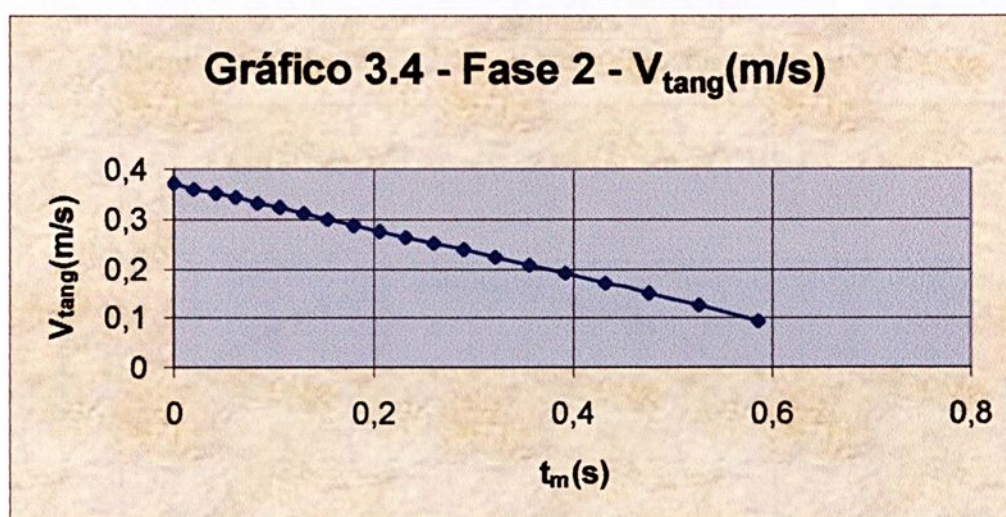


Gráfico 3.4 – 2ª Fase – Movimento de Rotação – Desaceleração – $V_{tang} \times t_m$.

Da análise do Gráfico 3.4 e da Planilha de Cálculo 3.2.2.R pode-se verificar que a rampa de desaceleração da velocidade tangencial parte de uma velocidade de 0,3725m/s e chega a uma velocidade de 0,0936m/s em um tempo de 0,667s, portanto com desaceleração aproximada de $0,42\text{m/s}^2$, perfeitamente compatível com a aceleração adotada na 1ª fase para esse movimento.

Na Planilha de Cálculo 3.2.2.Y são efetuados os cálculos do movimento no eixo Y e no Gráfico 3.5 é apresentada a curva da velocidade no eixo Y em função do tempo.

PLANILHA 3.2.2.Y - MOVIMENTO Y - 2ª FASE - INSERÇÃO DA COLHER

m	$\theta_m(^{\circ})$	$V_{tang}(\text{m/s})$ (rotação)	$V_Y(\text{m/s})$	$f_m(\text{pps})$	$\Delta t_m(\text{s})$	$4 \cdot \Delta t_m(\text{s})$ (rotação)	n_{pas}	N_{clock}
1	35,1	0,3725	0,0906	1.812	0,000552	0,020244	37	4.416
2	33,3	0,3631	0,1041	2.082	0,000480	0,020764	43	3.840
3	31,5	0,3536	0,1167	2.334	0,000428	0,021324	50	3.424
4	29,7	0,3439	0,1283	2.566	0,000390	0,021928	56	3.120
5	27,9	0,3337	0,1388	2.776	0,000360	0,022592	63	2.880
6	26,1	0,3234	0,1481	2.962	0,000338	0,023316	69	2.704
7	24,3	0,3127	0,1563	3.126	0,000320	0,024116	75	2.560
8	22,5	0,3016	0,1632	3.264	0,000306	0,025004	82	2.448
9	20,7	0,2900	0,1688	3.376	0,000296	0,026000	88	2.368
10	18,9	0,2780	0,1730	3.460	0,000289	0,027124	94	2.312
11	17,1	0,2654	0,1756	3.512	0,000285	0,028408	100	2.280
12	15,3	0,2522	0,1767	3.534	0,000283	0,029892	106	2.264
13	13,5	0,2383	0,1761	3.522	0,000284	0,031636	111	2.272
14	11,7	0,2236	0,1736	3.472	0,000288	0,033728	117	2.304
15	9,9	0,2077	0,1689	3.378	0,000296	0,036304	123	2.368
16	8,1	0,1905	0,1618	3.236	0,000309	0,039572	128	2.472
17	6,3	0,1716	0,1517	3.034	0,000330	0,043928	133	2.640
18	4,5	0,1504	0,1381	2.762	0,000362	0,050144	139	2.896
19	2,7	0,1254	0,1194	2.388	0,000419	0,060112	143	3.352
20	0,9	0,0936	0,0921	1.842	0,000543	0,080540	148	4.344

DADOS	
Passo($^{\circ}$)	1,8
$P_{rosca}(\text{m})$	0,01
$f_{clock}(\text{MHz})$	8
Ataque($^{\circ}$)	45

CÁLCULO AUXILIAR	
Passo(m)	0,00005
K_f	1
$t_{clock}(\text{ns})$	125

Tempo = 0,667 Passos = 1905

Planilha de Cálculo 3.2.2.Y – 2ª Fase – Movimento no eixo Y.

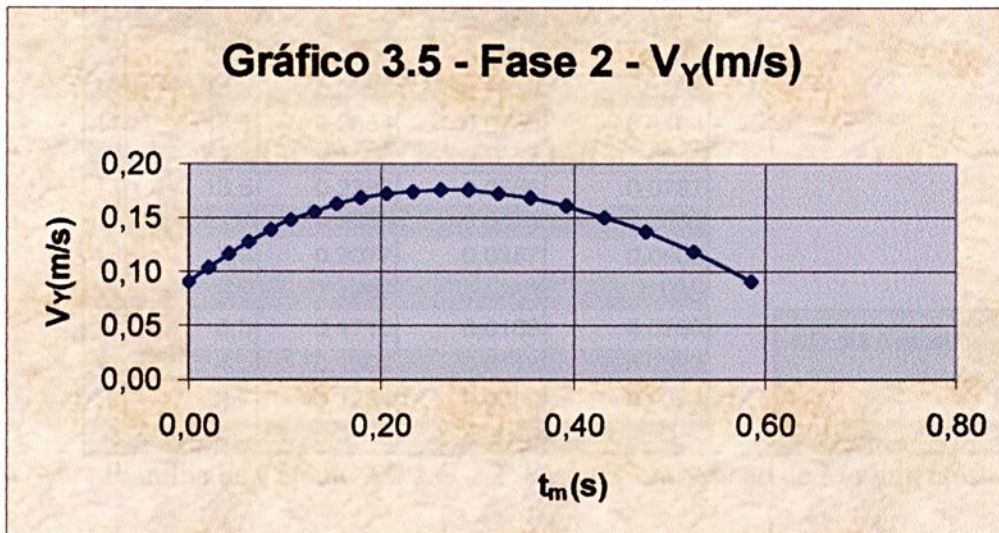


Gráfico 3.5 – 2ª Fase – Movimento no eixo Y – $V_Y \times t_m$.

Da análise da Planilha de Cálculo 3.2.2.Y e do Gráfico 3.5 vê-se que os valores da velocidade V_Y na entrada e saída são 0,0906m/s e 0,0921m/s, respectivamente, portanto muito parecidas, para um tempo total do movimento de 0,667s. Ocorre aceleração e desaceleração dentro desse período sendo que na fase de aceleração a velocidade passa de 0,0906m/s para 0,1767m/s em 0,29s, portanto com aceleração em torno de $0,30\text{m/s}^2$, e na fase de desaceleração a velocidade passa de 0,1767m/s para 0,0921m/s em 0,38s, portanto com desaceleração em torno de $0,22\text{m/s}^2$. A carga será efetivamente submetida à velocidade resultante da composição dos movimentos.

É oportuno destacar que para todos os gráficos desta fase os pontos são plotados considerando o momento inicial do degrau, sendo o tempo do degrau equivalente ao tempo de 4 passos do movimento de rotação. Logo, o último ponto da curva não reflete o tempo total do movimento na fase.

Na Planilha de Cálculo 3.2.2.G são efetuados os cálculos da composição do movimento rotacional com o movimento de translação no eixo Y, e no Gráfico 3.6 é apresentada a curva da velocidade resultante V_{RY} em função do tempo.

PLANILHA 3.2.2.G - COMPOSIÇÃO DE MOVIMENTOS - 2ª FASE				
m	θ_m (°)	V_{tang} (m/s) (rotação)	V_{RY} (m/s)	V_{ataque} (m/s)
1	35,1	0,3725	0,2142	0,3029
2	33,3	0,3631	0,1994	0,2819
3	31,5	0,3536	0,1848	0,2613
4	29,7	0,3439	0,1704	0,241
5	27,9	0,3337	0,1561	0,2208
6	26,1	0,3234	0,1423	0,2012
7	24,3	0,3127	0,1287	0,1820
8	22,5	0,3016	0,1154	0,1632
9	20,7	0,2900	0,1025	0,145
10	18,9	0,2780	0,0900	0,1273
11	17,1	0,2654	0,0780	0,1104
12	15,3	0,2522	0,0665	0,0941
13	13,5	0,2383	0,0556	0,0787
14	11,7	0,2236	0,0453	0,0641
15	9,9	0,2077	0,0357	0,0505
16	8,1	0,1905	0,0268	0,038
17	6,3	0,1716	0,0188	0,0266
18	4,5	0,1504	0,0118	0,0167
19	2,7	0,1254	0,0059	0,0084
20	0,9	0,0936	0,0015	0,0021

DADOS	
Ataque(°)	45

CÁLCULO AUXILIAR	
K_1	1

Planilha de Cálculo 3.2.2.G – 2ª Fase – Composição de Movimentos.

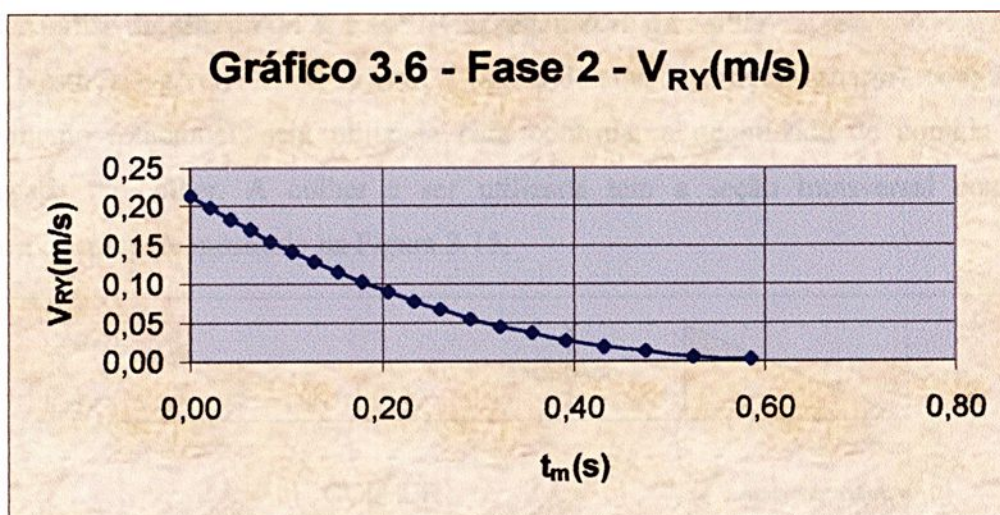


Gráfico 3.6 – 2ª Fase – Composição de Movimentos – $V_{RY} \times t_m$.

Da análise da planilha 3.2.2.G e do Gráfico 3.6, vê-se que a resultante da velocidade no eixo Y, V_{RY} , varia de 0,2142m/s a 0,0015m/s no tempo de 0,667s, portanto com desaceleração em torno de $0,32m/s^2$, e a resultante total do movimento V_{ataque} , varia de 0,3029m/s a 0,0021m/s no mesmo tempo, portanto com desaceleração em torno de $0,45m/s^2$. As acelerações e desacelerações para V_Y , V_{RY} , V_{ataque} , são aqui calculadas grosso modo, pois essas velocidades não variam linearmente, mas permitem uma avaliação do projeto.

3.2.3 Análise detalhada da 3ª Fase – Carregamento da colher

Nesta fase a velocidade no eixo Y (ainda de afastamento do usuário), contrária ao movimento rotacional, será utilizada para controlar a quantidade de comida a ser carregada na colher. A colher a ser utilizada tem a seção transversal conforme esquematicamente mostrado na Figura 3.15:

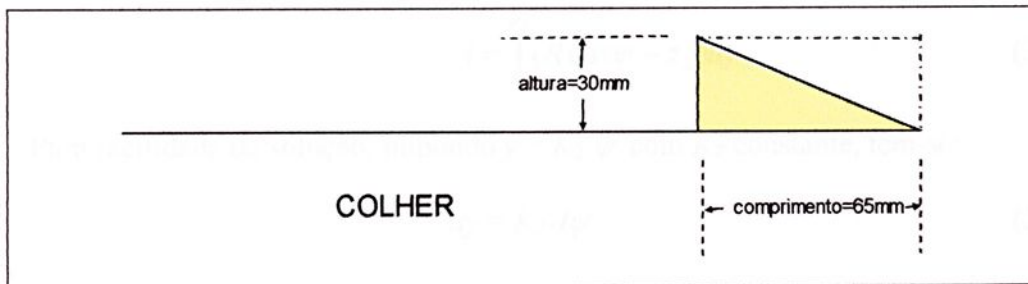


Figura 3.15 – Dimensões da colher.

Então, o volume de alimento que está sendo considerado para carregamento é $30 \times 65 \times \text{largura}$. Ou seja, a área da seção transversal considerada é 1950 mm^2 ou $19,5 \text{ cm}^2$.

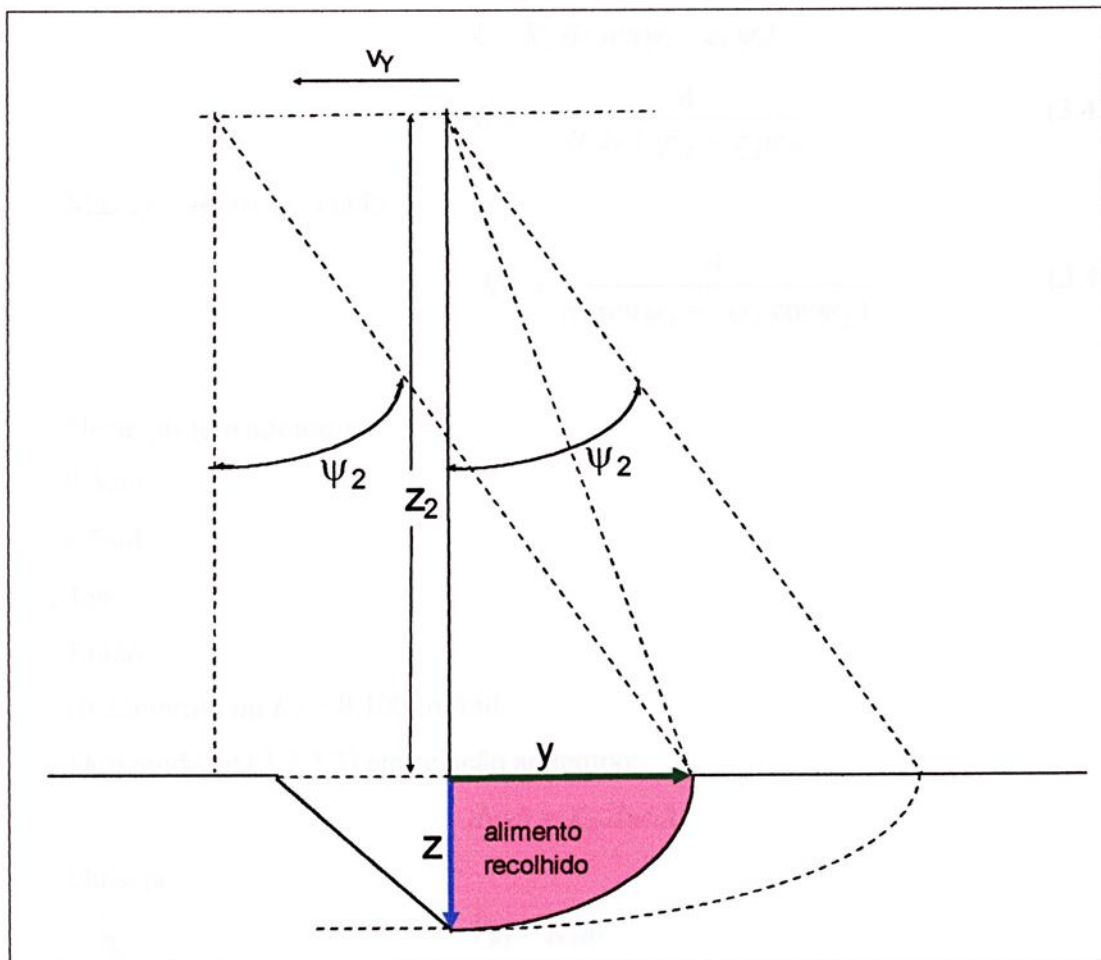


Figura 3.16 – Recolhimento do alimento.

A área A correspondente ao alimento recolhido, apresentada na figura 3.16, é dada por:

$$A = \int_0^{\psi_2} z dy \quad (3.42)$$

Mas $z = R \cos \psi - z_2$, então:

$$A = \int_0^{\psi_2} (R \cos \psi - z_2) dy \quad (3.43)$$

Para facilidade de solução, impondo $y = K_2 \cdot \psi$ com K_2 constante, têm-se:

$$dy = K_2 d\psi \quad (3.44)$$

Então:

$$A = \int_0^{\psi_2} K_2 R \cos \psi d\psi - \int_0^{\psi_2} K_2 z_2 d\psi$$

$$A = K_2 R \operatorname{sen} \psi_2 - K_2 z_2 \psi_2$$

$$A = K_2 (R \operatorname{sen} \psi_2 - z_2 \psi_2)$$

$$K_2 = \frac{A}{R \operatorname{sen} \psi_2 - z_2 \psi_2} \quad (3.45)$$

Mas $z_2 = R \cos \psi_2$, então:

$$K_2 = \frac{A}{R(\operatorname{sen} \psi_2 - \psi_2 \cos \psi_2)} \quad (3.46)$$

Neste projeto adotou-se:

$$A = 19,5 \text{cm}^2;$$

$$\psi_2 = \pi/5 \text{rad};$$

$$R = 24 \text{cm}.$$

Então:

$$K_2 = 10,22 \text{cm/rad} \text{ ou } K_2 = 0,1022 \text{m/rad}.$$

Derivando-se (3.2.3.3) em relação ao tempo:

$$dy/dt = K_2 d\psi/dt$$

Ou seja:

$$V_{RY} = K_2 \omega$$

Sendo ω = velocidade angular em rad/s, e como:

$$V_{RY} = V_{\text{tang}} \cos \psi - V_Y \quad (3.47)$$

$$V_{RY} = R\omega \cos \psi - V_Y$$

Portanto:

$$R\omega \cos \psi - V_Y = K_2\omega$$

$$V_Y = R\omega \cos \psi - K_2\omega$$

$$V_Y = \omega(R \cos \psi - K_2) \quad (3.48)$$

Toma-se $V_Y =$ constante, convenientemente escolhida para a transição suave entre a fase de inserção e a fase de carregamento da colher.

Tem-se então uma equação diferencial de 1ª ordem não linear:

$$(R \cos \psi - K_2) \frac{d\psi}{dt} - V_Y = 0$$

Considerando a facilidade que o motor de passo proporciona ao se poder tratar o movimento de rotação pontualmente, em cada passo adotando-se para ψ o valor médio ψ_m no passo, em (3.48) tem-se:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{V_Y}{R \cos \psi_m - K_2} \\ \omega R &= \frac{V_Y R}{R \cos \psi_m - K_2} \\ V_{\text{tang}} &= \frac{V_Y R}{R \cos \psi_m - K_2} \end{aligned} \quad (3.49)$$

A expressão (3.47), para V_{RY} , fica então:

$$V_{RY} = V_{\text{tang}} \cos \psi_m - V_Y \quad (3.50)$$

Entenda-se o valor médio ψ_m como:

$$\psi_m = (\psi_i + \psi_f) / 2 \quad (3.51)$$

Sendo:

ψ_i = ângulo inicial do passo mecânico na carga;

ψ_f = ângulo final do passo mecânico na carga.

Lembra-se que 4 passos de $1,8^\circ$ no motor correspondem a 1 passo de $1,8^\circ$ na carga.

Construção das Planilhas de Cálculo – Aspectos Específicos

A construção das planilhas de cálculo obedeceu a seguinte metodologia:

- Na Planilha 3.2.3.Y adotou-se para V_Y , em toda esta fase, o valor desta velocidade no último passo da fase anterior.

- Na Planilha 3.2.3.Y, o número de passos do movimento no eixo Y para cada 4 passos no movimento de rotação, coluna n_{pas} , é dado pela divisão da duração dos 4 passos da rotação, coluna 4. $\Delta t_m(\text{rotação})$, pela duração do passo no movimento Y, coluna Δt_m ;
- Na Planilha 3.2.3.R calcula-se V_{tang} através da expressão (3.49), obtendo-se V_Y da planilha integrada 3.2.3.Y.
- Na Planilha 3.2.3.G calcula-se V_{RY} por meio da expressão (3.50);
- As planilhas são calculadas com $A = 0,00195\text{m}^2$, obtendo-se $K2 = 0,1022\text{m/rad}$.

Com base na teoria aqui desenvolvida, foram elaboradas as Planilhas de Cálculo 3.2.3.R, 3.2.3.Y e 3.2.3.G, onde são calculadas todas as frequências de passos, tempos de passos, velocidades e acelerações na fase de carregamento da colher, inclusive na composição de movimentos. Utilizando os valores gerados nessas planilhas foram traçados os Gráficos 3.7, 3.8 e 3.9 das velocidades tangencial (V_{tang}), no eixo Y (V_Y) e de composição de movimentos (V_{RY}) em função do tempo.

Analisando a Planilha de Cálculo 3.2.3.R e o Gráfico 3.7, ambos para o movimento rotacional, observa-se uma suave aceleração, com a velocidade tangencial variando de $0,1604\text{m/s}$ a $0,2348\text{m/s}$, em um tempo total de $0,835\text{s}$, com uma aceleração em torno de $0,09\text{m/s}^2$, grosso modo pois a variação de velocidade não é linear.

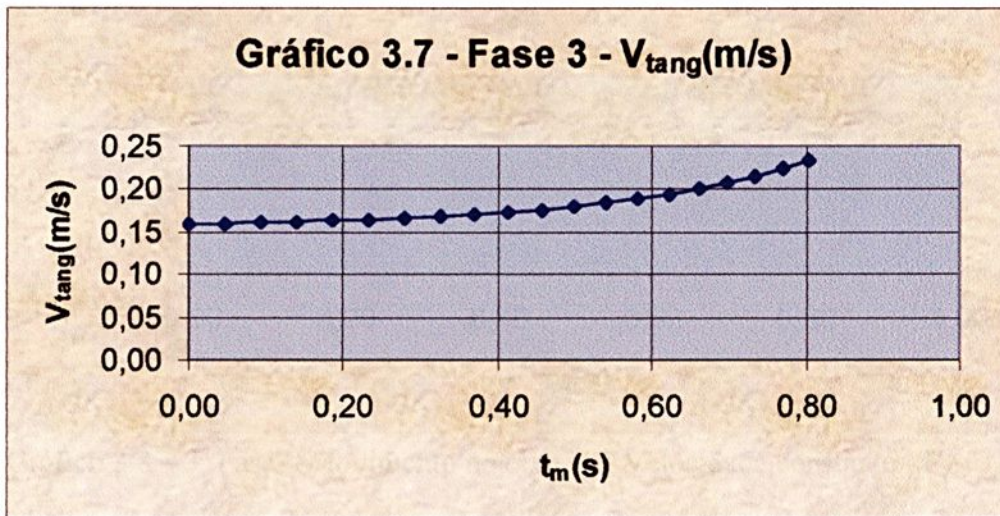
PLANILHA 3.2.3.R - MOVIMENTO DE ROTAÇÃO - 3ª FASE - CARREGAMENTO DA COLHER

m	$\psi_1(^{\circ})$	$\psi_f(^{\circ})$	$\Delta t_m(s)$	$t_m(s)$ cada 4 passos	$f_m(pps)$	$V_{tang}(m/s)$	N_{clock}
1	0,0	1,8	0,011752	0,000000	85,1	0,1604	94.016
2	1,8	3,6	0,011730	0,047008	85,3	0,1607	93.840
3	3,6	5,4	0,011686	0,093928	85,6	0,1613	93.488
4	5,4	7,2	0,011629	0,140672	86,0	0,1621	93.032
5	7,2	9,0	0,011550	0,187188	86,6	0,1632	92.400
6	9,0	10,8	0,011445	0,233388	87,4	0,1647	91.560
7	10,8	12,6	0,011328	0,279168	88,3	0,1664	90.624
8	12,6	14,4	0,011187	0,324480	89,4	0,1685	89.496
9	14,4	16,2	0,011023	0,369228	90,7	0,1710	88.184
10	16,2	18,0	0,010846	0,413320	92,2	0,1738	86.768
11	18,0	19,8	0,010650	0,456704	93,9	0,1770	85.200
12	19,8	21,6	0,010432	0,499304	95,9	0,1807	83.456
13	21,6	23,4	0,010195	0,541032	98,1	0,1849	81.560
14	23,4	25,2	0,009937	0,581812	100,6	0,1897	79.496
15	25,2	27,0	0,009667	0,621560	103,4	0,1950	77.336
16	27,0	28,8	0,009373	0,660228	106,7	0,2011	74.984
17	28,8	30,6	0,009063	0,697720	110,3	0,2080	72.504
18	30,6	32,4	0,008735	0,733972	114,5	0,2158	69.880
19	32,4	34,2	0,008393	0,768912	119,1	0,2246	67.144
20	34,2	36,0	0,008028	0,802484	124,6	0,2348	64.224
Tempo total movimento =				0,834596			

DADOS	
Passo($^{\circ}$)	1,8
R(m)	0,24
f_{clock} (MHz)	8
A (m^2)	0,00195
$\psi_2(^{\circ})$	36
n	4

CÁLCULO AUXILIAR	
P_{carros} (m) a cada 4 passos	0,00754
t_{clock} (ns)	125
K_2 (m/rad)	0,1022

Planilha de Cálculo 3.2.3.R – 3ª Fase – Movimento de Rotação – Aceleração.


 Gráfico 3.7 – 3ª Fase – Movimento de Rotação – Aceleração – $V_{tang} \times t_m$.

A Planilha de Cálculo 3.2.3.Y e o Gráfico 3.8 mostram resultados que refletem a premissa inicial de manter V_Y constante em $0,0921 m/s^2$.

PLANILHA 3.2.3.Y - MOVIMENTO Y - 3ª FASE - CARREGAMENTO DA COLHER

m	$\psi_m(^{\circ})$	$V_{tang} (m/s)$ (rotação)	$V_Y (m/s)$	$f_m(pps)$	$\Delta t_m(s)$	$4. \Delta t_m(s)$ (rotação)	n_{pas}	N_{clock}	DADOS	
1	0,9	0,1604	0,0921	1.842	0,000543	0,047008	87	4.344	Passo($^{\circ}$)	1,8
2	2,7	0,1607	0,0921	1.842	0,000543	0,046920	86	4.344	$P_{rosca} (m)$	0,01
3	4,5	0,1613	0,0921	1.842	0,000543	0,046744	86	4.344	$f_{clock} (MHz)$	8
4	6,3	0,1621	0,0921	1.842	0,000543	0,046516	86	4.344	$A (cm^2)$	19,5
5	8,1	0,1632	0,0921	1.842	0,000543	0,046200	85	4.344	$\theta_1 (^{\circ})$	36
6	9,9	0,1647	0,0921	1.842	0,000543	0,045780	84	4.344	$R (cm)$	24
7	11,7	0,1664	0,0921	1.842	0,000543	0,045312	83	4.344		
8	13,5	0,1685	0,0921	1.842	0,000543	0,044748	82	4.344		
9	15,3	0,1710	0,0921	1.842	0,000543	0,044092	81	4.344		
10	17,1	0,1738	0,0921	1.842	0,000543	0,043384	80	4.344		
11	18,9	0,1770	0,0921	1.842	0,000543	0,042600	78	4.344		
12	20,7	0,1807	0,0921	1.842	0,000543	0,041728	77	4.344		
13	22,5	0,1849	0,0921	1.842	0,000543	0,040780	75	4.344		
14	24,3	0,1897	0,0921	1.842	0,000543	0,039748	73	4.344		
15	26,1	0,1950	0,0921	1.842	0,000543	0,038668	71	4.344		
16	27,9	0,2011	0,0921	1.842	0,000543	0,037492	69	4.344		
17	29,7	0,2080	0,0921	1.842	0,000543	0,036252	67	4.344		
18	31,5	0,2158	0,0921	1.842	0,000543	0,034940	64	4.344		
19	33,3	0,2246	0,0921	1.842	0,000543	0,033572	62	4.344		
20	35,1	0,2348	0,0921	1.842	0,000543	0,032112	59	4.344		
Tempo =					0,834	Passos		1535		

CÁLCULO AUXILIAR	
Passo(m)	0,00005
$K_2 (m/rad)$	0,1022
$t_{clock} (ns)$	125

Planilha de Cálculo 3.2.3.Y – 3ª Fase – Movimento no eixo Y – Velocidade Constante.

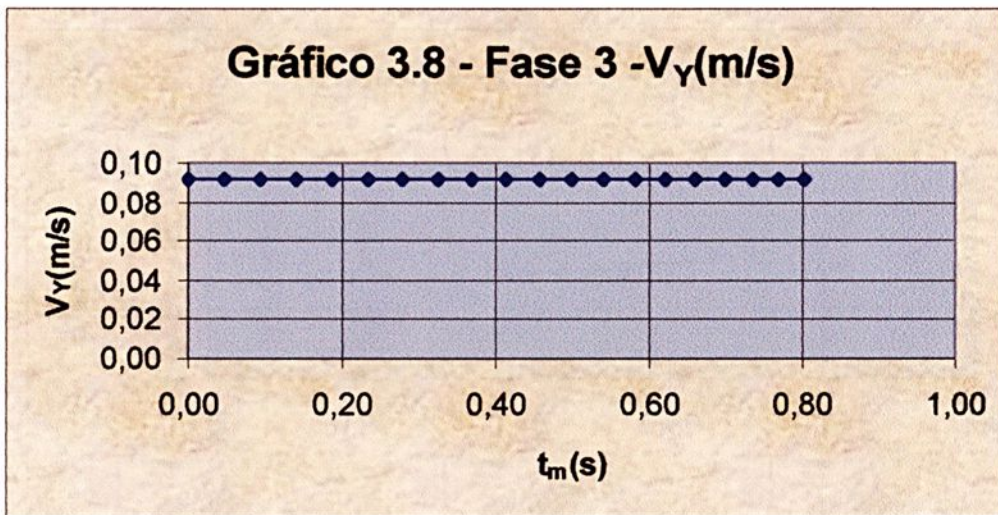


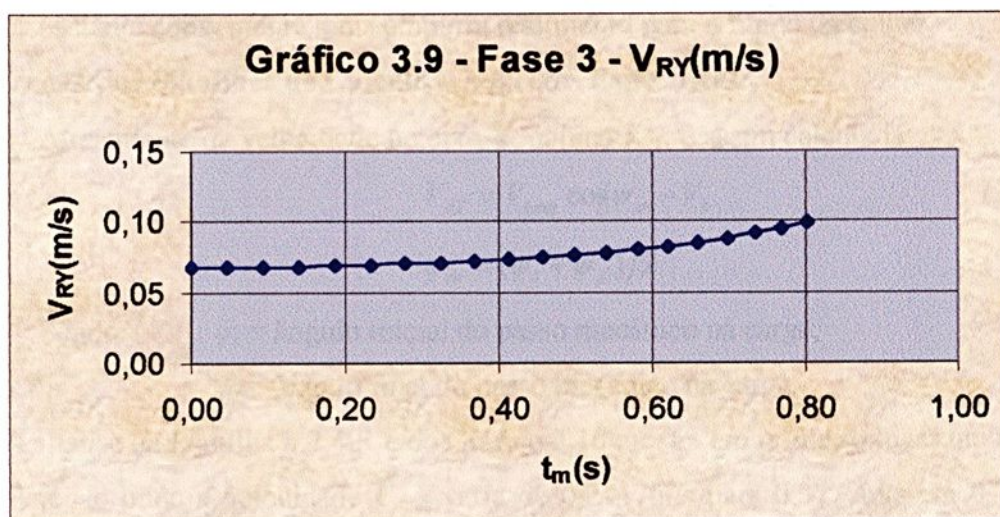
Gráfico 3.8 – 3ª Fase – Movimento no eixo Y – Velocidade constante - $V_Y \times t_m$.

A Planilha de Cálculo 3.2.3.G e o Gráfico 3.9, para a composição dos movimentos no eixo Y, vão mostrar uma suave aceleração, com V_{RY} variando de 0,0683m/s para 0,1000m/s em 0,835s, com uma aceleração em torno de $0,04m/s^2$, valor este aproximado, pois a variação de velocidade não é linear. Observe-se que os valores de V_{RY} nesta fase também são baixos.

PLANILHA 3.2.3.G - COMPOSIÇÃO - 3ª FASE

m	$\psi_m(^{\circ})$	$V_{tang}(m/s)$ (rotação)	$V_Y(m/s)$	$v_{RY}(m/s)$
1	0,9	0,1604	0,0921	0,0683
2	2,7	0,1607	0,0921	0,0684
3	4,5	0,1613	0,0921	0,0687
4	6,3	0,1621	0,0921	0,0690
5	8,1	0,1632	0,0921	0,0695
6	9,9	0,1647	0,0921	0,0701
7	11,7	0,1664	0,0921	0,0708
8	13,5	0,1685	0,0921	0,0717
9	15,3	0,1710	0,0921	0,0728
10	17,1	0,1738	0,0921	0,0740
11	18,9	0,1770	0,0921	0,0754
12	20,7	0,1807	0,0921	0,0769
13	22,5	0,1849	0,0921	0,0787
14	24,3	0,1897	0,0921	0,0808
15	26,1	0,1950	0,0921	0,0830
16	27,9	0,2011	0,0921	0,0856
17	29,7	0,2080	0,0921	0,0886
18	31,5	0,2158	0,0921	0,0919
19	33,3	0,2246	0,0921	0,0956
20	35,1	0,2348	0,0921	0,1000

Planilha de Cálculo 3.2.3.G – 3ª Fase – Composição de Movimentos.

Gráfico 3.9 – 3ª Fase – Composição de Movimentos – $V_{RY} \times t_m$.

3.2.4 Análise detalhada da 4ª fase – Movimento de subida da colher carregada

Este movimento, ilustrado na figura 3.1.7, compõe-se de:

- Subida da colher carregada, com o ângulo de rotação variando de 36° a 54° (10 passos), onde se tem aceleração linear do movimento rotacional, buscando-se atingir a taxa de passos 200pps, ou 15r.p.m. na carga;
- Entre 54° e 90° (20 passos), ocorre a desaceleração linear do movimento rotacional, até atingir a velocidade zero;
- A desaceleração da velocidade no eixo Y (de afastamento), entre 36° e 90°, é feita linearmente através do algoritmo do item 3.3.2, adotando-se $M = 31$ (30 degraus), o que proporciona rampa mais suave. Ocorre que, para o conjunto de passos 25 a 30, a composição dos movimentos de rotação e translação, em relação ao eixo Y, resultaria V_{RY} com sentido de afastamento, o que não é interessante. Então se ajustou a taxa de passos (e conseqüentemente Δt_m) da translação no eixo Y, neste intervalo, diretamente sobre a tabela, para que a resultante da velocidade no eixo Y desacelere linearmente atingindo a velocidade zero no final do intervalo, mas sempre com o sentido de aproximação. Ressalta-se que, a desaceleração de V_Y em toda essa fase é bastante conveniente, pois empurra o alimento para o fundo da colher.

Construção das Planilhas de Cálculo – Aspectos Específicos

- A resultante da velocidade no eixo Y, coluna V_{RY} , é assim calculada:

$$V_{RY} = V_{\text{tang}} \cos \psi_m - V_Y \quad (3.52)$$

$$\psi_m = (\psi_i + \psi_f) / 2 \quad (3.53)$$

Sendo: ψ_i = ângulo inicial do passo mecânico na carga;

ψ_f = ângulo final do passo mecânico na carga.

A análise da Planilha 3.2.4.R e do Gráfico 3.10 mostra em primeiro lugar uma fase de aceleração onde a velocidade V_{tang} varia de 0,2447m/s para 0,3770m/s em 0,242s, portanto com aceleração de aproximadamente 0,55m/s². Este período de aceleração é muito oportuno, pois a colher está emergindo do alimento e interessa levá-la a uma posição menos inclinada o mais rápido possível. Em seguida há a desaceleração até a parada na posição vertical, com variação de velocidade de 0,377m/s em 0,667s, ou seja, com desaceleração de aproximadamente 0,57m/s², portanto parecida com a aceleração que a precedeu. O tempo total do movimento na fase é aproximadamente 0,908s, conforme calculado na Planilha 3.2.4.R.

