



FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JEFERSON PRETI

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE ROBÔ
CARTESIANO DE BAIXO CUSTO PARA MANIPULAÇÃO
DE PRODUTOS EM LINHAS DE MÉDIA CADÊNCIA

BAURU/SP
2014

JEFERSON PRETI

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE ROBÔ
CARTESIANO DE BAIXO CUSTO PARA MANIPULAÇÃO
DE PRODUTOS EM LINHAS DE MÉDIA CADÊNCIA

Dissertação submetida à Faculdade de
Engenharia de Bauru UNESP como
parte dos requisitos exigidos para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Alessandro Serrão Gonçalves

BAURU/SP
2014

Preti, Jeferson.

Projeto e desenvolvimento de robô cartesiano de baixo custo para manipulação de produtos em linhas de média cadência / Jeferson Preti, 2014

134 f.

Orientador: Flávio Alessandro Serrão Gonçalves

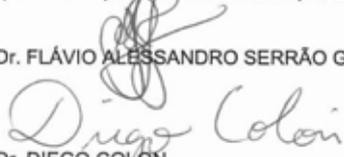
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014

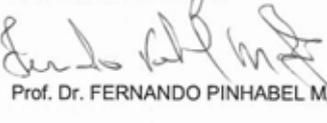
1. Manipulador Robótico Industrial. 2. Robô Cartesiano. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE JEFERSON PRETI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 19 dias do mês de agosto do ano de 2014, às 09:30 horas, no(a) Câmpus Experimental de Sorocaba, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. FLÁVIO ALESSANDRO SERRÃO GONÇALVES do(a) Engenharia Controle e Automação/ Unidade de Sorocaba, Prof. Dr. DIEGO COLON do(a) Depto de Engenharia Telecomunicações Controle/USP/Politécnica/SP, Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFÃO do(a) Engenharia Controle e Automação/ Unidade de Sorocaba, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de JEFERSON PRETI, intitulado "PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE ROBO CARTESIANO DE BAIXO CUSTO PARA MANIPULAÇÃO DE PRODUTOS EM LINHAS DE PRODUÇÃO DE MÉDIA CADÊNCIA". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. FLÁVIO ALESSANDRO SERRÃO GONÇALVES


Prof. Dr. DIEGO COLON


Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFÃO

Dedico esse trabalho à meus familiares e amigos, em especial, minha mãe Josefa Gomes Preti.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço à minha esposa Yolanda Mello Preti, pela compreensão e apoio e ao meu sócio Cristiano Bertulucci Siveira, que colaborou ativamente para este momento pudesse ser alcançado.

Agradeço o meu orientador Professor Dr. Flávio Alessandro Serrão Gonçalves por todos os ensinamentos fornecidos ao longo do desenvolvimento do trabalho e pelo constante apoio técnico e pessoal.

Agradeço aos Professores Doutores Fernando Pinhabel Marafão e Diego Colon pelas contribuições fornecidas ao trabalho em função das discussões e sugestões advindas de suas participações na banca de avaliação da dissertação.

Por fim, agradeço ao GASI da UNESP de Sorocaba e à seção de pós-graduação da UNESP de Bauru.

"A melhor forma de prever o futuro é criá-lo."

(Peter Drucker)

RESUMO

Orientador: Prof. Dr. Flávio Alessandro Serrão Gonçalves.

Área de Concentração: Mecatrônica.

Número de páginas: 134

Este trabalho apresenta a análise, o projeto e o desenvolvimento de um manipulador robótico industrial de baixo custo, para linhas de produção que demandem menos de 10 ciclos de manipulação por minuto, denominadas de média e baixa cadência. O aparato proposto possui potencial para contribuir na melhoria das condições de utilização de células robóticas no cenário industrial nacional, auxiliando na superação dos desafios existentes para implantação de células robóticas por pequenas e médias empresas, nomeadamente, custos de implantação, manutenção e reprogramação/reconfiguração. O manipulador robótico industrial foi projetado considerando uma estrutura metálica leve de baixo custo, com elementos mecânicos de precisão média e não dedicados, facilmente encontrados no mercado nacional. Além disso, o manipulador robótico foi projetado para ser capaz de alcançar velocidades médias provendo tempos de ciclo de operação quase equivalentes aos apresentados por robôs polares articulados convencionais, nas mesmas aplicações. O sistema de controle foi concebido para não empregar o dispendioso sistema convencional de hardware centralizado de controle de eixos, sendo esta operação realizada por algoritmo computacional executado no mesmo PC responsável pela gestão e integração dos processos. Assim, a operação emprega dispositivos acionadores descentralizados considerando o envio dos sinais de referência diretamente aos acionadores, possibilitando a compensação das restrições dos esforços da estrutura com recursos de suavização de trajetórias. A integração com o usuário possui uma interface gráfica de manipulação amigável que permite facilmente os processos de operação, manutenção e reconfiguração, com recursos de supervisão, histórico de falhas e assistência remota. Por fim, um protótipo do manipulador robótico industrial proposto é apresentado demonstrando as principais características construtivas e operacionais.

Palavras-chaves: Manipulador Robótico Industrial, Robô Cartesiano, Linha de Produção de Baixa Cadência.

ABSTRACT

Advisor: Prof. Dr. Flávio Alessandro Serrão Gonçalves.

Concentration Area: Mechatronics.

Number of Pages: 134

This master dissertation presents the analysis, design and development of an industrial low cost robotic manipulator for production lines that require manipulation less than 10 cycles per minute, denominated medium and low cadence lines. The proposed apparatus has the potential to contribute improving the use of robotic cells in the national industrial scene, helping to overcome the existing challenges in deployment of robotic cells by small and medium enterprises, in particular, implementation costs, maintenance and reprogramming /reconfiguration. The industrial robot manipulator was designed considering a low cost light steel structure, with average precision non-dedicated mechanical elements, easily found on the national market. In addition, the robotic manipulator was designed to be able to achieve average speeds with times of operation almost equivalent to those presented by conventional polar articulated robots in the same applications. The control system was designed without the costly centralized hardware system of axes control, this operation being performed by computer algorithm running on the same PC responsible for the management and integration of processes. Thus, the operation employs decentralized devices providing the reference signals directly to the actuators, allowing the mitigation of the efforts restrictions in structure with programmable smoothing of trajectories. Integration with the user is designed to have a user-friendly graphical interface allowing an easy handling of operation processes, maintenance and reconfiguration, with resources for supervision, fault history and remote assistance. Finally, a prototype of the proposed industrial robot manipulator is presented in order to corroborate the construction and operational characteristics.

Keywords: Industrial Robotic Manipulator, Cartesian Robot, Low Cadence production lines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Porcentagem de contribuição no PIB total do Brasil devido às indústrias de transformação.....	28
Figura 1.2 - Volume de participação porcentual dos países emergentes (Brasil, China, Coreia do Sul e México) no volume total exportações mundiais nas ultimas décadas	30
Figura 1.3 - Panorama de investimentos em robótica Industrial em países desenvolvidos	31
Figura 2.1 - Classificação de robôs industriais conforme sua estrutura mecânica	37
Figura 2.2 - Arquitetura de um robô cartesiano	38
Figura 2.3 - Arquitetura do sistema de controle de manipuladores robóticos industriais	40
Figura 2.4 - Fluxo de informação de um sistema de controle convencional de um Robô	42
Figura 2.5 - Fluxo de Informação para controle via envio de posições para drives “inteligentes”, com malha de controle integrada.....	43
Figura 2.6 - Máquina de Corte Plasma	46
Figura 2.7 - Parâmetros para construção do perfil de trajetória.....	46
Figura 2.8 - Interpolação dos pontos do perfil de trajetória.....	47
Figura 2.9 - Sistema de controle PID aplicado ao comando do servomotor.....	48
Figura 3.1 - Estrutura proposta do robô cartesiano e orientação dos eixos.....	49
Figura 3.2 - Simulação para verificação de pontos de sobre-esforço na estrutura do eixo Y.....	50
Figura 3.3 - Simulação para verificação de pontos de deformação na estrutura do eixo Y.....	51
Figura 3.4 - Detalhes da montagem por soldagem e por parafusamento ..	51
Figura 3.5: Guias lineares.....	52
Figura 3.6: Guias lineares do eixo X no projeto.	53
Figura 3.7 - Ilustração detalhada de um motor linear.....	53
Figura 3.8 - Detalhamento de um fuso de esferas	54
Figura 3.9 - Detalhamento de uma cremalheira.....	54

Figura 3.10 - Correias e Polias sincronizadas.....	54
Figura 3.11 - Redutor planetário de média precisão	55
Figura 3.12 - Detalhe da transmissão de movimentos do eixo X, com redutor e polias sincronizadas	55
Figura 3.13 - Detalhe da transmissão de movimentos do eixo Z, com redutor e polias sincronizadas	56
Figura 3.14 - Intervalos entre posições podem causar deformações inadequadas nos trajetos	60
Figura 3.15 - Servodrive AKD Kollmorgen	61
Figura 3.16 - Tela de configuração do TwinCAT IO	63
Figura 3.17 - Montagem de uma acomodação por uma linha.....	64
Figura 3.18 - Montagem de acomodação por uma linha com alternância de acomodações.....	65
Figura 3.19 - Montagem de uma acomodação a partir de duas ou mais linhas	65
Figura 3.20 - Montagem de acomodação a partir de duas ou mais linhas com alternância de acomodações	66
Figura 3.21 - Alimentação de linha única sem alternância de acomodações.....	66
Figura 3.22 - Alimentação de linha única com alternância de acomodações.....	66
Figura 3.23 - Alimentação de duas ou mais linhas sem alternância de acomodações.....	67
Figura 3.24 - Alimentação de duas ou mais linhas com alternância de acomodações.....	67
Figura 3.25 - Transposição entre linhas.....	68
Figura 3.26 - Transposição entre acomodações.....	68
Figura 3.32 - Fluxograma de funcionamento do software de controle	69
Fonte: Próprio Autor.....	69
Figura 3.33 - Interpolação dos pontos de entrada com orientação por arcos nos vértices.....	70
Figura 3.34 - Gráfico de tempo dispendido entre as linguagens C# e C++ para a execução da mesma operação aritmética	73
Figura 4.1- Foto de evidenciando a montagem do painel	75

Figura 4.2 - Foto da estrutura montada	76
Figura 4.3 - Foto de montagem do eixo de movimentação X	76
Figura 4.4 - Foto de montagem dois eixos de movimentação Y e Z	77
Figura 4.5 - Tela de cadastro de “produtos”, “acomodações”, “posições de Linha” e “posições de acomodações”	78
Figura 4.6 - Cadastro de “configurações de trabalho”	79
Figura 4.7 - Tela de configurações avançadas do processo	79
Figura 4.8 - Cadastro de trajetos de configurações de trabalho	80
Figura 4.9 - Tabela que irá acomodar os registros de trajetos, ordenados de cima para baixo	80
Figura 4.10 - Localização de produto	81
Figura 4.11 - Organização (amarração) de um pallet	82
Figura 4.12 - Botões de movimentação manual do manipulador	82
Figura 4.13 - Definição de pontos primários	83
Figura 4.14 - Criação de ordens de produção e consequente seleção de Configurações de Trabalho	84
Figura 4.15 - Fluxograma de funcionamento da <i>thread</i> da interface	85
Figura 4.16 - Entrada de segmento tangente associado a pontos de desvio de direção	86
Figura 4.17 - Demonstração do arco criado no ponto P2	86
Figura 4.18 - Reta que define a velocidade constante aplicada em cada arco do trajeto	87
Figura 4.19 - Comportamento esperado pelo processo de cálculo iterativo de perfis de trajetória.	88
Figura 4.20 - Posicionamento do robô em cada ponto primário dado	89
Figura 4.21 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso D1 de movimentação direta com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	93
Figura 4.22 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso I1 de movimentação interpolada com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	94
Figura 4.23 - Coletânea de curvas das grandezas cinemáticas, para o caso D1 de movimentação direta com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	95

Figura 4.24 - Coletânea de curvas das grandezas cinemáticas, para o caso I1 de movimentação interpolada com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1.....	96
Figura 4.25 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso D2 de movimentação direta com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	97
Figura 4.26 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso I2 de movimentação interpolada com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	98
Figura 4.27 - Coletânea de curvas das grandezas cinemáticas, para o caso D2 de movimentação direta com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	100
Figura 4.28 - Coletânea de curvas das grandezas cinemáticas, para o caso I2 de movimentação interpolada com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1.....	101
Figura 4.29 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso D3 de movimentação direta com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	102
Figura 4.30 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso I3 de movimentação interpolada com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	103
Figura 4.31 - Coletânea de curvas das grandezas cinemáticas, para o caso D3 de movimentação direta com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	104
Figura 4.32 - Coletânea de curvas das grandezas cinemáticas, para o caso I3 de movimentação interpolada com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1.....	105
Figura 4.33 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso D1 de movimentação direta considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	106
Figura 4.34 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso I1 de movimentação interpolada considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	107

Figura 4.35 - Coletânea de curvas das grandezas de movimento, para o caso D1 de movimentação direta considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	108
Figura 4.36 - Coletânea de curvas das grandezas de movimento, para o caso I1 de movimentação direta considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	109
Figura 4.37 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso D2 de movimentação direta considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	110
Figura 4.38 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso I2 de movimentação interpolada considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	111
Figura 4.39 - Coletânea de curvas das grandezas de movimento, para o caso D2 de movimentação direta considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	112
Figura 4.40 - Coletânea de curvas das grandezas de movimento, para o caso I2 de movimentação interpolada considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	113
Figura 4.41 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso D3 de movimentação direta considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	114
Figura 4.42 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso I3 de movimentação interpolada considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	115
Figura 4.43 - Coletânea de curvas das grandezas de movimento, para o caso D3 de movimentação direta considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	116
Figura 4.44 - Coletânea de curvas das grandezas de movimento, para o caso I3 de movimentação interpolada considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1	117
Figura 4.45 – Gráfico de barras das potências médias de entrada requeridas pelo servodriver do eixo Z nos casos avaliados.....	120

Figura 4.46 – Gráfico de barras das potências médias dissipadas na resistência acoplada ao servodriver do eixo Z durante o processo de regeneração nos casos avaliados.....	121
Figura 4.47 – Gráfico de barras das potências máximas dissipadas na resistência acoplada ao servodriver do eixo Z durante o processo de regeneração nos casos avaliados.....	121
Figura 4.48 – Gráfico de barras do intervalo de tempo que das potências médias dissipadas na resistência acoplada ao servodriver do eixo Z durante o processo de regeneração nos casos avaliados.	122
Figura 4.49 – Gráfico de barras dos intervalos de tempo demandados para a realização do movimento nos casos avaliados.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Dados de intensidades de carregamento nos eixos X, Y e Z	56
Tabela 3.2 - Considerações e características dimensionais	56
Tabela 4.1 - Dados das configurações cinemáticas empregadas nos casos de movimentação interpolada.....	91
Tabela 4.2 - Dados das configurações cinemáticas empregadas nos casos de movimentação direta.	91
Tabela 4.3 – Coletânea de dados para os casos de movimentação direta e interpolada considerando carga de 30 kg.	118
Tabela 4.4 – Coletânea de dados para os casos de movimentação direta e interpolada considerando operação a vazio.	119
Tabela 4.5 - descritivo resumido dos custos financeiros dos equipamentos empregados para a construção do protótipo do robô proposto.	124

LISTA DE ABREVIATURAS

a	Aceleração
F	Força
F_X	Força atuante no eixo X
F_Y	Força atuante no eixo Y
F_Z	Força atuante no eixo Z
i	Taxa de redução dos redutores de rotação
m	Massa
P	Potência do sistema
PC	Computador pessoal (Personal Computer)
PLC	Controlador lógico programável (Programmable Logic Controller)
P_X	Potência no eixo X
P_Y	Potência no eixo Y
P_Z	Potência no eixo Z
T_M	Torque dos motores
T_{MX}	Torque do motor X
T_{MY}	Torque do motor Y
T_{MZ}	Torque do motor Z
T_S	Torque de saída do sistema (transmissão)
T_{SX}	Torque de saída no eixo X
T_{SY}	Torque de saída no eixo Y
T_{SZ}	Torque de saída no eixo Z
v	Velocidade
v_s	Velocidade de saída

SUMÁRIO

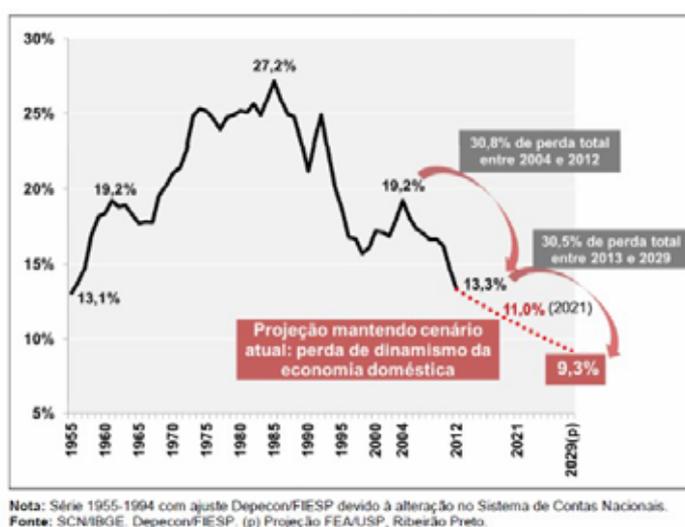
RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	21
LISTA DE ABREVIATURAS	23
1 INTRODUÇÃO	28
2 ROBÔS INDUSTRIAIS	35
2.1 Classificações dos tipos de robôs industriais	35
2.2 Proposta de robô manipulador para paletização	37
2.2.1 Escolha do tipo de robô manipulador.....	38
2.2.2 Arquitetura do sistema de controle em manipuladores	40
2.2.3 Construção de perfil de trajetória	44
2.2.4 Sistema de controle de posicionamento	48
2.2.5 Características da interface com usuário	48
3 PROJETO E METODOLOGIA	49
3.1 Estrutural	49
3.2 Transmissão	52
3.3 Motorização	56
3.3.1 Forças atuantes	57
3.3.2 Velocidades de saída.....	57
3.3.3 Torque de saída.....	57
3.3.4 Potência do sistema.....	58
3.3.5 Torque dos motores	58
3.3.6 Taxas de transformação dos redutores	59
3.4 Sistemas de Controle	59
3.4.1 Drives e comunicação.....	59
3.4.2 Software.....	62
3.4.2.1 Comunicação	62
3.4.2.2 Interface	63
3.4.2.3 Gerenciamento	68
3.4.3 Definição de linguagem de programação	70
4 Protótipo do robô e validação experimental	75

4.1 Montagem	75
4.2 Interface	77
4.3 Testes experimentais.....	89
4.4 Custo Financeiro	123
5 CONCLUSÕES	125
6 TRABALHOS FUTUROS.....	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

1 INTRODUÇÃO

A indústria brasileira no decorrer de sua história alternou momentos de baixo crescimento com ápices de desenvolvimento, como o ocorrido na década de 60 através da abertura da economia para o capital internacional que propiciou a vinda de grandes empresas multinacionais, principalmente do setor automobilístico [1]. Atingindo situação de apogeu na década de 80 quando o setor industrial chegou a responder por mais de um quarto do produto interno bruto do país PIB (27,2%), e de retomada de crescimento na década de 2000, chegando a 19,2% do PIB em 2004, conforme mostra a Figura 1.1. A indústria brasileira vem crescendo, mas com taxa de crescimento inferior que a dos demais setores, perdendo a participação no PIB [2].

Figura 1.1- Porcentagem de contribuição no PIB total do Brasil devido às indústrias de transformação



Fonte: Crespo, S. G [2].

Apesar dos aspectos relacionados com as restrições e a pequena evolução das políticas tributárias de produtos e serviços serem apontados como sendo os principais fatores responsáveis pela baixa taxa de crescimento, estudos indicam que as possíveis causas deste comportamento no Brasil se devem em grande parte pela falta de políticas de incentivo à inovação tecnológica, pela falta de qualificação adequada de profissionais [3] e pela burocracia relacionada com os processos de certificação e regulamentação de empresas nos setores [2].

Assim, a ação de modernização dos processos por parte das empresas nacionais sempre envolve grandes esforços e desafios, pois o acesso à informatização integrada de processos administrativos e de chão de fábrica e a aquisição de maquinário de última geração e componentes específicos para automação industrial são obtidos normalmente através de um processo de importação. Estes aspectos contribuem na elevação dos custos de instalação e manutenção, dificultando ou inviabilizando sua realização.

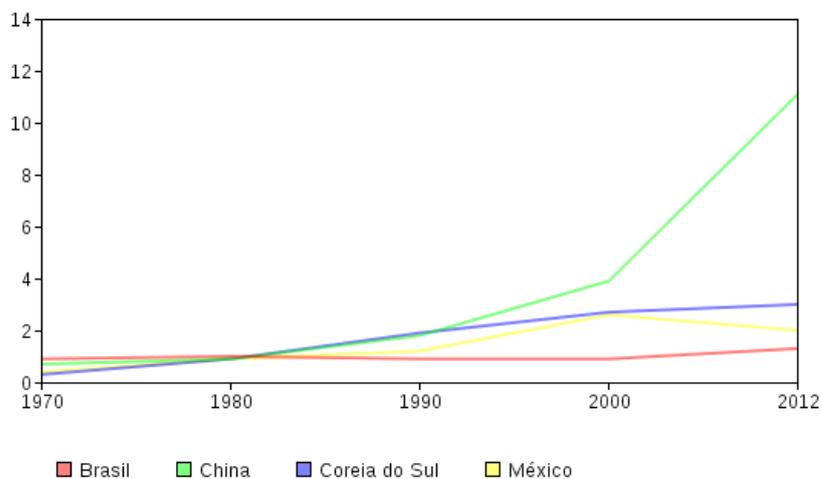
Por outro lado, embora o Brasil seja considerado um dos países detentores de grande conhecimento no campo da automação, o mesmo pode ser caracterizado como sendo um utilizador e não um desenvolvedor, existindo poucas empresas nacionais que efetivamente produzem tecnologia para automação de processos industriais.

Universidades brasileiras de tecnologia vêm desenvolvendo modernos projetos em automação e robótica alcançando posição de destaque internacionalmente [4]. Porém, estes avanços técnicos desenvolvidos nas Universidades, geralmente, são fruto de iniciativa própria, com pouco ou nenhum vínculo com segmentos industriais, devido a falta de verbas específicas e políticas de desenvolvimento para o setor [5].

Em uma economia baseada na propriedade e na detenção do conhecimento para poder se tornar competitiva, a nação deve ser capaz de gerar e distribuir o conhecimento desenvolvido [6]. Deste modo, é possível estabelecer uma relação direta entre as condições de evolução da automação industrial e o aspecto da competitividade. Como o Brasil não consegue vincular o grande conhecimento gerado em suas Universidades à realidade de sua indústria, existe a vigência de um cenário de baixa participação nas vendas do cenário mundial. Em 2014, as exportações brasileiras ainda representam apenas a 1,3% do comércio mundial, praticamente, mantendo a mesma participação dos últimos 50 anos [2].

A Figura 1.2 mostra o comparativo dos volumes gerais das participações nas exportações mundiais por parte de países denominados de emergentes na década de 70, ao longo das ultimas quatro décadas, demonstrando que alguns tinham uma participação inferior a do Brasil até a década de 80, e que hoje, têm capacidade de exportação muito maior que a do Brasil.

Figura 1.2 - Volume de participação porcentual dos países emergentes (Brasil, China, Coreia do Sul e México) no volume total exportações mundiais nas últimas décadas



Fonte: Crespo, S. G [2].