PLANILHA 3.2.4.R - MOVIMENTO DE ROTAÇÃO - 4ª FASE - SUBIDA DA COLHER

m	$\psi_i(^{\circ})$	$\psi_f(^{\circ})$	$\Delta t_m(s)$	$t_m(s)$ cada 4 passos	$f_m(pps)$	$V_{tang}(m/s)$	N_{clock}
1	36,0	37,8	0,007702	0,000000	129,8	0,2447	61.616
2	37,8	39,6	0,007146	0,030808	139,9	0,2638	57.168
3	39,6	41,4	0,006696	0,059392	149,3	0,2815	53.568
4	41,4	43,2	0,006321	0,086176	158,2	0,2982	50.568
5	43,2	45,0	0,006003	0,111146	166,6	0,3140	48.024
6	45,0	46,8	0,005729	0,135472	174,6	0,3290	45.832
7	46,8	48,6	0,005489	0,158388	182,2	0,3434	43.912
8	48,6	50,4	0,005277	0,180344	189,5	0,3572	42.216
9	50,4	52,2	0,005088	0,201452	196,5	0,3705	40.704
10	52,2	54,0	0,005000	0,221804	200,0	0,3770	40.000
1	54,0	55,8	0,005061	0,241804	197,6	0,3725	40.488
2	55,8	57,6	0,005191	0,262048	192,6	0,3631	41.528
3	57,6	59,4	0,005331	0,282812	187,6	0,3536	42.648
4	59,4	61,2	0,005482	0,304136	182,4	0,3439	43.856
5	61,2	63,0	0,005648	0,326064	177,1	0,3337	45.184
6	63,0	64,8	0,005829	0,348656	171,6	0,3234	46.632
7	64,8	66,6	0,006029	0,371972	165,9	0,3127	48.232
8	66,6	68,4	0,006251	0,396088	160,0	0,3016	50.008
9	68,4	70,2	0,006500	0,421092	153,8	0,2900	52.000
10	70,2	72,0	0,006781	0,447092	147,5	0,2780	54.248
11	72,0	73,8	0,007102	0,474216	140,8	0,2654	56.816
12	73,8	75,6	0,007473	0,502624	133,8	0,2522	59.784
13	75,6	77,4	0,007909	0,532516	126,4	0,2383	63.272
14	77,4	79,2	0,008432	0,564152	118,6	0,2236	67.456
15	79,2	81,0	0,009076	0,59788	110,2	0,2077	72.608
16	81,0	82,8	0,009893	0,634184	101,1	0,1905	79.144
17	82,8	84,6	0,010982	0,673756	91,1	0,1716	87.856
18	84,6	86,4	0,012536	0,717684	79,8	0,1504	100.288
19	86,4	88,2	0,015028	0,767828	66,5	0,1254	120.224
20	88,2	90,0	0,020135	0,827940	49,7	0,0936	161.080
Tempo total movimento =				0,908480			

DADOS	
Passo($^{\circ}$)	1,8
$R(m)$	0,24
$f_{clock}(MHz)$	8
$f_{s1}(pps)$	200
$g_{s1}(pps)$	124,6
$M1$	10
$f_{s2}(pps)$	40
$g_{s2}(pps)$	200
$M2$	21
n	4

CÁLCULO AUXILIAR	
$\beta_1(pps/s^2)$	1360
$\beta_2(pps/s^2)$	-960
$P_{carga}(m)$ a ca- da 4 passos	0,00754
$t_{clock}(ns)$	125

Planilha de Cálculo 3.2.4.R - 4ª Fase - Movimento de Rotação.

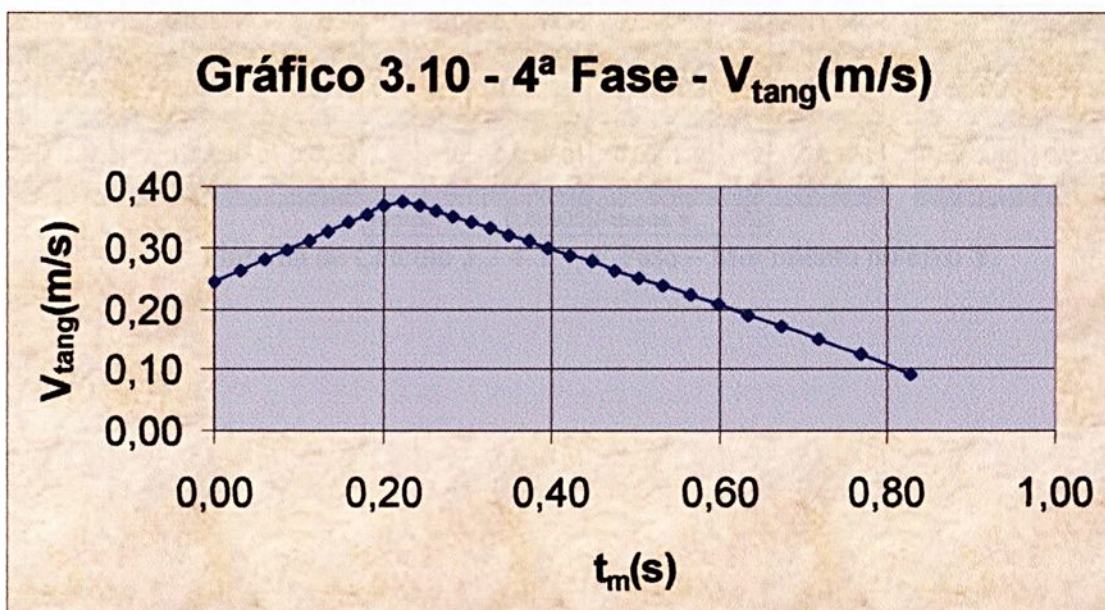


Gráfico 3.10 - 4ª Fase - Movimento de Rotação - $V_{tang} \times t_m$.

Na Planilha 3.2.4.Y e no Gráfico 3.11 observa-se a desaceleração suave da velocidade V_Y , até a parada, com variação de 0,0909m/s em 0,90s, ou seja, desaceleração de aproximadamente $0,1\text{m/s}^2$. Observa-se também o ajuste feito nos 5 últimos passos, tornando a queda da velocidade mais acentuada, para que o sentido de V_{RY} não seja afetado.

PLANILHA 3.2.4.Y - MOVIMENTO Y - 4ª FASE - SUBIDA DA COLHER

m	$\psi_m(^{\circ})$	V_{tangy} (m/s) (rotação)	V_Y (m/s)	f_m (pps)	Δt_m (s)	$4 \cdot \Delta t_m$ (s) (rotação)	n_{pes}	N_{clock}
1	36,9	0,1957	0,0909	1.818	0,000550	0,030808	56	4.400
2	38,7	0,2059	0,0893	1.786	0,000560	0,028584	51	4.480
3	40,5	0,2141	0,0877	1.754	0,000570	0,026784	47	4.560
4	42,3	0,2206	0,0861	1.721	0,000581	0,025284	44	4.648
5	44,1	0,2255	0,0845	1.689	0,000592	0,024012	41	4.736
6	45,9	0,229	0,0828	1.656	0,000604	0,022916	38	4.832
7	47,7	0,2311	0,0810	1.621	0,000617	0,021956	36	4.936
8	49,5	0,2320	0,0794	1.587	0,000630	0,021108	34	5.040
9	51,3	0,2317	0,0775	1.550	0,000645	0,020352	32	5.160
10	53,1	0,2264	0,0758	1.515	0,000660	0,020000	30	5.280
11	54,9	0,2142	0,0739	1.477	0,000677	0,020244	30	5.416
12	56,7	0,1994	0,0719	1.439	0,000695	0,020764	30	5.560
13	58,5	0,1848	0,0699	1.399	0,000715	0,021324	30	5.720
14	60,3	0,1704	0,0679	1.359	0,000736	0,021928	30	5.888
15	62,1	0,1561	0,0659	1.318	0,000759	0,022592	30	6.072
16	63,9	0,1423	0,0637	1.274	0,000785	0,023316	30	6.280
17	65,7	0,1287	0,0614	1.229	0,000814	0,024116	30	6.512
18	67,5	0,1154	0,0591	1.182	0,000846	0,025004	30	6.768
19	69,3	0,1025	0,0567	1.134	0,000882	0,026000	29	7.056
20	71,1	0,09	0,0542	1.083	0,000923	0,027124	29	7.384
21	72,9	0,078	0,0515	1.031	0,000970	0,028408	29	7.760
22	74,7	0,0665	0,0487	975	0,001026	0,029892	29	8.208
23	76,5	0,0556	0,0458	916	0,001092	0,031636	29	8.736
24	78,3	0,0453	0,0426	852	0,001174	0,033728	29	9.392
25	80,1	0,0357	0,0335	670	0,001493	0,036304	24	11.944
26	81,9	0,0268	0,0251	502	0,001992	0,039572	20	15.936
27	83,7	0,0188	0,0175	350	0,002857	0,043928	15	22.856
28	85,5	0,0118	0,0109	218	0,004587	0,050144	11	36.696
29	87,3	0,0059	0,0055	110	0,009091	0,060112	7	72.728
30	89,1	0,0015	0,0015	30	0,033333	0,08054	2	266.664

DADOS	
Passo($^{\circ}$)	1,8
P_{rosca} (m)	0,01
f_{clock} (MHz)	8
f_s (pps)	0
g_s (pps)	1832
M	31

CÁLCULO AUXILIAR	
β (pps/s ²)	-55.937
Passo(m)	0,00005

Tempo = 0,89905 Passos = 902

Planilha de Cálculo 3.2.4.Y – 4ª Fase – Movimento no eixo Y.



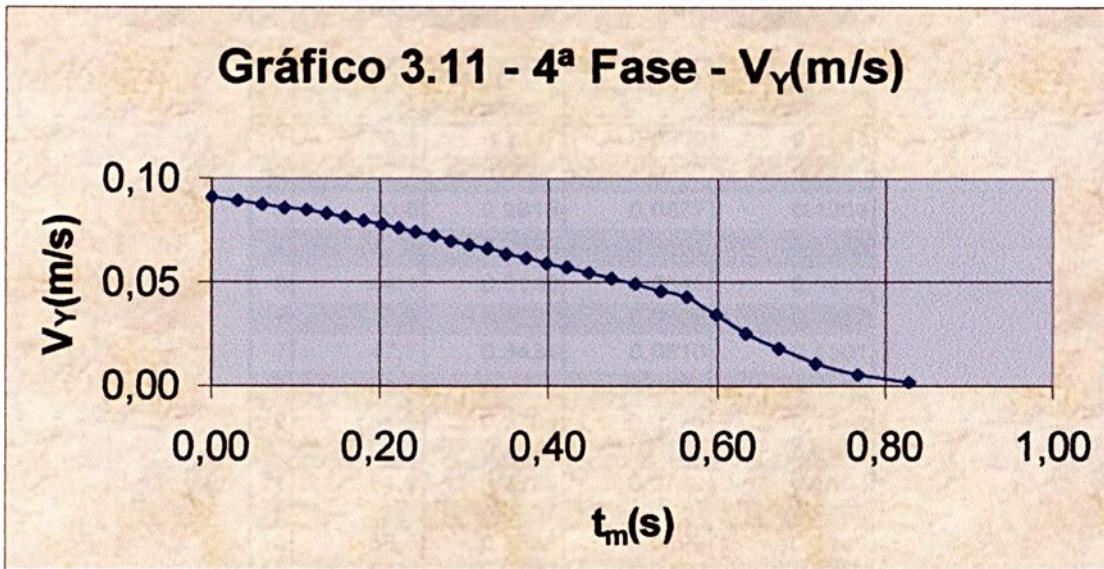


Gráfico 3.11 - 4ª Fase - Movimento no eixo Y - $V_Y \times t_m$.

Na Planilha de Cálculo 3.2.4.G e no Gráfico 3.12 observa-se a aceleração e posterior desaceleração da componente resultante V_{RY} . Na fase de aceleração, V_{RY} tem variação bem mais atenuada do que V_{tang} , ou seja, de 0,1048m/s a 0,1542m/s em 0,242s, portanto com aceleração de aproximadamente $0,20\text{m/s}^2$. A desaceleração é parecida, com variação de 0,1542m/s até zero em 0,667s, ou seja, desaceleração aproximada de $0,23\text{m/s}^2$.

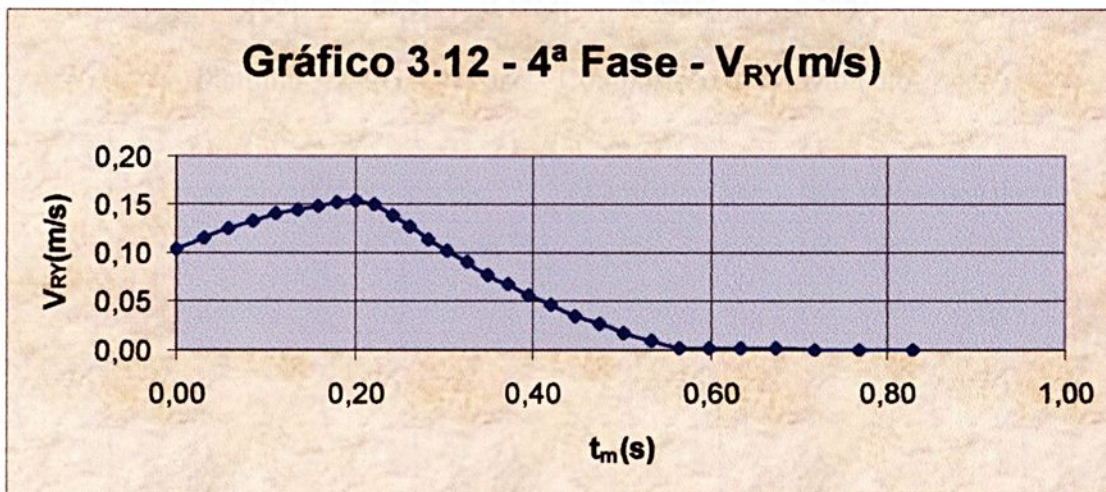


Gráfico 3.12 - 4ª Fase - Composição de Movimentos - $V_{RY} \times t_m$.

PLANILHA 3.2.4.G - COMPOSIÇÃO - 4ª FASE - SUBIDA

m	$\psi_m(^{\circ})$	$V_{tang}(m/s)$ (rotação)	$V_Y(m/s)$	$V_{RY}(m/s)$
1	36,9	0,2447	0,0909	0,1048
2	38,7	0,2638	0,0893	0,1166
3	40,5	0,2815	0,0877	0,1264
4	42,3	0,2982	0,0861	0,1345
5	44,1	0,3140	0,0845	0,1410
6	45,9	0,3290	0,0828	0,1462
7	47,7	0,3434	0,0810	0,1501
8	49,5	0,3572	0,0794	0,1526
9	51,3	0,3705	0,0775	0,1542
10	53,1	0,3770	0,0758	0,1506
11	54,9	0,3725	0,0739	0,1403
12	56,7	0,3631	0,0719	0,1275
13	58,5	0,3536	0,0699	0,1149
14	60,3	0,3439	0,0679	0,1025
15	62,1	0,3337	0,0659	0,0902
16	63,9	0,3234	0,0637	0,0786
17	65,7	0,3127	0,0614	0,0673
18	67,5	0,3016	0,0591	0,0563
19	69,3	0,2900	0,0567	0,0458
20	71,1	0,2780	0,0542	0,0358
21	72,9	0,2654	0,0515	0,0265
22	74,7	0,2522	0,0487	0,0178
23	76,5	0,2383	0,0458	0,0098
24	78,3	0,2236	0,0426	0,0027
25	80,1	0,2077	0,0335	0,0022
26	81,9	0,1905	0,0251	0,0017
27	83,7	0,1716	0,0175	0,0013
28	85,5	0,1504	0,0109	0,0009
29	87,3	0,1254	0,0055	0,0004
30	89,1	0,0936	0,0015	0,0000

Planilha 3.2.4.G – 4ª Fase – Composição de Movimentos.



3.2.5 – Análise detalhada da 5ª Fase – Deslocamento da colher carregada até o usuário

Este deslocamento, ilustrado na Figura 3.7, é exclusivamente de translação, tanto no eixo X quanto no eixo Y, e de aproximação do usuário com a colher carregada, sendo adotado um ciclo de aceleração linear em 40 passos, velocidade constante e desaceleração linear em 40 passos, para ambos os movimentos. Não há qualquer composição de movimentos.

A Planilha de Cálculo 3.2.5.Y e o Gráfico 3.13 mostram a rampa de aceleração e a fase de velocidade constante no movimento Y, sendo que a rampa de desaceleração não foi apresentada sendo semelhante à rampa de aceleração. A análise dos mesmos revela uma variação de velocidade de 0,1m/s em 0,04s, portanto com aceleração de 2,5m/s². Conforme explanado no item 3.2.1, a aceleração é relativamente alta em função da taxa de passos em velocidade constante, que neste caso é de 2000pps, e que é consequência do sistema de transmissão envolvido. O perfil das rampas foi suavizado adotando-se 40 passos em sua construção, e entende-se que a estabilidade do alimento na colher é satisfatória, mesmo porque a colher está na horizontal.

A Planilha de Cálculo 3.2.5.X e o Gráfico 3.14 apresentam a rampa de aceleração, seguida da etapa de velocidade constante e da rampa de desaceleração, do movimento no eixo X, tomando-se como referência o ponto de inserção $N_x = 0$. A análise dos mesmos revela rampas de aceleração e desaceleração com variação de velocidade de 0,1m/s em 0,4s, portanto com aceleração e desaceleração de 0,25m/s², bastante razoáveis já que são dez vezes menores que a do movimento no eixo Y.

A análise da Planilha de Cálculo 3.2.5.G.1 mostra que o tempo para a execução do ciclo completo do movimento da mesa XY, ou seja, o tempo total consumido nas fases 1 a 5, vai depender das coordenadas de inserção. O menor tempo despendido é aproximadamente 7,66s, para $N_y = 0$ e $N_x = 0$ a 5. O maior tempo despendido é aproximadamente 9,88s para $N_y = 4$ e qualquer N_x . Avalia-se que tempos maiores do que estes poderiam causar impaciência no usuário, motivo que desestimulou o emprego neste projeto de velocidades ainda menores.

A análise da Planilha de Cálculo 3.2.5.G.2 mostra que o curso total do movimento no eixo Y tem valor máximo de 442,7mm, valor este que é uma das condições de dimensionamento da mesa. Observa-se que o tempo total do movimento no eixo Y, para as fases 1 a 4, não foi de valia para o cálculo do tempo do ciclo total da mesa, pois o tempo do movimento rotacional nessas fases é maior.

Construção das Planilhas de Cálculo – Aspectos Específicos

- A Planilha de Cálculo 3.2.5.X, do movimento no eixo X, agrega os cálculos do trecho de velocidade constante. O número total de passos necessários nesta fase é obtido na planilha 3.2.1.X.2 que é integrada e que totaliza o número de passos no movimento X em sentido contrário.
- A Planilha de Cálculo 3.2.5.Y, do movimento no eixo Y, agrega os cálculos do trecho de velocidade constante. O número total de passos necessários nesta fase é obtido na planilha 3.2.5.G.2 que é integrada e que totaliza o número de passos no movimento Y em sentido contrário.
- A Planilha de Cálculo 3.2.5.G.1 soma o tempo total do movimento de rotação, obtido pela soma dos tempos de rotação das Planilhas de Cálculo 3.2.1.R, 3.2.2.R, 3.2.3.R e 3.2.4.R, com os tempos dos movimentos nos eixos X e Y, da 5ª fase, calculados respectivamente nas Planilhas de Cálculo 3.2.5.X e 3.2.5.Y, para cada coordenada de inserção. Obtêm-se assim os tempos totais do sistema.
- A Planilha de Cálculo 3.2.5.G.2, com base nas planilhas integradas das quatro fases anteriores, ou seja, Planilhas 3.2.1.Y.2, 3.2.2.Y, 3.2.3.Y, 3.2.4.Y, totaliza os passos e distâncias percorridas no movimento no eixo Y, no sentido de afastamento do usuário, para cada coordenada de inserção, que são exatamente os passos e distâncias que terão que ser percorridas na 5ª fase, para a colher voltar para o usuário.

PLANILHA 3.2.5.Y - MOVIMENTO Y - 5ª FASE - DESLOCAMENTO DA COLHER CARREGADA									
ACELERAÇÃO					DESACELERAÇÃO				
m	f_m (pps)	Δt_m (s)	V_Y (m/s)	N_{clock}	m	Δt_m (s)	f_m (pps)	V_Y (m/s)	N_{clock}
1	158	0,006325	0,0079	50.600	1	0,000503	1.988	0,0994	4.024
2	382	0,002620	0,0191	20.960	2	0,000510	1.961	0,0980	4.080
3	498	0,002010	0,0249	16.080	3	0,000516	1.938	0,0969	4.128
4	590	0,001695	0,0295	13.560	4	0,000523	1.912	0,0956	4.184
5	670	0,001493	0,0335	11.944	5	0,000531	1.883	0,0942	4.248
6	741	0,001350	0,0370	10.800	6	0,000538	1.859	0,0929	4.304
7	806	0,001241	0,0403	9.928	7	0,000546	1.832	0,0916	4.368
8	866	0,001155	0,0433	9.240	8	0,000555	1.802	0,0901	4.440
9	922	0,001085	0,0461	8.680	9	0,000563	1.776	0,0888	4.504
10	975	0,001026	0,0487	8.208	10	0,000573	1.745	0,0873	4.584
11	1.025	0,000976	0,0512	7.808	11	0,000582	1.718	0,0859	4.656
12	1.072	0,000933	0,0536	7.464	12	0,000592	1.689	0,0845	4.736
13	1.117	0,000895	0,0559	7.160	13	0,000603	1.658	0,0829	4.824
14	1.161	0,000861	0,0581	6.888	14	0,000614	1.629	0,0814	4.912
15	1.203	0,000831	0,0602	6.648	15	0,000626	1.597	0,0799	5.008
16	1.245	0,000803	0,0623	6.424	16	0,000639	1.565	0,0782	5.112
17	1.284	0,000779	0,0642	6.232	17	0,000652	1.534	0,0767	5.216
18	1.323	0,000756	0,0661	6.048	18	0,000667	1.499	0,0750	5.336
19	1.361	0,000735	0,0680	5.880	19	0,000682	1.466	0,0733	5.456
20	1.397	0,000716	0,0698	5.728	20	0,000698	1.433	0,0716	5.584
21	1.433	0,000698	0,0716	5.584	21	0,000716	1.397	0,0698	5.728
22	1.466	0,000682	0,0733	5.456	22	0,000735	1.361	0,0680	5.880
23	1.499	0,000667	0,0750	5.336	23	0,000756	1.323	0,0661	6.048
24	1.534	0,000652	0,0767	5.216	24	0,000779	1.284	0,0642	6.232
25	1.565	0,000639	0,0782	5.112	25	0,000803	1.245	0,0623	6.424
26	1.597	0,000626	0,0799	5.008	26	0,000831	1.203	0,0602	6.648
27	1.629	0,000614	0,0814	4.912	27	0,000861	1.161	0,0581	6.888
28	1.658	0,000603	0,0829	4.824	28	0,000895	1.117	0,0559	7.160
29	1.689	0,000592	0,0845	4.736	29	0,000933	1.072	0,0536	7.464
30	1.718	0,000582	0,0859	4.656	30	0,000976	1.025	0,0512	7.808
31	1.745	0,000573	0,0873	4.584	31	0,001026	975	0,0487	8.208
32	1.776	0,000563	0,0888	4.504	32	0,001085	922	0,0461	8.680
33	1.802	0,000555	0,0901	4.440	33	0,001155	866	0,0433	9.240
34	1.832	0,000546	0,0916	4.368	34	0,001241	806	0,0403	9.928
35	1.859	0,000538	0,0929	4.304	35	0,001350	741	0,0370	10.800
36	1.883	0,000531	0,0942	4.248	36	0,001493	670	0,0335	11.944
37	1.912	0,000523	0,0956	4.184	37	0,001695	590	0,0295	13.560
38	1.938	0,000516	0,0969	4.128	38	0,002010	498	0,0249	16.080
39	1.961	0,000510	0,0980	4.080	39	0,002620	382	0,0191	20.960
40	1.988	0,000503	0,0994	4.024	40	0,006325	158	0,0079	50.600
0,039998 = tempo total					0,039998 = tempo total				

VELOCIDADE CONSTANTE				
m	f_m (pps)	Δt_m (s)	V_Y (m/s)	N_{clock}
(*)	2.000	0,000500	0,1000	4.000

DADOS	
Passo(°)	1,8
P_{rosca} (m)	0,01
f_{clock} (MHz)	8
f_{s1} (pps)	2000
g_{s1} (pps)	0
M1	41
f_{s2} (pps)	0
g_{s2} (pps)	2000
M2	41

CÁLCULO AUXILIAR	
β_1 (pps/s ²)	50.000
β_2 (pps/s ²)	-50.000
Passo(m)	0,00005
t_{clock} (ns)	125
tempo total-0	2,242
tempo total-1	2,796
tempo total-2	3,350
tempo total-3	3,904
tempo total-4	4,458

Translação velocidade constante(*)	
N_y	Nºpassos
0	4324
1	5432
2	6540
3	7648
4	8756

Planilha de Cálculo 3.2.5.Y – 5ª Fase – Movimento no eixo Y.



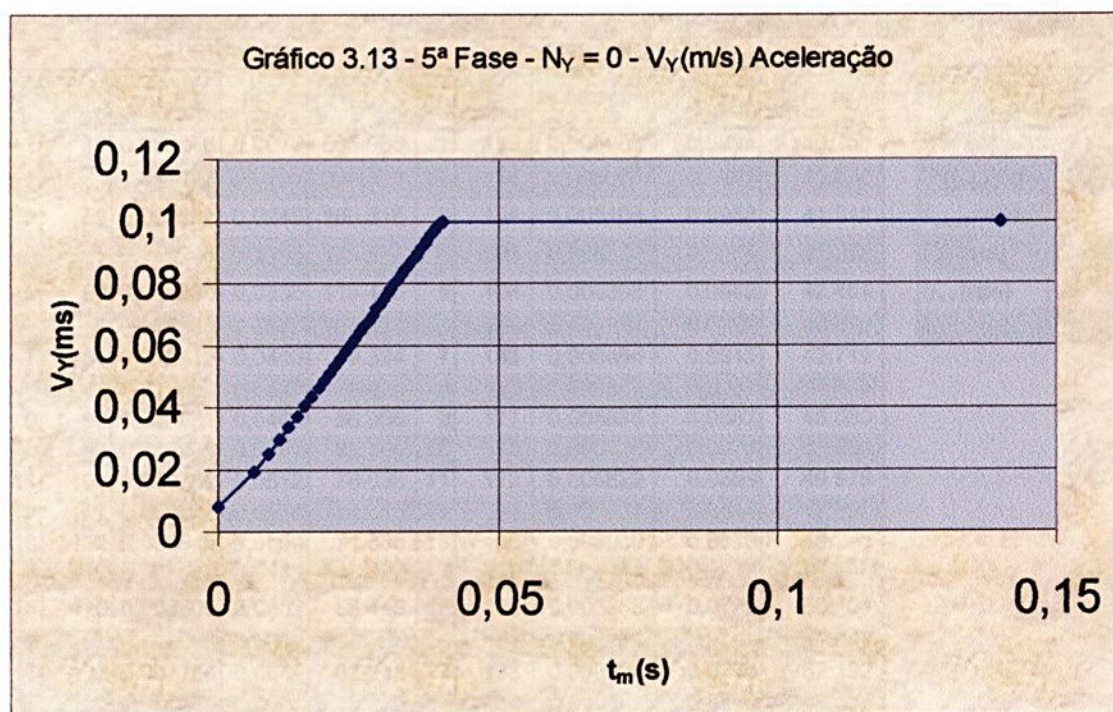


Gráfico 3.13 – 5ª Fase - Movimento no eixo Y – Rampa de aceleração seguida de velocidade constante – $V_Y \times t_m$.

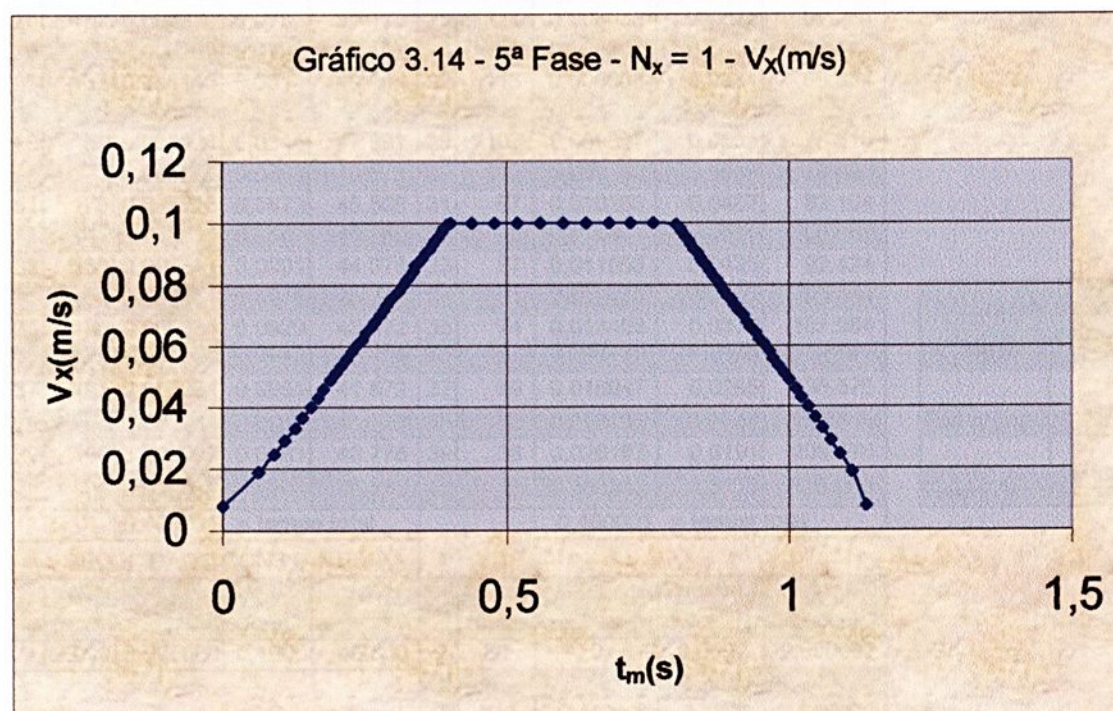


Gráfico 3.14 – 5ª Fase – Movimento no eixo X – Rampa de aceleração seguida de velocidade constante e desaceleração - $V_X \times t_m$.

PLANILHA 3.2.5.X - MOVIMENTO X - 5ª FASE - COLHER CARREGADA EM APROXIMAÇÃO

ACELERAÇÃO					DESACELERAÇÃO				
m	f_m (pps)	Δt_m (s)	V_x (m/s)	N_{clock}	m	f_m (pps)	Δt_m (s)	V_x (m/s)	N_{clock}
1	16	0,063246	0,0079	505.968	1	199	0,005032	0,0994	40.256
2	38	0,026197	0,0191	209.576	2	196	0,005097	0,0981	40.776
3	50	0,020102	0,0249	160.816	3	194	0,005164	0,0968	41.312
4	59	0,016947	0,0295	135.576	4	191	0,005234	0,0955	41.872
5	67	0,014930	0,0335	119.440	5	188	0,005308	0,0942	42.464
6	74	0,013498	0,0370	107.984	6	186	0,005384	0,0929	43.072
7	81	0,012413	0,0403	99.304	7	183	0,005464	0,0915	43.712
8	87	0,011553	0,0433	92.424	8	180	0,005547	0,0901	44.376
9	92	0,010851	0,0461	86.808	9	177	0,005635	0,0887	45.080
10	97	0,010263	0,0487	82.104	10	175	0,005726	0,0873	45.808
11	102	0,009762	0,0512	78.096	11	172	0,005822	0,0859	46.576
12	107	0,009327	0,0536	74.616	12	169	0,005924	0,0844	47.392
13	112	0,008946	0,0559	71.568	13	166	0,006030	0,0829	48.240
14	116	0,008608	0,0581	68.864	14	163	0,006143	0,0814	49.144
15	120	0,008306	0,0602	66.448	15	160	0,006263	0,0798	50.104
16	124	0,008033	0,0622	64.264	16	157	0,006389	0,0783	51.112
17	128	0,007786	0,0642	62.288	17	153	0,006524	0,0766	52.192
18	132	0,007560	0,0661	60.480	18	150	0,006667	0,0750	53.336
19	136	0,007353	0,0680	58.824	19	147	0,006820	0,0733	54.560
20	140	0,007162	0,0698	57.296	20	143	0,006985	0,0716	55.880
21	143	0,006985	0,0716	55.880	21	140	0,007162	0,0698	57.296
22	147	0,006820	0,0733	54.560	22	136	0,007353	0,0680	58.824
23	150	0,006667	0,0750	53.336	23	132	0,007560	0,0661	60.480
24	153	0,006524	0,0766	52.192	24	128	0,007786	0,0642	62.288
25	157	0,006389	0,0783	51.112	25	124	0,008033	0,0622	64.264
26	160	0,006263	0,0798	50.104	26	120	0,008306	0,0602	66.448
27	163	0,006143	0,0814	49.144	27	116	0,008608	0,0581	68.864
28	166	0,006030	0,0829	48.240	28	112	0,008946	0,0559	71.568
29	169	0,005924	0,0844	47.392	29	107	0,009327	0,0536	74.616
30	172	0,005822	0,0859	46.576	30	102	0,009762	0,0512	78.096
31	175	0,005726	0,0873	45.808	31	97	0,010263	0,0487	82.104
32	177	0,005635	0,0887	45.080	32	92	0,010851	0,0461	86.808
33	180	0,005547	0,0901	44.376	33	87	0,011553	0,0433	92.424
34	183	0,005464	0,0915	43.712	34	81	0,012413	0,0403	99.304
35	186	0,005384	0,0929	43.072	35	74	0,013498	0,0370	107.984
36	188	0,005308	0,0942	42.464	36	67	0,014930	0,0335	119.440
37	191	0,005234	0,0955	41.872	37	59	0,016947	0,0295	135.576
38	194	0,005164	0,0968	41.312	38	50	0,020102	0,0249	160.816
39	196	0,005097	0,0981	40.776	39	38	0,026197	0,0191	209.576
40	199	0,005032	0,0994	40.256	40	16	0,063246	0,0079	505.968
0,400001 = tempo total					0,400001 = tempo total				

DADOS	
Passo(°)	1,8
$P_{sistema}$ (m)	0,1
f_{clock} (MHz)	8
f_{s1} (pps)	200
g_{s1} (pps)	0
$M1$	41

CÁLCULO AUXILIAR	
β_1 (pps/s ²)	500
Passo(m)	0,0005
f_{clock} (ns)	125

VELOCIDADE CONSTANTE									
m	f_m (pps)	Δt_m (s)	V_x (m/s)	N_{clock}	N_x	Passos totais	Passos com veloc. cte (*)	Tempos(s) veloc. cte	Tempos totais(s)
(*)	2.000	0,005000	0,1000	40.000	0	80	0	0,0000	0,800002
					1	160	80	0,4000	1,200002
					2	240	160	0,8000	1,600002
					3	320	240	1,2000	2,000002
					4	400	320	1,6000	2,400002
					5	480	400	2,0000	2,800002
					6	560	480	2,4000	3,200002

Planilha de Cálculo 3.2.5.X – 5ª Fase – Movimento no eixo X.



Planilha 3.2.5.G.1			
Tempos totais do movimento (s)			
N _y	Movimento Y	Rotação	Ciclo
	Fase 5	completa	completo
0	2,250996	5,409748	7,660744
1	2,804996	5,409748	8,214744
2	3,358996	5,409748	8,768744
3	3,912996	5,409748	9,322744
4	4,466996	5,409748	9,876744
N _x	Movimento X	Rotação	Ciclo
	Fase 5		completo
0	0	5,409748	5,409748
1	0,4	5,409748	5,809748
2	0,8	5,409748	6,209748
3	1,2	5,409748	6,609748
4	1,6	5,409748	7,009748
5	2	5,409748	7,409748
6	2,4	5,409748	7,809748

Planilha de Cálculo 3.2.5.G.1 – Movimentos nos eixos X e Y – Tempos totais para o ciclo completo do movimento da mesa.

PLANILHA 3.2.5.G.2 - TOTALIZAÇÃO - MOVIMENTO Y - AFASTAMENTO									
POSICIONAMENTO		COMPOSIÇÃO				TOTAL GERAL			
CÔMPUTO - 1ª FASE		CÔMPUTO - 2ª, 3ª, 4ª FASES				CÔMPUTO - 1ª, 2ª, 3ª, 4ª FASES			
Passos totais	Translação total (mm)	Tempo total (s)	Passos totais	Translação total (mm)	Tempo total (s)	Passos totais	Translação total (mm)	Tempo total (s)	N _y
80	4	0,055196	4342	217,1	2,399334	4422	221,1	2,45453	0
1188	59,4	0,666812	4342	217,1	2,399334	5530	276,5	3,066146	1
2296	114,8	1,278428	4342	217,1	2,399334	6638	331,9	3,677762	2
3404	170,2	1,890044	4342	217,1	2,399334	7746	387,3	4,289378	3
4512	225,6	2,50166	4342	217,1	2,399334	8854	442,7	4,900994	4

Planilha de Cálculo 3.2.5.G.2 – Movimento no eixo Y - Cômputo dos tempos consumidos e das distâncias percorridas nas 1ª, 2ª, 3ª e 4ª fases.

3.3 Análise do Conjunto dos Movimentos e da Transição entre as Fases

Neste item procurar-se-á mostrar através de gráficos como os movimentos se coordenam e como se dá a transição entre as diversas fases.

Conforme exposto no item 3.2.1, na fase 1 não há composição de movimentos, sendo que o movimento no eixo X se inicia e se conclui dentro dessa fase, posicionando a colher na coordenada N_x programada. Entretanto, o movimento Y é ajustado de tal forma que, o posicionamento da colher na coordenada N_y programada, dar-se-á com uma rampa de aceleração sucedida por uma etapa de velocidade constante, velocidade esta igual à velocidade no primeiro passo da próxima fase, que é a fase de inserção. Isto garante transição suave entre fases. O Gráfico 3.15 ilustra essa situação.

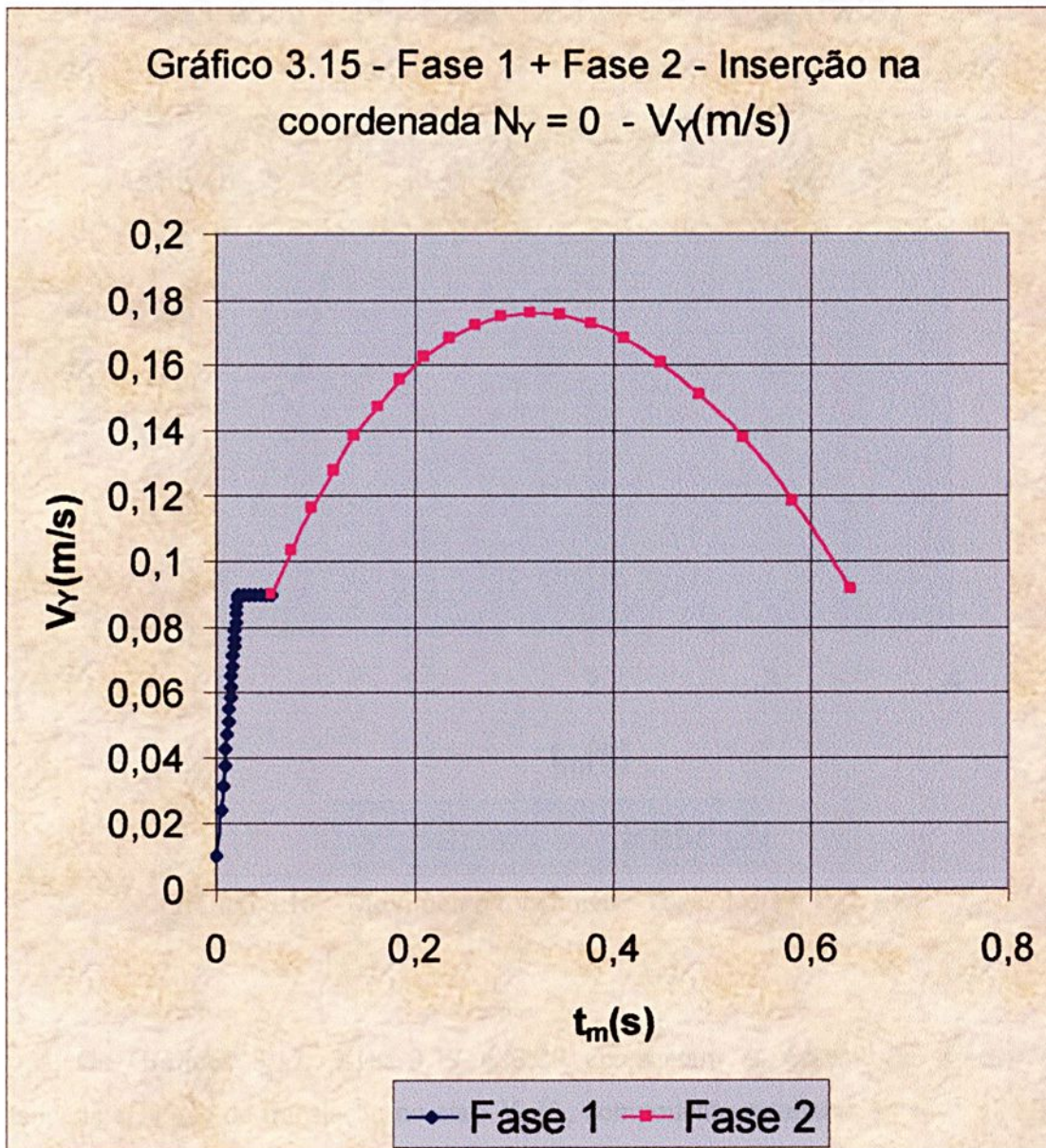


Gráfico 3.15 – Movimento no eixo Y – Fases 1 e 2 – Inserção no ponto 0 – $V_Y \times t_m$.

Ainda com relação à fase 1, o movimento rotacional dar-se-á com uma rampa de aceleração sucedida por uma etapa de velocidade constante, velocidade esta compatível com a velocidade no primeiro passo da próxima fase, de acordo com o algoritmo do item 3.1.1. O referido algoritmo estabelece, para uma rampa de desaceleração, um patamar de velocidade constante inicial, correspondente à taxa de passos g_s . O movimento rotacional na fase 2 constitui-se de uma rampa de desaceleração, e o patamar citado vai ser proporcionado pela etapa de velocidade constante da fase 1. Isto assegura transição suave entre as fases. O Gráfico 3.16 ilustra essa situação.

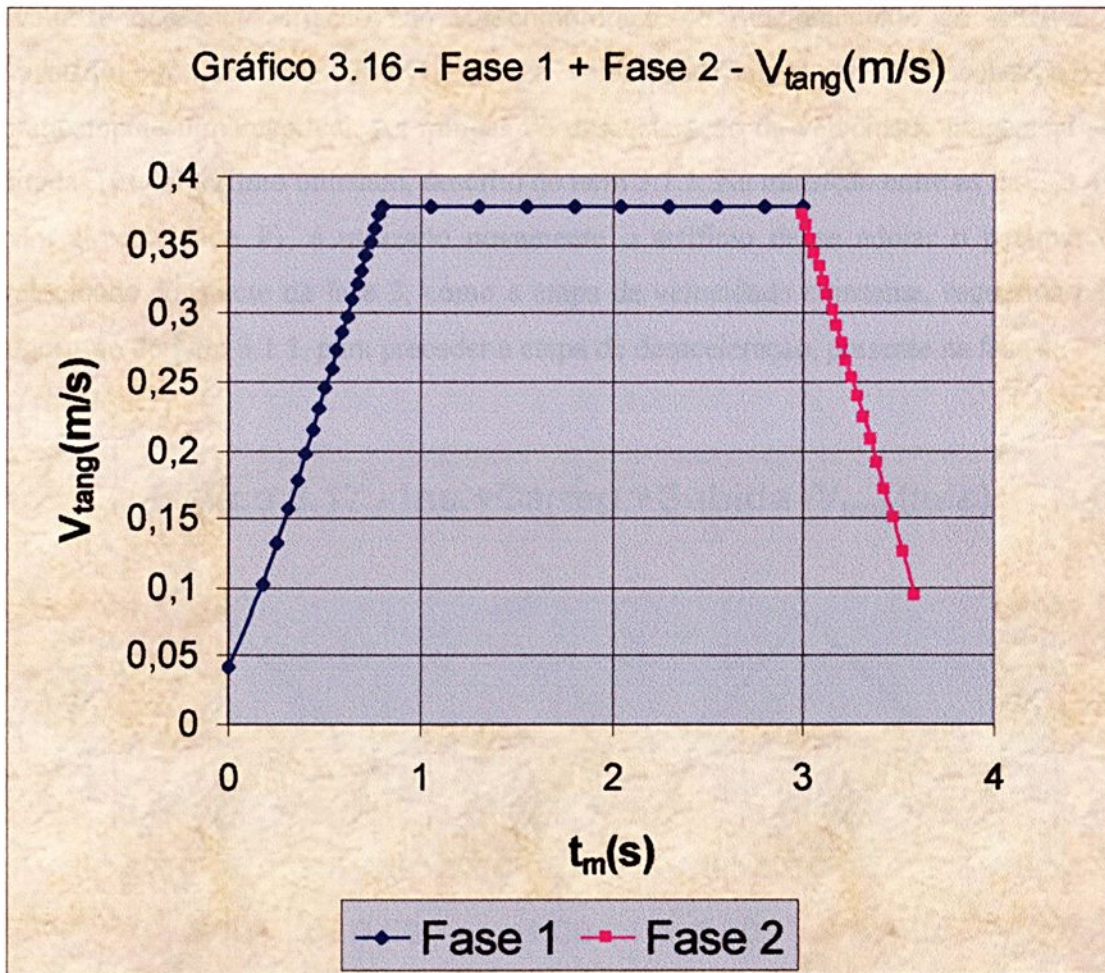


Gráfico 3.16 – Movimento rotacional – Fases 1 e 2 – $V_{tang} \times t_m$.

Os Gráficos 3.17, 3.18, 3.19 e 3.20 apresentam as curvas das velocidades tangencial, V_{tang} , de translação no eixo Y, V_Y , componente resultante no eixo Y, V_{RY} , e sobreposição das curvas V_Y , V_{tang} e V_{RY} , respectivamente, para o conjunto das fases 2, 3

e 4, ou seja, inserção, carregamento e subida da colher, que são fases onde ocorre composição dos movimentos.

Na análise dos Gráficos 3.17 e 3.18 pode-se avaliar os resultados da decisão de manter-se a velocidade V_Y constante na fase de carregamento da colher, fase 3, velocidade esta igual a do último passo da fase anterior. Em função disto ocorre um degrau na velocidade V_{tang} , que passa de 0,0936m/s (49,7pps), no último passo da fase de inserção, fase 2, para 0,1604m/s (85,1pps), no primeiro passo da fase de carregamento da colher, fase 3, com uma variação de aproximadamente 71%. Embora percentualmente a variação seja elevada, como se trabalha com baixas velocidades, avalia-se que esta variação não vai comprometer o funcionamento do sistema. A transição entre as fases 3 e 4, para a velocidade tangencial (em aceleração), é praticamente imperceptível. As rampas de desaceleração da velocidade tangencial são ditadas pelo algoritmo utilizado, descrito no item 3.1.1. Na transição entre as fases 3 e 4, para a velocidade V_Y , é utilizado novamente o artifício de se adotar o patamar de velocidade constante da fase 3, como a etapa de velocidade constante, requerida pelo algoritmo do item 3.1.1, para preceder a etapa de desaceleração, presente na fase 4.

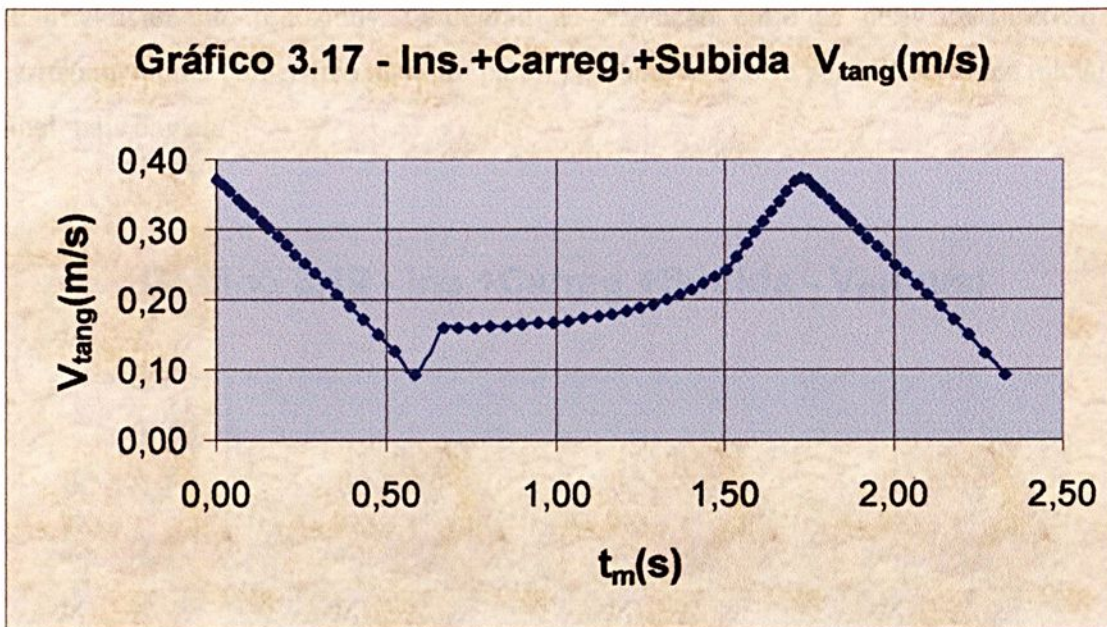


Gráfico 3.17 – Movimento Rotacional – Fases 2, 3 e 4 – $V_{tang} \times t_m$.

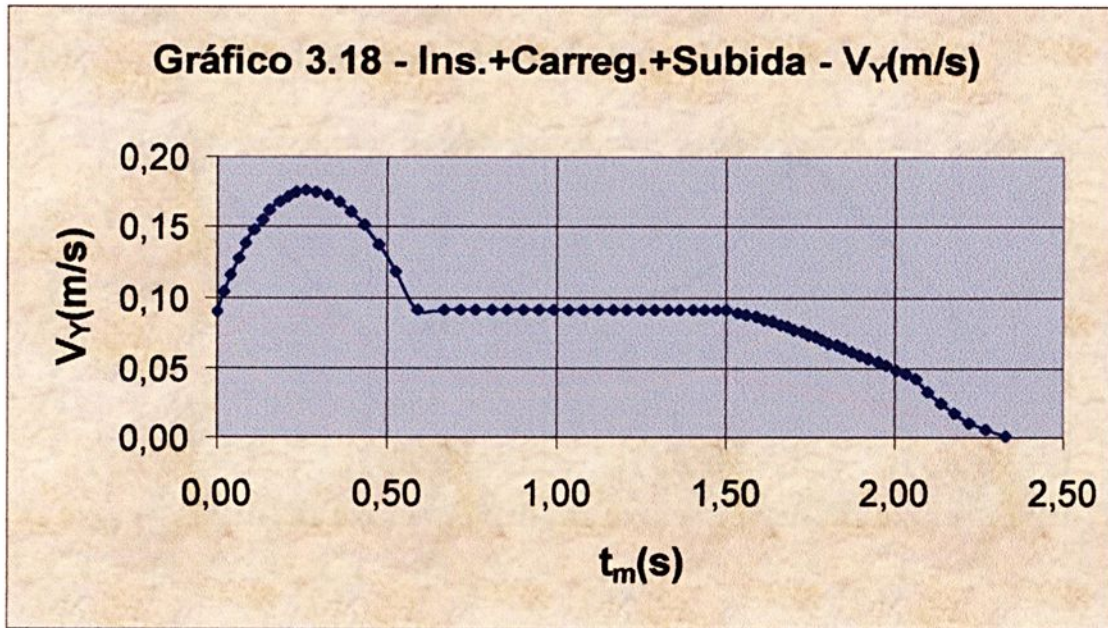


Gráfico 3.18 – Movimento no eixo Y – Fases 2, 3 e 4 – $V_Y \times t_m$.

Na análise dos gráficos 3.19 e 3.20 vê-se que a componente V_{RY} , a qual a carga fica efetivamente submetida, está atenuada em relação à V_Y e V_{tang} , desaparecendo, por exemplo, a “saliência” de V_Y na fase de inserção, e os “picos” de V_{tang} são significativamente reduzidos. O degrau na transição entre as fases de inserção e carregamento da colher fica mantido para V_{RY} , contudo ocorre para velocidades inicial e final mais baixas.

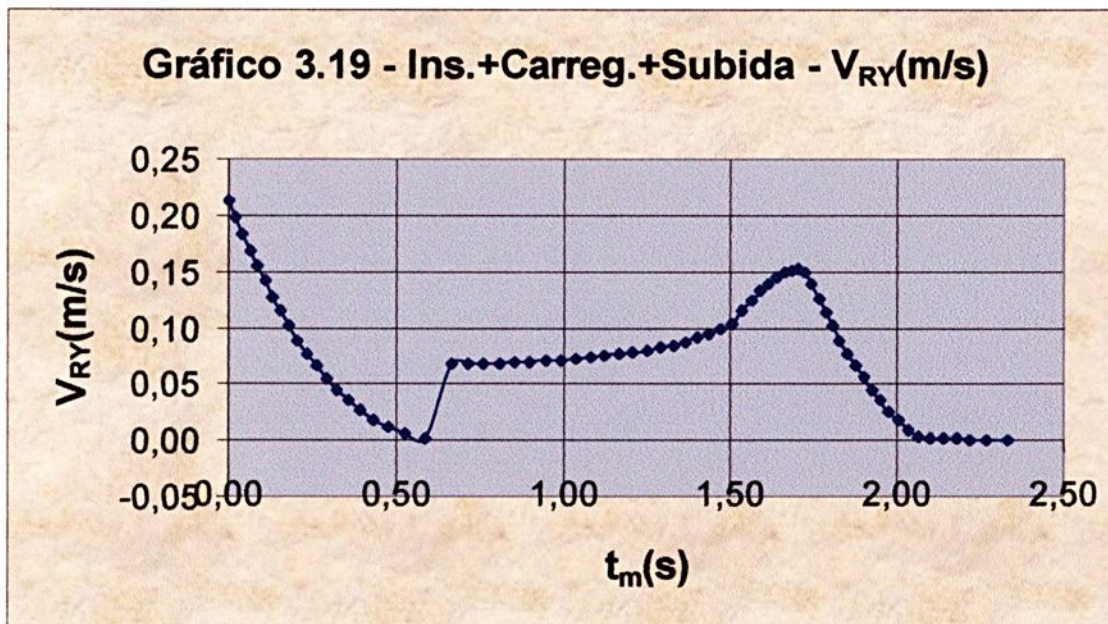


Gráfico 3.19 – Composição de Movimentos - Fases 2, 3 e 4 – $V_{RY} \times t_m$.

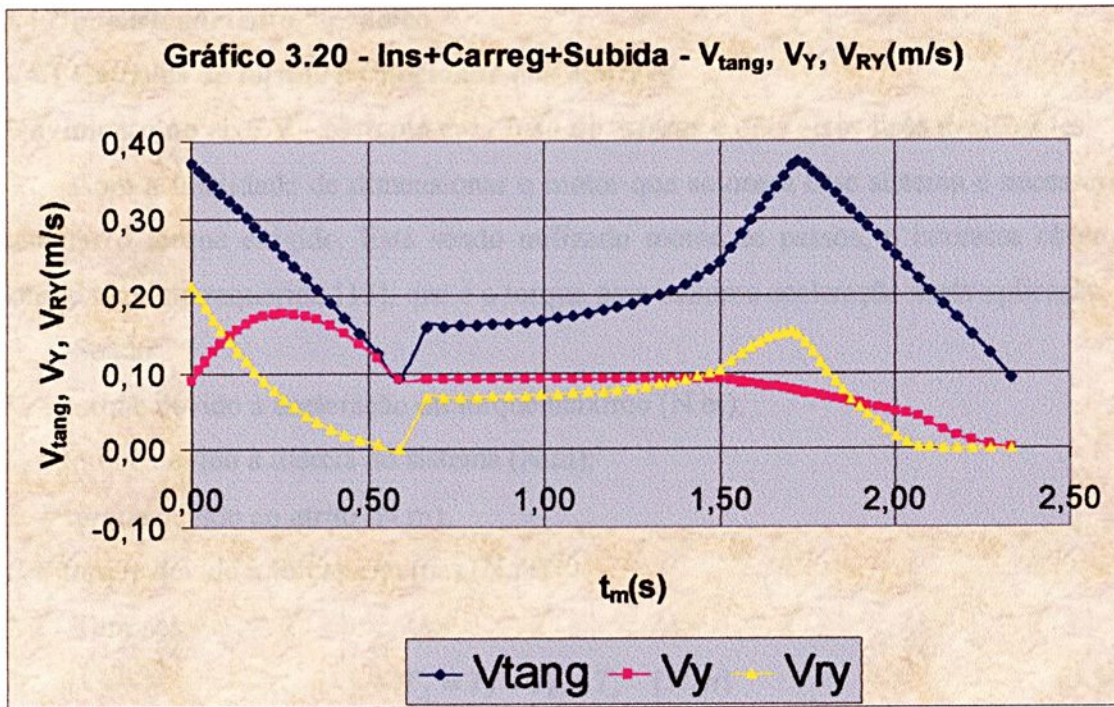


Gráfico 3.20 – Composição de Movimentos – Fases 2, 3 e 4 –

$$V_{tang} \times t_m, V_Y \times t_m, V_{RY} \times t_m.$$

Observa-se que a transição da fase 4 para a fase 5 é feita com todas as velocidades envolvidas zeradas, ou seja, a colher para completamente na posição horizontal no final da fase 4, e a fase 5 inicia-se a partir do repouso, não havendo portanto, interação entre essas fases. A fase 5 encontra-se descrita em detalhes no item 3.2.5.

3.4 Dimensionamento mecânico

3.4.1 Cálculos de torque e velocidade dos motores

Movimento no eixo Y – Sistema com fuso de esferas e dois eixos lisos deslizantes

Com a finalidade de dimensionar o motor que acionará esse sistema é necessário calcular o torque exigido. Está sendo utilizado motor de passos, e interessa obter o torque máximo requerido [13], que é o torque para máxima aceleração nesta aplicação.

Sendo:

T_A = torque devido à aceleração ou torque máximo (N.m);

T_J = torque devido à inércia do sistema (N.m);

T_F = torque devido ao atrito (N.m);

T_e = torque devido à forças externas (N.m).

Tem-se:

$$T_A = T_J + T_F + T_e \quad (N.m) \quad (3.54)$$

A expressão (3.54) vai exigir os seguintes cálculos auxiliares.

- Calcula-se o torque devido à inércia do sistema (T_J), que é dado por:

$$T_J = \frac{\omega_{max}}{g t_a} \left[\frac{J_L}{\varepsilon_{fuso}} + J_B + J_M \right] \quad (N.m) \quad (3.55)$$

Sendo:

ω_{max} = velocidade angular máxima (rad/s);

J_L = inércia da carga (N.m²);

J_B = inércia da rosca sem fim (N.m²);

J_M = inércia do motor (N.m²);

t_a = tempo para aceleração (s);

g = aceleração da gravidade = 9,81m/s²;

ε_{fuso} = eficiência do fuso de esferas = 90%.

Para aplicação da fórmula (3.55) são necessários ainda os seguintes cálculos complementares.

A inércia da carga (J_L) é obtida através de:

$$J_L = \frac{W (P/1000)^2}{(2\pi)^2} \quad (N.m^2) \quad (3.56)$$

Sendo:

W = peso dos equipamentos movimentados na direção Y (N);

P = passo da rosca sem fim (mm);

$$\pi = 3,1416.$$

A inércia da rosca sem fim (J_B) é obtida através de:

$$J_B = \frac{\pi L \rho (d/1000)^4}{32} \quad (N.m^2) \quad (3.57)$$

Sendo:

L = comprimento da rosca sem fim (m);

ρ = densidade da rosca sem fim (N/m^3);

d = diâmetro da rosca sem fim (mm).

A velocidade angular máxima (ω_{max}) é obtida através de:

$$\omega_{max} = \frac{2\pi V_{max}}{(P/1000)} \quad (rad/s) \quad (3.58)$$

V_{max} = velocidade linear máxima (m/s);

P = passo da rosca sem fim (mm).

- Calcula-se o torque devido ao atrito (T_F), que é dado por:

$$T_F = \frac{(P/1000)}{2\pi\epsilon_{fuso}} F_f + T_r \quad (N.m) \quad (3.59)$$

Sendo:

P = passo da rosca sem fim (mm);

$\pi = 3,1416$;

ϵ_{fuso} = eficiência do fuso de esferas;

F_f = força de atrito (N);

T_r = torque de atrito em vazio (N.m);

A expressão (3.59) vai exigir ainda o seguinte cálculo complementar.

A força de atrito (F_f) é obtida através da seguinte expressão:

$$F_f = W\mu_{carro} + nD_s \quad (N) \quad (3.60)$$

Sendo:

W = peso dos equipamentos movimentados na direção Y (N);

μ_{carro} = coeficiente de atrito do carro;

n = número de vedações;

D_s = força de atrito nas vedações (N).

- E finalmente, calcula-se o torque devido a forças externas (T_e) através de:

$$T_e = \frac{(P/1000)}{2\pi\epsilon_{fuso}} F_e \quad (N.m) \quad (3.61)$$

Sendo:

P = passo da rosca sem fim (mm);

ε_{fuso} = eficiência do fuso de esferas = 90%;

F_e = forças externas – direção Y (N).

Observe-se que F_e representa a resistência oferecida pelo alimento ao avanço da colher quando mergulhada no mesmo, e foi estimado em 3 N. Embora o torque para vencer a inércia do sistema (fórmula 3.55) seja calculado com base na fase de aceleração mais acentuada, que ocorre com a colher fora do alimento, somou-se os dois esforços pois é um cálculo a favor da segurança.

Em resumo, os torques T_J (torque devido à inércia do sistema), T_F (torque devido ao atrito), T_e (torque devido a forças externas), obtidos respectivamente pelas expressões (3.55), (3.59), e (3.61), e somados através da expressão (3.54), fornecerão o torque de aceleração T_A , que será o torque máximo exigido do motor deste acionamento. Elaborou-se então a Planilha de Cálculo 3.4.1 para este torque.



PLANILHA 3.4.1 - CÁLCULO DO TORQUE EXIGIDO DOS MOTORES										
	MOVIMENTO DIREÇÃO Y					MOVIMENTO DIREÇÃO X				
	Variável	Simb.	Unid.	Fórmula	Valor	Variável	Simb.	Unid.	Fórmula	Valor
1	Peso movimentado	W	N	projeto	100					
2						Peso movimentado	W_X	N	projeto	60
3	Passo rosca	P	mm	projeto	10	Passo correia	P_X	mm	projeto	5
4						Nº dentes engren.	Z		projeto	20
5	Inércia carga	J_L	N.m ²	3.56	0,000253	Inércia carga	J_{LX}	N.m ²	3.64	0,015198
6	Comprimento rosca	L	m	projeto	0,58	Espessura engren.	L_X	m	projeto	20
7	Densidade rosca	ρ	N/m ³	catálogo	76400	Dens. engrenagem	ρ_x	N/m ³	catálogo	76400
8	Diâmetro rosca	d	mm	projeto	16	Diam engrenagem	d_X	mm	projeto	31,83
9										
10	Inércia rosca	J_B	N.m ²	3.57	0,000285	Inércia engrenagem	J_{BX}	N.m ²	3.65	0,000154
11	Velocidade máxima	V_{max}	m/s	projeto	0,1	Velocidade máxima	V_{maxx}	m/s	projeto	0,1
12	Passo rosca	P	mm	projeto	10	Passo correia	P_X	mm	projeto	5
13						Nº dentes engren.	Z		projeto	20
14	Velocidade angular	ω_{max}	rad/s	3.58	62,832	Velocidade angular	ω_{maxx}	rad/s	3.66	6,283
15	Tempo aceleração	t_a	s	projeto	0,04	Tempo aceleração	t_{ax}	s	projeto	0,04
16	Acel. gravidade	g	m/s ²		9,81	Acel. gravidade	g	m/s ²		9,81
17	Eficiência fuso	ϵ_{fuso}		catálogo	0,9	Eficiência engren.	ϵ_x		catálogo	0,9
18	Inércia motor	J_M	N.m ²	catálogo	0,000005	Inércia motor	J_{MX}	N.m ²	catálogo	0,000005
19	Inércia carga	J_L	N.m ²	(linha 5)	0,000253	Inércia carga	J_{LX}	N.m ²	(linha 5)	0,015198
20	Inércia rosca	J_B	N.m ²	(linha10)	0,000285	Inércia engrenagem	J_{BX}	N.m ²	(linha10)	0,000154
21	Velocidade angular	ω_{max}	rad/s	(linha 14)	62,832	Velocidade angular	ω_{maxx}	rad/s	(linha 14)	6,283
22										
23	Torque inércia	T_J	N.m	3.55	0,091	Torque inércia	T_{JX}	N.m	3.63	0,273
24	Peso movimentado	W	N	projeto	100	Peso movimentado	W_X	N	projeto	60
25										
26	Coef. atrito carro	μ_s		catálogo	0,002	Coef. atrito carro	μ_{sx}		catálogo	0,002
27	Nº vedações	n		catálogo	8	Nº vedações	n		catálogo	8
28	Força atrito vedação	D_s	N	catálogo	0,7	Força atrito vedação	D_s	N	catálogo	0,7
29										
30	Força atrito	F_f	N	3.60	5,800	Força atrito	F_{fx}	N	3.68	5,720
31	Passo rosca	P	mm	projeto	10	Passo correia	P_X	mm	projeto	5
32	Eficiência fuso	ϵ_{fuso}		catálogo	0,9	Eficiência engren.	ϵ_x		catálogo	0,9
33	Torque atrito vazio	T_r	N.m	catálogo	0,1					
34	Força atrito	F_f	N	(linha30)	5,8	Força atrito	F_{fx}	N	(linha30)	5,72
35						Nº dentes engren.	Z		projeto	20
36	Torque atrito	T_F	N.m	3.59	0,110	Torque atrito	T_{FX}	N.m	3.67	0,101
37	Passo rosca	P	mm	projeto	10					
38	Eficiência fuso	ϵ_{fuso}		catálogo	0,9					
39	Forças externas	F_e	N	projeto	3,0					
40										
41	Torque forças ext.	T_e	N.m	3.61	0,005					
42	Torque máximo	T_A	N.m	3.54	0,207	Torque máximo	T_{AX}	N.m	3.62	0,374
43	Torque máximo	T_A	oz.in	3.54	29,58	Torque máximo	T_{AX}	oz.in	3.62	53,44

Planilha de Cálculo 3.4.1 – Torque dos motores dos movimentos nos eixos X e Y.



Movimento no eixo X – Sistema com correia dentada / engrenagem e dois eixos lisos deslizantes.

O movimento na direção X é semelhante ao movimento na direção Y, contudo diferindo quanto ao acionamento mecânico, que ao invés de ser através de fuso de esferas, é através de correia dentada e engrenagem. O motivo da utilização do sistema de correia dentada e engrenagem é por ser mais simples e econômico, já que o movimento no eixo X é apenas para posicionamento, não havendo composição com outros movimentos. Os cálculos de torque serão parecidos [13] e serão utilizadas as seguintes expressões:

$$T_{AX} = T_{JX} + T_{FX} + T_{ex} \quad (N.m) \quad (3.62)$$

$$T_{JX} = \frac{\omega_{\max x}}{g.t_{ax}} \left[\frac{J_{LX}}{\varepsilon_x} + J_{BX} + J_{MX} \right] \quad (N.m) \quad (3.63)$$

$$J_{LX} = \frac{W_X (P_X/1000)^2 Z^2}{(2\pi)^2} \quad (N.m^2) \quad (3.64)$$

$$J_{BX} = \frac{\pi L_X \rho_x (d_X/1000)^4}{32.000} \quad (N.m^2) \quad (3.65)$$

$$\omega_{\max x} = \frac{2\pi V_{\max x}}{Z(P_X/1000)} \quad (rad/s) \quad (3.66)$$

$$T_{FX} = \frac{Z(P_X/1000)}{2\pi\varepsilon_x} F_{fx} \quad (N.m) \quad (3.67)$$

$$F_{fx} = W_X \mu_{carrox} + nD_s \quad (N) \quad (3.68)$$

As variáveis receberam índice x, por se referirem ao movimento X, contudo a definição das mesmas é igual ao do movimento Y, exceto:

J_{BX} = inércia da engrenagem (N.m²);

ε_x = eficiência do conjunto engrenagem e correia dentada;

P_X = passo da correia dentada (mm);

Z = número de dentes da engrenagem;

L_X = espessura da engrenagem (mm);

d_X = diâmetro da engrenagem (mm);

ρ_x = densidade da engrenagem (N/m³).

Através da Planilha de Cálculo 3.4.1 calculou-se o torque máximo exigido do motor (T_A).

Movimento de rotação da colher – Sistema com duas polias e correia – Redução 4:1

O torque máximo exigido do motor para a rotação da colher ocorre na fase de aceleração da colher carregada na subida.

Seja:

m = massa da colher cheia de alimento (Kg);

L = comprimento da ponta da colher até o centro do eixo da polia (m);

I = momento de inércia da colher cheia de alimento (Kg.m^2).

Efetuada uma simplificação, considerou-se a massa distribuída de forma aproximadamente uniforme ao longo da colher, o que aparenta ser razoável, pois é possível equilibrar facilmente uma colher doméstica a partir de um ponto próximo do centro. De qualquer forma, ressalta-se que se atua com bastante segurança, pois se adotou o peso da colher 100g (Planilha de Cálculo 3.4.2), sendo que uma colher doméstica pesa por volta de 25g. Tem-se então:

$$I = \frac{1}{4}mL^2 \quad (\text{Kg.m}^2) \quad (3.69)$$

- O torque exigido pela carga (T_C) é dado por:

$$T_C = \frac{1}{\varepsilon_r n} (I\alpha + mgL \sin \theta) \quad (\text{N.m}) \quad (3.70)$$

Sendo:

θ = ângulo entre a vertical e a colher;

α = aceleração angular;

g = aceleração da gravidade;

ε_r = eficiência do sistema de polias e correia;

n = redução proporcionada pelo sistema de polias e correia = 4;

m = massa da colher cheia de alimento;

L = comprimento da ponta da colher até o centro do eixo da polia;

I = momento de inércia da colher cheia de alimento.

Tem-se na verdade, uma equação diferencial de 2ª ordem pois $\alpha = \ddot{\theta}$. Mas como no intervalo de θ variando de 36° a 54°, intervalo este em que a colher carregada está subindo e acelerando, e portanto com maior solicitação de torque, α é constante, a solução simplifica-se e toma-se o ponto mais desfavorável que é $\theta = 54^\circ$.

- O torque para movimentar o sistema de polias (T_p) é dado por:

$$T_p = \frac{1}{\varepsilon_r} (I_p \alpha) \quad (N.m) \quad (3.71)$$

Sendo:

I_p = momento de inércia do sistema de polias;

α = aceleração angular;

ε_r = eficiência do sistema de polias e correia.

- O torque devido a forças externas (T_e) é dado por:

$$T_e = F_e L \quad (N.m) \quad (3.72)$$

Sendo:

L = comprimento da ponta da colher até o centro do eixo da polia (m);

F_e = forças externas (N).

Observe-se que F_e representa a resistência oferecida pelo alimento ao avanço da colher quando mergulhada no mesmo, e foi estimado em 3 N. Embora o torque exigido pela carga (fórmula 3.70) seja calculado com base na fase de aceleração mais acentuada, que ocorre com a colher carregada fora do alimento, somou-se os dois esforços, pois é um cálculo a favor da segurança.

- O torque de aceleração ou torque máximo exigido do motor (T_A) é dado então por:

$$T_A = T_C + T_p + T_e \quad (N.m) \quad (3.73)$$

Obtêm-se então a Planilha de Cálculo 3.4.2 com o cálculo do torque máximo exigido do motor.



PLANILHA 3.4.2 - CÁLCULO DO TORQUE EXIGIDO DO MOTOR					
MOVIMENTO ROTAÇÃO DA COLHER					
	Variável	Simb.	Unid.	Fórmula	Valor
1	massa	m	Kg	projeto	0,100
2	comprimento	L	m	projeto	0,240
3	momento inércia carga	I	Kg.m ²	3.69	0,00144
4	aceleração angular	α	rad	projeto	1,298
5	ângulo elevação	θ	graus	projeto	54
6	acel. gravidade	g	m/s ²		9,81
7	eficiência sist. polias	ε_r		projeto	0,7
8	redução	n		projeto	4
9	torque carga	T_C	N.m	3.70	0,06869
10	momento inércia polias	I_P	Kg.m ²	catálogo	0,00001
11	torque sistema polias	T_P	N.m	3.71	0,00001
12	força externa	F_e	N	projeto	3,00
13	comprimento	L	m	projeto	0,24
14	torque força externa	T_e	N.m	3.72	0,72
15	torque aceleração	T_A	N.m	3.73	0,78870
16	torque aceleração	T_A	oz.in	3.73	112,67

Planilha de Cálculo 3.4.2 – Torque exigido do motor da rotação da colher.

Escolha do motor com base na curva Velocidade x Torque

Para efetuar a seleção do motor adequado adotam-se os seguintes passos:

- Calcula-se a velocidade requerida do motor (N , N_x , N_r), em r.p.m., para a velocidade máxima do movimento em questão, no término da fase de aceleração mais acentuada. Então se tem:

Movimento Y

$$N = \left(\frac{V_{max}}{P} \right) \times 1000 \frac{mm}{m} \times 60 \frac{s}{min} \quad (RPM) \quad (3.74)$$

Sendo:

V_{max} = velocidade linear máxima – eixo Y (m/s);

P = passo da rosca sem fim (mm).

Movimento X

$$N_x = \left(\frac{V_{maxx}}{ZP_x} \right) \times 1000 \frac{mm}{m} \times 60 \frac{s}{min} \quad (RPM) \quad (3.75)$$

Sendo:

P_x = passo da correia dentada (mm);

Z = número de dentes da engrenagem;

V_{maxx} = velocidade linear máxima – eixo X (m/s).

Movimento de rotação da colher

$$N_r = \left(\frac{V_{tg\max} n}{R \cdot 2\pi} \right) \times 60 \text{ s/min} \quad (RPM) \quad (3.76)$$

Sendo:

n = redução proporcionada pelo sistema de polias e correia = 4;

$V_{tg\max}$ = velocidade tangencial máxima na ponta da colher (m/s);

R = raio, distância da ponta da colher ao centro do eixo da polia (m).

Através da Planilha de Cálculo 3.4.3 calculam-se os valores máximos de velocidade dos motores para os 3 movimentos.

Planilha 3.4.3 - Velocidade requerida dos motores				
Variável	Simb.	Unid.	Fórmula	Valor
Velocidade máxima - Y	V_{max}	m/s	projeto	0,1
Velocidade máxima - X	V_{maxx}	m/s	projeto	0,1
Veloc. tangencial max.	V_{tgmax}	m/s	projeto	0,375
Passo da rosca	P	mm	projeto	10
Passo da correia	P_x	mm	projeto	5
Nº dentes engrenagem	Z		projeto	20
Redução sist. polias	n		projeto	4
Raio rotação colher	R	m	projeto	0,24
Velocidade motor - Y	N	RPM	3.74	600
Velocidade motor - X	N_x	RPM	3.75	60
Veloc. motor rotação	N_r	RPM	3.76	60

Planilha de Cálculo 3.4.3 – Velocidade requerida dos motores.

- Plota-se o torque máximo (T_A), para cada movimento, contra a velocidade requerida do motor (N , N_x , N_r), entrando com esses dados no gráfico “velocidade do motor x torque”, conforme representado nos gráficos 3.21, 3.22, 3.23. Observa-se que a curva foi construída pelo fabricante [14] para o acionamento bipolar (em conexão paralela), e como neste projeto é utilizado o acionamento unipolar, então foi necessário indicar nas curvas o torque que pode ser proporcionado pelo motor neste acionamento, que é aproximadamente o torque do acionamento bipolar dividido por 1,41. É oportuno lembrar que, para a força F_e , que representa a resistência oferecida pelo alimento ao avanço da colher, está sendo adotado o valor 3N (planilhas 3.4.1 e 3.4.2), o que pode até ser considerado um limite máximo, pois equivale ao peso de mais de 300g de comida. Na realidade, o valor desta força só pode ser determinado com precisão na prática, e vai variar de alimento para alimento.

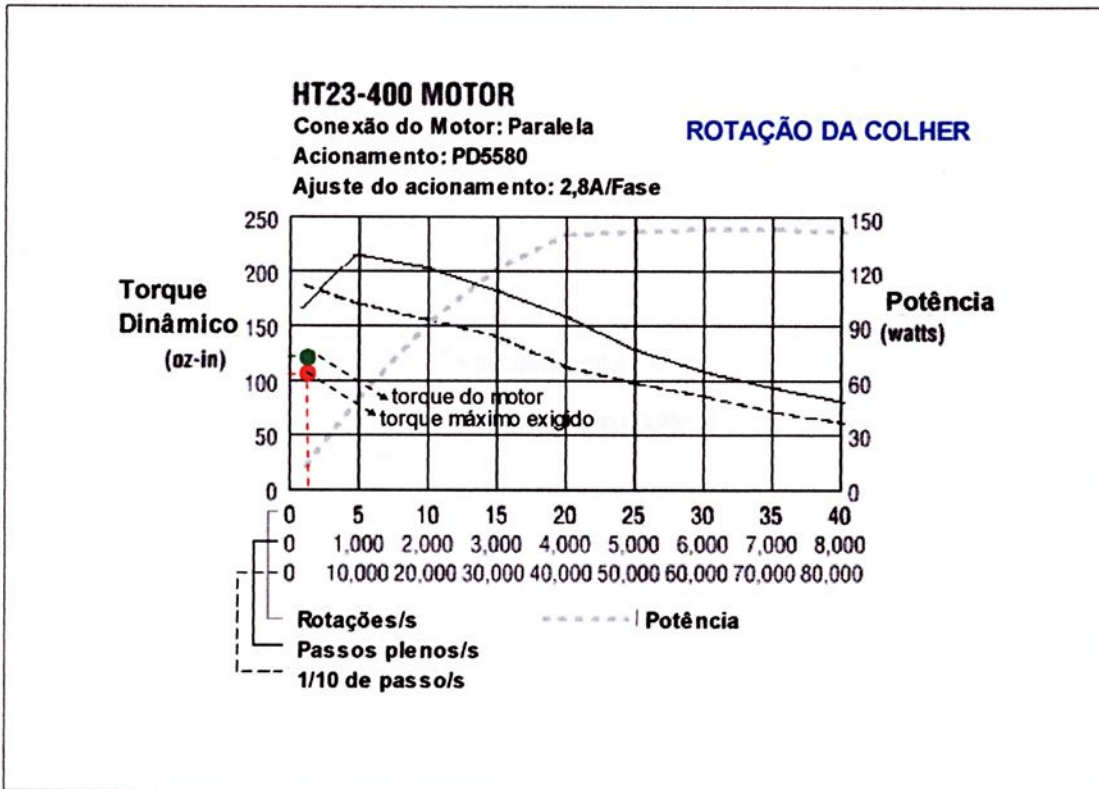


Gráfico 3.21 – Dimensionamento do motor de rotação da colher – Torque x Rotação.