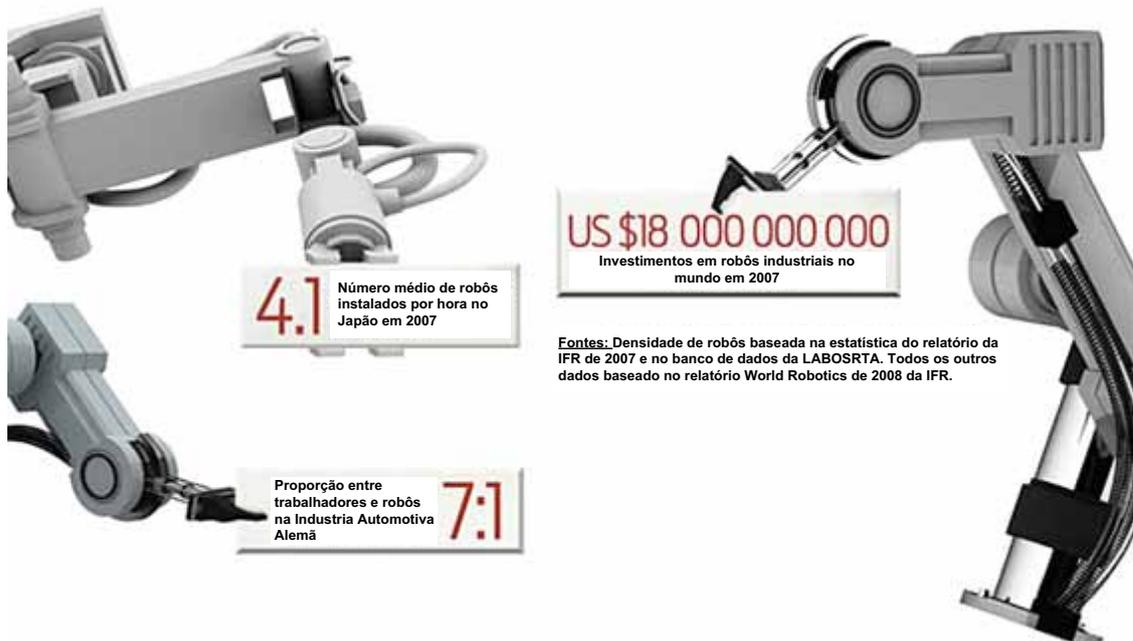
A comparação da distribuição de robôs industriais polivalentes em vários países pode servir como indicador de desenvolvimento, entretanto contabilizar o montante expresso pelo número total de unidades pode levar a constatações inadequadas devido aos diferentes graus de tamanho e evolução nos setores dos países. Assim, visando à contabilização das diferenças de tamanho nas indústrias que empregam robôs em vários países preferencialmente são utilizadas medidas baseadas na densidade de robôs. Uma dessas medidas de densidade de robôs é o número de robôs industriais polivalentes a cada 10.000 pessoas empregadas na "indústria em geral", que abrange todos os setores.

Em estatísticas publicadas no ano de 2012 pela IFR-*International Federation of Robotics* [7], a densidade média de robôs no mundo era de aproximadamente 58 robôs por grupo de 10.000 trabalhadores e a densidade de robôs na indústria japonesa era de 306 robôs, enquanto no Brasil esta quantidade era inferior a média mundial (apenas 10 unidades).

Esta densidade de robôs reflete o nível de desenvolvimento tecnológico das empresas do setor industrial relacionado com a robótica industrial no país, onde este é um assunto e uma área de aplicação pouco explorada [8].

A figura 1.3 apresenta um panorama resumido sobre a inclusão de robôs na indústria mundial em 2007, através da dimensão do investimento no setor da robótica industrial nos países, evidenciando a falta de investimento nacional nesta tecnologia [9].

Figura 1.3 - Panorama de investimentos em robótica Industrial em países desenvolvidos



Fonte: Guizzo, E. (Reprodução e tradução autor) [9].

Basicamente este panorama nacional tem sua causa relacionada com as dificuldades que o empresário nacional encontra para justificar o investimento em uma célula robótica. Os desafios se apresentam nos custos envolvidos com a aquisição do equipamento, com a manutenção e com a reconfiguração das células robóticas.

Devido ao cenário de utilização e não de desenvolvimento, a grande maioria dos robôs comercializados no Brasil são totalmente importados ou apenas montados localmente empregando a maioria dos componentes importados, possuindo assim um nível de nacionalização muito baixo.

Dessa forma, os custos financeiros envolvidos com a implantação de uma célula robótica podem alcançar montantes expressivos, que, devido ao baixo índice de nacionalização, não podem ser custeados por linhas de crédito destinadas ao desenvolvimento industrial nacional, como o Finame do BNDES [10], significando um obstáculo ao empresário nacional.

Algumas atividades industriais conseguem amortizar melhor estes custos e se desenvolver, como as aplicações que envolvem estações de solda, sendo estas as aplicações que mais empregam robôs no Brasil [4].

A necessidade de adaptações das funcionalidades das células robóticas, reprogramação, também representa outro grande obstáculo para sua aquisição. Com a falta de profissionais capacitados para realizar a tarefa, as empresas somente adquirem uma célula robótica para uma linha de produção quando têm certeza de que a mesma necessitará sofrer pouquíssimas alterações ao longo dos anos. Em alguns casos pode ocorrer a padronização do formato de um determinado produto para adaptá-lo ao funcionamento da célula [4].

A manutenção representada pela necessidade da reposição de peças é outro grande obstáculo enfrentado pelos empresários no emprego de células robóticas. Geralmente a mecânica destes equipamentos é robusta, precisa e dedicada, além de na maioria das vezes ser importada e feita sob encomenda [6].

Por outro lado, os custos relacionados com o armazenamento de produtos podem representar uma parcela relevante dos custos totais dos produtos que são influenciados pela ação da paletização dos produtos.

Assim, a paletização de produtos pode ser definida como sendo a ação de arranjar uma coletânea de produtos iguais ou diferentes para formar uma carga unitária conveniente para a realização de subsequente manuseio.

A ação de paletização pode ser realizada pelo homem ou por um dispositivo manipulador. Existem várias desvantagens no processo de paletização baseado no trabalho do ser humano. A primeira está relacionada com o custo global, pois até mesmo o mais hábil e motivado ser humano é capaz de empilhar somente cerca de seis produtos por minuto, ou seja, manipular 1 produto a cada 10 segundos, por um tempo finito sem interrupção [15-16].

Além disso, o ser humano que realiza este movimento de forma tão repetitiva está em risco de sofrer de traumas cumulativos, como lesões nas costas e ombro, afetando sua segurança e a compensação financeira do trabalho [13-16]. Assim, a realização da paletização por robôs resultam em vantagens que incluem desde a maximização da utilização do cubo de pallet, a retenção do conhecimento sobre cada parcela através do sistema de distribuição, aumento de estabilidade da carga de pallets, garantia de formação de pallets em conformidade com regulamentações, como por exemplo, não empilhar venenos em cima de itens alimentícios e o controle da fragilidade das parcelas, o que ainda reduz o desperdício com o dano e contaminação dos produtos [15-20].

Apesar de serem conhecidas todas as vantagens do emprego de células robóticas em processos industriais [11-12, 15], tais como, a melhoria na qualidade da atividade devido às invariâncias de desempenho e repetitividade nos processos, além da diminuição dos problemas como absenteísmo devido a falta de ergonomia, licenças médicas ou processos trabalhistas [13-14], devido aos aspectos apresentados anteriormente as células robóticas continuam possuindo aplicações limitadas no Brasil.

Neste sentido, este trabalho apresenta a análise, projeto e o desenvolvimento de um robô cartesiano para realizar o processo de paletização em um armazém, baseado no emprego de dispositivos e estruturas de baixo custo, tais como, robô cartesiano e controle descentralizado. Assim, espera-se que a proposta possua potencial para contribuir com a melhoria das condições de utilização de células robóticas no cenário industrial nacional, auxiliando na superação dos desafios existentes na implantação de células robóticas por pequenas e médias empresas.

Especificamente, a proposta do robô pretende atender linhas de manufatura no processo de paletização de produtos embalados em caixas de papelão, tais como, produtos de limpeza, alimentos ou fardos envoltos em filme plástico, geralmente utilizados para embalar cereais como arroz e feijão, e, sacarias contendo ração animal ou fertilizante agrícola. O robô proposto deve realizar a manipulação de cargas variando de 30Kg a 80Kg, envolvendo ciclos de movimentação variando de 7 a 14 segundos, caracterizando para estas situações uma cadência denominada de média a baixa.

2 ROBÔS INDUSTRIAIS

Os robôs industriais foram introduzidos nas décadas de 50 e 60 com a finalidade de substituir o ser humano na realização de tarefas perigosas ou repetitivas, visando à melhoria na qualidade do serviço, o aumento na produtividade e a redução dos custos de produção. Alguns exemplos de tarefas onde se tornou comum a existência de robôs industriais são: a montagem e manufatura [23], soldagem a arco e a ponto [24], pintura [25], transporte e manejo de materiais [26 e 27].

Em virtude da constante evolução dos robôs e de definições próprias da concepção de um robô efetuadas por fabricantes, existem diferentes definições para o termo robô dentro da área da robótica.

A norma ISO 8373:1994 define o robô industrial como sendo um aparato manipulador polivalente programável em três ou mais eixos, automaticamente controlado, reprogramável, que pode ser fixo no local ou móvel para uso em aplicações industriais de automação [28].

A Associação Japonesa de Robôs Industriais (JIRA) define um robô como sendo um dispositivo com graus de liberdade que pode ser controlado. Enquanto, o Instituto de Robótica da América (RIA) adota a definição de que um robô é um manipulador reprogramável e multifuncional, projetado para mover e manusear materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especiais, capazes de desempenhar uma variedade de tarefas através do movimento de variáveis programadas.

2.1 Classificações dos tipos de robôs industriais

Os robôs podem ser classificados conforme o nível de inteligência do controlador, cronologicamente por gerações e pela sua estrutura mecânica.

A classificação baseada no nível de inteligência do controlador, adotada pela JIRA, resulta nas classes de robôs manipuladores, de sequência fixa, de sequência variável, repetitivos, de controle numérico e os denominados inteligentes.

Os robôs classificados como manipuladores são robôs que apresentam vários graus de liberdade e com a operação controlada por pessoas.

Os robôs denominados de sequência fixa são os robôs que desempenham tarefas sucessivas com uma programação pré-existente e que requer grande esforço para ser modificada. Por outro lado, os robôs que realizam tarefas sucessivas, mas que podem ser modificadas facilmente são classificados como os robôs de sequência variável.

A classe dos robôs do tipo repetitivos representam os dispositivos que permitem o operador orientar o robô na execução de uma tarefa fixa. Os da classe de controle numérico representam os robôs que o operador fornece a programação de movimento, em vez de guiá-lo manualmente. Por fim, os robôs denominados inteligentes representam os robôs que monitoram e interagem com as alterações do ambiente para realizar o movimento.

Por outro lado, de acordo com os fabricantes e fornecedores, os robôs industriais podem ser classificados considerando sua estrutura mecânica e o número dos eixos fornecidos preliminarmente pelo fabricante como configuração inicial. Assim, os robôs industriais podem ser classificados como: lineares (cartesianos e pórtico), cilíndricos, SCARA, articulados e paralelos.

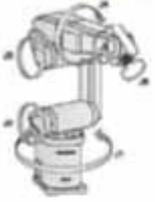
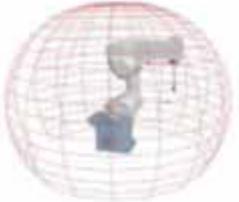
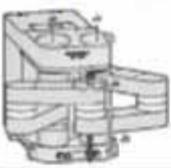
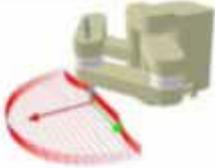
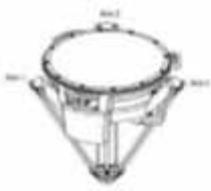
O robô do tipo cartesiano é definido como sendo um robô cujo braço possui três juntas prismáticas e cujos eixos são coincidentes com um sistema de coordenadas cartesiano. Enquanto o robô do tipo cilíndrico é definido como sendo um robô cujos eixos formam um sistema de coordenadas cilíndricas.

Um robô que possui duas juntas rotativas paralelas para fornecer a conformidade em um plano é definido como sendo um robô do tipo SCARA.

O robô do tipo articulado consiste basicamente de um robô cujo braço apresenta pelo menos três juntas rotativas. Enquanto o robô do tipo paralelo pode ser definido com sendo um robô cujos braços têm concorrentes juntas prismáticas ou rotativas.

A figura 2.1 ilustra a classificação de robôs industriais conforme sua estrutura mecânica.

Figura 2.1 - Classificação de robôs industriais conforme sua estrutura mecânica

Princípio	Estrutura Cinemática	Foto
Robô Articulado 		
Robô SCARA 		
Robô SCARA 		
Robô Cartesiano 		
Robô Delta 		

Fonte: World Robotics 2005 [15].

2.2 Proposta de robô manipulador para paletização

A proposta deste trabalho consiste no desenvolvimento de um robô manipulador para paletização de produtos que atenda os requisitos mínimos de dinâmica para linhas de produção de médias e baixas cadências, onde a aquisição de uma célula robótica convencional de mercado não se justificaria.

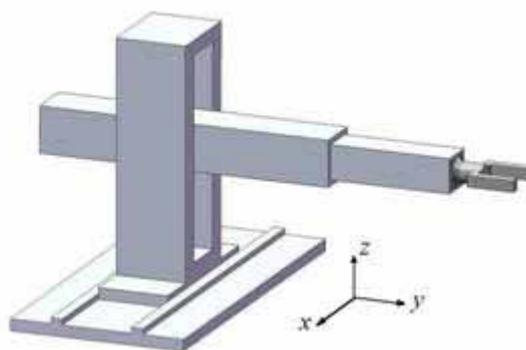
Desta forma, em função de informações coletadas com consumidores adotou-se que o desenvolvimento do robô manipulador deva buscar o atendimento das seguintes características:

- 1) Estrutura leve de baixo custo;
- 2) Elementos mecânicos de precisão média;
- 3) Elementos mecânicos e elétricos não dedicados, facilmente encontrados no mercado;
- 4) Velocidade média, com tempos de ciclo pouco inferiores aos dos robôs polares articulados;
- 5) Sistema de controle de baixo custo, capaz de compensar a fragilidade da estrutura com recursos de suavização de trajetórias;
- 6) Software de reconfiguração de manipulação amigável, que exime a empresa da necessidade de se manter um profissional com conhecimentos profundos em automação;
- 7) Ambiente amigável para operação e manutenção, com recursos de supervisão, histórico de falhas e assistência remota.

2.2.1 Escolha do tipo de robô manipulador

Mediante análise da complexidade envolvida nos tipos possíveis de manipuladores robóticos, a arquitetura cartesiana surgiu como uma opção para emprego no projeto devido à simplicidade envolvida na sua operação.

Figura 2.2 - Arquitetura de um robô cartesiano



Fonte: Próprio Autor.

Os robôs cartesianos operam através de uma estratégia de posicionamento onde cada eixo está disposto a 90 graus do outro, conforme ilustra a figura 2.2. Assim, cada um dos motores representa um dos eixos cartesianos X, Y e Z.

Dessa forma, a utilização de algoritmos complexos de transformação de coordenadas relacionadas com a cinemática inversa e direta não se faz necessária.

Este tipo de arquitetura apresenta vantagens e desvantagens em relação aos robôs polares articulados. Entre as vantagens em relação aos robôs polares articulados pode-se citar:

- Precisão dos elementos mecânicos não necessita ser tão alta, pois a transferência de erro é considerada linear;
- Permite a instalação sobre máquinas da planta de manufatura;
- Apresenta construção considerada simples;
- Apresenta menor consumo para realizar o mesmo movimento, pois exige menor aplicação de torque para verter o efeito da gravidade.

Entre os aspectos que podem ser considerados como desvantagens é possível relatar:

- Apresenta menor velocidade por massa estrutural que a arquitetura polar articulada;
- Exige que o ambiente de instalação possua altura elevada (pé direito alto);
- Necessidade dos produtos manipulados sempre ficarem sob a estrutura do robô, o que pode atrapalhar a retirada em algumas aplicações;
- Área ocupada, um dos motivos para a maior utilização de juntas de revolução em robôs industriais é a relação alcance/espço ocupado pelo par junta-atuador, uma vez que, para obter um mesmo alcance, uma junta prismática ocupa um espaço maior que uma junta de revolução.

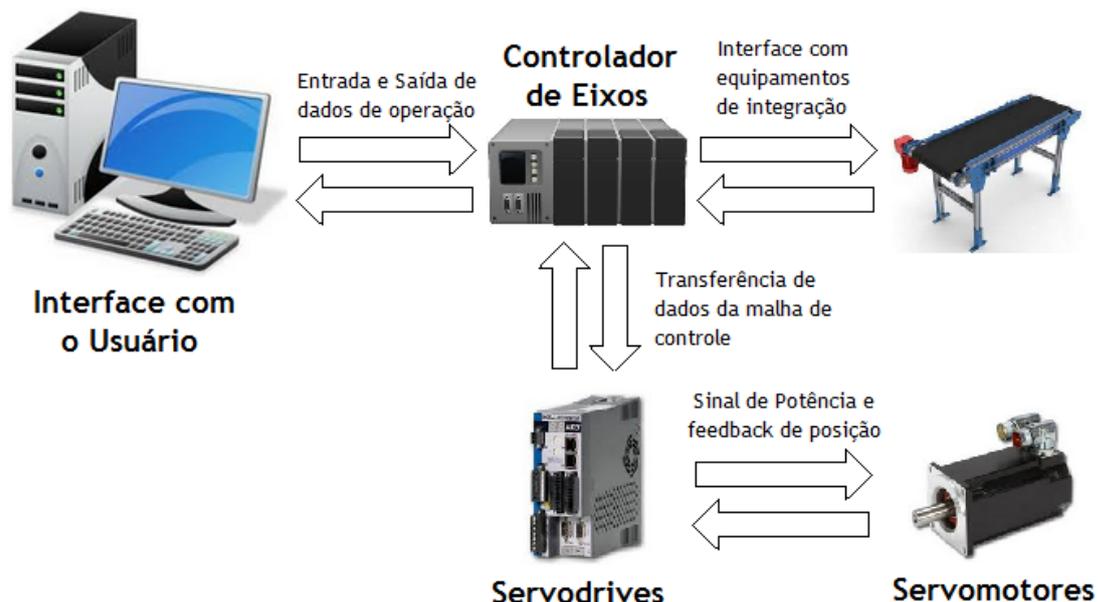
Mesmo possuindo uma importante desvantagem em relação aos robôs polares articulados, nomeadamente, a de apresentar menor velocidade, a estrutura cartesiana ainda é capaz de atender de forma adequada às características de operação destinadas na proposta, pois o foco são aplicações em linhas de média e baixa cadência, onde existem menos de 10 ciclos de manipulação por minuto, que não necessitam de grandes velocidades para a manipulação dos produtos.

Além disso, a estrutura cartesiana é passível de acoplamento com guias lineares e redutores planetários de média precisão, atendendo até 10 arcmin, que apresentam custo de pelo menos três vezes menores que os de alta precisão, até 2 arcmin, permitindo o atendimento das quatro primeiras características desejadas na proposta.

2.2.2 Arquitetura do sistema de controle em manipuladores

Os manipuladores robóticos industriais convencionalmente empregados nas ações de manipulação para paletização geralmente trabalham com uma arquitetura de controle semelhante à ilustrada na figura 2.3. Basicamente a arquitetura apresenta uma interface com o usuário, um controlador de eixos, servodrives e servomotores.

Figura 2.3 - Arquitetura do sistema de controle de manipuladores robóticos industriais



Fonte: Próprio Autor

A Interface de Usuário geralmente utiliza uma plataforma baseada no emprego de um PC industrial funciona como a porta de entrada para os comandos de trabalho da célula robótica. A partir deste elemento, o usuário pode informar os dados das trajetórias desejadas para o Controlador de Eixos, e também, extrair dados de operação do Robô, como posições atuais e produção realizada.

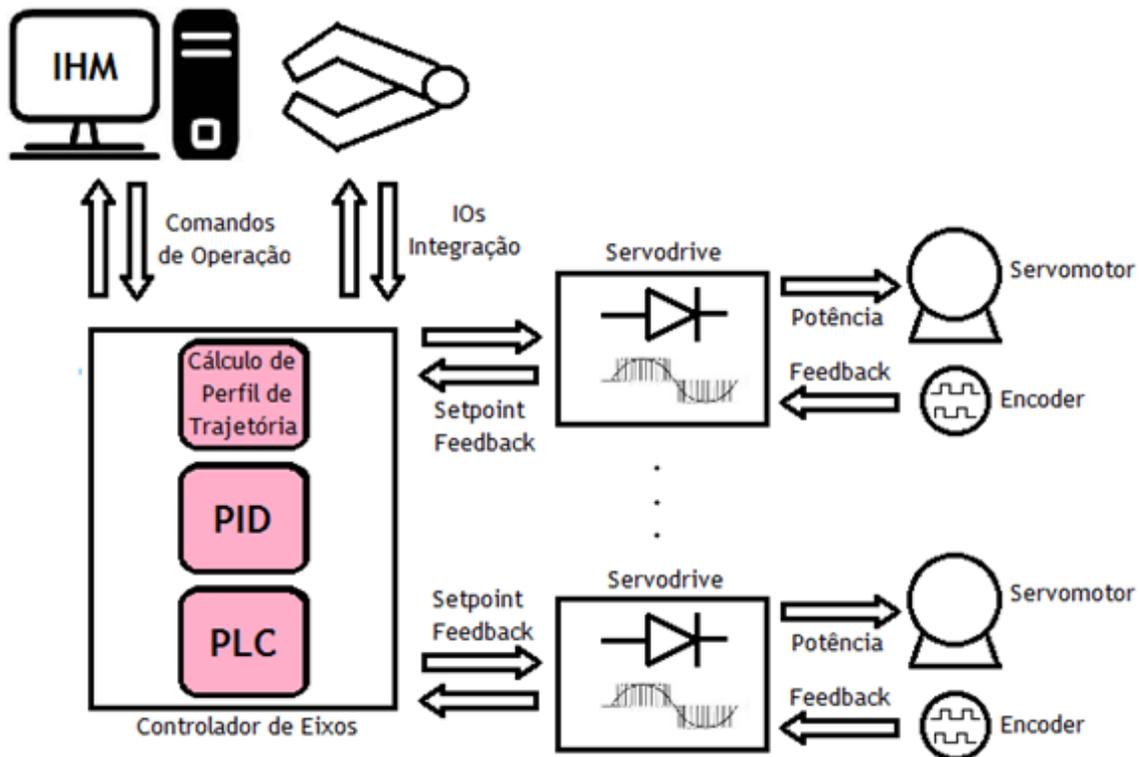
O Controlador de Eixos é o elemento mais importante do sistema, pois é o elemento que integra o sistema de controle e realiza a interface com os dispositivos de integração da célula robótica, como esteiras e garras. Além disso, é responsável pelo gerenciamento dos sinais da malha de controle, enviando dados de posicionamento para o Servodrive, através de protocolos de comunicação ou via sinal analógico, e recebendo a realimentação de posição proveniente do sensor (*encoder*) acoplado no eixo do Servomotor.

Assim, a função principal de um controlador de eixos é realizar o controle de movimento de dois ou mais servomotores, de modo que o movimento de cada um obedeça a definições de posicionamento e dinâmica de um determinado perfil de trajetória, criado empregando um sistema de coordenadas especificado (cartesiano, polar, etc.). A categoria mais usual de controladores de eixos para aplicações robóticas na indústria acumula funções de construção de perfis de trajetória, controle e de sequenciamento e de intertravamento de operações (PLC).

Os Servodrives são os dispositivos responsáveis por acionar os servomotores conforme as condições informadas pelo sistema de controle. Basicamente, transformam os comandos de posição e velocidade do Controlador de Eixos para sinais de tensão pulsantes através da modulação por largura de pulso (PWM) que são entregues aos Servomotores, que por sua vez, se encarregam de realizar o movimento.

O fluxo convencional de informação desta arquitetura para controle de uma célula robótica é mostrado na figura 2.4.

Figura 2.4 - Fluxo de informação de um sistema de controle convencional de um Robô



Fonte: Próprio Autor

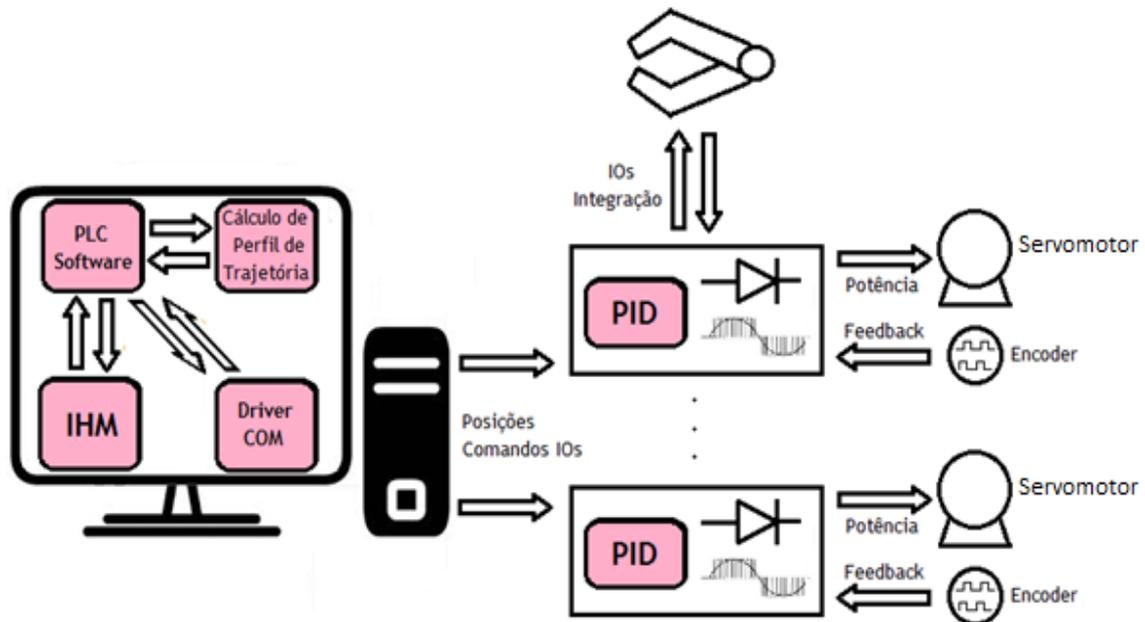
Devido a sua característica integradora e controladora, o Controlador de Eixos geralmente representa um elemento de elevado custo no sistema, pois possuem tecnologia totalmente importada.