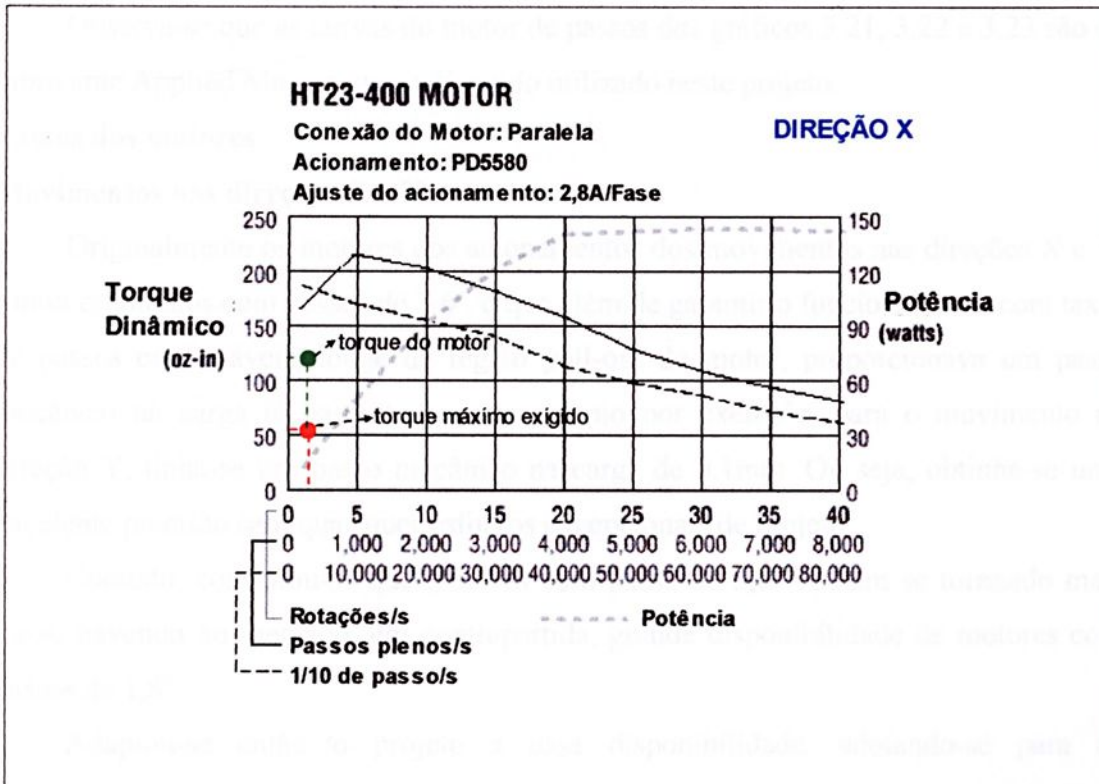


Gráfico 3.22 – Dimensionamento do motor - Movimento eixo X – Torque x Rotação.

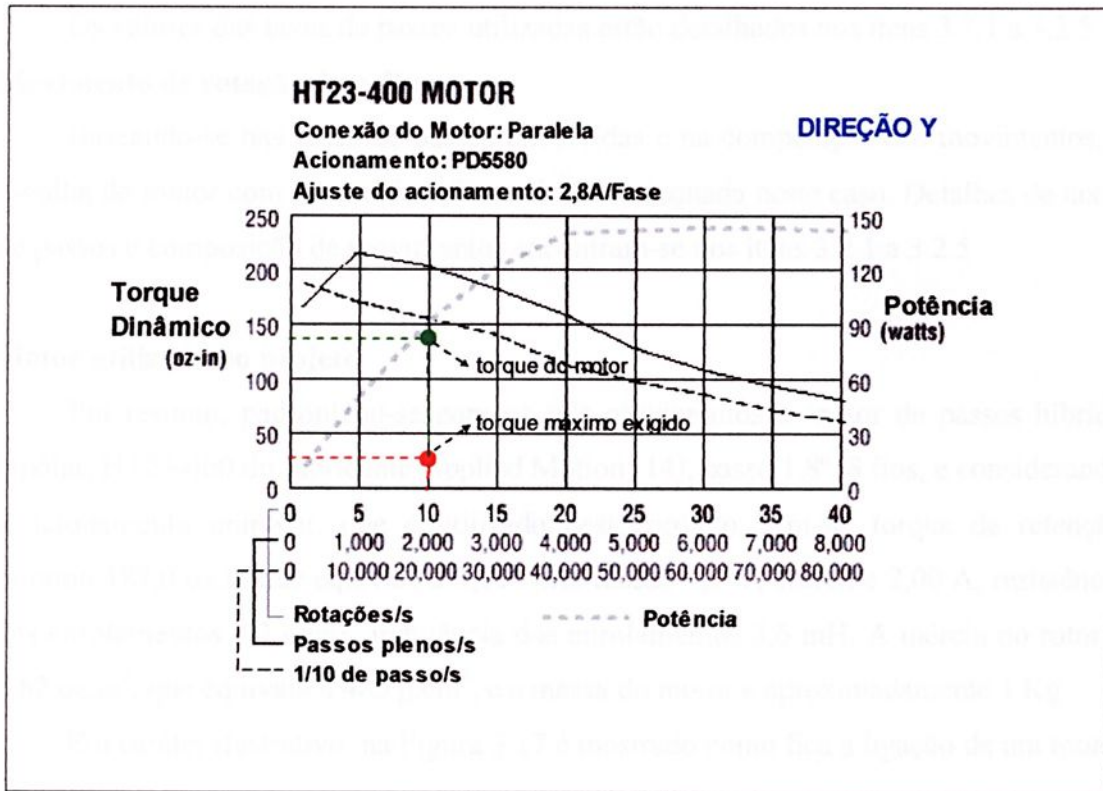


Gráfico 3.23 – Dimensionamento do motor - Movimento eixo Y – Torque x Rotação.

Observa-se que as curvas do motor de passos dos gráficos 3.21, 3.22 e 3.23 são do fabricante Applied Motion, que está sendo utilizado neste projeto.

Passos dos motores

Movimentos nas direções X e Y

Originalmente os motores dos acionamentos dos movimentos nas direções X e Y, foram escolhidos com passos de $3,6^\circ$, o que além de garantir o funcionamento com taxas de passos confortáveis, longe da região pull-out do motor, proporcionava um passo mecânico na carga já bastante pequeno, como por exemplo, para o movimento na direção Y, tinha-se um passo mecânico na carga de 0,1mm. Ou seja, obtinha-se uma excelente precisão sem quaisquer esforços excepcionais de projeto.

Contudo, constatou-se que motores com passo de $3,6^\circ$ vinham se tornando mais raros, havendo no mercado, em contrapartida, grande disponibilidade de motores com passos de $1,8^\circ$.

Adaptou-se então o projeto a essa disponibilidade, adotando-se para os movimentos X e Y motores com passos de $1,8^\circ$, obtendo-se até uma certa vantagem ao evitar-se taxas de passos muito baixas, fugindo-se assim de regiões de instabilidade natural de motores de passos.

Os valores das taxas de passos utilizadas estão detalhados nos itens 3.2.1 a 3.2.5.

Movimento de rotação da colher

Baseando-se nas taxas de passos envolvidas e na composição dos movimentos, a escolha do motor com passos de $1,8^\circ$ revelou-se adequada neste caso. Detalhes de taxas de passos e composição de movimentos encontram-se nos itens 3.2.1 a 3.2.5.

Motor utilizado no projeto

Em resumo, padronizou-se para os três movimentos o motor de passos híbrido bipolar, HT23-400 do fabricante Applied Motion [14], passo $1,8^\circ$, 8 fios, e considerando o acionamento unipolar, que é utilizado neste projeto, têm-se: torque de retenção mínimo 187,0 oz.in que equivale a 1,31 N.m, tensão 4,5 V, corrente 2,00 A, resistência dos enrolamentos 2,3 ohms, indutância dos enrolamentos 3,6 mH. A inércia do rotor é $2,62 \text{ oz.in}^2$, que equivale a 480 g.cm^2 , e a massa do motor é aproximadamente 1 Kg.

Em caráter ilustrativo, na Figura 3.17 é mostrado como fica a ligação de um motor de passos 8 fios para o acionamento unipolar, figura esta retirada do catálogo do fabricante Applied Motion. Na Figura 3.18 são mostradas as dimensões do motor HT23-400 escolhido.



Figura 3.17 – Diagrama de ligações - Motor 8 fios – Catálogo Applied Motion.

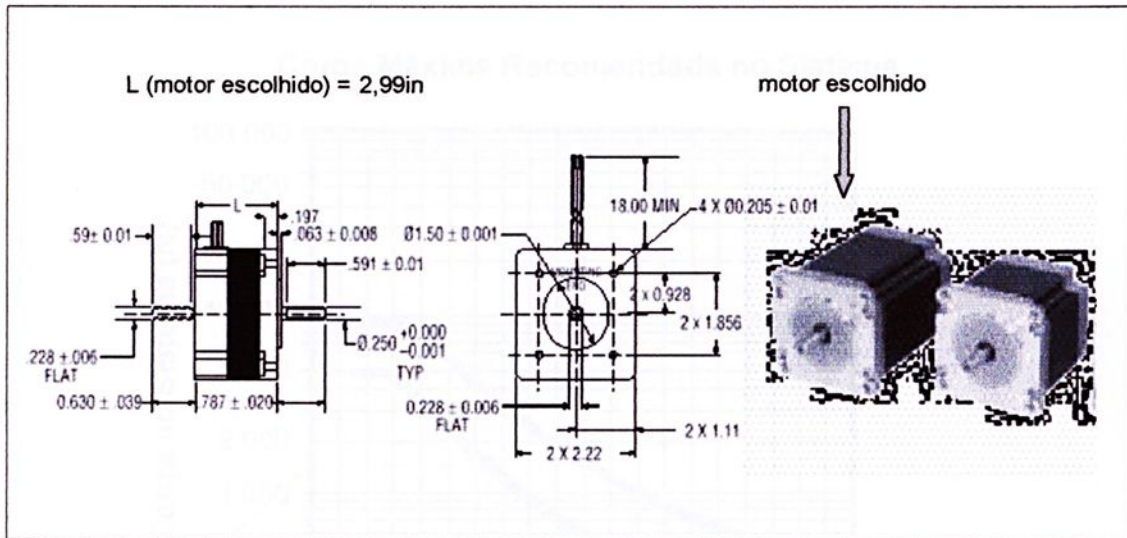


Figura 3.18 – Dimensões do motor HT23-400.

3.4.2 Aspectos exclusivamente mecânicos

Existem outros aspectos exclusivamente mecânicos que foram levados em consideração no dimensionamento do sistema. Ressalta-se que a carga movimentada pela mesa XY constitui-se do conjunto: motor da rotação da colher, suporte do motor, sistema de polias, suporte da colher e a colher. O peso desse conjunto não ultrapassa 3 Kg, o que para uma mesa XY padrão constitui uma carga bastante pequena. Então o dimensionamento mecânico da mesa pôde ser resumido em uma verificação relativamente simples dos seguintes aspectos, tomando o movimento Y como referência, pois é o que sofre maiores esforços:

- carga para deflexão máxima permitida do fuso de esferas – Gráfico 3.24;
- velocidade de percurso máxima aceitável – Gráfico 3.25;
- máxima carga compressiva no fuso de esferas – Gráficos 3.26 e 3.27.

Com relação à carga para deflexão máxima permitida do fuso de esferas, o fabricante (ref.: Thomson) fornece a curva da carga máxima suportada (estática) em função do comprimento total do sistema, onde o limitante é a deflexão máxima do fuso de esferas. Esta curva está representada no Gráfico 3.24 onde se vê que o sistema suportaria uma carga de aproximadamente 1500N, o que representa uma massa de mais de 150Kg. Ora, no sistema Y que é o mais carregado, a massa transportada não chega a 10Kg. Logo, o dimensionamento está correto.

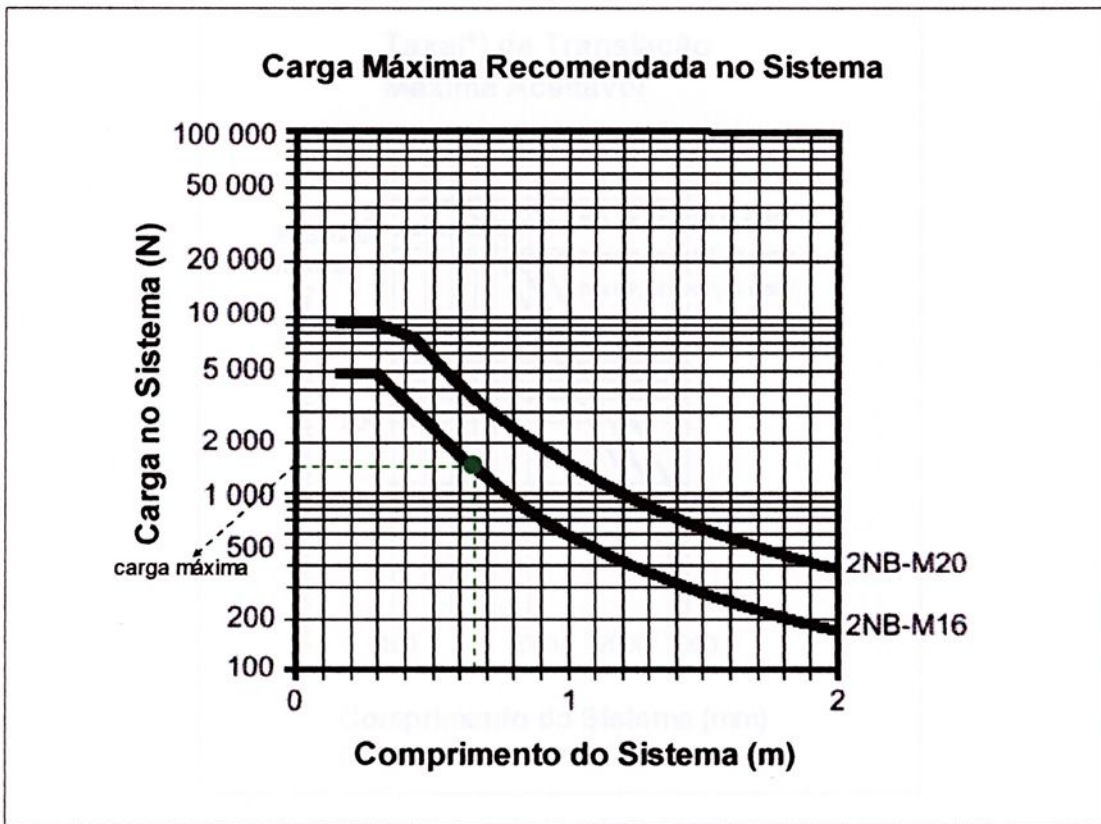


Gráfico 3.24 – Carga estática no fuso de esferas x Comprimento do sistema.

Embora o comprimento total do sistema de fuso de esferas seja 549mm, para efeito de analisar o dimensionamento, no Gráfico 3.24 está sendo considerado um comprimento em torno de 650mm, para resguarda-se de qualquer eventualidade prática que afete o comprimento do sistema, como por exemplo, instalação de fim-de-curso.

Com relação à velocidade de percurso máxima aceitável, a limitante é a frequência natural de vibração do fuso de esferas. O fabricante fornece a curva da velocidade rotacional máxima, em r.p.m., em função do comprimento total do sistema, que está representada no Gráfico 3.25, e onde se vê que o fuso de esferas poderia funcionar adequadamente até aproximadamente 2800 r.p.m. Ora, os movimentos X e Y trabalham com velocidade rotacional máxima de 60r.p.m. e 600r.p.m. respectivamente. Logo o dimensionamento está correto.

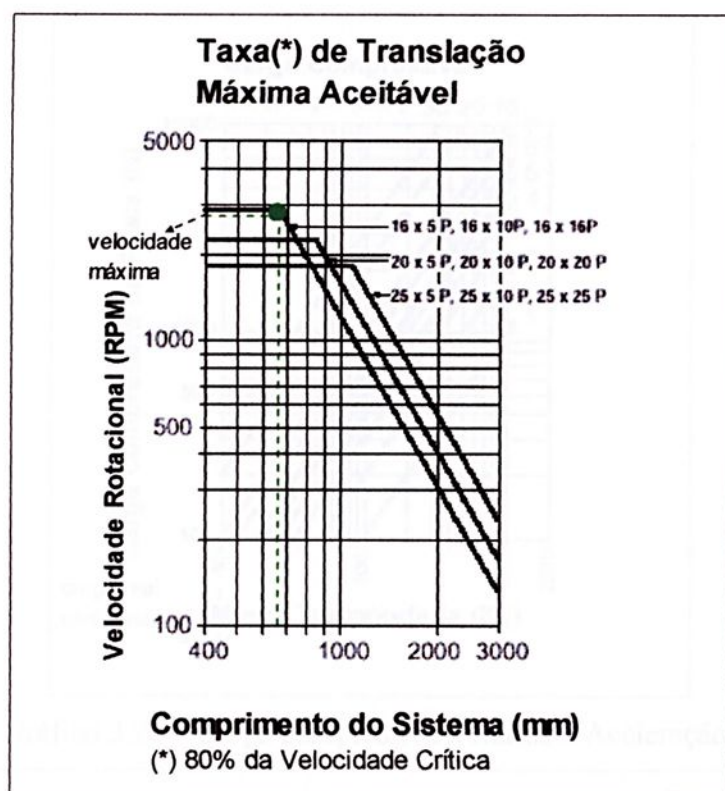


Gráfico 3.25 - Velocidade máxima x Comprimento.

Com relação à carga compressiva máxima (dinâmica) suportada pelo fuso de esferas, o primeiro passo é determinar a carga compressiva real, exercida pelo sistema. Para tal utiliza-se a curva do Gráfico 3.26, onde se tem a carga compressiva real em função da massa transportada e da aceleração máxima. Considerando-se a aceleração máxima de $2,5\text{m/s}^2$ e a massa transportada de 10Kg , para o movimento Y que é o mais carregado, chega-se a uma carga compressiva real de alguns poucos newtons, sendo que pela curva do Gráfico 3.27, também fornecida pelo fabricante, o sistema suportaria uma carga compressiva de mais de 2000N . Logo, o dimensionamento está correto.

Analogamente ao que foi dito em relação ao Gráfico 3.24, nos Gráficos 3.25 e 3.27, para análise de dimensionamento, está sendo considerado o comprimento total do sistema em torno de 650mm , com folga em relação ao comprimento de projeto que é 549mm , ficando-se assim resguardado de qualquer eventual contratempo, que ocorra na prática, e que afete o comprimento do sistema.

Um julgamento menos cuidadoso poderia concluir que o sistema está superdimensionado sob o aspecto mecânico e que deveria ser reavaliado, mas na verdade, está sendo utilizado fuso de esferas escolhido entre os de menor capacidade disponíveis no mercado, e está sendo considerado também o aspecto econômico.

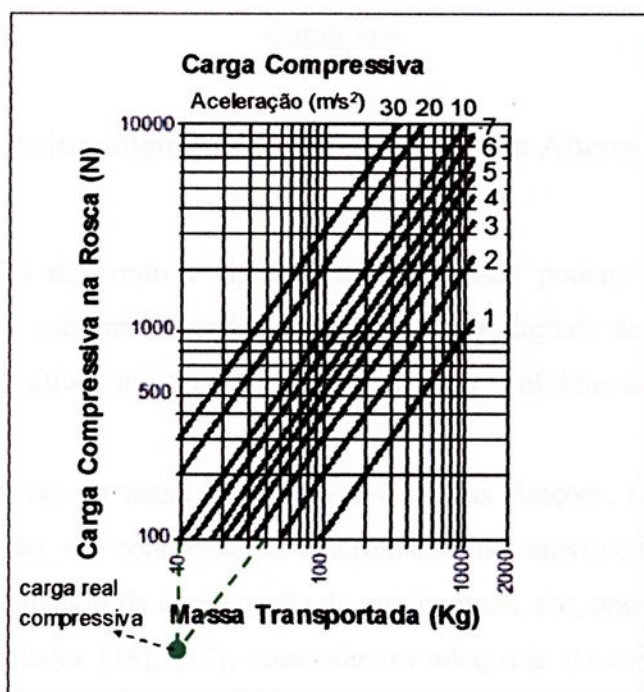


Gráfico 3.26 – Carga compressiva x Massa x Aceleração.

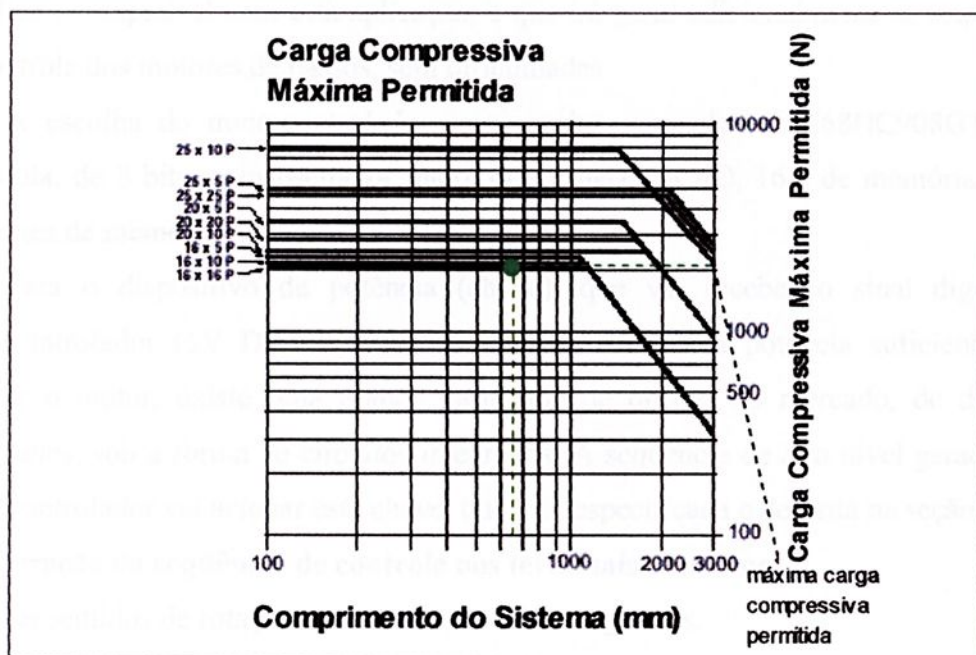


Gráfico 3.27 – Máxima carga compressiva x Comprimento do sistema.

3.4.3 Partida do motor da rotação da colher

O motor de rotação da colher escolhido possui inércia do rotor de 480 g.cm². A experiência mostra que este motor conseguirá partir uma carga com inércia de até 10 vezes esse valor, ou seja, 4.800 g.cm². Como há um sistema de polias acoplado ao eixo do motor com relação 1:4 (motor / carga) a inércia na carga estará limitada a 19.200 g.cm² ou 0,00192 Kg.m². Pela planilha 3.4.2 a inércia da carga (incluindo a inércia do sistema de roldanas) é 0,00145 Kg.m², logo o motor estará em condições de parti-la.

Capítulo 4

Sistema de Acionamento e Controle em Malha Aberta dos Motores

As seqüências de controle de motores de passos podem ser produzidas por microcontroladores, microprocessadores, processadores digitais de sinais (DSP's), ou por inúmeros dispositivos existentes no mercado, desenvolvidos especificamente para esta finalidade.

Como o controle da mesa em si envolve muitas funções, tais como, partida e parada, programação de coordenadas, sincronismo de movimentos, seqüências de tempos complexas quando da composição de movimentos, etc, optou-se pela utilização de um microcontrolador [16], [17], com número adequado de entradas e saídas, e a memória necessária já agregada, que é uma alternativa de excelente relação custo-benefício, compatível com esta aplicação, e que irá gerar adicionalmente as seqüências de controle dos motores de passos, sem dificuldades.

A escolha do microcontrolador recaiu sobre o modelo MC68HC908GT16 da Motorola, de 8 bits, com oscilador interno de 8MHz, 36 I/O, 16K de memória Flash, 512 bytes de memória RAM.

Para o dispositivo de potência (chave), que vai receber o sinal digital do microcontrolador (5V DC) e converter em um sinal com potência suficiente para acionar o motor, existe uma grande variedade de opções no mercado, de diversos fabricantes, sob a forma de circuitos integrados. A seqüência de alto nível gerada pelo microcontrolador vai acionar esta chave, que está especificada e descrita na seção 4.2.

4.1. Geração da seqüência de controle nos terminais do motor

Os sentidos de rotação dos motores serão os seguintes:

- Motor do giro da colher: anti-horário (visto pela parte posterior do motor);
- Motor da translação no eixo Y: ambos os sentidos;
- Motor da translação no eixo X: ambos os sentidos.

Os motores serão todos híbridos de duas fases, operando em passo pleno, no modo de operação monopolar, “duas fases ligadas”, ou seja, dois segmentos de enrolamento energizados simultaneamente, um de cada fase.

Esta opção pelo acionamento com duas fases energizadas simultaneamente garante maior torque, contudo, se a qualquer tempo, constatar-se a necessidade de torque menor

para maior suavidade de movimentos, pode-se efetuar uma pequena modificação de software e obter-se a seqüência unipolar, “uma fase ligada”, sem qualquer alteração no hardware.

Da mesma forma, na improvável hipótese de uma inesperada ressonância mecânica (impossível de ser prevista no projeto), que não possa ser resolvida facilmente através de recursos mecânicos (ex.: alteração do acoplamento), pode-se adotar, apenas modificando o software, a alternância de modos de operação citada no Capítulo 2, item 2.4.

A seqüência de controle do motor escolhida é a seqüência U2 da Tabela 2.3 do capítulo 2, aqui reproduzida para facilidade de consulta, e rebatizada como Tabela 4.1, e que seguida da posição 1 para a posição 8, proporcionará rotação no sentido horário, e seguida na ordem inversa, gerará rotação no sentido anti-horário:

Tabela 4.1 – Seqüência U2 – Unipolar.

Posição	1a	1b	2a	2b
1	1	0	1	0
2	0	1	1	0
3	0	1	0	1
4	1	0	0	1
5	1	0	1	0
6	0	1	1	0
7	0	1	0	1
8	1	0	0	1

Esta seqüência é disponibilizada nos terminais do motor, a partir do componente de potência alimentador (chave) do motor.

O fabricante dos motores de passos, Applied Motion, tomado como referência para esse projeto, fornece as informações das terminações conforme Figura 4.1.

8 Lead Wire Configuration – Unipolar Drive

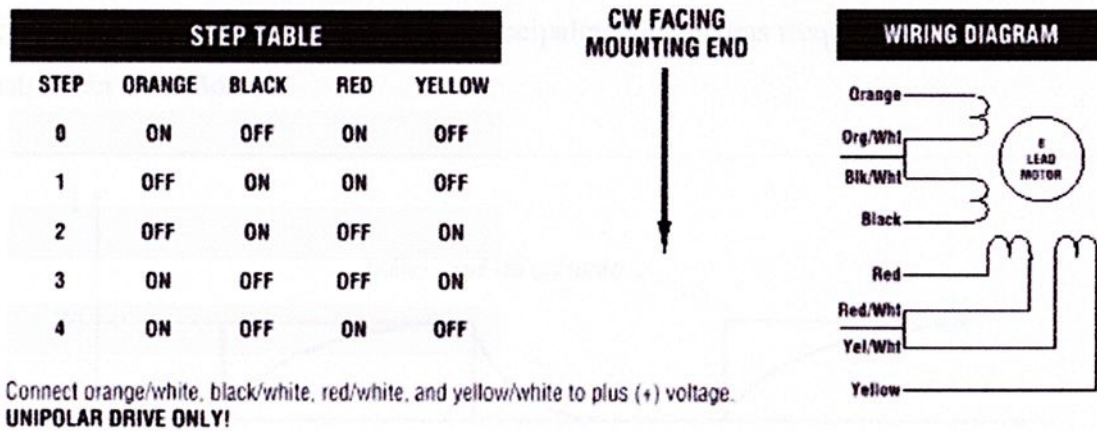


Figura 4.1 – Conexões do motor – Dados do fabricante – Extraído do catálogo da Applied Motion.

Comparando a tabela 4.1 e a figura 4.1 tem-se:

Terminal 1a – fio laranja;

Terminal 1b – fio preto;

Terminal 1 comum – fio laranja/branco ligado ao fio preto/branco;

Terminal 2a – fio vermelho;

Terminal 2b – fio amarelo;

Terminal 2 comum – fio vermelho/branco ligado ao fio amarelo/branco.

4.2. Escolha das chaves de potência alimentadoras dos motores

Com relação às chaves alimentadoras dos motores cumpre tecer algumas considerações.

Para aplicações que empregam motores de passos de menor capacidade, onde a corrente no motor é no máximo 500 mA, existem soluções muito simples para chaveamento, como por exemplo, a utilização de chaves Darlington, com proteção contra transitórios, acionadas digitalmente, sendo um exemplo típico o CI ULN2803, com 8 saídas, de vários fabricantes, tais como National, Motorola, Allegro, etc.

Para esta aplicação em particular, a corrente no motor é maior, e está especificada em 2A (tensão no motor especificada em 4,5V), e para manter um perfil adequado dos pulsos de corrente no motor faz-se necessário um sistema Chopper-PWM (PWM = *Pulse Width Modulation*), que já vem incorporado ao CI de chaveamento, que por sua vez, utiliza MOSFET's como elementos de potência.

Os pulsos de corrente resultantes dos pulsos de tensão aplicados sobre o motor, apresentam perfil degradado pela ação da indutância dos enrolamentos, o que prejudica o comportamento dinâmico do motor, principalmente em altas frequências. A Figura 4.2 ilustra essa situação.

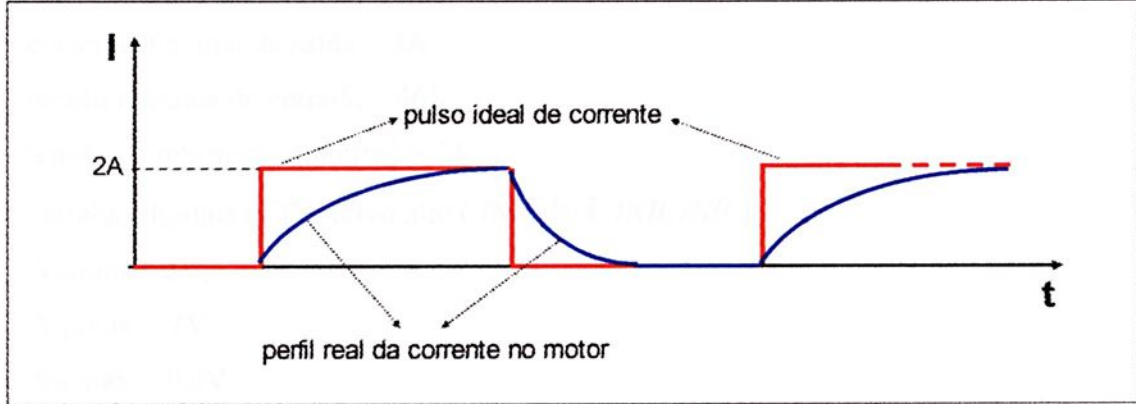


Figura 4.2 – Forma de onda da corrente no motor quando submetido a pulsos de tensão.

Um modo de minimizar esse problema consiste em aplicar sobre o motor uma tensão acima da tensão normal de trabalho, aumentando a declividade da curva de subida da corrente, e quando esta atinge o valor nominal, é chaveada, e passa a cair, iniciando-se então um ciclo de ligamentos e desligamentos, característico do sistema Chopper-PWM, que manterá a corrente do motor em torno do valor nominal. O novo perfil desta corrente será o da Figura 4.3.

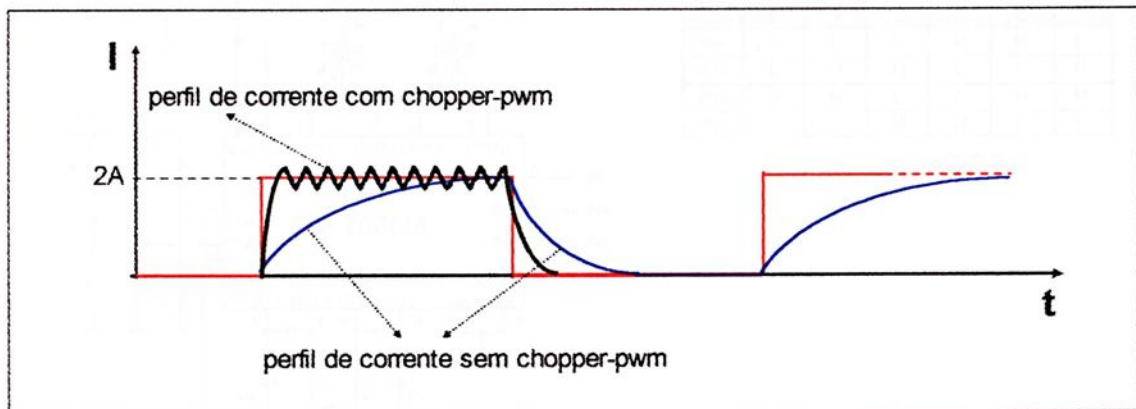


Figura 4.3 – Forma de onda de corrente corrigida por Chopper-PWM.

Uma análise detalhada do Chopper-PWM aplicado a motores de passos é feita em [11] e [18].

Optou-se então por especificar a chave de potência SLA7026M, disponível através dos fabricantes Sanken e Allegro Microsystems. Outros fabricantes, como, por exemplo, SGS-Thompson, possuem chaves parecidas.

As características básicas, utilizadas nestas considerações, são do componente da Sanken, a saber:

- corrente máxima de saída = 3A;
- tensão máxima de entrada = 46V;
- tensão de referência (interna) = 2V;
- entradas digitais (TTL) ativo alto (INA , $IN\bar{A}$, INB , $IN\bar{B}$);

$$V_{IH\min} = 2V;$$

$$V_{IH\max} = 7V;$$

$$V_{IL\max} = 0,8V.$$

São empregados dois resistores R_s , um para cada fase, atuando como sensores de corrente, sendo que a tensão sobre os mesmos é comparada com uma referência, e vai servir para determinar os pontos de desligamento e ligamento.

A figura 4.4 apresenta o diagrama de ligações externas desta chave e a figura 4.5 mostra a topologia do elemento.

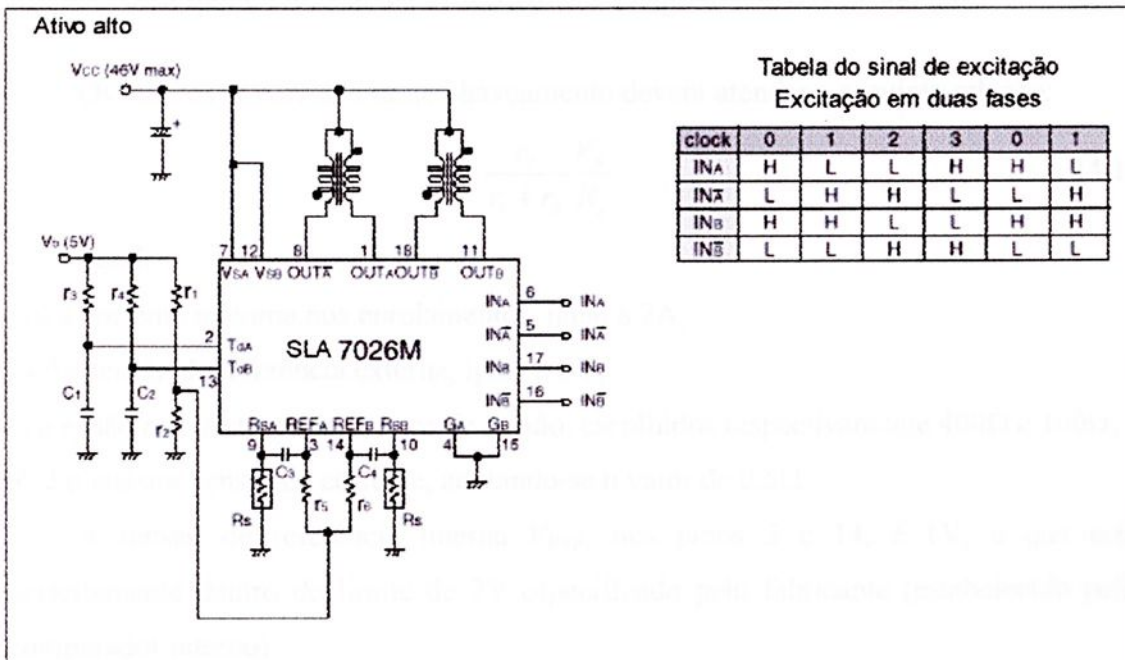


Figura 4.4 – CI SLA7026M - Unipolar – 2 fases ligadas – Circuito externo padrão

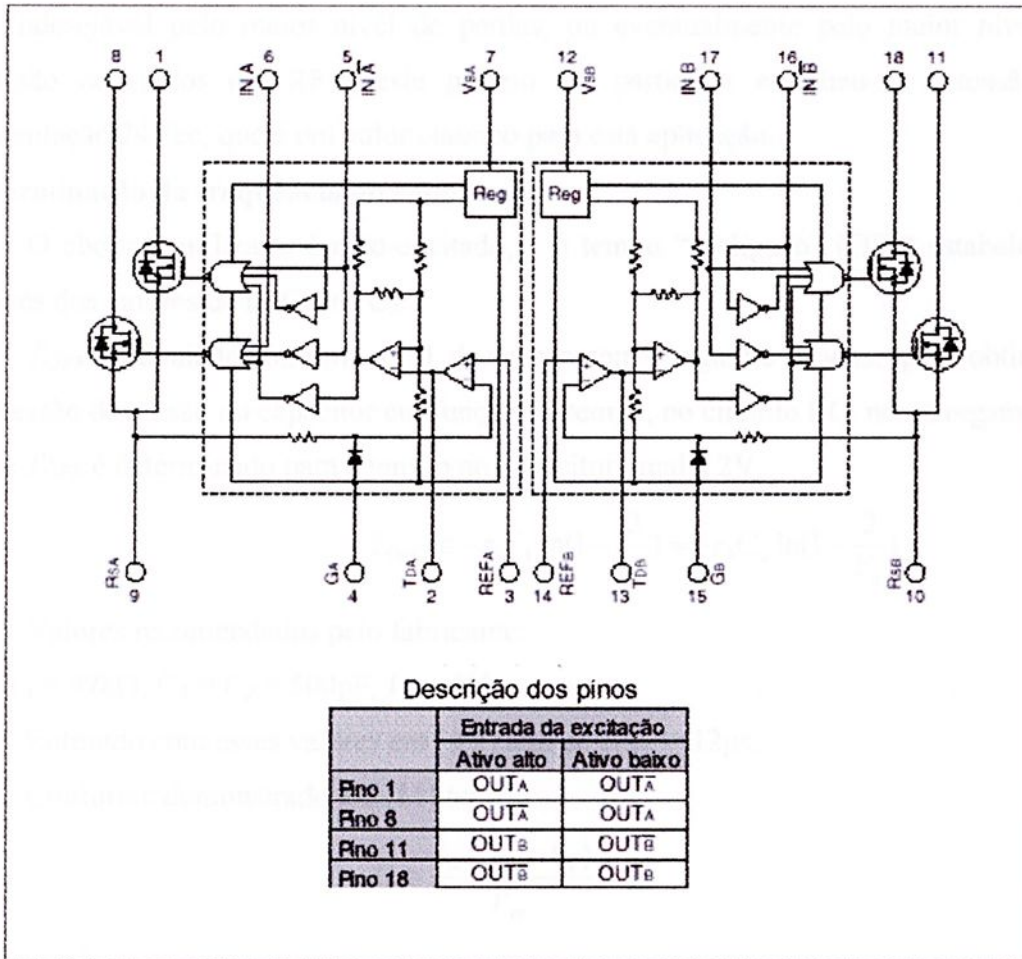


Figura 4.5 – Chave SLA 7026M – Diagrama de blocos interno.

Os valores envolvidos neste chaveamento devem atender a seguinte relação:

$$I_0 \cong \frac{r_2}{r_1 + r_2} \frac{V_b}{R_s} \quad (4.1)$$

Sendo:

I_0 é a corrente máxima nos enrolamentos, igual a 2A;

V_b é a tensão de referência externa, igual a 5V;

r_1 e r_2 são os resistores do divisor de tensão, escolhidos respectivamente 400Ω e 100Ω;

R_s é o resistor sensor de corrente, adotando-se o valor de 0,5Ω.

A tensão de referência interna V_{REF} , nos pinos 3 e 14, é 1V, o que está perfeitamente dentro do limite de 2V especificado pelo fabricante (estabelecido pelo comparador interno).

A escolha da tensão de alimentação do motor está limitada pelo fabricante do CI em 46V, não havendo dentro dessa faixa limitações no que se refere à isolação do motor. Quanto maior a tensão maior a frequência do PWM, o que em alguns casos pode

ser indesejável pelo maior nível de perdas, ou eventualmente pelo maior nível de emissão de ruídos em RF. Neste projeto em particular escolheu-se a tensão de alimentação 24Vcc, que é um valor clássico para esta aplicação.

Determinação da frequência do chopper

O chopper utilizado é auto-excitado, e o tempo “desligado” (OFF) estabelecido através dos valores de r_3 , C_1 , r_4 , C_2 .

T_{OFF} é calculado conforme [19], de acordo com a seguinte relação, que é obtida da expressão da tensão no capacitor em função do tempo, no circuito RC, no carregamento, onde T_{OFF} é determinado para a tensão no capacitor igual a 2V:

$$T_{OFF} \cong -r_3 C_1 \ln\left(1 - \frac{2}{V_b}\right) = -r_4 C_2 \ln\left(1 - \frac{2}{V_b}\right) \quad (4.2)$$

Valores recomendados pelo fabricante:

$$r_3 = r_4 = 47\text{k}\Omega, C_1 = C_2 = 500\text{pF}, V_b = 5\text{V}.$$

Entrando com esses valores em (4.2) tem-se $T_{OFF} = 12\mu\text{s}$.

Conforme demonstrado em [11] tem-se:

$$D \cong \frac{I_m (R_m + R_s)}{V_{cc}} \quad (4.3)$$

Sendo:

D = tempo de ciclo do PWM;

I_m = corrente no motor = 2A;

R_m = resistência do enrolamento na ligação unipolar = 2,3 Ω ;

R_s = resistência do resistor sensor de corrente = 0,5 Ω ;

V_{cc} = tensão de alimentação = 24V.

Logo $D = 0,233$. Por definição:

$$D = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad (4.4)$$

Logo $T_{ON} \cong 3,6\mu\text{s}$.

O período do PWM é:

$$T = T_{ON} + T_{OFF} \quad (4.5)$$

Então $T = 15,6 \mu\text{s}$.

A frequência do PWM é dada por:

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.6)$$

Portanto $f \cong 64 \text{ kHz}$.

Filtros

Os componentes r_5 e C_3 , assim como r_6 e C_4 , constituem filtros para eventuais ruídos produzidos pelo resistor sensor de corrente R_s quando os MOSFET's são chaveados, e em realimentação poderiam causar mau funcionamento do comparador.

O fabricante recomenda $r_5 = r_6 = 2,4k\Omega$ e $C_3 = C_4 = 2200pF$, alertando que valores superiores a estes poderiam tornar a resposta do sistema lenta.

Em resumo, os componentes auxiliares escolhidos são:

$r_1 = 400\Omega;$	$C_1 = 470pF;$
$r_2 = 100\Omega;$	$C_2 = 470pF;$
$r_3 = 47k\Omega;$	$C_3 = 2200pF;$
$r_4 = 47k\Omega;$	$C_4 = 2200pF;$
$r_5 = 2,4k\Omega;$	
$r_6 = 2,4k\Omega;$	
$R_s = 0,5\Omega.$	

Na Figura 4.6 apresentam-se as conexões do microcontrolador, das chaves de potência, e dos motores de passos do giro da colher e da translação nos eixos X e Y.

A seqüência de excitação da Tabela 4.1 está preservada, contudo foram construídas as Tabelas 4.2 e 4.3 relacionando as saídas do microcontrolador com os terminais dos motores, e organizando as seqüências nessas saídas de forma a facilitar a programação.

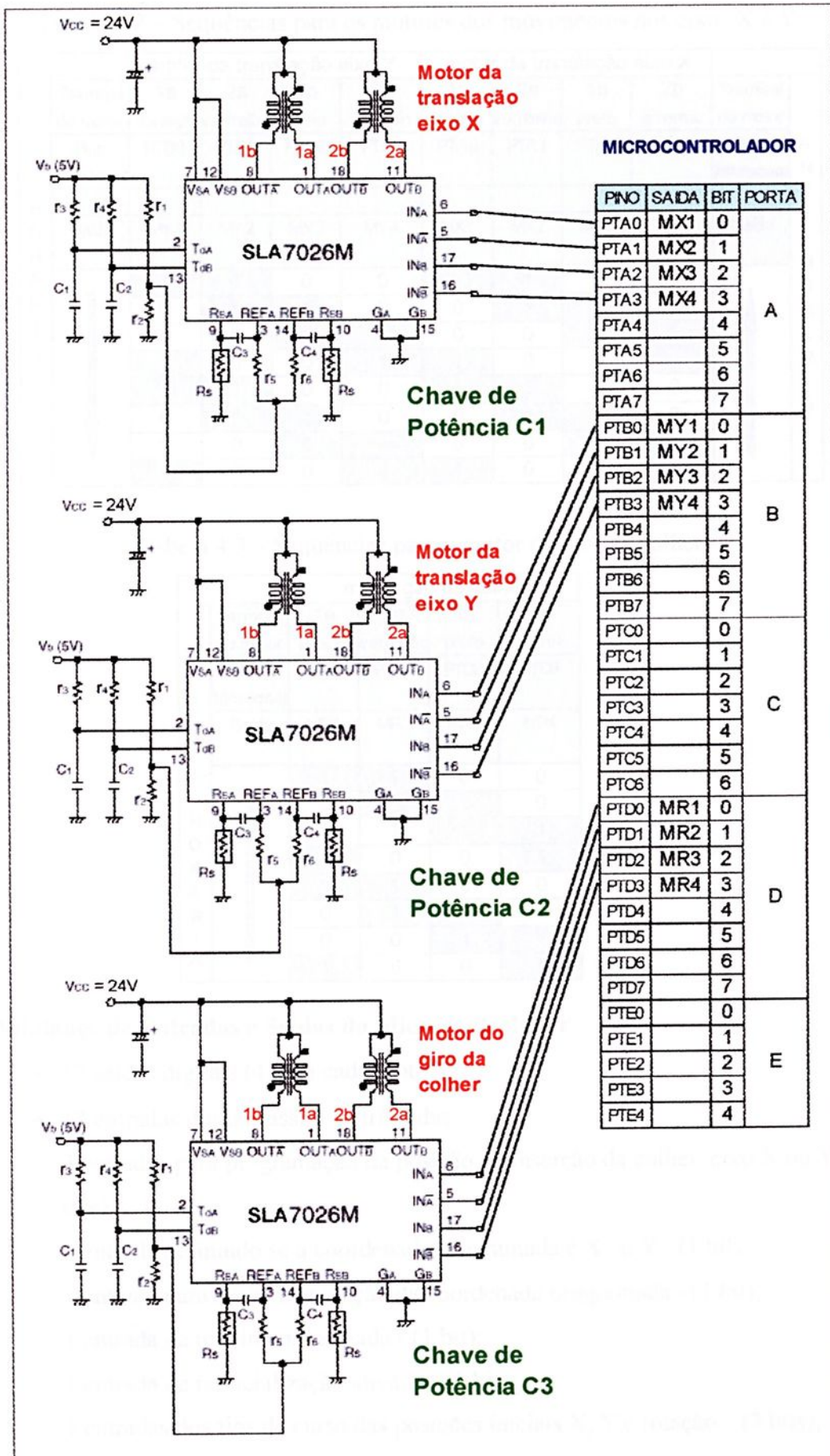


Figura 4.6 – Conexões do Microcontrolador, Chaves de Potência e Motores.

Tabela 4.2 – Sequências para os motores dos movimentos nos eixos X e Y.




		motor da translação eixo Y				motor da translação eixo X					
Terminal do motor		1a laranja	2a vermelho	1b preto	2b amarelo	1a laranja	2a vermelho	1b preto	2b amarelo	Terminal do motor	
Fino		PTB0	PTB1	PTB2	PTB3	PTA0	PTA1	PTA2	PTA3	Fino	
Microcont										Microcont	
Saída		MY1	MY2	MY3	MY4	MX1	MX2	MX3	MX4	Saída	
H O R Á R I O		1	1	0	0	1	1	0	0		A N T I H O R Á R I O
		0	1	1	0	0	1	1	0		
		0	0	1	1	0	0	1	1		
		1	0	0	1	1	0	0	1		
		1	1	0	0	1	1	0	0		
		0	1	1	0	0	1	1	0		
		0	0	1	1	0	0	1	1		
		1	0	0	1	1	0	0	1		

Tabela 4.3 – Sequências para o motor do giro da colher.

		motor giro da colher			
Terminal do motor		1a laranja	2a vermelho	1b preto	2b amarelo
Fino		PTD0	PTD1	PTD2	PTD3
Microcont					
Saída		MR1	MR2	MR3	MR4
A N T I H O R Á R I O		1	1	0	0
		0	1	1	0
		0	1	1	1
		1	0	0	1
		1	1	0	0
		0	1	1	0
		0	0	1	1
		1	0	0	1

4.3 Balanço de Entradas e Saídas do Microcontrolador

- 12 saídas digitais (4 para cada motor);
- 12 entradas digitais assim distribuídas:
 - 3 entradas para programação da posição de inserção da colher, eixo X ou Y - (3 bits);
 - 1 entrada definindo se a coordenada programada é X ou Y - (1 bit);
 - 1 entrada para ativar a gravação da coordenada programada - (1 bit);
 - 1 entrada de movimento ativada - (1 bit);
 - 1 entrada de reinicialização ativada - (1 bit);
 - 3 entradas dos fins de curso das posições iniciais X, Y e rotação - (3 bits);
 - 2 entradas dos fins de curso das posições extremas X e Y - (2 bits).

A Tabela 4.4 relaciona os terminais do microcontrolador com as entradas.

Tabela 4.4 – Tabela dos terminais de entrada para o microcontrolador

Entrada	Pino	Código	Bit
Gravação da coordenada de inserção	PTC0	G	Pulso - Ativo alto
Definição da coordenada, se X ou Y	PTC1	XY	Se X bit = 0; se Y bit = 1
Coordenada de inserção, eixo X ou Y	PTC2	C1	Menos significativo
	PTC3	C2	
	PTC4	C3	Mais significativo
Partida do movimento	PTC5	P	Pulso - Ativo alto
Reinicialização	PTC6	R	Pulso - Ativo alto
Fim de curso posição inicial - eixo Y	PTE0	FCY	Ativo alto
Fim de curso posição inicial - eixo X	PTE1	FCX	Ativo alto
Fim de curso posição inicial - rotação	PTE2	FCR	Ativo alto
Fim de curso posição máxima - eixo Y	PTE3	FCYMAX	Ativo alto
Fim de curso posição máxima - eixo X	PTE4	FCXMAX	Ativo alto

A lógica do sistema é detalhada no Capítulo 5, mas resumidamente tem-se:

- Através de 3 chaves ligado-desligado programa-se em código binário as posições de inserção, tanto no eixo X quanto no eixo Y, utilizando-se as entradas C1, C2 e C3, sendo C1 o bit menos significativo e C3 o bit mais significativo. Ressalte-se que a coordenada X varia de 0 a 6 e a coordenada Y varia de 0 a 4, portanto ambas requerendo 3 bits para representação em código binário;
- Através de outra chave ligado-desligado é definida se a coordenada programada em C1, C2 e C3 refere-se ao eixo X ou Y, utilizando-se para isso a entrada XY, ou seja, se $XY = 0$ a coordenada refere-se ao eixo X, e se $XY = 1$ a coordenada refere-se ao eixo Y;
- Através de uma chave de características pulsantes, emite-se um pulso que, por meio da entrada G, determinará a gravação, na memória do microcontrolador, da coordenada definida em C1, C2, C3, XY;
- Estão previstas ainda duas outras chaves de características pulsantes, uma para dar início ao movimento, através da entrada P, e outra para a reinicialização, através da entrada R.

Neste trabalho previu-se o mínimo necessário para que o sistema funcione dando base para eventuais sofisticações e adequações futuras.

Salienta-se que estas chaves terão sua escolha customizada em função da deficiência do usuário, e na efetiva implementação deverá ser buscada uma interface otimizada. Embora pareça pouco prático definir a programação das coordenadas de inserção em código binário, uma solução mais amigável para esta interface deve levar em conta também as restrições/habilidades motoras do deficiente. Poder-se-ia, por exemplo, prever um contador no microcontrolador, de tal forma que, pulsos gerados por uma chave acionada pelo usuário, iriam alterando sucessivamente a coordenada de inserção.

Eventualmente poderia ser pleiteado 2 *display's* confirmando as coordenadas na memória do microcontrolador, antes da partida do sistema. Embora os referidos *display's* não tenham sido previstos, existem entradas/saídas reservas no microcontrolador que possibilitariam atender essa exigência.

Outras sofisticações poderiam ser imaginadas sem prejuízo aos fundamentos do projeto.



Capítulo 5

Lógica e Fluxogramas do Sistema

Os controles dos três movimentos envolvidos neste projeto, ou seja, translação nos eixos X e Y e rotação da colher, em operação normal ou de reinicialização, foram modelados através de fluxogramas, que são analisados após as seguintes considerações.

5.1 Operação Normal

Em face das facilidades proporcionadas pelo motor de passos, as diversas fases de aceleração, velocidade constante ou variável, e desaceleração, podem receber um tratamento unificado, onde apenas interessam os seguintes aspectos:

- O momento da aplicação e a duração dos pulsos sobre os motores, que se refletirão em passos com duração correspondente;
- A seqüência de excitação dos enrolamentos e o sentido dos movimentos.

5.1.1 Momento de aplicação e duração dos pulsos

Criaram-se os seguintes vetores, que são uma síntese das planilhas do Capítulo 3.

Movimento Y

- NCLKY(I) com $I = 1, \dots, 153$. Este vetor contém os tempos de duração dos passos em seqüência, através do número de ciclos de relógio;
- NPY(I) com $I = 1, \dots, 153$. Este vetor, para cada elemento I, contém o número de passos em seqüência que são dados com o tempo de duração NCLKY(I);
- Vetor NPY1(IJ), $IJ = 1$ a 5, com os elementos [60 1168 2276 3384 4492], que são os números de passos em velocidade constante da 1ª fase. NPY(21) assume um desses valores dependendo do ponto de inserção;
- Vetor NPY2(IJ), $IJ = 1$ a 5, com os elementos [4324 5432 6540 7648 8756], que são os números de passos em velocidade constante da 5ª fase. NPY(113) assume um desses valores dependendo do ponto de inserção;
- Vetor TY1(IJ), $IJ = 1$ a 5, com os tempos correspondentes à defasagem do início do movimento Y em relação ao movimento de rotação, representados pelo número de ciclos de relógio. Seus elementos são [23.558.400 18.665.472 13.772.544 8.879.616 3.986.688];
- Estabelece-se NY como o decimal correspondente ao binário P3, P2 e P1 da coordenada Y de inserção, então $IJ = NY + 1$.



Os vetores NCLKY(I) e NPY(I) ficam constituídos conforme Figura 5.1.

I		NPY(I)	NCLKY(I)	I		NPY(I)	NCLKY(I)
Índice		nº passos	nº ciclos	Índice		nº passos	nº ciclos
1		1	39.488	77		1	11.944
2		1	16.360	78		1	10.800
3		1	12.552	79		1	9.928
4		1	10.584	80		1	9.240
5		1	9.320	81		1	8.680
6		1	8.424	82		1	8.208
7		1	7.752	83		1	7.808
8		1	7.216	84		1	7.464
9		1	6.776	85		1	7.160
10	ACELERAÇÃO	1	6.408	86		1	6.888
11	1ª FASE	1	6.096	87		1	6.648
12		1	5.824	88		1	6.424
13		1	5.584	89		1	6.232
14		1	5.376	90		1	6.048
15		1	5.184	91		1	5.880
16		1	5.016	92		1	5.728
17		1	4.864	93		1	5.584
18		1	4.720	94		1	5.456
19		1	4.582	95		1	5.336
20		1	4.472	96		1	5.216
21	60 1168 2276	3384	4462	97	ACELERAÇÃO	1	5.112
22		36	4.416	98	5ª FASE	1	5.008
23		43	3.840	99	(CONT.)	1	4.912
24		49	3.424	100		1	4.824
25		56	3.120	101		1	4.736
26		62	2.880	102		1	4.656
27		69	2.704	103		1	4.584
28		75	2.560	104		1	4.504
29		81	2.448	105		1	4.440
30		87	2.368	106		1	4.368
31	INSERÇÃO	93	2.312	107		1	4.304
32	2ª FASE	99	2.280	108		1	4.248
33		105	2.264	109		1	4.184
34		111	2.272	110		1	4.128
35		116	2.304	111		1	4.080
36		122	2.368	112		1	4.024
37		127	2.472	113	4342 5450 6558	7666	8774
38		133	2.640	114		1	4.024
39		138	2.896	115		1	4.060
40		143	3.352	116		1	4.128
41		148	4.344	117		1	4.184
42	CARREGAMENTO	1529	4.344	118		1	4.248
43		56	4.400	119		1	4.304
44		51	4.480	120		1	4.368
45		47	4.580	121		1	4.440
46		44	4.648	122		1	4.504
47		41	4.736	123		1	4.584
48		38	4.832	124		1	4.656
49		36	4.936	125		1	4.736
50		34	5.040	126		1	4.824
51		32	5.160	127		1	4.912
52		30	5.280	128		1	5.008
53		30	5.416	129		1	5.112
54		30	5.560	130		1	5.216
55		30	5.720	131		1	5.336
56		30	5.888	132		1	5.456
57	SUBIDA	30	6.072	133		1	5.584
58	4ª FASE	30	6.280	134	DESACELERAÇÃO	1	5.728
59		30	6.512	135	5ª FASE	1	5.880
60		30	6.768	136		1	6.048
61		29	7.056	137		1	6.232
62		29	7.384	138		1	6.424
63		29	7.760	139		1	6.648
64		29	8.208	140		1	6.888
65		29	8.736	141		1	7.160
66		29	9.392	142		1	7.464
67		24	11.944	143		1	7.808
68		20	15.936	144		1	8.208
69		15	22.856	145		1	8.680
70		11	36.696	146		1	9.240
71		7	72.728	147		1	9.928
72		2	266.664	148		1	10.800
73		1	50.800	149		1	11.944
74	ACELERAÇÃO	1	20.960	150		1	13.560
75	5ª FASE	1	16.080	151		1	16.080
76		1	13.560	152		1	20.960
				153		1	50.600

Figura 5.1 – Vetores NCLKY(I) e NPY(I).

Exemplos: a linha $I = 27$ com 69 passos, cada passo com 2.704 ciclos de relógio, fase inserção, da Figura 5.1, equivale à linha $m = 6$ na Planilha 3.2.2.Y do item 3.2.2; a linha $I = 50$ com 34 passos, cada passo com 5.040 ciclos de relógio, fase subida, da Figura 5.1, equivale à linha $m = 8$ na Planilha 3.2.4.Y do item 3.2.4.

Movimento X

- Vetor NCLKX(J) com $J = 1, \dots, 122$. Este vetor contém os tempos de duração dos passos em seqüência, através do número de ciclos de relógio;
- Vetor NPX(J) com $J = 1, \dots, 122$. Este vetor, para cada elemento J, contém o número de passos em seqüência, que são dados com o tempo de duração NCLKX(J);
- Vetor NPX1(JK), $JK = 1$ a 7, com os valores [40 120 200 280 360 440 520], que são os números de passos em velocidade constante da 1ª fase. NPX(21) assume um desses valores dependendo do ponto de inserção;
- Vetor NPX2(JK), $JK = 1$ a 7, com os valores [80 160 240 320 400 480 560], que são os números de passos em velocidade constante da 5ª fase. NPX(82) assume um desses valores dependendo do ponto de inserção;
- Como o movimento X e o movimento de rotação iniciam-se simultaneamente, não vai existir defasagem neste caso. Contudo, há um intervalo de tempo entre a conclusão do movimento X na 1ª fase e o início deste movimento na 5ª fase, intervalo este que depende do ponto de inserção, e que será dado pelo vetor TX1(JK), $JK = 1$ a 7, com seus elementos em ciclos de relógio, sendo assim constituído: [38.478.000 35.278.000 32.078.000 28.878.000 25.678.000 22.478.000 19.278.000];
- Estabelece-se NX como o decimal correspondente ao binário P3, P2 e P1 da coordenada X de inserção, então $JK = NX + 1$.

Os vetores NCLKX(J) e NPX(J) ficam constituídos conforme figura 5.2.

Movimento de rotação

- Vetor NCLKR(K), com $K = 1, \dots, 91$. Este vetor contém os tempos de duração dos passos em seqüência, através do número de ciclos de relógio;
- Vetor NPR(K), com $K = 1, \dots, 91$. Este vetor, para cada elemento K, contém o número de passos em seqüência, que são dados com o tempo de duração NCLKR(K).

Os vetores NCLKR(K) e NPR(K) ficam constituídos conforme figura 5.3.



J		NPX(J)	NCLKX(J)	J		NPX(J)	NCLKX(J)	
Índice		nº passos	nº ciclos	Índice		nº passos	nº ciclos	
1		1	357.768	82		1	55.880	
2		1	148.192	83		1	54.560	
3		1	113.712	84		1	53.336	
4		1	95.864	85		1	52.192	
5		1	84.456	86		1	51.112	
6		1	76.360	87		1	50.104	
7		1	70.216	88		1	49.144	
8		1	65.360	89		1	48.240	
9		1	61.384	90		1	47.392	
10	ACELERAÇÃO	1	58.056	91	ACELERAÇÃO	1	46.576	
11	1ª FASE	1	55.224	92	5ª FASE	1	45.808	
12		1	52.760	93	(CONT.)	1	45.080	
13		1	50.608	94		1	44.376	
14		1	48.696	95		1	43.712	
15		1	46.984	96		1	43.072	
16		1	45.440	97		1	42.464	
17		1	44.040	98		1	41.872	
18		1	42.768	99		1	41.312	
19		1	41.592	100		1	40.776	
20		1	40.512	101		1	40.256	
21	40 120 200 280 360	440	520	40.000	80 160 240 320 400	480	560	40.000
22		1	40.512	102		1	40.256	
23		1	41.592	103		1	40.776	
24		1	42.768	104		1	41.312	
25		1	44.040	105		1	41.872	
26		1	45.440	106		1	42.464	
27		1	46.984	107		1	43.072	
28		1	48.696	108		1	43.712	
29		1	50.608	109		1	44.376	
30		1	52.760	110		1	45.080	
31	DESACELERAÇÃO	1	55.224	111	DESACELERAÇÃO	1	45.808	
32	1ª FASE	1	58.056	112	5ª FASE	1	46.576	
33		1	61.384	113		1	47.392	
34		1	65.360	114		1	48.240	
35		1	70.216	115		1	49.144	
36		1	76.360	116		1	50.104	
37		1	84.456	117		1	51.112	
38		1	95.864	118		1	52.192	
39		1	113.712	119		1	53.336	
40		1	148.192	120		1	54.560	
41		1	357.768	121		1	55.880	
42		1	505.968	122		1	57.296	
43		1	209.576					
44		1	160.816					
45		1	135.576					
46		1	119.440					
47		1	107.984					
48		1	99.304					
49		1	92.424					
50	ACELERAÇÃO	1	86.808					
51	5ª FASE	1	82.104					
52		1	78.096					
53		1	74.616					
54		1	71.568					
55		1	68.864					
56		1	66.448					
57		1	64.264					
58		1	62.288					
59		1	60.480					
60		1	58.824					
61		1	57.296					

Figura 5.2 - Vetores NCLKX(J) e NPX(J).

Exemplo: a linha $J = 99$ com 1 passo de 52.192 ciclos de relógio, desaceleração 5ª fase, da Figura 5.2, corresponde à linha $m = 17$ da Planilha 3.2.5.X do item 3.2.5.

K		NPR(K)	NCLKR(K)	K		NPR(K)	NCLKR(K)
Índice		nº passos	nº ciclos	Índice		nº passos	nº ciclos
1		4	357.768	47		4	91.560
2		4	148.192	48		4	90.624
3		4	113.712	49		4	89.496
4		4	95.864	50		4	88.184
5		4	84.456	51		4	86.768
6	A	4	76.360	52		4	85.200
7	C	4	70.216	53		4	83.456
8	E	4	65.360	54		4	81.560
9	L	4	61.384	55		4	79.496
10	E	4	58.056	56		4	77.336
11	R	4	55.224	57		4	74.984
12	A	4	52.760	58		4	72.504
13	Ç	4	50.608	59		4	69.880
14	Ã	4	48.696	60		4	67.144
15	Õ	4	46.984	61		4	64.224
16		4	45.440	62		4	61.616
17		4	44.040	63		4	57.168
18		4	42.768	64		4	53.568
19		4	41.592	65		4	50.568
20		4	40.512	66		4	48.024
21	V.CTE	440	40.000	67		4	45.832
22		4	40.488	68		4	43.912
23		4	41.528	69		4	42.216
24		4	42.648	70		4	40.704
25		4	43.856	71		4	40.000
26		4	45.184	72		4	40.488
27		4	46.632	73		4	41.528
28	I	4	48.232	74		4	42.648
29	N	4	50.008	75		4	43.856
30	S	4	52.000	76		4	45.184
31	E	4	54.248	77		4	46.632
32	R	4	56.816	78		4	48.232
33	Ç	4	59.784	79		4	50.008
34	Ã	4	63.272	80		4	52.000
35	Õ	4	67.456	81		4	54.248
36		4	72.608	82		4	56.816
37		4	79.144	83		4	59.784
38		4	87.856	84		4	63.272
39		4	100.288	85		4	67.456
40		4	120.224	86		4	72.608
41		4	161.080	87		4	79.144
42		4	94.016	88		4	87.856
43	C	4	93.840	89		4	100.288
44	A	4	93.488	90		4	120.224
45	R	4	93.032	91		4	161.080
46	R	4	92.400				
	E						
	G						

Figura 5.3 - Vetores NCLKR(K) e NPR(K).

Exemplo: a linha $K = 55$ com 4 passos de 79.496 ciclos de relógio, fase carregamento, da Figura 5.3, equivale à linha $m = 14$ da Planilha 3.2.3.R do item 3.2.3.

5.1.2 Seqüências de controle e sentido dos movimentos

Criaram-se os seguintes vetores, que dão a seqüência de excitação dos enrolamentos. A seqüência de excitação é a mesma apresentada nas Tabelas 4.2.1 e 4.2.2 do Capítulo 4.

- $MOVY(L)$, com $L = 1$ a 4. Este vetor contém a seqüência de controle do motor da translação do eixo Y. Cada elemento ocupa um byte;
- $MOVX(M)$, com $M = 1$ a 4. Este vetor contém a seqüência de controle do motor da translação do eixo X. Cada elemento ocupa um byte;
- $MOVR(N)$, com $N = 1$ a 4. Este vetor contém a seqüência de controle do motor da rotação da colher. Cada elemento ocupa um byte;
- Os vetores $MOVY(L)$, $MOVX(M)$, e $MOVR(N)$ possuem o mesmo conteúdo, que em números binários de 8 bits é [11001100 01100110 00110011 10011001].

São definidos ainda os escalares do sentido da rotação:

- SY determina o sentido de rotação do motor da translação no eixo Y. Se $SY = 0$ (sentido horário) e se $SY = 1$ (sentido anti-horário);
- SX determina o sentido de rotação do motor da translação no eixo X. Se $SX = 0$ (sentido horário) e se $SX = 1$ (sentido anti-horário).

Existe uma lógica muito simples, baseada no número de passos, para estabelecer os valores de SX, ou seja, se $J > 41$ (índice do vetor NPX), então $SX = 0$, caso contrário, $SX = 1$. Analogamente, para SY, se $I > 72$ (índice do vetor NPY), então $SY = 0$, caso contrário, $SY = 1$. A explicação para essa lógica é que se sabe através do projeto, que as linhas $J = 41$ e $I = 72$, dos respectivos vetores NPX e NPY, constituem os últimos passos no sentido de afastamento do usuário, para os movimentos nos eixos X e Y, respectivamente, ou seja, com motor girando no sentido anti-horário e com SX e SY iguais a 1. Para $J > 41$ e $I > 72$ os movimentos X e Y são no sentido de aproximação.

5.1.3 Características Gerais da Operação Normal

Os vetores NCLKY, NPY, NPY1, NPY2, TY1, NCLKX, NPX, NPX1, NPX2, NCKLR, NPR, MOVY, MOVX e MOVR, e o escalar T2, são armazenados na memória Flash do microcontrolador. SX e SY são variáveis do programa. A variável auxiliar AR

constitui um OU lógico entre R (comando de reinicialização), FCXMAX e FCYMAX (fins-de-curso de percurso máximo dos movimentos X e Y respectivamente). AR = 1 vai determinar o início imediato do processo de reinicialização. Ressalta-se que a filosofia de operação adotada estabelece que toda vez que o equipamento é ligado obrigatoriamente deve ser reinicializado. Então se criou a variável auxiliar LR, de tal forma que, LR = 1 vai significar que o sistema ainda não foi reinicializado e não está apto a entrar em operação normal, e LR = 0 habilita o sistema para a operação normal. Utilizam-se também as variáveis auxiliares NX e NY para registrar as coordenadas do ponto de inserção, nos eixos X e Y. Existem algumas variáveis auxiliares criadas apenas para atender a lógica interna do programa, que se entende como auto-explicativas. O fluxograma geral do sistema, construído com base em [20], é apresentado na Figura 5.4. As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam os fluxogramas dos movimentos nos eixos X e Y, e do giro da colher, respectivamente, e representam um complemento ao fluxograma da Figura 5.4.

Na Figura 5.4 os processos 1, 2 e 3 ocorrem permanentemente e em paralelo, pois são imprevisíveis os momentos em que o usuário reinicializará o sistema, dará a partida ou alterará as coordenadas de inserção.

Para maior facilidade de compreensão dos fluxogramas reafirma-se aqui a nomenclatura adotada no Capítulo 4, item 4.3:

P é a entrada referente ao botão de partida (pulso – ativo alto);

R é a entrada referente ao botão de reinicialização (pulso – ativo alto);

C3, C2 e C1 são as coordenadas de inserção em binários de 1 bit, compondo-se em um binário de 3 dígitos, C3 é o bit mais significativo, C1 é o bit menos significativo;

XY é a entrada binária de um bit, definindo se as coordenadas C3, C2 e C1, referem-se ao eixo X (XY = 0) ou ao eixo Y (XY = 1);

G é a entrada que determina a gravação das coordenadas C3, C2 e C1 na memória do microcontrolador (pulso – ativo alto);

FCXMAX e FCYMAX são as entradas binárias referentes aos fins de curso das posições máximas no eixo X e no eixo Y, respectivamente (nível alto = atuado);

FCX, FCY, FCR são as entradas binárias referentes aos fins de curso das posições iniciais dos movimentos X, Y e rotação, respectivamente (nível alto = atuado).

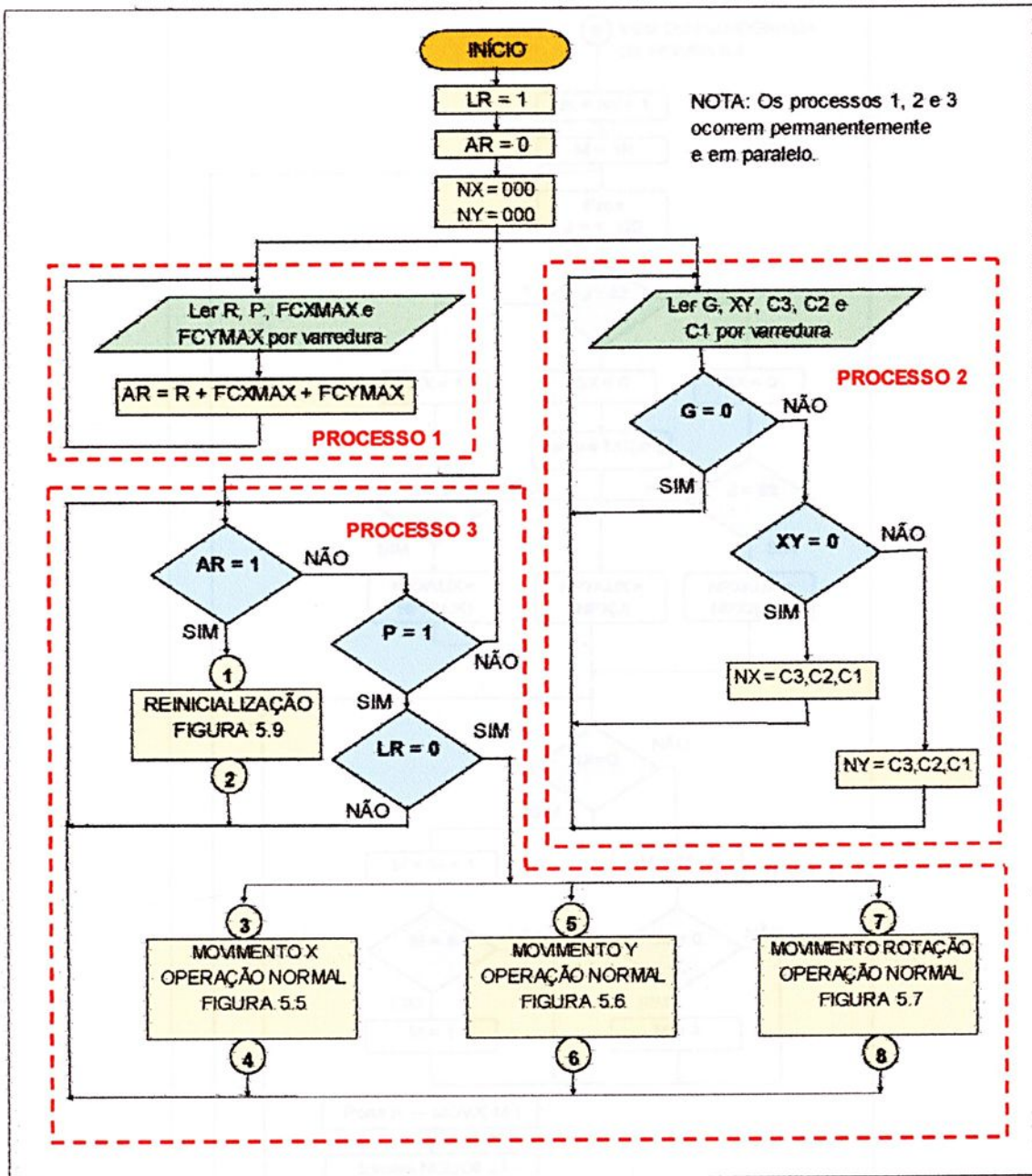


Figura 5.4 – Fluxograma geral do sistema.

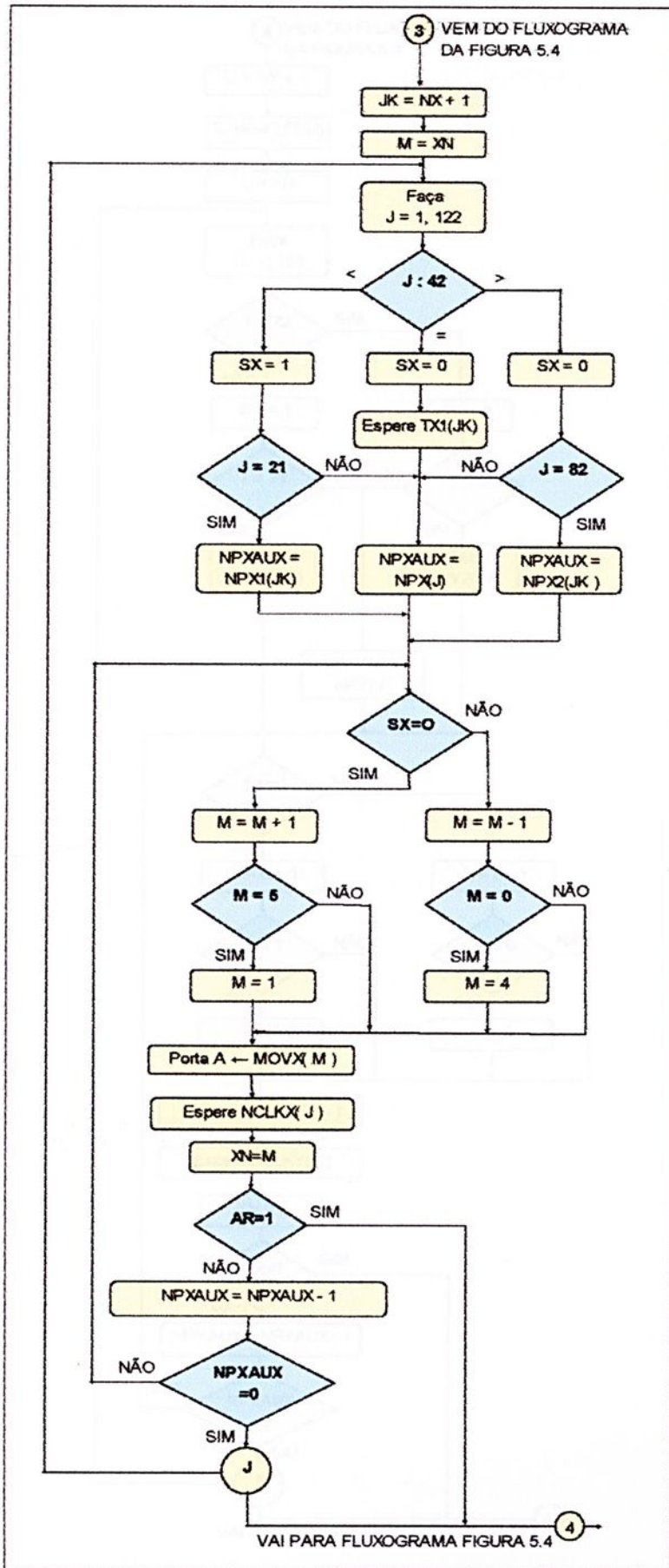


Figura 5.5 – Fluxograma do movimento no eixo X.