Uma estratégia para reduzir os custos do protótipo em questão seria conseguir criar um sistema alternativo que fosse capaz de eliminar a necessidade do emprego do Controlador de Eixos no sistema.

Assim, no desenvolvimento da proposta adotou-se uma estratégia baseada na utilização do PC responsável pela Interface-Homem-Máquina para acomodar um algoritmo que fosse capaz de efetuar os cálculos dos perfis das trajetórias e enviar estas informações de posição/tempo diretamente para Servodrives denominados inteligentes, munidos de malhas de controle integradas, como descrito na figura 2.5.

Os Servodrives com controle de posicionamento em malha fechada, denominados pela linguagem de mercado como “inteligentes”, são largamente utilizados em manipuladores que exigem o posicionamento controlado de apenas um eixo.

Figura 2.5 - Fluxo de Informação para controle via envio de posições para drives “inteligentes”, com malha de controle integrada



Fonte: Próprio Autor

Para os casos onde múltiplos eixos são exigidos a utilização destes dispositivos “inteligentes” não suprime a necessidade da existência de um Controlador de Eixos. Estes apresentam um custo um pouco maior que os denominados servodrives convencionais, sem malhas de controle integradas.

Na arquitetura proposta os servodrives inteligentes serão configurados de forma a dispensar o emprego de um controlador de eixos, pois o comando de posicionamento será enviado diretamente aos Servodrives pelo PC através de driver de protocolo de comunicação industrial. Este aspecto operacional possui grande potencial para impactar de forma a diminuir o custo global do sistema de controle.

Os softwares para sequenciamento de operações (PLC) e cálculo de perfis de trajetórias serão desenvolvidos em linguagem de programação. O software PLC estará em comunicação direta com o Driver de Comunicação, para o envio de posições e comandos de Entradas e Saídas Digitais aos Servodrives.

2.2.3 Construção de perfil de trajetória

O problema do planejamento de trajetória em robótica envolve a determinação de uma lei de movimento ao longo de um dado caminho geométrico, levando em conta requisitos predefinidos, de modo a gerar as entradas de referência adequadas para o sistema de controle do manipulador.

As principais entradas empregadas no planejamento de trajetória são o caminho geométrico, a cinemática e as restrições dinâmicas, enquanto a saída é a trajetória das articulações, expressos como uma sequência no tempo de valores de posição, velocidade e aceleração.

A trajetória gerada pelo planejador não deve excitar ressonâncias mecânicas do manipulador: este é o caso quando ela é suavizada, isto é, a própria trajetória e algumas das suas derivadas são funções contínuas. Em particular, seria desejável a obtenção de trajetórias com acréscimo contínuo de acelerações, de modo a que o valor absoluto do jerk (ou seja, da integral da aceleração) permaneça limitado. Limitar o jerk é muito importante, porque altos valores de jerk podem desgastar a estrutura do robô, e excitar fortemente suas frequências de ressonância. As vibrações induzidas por trajetórias não suaves podem danificar os atuadores do robô e introduzir grandes erros enquanto o robô está realizando as tarefas de rastreamento de trajetória. Além disso, trajetórias relativas a baixos valores de jerk podem ser executadas mais rapidamente e com melhor precisão.

A maioria dos algoritmos de planejamento de trajetória propostos estão baseados na minimização de uma função objetivo, que depende de execução no tempo, esforço do atuador, o valor absoluto do jerk, ou uma combinação destas variáveis [28, 29].

As primeiras técnicas de planejamento de trajetória propostas foram algoritmos de tempo-mínimo, devido à necessidade de aumentar a produtividade no setor industrial. Algumas versões deste tipo de algoritmos podem ser encontradas em [29-30].

A principal desvantagem dos algoritmos de tempo mínimo é a existência de trajetórias possuindo valores descontínuos de aceleração e de torque nas articulações, podendo causar problemas dinâmicos durante a execução da trajetória.

Com o objetivo de gerar trajetórias com acelerações contínuas, uma estratégia comum é usar trajetórias suaves, tais como as funções denominadas spline, que têm sido extensivamente utilizadas na literatura científica em estratégias de planejamento de trajetória cinemática e dinâmica [31-32].

Uma abordagem alternativa prioriza a minimização do consumo de energia em vez do tempo de execução. Esta abordagem conduz a resultados com trajetórias mais suaves, com menores esforços sobre a estrutura do manipulador e sobre os atuadores. Alguns exemplos de estratégias de planejamento de trajetória baseadas na energia podem ser encontradas em [33-35].

Outras abordagens procuram a obtenção de trajetórias baseadas no jerk ótimo. Este tipo de abordagem permite a redução dos erros durante a trajetória de rastreamento, dos esforços dos atuadores e da estrutura mecânica do robô, e da excitação das frequências de ressonância. Alguns exemplos destas abordagens podem ser encontrados em [35-39].

Assim, a construção de um perfil de trajetória pode ser criada de modo a definir a dinâmica e posicionamentos de cada eixo para um determinado trajeto.

Em uma máquina de corte-plasma, conforme figura 2.6, para a confecção de uma peça circular, é necessário que os servomotores que representam os eixos cartesianos X e Y se movimentem de forma que o movimento dos dois defina uma circunferência. Ou seja, a relação de movimento entre uma e outra deve obedecer (2.1):

$$X^2 + Y^2 = R^2 \quad (2.1)$$

As grandezas dinâmicas de cada eixo também deverão obedecer a padrões físicos para que os eixos iniciem o movimento com aceleração (a) constante ou variável (jerk) até alcançarem a velocidade ideal de corte (V), conforme (2.2) e (2.3).

$$\vec{a} = \vec{a}_X + \vec{a}_Y \quad (2.2)$$

$$\vec{V} = \vec{V}_X + \vec{V}_Y \quad (2.3)$$

Figura 2.6 - Máquina de Corte Plasma

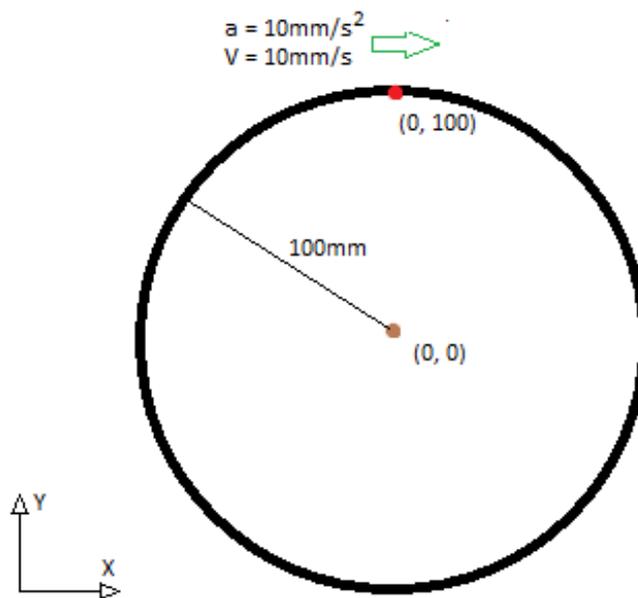


Fonte: www.eletroplasma.com.br

Para a programação deste trabalho, uma forma de fazê-lo é informando o ponto inicial do corte, o sentido do movimento, o ponto de centro e o raio da circunferência, como descrito na lista abaixo de definição dos valores e na figura 2.7.

- Velocidade: $V = 10\text{mm/s}$;
- Aceleração: $a = 10\text{mm/s}^2$;
- Ponto Inicial = $(0, 100)$;
- Sentido = horário;
- Ponto Central = $(0, 0)$;
- Raio = 100mm .

Figura 2.7 - Parâmetros para construção do perfil de trajetória

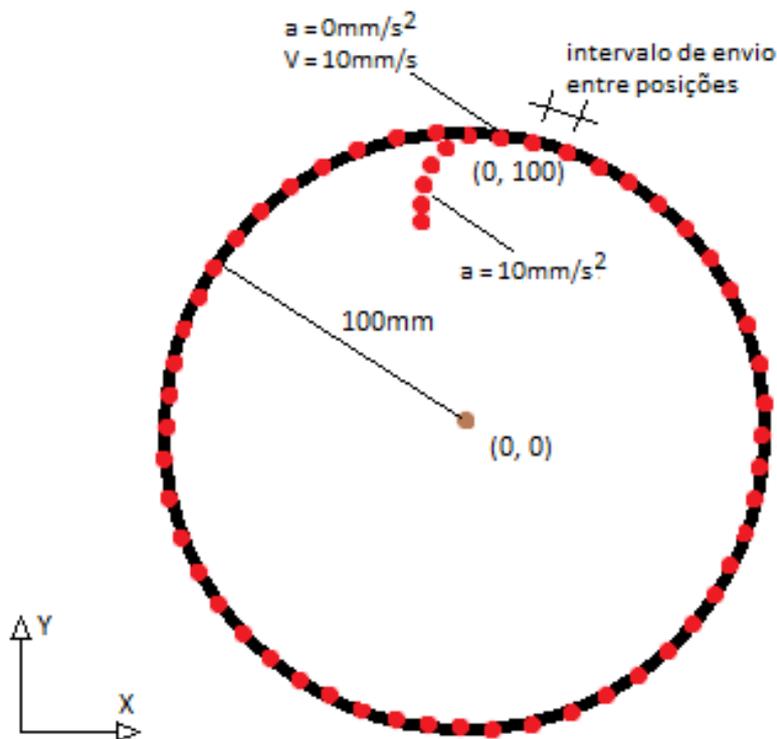


Fonte: Próprio Autor

Desta forma, o perfil da trajetória pode ser construído a partir do conjunto de pontos cartesianos interpolados pelas equações descritas, espaçados por um período de tempo, que na verdade, se trata do intervalo mínimo de envio de setpoint de posicionamento para os servodrives. É importante ratificar que este intervalo deve respeitar a velocidade do canal de comunicação entre o controlador e os servodrives.

A figura 2.8 demonstra a criação dos pontos do perfil de trajetória para o exemplo descrito.

Figura 2.8 - Interpolação dos pontos do perfil de trajetória



Fonte: Próprio Autor

Este perfil de trajetória será considerado no sistema de controle para que o mesmo envie o setpoint de torque, posição ou velocidade, para a consequente realização do movimento dos motores.

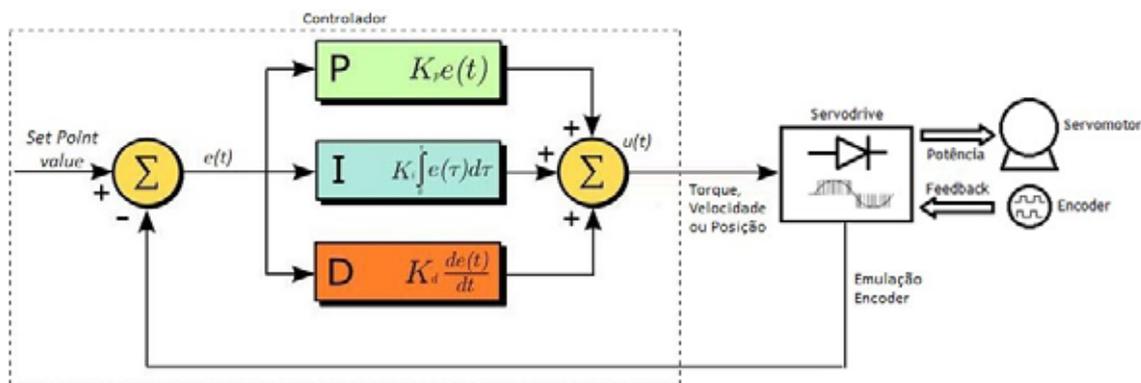
No exemplo descrito anteriormente foi demonstrado um caso de interpolação circular em 2 eixos, mas existem controladores no mercado que realizam interpolações de até 32 eixos. Para a proposta deste trabalho adotou-se que as interpolações serão do tipo lineares e circulares de 4 eixos.

2.2.4 Sistema de controle de posicionamento

O sistema de controle de posicionamento, basicamente realiza a comunicação com os servodrives para que os mesmos “transformem” o comando recebido em potência para os servomotores, e assim executando o movimento desejado. Esta comunicação pode ser feita a partir de sinais analógicos ou protocolos industriais de alta capacidade (EtherCAT, CANOpen, Sercos, etc.).

Geralmente, a metodologia de controle aplicada é o PID (Proporcional, Integrativo e Derivativo). O Controlador envia o comando de torque, velocidade ou posição (dependendo da configuração do conjunto controlador-servodrives) para o servodrive, que por sua vez, envia ao controlador a posição atual do motor, para que a malha de controle verifique qual o novo valor de referência a ser injetado, conforme ilustra a figura 2.9.

Figura 2.9 - Sistema de controle PID aplicado ao comando do servomotor



Fonte: Próprio Autor

2.2.5 Características da interface com usuário

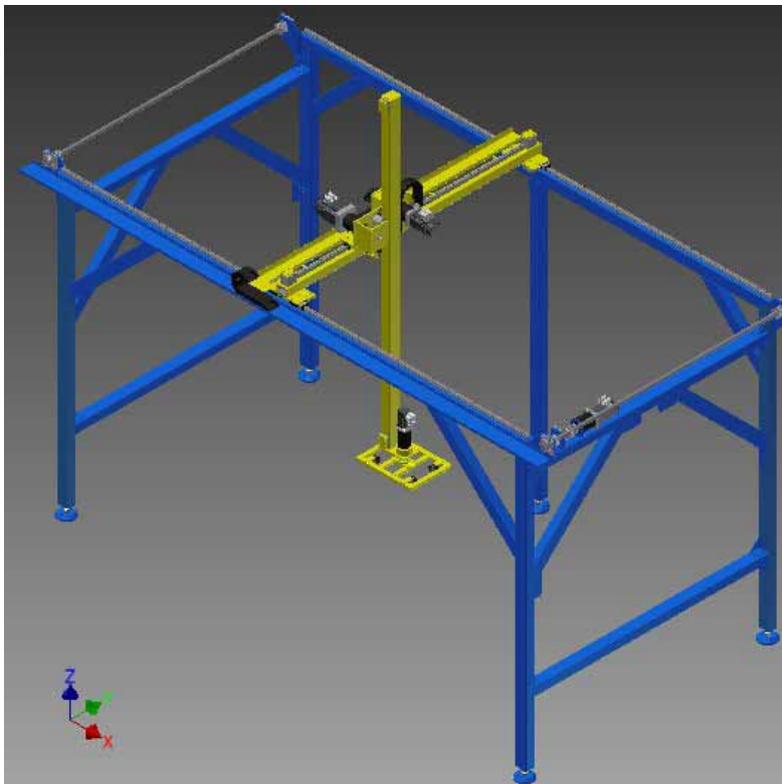
A Interface com o usuário deverá ser intuitiva e visualmente amigável, tanto para operações de rotina quanto para manutenção e reprogramação de posicionamentos. Para atender a estes requisitos, o sistema terá uma base de dados com preferências de trabalho programáveis, assistentes de criação e ajuste de trajetórias e tela de sinótico da célula.

3 PROJETO E METODOLOGIA

3.1 Estrutural

O projeto estrutural foi concebido visando à utilização de elementos de baixo custo relativo e com características de fácil reposição em caso de quebra ou desgaste. O sistema cartesiano proposto será tipo pórtico, de forma a possibilitar a instalação sobre máquinas e dispositivos de acomodação de produtos.

Figura 3.1 - Estrutura proposta do robô cartesiano e orientação dos eixos



Fonte: Próprio Autor.

O projeto do manipulador cartesiano foi baseado em resultados de simulações computacionais considerando a operação com uma carga de aproximadamente 30kg, desenvolvimento de velocidade máxima 2,2m/s e aceleração máxima de 5mm/s^2 .

Simulações computacionais foram realizadas a partir da construção do modelo estrutural primário. O modelo estrutural matemático desenvolvido considera as características de cada elemento utilizado, como tipo de material e peso específico.

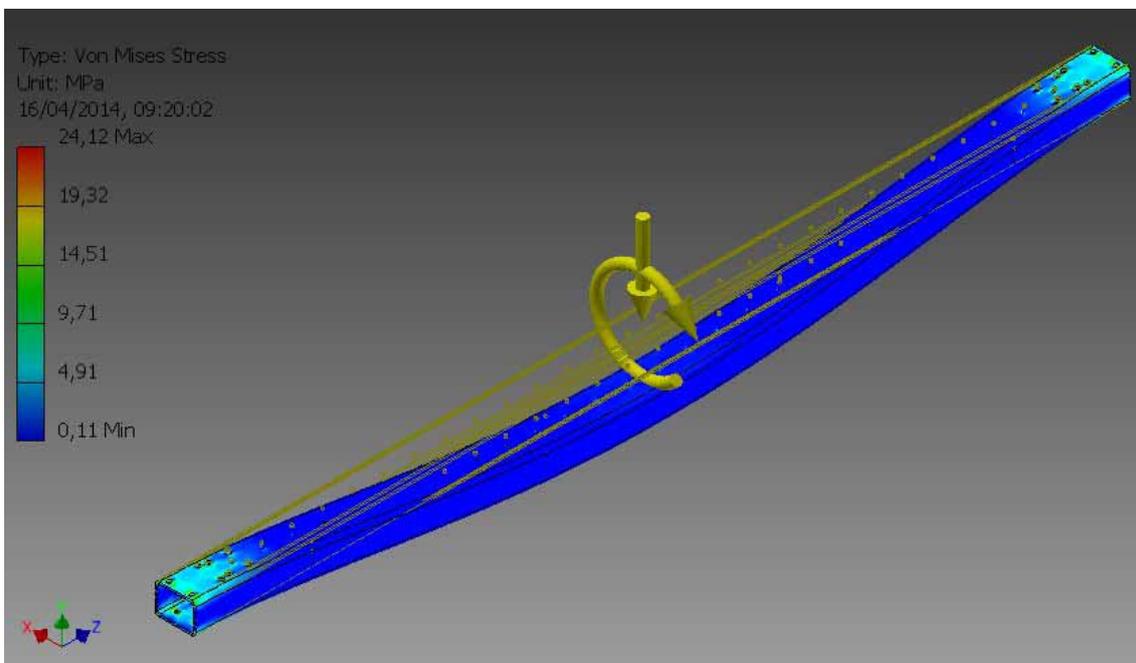
A partir das simulações computacionais deste modelo estrutural foi possível a obtenção de dados mais precisos a respeito do peso da estrutura fixa e móvel, permitindo o dimensionamento dos equipamentos. A cada constatação de um ponto de fragilidade da estrutura devido a sobre-esforço (“stress”) mecânico ou deformação excessiva, um processo de substituição do elemento por outro mais resistente era efetuado.

As figuras 3.2 e 3.3 mostram as simulações de esforço no eixo Y do Robô orientado conforme denotação cartesiana da figura 3.1.

O eixo Y é composto de apenas uma barra de tubo Metalon, ligada entre as duas laterais componentes do eixo X, e por este motivo, sofre um grande esforço na efetuação das movimentações X e Z, já que a carga e o próprio peso da estrutura móvel tem ação direta sobre ele.

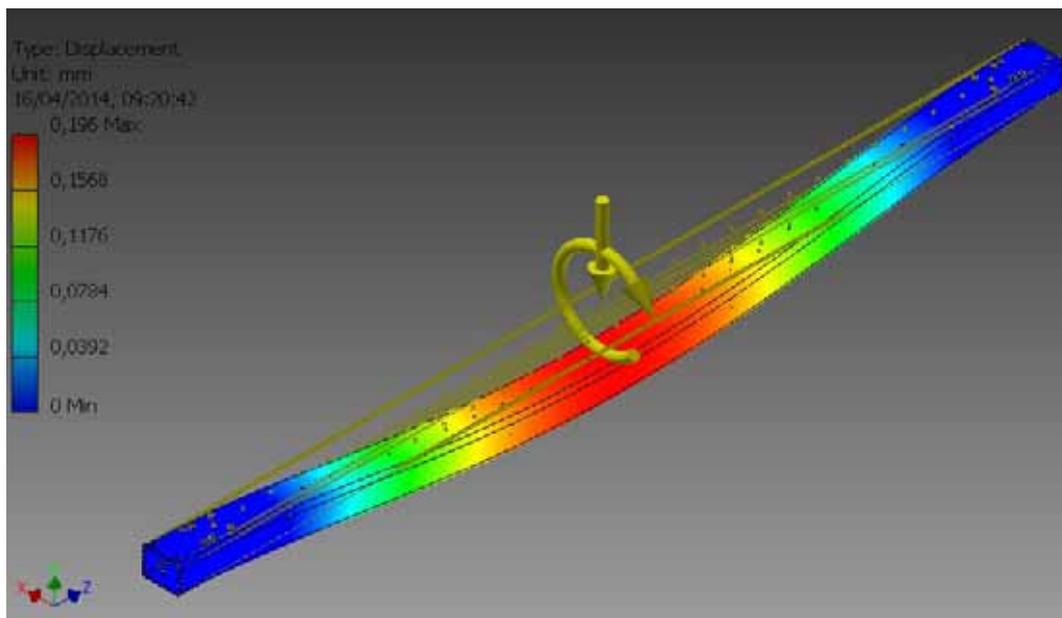
A partir dos dados iniciais de aceleração e carregamento foi possível calcular as forças atuantes neste eixo no caso crítico, que foi definido como sendo a movimentação no sentido X com a estrutura móvel posicionada ao centro do eixo Y, resultando em 1.500 N.m por efeito da movimentação Z e 250 N.m por efeito da movimentação X.

Figura 3.2 - Simulação para verificação de pontos de sobre-esforço na estrutura do eixo Y



Fonte: Próprio Autor

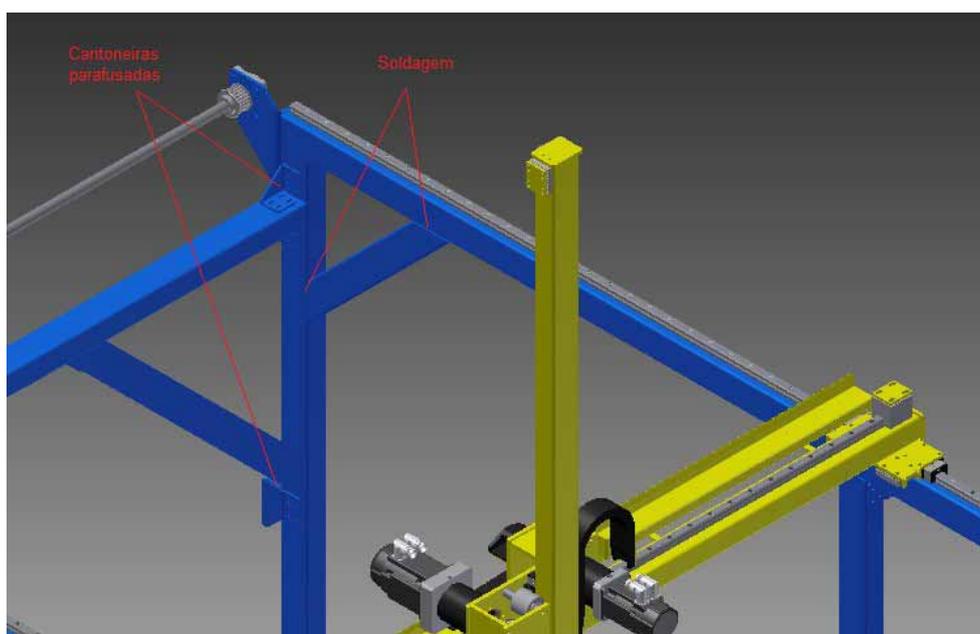
Figura 3.3 - Simulação para verificação de pontos de deformação na estrutura do eixo Y



Fonte: Próprio Autor

Em função dos resultados obtidos através das simulações computacionais, especificou-se a utilização de tubos tipo Metalon de dimensões 80x60x3mm para a estrutura fixa, ilustrada na cor azul na figura 3.1. e tubos tipo Metalon de dimensões 80x60x4,5mm para a estrutura móvel dos eixos X, Y e Z, ilustrada na cor amarela na figura 3.1.