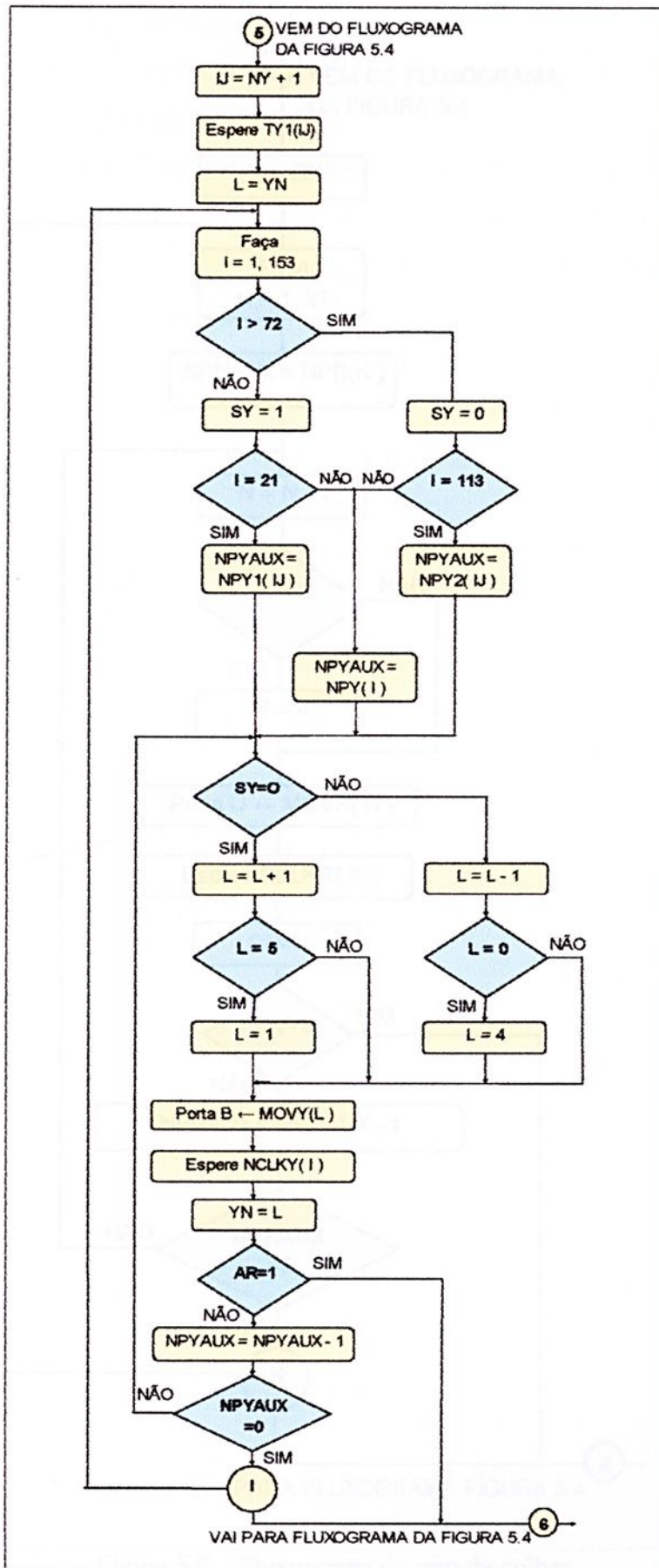


Figura 5.6 – Fluxograma do movimento no eixo Y.

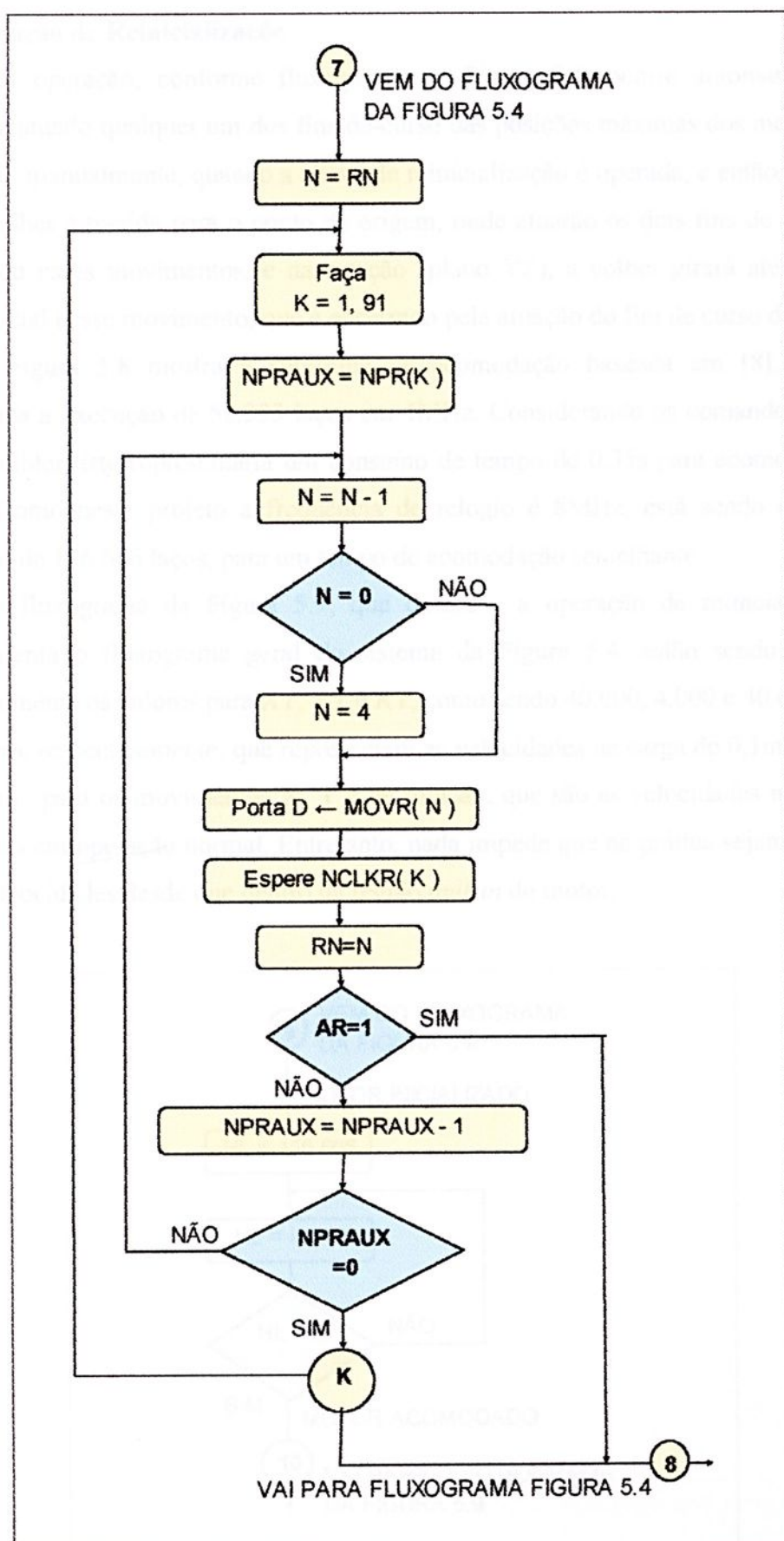


Figura 5.7 – Fluxograma do giro da colher.

5.2 Operação de Reinicialização

Esta operação, conforme fluxograma da Figura 5.4, ocorre automaticamente, quando é atuado qualquer um dos fins-de-curso das posições máximas dos movimentos X e Y, ou manualmente, quando a chave de reinicialização é operada, e então, no plano XY, a colher é trazida para o ponto de origem, onde atuarão os dois fins de curso que encerrarão esses movimentos, e na rotação (plano YZ), a colher girará até atingir o ponto inicial desse movimento, que é encerrado pela atuação do fim de curso da rotação.

A Figura 5.8 mostra a subrotina de acomodação baseada em [8], onde se recomenda a execução de 58.333 laços em 4MHz. Considerando os comandos do laço em assembler, isto representaria um consumo de tempo de 0,35s para acomodação do motor. Como neste projeto a frequência de relógio é 8MHz, está sendo adotada a execução de 116.666 laços, para um tempo de acomodação semelhante.

No fluxograma da Figura 5.9, que descreve a operação de reinicialização e complementa o fluxograma geral do sistema da Figura 5.4, estão sendo adotados arbitrariamente os valores para XT, YT e RT, como sendo 40.000, 4.000 e 40.000 ciclos de relógio, respectivamente, que representam as velocidades na carga de 0,1m/s, 0,1m/s e 15r.p.m., para os movimentos X, Y e de rotação, que são as velocidades máximas e constantes em operação normal. Entretanto, nada impede que na prática sejam adotadas outras velocidades desde que dentro da região *pull-in* do motor.

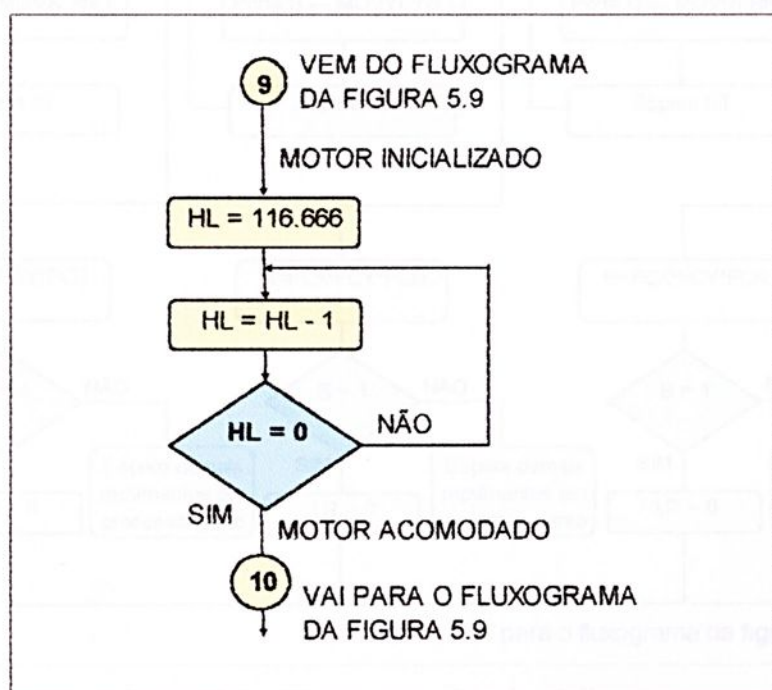


Figura 5.8 – Sub-rotina de acomodação dos motores.

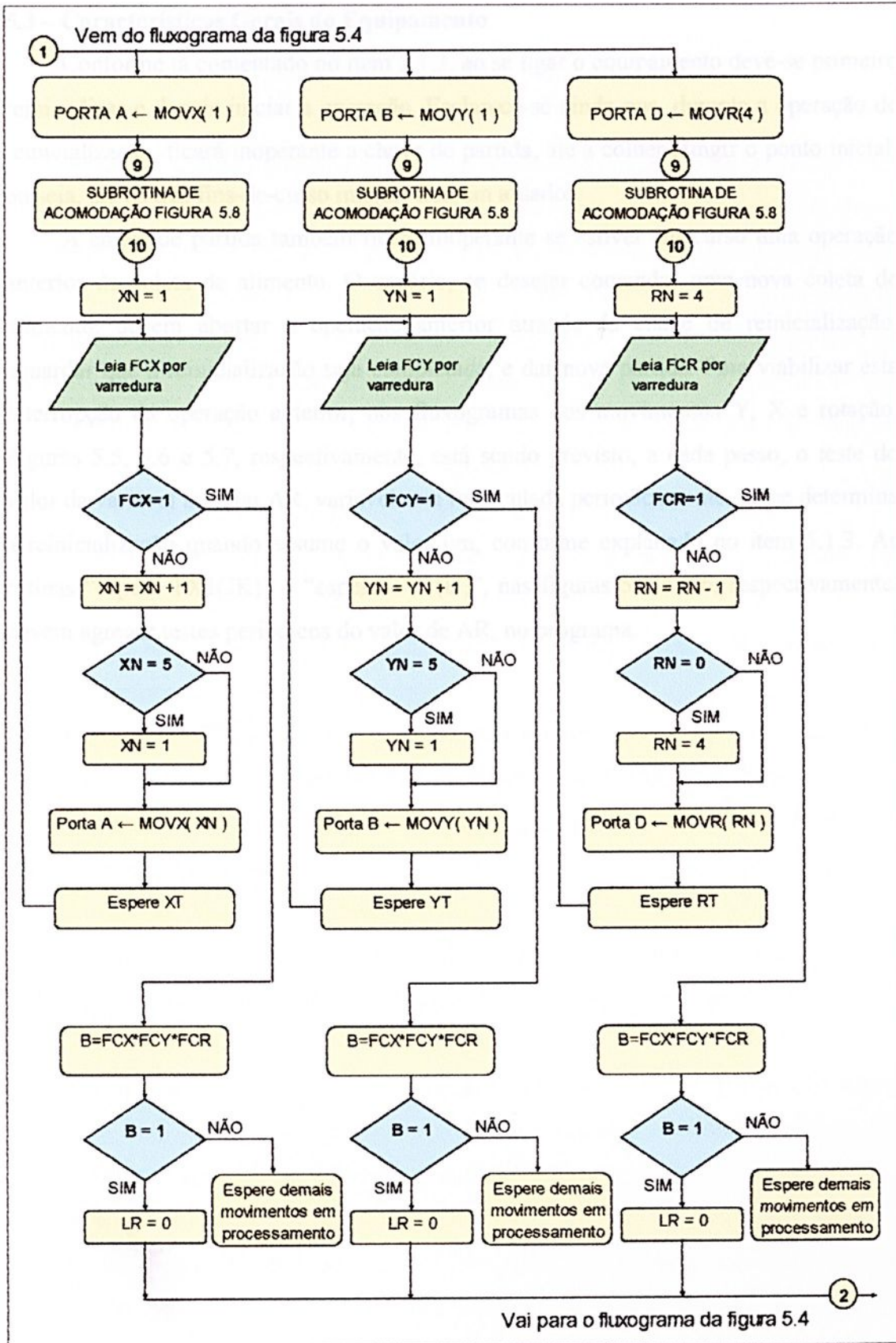


Figura 5.9 – Fluxograma da reinicialização.

5.3 – Características Gerais do Equipamento

Conforme já comentado no item 5.1.3, ao se ligar o equipamento deve-se primeiro reinicializar e depois iniciar a operação. Esclarece-se ainda que, durante a operação de reinicialização, ficará inoperante a chave de partida, até a colher atingir o ponto inicial, ou seja, até os três fins-de-curso iniciais ficarem atuados.

A chave de partida também ficará inoperante se estiver em curso uma operação anterior de coleta de alimento. O usuário, se desejar comandar uma nova coleta de alimento, deverá abortar a operação anterior através da chave de reinicialização, aguardar que a reinicialização seja completada, e dar nova partida. Para viabilizar esta interrupção da operação anterior, nos fluxogramas dos movimentos Y, X e rotação, Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, respectivamente, está sendo previsto, a cada passo, o teste do valor da variável auxiliar AR, variável esta recalculada periodicamente, e que determina a reinicialização quando assume o valor um, conforme explanado no item 5.1.3. As rotinas “espere TX1(JK)” e “espere TY1(IJ)”, nas figuras 5.5 e 5.6, respectivamente, devem agregar testes periódicos do valor de AR, no programa.

Capítulo 6

Ferramenta de Cálculo Desenvolvida

Neste capítulo procurar-se-á descrever a ferramenta de cálculo desenvolvida neste trabalho e suas potencialidades, apresentando um exemplo com condições de operação diferentes das estabelecidas no Capítulo 3. Esta ferramenta é uma planilha de cálculo geral, construída utilizando o programa Excel XP da Microsoft, que integra todas as planilhas secundárias de cálculo dos diversos movimentos, com as interações entre as fases devidamente consideradas. Entenda-se como cálculos dos movimentos os cálculos dos tempos de aplicação e de duração dos passos, das taxas de passos, das velocidades e das acelerações, e demais cálculos complementares requeridos.

Foi construída uma planilha geral e geradas versões para duas situações:

- PLANILHAGERAL_2004f1.xls com os dados gerais de entrada em conformidade com o Capítulo 3;
- PLANILHAGERAL_2004f2.xls com os dados gerais de entrada em conformidade com este capítulo.

O programa Excel permite, para o mesmo arquivo, a construção de 3 planilhas, onde a atualização de uma das planilhas implicará na atualização dos dados das outras planilhas onde tenha sido criado um vínculo. Essas planilhas mantêm a designação original Plan1, Plan2, Plan3.

Adotou-se a seguinte distribuição:

- Em Plan1 são efetuados os cálculos referentes às fases 1, 2, 3 e 4, para os movimentos no eixo Y e rotacional, inclusive quando há composição de movimentos;
- Em Plan2 são efetuados os cálculos referentes às fases 1 e 5, para o movimento X, que é completamente independente dos outros movimentos. Portanto não existem vínculos entre Plan2 e as outras planilhas;
- Em Plan3 foram efetuados os cálculos referentes à fase 5, para o movimento Y, que nesta fase é independente dos outros movimentos. Contudo, existem vínculos com as outras planilhas, pois em Plan3 são efetuados os cálculos gerais dos tempos, passos e distâncias, para todos os movimentos e fases.

Para avaliar-se o potencial da ferramenta em questão, considera-se uma situação hipotética na qual constata-se que a colher sempre fica excessivamente cheia após a fase de carregamento, e deseja-se diminuir a quantidade de alimento recolhida a cada ciclo. Procurando resolver o problema optou-se arbitrariamente por aumentar de 45° para 60° o ângulo de inserção δ , que é definido no item 3.2.2 (págs. 53 e 54) em relação a horizontal, e diminuir em 30% a área A da seção transversal do alimento recolhido, definida no item 3.2.3, e que passa então de $0,00195\text{m}^2$ para $0,001365\text{m}^2$. Os dados de entrada, neste caso, são os apresentados na Tabela 6.1. No Gráfico 6.1 e nas Planilhas 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5 pode-se verificar os novos valores de V_Y nas 4 primeiras fases.

Tabela 6.1 – Dados gerais de entrada para a situação hipotética.

BASE DE DADOS GERAL	
$\text{Passo}_R (^\circ)$	1,8
$\text{Passo}_Y (^\circ)$	1,8
$P_{\text{rosca}} (\text{m})$	0,01
$R (\text{m})$	0,24
$f_{\text{clock}} (\text{MHz})$	8
Ataque ($^\circ$)	60
$A (\text{m}^2)$	0,001365
n	4
$N_R (\text{r.p.m.})$	15
$f_R (\text{pps})$	200

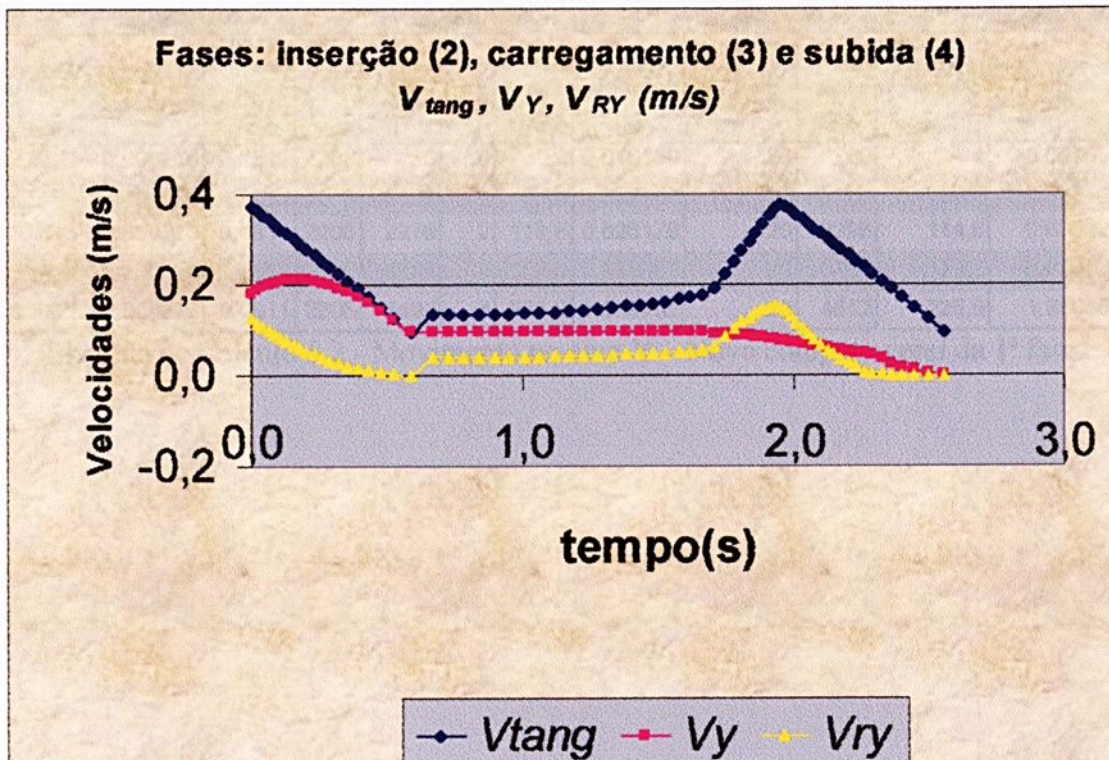


Gráfico 6.1 – Composição de Movimentos – Fases 2, 3 e 4 –
 $V_{\text{tang}} \times t_m, V_Y \times t_m, V_{RY} \times t_m$ – Situação hipotética.

PLANILHA 3.2.1.Y.1 - MOVIMENTO Y - 1ª FASE				
ACELERAÇÃO				
m	$f_m(\text{pps})$	$\Delta t_m(\text{s})$	$V_Y(\text{m/s})$	N_{clock}
1	405	0,002469	0,0203	19.752
2	978	0,001023	0,0489	8.184
3	1.274	0,000785	0,0637	6.280
4	1.511	0,000662	0,0755	5.296
5	1.715	0,000583	0,0858	4.664
6	1.898	0,000527	0,0949	4.216
7	2.062	0,000485	0,1031	3.880
8	2.217	0,000451	0,1109	3.608
9	2.358	0,000424	0,1179	3.392
10	2.494	0,000401	0,1247	3.208
11	2.625	0,000381	0,1312	3.048
12	2.747	0,000364	0,1374	2.912
13	2.865	0,000349	0,1433	2.792
14	2.976	0,000336	0,1488	2.688
15	3.086	0,000324	0,1543	2.592
16	3.185	0,000314	0,1592	2.512
17	3.289	0,000304	0,1645	2.432
18	3.390	0,000295	0,1695	2.360
19	3.484	0,000287	0,1742	2.296
20	3.571	0,00028	0,1786	2.240
Tempo total =		0,011044		

DADOS	
Passo(°)	1,8
$P_{\text{rosca}}(\text{m})$	0,01
$f_{\text{clock}}(\text{MHz})$	8
$f_{s1}(\text{pps})$	3.622
$g_{s1}(\text{pps})$	0
$M1$	21

CÁLCULO AUXILIAR	
$\beta(\text{pps/s}^2)$	327.972
Passo(m)	0,00005
$t_{\text{clock}}(\text{ns})$	125

Planilha de Cálculo 6.1 – Movimento no eixo Y – 1ª fase – Novo cálculo de V_Y .

PLANILHA 3.2.1.Y.2 - MOVIMENTO Y - 1ª FASE - POSICIONAMENTO												
VELOCIDADE CONSTANTE								ACELERA	CÔMPUTO - 1ª FASE			
f_m (pps)	$\Delta t_m(\text{s})$	$V_Y(\text{m/s})$	N_{clock}	55,4 = ΔY		Transl. (mm)	Tempo (s)	Passos aceleração	Passos totais	Translação total (mm)	Tempo total (s)	
				Passos	N_y							
3.622	0,000276	0,1811	2208	60	0	3	0,016560	20	80	4	0,027604	
3.622	0,000276	0,1811	2208	1168	1	58,4	0,322368	20	1188	59,4	0,333412	
3.622	0,000276	0,1811	2208	2276	2	113,8	0,628176	20	2296	114,8	0,639220	
3.622	0,000276	0,1811	2208	3384	3	169,2	0,933984	20	3404	170,2	0,945028	
3.622	0,000276	0,1811	2208	4492	4	224,6	1,239792	20	4512	225,6	1,250836	

Planilha de Cálculo 6.2 - Movimento no eixo Y – Novo cômputo geral da 1ª fase.

PLANILHA 3.2.2.Y - MOVIMENTO Y - 2ª FASE - INSERÇÃO DA COLHER

m	$\theta_m(^{\circ})$	$V_{tang}(m/s)$ (rotação)	$V_Y(m/s)$	$f_m(pps)$	$\Delta t_m(s)$	$4 \cdot \Delta t_m(s)$ (rotação)	n_{pas}	N_{clock}	
1	35,1	0,3725	0,1811	3.622	0,000276	0,020244	73	2.208	
2	33,3	0,3631	0,1884	3.768	0,000265	0,020764	78	2.120	
3	31,5	0,3536	0,1948	3.896	0,000257	0,021324	83	2.056	
4	29,7	0,3439	0,2003	4.006	0,000250	0,021928	88	2.000	
5	27,9	0,3337	0,2048	4.096	0,000244	0,022592	93	1.952	
6	26,1	0,3234	0,2083	4.166	0,000240	0,023316	97	1.920	
7	24,3	0,3127	0,2107	4.214	0,000237	0,024116	102	1.896	
8	22,5	0,3016	0,2120	4.240	0,000236	0,025004	106	1.888	
9	20,7	0,2900	0,2121	4.242	0,000236	0,026000	110	1.888	
10	18,9	0,2780	0,2110	4.220	0,000237	0,027124	114	1.896	
11	17,1	0,2654	0,2086	4.172	0,000240	0,028408	118	1.920	
12	15,3	0,2522	0,2048	4.096	0,000244	0,029892	123	1.952	
13	13,5	0,2383	0,1996	3.992	0,000251	0,031636	126	2.008	
14	11,7	0,2236	0,1928	3.856	0,000259	0,033728	130	2.072	
15	9,9	0,2077	0,1840	3.680	0,000272	0,036304	133	2.176	
16	8,1	0,1905	0,1731	3.462	0,000289	0,039572	137	2.312	
17	6,3	0,1716	0,1597	3.194	0,000313	0,043928	140	2.504	
18	4,5	0,1504	0,1431	2.862	0,000349	0,050144	144	2.792	
19	2,7	0,1254	0,1219	2.438	0,000410	0,060112	147	3.280	
20	0,9	0,0936	0,0927	1.854	0,000539	0,080540	149	4.312	
Tempo =					0,666	Passos = 2291			

DADOS	
Passo($^{\circ}$)	1,8
$P_{rosca}(m)$	0,01
$f_{clock}(MHz)$	8
Ataque($^{\circ}$)	60

CÁLCULO AUXILIAR	
Passo(m)	0,00005
K_1	0,57735
$t_{clock}(ns)$	125

Planilha de Cálculo 6.3 – Movimento no eixo Y – 2ª fase – Novo cálculo de V_Y .

PLANILHA 3.2.3.Y - MOVIMENTO Y - 3ª FASE - CARREGAMENTO DA COLHER

m	$\psi_m(^{\circ})$	$V_{tang}(m/s)$ (rotação)	$V_Y(m/s)$	$f_m(pps)$	$\Delta t_m(s)$	$4 \cdot \Delta t_m(s)$ (rotação)	n_{pas}	N_{clock}	
1	0,9	0,1321	0,0927	1.854	0,000539	0,057076	106	4.312	
2	2,7	0,1323	0,0927	1.854	0,000539	0,056992	106	4.312	
3	4,5	0,1327	0,0927	1.854	0,000539	0,056820	105	4.312	
4	6,3	0,1333	0,0927	1.854	0,000539	0,056564	105	4.312	
5	8,1	0,1340	0,0927	1.854	0,000539	0,056268	104	4.312	
6	9,9	0,1350	0,0927	1.854	0,000539	0,055852	104	4.312	
7	11,7	0,1361	0,0927	1.854	0,000539	0,055400	103	4.312	
8	13,5	0,1375	0,0927	1.854	0,000539	0,054836	102	4.312	
9	15,3	0,1391	0,0927	1.854	0,000539	0,054204	101	4.312	
10	17,1	0,1410	0,0927	1.854	0,000539	0,053476	99	4.312	
11	18,9	0,1431	0,0927	1.854	0,000539	0,052692	98	4.312	
12	20,7	0,1455	0,0927	1.854	0,000539	0,051820	96	4.312	
13	22,5	0,1482	0,0927	1.854	0,000539	0,050876	94	4.312	
14	24,3	0,1512	0,0927	1.854	0,000539	0,049868	93	4.312	
15	26,1	0,1546	0,0927	1.854	0,000539	0,048772	90	4.312	
16	27,9	0,1583	0,0927	1.854	0,000539	0,047632	88	4.312	
17	29,7	0,1625	0,0927	1.854	0,000539	0,046400	86	4.312	
18	31,5	0,1672	0,0927	1.854	0,000539	0,045096	84	4.312	
19	33,3	0,1725	0,0927	1.854	0,000539	0,043712	81	4.312	
20	35,1	0,1783	0,0927	1.854	0,000539	0,042288	78	4.312	
Tempo =					1,036	Passos = 1923			

DADOS	
Passo($^{\circ}$)	1,8
$P_{rosca}(m)$	0,01
$f_{clock}(MHz)$	8
$A(cm^2)$	13,65
$\theta_1(^{\circ})$	36
$R(cm)$	24

CÁLCULO AUXILIAR	
Passo(m)	0,00005
$K_2(m/rad)$	0,0716
$t_{clock}(ns)$	125

Planilha de Cálculo 6.4 – Movimento no eixo Y – 3ª fase – Novo cálculo de V_Y .

PLANILHA 3.2.4.Y - MOVIMENTO Y - 4ª FASE - SUBIDA DA COLHER

m	$\psi_m(^{\circ})$	$V_{tangy} (m/s)$ (rotação)	$V_Y (m/s)$	$f_m (pps)$	$\Delta t_m (s)$	$4 \cdot \Delta t_m (s)$ (rotação)	n_{pas}	N_{clock}
1	36,9	0,1552	0,0909	1.818	0,000550	0,038844	71	4.400
2	38,7	0,1745	0,0893	1.786	0,000560	0,033720	60	4.480
3	40,5	0,1898	0,0877	1.754	0,000570	0,030208	53	4.560
4	42,3	0,202	0,0861	1.721	0,000581	0,027608	48	4.648
5	44,1	0,2116	0,0845	1.689	0,000592	0,025584	43	4.736
6	45,9	0,2191	0,0828	1.656	0,000604	0,023948	40	4.832
7	47,7	0,2246	0,0810	1.621	0,000617	0,022592	37	4.936
8	49,5	0,2284	0,0794	1.587	0,000630	0,02144	34	5.040
9	51,3	0,2305	0,0775	1.550	0,000645	0,020452	32	5.160
10	53,1	0,2264	0,0758	1.515	0,000660	0,020000	30	5.280
11	54,9	0,2142	0,0739	1.477	0,000677	0,020244	30	5.416
12	56,7	0,1994	0,0719	1.439	0,000695	0,020764	30	5.560
13	58,5	0,1848	0,0699	1.399	0,000715	0,021324	30	5.720
14	60,3	0,1704	0,0679	1.359	0,000736	0,021928	30	5.888
15	62,1	0,1561	0,0659	1.318	0,000759	0,022592	30	6.072
16	63,9	0,1423	0,0637	1.274	0,000785	0,023316	30	6.280
17	65,7	0,1287	0,0614	1.229	0,000814	0,024116	30	6.512
18	67,5	0,1154	0,0591	1.182	0,000846	0,025004	30	6.768
19	69,3	0,1025	0,0567	1.134	0,000882	0,026000	29	7.056
20	71,1	0,09	0,0542	1.083	0,000923	0,027124	29	7.384
21	72,9	0,078	0,0515	1.031	0,000970	0,028408	29	7.760
22	74,7	0,0665	0,0487	975	0,001026	0,029892	29	8.208
23	76,5	0,0556	0,0458	916	0,001092	0,031636	29	8.736
24	78,3	0,0453	0,0428	852	0,001174	0,033728	29	9.392
25	80,1	0,0357	0,0335	670	0,001493	0,036304	24	11.944
26	81,9	0,0268	0,0251	502	0,001992	0,039572	20	15.936
27	83,7	0,0188	0,0175	350	0,002857	0,043928	15	22.856
28	85,5	0,0118	0,0109	218	0,004587	0,050144	11	36.696
29	87,3	0,0059	0,0055	110	0,009091	0,060112	7	72.728
30	89,1	0,0015	0,0015	30	0,033333	0,08054	2	266.664

DADOS	
Passo($^{\circ}$)	1,8
$P_{rosca} (m)$	0,01
$f_{clock} (MHz)$	8
$f_s (pps)$	0
$g_s (pps)$	1832
M	31

CÁLCULO AUXILIAR	
$\beta' (pps/s^2)$	-55.937
Passo(m)	0,00005

Tempo =	0,921093	Passos =	941
---------	----------	----------	-----

Planilha de Cálculo 6.5 – Movimento no eixo Y – 4ª fase – Novo cálculo de V_Y .

Através de verificação no Gráfico 6.1 e nas Planilhas 6.1 a 6.5, comparativamente à solução apresentada no Capítulo 3, pode-se constatar que, devido aos novos valores de A e δ , ocorrem as seguintes alterações principais em relação a V_Y :

- A velocidade V_Y , no fim da 1ª fase (constante) e início da 2ª fase, passa de 0,0906m/s para 0,1811m/s, ou seja, praticamente dobrou;
- A velocidade V_Y , no fim da 2ª fase e durante a 3ª fase (constante) passa de 0,0921m/s para 0,0927m/s, ou seja, quase não variou.

Nas Planilhas de Cálculo 6.6, 6.7 e 6.8 são calculados os valores de V_{RF} para as fases 2, 3 e 4.

PLANILHA 3.2.2.G - COMPOSIÇÃO DE MOVIMENTOS - 2ª FASE

m	$\theta_m(^{\circ})$	$V_{tang}(m/s)$ (rotação)	$V_{RY}(m/s)$	$V_{ataque}(m/s)$
1	35,1	0,3725	0,1237	0,2473
2	33,3	0,3631	0,1151	0,2302
3	31,5	0,3536	0,1067	0,2133
4	29,7	0,3439	0,0984	0,1967
5	27,9	0,3337	0,0902	0,1803
6	26,1	0,3234	0,0821	0,1643
7	24,3	0,3127	0,0743	0,1486
8	22,5	0,3016	0,0666	0,1333
9	20,7	0,2900	0,0592	0,1184
10	18,9	0,2780	0,052	0,104
11	17,1	0,2654	0,0451	0,0901
12	15,3	0,2522	0,0384	0,0768
13	13,5	0,2383	0,0321	0,0642
14	11,7	0,2236	0,0262	0,0524
15	9,9	0,2077	0,0206	0,0412
16	8,1	0,1905	0,0155	0,031
17	6,3	0,1716	0,0109	0,0217
18	4,5	0,1504	0,0068	0,0136
19	2,7	0,1254	0,0034	0,0068
20	0,9	0,0936	0,0008	0,0017

DADOS	
Ataque($^{\circ}$)	60

CÁLCULO AUXILIAR	
K_1	0,57735

Planilha de Cálculo 6.6 – Composição de Movimentos – 2ª fase – Novo cálculo de V_{RY} .

PLANILHA 3.2.3.G - COMPOSIÇÃO - 3ª FASE

m	$\psi_m(^{\circ})$	$V_{tang}(m/s)$ (rotação)	$V_Y(m/s)$	$v_{RY}(m/s)$
1	0,9	0,1321	0,0927	0,0394
2	2,7	0,1323	0,0927	0,0395
3	4,5	0,1327	0,0927	0,0396
4	6,3	0,1333	0,0927	0,0398
5	8,1	0,1340	0,0927	0,0400
6	9,9	0,1350	0,0927	0,0403
7	11,7	0,1361	0,0927	0,0406
8	13,5	0,1375	0,0927	0,0410
9	15,3	0,1391	0,0927	0,0415
10	17,1	0,1410	0,0927	0,0421
11	18,9	0,1431	0,0927	0,0427
12	20,7	0,1455	0,0927	0,0434
13	22,5	0,1482	0,0927	0,0442
14	24,3	0,1512	0,0927	0,0451
15	26,1	0,1546	0,0927	0,0461
16	27,9	0,1583	0,0927	0,0472
17	29,7	0,1625	0,0927	0,0485
18	31,5	0,1672	0,0927	0,0499
19	33,3	0,1725	0,0927	0,0515
20	35,1	0,1783	0,0927	0,0532

Planilha de Cálculo 6.7 – Composição de Movimentos – 3ª fase – Novo cálculo de V_{RY} .

PLANILHA 3.2.4.G - COMPOSIÇÃO - 4ª FASE - SUBIDA

m	$\psi_m(^{\circ})$	$V_{tang}(m/s)$ (rotação)	$V_Y(m/s)$	$V_{RY}(m/s)$
1	36,9	0,1941	0,0909	0,0643
2	38,7	0,2236	0,0893	0,0852
3	40,5	0,2496	0,0877	0,1021
4	42,3	0,2731	0,0861	0,1159
5	44,1	0,2947	0,0845	0,1271
6	45,9	0,3148	0,0828	0,1363
7	47,7	0,3337	0,0810	0,1436
8	49,5	0,3517	0,0794	0,1490
9	51,3	0,3687	0,0775	0,1530
10	53,1	0,3770	0,0758	0,1506
11	54,9	0,3725	0,0739	0,1403
12	56,7	0,3631	0,0719	0,1275
13	58,5	0,3536	0,0699	0,1149
14	60,3	0,3439	0,0679	0,1025
15	62,1	0,3337	0,0659	0,0902
16	63,9	0,3234	0,0637	0,0786
17	65,7	0,3127	0,0614	0,0673
18	67,5	0,3016	0,0591	0,0563
19	69,3	0,2900	0,0567	0,0458
20	71,1	0,2780	0,0542	0,0358
21	72,9	0,2654	0,0515	0,0265
22	74,7	0,2522	0,0487	0,0178
23	76,5	0,2383	0,0458	0,0098
24	78,3	0,2236	0,0426	0,0027
25	80,1	0,2077	0,0335	0,0022
26	81,9	0,1905	0,0251	0,0017
27	83,7	0,1716	0,0175	0,0013
28	85,5	0,1504	0,0109	0,0009
29	87,3	0,1254	0,0055	0,0004
30	89,1	0,0936	0,0015	0,0000

Planilha de Cálculo 6.8 – Composição de Movimentos – 4ª fase – Novo cálculo de V_{RY} .

Pela verificação do Gráfico 6.1 e das Planilhas de Cálculo 6.6 a 6.8, comparativamente à solução apresentada no Capítulo 3, pode-se constatar que:

- O degrau (diferença) de velocidade de V_{RY} na transição entre a 2ª fase e a 3ª fase passa de 0,0668m/s para 0,0386m/s, ou seja, decresce significativamente, o que é um aspecto positivo;
- Demais características de suavidade na variação de V_{RY} estão mantidas.

Quanto ao movimento rotacional, ele só variou em relação ao Capítulo 3, nas fases 3 e 4, mas pela comparação do Gráfico 6.1 com os gráficos do Capítulo 3, vê-se que as características de suavidade estão mantidas. Apenas para ilustração estão sendo apresentadas as Planilhas de Cálculo 6.9 e 6.10, da velocidade V_{tang} nas fases 3 e 4.

PLANILHA 3.2.2.R - MOVIMENTO DE ROTAÇÃO - 2ª FASE - INSERÇÃO DA COLHER

m	$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_r(^{\circ})$	$\Delta t_m(s)$	$t_m(s)$ cada 4 passos	$f_m(pps)$	$V_{tang}(m/s)$	N_{clock}
1	36,0	34,2	0,005061	0,000000	197,6	0,3725	40.488
2	34,2	32,4	0,005191	0,020244	192,6	0,3631	41.528
3	32,4	30,6	0,005331	0,041008	187,6	0,3536	42.648
4	30,6	28,8	0,005482	0,062332	182,4	0,3439	43.856
5	28,8	27,0	0,005648	0,084260	177,1	0,3337	45.184
6	27,0	25,2	0,005829	0,106852	171,6	0,3234	46.632
7	25,2	23,4	0,006029	0,130168	165,9	0,3127	48.232
8	23,4	21,6	0,006251	0,154284	160,0	0,3016	50.008
9	21,6	19,8	0,006500	0,179288	153,8	0,2900	52.000
10	19,8	18,0	0,006781	0,205288	147,5	0,2780	54.248
11	18,0	16,2	0,007102	0,232412	140,8	0,2654	56.816
12	16,2	14,4	0,007473	0,260820	133,8	0,2522	59.784
13	14,4	12,6	0,007909	0,290712	126,4	0,2383	63.272
14	12,6	10,8	0,008432	0,322348	118,6	0,2236	67.456
15	10,8	9,0	0,009076	0,356076	110,2	0,2077	72.608
16	9,0	7,2	0,009893	0,392380	101,1	0,1905	79.144
17	7,2	5,4	0,010982	0,431952	91,1	0,1716	87.856
18	5,4	3,6	0,012536	0,475880	79,8	0,1504	100.288
19	3,6	1,8	0,015028	0,526024	66,5	0,1254	120.224
20	1,8	0,0	0,020135	0,586136	49,7	0,0936	161.080
Tempo total movimento =				0,666676			

DADOS	
Passo($^{\circ}$)	1,8
R(m)	0,24
f_{clock} (MHz)	8
f_s (pps)	40
g_s (pps)	200
M	21
n	4

CÁLCULO AUXILIAR	
β' (pps/s ²)	-960
P_{carga} (m) a ca- da 4 passos	0,00754
t_{clock} (ns)	125

Planilha de Cálculo 6.9 – Movimento rotacional – 2ª fase – Novo cálculo de V_{tang} .

PLANILHA 3.2.3.R - MOVIMENTO DE ROTAÇÃO - 3ª FASE - CARREGAMENTO DA COLHER

m	$\psi_i(^{\circ})$	$\psi_r(^{\circ})$	$\Delta t_m(s)$	$t_m(s)$ cada 4 passos	$f_m(pps)$	$V_{tang}(m/s)$	N_{clock}
1	0,0	1,8	0,014269	0,000000	70,1	0,1321	114.152
2	1,8	3,6	0,014248	0,057076	70,2	0,1323	113.984
3	3,6	5,4	0,014205	0,114068	70,4	0,1327	113.640
4	5,4	7,2	0,014141	0,170888	70,7	0,1333	113.128
5	7,2	9,0	0,014067	0,227452	71,1	0,1340	112.536
6	9,0	10,8	0,013963	0,283720	71,6	0,1350	111.704
7	10,8	12,6	0,013850	0,339572	72,2	0,1361	110.800
8	12,6	14,4	0,013709	0,394972	72,9	0,1375	109.672
9	14,4	16,2	0,013551	0,449808	73,8	0,1391	108.408
10	16,2	18,0	0,013369	0,504012	74,8	0,1410	106.952
11	18,0	19,8	0,013173	0,557488	75,9	0,1431	105.384
12	19,8	21,6	0,012955	0,610180	77,2	0,1455	103.640
13	21,6	23,4	0,012719	0,662000	78,6	0,1482	101.752
14	23,4	25,2	0,012467	0,712876	80,2	0,1512	99.736
15	25,2	27,0	0,012193	0,762744	82,0	0,1546	97.544
16	27,0	28,8	0,011908	0,811516	84,0	0,1583	95.264
17	28,8	30,6	0,011600	0,859148	86,2	0,1625	92.800
18	30,6	32,4	0,011274	0,905548	88,7	0,1672	90.192
19	32,4	34,2	0,010928	0,950644	91,5	0,1725	87.424
20	34,2	36,0	0,010572	0,994356	94,6	0,1783	84.576
Tempo total movimento =				1,036644			

DADOS	
Passo($^{\circ}$)	1,8
R(m)	0,24
f_{clock} (MHz)	8
A(m ²)	0,00137
ψ_2 ($^{\circ}$)	36
n	4

CÁLCULO AUXILIAR	
P_{carga} (m) a ca- da 4 passos	0,00754
t_{clock} (ns)	125
K_2 (m/rad)	0,0716

Planilha de Cálculo 6.10 – Movimento rotacional – 3ª fase – Novo cálculo de V_{tang} .



PLANILHA 3.2.4.R - MOVIMENTO DE ROTAÇÃO - 4ª FASE - SUBIDA DA COLHER

m	$\psi_i(^{\circ})$	$\psi_f(^{\circ})$	$\Delta t_m(s)$	$t_m(s)$ cada 4 passos	$f_m(pps)$	$V_{tang}(m/s)$	N_{clock}	DADOS	
1	36,0	37,8	0,009711	0,000000	103,0	0,1941	77.688	Passo($^{\circ}$)	1,8
2	37,8	39,6	0,008430	0,038844	118,6	0,2236	67.440	$R(m)$	0,24
3	39,6	41,4	0,007552	0,072564	132,4	0,2496	60.416	$f_{clock}(MHz)$	8
4	41,4	43,2	0,006902	0,102772	144,9	0,2731	55.216	$f_{s1}(pps)$	200
5	43,2	45,0	0,006396	0,13038	156,3	0,2947	51.168	$g_{s1}(pps)$	94,6
6	45,0	46,8	0,005987	0,155964	167,0	0,3148	47.896	$M1$	10
7	46,8	48,6	0,005648	0,179912	177,1	0,3337	45.184	$f_{s2}(pps)$	40
8	48,6	50,4	0,00536	0,202504	186,6	0,3517	42.880	$g_{s2}(pps)$	200
9	50,4	52,2	0,005113	0,223944	195,6	0,3687	40.904	$M2$	21
10	52,2	54,0	0,005000	0,244396	200,0	0,3770	40.000	n	4
1	54,0	55,8	0,005061	0,264396	197,6	0,3725	40.488		
2	55,8	57,6	0,005191	0,284640	192,6	0,3631	41.528		
3	57,6	59,4	0,005331	0,305404	187,6	0,3536	42.648		
4	59,4	61,2	0,005482	0,326728	182,4	0,3439	43.856		
5	61,2	63,0	0,005648	0,348656	177,1	0,3337	45.184		
6	63,0	64,8	0,005829	0,371248	171,6	0,3234	46.632		
7	64,8	66,6	0,006029	0,394564	165,9	0,3127	48.232		
8	66,6	68,4	0,006251	0,41868	160,0	0,3016	50.008		
9	68,4	70,2	0,006500	0,443684	153,8	0,2900	52.000		
10	70,2	72,0	0,006781	0,469684	147,5	0,2780	54.248		
11	72,0	73,8	0,007102	0,496808	140,8	0,2654	56.816		
12	73,8	75,6	0,007473	0,525216	133,8	0,2522	59.784		
13	75,6	77,4	0,007909	0,555108	126,4	0,2383	63.272		
14	77,4	79,2	0,008432	0,586744	118,6	0,2236	67.456		
15	79,2	81,0	0,009076	0,620472	110,2	0,2077	72.608		
16	81,0	82,8	0,009893	0,656776	101,1	0,1905	79.144		
17	82,8	84,6	0,010982	0,696348	91,1	0,1716	87.856		
18	84,6	86,4	0,012536	0,740276	79,8	0,1504	100.288		
19	86,4	88,2	0,015028	0,79042	66,5	0,1254	120.224		
20	88,2	90,0	0,020135	0,850532	49,7	0,0936	161.080		
Tempo total movimento =				0,931072					

CÁLCULO AUXILIAR	
$\beta_1(pps/s^2)$	1725
$\beta_2(pps/s^2)$	-960
$P_{carga}(m)$ a ca- da 4 passos	0,00754
$t_{clock}(ns)$	125

Planilha de Cálculo 6.11 – Movimento rotacional – 4ª fase – Novo cálculo de V_{tang} .

Não é objetivo deste capítulo entrar no mérito da solução hipotética apresentada, mas sim mostrar os recursos de uma planilha integrada, onde a alteração de qualquer dos valores da base de dados geral da Tabela 6.1, implica no recálculo automático de toda a planilha. Isto garante uma flexibilidade muito grande para eventuais mudanças de projeto.

Existem alguns vínculos entre as variáveis do projeto, devidamente previstos pela planilha, que se entende oportuno destacar:



- O valor da velocidade V_Y no primeiro passo da fase de inserção (fase 2), que é calculado em função da velocidade V_{tang} e do ângulo de inserção δ , vai ser imposto para a etapa de velocidade constante da fase 1;
- O valor da velocidade V_Y no último passo da fase de inserção, também calculado em função da velocidade V_{tang} e do ângulo de inserção δ , vai ser imposto para a fase 3 completa;
- O valor da velocidade V_{tang} na 3ª fase vai ser calculado em função de V_Y nesta fase, considerando a área A da seção transversal do alimento a ser recolhido;
- O valor máximo da velocidade V_{tang} , que é o valor estabelecido para a etapa de velocidade constante da fase 1, vai determinar o valor desta velocidade no primeiro passo da fase 2, que é o início de uma rampa de desaceleração. O valor máximo de rotação N_R está na base de dados, e portanto, pode-se alterar completamente a fase 1 e a fase 2 em função desta variável;
- O valor máximo da velocidade V_{tang} também é alcançado no passo 10 da 4ª fase. Portanto a variação do valor máximo de rotação N_R , que está na base de dados, vai afetar a fase 4;
- Em resumo, existe um grande número de variáveis dependentes uma das outras, e a planilha de cálculo geral desenvolvida permite alterar essas variáveis com o recálculo automático das variáveis dependentes.

Capítulo 7

Observações Finais e Conclusões

No Capítulo 3 fez-se um estudo detalhado da cinemática dos movimentos com apresentação de gráficos para avaliação da suavidade e coordenação dos movimentos envolvidos, cálculos dos tempos para os deslocamentos, perfis de velocidade, etc. Os resultados foram interpretados, no referido capítulo, como satisfatórios, contudo esta interpretação contém aspectos que poderiam ser questionados, com a alegação de serem subjetivos. Em função disso, procurou-se mostrar no Capítulo 6 a flexibilidade para mudanças proporcionada pela ferramenta de cálculo desenvolvida, apresentando o resultado para outro ângulo de inserção da colher no alimento, e quantidade de alimento coletado menor, mas valores de velocidades, de acelerações e de tempos também podem ser alterados com facilidade. Isto além de garantir, na prática, condições de operar dentro de um largo leque de possibilidades, viabiliza a radical customização do projeto em função das exigências do usuário.

Fez-se também no Capítulo 3, o dimensionamento dos motores e dos componentes mecânicos empregados, mostrando-se a capacidade dos mesmos em suportar os esforços estáticos e dinâmicos a que são submetidos, e de suprir os valores de torque exigidos.

O formato da colher apresentado no Capítulo 3 é uma referência. Eventualmente a ponta poderia ser arredondada para reter alimentos menos aderentes (ex.: ervilhas). Portanto a sugestão deste projeto é que o suporte girante da colher (montado no eixo da polia) tenha um furo, de preferência oblongo para permitir ajustes, onde seriam fixados diferentes tipos de colher, dependendo do tipo de alimento. O próprio processo de inserção e coleta do alimento pode ser aprimorado com base na escolha do formato da colher.

Enfatiza-se ainda que as declividades das rampas de aceleração e desaceleração são dadas automaticamente pelo algoritmo utilizado, em função do número de passos (degraus) da rampa. Os números de passos escolhidos para as rampas, 20 ou 40 passos (colher vazia ou cheia), baseiam-se na literatura consultada [8] e [9]. Na pouco provável hipótese da necessidade prática de rampas mais suaves, além da solução de aumentar o número de degraus da rampa, poder-se-ia avaliar a possibilidade de se utilizar mais de



um passo por degrau, alterando-se com isso o perfil da curva. Sofisticações, como por exemplo, acionamentos com micropassos, parecem realmente não serem necessárias.

É oportuno registrar-se aqui o histórico da escolha dos valores de velocidade envolvidos, para que se possa ter noção da origem dos mesmos e avaliar a coerência:

- Inicialmente definiu-se a máxima velocidade do giro da colher em 15r.p.m., uma escolha subjetiva contudo baseada em observações da vida prática;
- Com essa escolha, no processo de inserção (2ª fase), a velocidade V_Y fica em torno de 0,09m/s, tanto na entrada quanto na saída desta fase, e este valor foi adotado para as fases 1 e 3 (velocidade constante), obtendo-se perfeita transição entre fases. Para as demais fases de velocidade constante das translações X e Y, optou-se por um valor muito próximo deste (0,1m/s), e que proporcionou o tempo total máximo do movimento em torno de 10s, que não pode ser considerado muito curto, já que com os recursos do ser humano consegue-se realizar o ciclo completo em menos tempo.
- A definição da velocidade de rotação no carregamento e subida (3ª e 4ª fases) é consequência dessas decisões.

Entende-se que a codificação do programa, construção do protótipo, testes, adequações, avaliação de desempenho, solução de problemas de implementação, etc poderiam representar um novo trabalho, talvez até adaptado a um usuário específico.

Capítulo 8

Referências Bibliográficas

- [1] Chael, P.; Lin, J.; Ramsundar, D. **Cooper Union's Gateway Homepage**. Página da Internet no endereço www.cooper.edu, 1996, acessado em 01/2004.
- [2] Kumar, V.; Rahman, T.; Krovi, V. **Assistive Devices for People with Motor Disabilities**. Artigo disponível na Internet no endereço www.cim.mcgill.ca/~venkat/PUBLICATIONS/wiley.pdf, 1997, acessado em 01/2004.
- [3] Krovi, V. **Virtual Prototyping of Rehabilitation Aids e the Upgrade Demo Page**. Artigos disponíveis na Internet no endereço www.cis.upenn.edu, 1999, acessado em 01/2004.
- [4] Rice, D.A.; Anderson R.C. **NSF 89 Book, Chapter 10 – Tulane University – School of Engineering – Department of Biomedical Engineering**. Artigo disponível na Internet no endereço nsf-pad.bme.uconn.edu/1989/chapter_10.pdf, 1989, acessado em 01/2004.
- [5] Skarski, B. **Síntese Cinemática dos Mecanismos**. Publicação CT – Nº 8, Unicamp, 1980
- [6] Takahashi, Y.; Hasegawa, H.; Ishikawa, S.; Ogawa, S. **Robotic Food Feeder**. IEEE International Conference on Control Applications SICE 1999 July 28-30, Morioka 113C-2
- [7] Bird, V.T.; Parker, J. K. **Design of a Robotic Feeder**. System Theory, 1993 IEEE. Proceedings SSST'93, Twenty-Fifth Southeastern Symposium on, 1993 Page(s): 363-367

- [8] Kenjo, T.; Sugawara, A. **Stepping Motors and Their Microprocessors Controls**. Oxford University Press. 1994.
- [9] Acarnley, P.P. **Stepping Motors: a Guide to Modern Theory and Practice**. Peter Peregrinus Ltd. 1992.
- [10] Harries, I. **Documents & Information – Stepper Motors** – Imperial College, London, UK – Department of Computing. Disponível na Internet no endereço www.doc.ic.ac.uk/~ih/doc/stepper/, 1997, acessado em 10/2003.
- [11] Jones, D. W. **Control of Stepping Motors A Tutorial** – The University of Iowa – Department of Computer Science. Disponível na Internet no endereço www.cs.uiowa.edu/~jones/step/, 1998, acessado em 10/2003.
- [12] Salant, M.A. **Introdução a Robótica**. São Paulo. McGraw-Hill e Makron Books, 1991
- [13] Literatura comercial da **Thomson Industries, Inc.** – Library CD-ROM Release Notes Version 1.0
- [14] Literatura comercial da **Applied Motion Products** – CD14 – Si Prog 1.97.2, eXpo 1.4, Hub Programmer 1.23.3, SCL 1.30, Quick Tuner 1.8.1
- [15] Tyni, P.; Parkkinen, R. **A 3-DOF Stepping Motor Robot Controlled by a Microcontroller**. Industrial Electronics, 1993. Conference Proceedings, ISIE'93 Budapest, IEEE International, 1993 Page(s): 689-694
- [16] Mital, D.P.; Chai, C.T.; Myint, T. **A Precision Stepper Motor Controller for Robotic Applications**. Industry Applications Society Annual Meeting, 1989, Conference Record of the 1989 IEEE, Page(s): 686-691 vol.1
- [17] Literatura comercial da **Motorola Semicondutores** – Technical Databook MC68HC908GT/D Rev. 1, 05/2002

- [18] Emerald, P.R.; Sasaki, M.; Takahashi, H.; **Unified, Multi-mode Step Motor Control IC and Power Multi-chip Module Exploit Versatile, Constant Torque PWM Operation and Microstepping.** Power Electronics and Drive Systems, 1997. Proceedings, 1997 International Conference on, 26-29 May 1997, Volume: 1, Pages: 436-445
- [19] Literatura comercial da **Sanken Electric Co., Ltd.** – Bulletin N° I02 EB0 (Jul, 2000). Disponível na Internet no endereço www.allegromicro.com, acessado em 03/2004.
- [20] Yourdon, E. **Análise Estruturada Moderna.** Editora Campus, Tradução da 3ª Edição Americana, 1990



Figura 1.1 - (Tomo 1/2) - Inserção da colina no alívio

Apêndice I

Alternativas estudadas

Durante o desenvolvimento do projeto apareceram soluções que, embora interessantes, mostraram-se menos eficazes do que aquelas que foram adotadas.

Dentre as várias soluções descartadas, entende-se oportuno discorrer sobre uma alternativa, com composição diferente de movimentos, menos natural e com deslocamentos mais abruptos, mas aparentemente factível.

Nesta alternativa, a mesa XY seria construída de forma idêntica, com os mesmos movimentos, mas operaria do seguinte modo:

- O movimento de rotação ocorreria no sentido horário, visto pelo lado esquerdo do usuário, a partir da posição horizontal da colher, percorrendo uma trajetória total de 90° , sendo 54° até incidir no alimento e 36° dentro do alimento;
- O movimento de translação no eixo Y seria mais crítico, pois na fase de inserção teria que ser anulada a componente do movimento de rotação V_{tangy} , que tem o sentido de afastamento do usuário, e criada uma componente resultante V_{RY} , com sentido de aproximação do usuário, que se comporia com V_{tangz} e proporcionaria a inserção linear, conforme já concebido na dissertação. Sendo θ o ângulo da colher com a vertical, variando de 36° a 0° na inserção, ter-se-ia em módulo: $V_{tangy} = V_{tang} \cdot \cos\theta$, $V_{tangz} = V_{tang} \cdot \sin\theta$, e portanto, $V_Y = V_{tang} \cdot \cos\theta + V_{tang} \cdot \sin\theta$, V_Y com sentido de aproximação em relação ao usuário. A Figura I.1 ilustra essa situação;

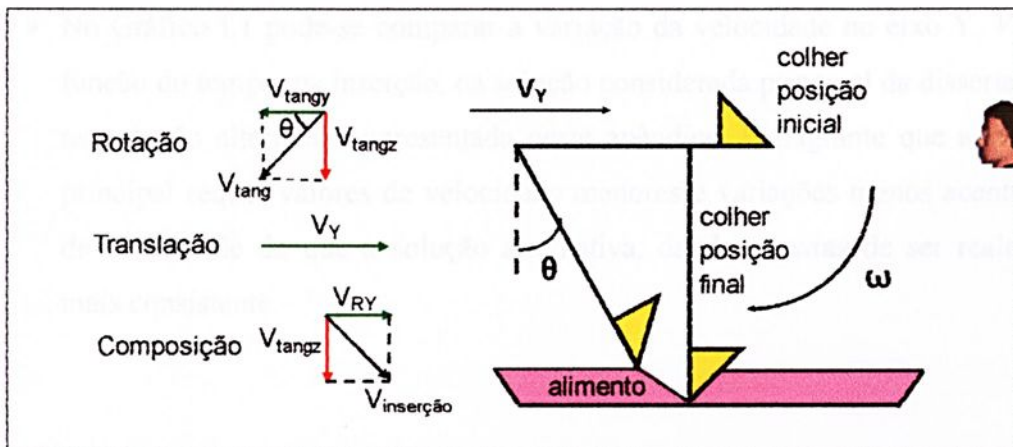


Figura I.1 – Plano Y-Z – Inserção da colher no alimento.

- As fases de carregamento, subida, e aproximação da colher carregada poderiam ser semelhantes as da dissertação;
- A 1ª fase, ou seja, deslocamento da colher vazia até o ponto de inserção, teria que ser diferente da proposta principal, pois como agora a trajetória do movimento de rotação é curta (54°), se mantidos os mesmo níveis de velocidade máxima originalmente praticados nesta fase, os movimentos X e Y teriam que se iniciar primeiro. Haveria ainda um complicador, pois a velocidade V_Y , na 2ª fase, teria sentido contrário à da 1ª fase, então, para minimizar o impacto seria recomendável chegar-se no ponto de inserção pelo menos com $V_Y = 0$ (final de uma rampa de desaceleração);
- Nas planilhas de cálculo I.1, I.2 e I.3 são calculadas, respectivamente, a velocidade tangencial na rotação, V_{tang} , a velocidade de translação no eixo Y, V_Y , e a velocidade na composição de movimentos na direção Y, V_{RY} , em função do tempo. Como se pode constatar pela Planilha de Cálculo I.2, ilustrada pelo Gráfico I.1, a velocidade de translação no eixo Y, V_Y , atinge um valor relativamente alto no início desta fase, 0,5162m/s, e conseqüentemente uma taxa de passos elevada, 10.324p.p.s. (51,62r.p.s ou 3097,2r.p.m.). O motor escolhido para a dissertação não atenderia, e seria necessário especificar outro motor com o cuidado de verificar se esse ponto crítico está dentro da região *pull-in*, pois se parte da velocidade zero. Talvez fosse o caso da colher ser deslocada na 1ª fase para uma coordenada Y posterior, e voltar acelerando, para uma transição mais suave com a fase de inserção. Neste caso, teria que ser avaliado o curso total da mesa, no movimento Y, quando o ponto de inserção fosse o mais distante;
- No Gráfico I.1 pode-se comparar a variação da velocidade no eixo Y, V_Y , em função do tempo, na inserção, na solução considerada principal da dissertação e na solução alternativa apresentada neste apêndice. É flagrante que a solução principal requer valores de velocidade menores e variações menos acentuadas de velocidade do que a solução alternativa, dando mostras de ser realmente mais consistente.

PLANILHA 6.1 - MOVIMENTO DE ROTAÇÃO - INSERÇÃO DA COLHER - ALTERNATIVA

m	$\theta_l(^{\circ})$	$\theta_r(^{\circ})$	$\Delta t_m(s)$	$t_m(s)$ cada 4 passos	$f_m(pps)$	$V_{tang}(m/s)$	N_{clock}
1	36,0	34,2	0,005061	0,000000	197,6	0,3705	40.488
2	34,2	32,4	0,005191	0,020244	192,6	0,3612	41.528
3	32,4	30,6	0,005331	0,041008	187,6	0,3517	42.648
4	30,6	28,8	0,005482	0,062332	182,4	0,3420	43.856
5	28,8	27,0	0,005648	0,084260	177,1	0,3320	45.184
6	27,0	25,2	0,005829	0,106852	171,6	0,3217	46.632
7	25,2	23,4	0,006029	0,130168	165,9	0,3110	48.232
8	23,4	21,6	0,006251	0,154284	160,0	0,3000	50.008
9	21,6	19,8	0,006500	0,179288	153,8	0,2885	52.000
10	19,8	18,0	0,006781	0,205288	147,5	0,2765	54.248
11	18,0	16,2	0,007102	0,232412	140,8	0,2640	56.816
12	16,2	14,4	0,007473	0,260820	133,8	0,2509	59.784
13	14,4	12,6	0,007909	0,290712	126,4	0,2371	63.272
14	12,6	10,8	0,008432	0,322348	118,6	0,2224	67.456
15	10,8	9,0	0,009076	0,356076	110,2	0,2066	72.608
16	9,0	7,2	0,009893	0,392380	101,1	0,1895	79.144
17	7,2	5,4	0,010982	0,431952	91,1	0,1707	87.856
18	5,4	3,6	0,012536	0,475880	79,8	0,1496	100.288
19	3,6	1,8	0,015028	0,526024	66,5	0,1248	120.224
20	1,8	0,0	0,020135	0,586136	49,7	0,0931	161.080

Tempo total movimento = 0,666676

DADOS	
Passo($^{\circ}$)	1,8
$R(m)$	0,24
$f_{clock}(MHz)$	8
$f_s(pps)$	40
$g_s(pps)$	200
M	21
n	4

CÁLCULO AUXILIAR	
$\beta(pps/s^2)$	-960
Passo(m)	0,0075
$t_{clock}(ns)$	125

Planilha de Cálculo I.1 – Movimento de Rotação – Inserção da Colher – Alternativa.

PLANILHA 6.2 - MOVIMENTO Y - INSERÇÃO DA COLHER - ALTERNATIVA

m	$\theta_m(^{\circ})$	$V_{tang}(m/s)$ (rotação)	V_y (m/s)	$f_m(pps)$	$\Delta t_m(s)$	$4 \cdot \Delta t_m(s)$ (rotação)	n_{pas}	N_{clock}
1	35,1	0,3705	0,5162	10.324	0,000097	0,020244	209	194
2	33,3	0,3612	0,5002	10.004	0,000100	0,020764	208	200
3	31,5	0,3517	0,4836	9.672	0,000103	0,021324	207	206
4	29,7	0,3420	0,4665	9.330	0,000107	0,021928	205	214
5	27,9	0,3320	0,4488	8.976	0,000111	0,022592	204	221
6	26,1	0,3217	0,4304	8.608	0,000116	0,023316	201	232
7	24,3	0,3110	0,4114	8.228	0,000122	0,024116	198	244
8	22,5	0,3000	0,3920	7.840	0,000128	0,025004	195	256
9	20,7	0,2885	0,3719	7.438	0,000134	0,026000	194	268
10	18,9	0,2765	0,3512	7.024	0,000142	0,027124	191	284
11	17,1	0,2640	0,3300	6.600	0,000152	0,028408	187	304
12	15,3	0,2509	0,3082	6.164	0,000162	0,029892	185	323
13	13,5	0,2371	0,2859	5.718	0,000175	0,031636	181	350
14	11,7	0,2224	0,2629	5.258	0,000190	0,033728	178	379
15	9,9	0,2066	0,2390	4.780	0,000209	0,036304	174	417
16	8,1	0,1895	0,2143	4.286	0,000233	0,039572	170	466
17	6,3	0,1707	0,1884	3.768	0,000265	0,043928	166	529
18	4,5	0,1496	0,1609	3.218	0,000311	0,050144	161	623
19	2,7	0,1248	0,1305	2.610	0,000383	0,060112	157	766
20	0,9	0,0931	0,0946	1.892	0,000529	0,080540	152	1.060

DADOS	
Passo($^{\circ}$)	1,8
$P_{rosca}(m)$	0,01
$f_{clock}(MHz)$	8
Ataque($^{\circ}$)	45

CÁLCULO AUXILIAR	
Passo(m)	0,00005
K_1	1
$t_{clock}(ns)$	125

Planilha de Cálculo I.2 – Movimento no eixo Y – Inserção da colher – Alternativa.

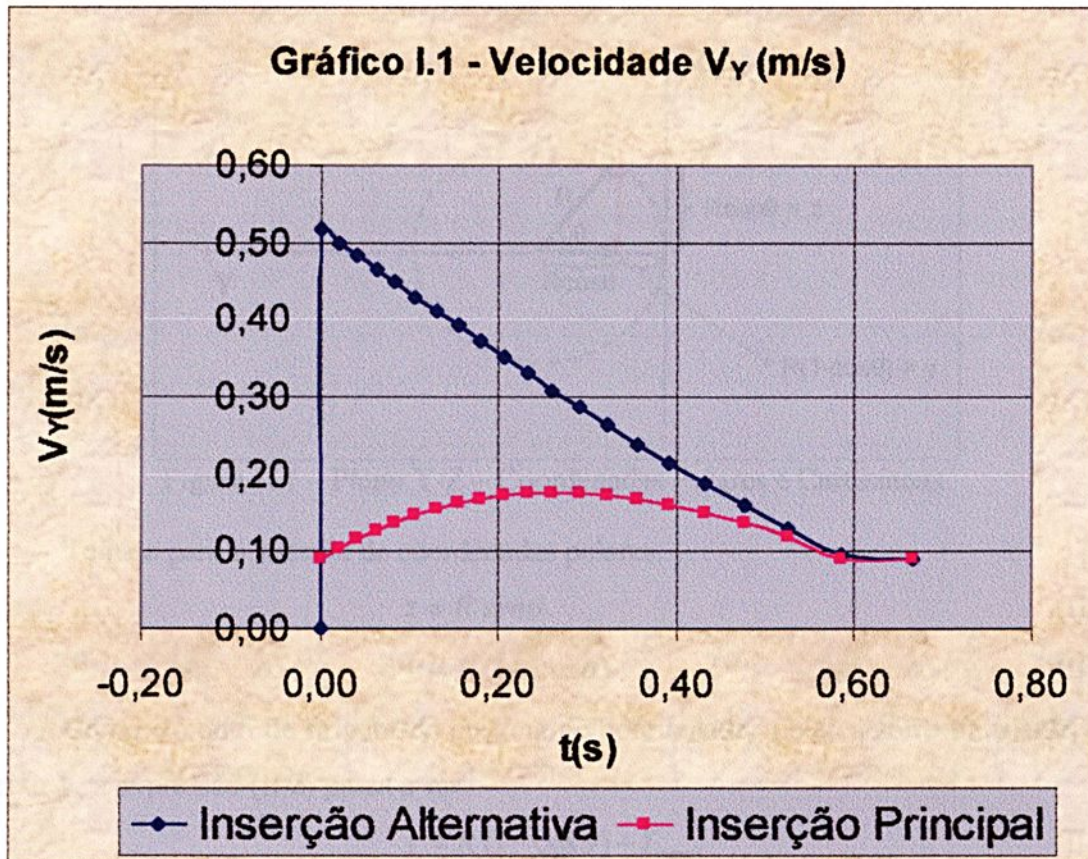
PLANILHA 6.3 - COMPOSIÇÃO - INSERÇÃO - ALTERNATIVA

m	$\theta_m(^{\circ})$	V_{tang} (m/s) (rotação)	V_{RY} (m/s)	V_{ataque} (m/s)
1	35,1	0,3705	0,2130	0,3010
2	33,3	0,3612	0,1980	0,2800
3	31,5	0,3517	0,1840	0,2600
4	29,7	0,3420	0,1690	0,2400
5	27,9	0,3320	0,1550	0,2200
6	26,1	0,3217	0,1420	0,2000
7	24,3	0,3110	0,1280	0,1810
8	22,5	0,3000	0,1150	0,1620
9	20,7	0,2885	0,1020	0,1440
10	18,9	0,2765	0,0900	0,1270
11	17,1	0,2640	0,0780	0,1100
12	15,3	0,2509	0,0660	0,0940
13	13,5	0,2371	0,0550	0,0780
14	11,7	0,2224	0,0450	0,0640
15	9,9	0,2066	0,0360	0,0500
16	8,1	0,1895	0,0270	0,0380
17	6,3	0,1707	0,0190	0,0260
18	4,5	0,1496	0,0120	0,0170
19	2,7	0,1248	0,0060	0,0080
20	0,9	0,0931	0,0010	0,0020

DADOS	
Ataque($^{\circ}$)	45

CÁLCULO AUXILIAR	
K_1	1

Planilha de Cálculo I.3 – Composição de Movimentos – Inserção – Alternativa.

Gráfico I.1 – Movimento no eixo Y – Inserção da colher – Soluções principal e alternativa – $V_Y \times t$.

Apêndice II

Simulação dos movimentos

Conforme explanado no Capítulo 3, os movimentos de rotação da colher e translação no eixo Y são conceitualmente os mais importantes, pois através deles é construída a adequada trajetória para o recolhimento do alimento. O movimento no eixo X é apenas para posicionamento e retorno, sendo independente dos demais movimentos.

Assim, o ciclo completo do movimento, em sua parte mais significativa, acontece no plano YZ. Para equacionar o movimento rotacional defini-se então, o sistema de coordenadas polares (r, θ) , cujo ponto de origem é o centro do eixo de rotação da colher. Inicialmente, este ponto de origem está a uma distância R do ponto de origem do sistema de coordenadas (Y, Z) , sendo R o comprimento da colher. O ponto de origem do sistema de coordenadas (Y, Z) é o ponto inicial/final do ciclo completo do movimento, onde a colher está acessível ao usuário. A figura II.1 ilustra os sistemas de coordenadas envolvidos.

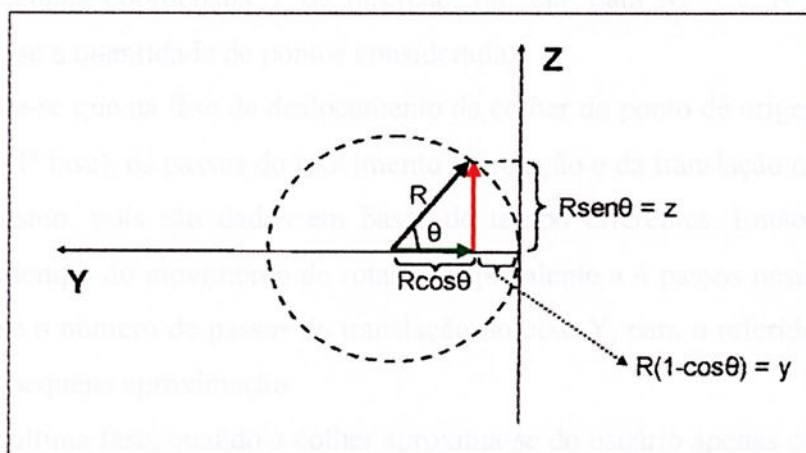


Figura II.1 – Plano Y-Z – Coordenadas Polares e Cartesianas.

Tem-se para o sistema de coordenadas polares:

$$z = R \operatorname{sen} \theta \quad (\text{II.1})$$

$$y = R (1 - \cos \theta) \quad (\text{II.2})$$

Como o ponto de origem do sistema de coordenadas polares sofre translação no eixo Y, a expressão (II.2) passa a ser:

$$y = R (1 - \cos \theta) + Y_{\text{transl}} \quad (\text{II.3})$$

Y_{transl} representa o quanto o ponto de origem do sistema de coordenadas polares está deslocado em relação à sua posição inicial, em um determinado instante, e é obtido pelo cômputo dos passos do movimento de translação no eixo Y, levando-se em consideração o sentido dos passos.

Nas relações II.1 e II.3, R é constante e igual a 240mm, θ é função do tempo e varia de 0° a 360° , tomando-se intervalos de $1,8^\circ$, e Y_{transl} também é função do tempo, variando de 0 a um valor máximo em mm, que vai depender do ponto de inserção escolhido.

Os pontos (y,z) definem a posição da ponta da colher ao longo do tempo. Os pontos $(Y_{transl} + R, 0)$ definem a posição da ponta do cabo da colher (centro do eixo de rotação) ao longo do tempo. A ponta do cabo da colher e a ponta da colher estão sendo designadas como ponto A e ponto B respectivamente, para facilidade de referência.

Vai interessar neste apêndice plotar os pontos A e B, em função do tempo, no sistema de coordenadas (Y,Z) , e com isso ter noção do movimento da colher.

Para isso construíram-se as tabelas II.1, II.2, II.3, II.4 e II.5 estabelecendo os pontos A e B nos instantes de tempo mais significativos, e considerou-se a inserção da colher na segunda coordenada Y de inserção, ou seja, para $N_Y = 1$. A divisão em 5 tabelas deve-se a quantidade de pontos considerada.

Ressalta-se que na fase de deslocamento da colher do ponto de origem até o ponto de inserção (1ª fase), os passos do movimento de rotação e da translação no eixo Y, não tem sincronismo, pois são dados em bases de tempo diferentes. Então se adotou o intervalo de tempo do movimento de rotação, equivalente a 4 passos neste movimento, calculando-se o número de passos da translação no eixo Y, para o referido intervalo de tempo, com pequena aproximação.