Figura 3.4 - Detalhes da montagem por soldagem e por parafusamento



Fonte: Próprio Autor

Para prover a característica de facilidade de transporte, a montagem proposta contempla fixação entre os pés e as travessas de sentido do deslocamento X por soldagem, e nas travessas de sentido de deslocamento Y, por parafusamento de cantoneiras cortadas a laser e dobradas, conforme ilustra a figura 3.4.

3.2 Transmissão

A transmissão linear de movimento em máquinas industriais é associada a um dispositivo de deslizamento entre parte fixa e móvel, que possibilite a movimentação de forma adequada, de acordo com a aplicação. Geralmente este dispositivo se compõe de um trilho orientador em contato com suportes compostos de materiais de baixo atrito, rolamentos ou roldanas. Para máquinas de média e alta precisão, o equipamento mais utilizado é a guia linear. A figura 3.5 ilustra um exemplo de guia linear.

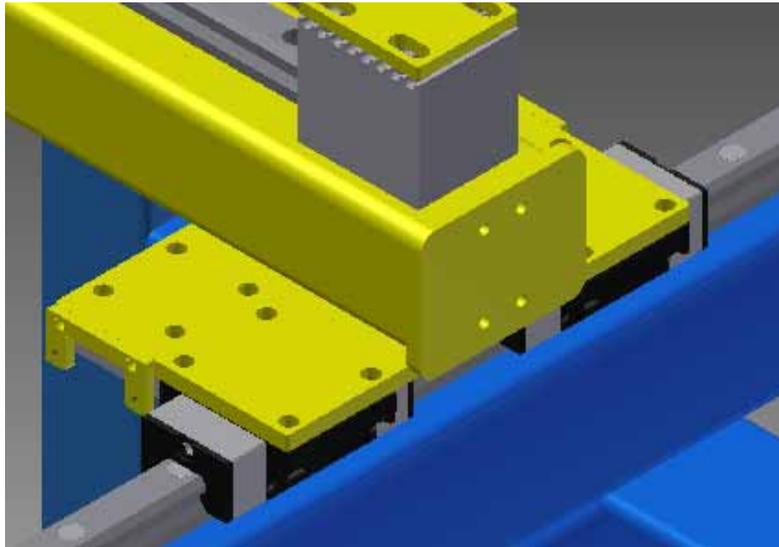
Figura 3.5: Guias lineares.



Fonte: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/>

Por conciliar ótima relação de custo e benefício, apresentando facilidade de reposição, adotou-se que o sistema de deslizamento do projeto seria composto por guias lineares rolamentadas de média precisão e robustez. A figura 3.6 ilustra um detalhe do projeto mecânico de guias lineares aplicadas ao eixo X.

Figura 3.6: Guias lineares do eixo X no projeto.

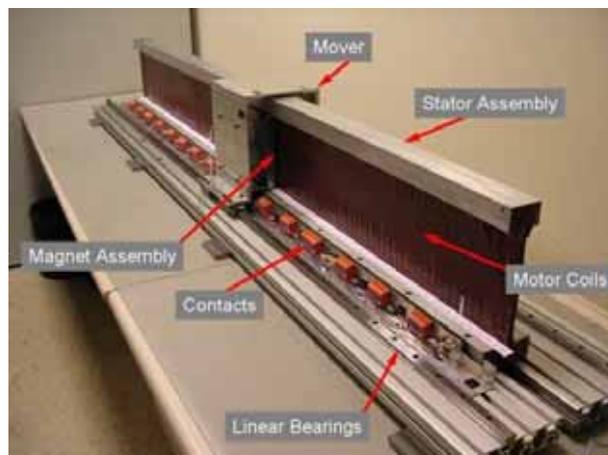


Fonte: Próprio Autor.

Para a realização da transmissão de movimento propriamente dita, existem vários meios eficazes disponíveis. As figuras 3.7 até 3.10 ilustram os dispositivos de transmissão utilizados convencionalmente, nomeadamente, os motores lineares, os fusos de esferas, as cremalheiras e as polias sincronizadas.

- *Motores Lineares*: Aplicação direta de motores de estator aberto, fazendo com que a o torque seja transformado em força tangencial. É a forma mais precisa de transmissão de movimento, pois não necessita a utilização de engrenagens para a redução ou transferência de movimento. Muito utilizado em máquinas de corte a laser e corte a jato d'água, devido à grande precisão.

Figura 3.7 - Ilustração detalhada de um motor linear



Fonte: Sabanci Üniversitesi

- *Fuso de esferas*: trata-se de um equipamento que transfere o movimento circular do motor para o movimento linear da castanha, através de um sistema de deslizamento helicoidal (semelhante ao de um parafuso e uma porca). Dependendo da aplicação, pode ser acoplado diretamente ao motor, sem a necessidade de um sistema de engrenagens para a redução.

Figura 3.8 - Detalhamento de um fuso de esferas



Fonte: <http://www.mectrol.com.br/>

- *Cremalheiras*: composição formada por um trilho serrilhado em contato com uma engrenagem acoplada à saída do redutor. Muito usadas em deslocamentos de grande distância.

Figura 3.9 - Detalhamento de uma cremalheira



Fonte: <http://plasmacortplus.com.br/>

- *Polias Sincronizadas*: semelhante à Cremalheira, a transmissão ocorre a partir de uma engrenagem acoplada à saída do redutor, porém, o movimento da engrenagem agora é transferido para uma correia dentada flexível.

Figura 3.10 - Correias e Polias sincronizadas



Fonte: <http://www.solostocks.com.br/>

Considerando a metodologia de funcionamento proposta para robô manipulador e também buscando apreciar critérios do preço inicial e de manutenção, facilidade de montagem e facilidade de reposição em caso de desgaste ou quebra, constatou-se que a opção mais adequada seria a opção baseada no conceito de transmissão por polias e correias sincronizadas, juntamente com redutores planetários de precisão média e baixo volume. A constatação está baseada nos aspectos da facilidade de montagem, preço com boa relação custo/benefício e grande facilidade na reposição dos equipamentos, pois existem vários fornecedores destes equipamentos no Brasil. A figura 3.11 ilustra um exemplo de redutor planetário de média precisão.

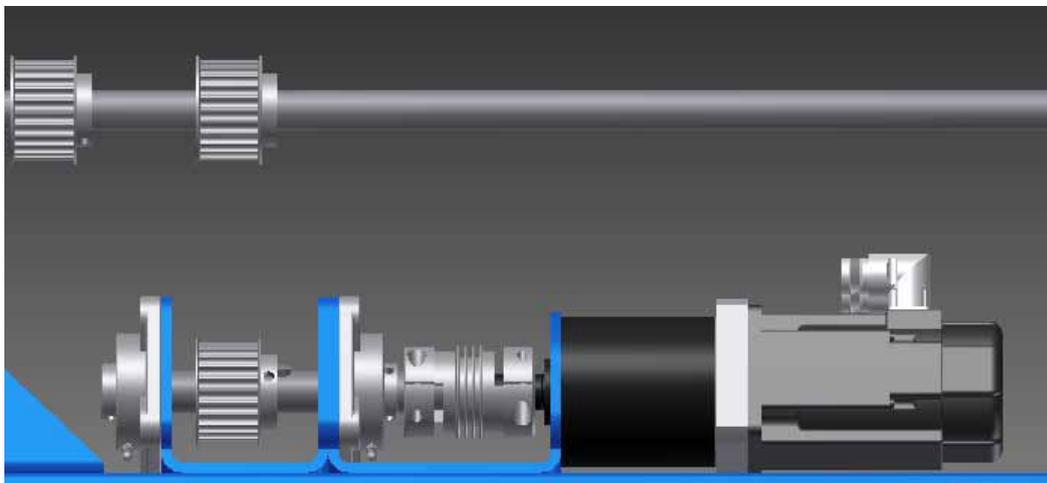
Figura 3.11 - Redutor planetário de média precisão



Fonte: <http://apexdynabrasil.com.br/>

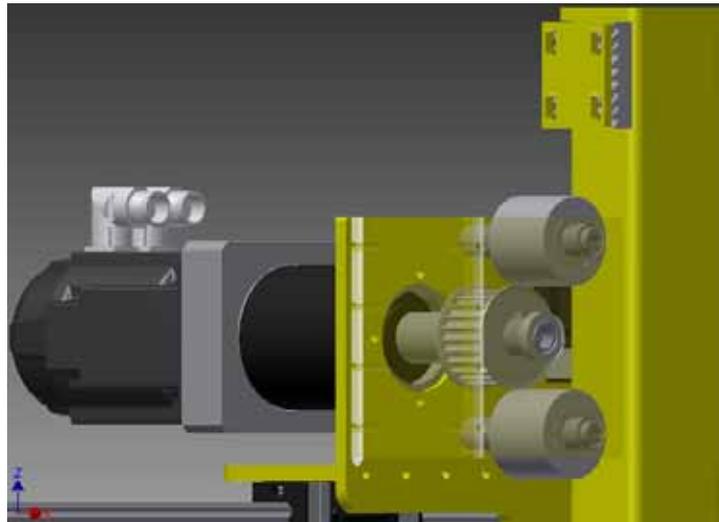
As figuras 3.12 e 3.13 mostram detalhes do projeto da transmissão empregando polias para os eixos de movimentação, evidenciando a instalação das polias e a conexão mecânica com o redutor.

Figura 3.12 - Detalhe da transmissão de movimentos do eixo X, com redutor e polias sincronizadas



Fonte: Próprio Autor

Figura 3.13 - Detalhe da transmissão de movimentos do eixo Z, com redutor e polias sincronizadas



Fonte: Próprio Autor

3.3 Motorização

A partir da definição dos dados de dimensionamento dos elementos de transmissão e peso da estrutura, o dimensionamento das potências e velocidades dos motores pode ser realizado. Assim, a tabela 3.1 apresenta os dados de carga exigidos para cada conjunto de eixos.

Tabela 3.1 - Dados de intensidades de carregamento nos eixos X, Y e Z

Parâmetro	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Peso Motores (kg)	15,00	10,00	15,00
Peso Guias (kg)		15,00	5,00
Peso Tubos (kg)		20,00	16,00
Peso dos Acessórios (kg)		15,00	
Carga (kg)			
Massa Móvel (kg)	146,00	111,00	71,00

Fonte: Próprio Autor

As considerações e características dimensionais são apresentadas na tabela 3.2:

Tabela 3.2 - Considerações e características dimensionais

Parâmetro	Valor
Aceleração máxima dos eixos (a) em m/s^2	5,0
Velocidade máxima dos eixos (v) em m/s	2,2
Raio da polia (r) em mm	30
Velocidade dos motores (v_e) em rpm	3000

Fonte: Próprio Autor

3.3.1 Forças atuantes

As forças atuantes no sistema podem ser calculadas pela equação 3.1 a partir da utilização dos dados apresentados nas tabelas 3.1 e 3.2.

$$F = ma \quad (3.1)$$

Onde: m é a massa em Kg e a aceleração em (m/s^2)

Os resultados para cada eixo são apresentados nas equações 3.2, 3.3 e 3.4. No eixo Z, a força gravitacional também atua diretamente no seu sistema de transmissão, por isso a componente de aceleração gravitacional é somada à componente considerada no sistema.

$$F_X = 146,0 \times 5,0 = 720N \quad (3.2)$$

$$F_Y = 111,0 \times 5,0 = 550N \quad (3.3)$$

$$F_Z = 71,0 \times (10,0 + 5,0) = 1060N \quad (3.4)$$

3.3.2 Velocidades de saída

As velocidades de saídas são, por consideração, iguais para as movimentações nos três eixos cartesianos X, Y e Z. A obtenção da velocidade, em rotações por minuto (rpm), pode ser efetuada através de 3.5.

$$v_s = \frac{60.000v}{2\pi r} \quad (3.5)$$

Onde: v é a velocidade máxima permitida no eixo e r é o raio da polia.

O resultado da velocidade é apresentado em 3.6.

$$v_s = \frac{60.00 \times 2,2}{2\pi \times 30} \cong 710 \text{ rpm} \quad (3.6)$$

3.3.3 Torque de saída

O torque de saída do sistema para cada eixo pode ser calculado por 3.7, à partir dos dados da tabela 3.1 e das equações 3.2, 3.3 e 3.4.

$$T_S = \frac{Fr}{1000} \quad (3.7)$$

Onde: Fr é a força atuante no eixo R, onde o eixo pode ser X, Y e Z.

Os resultados dos torques de saída para os três eixos são apresentados em 3.8, 3.9 e 3.10.

$$T_{SX} = \frac{720 \times 30}{1000} = 21,90Nm \quad (3.8)$$

$$T_{SY} = \frac{550 \times 30}{1000} = 16,65Nm \quad (3.9)$$

$$T_{SZ} = \frac{1060 \times 30}{1000} = 31,95Nm \quad (3.10)$$

3.3.4 Potência do sistema

A potência necessária para atender os requisitos de Torque e Velocidade do sistema, descritos em 3.5 e 3.7, pode ser calculada através de 3.11, para cada eixo.

$$P = \frac{2\pi T_S v_s}{60.000} \quad (3.11)$$

Onde: T_S é o torque de saída do eixo S, e v_s é a velocidade de saída do eixo S.

Os resultados das potências necessárias para cada eixo são apresentados em 3.12, 3.13 e 3.14.

$$P_X = \frac{2\pi \times 21,90 \times 710}{60.000} = 1,63kW \quad (3.12)$$

$$P_Y = \frac{2\pi \times 16,65 \times 710}{60.000} = 1,24kW \quad (3.13)$$

$$P_Z = \frac{2\pi \times 31,95 \times 710}{60.000} = 2,38kW \quad (3.14)$$

3.3.5 Torque dos motores

Considerando velocidades dos motores (v_e) iguais de 3000 rpm, conforme tabela 3.1, o torque dos motores pode ser calculado por 3.15 e pelos dados de potência encontrados em 3.12, 3.13 e 3.14.

$$T_M = \frac{60.000P}{2\pi v_e} \quad (3.15)$$

Onde: P é a potência nos eixos X, Y e Z, e v_e a velocidade dos motores. Assim, os resultados dos torques dos motores são apresentados em 3.16, 3.17 e 3.18.

$$T_{MX} = \frac{60.000 \times 1,63}{2\pi \times 3000} = 5,20Nm \quad (3.16)$$

$$T_{MY} = \frac{60.000 \times 1,24}{2\pi \times 3000} = 3,95Nm \quad (3.17)$$

$$T_{MZ} = \frac{60.000 \times 2,38}{2\pi \times 3000} = 7,58Nm \quad (3.18)$$

3.3.6 Taxas de transformação dos redutores

A taxa de transformação dos redutores pode ser obtida pela relação entre as velocidades de saída e de entrada, descrita por 3.19.

$$i = \frac{v_s}{v_e} \quad (3.19)$$

Onde: v_s e v_e são as velocidades de saída e de entrada, respectivamente.

O valor obtido de taxa de transformação dos redutores, adotando o mesmo valor em todos os eixos, é apresentado em 3.20.

$$i = \frac{710}{3000} = 4,21 \quad (3.20)$$

Considerando os valores teóricos obtidos e valores comerciais disponíveis no mercado referentes à família de servo-motores (Kollmorgen), especifica-se:

$$T_{MX} = 4,82\text{Nm}$$

$$T_{MY} = 3,53\text{Nm}$$

$$T_{MZ} = 8,67\text{Nm}$$

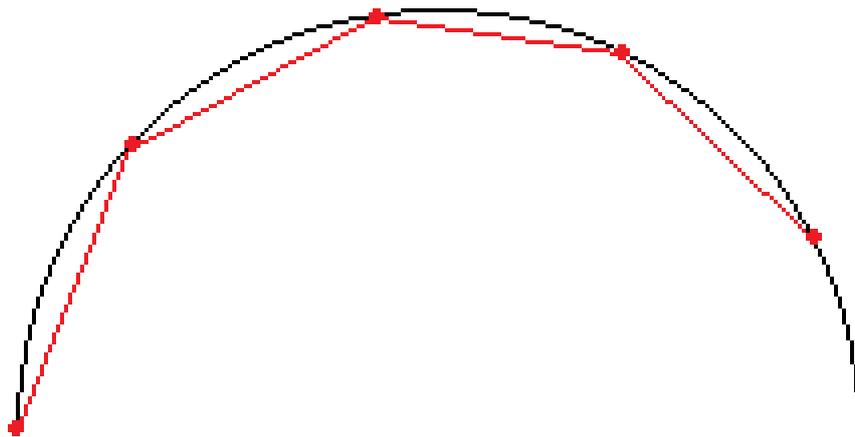
Além disso, para a taxa de transformação dos redutores considerando valores disponíveis comercialmente, especifica-se uma taxa igual a cinco ($i = 5$).

3.4 Sistemas de Controle

3.4.1 Drives e comunicação

Como destacado no capítulo 2, a proposta para o controle eixos contempla o envio de posições geradas em um PC para servodrives que possuem controle individual de malha fechada. Para que estes requisitos sejam atendidos, é importante que os servodrives tenham este controle individual associado a um canal de comunicação rápido, para que as posições enviadas sejam interpretadas em pequenos intervalos. Quanto menor o intervalo entre posições, melhor pode ser a qualidade do movimento, pois as movimentações em arco tendem a ter a trajetória deformada se o intervalo for muito grande. A figura 3.14 ilustra um exemplo de trajetória com intervalos de posições.

Figura 3.14 - Intervalos entre posições podem causar deformações inadequadas nos trajetos



Fonte: Próprio Autor

O PC também deve possuir um canal de comunicação compatível com o do servodrive, tanto em critérios de interpretação de protocolo como em capacidade de processamento, que envolvem questões não só de hardware, mas também de software. Este canal também deve possuir boa confiabilidade e custo baixo para que justifique sua utilização.

A partir destas premissas foram consideradas as seguintes opções de comunicação entre o PC e o servodrive:

- a) EtherCAT: Originalmente criada pela Beckhoff® [40], trata-se de uma comunicação de protocolo aberto extremamente rápida (pode alcançar 1Gb/s). Pode trabalhar em meio físico Ethernet, o que proporciona à mesma grande flexibilidade, já que existem no mercado vários equipamentos baseados neste mesmo meio físico, como placas de rede, switches, etc. Neste cenário, porém, a comunicação pode apresentar significativa perda de performance;
- b) CANOpen: Teve seu primeiro desenvolvimento em 1993 [41] pela Bosch® e foi amplamente utilizada no setor automotivo. Possui alta velocidade (pode alcançar até 1Mb/s), porém, exige a instalação de hardware conversor ou placa dedicada para conexões com PCs;

- c) Modbus TCP: Baseada no protocolo Modbus, criado pela Modicon (hoje Schneider®) [42], trata-se de uma comunicação rápida de grande flexibilidade, pois se baseia no meio físico Ethernet.

Diante deste contexto, optou-se pelos servodrives modelo AKD e servomotores modelo AKM da Kollmorgen, por acomodar boas alternativas de comunicação por um baixo custo. A figura 3.15 ilustra o servodrives modelo AKD, este dispositivo possui a malha de controle individual requerida, além de sete entradas digitais e duas saídas digitais para utilização livre e as opções de comunicação CANOpen e EtherCAT.

Figura 3.15 - Servodrives AKD Kollmorgen



Fonte: <http://www.kollmorgen.com/en-us/home/>

O padrão de comunicação definido para o envio das posições foi a EtherCAT, pela grande flexibilidade quanto à utilização de equipamentos (quando trabalhada em meio físico Ethernet), não exigindo a instalação de hardwares dedicados no PC para a conversão de dados, permitindo o emprego da própria placa de rede Ethernet do mesmo. Evidente que este modo de trabalho implicará em perda de velocidade de comunicação, porém, como um critério importante do trabalho é o baixo custo, então o melhor custo benefício encontrado para o conjunto Servo Acionamento – Comunicação foi obtido à partir desta combinação.

3.4.2 Software

Como a responsabilidade da monitoração do posicionamento dos motores será delegada aos servodrives, fica destinado ao PC a realização do gerenciamento dos aplicativos relativos ao:

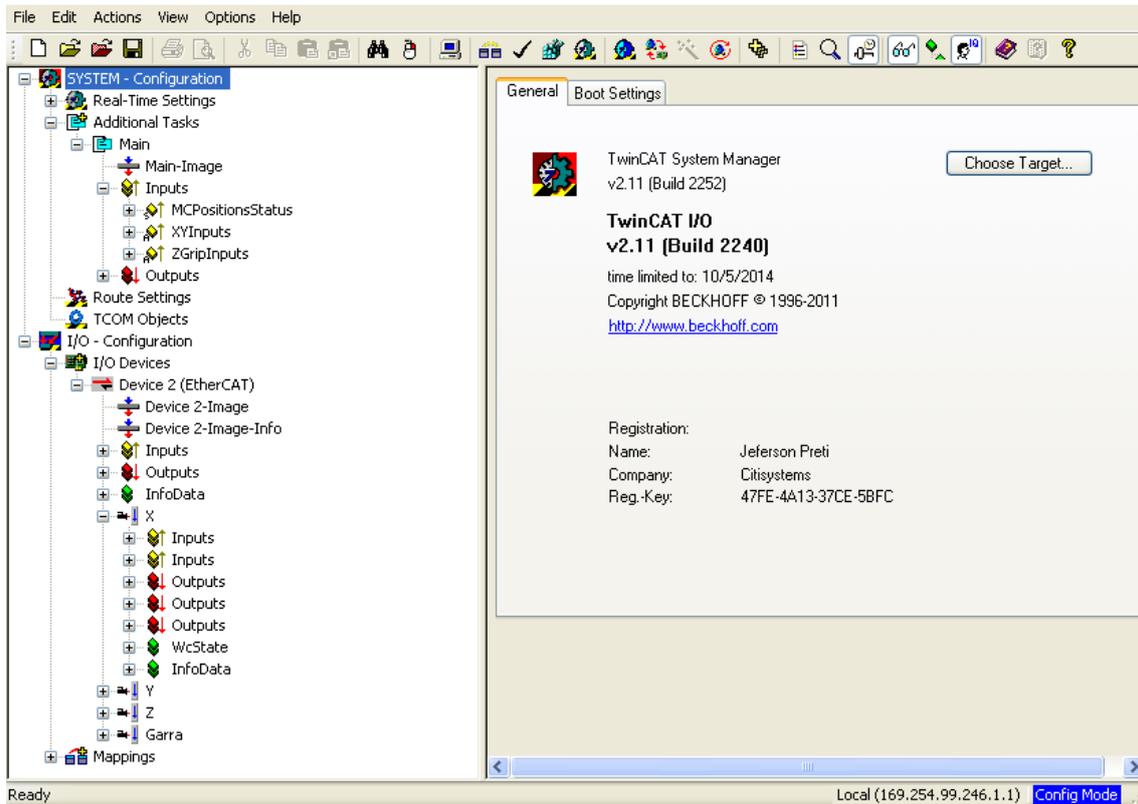
- 1) Sincronismo da comunicação;
- 2) Interface de usuário, para recepção e envio de comandos de status de produção, organização e armazenamento dos vários sistemas de manipulação para os diferentes produtos trabalhados;
- 3) Criação das amostras de posicionamento do trajeto criado pelo usuário, a partir dos pontos primários apontados (*teaching mode*);
- 4) Definição da dinâmica de envio das amostras de posicionamento, considerando as grandezas físicas configuradas na Interface (velocidade, aceleração, desaceleração e jerk);
- 5) Envio sincronizado das amostras para garantir a efetuação correta do movimento;
- 6) Editor e Runtime de PLC para execução dos posicionamentos e acionamento dos elementos de integração da célula (esteiras, garra, etc.).

3.4.2.1 Comunicação

Para o Sincronismo da comunicação EtherCAT (1), optou-se por utilizar um driver chamado TwinCAT® IO da empresa Beckhoff®, conforme mostra a figura 3.16.

Trata-se de um software capaz de criar variáveis de comunicação entre elementos e uma rede EtherCAT, com bibliotecas para acessá-las a partir de diversas linguagens de programação, como C++, C#, Java, Visual Basic e Delphi, o que torna bem vantajosa sua utilização. O custo deste driver pode ser considerado como sendo relativamente baixo, não impactando significativamente no preço final do projeto.

Figura 3.16 - Tela de configuração do TwinCAT IO



Fonte: Próprio Autor.

De todas as funcionalidades descritas, apenas a de sincronismo de comunicação será realizada por um produto de mercado (TwinCAT IO). Todas as outras serão desenvolvidas via linguagem de programação, que deve ser criteriosamente selecionada.

3.4.2.2 Interface

Em função de necessidades de mercado, adotou-se que a interface de usuário deve ser desenvolvida para que seja operada de forma simples e intuitiva. Além de dar acesso ao controle do processo, esta aplicação também terá a função de criar novas formas de manipulação (receitas) e enviar as respectivas informações ao aplicativo controlador.