Para a última fase, quando a colher aproxima-se do usuário apenas com translação no eixo Y, escolheram-se intervalos com número conveniente de passos, a saber, 40 passos em aceleração, 10 x 545 passos em velocidade constante, 40 passos em desaceleração.

No Gráfico II.1 é apresentada a curva teórica da ponta da colher deslocando-se no plano YZ, perfazendo um ciclo completo, desde a partida do sistema até a volta da colher carregada ao ponto de alimentação, com inserção no 2ª coordenada referida ao eixo Y, ou seja, com $N_Y = 1$.

Tabela II.1 – Pontos A e B em função do tempo.

Tempo (s)	θ ($^{\circ}$)	Ponto B		Ponto A		Y_{transl} (mm)
		y(mm)	z(mm)	$Y_{transl} + R$ (mm)	z_A (mm)	
0,000	0	0,00	0,00	240,00	0	0
0,179	1,8	0,12	7,54	240,00	0	0
0,253	3,6	0,47	15,07	240,00	0	0
0,310	5,4	1,07	22,59	240,00	0	0
0,358	7,2	1,89	30,08	240,00	0	0
0,400	9,0	2,95	37,54	240,00	0	0
0,438	10,8	4,25	44,97	240,00	0	0
0,473	12,6	5,78	52,35	240,00	0	0
0,506	14,4	7,54	59,69	240,00	0	0
0,537	16,2	9,53	66,96	240,00	0	0
0,566	18,0	11,75	74,16	240,00	0	0
0,593	19,8	14,19	81,30	240,00	0	0
0,620	21,6	16,85	88,35	240,00	0	0
0,645	23,4	19,74	95,32	240,00	0	0
0,669	25,2	22,84	102,19	240,00	0	0
0,693	27,0	26,16	108,96	240,00	0	0
0,716	28,8	29,69	115,62	240,00	0	0
0,738	30,6	33,42	122,17	240,00	0	0
0,759	32,4	37,36	128,60	240,00	0	0
0,780	34,2	41,50	134,90	240,00	0	0
0,800	36,0	45,84	141,07	240,00	0	0
0,820	37,8	50,36	147,10	240,00	0	0
0,840	39,6	55,08	152,98	240,00	0	0
0,860	41,4	59,97	158,71	240,00	0	0
0,880	43,2	65,05	164,29	240,00	0	0
0,900	45,0	70,29	169,71	240,00	0	0
0,920	46,8	75,71	174,95	240,00	0	0
0,940	48,6	81,29	180,03	240,00	0	0
0,960	50,4	87,02	184,92	240,00	0	0
0,980	52,2	92,90	189,64	240,00	0	0
1,000	54,0	98,93	194,16	240,00	0	0
1,020	55,8	105,10	198,50	240,00	0	0
1,040	57,6	111,40	202,64	240,00	0	0
1,060	59,4	117,83	206,58	240,00	0	0
1,080	61,2	124,38	210,31	240,00	0	0
1,100	63,0	131,04	213,84	240,00	0	0
1,120	64,8	137,81	217,16	240,00	0	0
1,140	66,6	144,68	220,26	240,00	0	0
1,160	68,4	151,65	223,15	240,00	0	0
1,180	70,2	158,70	225,81	240,00	0	0
1,200	72,0	165,84	228,25	240,00	0	0
1,220	73,8	173,04	230,47	240,00	0	0



Tabela II.2 – Pontos A e B em função do tempo.

Tempo (s)	θ ($^{\circ}$)	Ponto B		Ponto A		Y_{transl} (mm)
		y(mm)	z(mm)	$Y_{transl}+R$ (mm)	z_A (mm)	
1,240	75,6	180,31	232,46	240,00	0	0
1,260	77,4	187,65	234,22	240,00	0	0
1,280	79,2	195,03	235,75	240,00	0	0
1,300	81,0	202,46	237,05	240,00	0	0
1,320	82,8	209,92	238,11	240,00	0	0
1,340	84,6	217,41	238,93	240,00	0	0
1,360	86,4	224,93	239,53	240,00	0	0
1,380	88,2	232,46	239,88	240,00	0	0
1,400	90,0	240,00	240,00	240,00	0	0
1,420	91,8	247,54	239,88	240,00	0	0
1,440	93,6	255,07	239,53	240,00	0	0
1,460	95,4	262,59	238,93	240,00	0	0
1,480	97,2	270,08	238,11	240,00	0	0
1,500	99,0	277,54	237,05	240,00	0	0
1,520	100,8	284,97	235,75	240,00	0	0
1,540	102,6	292,35	234,22	240,00	0	0
1,560	104,4	299,69	232,46	240,00	0	0
1,580	106,2	306,96	230,47	240,00	0	0
1,600	108,0	314,16	228,25	240,00	0	0
1,620	109,8	321,30	225,81	240,00	0	0
1,640	111,6	328,35	223,15	240,00	0	0
1,660	113,4	335,32	220,26	240,00	0	0
1,680	115,2	342,19	217,16	240,00	0	0
1,700	117,0	348,96	213,84	240,00	0	0
1,720	118,8	355,62	210,31	240,00	0	0
1,740	120,6	362,17	206,58	240,00	0	0
1,760	122,4	368,60	202,64	240,00	0	0
1,780	124,2	374,90	198,50	240,00	0	0
1,800	126,0	381,07	194,16	240,00	0	0
1,820	127,8	387,10	189,64	240,00	0	0
1,840	129,6	392,98	184,92	240,00	0	0
1,860	131,4	398,71	180,03	240,00	0	0
1,880	133,2	404,29	174,95	240,00	0	0
1,900	135,0	409,71	169,71	240,00	0	0
1,920	136,8	414,95	164,29	240,00	0	0
1,940	138,6	420,03	158,71	240,00	0	0
1,960	140,4	424,92	152,98	240,00	0	0
1,980	142,2	429,64	147,10	240,00	0	0
2,000	144,0	434,16	141,07	240,00	0	0
2,020	145,8	438,50	134,90	240,00	0	0
2,040	147,6	442,64	128,60	240,00	0	0
2,060	149,4	446,58	122,17	240,00	0	0



Tabela II.3 – Pontos A e B em função do tempo.

Tempo (s)	θ ($^{\circ}$)	Ponto B		Ponto A		Y_{transl} (mm)
		y(mm)	z(mm)	$Y_{transl} + R$ (mm)	z_A (mm)	
2,080	151,2	450,31	115,62	240,00	0	0
2,100	153,0	453,84	108,96	240,00	0	0
2,120	154,8	457,16	102,19	240,00	0	0
2,140	156,6	460,26	95,32	240,00	0	0
2,160	158,4	463,15	88,35	240,00	0	0
2,180	160,2	465,81	81,30	240,00	0	0
2,200	162,0	468,25	74,16	240,00	0	0
2,220	163,8	470,47	66,96	240,00	0	0
2,240	165,6	472,46	59,69	240,00	0	0
2,260	167,4	474,22	52,35	240,00	0	0
2,280	169,2	475,75	44,97	240,00	0	0
2,300	171,0	477,05	37,54	240,00	0	0
2,320	172,8	478,11	30,08	240,00	0	0
2,340	174,6	478,93	22,59	240,00	0	0,00
2,360	176,4	481,33	15,07	241,80	0	1,80
2,380	178,2	483,48	7,54	243,60	0	3,60
2,400	180,0	485,40	0,00	245,40	0	5,40
2,420	181,8	487,08	-7,54	247,20	0	7,20
2,440	183,6	488,53	-15,07	249,00	0	9,00
2,460	185,4	489,73	-22,59	250,80	0	10,80
2,480	187,2	490,71	-30,08	252,60	0	12,60
2,500	189,0	491,45	-37,54	254,40	0	14,40
2,520	190,8	491,95	-44,97	256,20	0	16,20
2,540	192,6	492,22	-52,35	258,00	0	18,00
2,560	194,4	492,26	-59,69	259,80	0	19,80
2,580	196,2	492,07	-66,96	261,60	0	21,60
2,600	198,0	491,65	-74,16	263,40	0	23,40
2,620	199,8	491,01	-81,30	265,20	0	25,20
2,640	201,6	490,15	-88,35	267,00	0	27,00
2,660	203,4	489,06	-95,32	268,80	0	28,80
2,680	205,2	487,76	-102,19	270,60	0	30,60
2,700	207,0	486,24	-108,96	272,40	0	32,40
2,720	208,8	484,51	-115,62	274,20	0	34,20
2,740	210,6	482,58	-122,17	276,00	0	36,00
2,760	212,4	480,44	-128,60	277,80	0	37,80
2,780	214,2	478,10	-134,90	279,60	0	39,60
2,800	216,0	475,56	-141,07	281,40	0	41,40
2,820	217,8	472,84	-147,10	283,20	0	43,20
2,840	219,6	469,92	-152,98	285,00	0	45,00
2,860	221,4	466,83	-158,71	286,80	0	46,80
2,880	223,2	463,55	-164,29	288,60	0	48,60
2,900	225,0	460,11	-169,71	290,40	0	50,40



Tabela II.4 – Pontos A e B em função do tempo.

Tempo (s)	θ (°)	Ponto B		Ponto A		Y_{transf} (mm)
		y(mm)	z(mm)	$Y_{transf} + R$ (mm)	z_A (mm)	
2,920	226,8	456,49	-174,95	292,20	0	52,20
2,940	228,6	452,71	-180,03	294,00	0	54,00
2,960	230,4	448,78	-184,92	295,80	0	55,80
2,980	232,2	444,70	-189,64	297,60	0	57,60
3,000	234,0	440,47	-194,16	299,40	0	59,40
3,020	235,8	436,15	-198,50	301,25	0	61,25
3,041	237,6	432,00	-202,64	303,40	0	63,40
3,062	239,4	428,07	-206,58	305,90	0	65,90
3,084	241,2	424,32	-210,31	308,70	0	68,70
3,107	243,0	420,81	-213,84	311,85	0	71,85
3,130	244,8	417,49	-217,16	315,30	0	75,30
3,154	246,6	414,37	-220,26	319,05	0	79,05
3,179	248,4	411,50	-223,15	323,15	0	83,15
3,205	250,2	408,85	-225,81	327,55	0	87,55
3,232	252,0	406,41	-228,25	332,25	0	92,25
3,261	253,8	404,21	-230,47	337,25	0	97,25
3,291	255,6	402,24	-232,46	342,55	0	102,55
3,322	257,4	400,45	-234,22	348,10	0	108,10
3,356	259,2	398,92	-235,75	353,95	0	113,95
3,392	261,0	397,64	-237,05	360,10	0	120,10
3,432	262,8	396,58	-238,11	366,50	0	126,50
3,476	264,6	395,74	-238,93	373,15	0	133,15
3,526	266,4	395,17	-239,53	380,10	0	140,10
3,586	268,2	394,79	-239,88	387,25	0	147,25
3,667	270,0	394,65	-240,00	394,65	0	154,65
3,714	271,8	391,46	-239,88	399,00	0	159,00
3,761	273,6	388,23	-239,53	403,30	0	163,30
3,808	275,4	385,01	-238,93	407,60	0	167,60
3,854	277,2	381,82	-238,11	411,90	0	171,90
3,900	279,0	378,61	-237,05	416,15	0	176,15
3,946	280,8	375,38	-235,75	420,35	0	180,35
3,991	282,6	372,15	-234,22	424,50	0	184,50
4,036	284,4	368,91	-232,46	428,60	0	188,60
4,080	286,2	365,69	-230,47	432,65	0	192,65
4,124	288,0	362,49	-228,25	436,65	0	196,65
4,166	289,8	359,25	-225,81	440,55	0	200,55
4,208	291,6	356,05	-223,15	444,40	0	204,40
4,249	293,4	352,83	-220,26	448,15	0	208,15
4,289	295,2	349,61	-217,16	451,80	0	211,80
4,327	297,0	346,39	-213,84	455,35	0	215,35
4,365	298,8	343,18	-210,31	458,80	0	218,80
4,401	300,6	339,98	-206,58	462,15	0	222,15



Tabela II.5 – Pontos A e B em função do tempo.

Tempo (s)	θ ($^{\circ}$)	Ponto B		Ponto A		Y_{transl} (mm)
		y(mm)	z(mm)	$Y_{transl} + R$ (mm)	z_A (mm)	
4,436	302,4	336,75	-202,64	465,35	0	225,35
4,469	304,2	333,55	-198,50	468,45	0	228,45
4,502	306,0	330,33	-194,16	471,40	0	231,40
4,533	307,8	327,10	-189,64	474,20	0	234,20
4,561	309,6	323,77	-184,92	476,75	0	236,75
4,588	311,4	320,39	-180,03	479,10	0	239,10
4,613	313,2	317,01	-174,95	481,30	0	241,30
4,637	315,0	313,64	-169,71	483,35	0	243,35
4,660	316,8	310,30	-164,29	485,25	0	245,25
4,682	318,6	307,02	-158,71	487,05	0	247,05
4,703	320,4	303,83	-152,98	488,75	0	248,75
4,724	322,2	300,71	-147,10	490,35	0	250,35
4,744	324,0	297,69	-141,07	491,85	0	251,85
4,764	325,8	294,85	-134,90	493,35	0	253,35
4,785	327,6	292,21	-128,60	494,85	0	254,85
4,806	329,4	289,77	-122,17	496,35	0	256,35
4,828	331,2	287,54	-115,62	497,85	0	257,85
4,851	333,0	285,51	-108,96	499,35	0	259,35
4,874	334,8	283,69	-102,19	500,85	0	260,85
4,898	336,6	282,09	-95,32	502,35	0	262,35
4,923	338,4	280,70	-88,35	503,85	0	263,85
4,949	340,2	279,49	-81,30	505,30	0	265,30
4,976	342,0	278,50	-74,16	506,75	0	266,75
5,005	343,8	277,73	-66,96	508,20	0	268,20
5,035	345,6	277,19	-59,69	509,65	0	269,65
5,066	347,4	276,88	-52,35	511,10	0	271,10
5,100	349,2	276,80	-44,97	512,55	0	272,55
5,136	351,0	276,70	-37,54	513,75	0	273,75
5,176	352,8	276,64	-30,08	514,75	0	274,75
5,220	354,6	276,57	-22,59	515,50	0	275,50
5,270	356,4	276,52	-15,07	516,05	0	276,05
5,330	358,2	276,52	-7,54	516,40	0	276,40
5,410	360,0	276,50	0,00	516,50	0	276,50
5,450	360,0	274,50	0,00	514,50	0	274,50
5,723	360,0	247,25	0,00	487,25	0	247,25
5,995	360,0	220,00	0,00	460,00	0	220,00
6,268	360,0	192,75	0,00	432,75	0	192,75
6,540	360,0	165,50	0,00	405,50	0	165,50
6,813	360,0	138,25	0,00	378,25	0	138,25
7,085	360,0	111,00	0,00	351,00	0	111,00
7,358	360,0	83,75	0,00	323,75	0	83,75
7,630	360,0	56,50	0,00	296,50	0	56,50
7,903	360,0	29,25	0,00	269,25	0	29,25
8,175	360,0	2,00	0,00	242,00	0	2,00
8,215	360,0	0,00	0,00	240,00	0	0,00



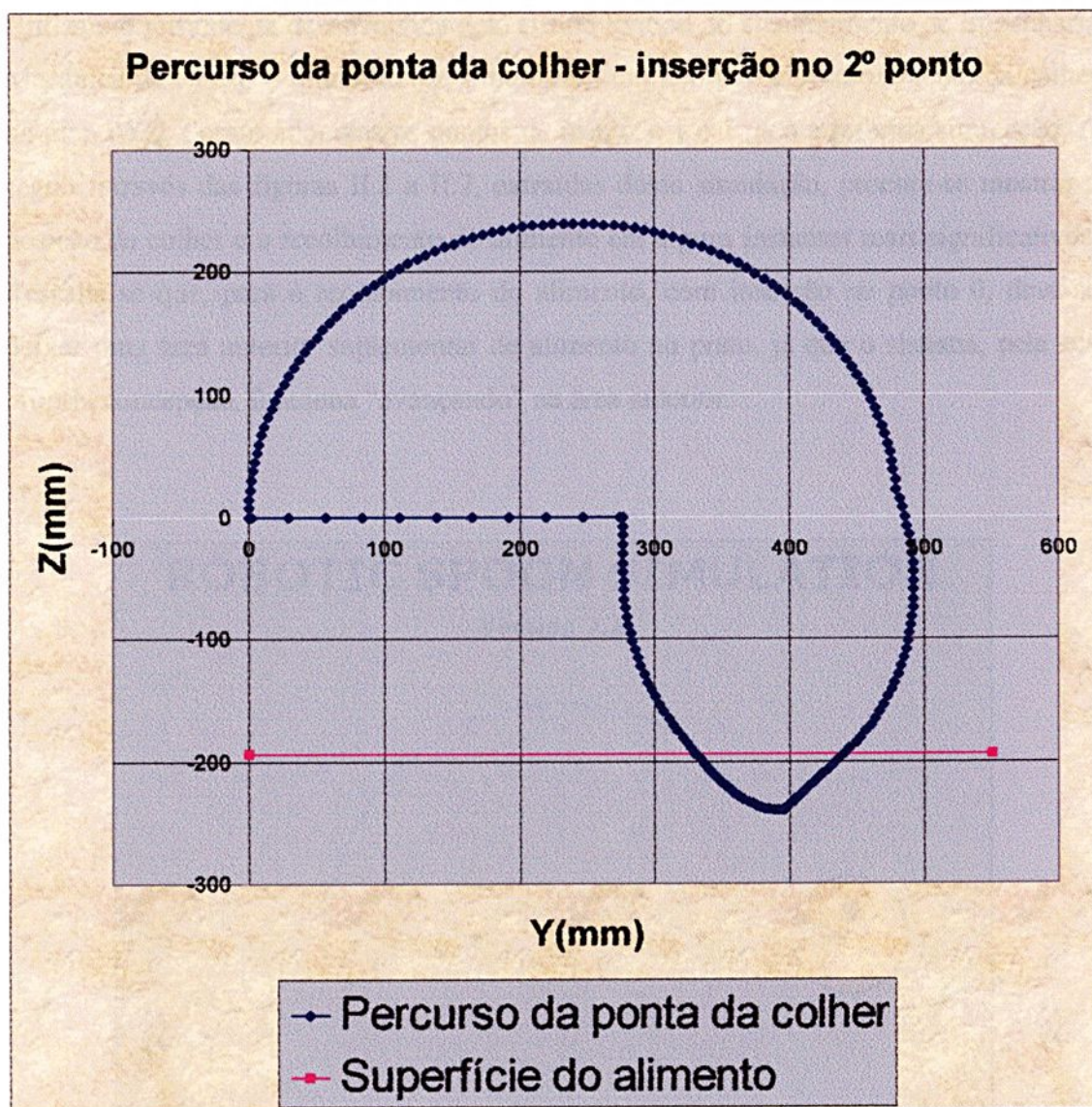


Gráfico II.1 – Percurso da ponta da colher, no plano YZ, visto pelo lado direito do usuário.

Utilizando ferramenta desenvolvida pelo Grupo Python do Departamento de Engenharia Mecânica da Unesp – Ilha Solteira, simulou-se, em tempo real, o movimento da colher no plano YZ. Foram adotados os pontos de inserção 1 e 3 para a referida simulação. A seguir, através das figuras II.2 a II.7, extraídas dessa simulação, procura-se mostrar a posição da colher e o recolhimento do alimento em alguns instantes mais significativos. Ressalta-se que, para o recolhimento do alimento, com inserção no ponto 0, deve-se deixar uma área anterior suplementar de alimento no prato, já que o sistema, pela sua própria concepção, funciona “avançando” na área anterior.

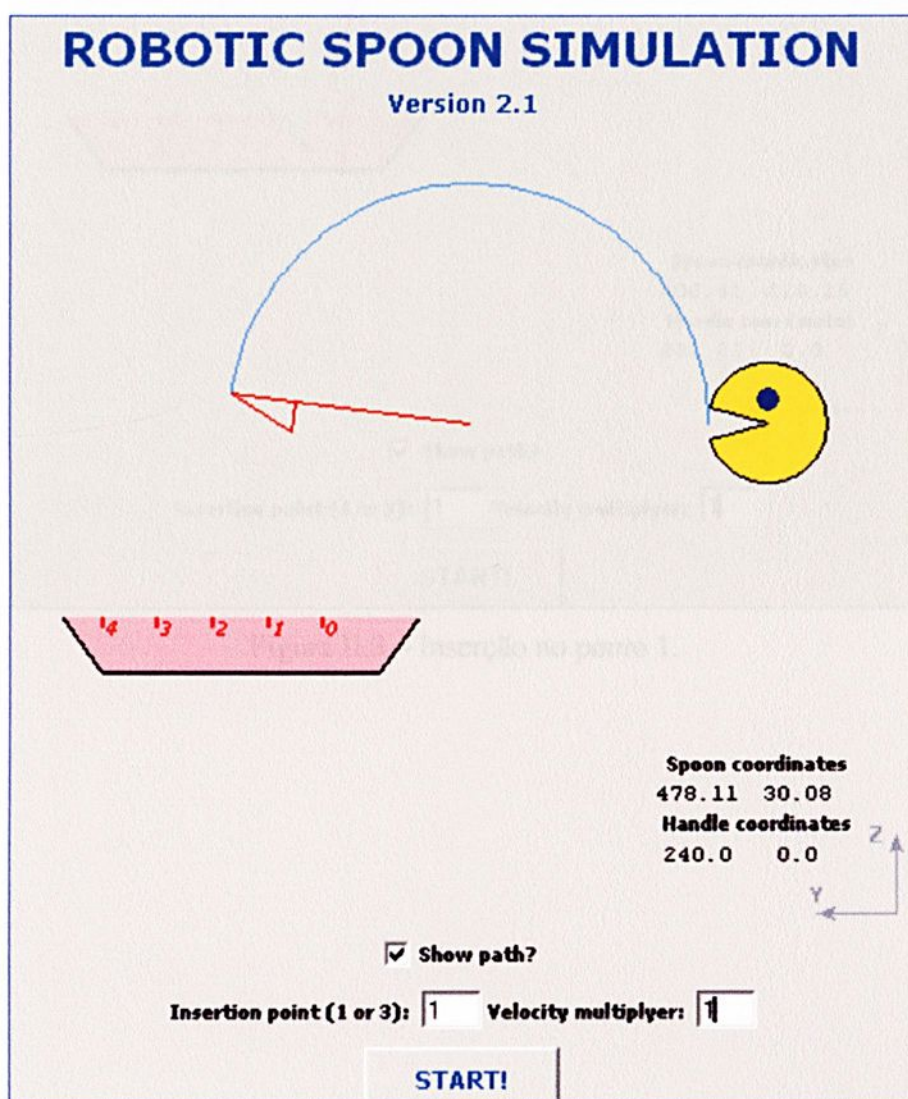


Figura II.2 – Colher aproximando-se do alimento.

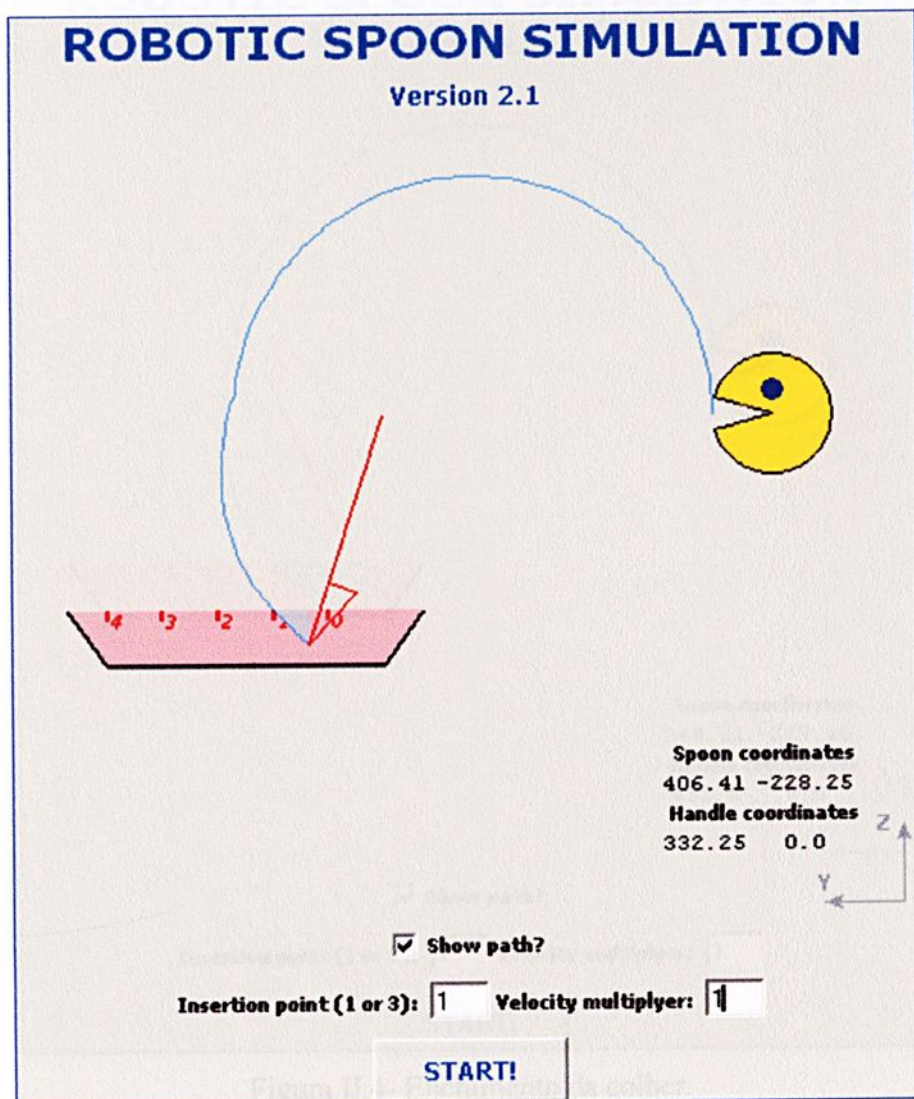


Figura II.3 – Inserção no ponto 1.

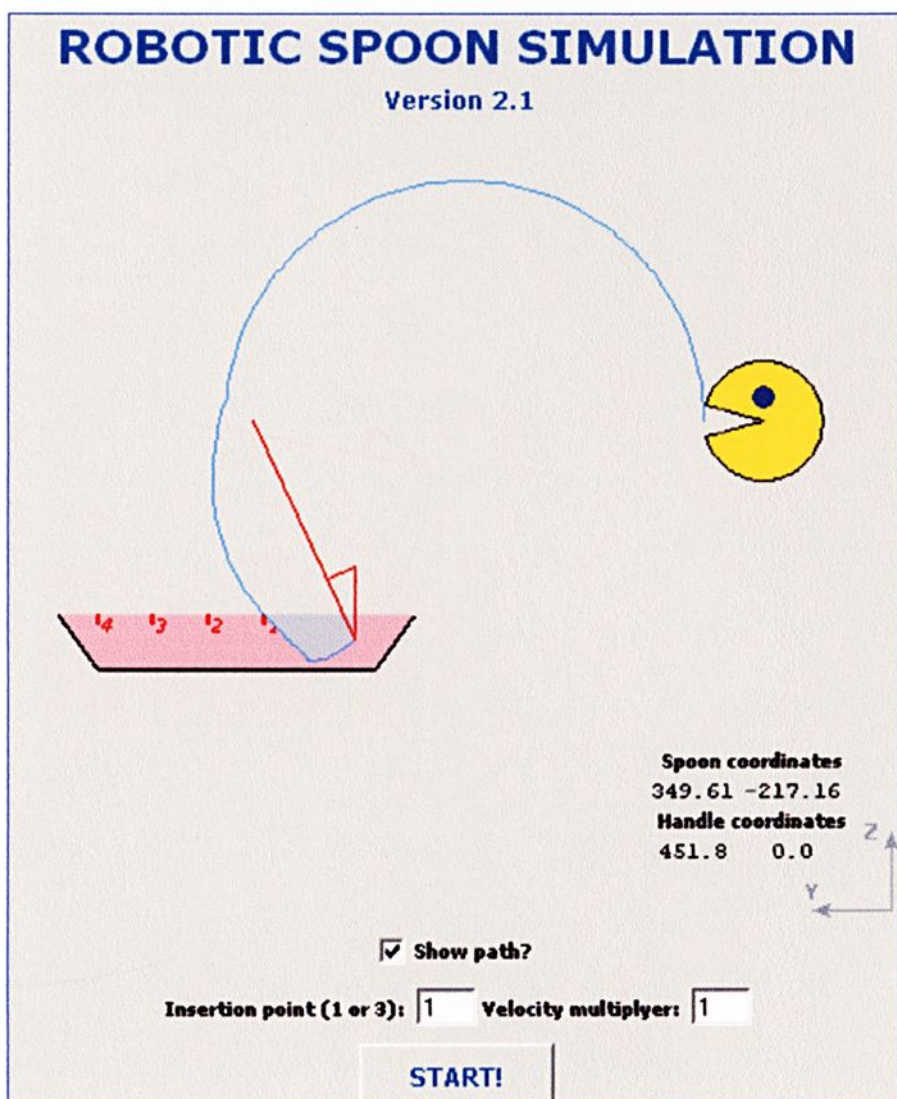


Figura II.4- Enchimento da colher.

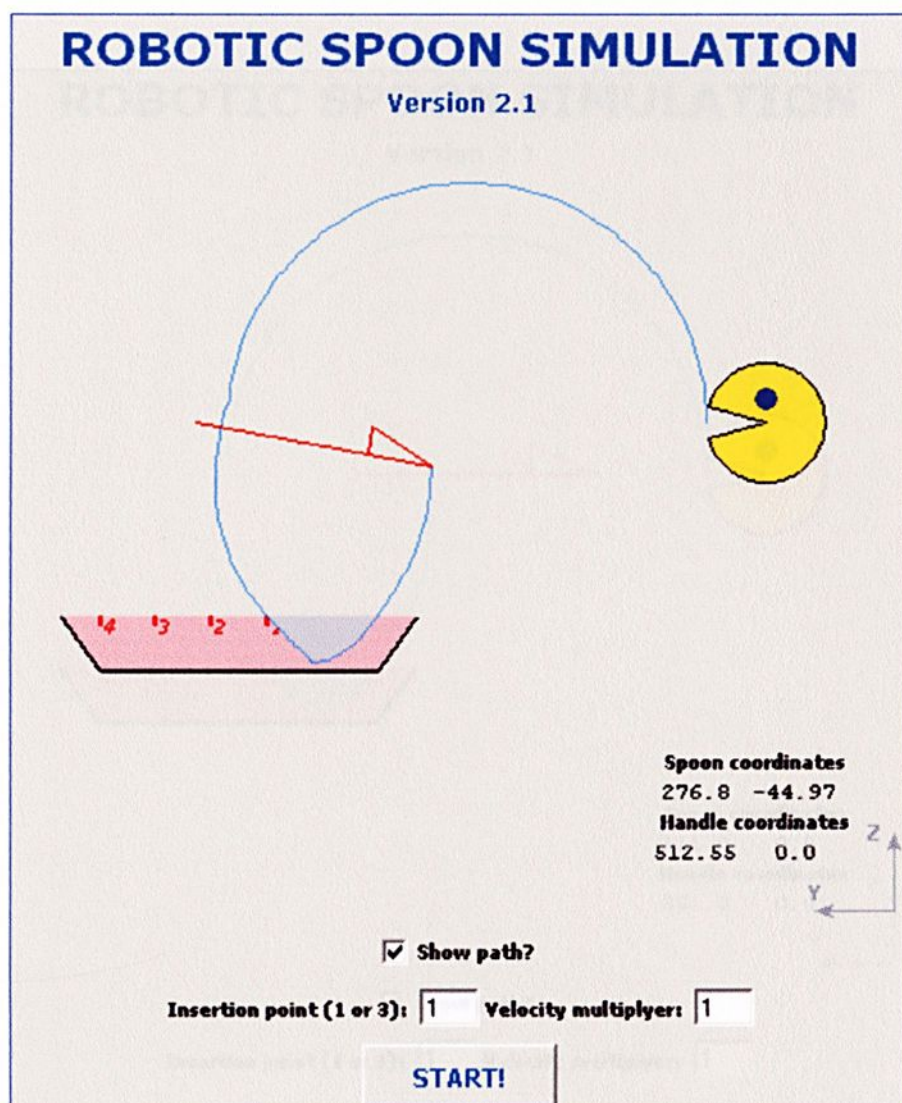


Figura II.5 – Subida da colher.

Figura II.6 – Colher carregada aproximadamente do líquido

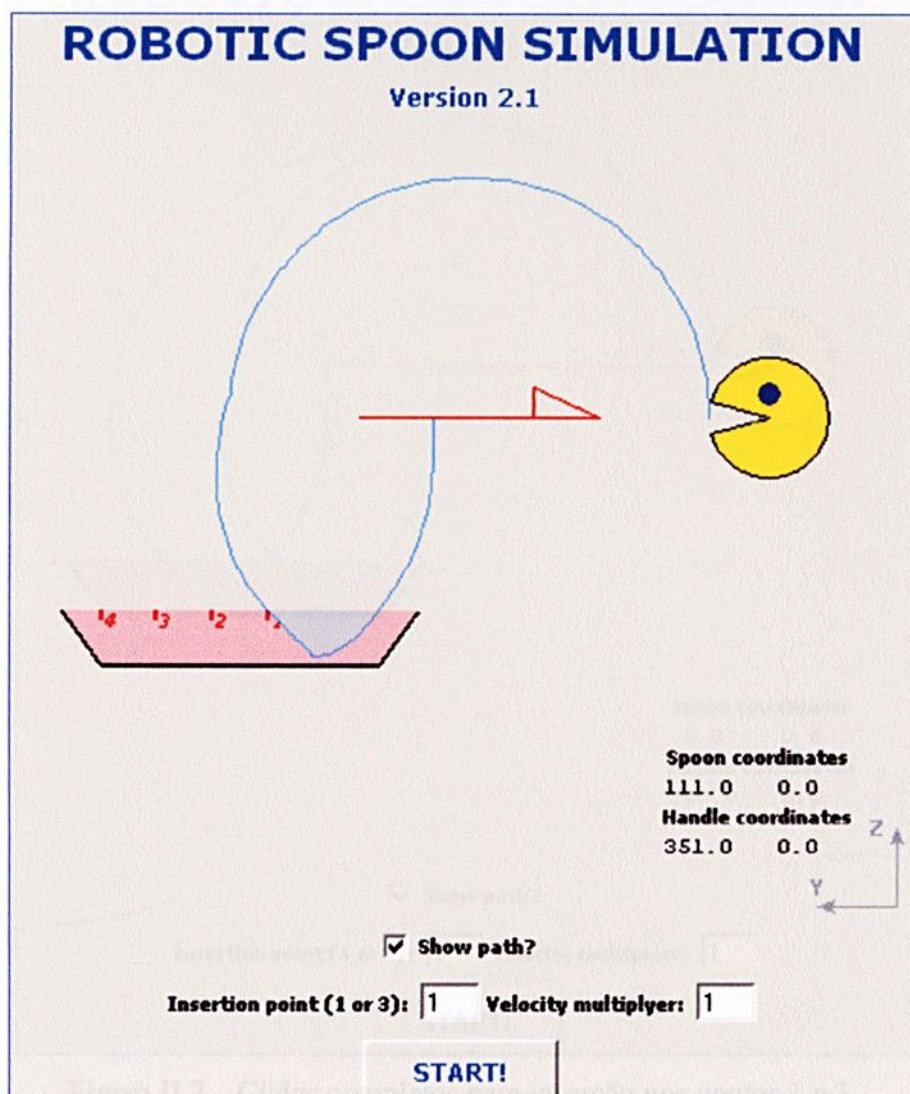


Figura II.6 – Colher carregada aproximando-se do usuário.

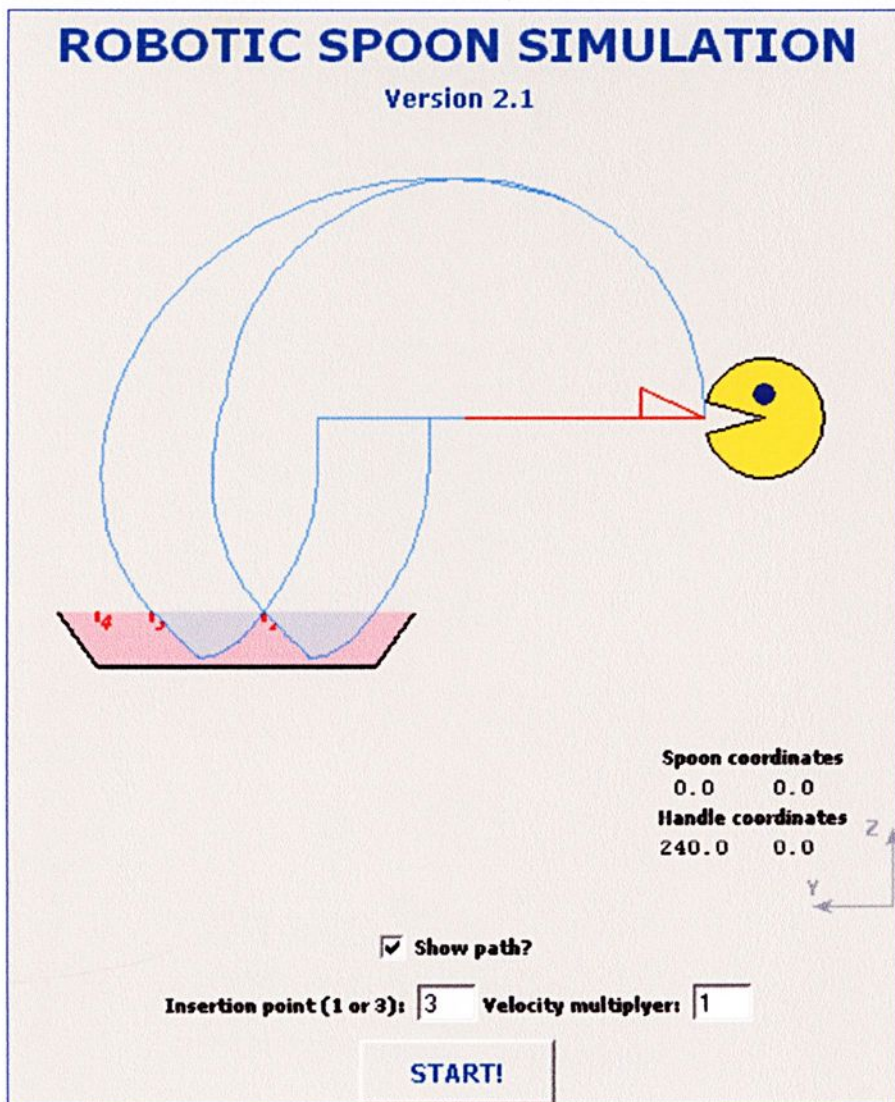


Figura II.7 – Ciclos completos para inserção nos pontos 1 e 3.



**,UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dee.feis.unesp.br**