A configuração de receitas de produção consiste no registro de informações do processo de produção, para que o controle do sistema possa identificar o modo de operação adequado ao trabalho.

Para a definição de uma receita de manipulação, são necessárias as seguintes informações:

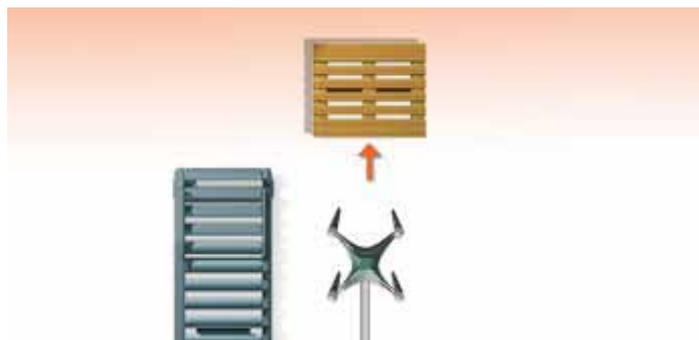
- Características do produto a ser manipulado;
- Características da acomodação que em que o produto será abrigado (ex.: pallet, cesto, caixa, etc.);
- Posição de coleta ou entrega de Linha (região da linha de produção onde o Manipulador fará a coleta ou a entrega do produto);
- Posição de coleta ou entrega de Acomodação (região onde se posicionará a acomodação onde o Manipulador fará a coleta ou a entrega do produto);
- Características do Sistema de Manipulação.

O Sistema de Manipulação se define pelo layout da célula e pelo tipo de garra empregado.

O layout de uma célula pode ser configurado de uma das seguintes formas:

- Montagem de uma acomodação a partir de linha única sem alternância de acomodações: O Robô fará a montagem de uma acomodação a partir de uma linha. Neste modo de trabalho, o processo deverá ser interrompido para a reposição de acomodações, conforme figura 3.17.

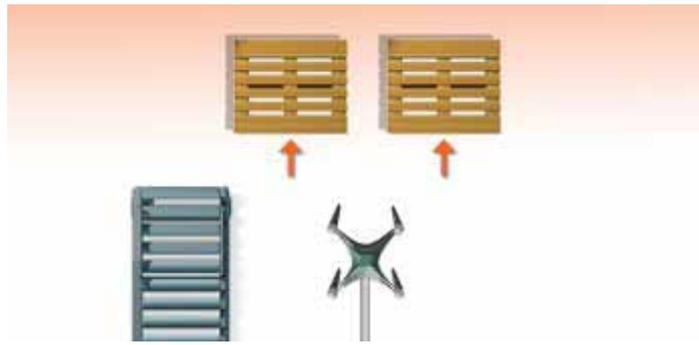
Figura 3.17 - Montagem de uma acomodação por uma linha



Fonte: Próprio Autor

- Montagem de acomodação a partir de linha única com alternância de acomodações: O Robô fará a montagem de uma acomodação de cada vez a partir de uma linha. Dessa forma, é possível repor uma acomodação enquanto o robô trabalha outra, conforme figura 3.18.

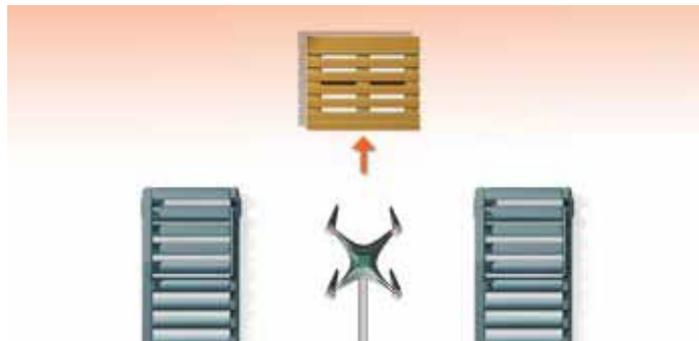
Figura 3.18 - Montagem de acomodação por uma linha com alternância de acomodações



Fonte: Próprio Autor

- Montagem de acomodação a partir de duas ou mais linhas sem alternância de acomodações: O Robô fará a montagem de uma acomodação a partir de duas ou mais linhas, conforme necessidade indicada pelo controlador. Neste modo de trabalho, o processo deverá ser interrompido para a reposição de acomodações, conforme figura 3.19.

Figura 3.19 - Montagem de uma acomodação a partir de duas ou mais linhas

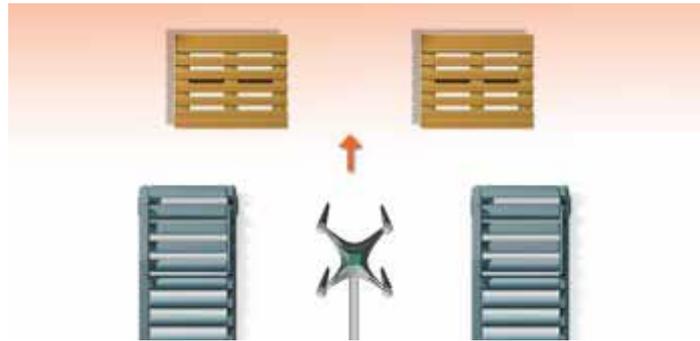


Fonte: Próprio Autor

- Montagem de acomodação a partir de duas ou mais linhas com alternância de acomodações: O Robô fará a montagem uma acomodação de cada vez a partir de duas ou mais linhas, conforme necessidade apontada pelo controlador. Dessa forma, é possível repor uma acomodação enquanto o robô trabalha outra, conforme figura 3.20.

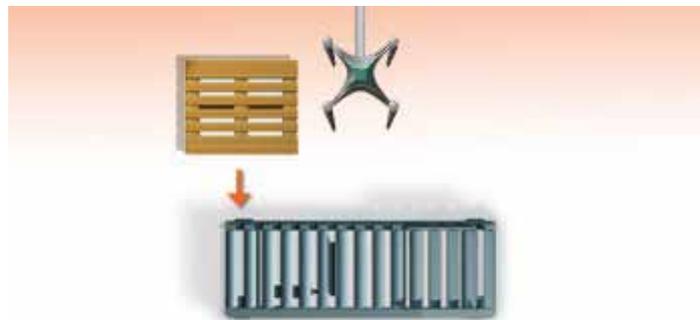
- Alimentação de linha única sem alternância de acomodações: O Robô fará a desmontagem de uma acomodação para alimentação de uma linha. Neste modo de trabalho, o processo deverá ser interrompido para a reposição de acomodações, conforme figura 3.21.

Figura 3.20 - Montagem de acomodação a partir de duas ou mais linhas com alternância de acomodações



Fonte: Próprio Autor

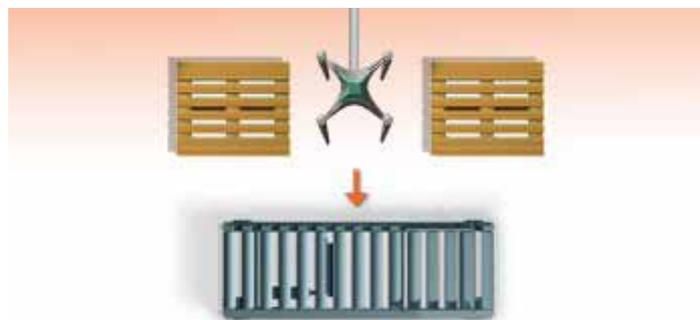
Figura 3.21 - Alimentação de linha única sem alternância de acomodações



Fonte: Próprio Autor

- Alimentação de linha única com alternância de acomodações: O Robô fará a desmontagem de uma acomodação de cada vez para alimentação das linhas. Dessa forma, é possível repor uma acomodação enquanto o robô trabalha outra, conforme figura 3.22.

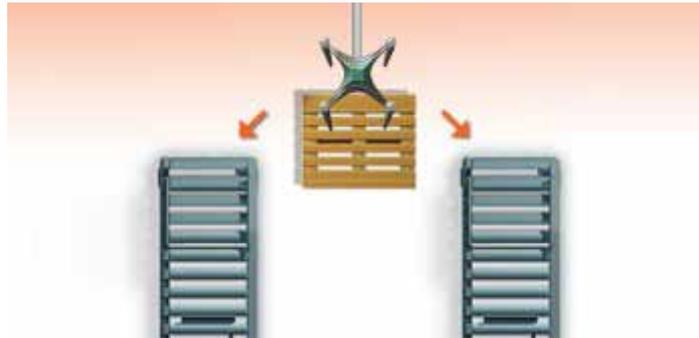
Figura 3.22 - Alimentação de linha única com alternância de acomodações



Fonte: Próprio Autor

- Alimentação de duas ou mais linhas sem alternância de acomodações: O Robô fará a desmontagem de uma acomodação para alimentação de duas ou mais linhas, conforme necessidade apontada pelo controlador. Neste modo de trabalho, o processo deverá ser interrompido para a reposição de acomodações, conforme figura 3.23.

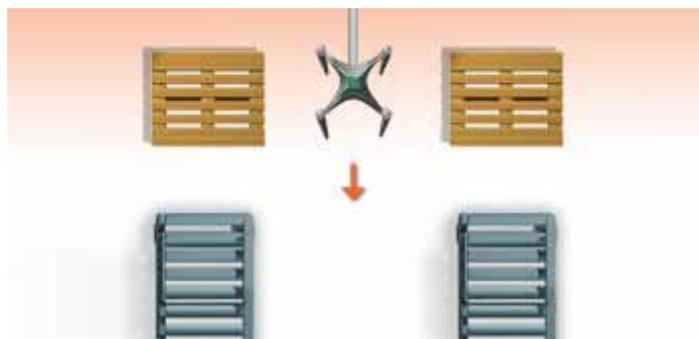
Figura 3.23 - Alimentação de duas ou mais linhas sem alternância de acomodações



Fonte: Próprio Autor

- Alimentação de duas ou mais linhas com alternância de acomodações: O Robô fará a desmontagem uma acomodação de cada vez para alimentação de duas ou mais linhas, conforme necessidade apontada pelo controlador. Dessa forma, é possível repor uma acomodação enquanto o robô trabalha outra, conforme figura 3.24.

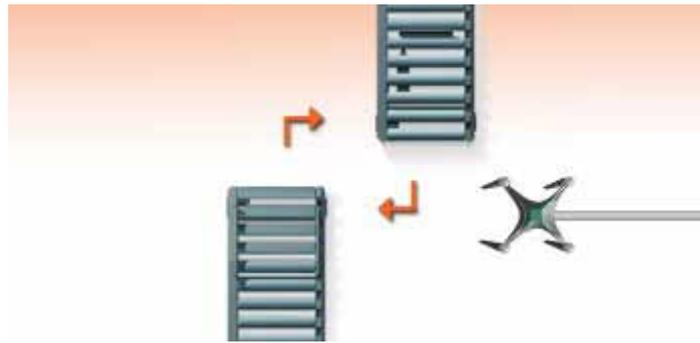
Figura 3.24 - Alimentação de duas ou mais linhas com alternância de acomodações



Fonte: Próprio Autor.

- Transposição entre linhas: O Robô fará a transferência de produtos de uma linha para outra, conforme necessidade indicada pelo controlador, conforme figura 3.25.

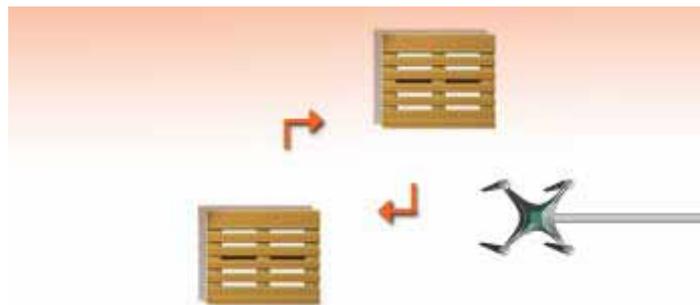
Figura 3.25 - Transposição entre linhas



Fonte: Próprio Autor

- Transposição entre Acomodações: O Robô fará o reposicionamento de uma acomodação para a outra. O início da operação deverá ser ativado manualmente após reposicionamento das acomodações, conforme figura 3.26.

Figura 3.26 - Transposição entre acomodações



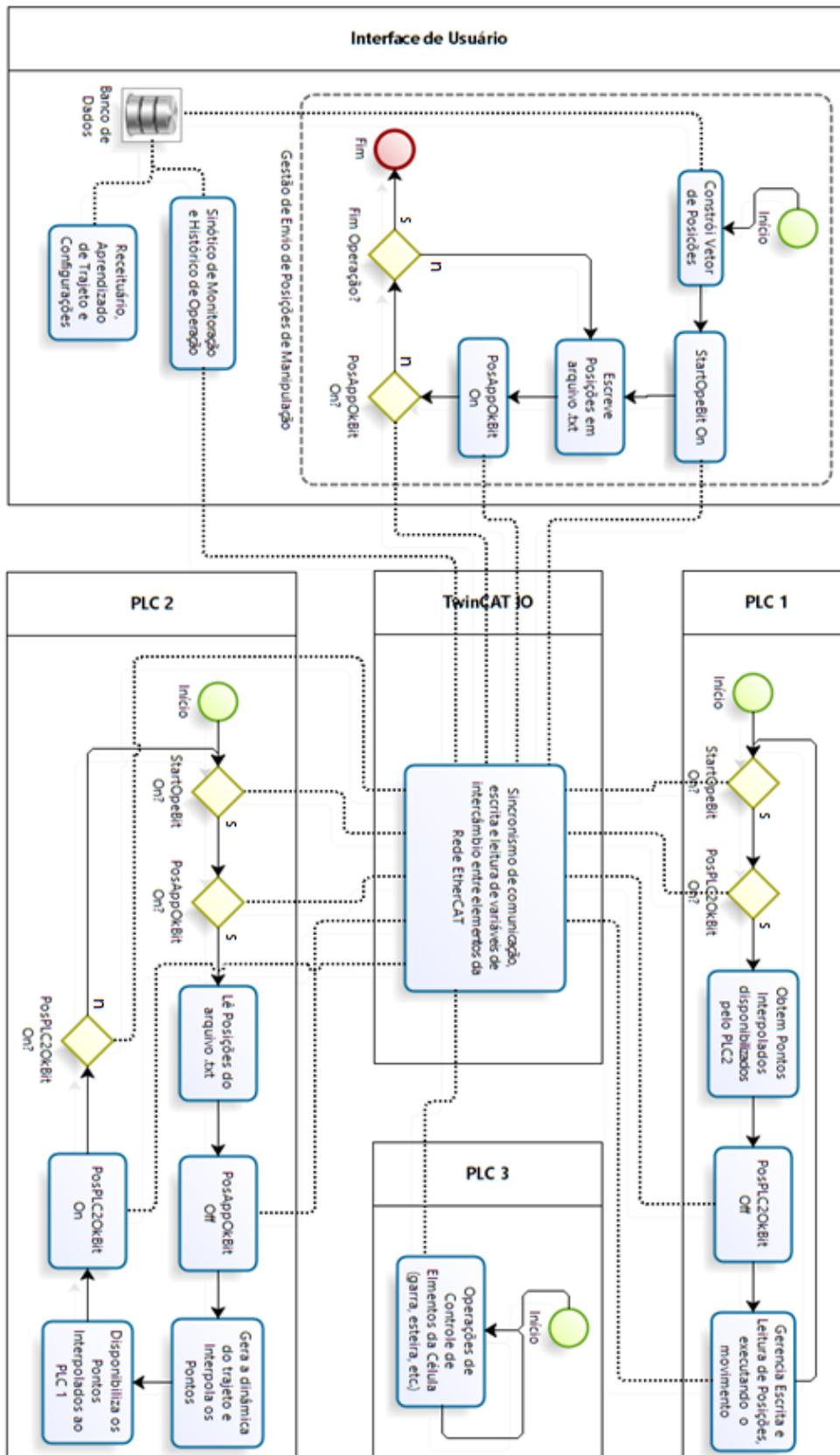
Fonte: Próprio Autor.

3.4.2.3 Gerenciamento

Segue na figura 3.32 um fluxograma que abrange o funcionamento de todas as aplicações componentes do sistema.

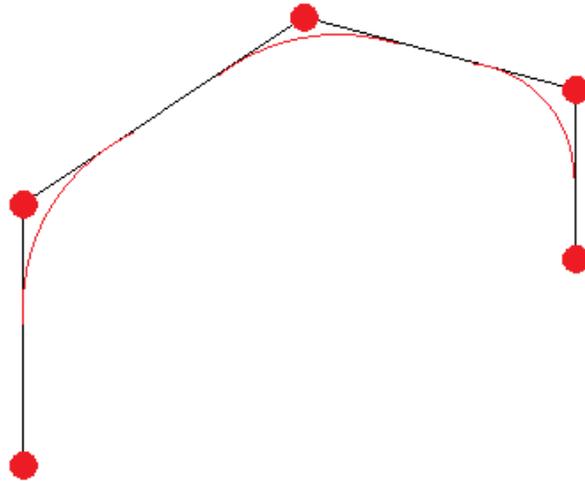
Como visto no capítulo anterior, a interface enviará pontos primários para ao sistema controlador para a devida interpolação do trajeto. Estes pontos serão enviados via escrita em arquivo texto (.txt), e, quando esta escrita estiver pronta, um bit, ativado no TwinCAT IO, alertará o processo PLC 2 de que os dados estão prontos para serem tratados. O PLC 2 por sua vez fará o processamento do trajeto, inserindo pontos orientados por arco nos vértices e definindo a dinâmica ligada a cada ponto do trajeto, conforme é ilustrado na figura 3.33.

Figura 3.32 - Fluxograma de funcionamento do software de controle



Fonte: Próprio Autor

Figura 3.33 - Interpolação dos pontos de entrada com orientação por arcos nos vértices.



Fonte: Próprio Autor

Após a criação da interpolação dos pontos, o PLC 2 disponibiliza estes dados para o PLC 1 via Memory-Mapped File, método bastante eficiente para transferência de dados entre threads [43], para que este possa enviá-los aos respectivos servodrive, executando assim o movimento do Manipulador.

Os processos PLC 1, 2 e 3 serão abertos, para que se refaça a configuração de controle da célula, quando necessário (ex.: acréscimo de componentes, como esteiras, etc).

3.4.3 Definição de linguagem de programação

Como podemos observar, a proposta consiste em se trabalhar com 5 threads atuando independentemente (TwinCAT IO, Interface, PLC 1, PLC 2 e PLC3), onde o principal elo de comunicação entre as threads é o TwinCAT IO, que poderá se conectar às demais aplicações via biblioteca de acesso. Vale lembrar que o TwinCAT IO também fará o acesso de leitura/escrita aos parâmetros de interesse dos servodrive, disponibilizando-os para todas as threads.

Este pequeno demonstrativo evidência de forma clara os requisitos necessários para as devidas implementações, exigindo da linguagem de programação selecionada uma alta capacidade de gerenciamento dos recursos de hardware do PC, haja vista que o sistema deverá compor aplicações de:

- Armazenamento de dados;
- Gerenciamento de threads de execução simultânea (PLCs 1, 2 e 3);
- Métodos matemáticos complexos;
- Acesso a dados via protocolo de comunicação.

Dessa forma, a escolha da linguagem de programação e também dos aplicativos dependentes terá grande impacto no desfecho do projeto. Portanto, foram feitas algumas pesquisas sobre o desempenho, recursos, usabilidade e facilidade de suporte de algumas linguagens de programação.

O sistema operacional foi estabelecido como sendo o Windows, em função do TwinCAT poder ser executado apenas neste sistema operacional. Adicionalmente, as linguagens de programação desenvolvidas pela Microsoft tendem a possuir um melhor desempenho que as de outros fabricantes, como Java, Delphi, entre outras. Somando-se isto à facilidade de suporte e usabilidade, duas linguagens de programação da plataforma Visual Studio® se destacam: C# e C++.

A plataforma Visual Studio trabalha em conjunto com o *framework .NET*, uma espécie de máquina virtual executada em segundo plano, que realiza a interpretação do código pré-compilado para a linguagem de máquina. É de grande utilidade para a instalação de um mesmo projeto em diferentes versões do sistema operacional (um software desenvolvido no Windows 7 pode ser executado no Windows CE, com a instalação da devida versão do .NET), bem como para a utilização de diferentes linguagens da plataforma para um mesmo projeto.

Estes recursos tornaram o *framework .NET* ferramenta padrão de programação para aplicativos do sistema operacional Windows, nas suas diversas versões. Com isso, a gama de recursos disponíveis e também de suporte para soluções de problemas é ampla.

Diante deste panorama, a ideia de se trabalhar com o *framework .NET* pode trazer grandes vantagens ao desenvolvimento do projeto, tais como:

- Facilidade de acesso à suporte para soluções de problemas;
- Facilidade em se conseguir componentes para as diversas necessidades da aplicação, como drivers de comunicação com hardwares e outros aplicativos, plug-ins de recursos visuais, etc.;
- Alta produtividade;
- Robustez assegurada no sistema operacional Windows.

Porém, em uma primeira análise, para uma aplicação em que se deseja trabalhar com o maior desempenho possível, a ideia de se utilizar uma aplicação paralela, consumindo recursos do computador (como é o caso do framework .NET) soa de forma pouco otimista.

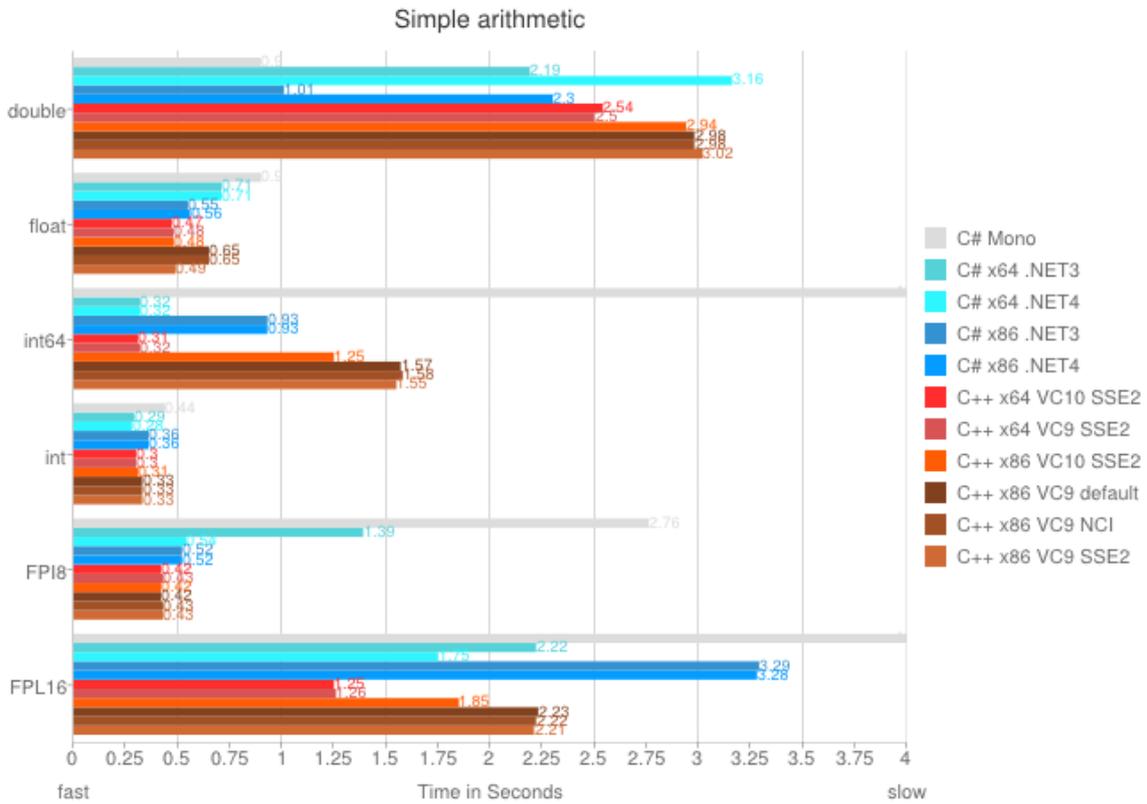
Dentro da plataforma Visual Studio, apenas a linguagem C++ pode ser trabalhada de forma a compilar o código diretamente para a linguagem de máquina (código não gerenciado). As outras linguagens da plataforma utilizam um pré-compilador, que torna o código interpretável para o framework .NET, que por sua vez, efetua a conversão para a linguagem de máquina do respectivo sistema operacional.

A linguagem C++ é uma derivação da linguagem C para programação orientada a objeto [44], e tem também utilização bastante difundida. Porém, ao se trabalhar em C++ em código não gerenciado, perde-se bastante em produtividade, já que a implementação de recursos visuais e de comunicação com outros aplicativos é mais complicada, quando comparada à utilização do framework .NET.

Como o ganho de produtividade com o framework .NET é evidente, pela ampla gama de componentes disponíveis e pelo fácil acesso a suporte, a escolha da linguagem fica a cargo da avaliação dos reais ganhos obtidos em desempenho, utilizando-se a linguagem C++.

O melhor estudo encontrado a respeito desta avaliação é apresentado em um artigo do site de colaboração entre programadores Code Project [45]. O estudo consiste em se medir o tempo gasto para a realização de operações idênticas implementadas nas linguagens C#, .NET e no código não gerenciado C++ , conforme ilustra a Figura 3.34.

Figura 3.34 - Gráfico de tempo dispendido entre as linguagens C# e C++ para a execução da mesma operação aritmética



Fonte: Head-to-head benchmark: C++ vs .NET [45]

Como descrito anteriormente, o software proposto deve ser capaz de tratar os dados de trajeto, inseridos pelo usuário, e enviá-los para a rede EtherCAT em um intervalo criteriosamente fixo e curto. Para desempenhar este papel, o software deverá executar operações aritméticas cíclicas de preparação do trajeto (para que se obtenha o melhor perfil dinâmico do mesmo, respeitando-se as grandezas determinantes informadas pelo usuário) em tempo hábil para início do desenvolvimento do trajeto e enviar as posições para a rede, efetuando a leitura do estado dos drives e respectivas posições para tratativas de redefinição das ações de envio, dentro do intervalo pré-definido.

Tais operações são baseadas em aritmética simples e métodos numéricos iterativos. Dessa forma, a aplicação mais crítica do sistema se enquadra muito bem nos exemplos “Simple Arithmetic” e “Square Root” apresentados em [45].

Apesar de o autor do artigo destacar categoricamente que os resultados podem sofrer variações diversas dependendo do estado do sistema operacional e modos de escrita do código, estes pequenos testes dão uma clara noção de que, para a aplicação proposta, não haverá grandes perdas de desempenho na utilização do C# .NET em relação ao C++ com código não gerenciado. E o ganho de produtividade é enorme na primeira opção.

Portanto, diante destas análises, definiu-se como melhor opção para o desenvolvimento do sistema a linguagem de programação C# .NET.

4 Protótipo do robô e validação experimental

4.1 Montagem

O painel de comando foi montado de forma a possibilitar a conexão das saídas digitais dos servodrives a dispositivos externos (por interface a relé), que serão controladas pela *thread PLC3*. As ligações de energia elétrica e as de realimentação entre o servodrive e servomotores são realizadas por meio de cabos blindados de forma direta, sem seccionamento por bornes ou tomadas, pois estes podem atenuar os erros de leitura da realimentação devido a possíveis efeitos causados por interferências eletromagnéticas.

Os elementos da estrutura foram divididos em dois grupos: usinagem e corte/dobra. Tais peças foram produzidas por prestadores de serviço do setor, e foram entregues conforme definido em projeto. A montagem realizada de forma satisfatória, com poucos desvios em relação ao projeto inicial. A figura 4.2 mostra uma foto de montagem do painel elétrico.

Figura 4.1- Foto de evidenciando a montagem do painel



Fonte: Próprio Autor

As Figuras 4.2 a 4.4 mostram fotos do protótipo ilustrando a estrutura metálica, a montagem do eixo de movimentação X e do eixo de movimentação Y e Z, respectivamente.

Figura 4.2 - Foto da estrutura montada



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.3 - Foto de montagem do eixo de movimentação X



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.4 - Foto de montagem dois eixos de movimentação Y e Z



Fonte: Próprio Autor

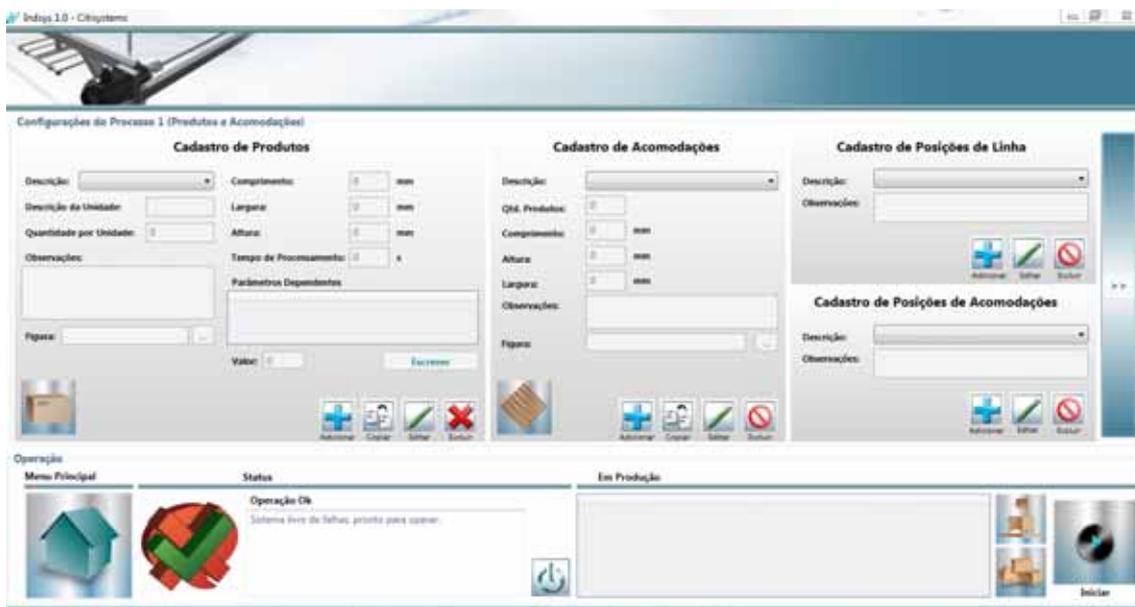
4.2 Interface

A Interface é o ambiente de configuração do sistema, onde serão definidos os pontos iniciais de cada trajeto, bem como as configurações de dinâmica do sistema. Estes dados são a base do cálculo dos perfis de trajetória, e são obtidos a partir de cadastros efetuados pelo usuário em telas de configuração da Interface.

O primeiro cadastro necessário é o de “Produtos”, onde são informadas as características do produto. Em seguida, efetua-se o cadastro das “Acomodações” (pallets, cestos, caixas, etc.) onde serão depositados os produtos, as “Posições de Linha” que são as posições de coleta do produto (como esteiras, saída de máquina, etc.) e as “Posições de Acomodações”, que são as posições onde as acomodações estarão localizadas (indexadores, magazines, etc.).

A tela de cadastro destes dados pode ser visualizada na figura 4.5.

Figura 4.5 - Tela de cadastro de “produtos”, “acomodações”, “posições de Linha” e “posições de acomodações”



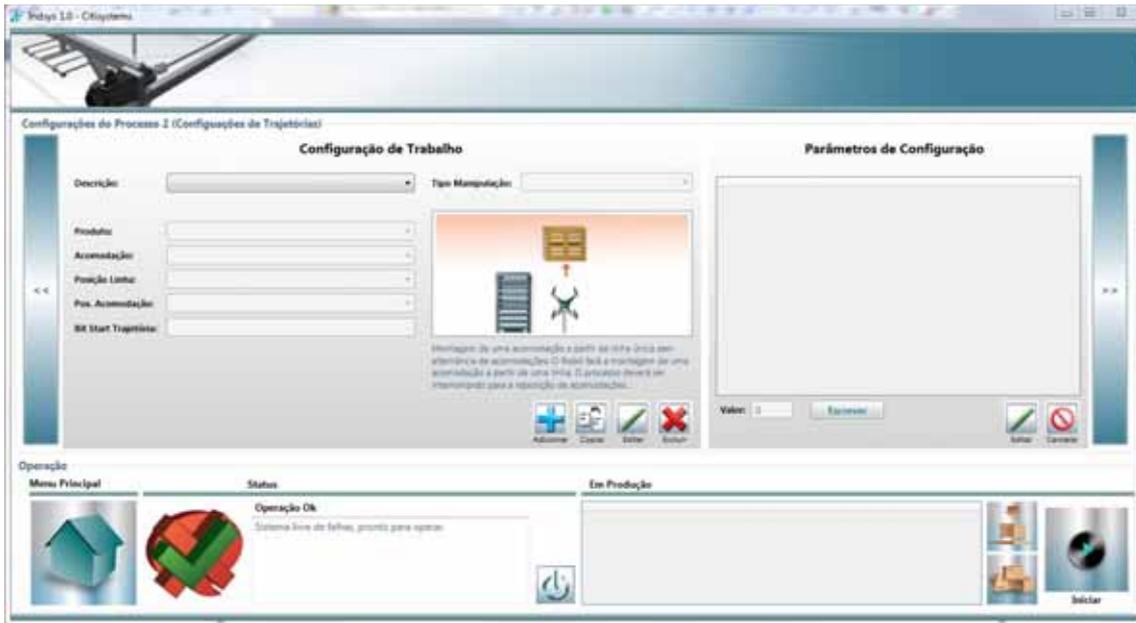
Fonte: Próprio Autor

Estes dados serão combinados no cadastro de “Configurações de Trabalho”, de modo que cada combinação defina um ciclo de manipulação para Produto, Acomodação, Posição de Linha e Posição de Acomodação específica. A esta combinação, pode ser associado também a descrição do bit (no TwinCAT IO) que define o início de trajetória deste sistema (como o bit que determina a chegada de um produto à posição de pegada).

Dessa forma, quando a célula estiver operando, sempre que o bit com a descrição informada for ativado, então o software irá reconhecer que se trata do devido ciclo de manipulação. A tela de cadastro das Configurações de Trabalho pode ser visualizada na figura 4.6 e a tela de “Configurações Avançadas” está sendo mostrada na figura 4.7.

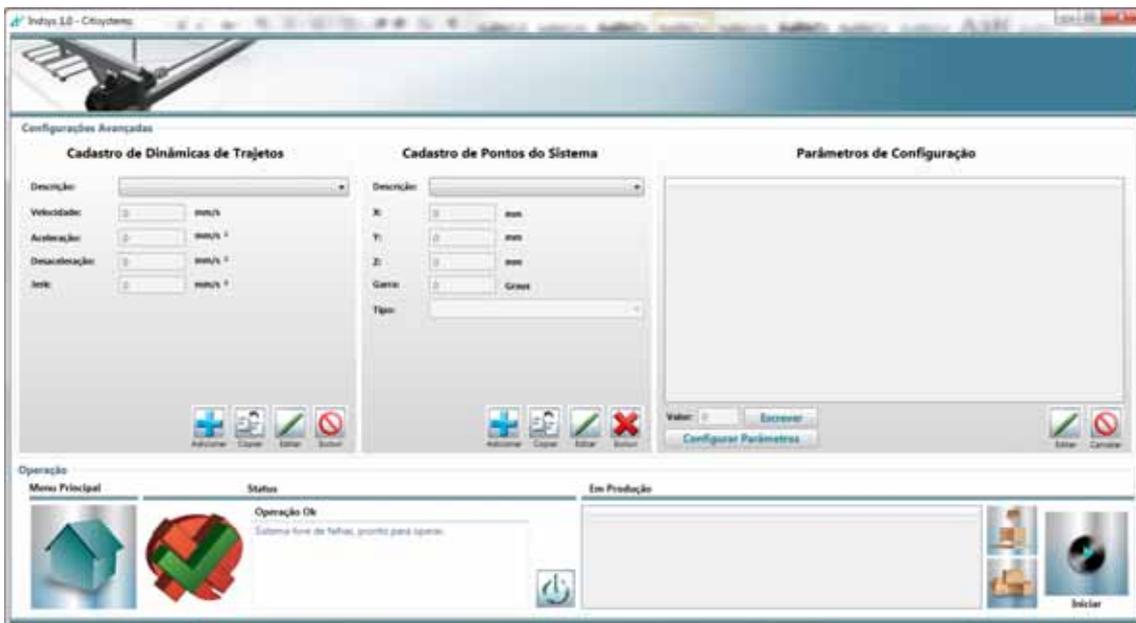
Na tela de “Configurações Avançadas” podem-se cadastrar várias características dinâmicas, combinando-se Velocidade, Aceleração, Desaceleração e Jerk. Estas dinâmicas podem ser associadas aos trajetos com as Configurações de Trabalho cadastradas.

Figura 4.6 - Cadastro de “configurações de trabalho”



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.7 - Tela de configurações avançadas do processo

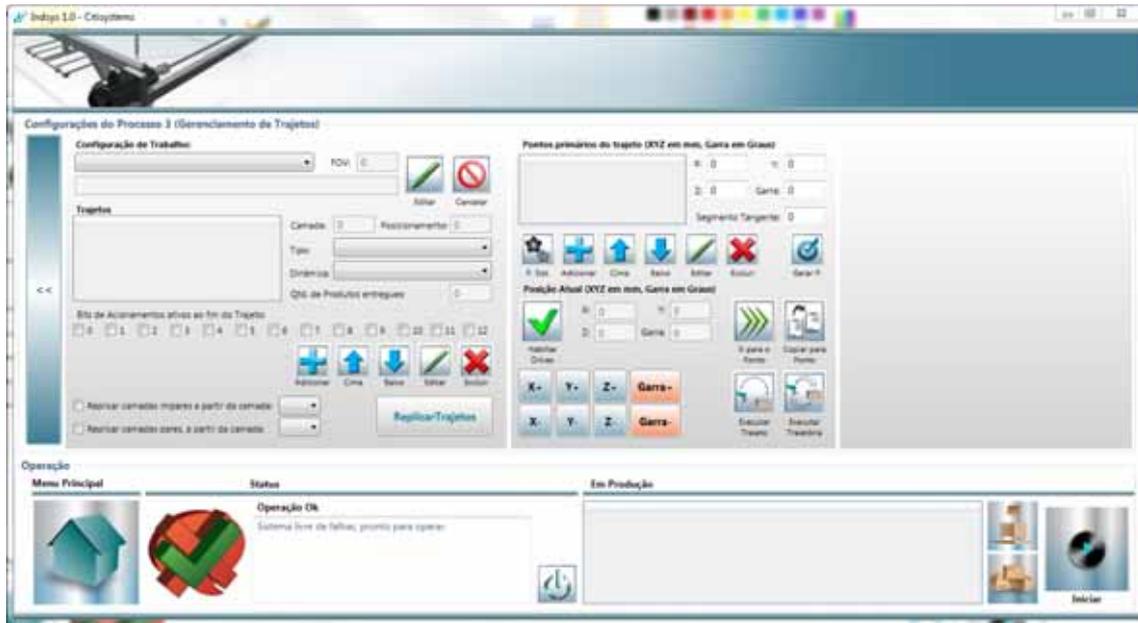


Fonte: Próprio Autor

Os trajetos também podem compartilhar “Pontos do Sistema”, que são estrategicamente criados de modo a facilitar o cadastro de trajetos.

A tela de cadastro de trajetos para cada configuração de trabalho pode ser visualizada na figura 4.8.

Figura 4.8 - Cadastro de trajetos de configurações de trabalho



Fonte - Próprio Autor

Como pode ser observado, para cada trajeto, que é exibido como uma linha da tabela apresentada na figura 4.9, pode-se associar:

Figura 4.9 - Tabela que irá acomodar os registros de trajetos, ordenados de cima para baixo

Trajeto

Fonte: Próprio Autor

- Camada, Posicionamento: Identificador de local de posicionamento produto. Pode ser utilizada da forma que se queira, mas em um exemplo de paletização, a figura 4.10 abaixo destaca um produto na camada 2, posicionamento 1.

Figura 4.10 - Localização de produto



Fonte: Próprio Autor

- Tipo: Para fins de organização, cada trajeto pode ter um tipo associado. São eles: Entrega (depósito de Produto na Acomodação), Segunda Entrega (depósito de segundo Produto na Acomodação), Terceira Entrega (depósito de terceiro Produto na Acomodação), Quarta Entrega (depósito de quarto Produto na Acomodação), Entrega para Busca (volta do manipulador para nova pegada), Entrega para Ready (volta do manipulador para posição de espera de Produto), Ready para Busca (movimentação de pegada do Produto a partir da posição de espera), Segunda Busca (busca de segundo Produto na Linha), Terceira Busca (pegada de terceiro Produto na Linha), Quarta Busca (pegada de quarto Produto na Linha);

- Dinâmica: Característica dinâmica do trajeto (Velocidade, Aceleração, Desaceleração e Jerk);

- Quantidade de Produtos entregues: Quantidade de produtos que será depositada no trajeto;

- Bits de Acionamentos ativos no fim do Trajeto.

Nesta tela encontram-se alguns recursos para criação de outros trajetos a partir de trajetos base. O comando replicar efetua a reestruturação de trajetos onde seja necessária a colocação de Produtos em camadas, como no caso de pallets. A organização de um pallet obedece a critérios de resistência à movimentação, para que o mesmo não se desmonte no transporte.

Esta organização, também chamada de amarração, geralmente é definida de modo que as camadas pares sejam dispostas de forma diferente das camadas ímpares. A figura 4.11 mostra um exemplo de organização de um pallet, onde é possível observar que as camadas ímpares contêm uma disposição semelhante entre si, mas diferente das camadas pares.

Figura 4.11 - Organização (amarração) de um pallet

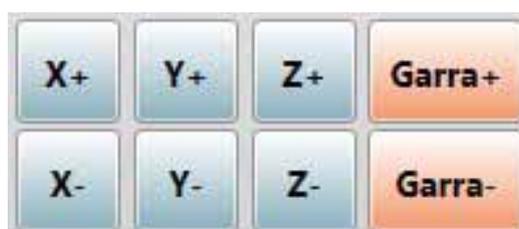


Fonte: Modificada pelo Autor

Dessa forma, se os trajetos da camada 1 estão definidos, este trajeto pode dar origem a outros trajetos de camadas ímpares, como ilustrado no exemplo da figura 4.11, para as camadas 3 e 5. O mesmo se aplica às camadas pares. Esta replicação se dá através da preservação das coordenadas X e Y e alteração da coordenada Z dos pontos diretamente ligados à entrega do Produto na Acomodação, para cada trajeto.

Os pontos primários podem ser adicionados através do posicionamento manual do robô utilizando os botões apresentados na figura 4.12, e registro da posição através do botão “Copiar para Ponto”.

Figura 4.12 - Botões de movimentação manual do manipulador

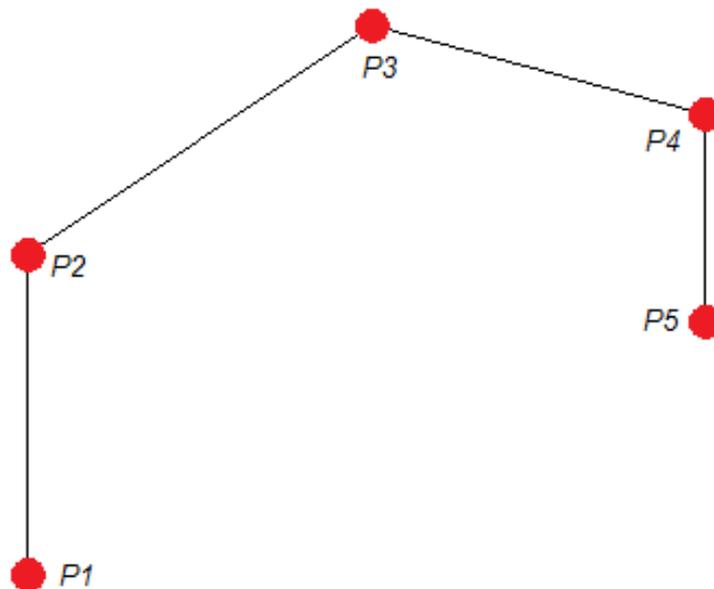


Fonte: Próprio Autor

A adição de um ponto também pode ser efetuada através da seleção de um ponto do sistema, a partir do botão “P. Sist.”. A função “Gerar P.” Pode gerar os pontos de desvio de direção a partir dos pontos de Início e Fim, considerando um acréscimo em Z, da altura do Produto, em cada um desses pontos para a criação de outros dois pontos intermediários: um logo acima do ponto de Início e outro logo acima do ponto de Fim.

Um trajeto será formado através do apontamento de pontos de início, desvios de direção e fim, como demonstrado na figura 4.13.

Figura 4.13 - Definição de pontos primários

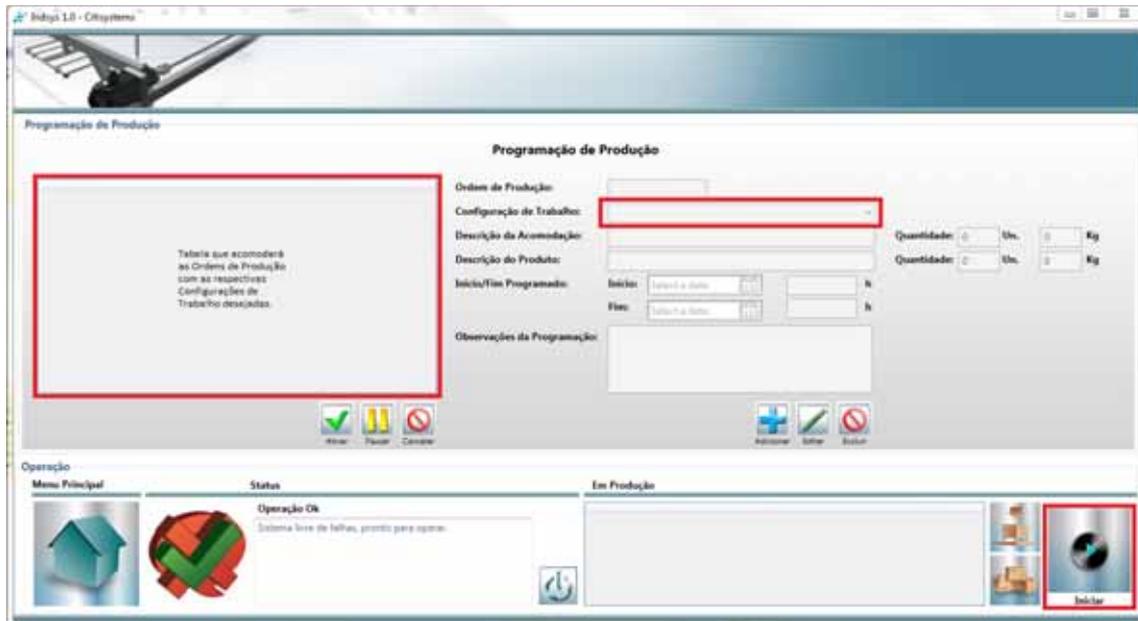


Fonte: Próprio Autor

Conforme observado na figura 4.13, o trajeto em questão foi inicialmente formado por 5 pontos cartesianos. P1 (X_1, Y_1, Z_1) define o início do trajeto, e P5 (X_5, Y_5, Z_5) define o fim. P2, P3 e P4 são pontos que caracterizam desvio de direção da movimentação. Cada trajeto pode ter sua própria característica dinâmica, que é cadastrada na tela de configurações avançadas do processo (figura 4.7).

O início da operação de manipulação se dá a partir da seleção das Configurações de Trabalhos desejadas e consequente pressionamento do botão “Iniciar”, como descrito na figura 4.14.

Figura 4.14 - Criação de ordens de produção e consequente seleção de Configurações de Trabalho



Fonte: Próprio Autor

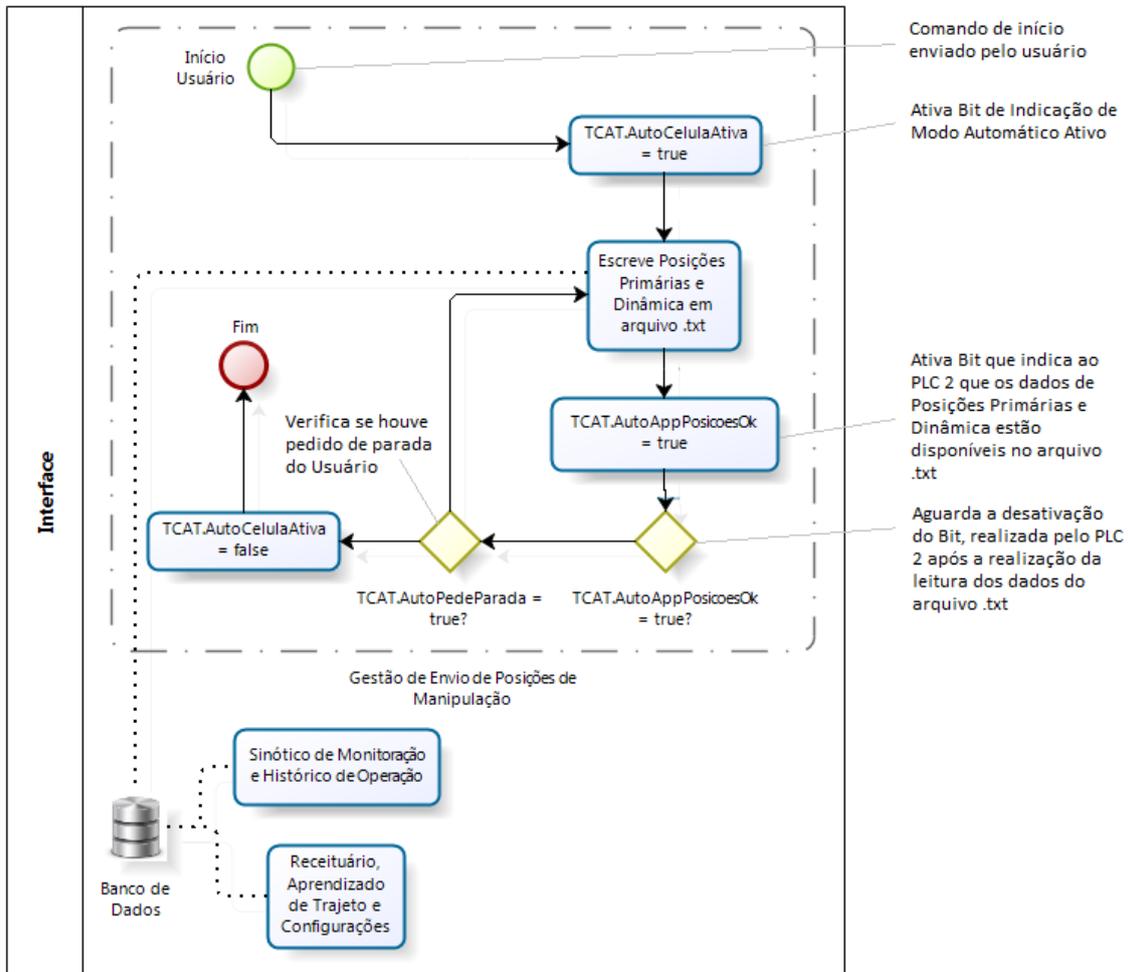
Além do gerenciamento dos dados, é também papel da Interface gerenciar o envio de dados de trajeto para a thread responsável pela criação dos perfis de trajetória (no caso o PLC 2). Este envio deve ser realizado respeitando-se a ordem com que os trajetos foram cadastrados.

A comunicação entre as threads é estabelecida através da leitura de um arquivo de texto, salvo com a extensão “.txt”. A escrita deste arquivo texto de transferência de dados da Interface para o PLC 2 ocorre no início da operação e quando existe um pedido de escrita do PLC 2. No início da operação a Interface efetua a escrita e ativa um bit no driver de comunicação TwinCAT® IO para indicação de dados disponíveis (TCAT.AutoAppPosicoesOk).

Quando o PLC 2 detecta a ativação deste bit, então o mesmo realiza a aquisição dos mesmos e desativa o bit TCAT.AutoAppPosicoesOk. Neste momento a Interface reconhece a necessidade da criação da próxima carga de dados. O PLC 2 é a thread responsável pelo cálculo do perfil de trajetória. Os dados de construção dos perfis (pontos primários e os dados de dinâmica) são fornecidos pela Interface. Após a aquisição destes dados, o PLC 2 realiza os cálculos de construção do perfil e disponibiliza os dados calculados à thread PLC 1, através de um recurso de compartilhamento de dados entre processos do Windows nomeado Memory Mapped File [32].

O PLC 1, por sua vez, é responsável pelo envio cadenciado destes dados aos servodrives (a partir do driver de comunicação TwinCAT IO).

Figura 4.15 - Fluxograma de funcionamento da *thread* da interface

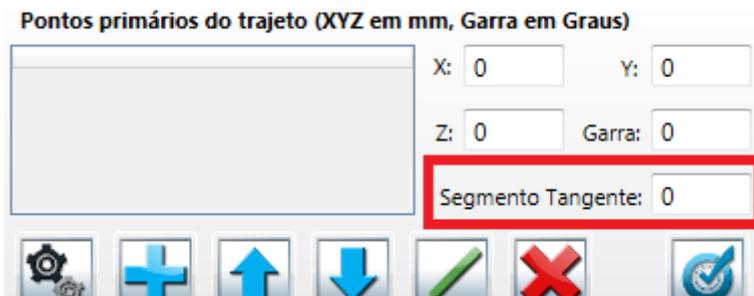


Fonte: Próprio Autor

Para a realização da determinação do perfil de trajetória algumas etapas de processamento devem ser efetuadas.

1) Criação de Arcos nos pontos de desvio de direção: Considerando a figura 4.13, têm-se cinco pontos formadores do trajeto, sendo que 3 deles são de desvio de direção. Estes pontos deverão substituídos por um arco de suavização de trajetória. Além das coordenadas dos pontos anterior e posterior ao ponto de desvio trabalhado, outra grandeza necessária para a definição deste arco é o “Segmento Tangente”, observado na figura 4.16.

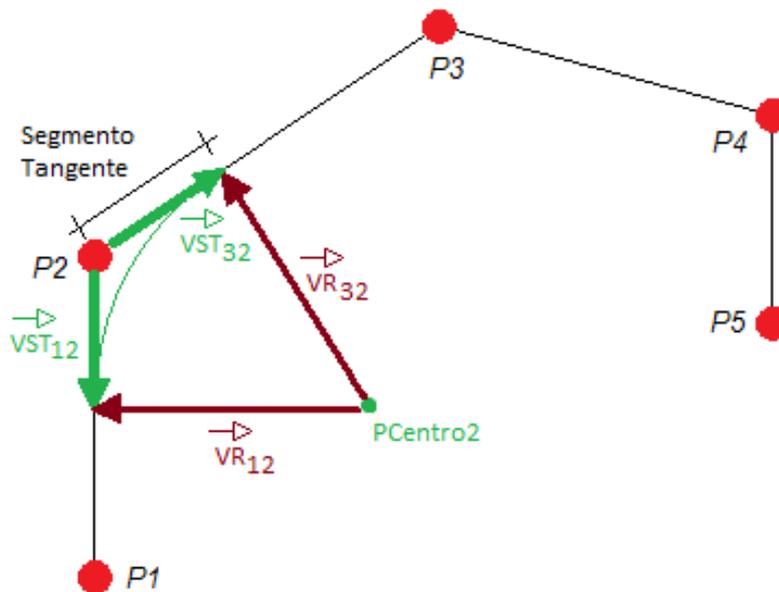
Figura 4.16 - Entrada de segmento tangente associado a pontos de desvio de direção



Fonte: Próprio Autor

A criação dos arcos é realizada utilizando a metodologia demonstrada na figura 4.17.

Figura 4.17 - Demonstração do arco criado no ponto P2



Fonte: Próprio Autor

Conforme a figura 4.17, o arco tem como ponto central o ponto de intersecção entre os vetores VR_{12} e VR_{32} . Estes vetores partem da ortogonalidade entre os respectivos vetores VST e se posicionam no plano formado pelos vetores VST_{12} e VST_{32} , que têm comprimento = Segmento Tangente de entrada. O ângulo do arco é o definido pelo ângulo entre os vetores VR_{12} e VR_{32} .

2) Interpolação linear e circular dos pontos componentes do trajeto:

O perfil de trajetória é criado a partir de uma definição da dinâmica do trajeto, que segue as seguintes premissas:

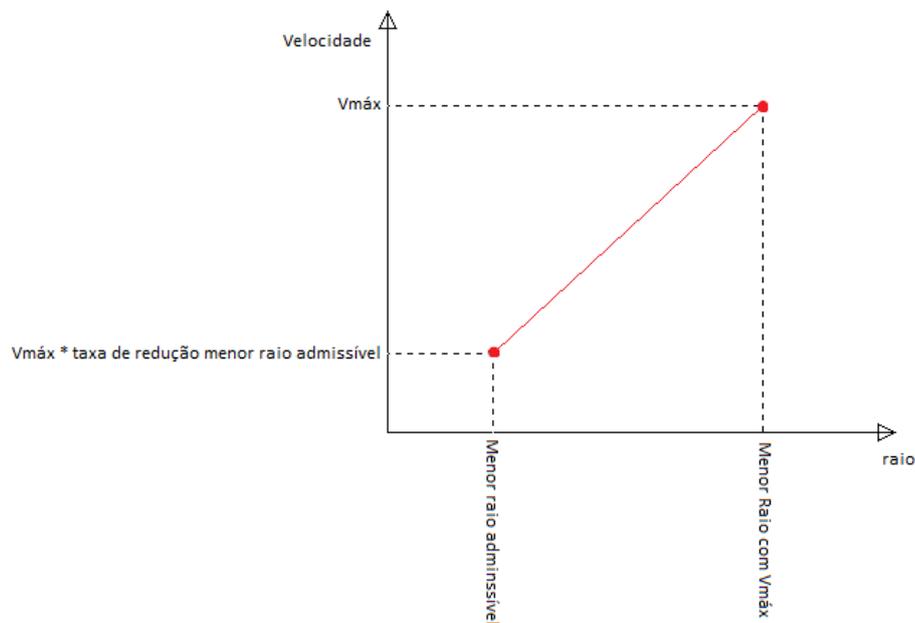
- O início do trajeto sempre se inicia com Velocidade (V) = 0, Aceleração (a) = 0 e Jerk (j) constante > 0 ;
- Trechos lineares do trajeto são tratados com aceleração/desaceleração uniformemente variável ($j > 0$), até que se atinja a aceleração máxima (momento em que $j = 0$) ou a velocidade máxima (momento em que $a = 0$);
- Trechos em arco são tratados com velocidade constante, sendo que esta velocidade obedece a critérios de variação de acordo com o raio do arco:

O menor raio do arco que pode ser tratado com a velocidade máxima definida deve ser informado na região de “Parâmetros de Configuração” da figura 4.8;

O menor raio admissível para arcos também é informado na região de “Parâmetros de Configuração”, bem como a taxa de redução da velocidade máxima que pode ser desenvolvida para este arco;

A equação da reta apresentada na figura 4.18 é utilizada para definição da velocidade aplicada em cada arco do trajeto.

Figura 4.18 - Reta que define a velocidade constante aplicada em cada arco do trajeto

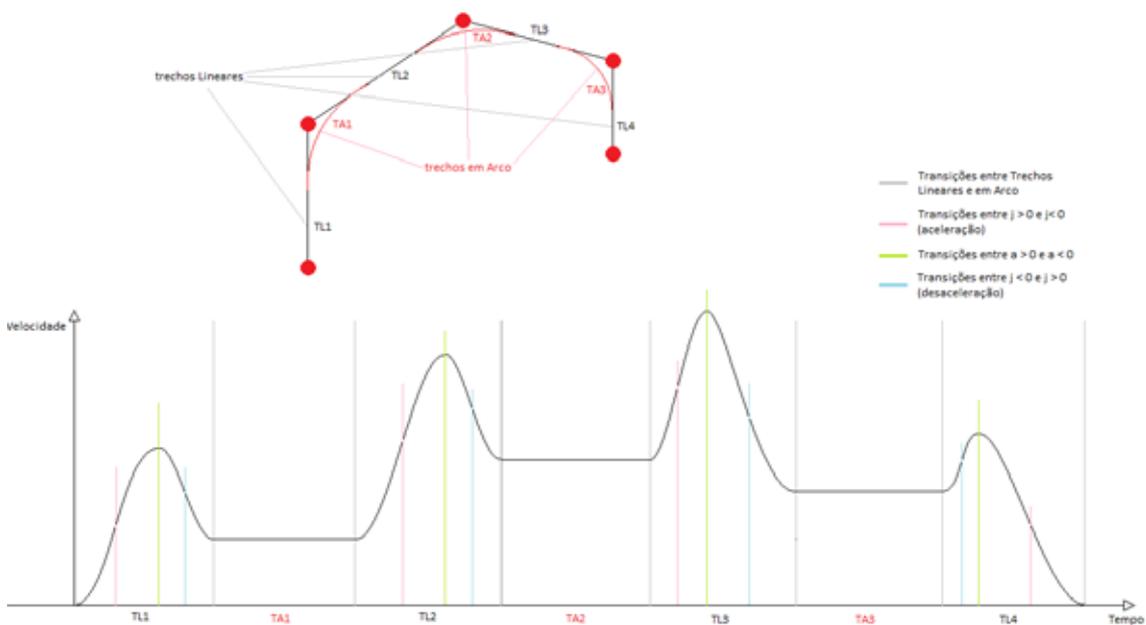


Fonte: Próprio Autor

Os cálculos de interpolação dos pontos devem ser realizados com o principal objetivo de se determinar que o devido trajeto seja percorrido no menor tempo possível, respeitando-se os dados de dinâmica e premissas descritos anteriormente.

Sendo assim, para o exemplo de pontos primários da figura 4.17, o perfil de trajetória calculado deverá ter o comportamento velocidade versus o tempo como segue na figura 4.19.

Figura 4.19 - Comportamento esperado pelo processo de cálculo iterativo de perfis de trajetória.



Fonte: Próprio Autor

O processo de construção do perfil analisa, de forma iterativa, por quanto tempo pode ser aplicado o acréscimo de velocidade em trechos lineares para que, ainda no desenvolvimento desse trecho linear, se obtenha uma etapa de decréscimo de velocidade para que, ao final do trecho linear, a velocidade seja a mesma configurada para o trecho circular.

Criado o perfil de trajetória, o mesmo é enviado para a thread PLC 1 para que a mesma envie as posições para os servo drives na cadência desejada (melhor evidenciada nos testes experimentais).

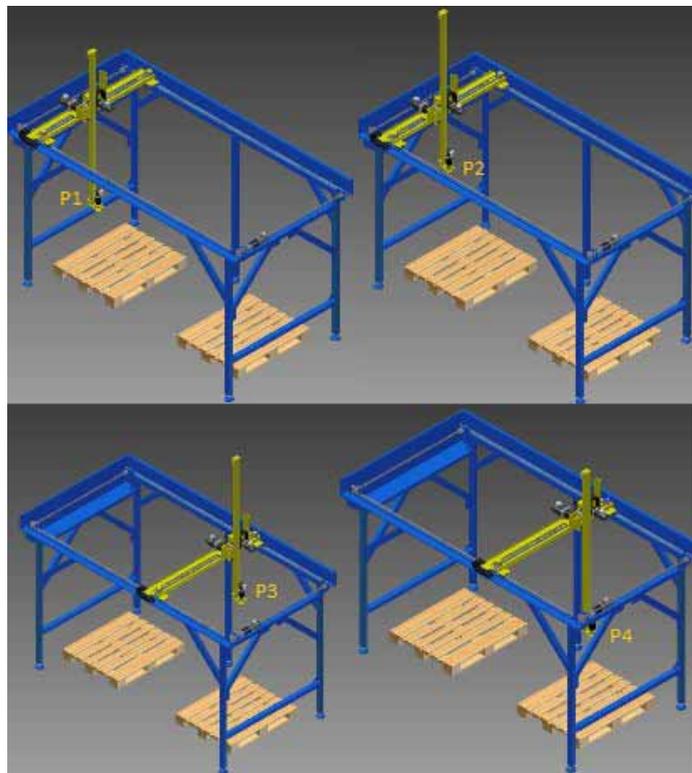
4.3 Testes experimentais

Com o objetivo de demonstrar e ratificar a operação do protótipo do robô proposto, alguns testes experimentais foram realizados. Para a realização dos testes experimentais definiu-se um caso de estudo envolvendo um movimento característico de deslocamento de ida e retorno de produto usualmente encontrado nas áreas de aplicação pretendidas para o protótipo. Adicionalmente, foram consideradas duas situações de carregamento, com carga nominal de 30Kg e a vazio, e com as trajetórias sendo geradas considerando interpolação e movimento direto.

Desta forma, o caso de estudo foi definido como sendo a realização da movimentação do manipulador seguindo os seguintes pontos primários, em coordenadas cartesianas do cubo de paletização: $P1 = (100, 400, 600)$, $P2 = (100, 400, 1200)$, $P3 = (2000, 1000, 1200)$ e $P4 = (2000, 1000, 800)$.

A figura 4.20 apresenta a posição do manipulador para cada um dos pontos primários definidos. Os testes foram efetuados considerando o deslocamento do ponto P1 para P4 e também o deslocamento no sentido de P4 para P1.

Figura 4.20 - Posicionamento do robô em cada ponto primário dado



Fonte: Próprio Autor

Além disso, informa-se que os testes foram realizados considerando a carga acoplada diretamente ao eixo, devido a não existência do dispositivo de manipulação do produto (garra).

Os testes foram separados por modos de movimentação para efeito de comparação: Movimentação Interpolada (com ação direta do software de criação de perfis de trajetória e envio cadenciado) e Movimentação Direta (com o movimento linear entre os quatro pontos).

Para cada tipo de movimentação, foram sendo alteradas as características dinâmicas do movimento e se registrando o comportamento de grandezas do drive Z, ligadas ao consumo energético e ao controle de malha. Este registro foi realizado através da coleta de dados internos do Servodrive da Kollmorgen.

As grandezas registradas foram divididas em variáveis de energia e variáveis de cinemática, considerando a existência de uma variável em comum para manter a referência de tempo entre os conjuntos dos dados. Adotou-se o comando de velocidade como sendo esta variável comum.

As grandezas registradas no conjunto da Energia foram:

- Comando de velocidade [RPMs];
- Potência dissipada no resistor de regeneração [Watts];
- Tensão no barramento CC (entrada no servodriver) [Volts];
- Corrente de entrada no servodriver [A];
- Corrente instantânea no enrolamento U do servomotor [A];
- Tensão instantânea no enrolamento U do servomotor [Volts];

As grandezas registradas no conjunto de cinemática foram:

- Velocidade comandada [RPMs];
- Realimentação de velocidade em [RPMs];
- Comando de posição [mm];
- Realimentação de posição [mm];
- Comando de aceleração [RPMs/s];
- Erro de posição [mm];

Para efeito de comparação, os resultados serão exibidos considerando a classificação por casos de configurações dinâmicas para os dois tipos de elaboração de trajetória (interpolada e direta), no trajeto de ida e de retorno, e, considerando duas situações de carga para cada caso (a vazio e com carga de 30Kg).

A elaboração da trajetória interpolada foi analisada considerando uma taxa de amostragem de 20ms para a construção dos pontos de referência e as configurações cinemáticas informadas na Tabela 4.1. A tabela 4.2 apresenta as configurações cinemáticas empregadas para a elaboração das trajetórias nos casos de movimentação direta.

Tabela 4.1 - Dados das configurações cinemáticas empregadas nos casos de movimentação interpolada.

Casos	I1	I2	I3
Velocidade máxima V_{max} (mm/s)	1500	2000	2000
Aceleração máxima a_{max} (mm/s ²)	1500	3000	3000
Jerk (mm/s ³)	1500	3000	4500

Fonte: Próprio Autor

Tabela 4.2 - Dados das configurações cinemáticas empregadas nos casos de movimentação direta.

Casos	D1	D2	D3
Velocidade máxima V_{max} (mm/s)	400	1000	1500
Aceleração máxima a_{max} (mm/s ²)	400	1000	1500

Fonte: Próprio Autor

Os resultados experimentais obtidos para o sistema de acionamento do eixo Z do robô possuindo uma carga acoplada de 30Kg e realizando as movimentações relacionadas com os trajetos definidos de P1 para P4 e de P4 para P1 considerando os casos de movimentação direta e interpolada D1 e I1 são apresentados nas figuras de 4.21 até 4.24, onde o eixo horizontal está delimitado em milissegundos (ms).

As figuras 4.21 e 4.22 demonstram através das curvas das potências dissipadas na resistência de regeneração que a realização dos movimentos finais de descida e parada no ponto de referência, onde o sistema possui energia relacionada com a energia cinética do movimento ação da gravidade, causa uma elevação do barramento de alimentação.

A elevação do barramento de alimentação pode alcançar valores superiores aos permitidos para a operação dos sistemas de acionamento.

Desta forma, um processo de frenagem dissipativa foi empregado no sistema de forma a manter a amplitude de tensão dentro dos valores permitidos para operação segura.

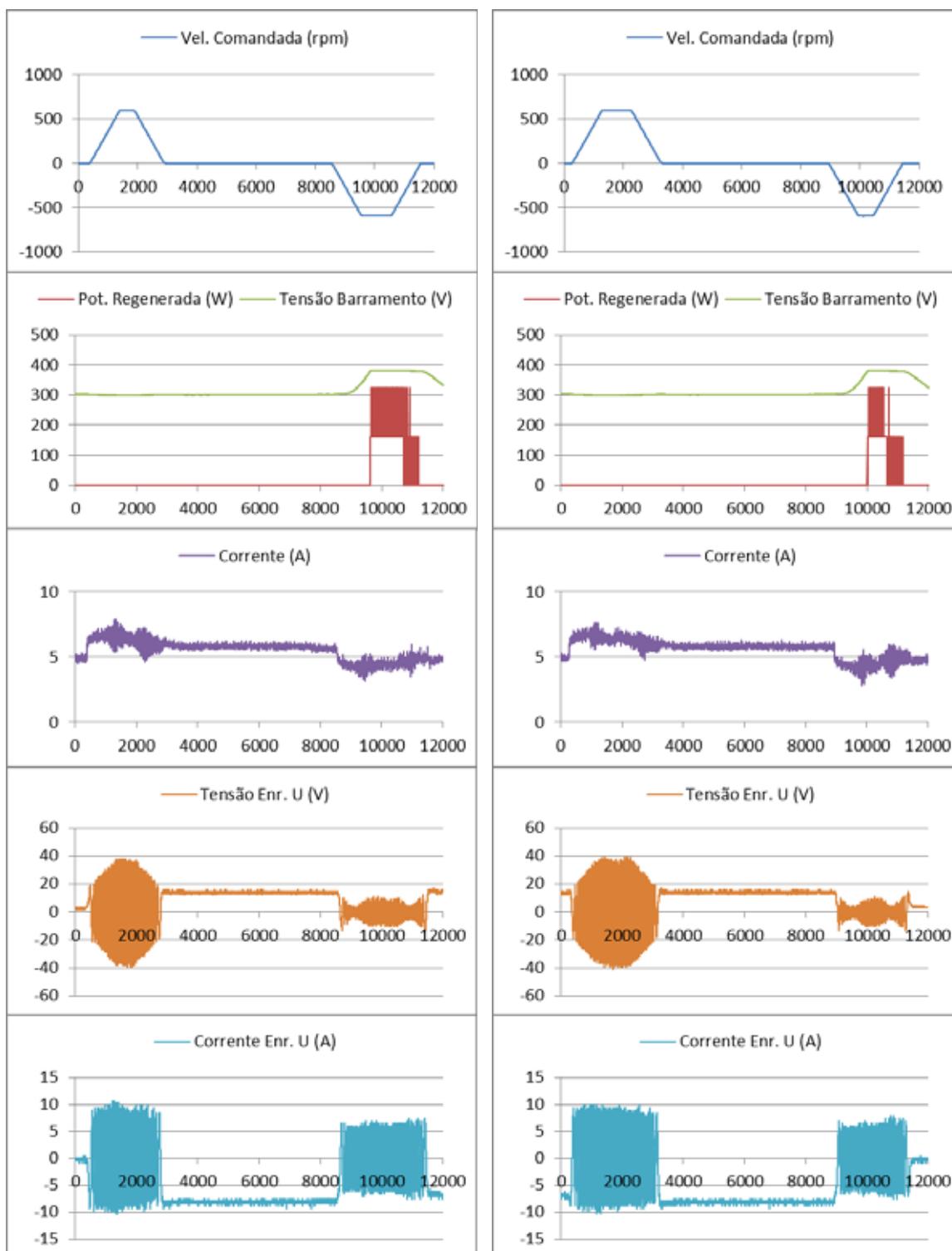
Caso a resistência empregada na dissipação desta energia seja substituída por um conversor estático conectado a um barramento cooperativo com o barramento principal, processo de frenagem dissipativa pode ser modificado para um processo de frenagem regenerativa, onde esta energia pode ser reaproveitada resultando em uma possível redução do consumo total demandado para a realização dos movimentos pelo robô proposto.

As Figuras 4.23 e 4.24 demonstram através das curvas de trajetórias e do erro de posicionamento de trajetória, que o arranjo proposto para o sistema de manipulação do robô possui capacidade de rastreamento das trajetórias propostas para ambos os tipos de trajetórias propostas (direta e interpolada), sendo o erro de posicionamento considerado pequeno, atingindo nestes casos o valor máximo de 14 mm. Apesar da existência deste pequeno erro de posicionamento ao longo da trajetória, nos pontos considerados críticos para a aplicação (coleta e entrega) o erro é praticamente nulo.

Os resultados apresentados nas figuras descritas anteriormente conseguem retratar de forma clara a diferença existente no fornecimento dos sinais de referência de comando de aceleração que acontecem de forma constante e variável nas estratégias direta e interpolada, respectivamente.

Além disso, o tempo total demandado para a realização do movimento proposto no caminho de P1 para P4 envolve aproximadamente 11,1 segundos para o caso da trajetória direta e 6,3 segundos para a trajetória interpolada.

Figura 4.21 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso D1 de movimentação direta com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

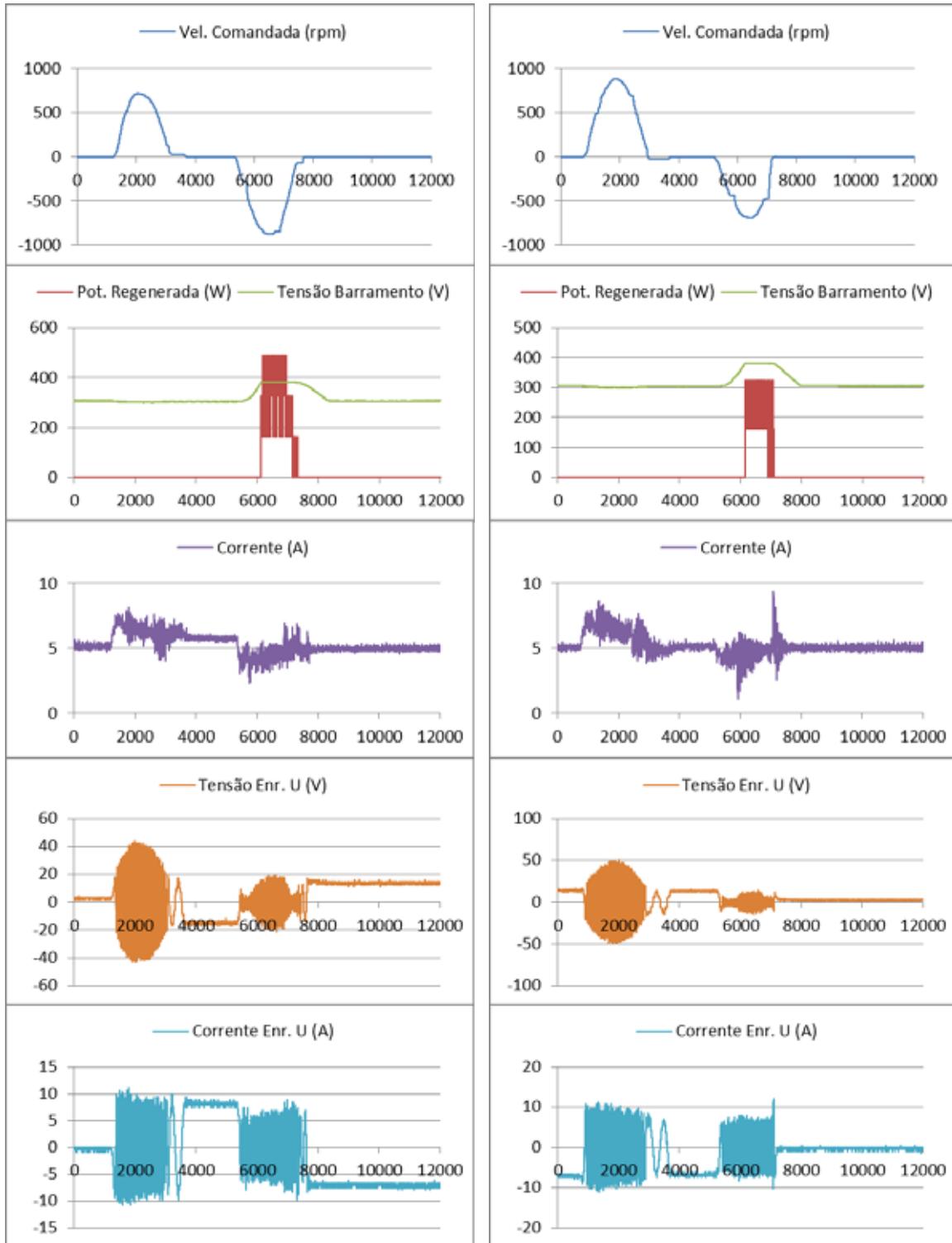


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.22 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso I1 de movimentação interpolada com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

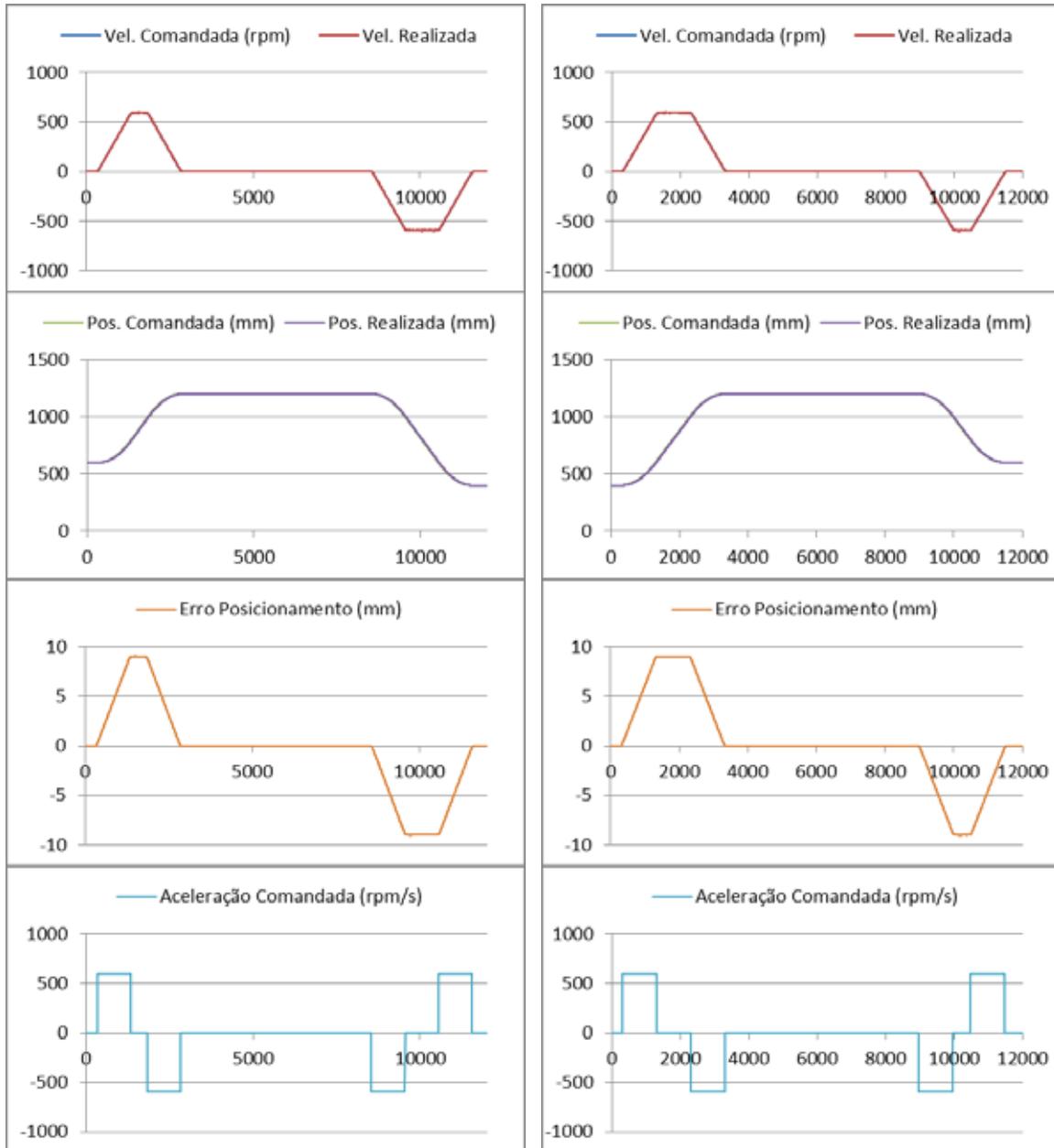


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.23 - Coletânea de curvas das grandezas cinemáticas, para o caso D1 de movimentação direta com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

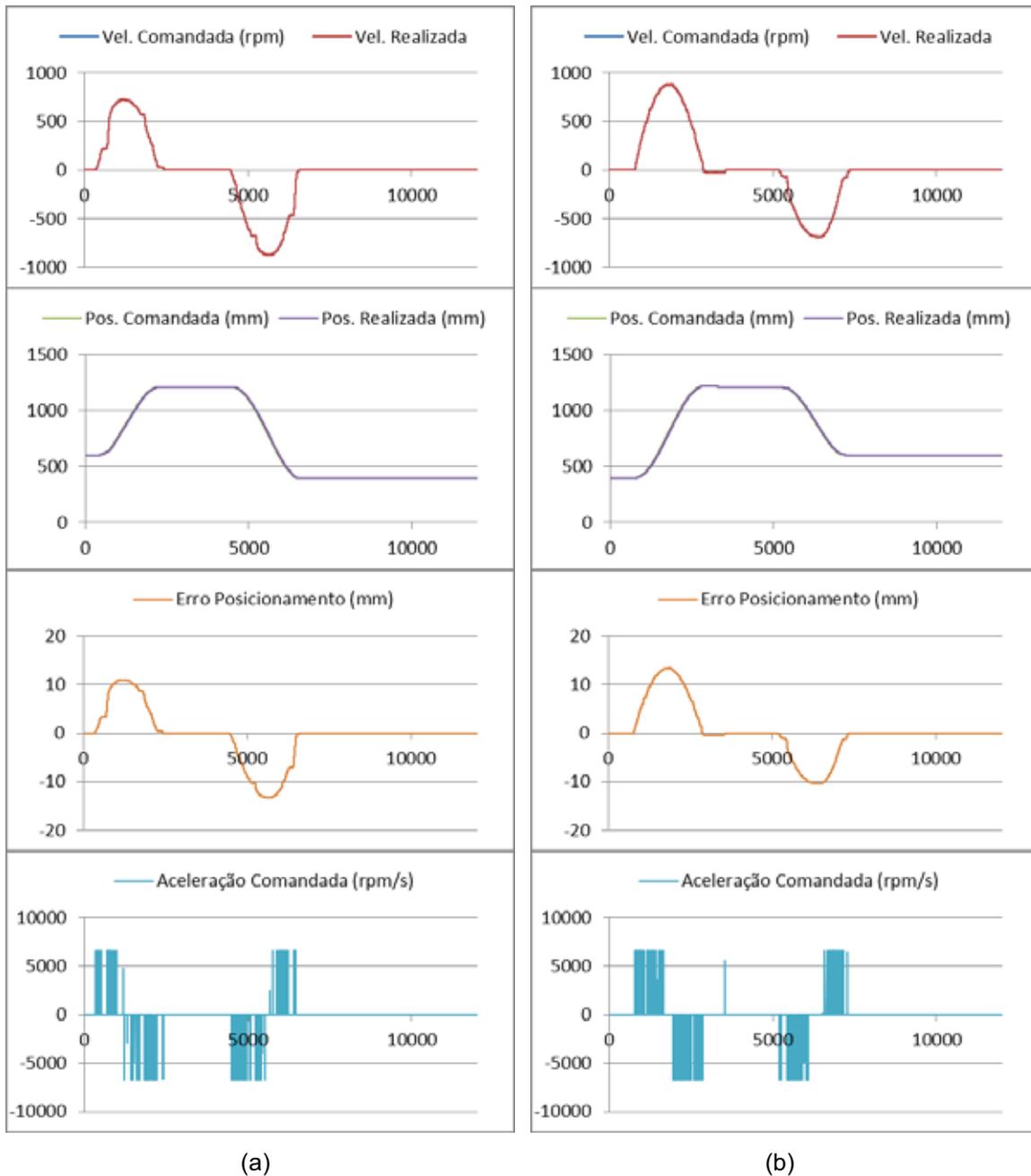


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

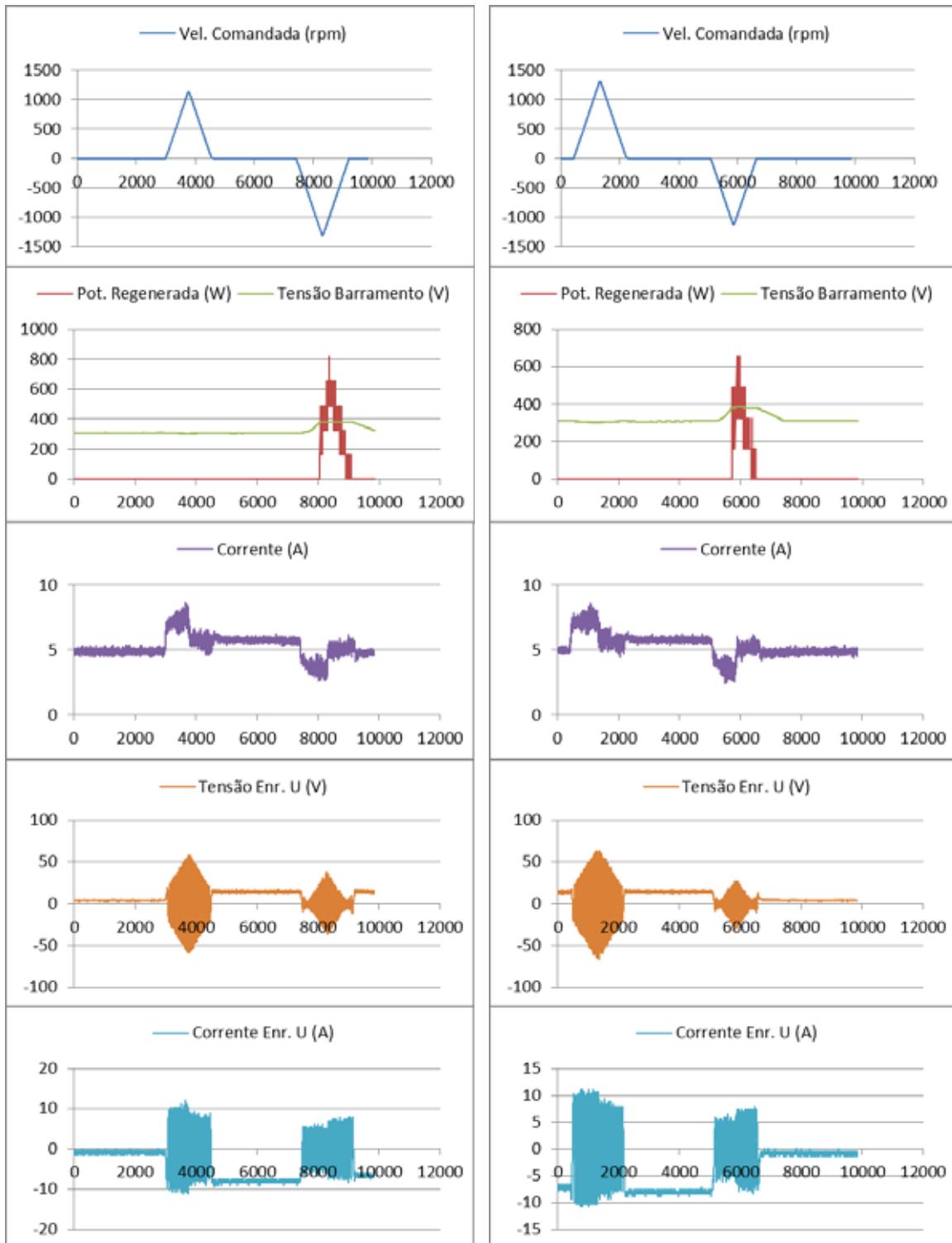
Figura 4.24 - Coletânea de curvas das grandezas cinemáticas, para o caso I1 de movimentação interpolada com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1



Fonte: Próprio Autor

Assim, mesmo considerando as configurações de velocidades e acelerações máximas limitadas à valores baixos, ambos os casos ainda atendem os propósitos das aplicações de baixa e média cadência, sendo o caso interpolado apresentando o tempo 40% menor, o que poderia resultar em uma maximização do processo de paletização permitindo um número maior de repetições no mesmo período.

Figura 4.25 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso D2 de movimentação direta com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

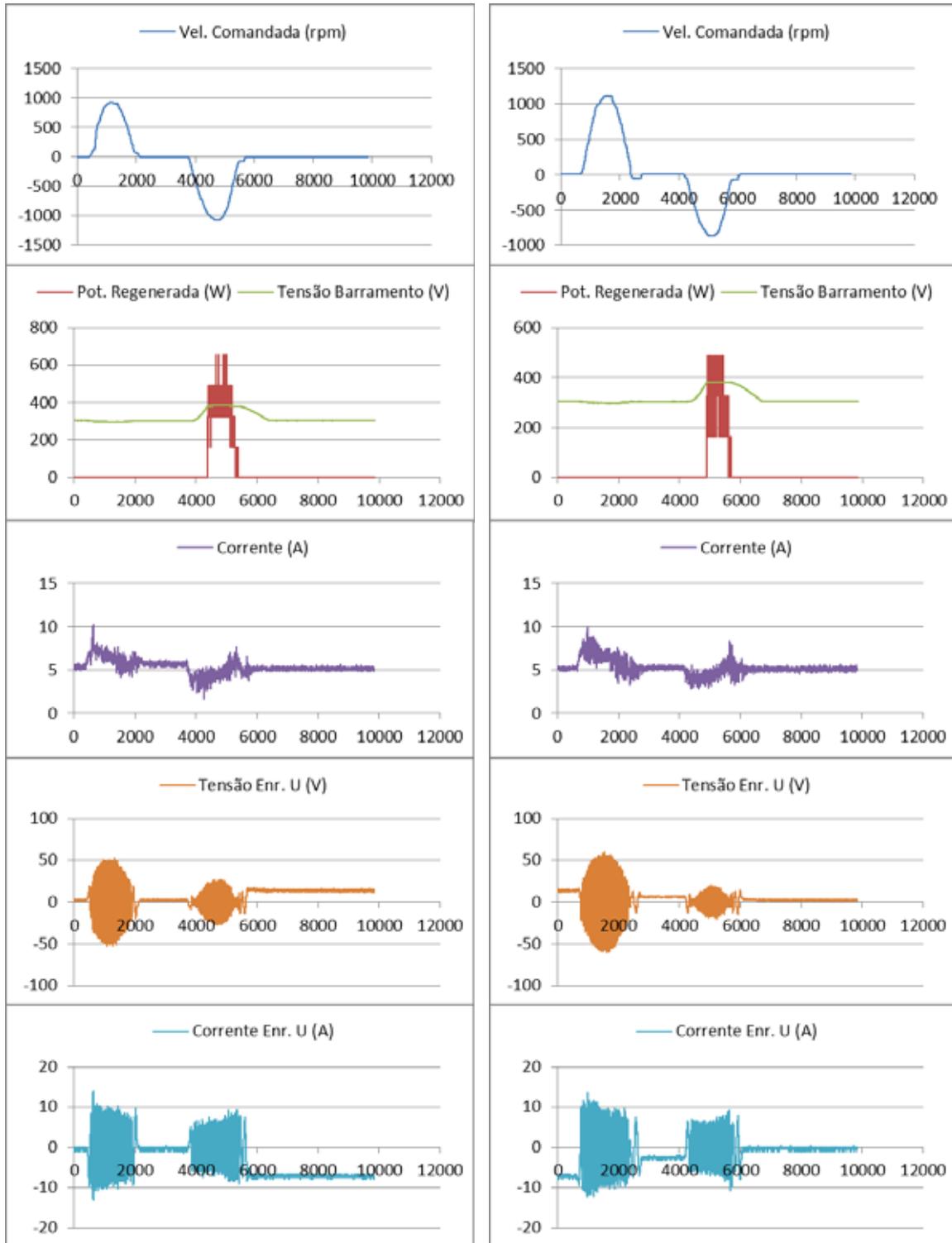


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.26 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso I2 de movimentação interpolada com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1



(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

As figuras 4.25 até 4.28 apresentam os resultados experimentais obtidos para o sistema de acionamento do eixo Z do robô possuindo uma carga acoplada de 30Kg e realizando as movimentações relacionadas com os trajetos definidos de P1 para P4 e de P4 para P1 considerando os casos de movimentação direta e interpolada D2 e I2.

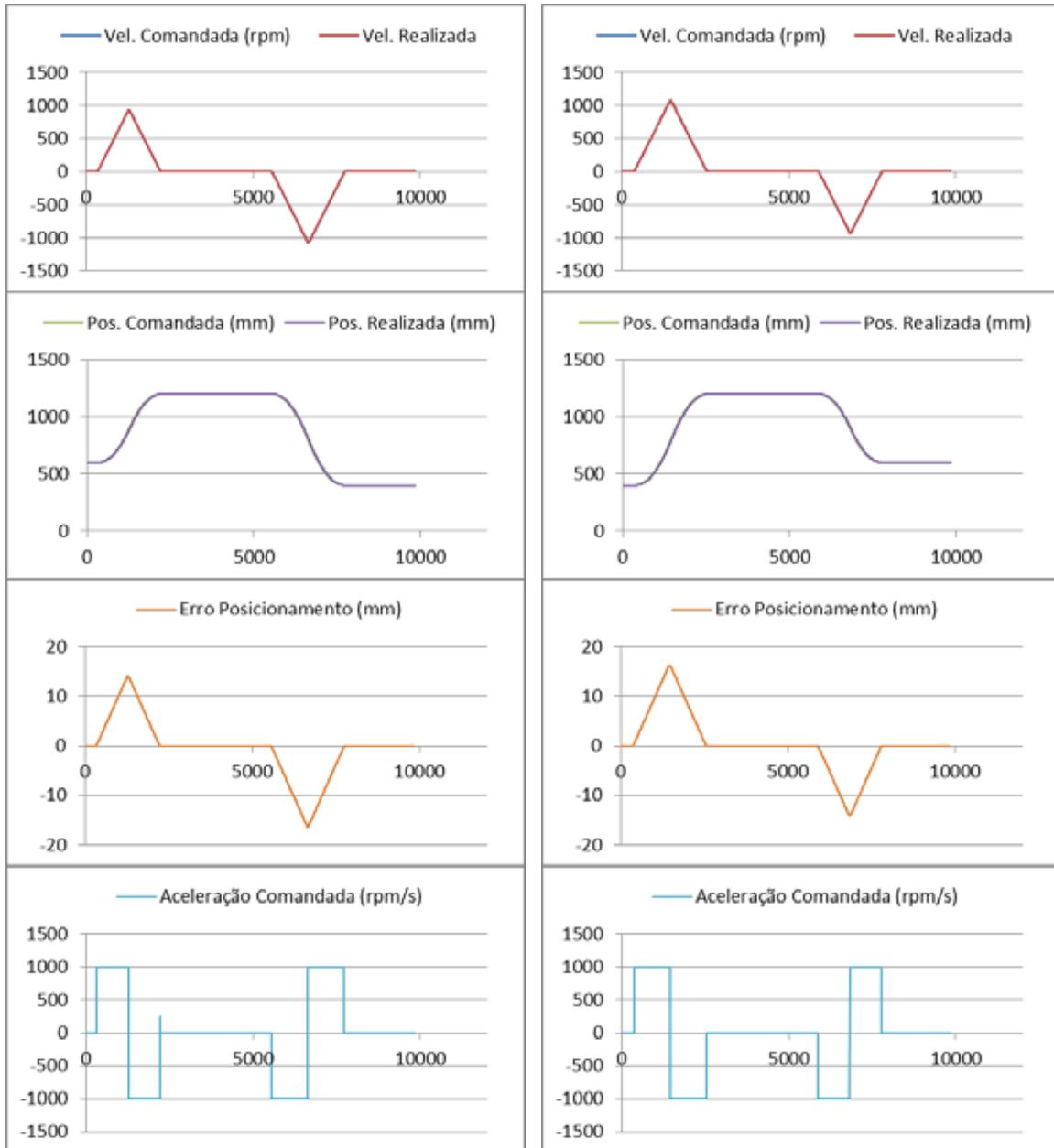
De forma análoga, em ambos os casos experimentados houve a realização do movimento de maneira satisfatória apresentando um baixo erro de posicionamento no decorrer da realização das trajetórias.

Além disso, os efeitos relacionados com a existência de energia a ser dissipada no processo de frenagem e a elevação de tensão no barramento se mantêm, mas agora ocorrendo durante um intervalo menor e com valores de dissipação de energia maiores que os casos D1 e I1.

Em função do aumento das configurações de velocidade e aceleração máximas permitidas, os tempos totais demandados para a realização dos movimentos (P1-P4 e P4-P1) também diminuiram.

As trajetórias interpoladas ainda alcançam o objetivo em um tempo menor, 5,2s para P1-P4 e cerca de 5,3s para o trajeto P4-P1, enquanto para os casos das movimentações diretas os valores registrados foram de aproximadamente 6,2s para os movimentos nos dois sentidos.

Figura 4.27 - Coletânea de curvas das grandezas cinemáticas, para o caso D2 de movimentação direta com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

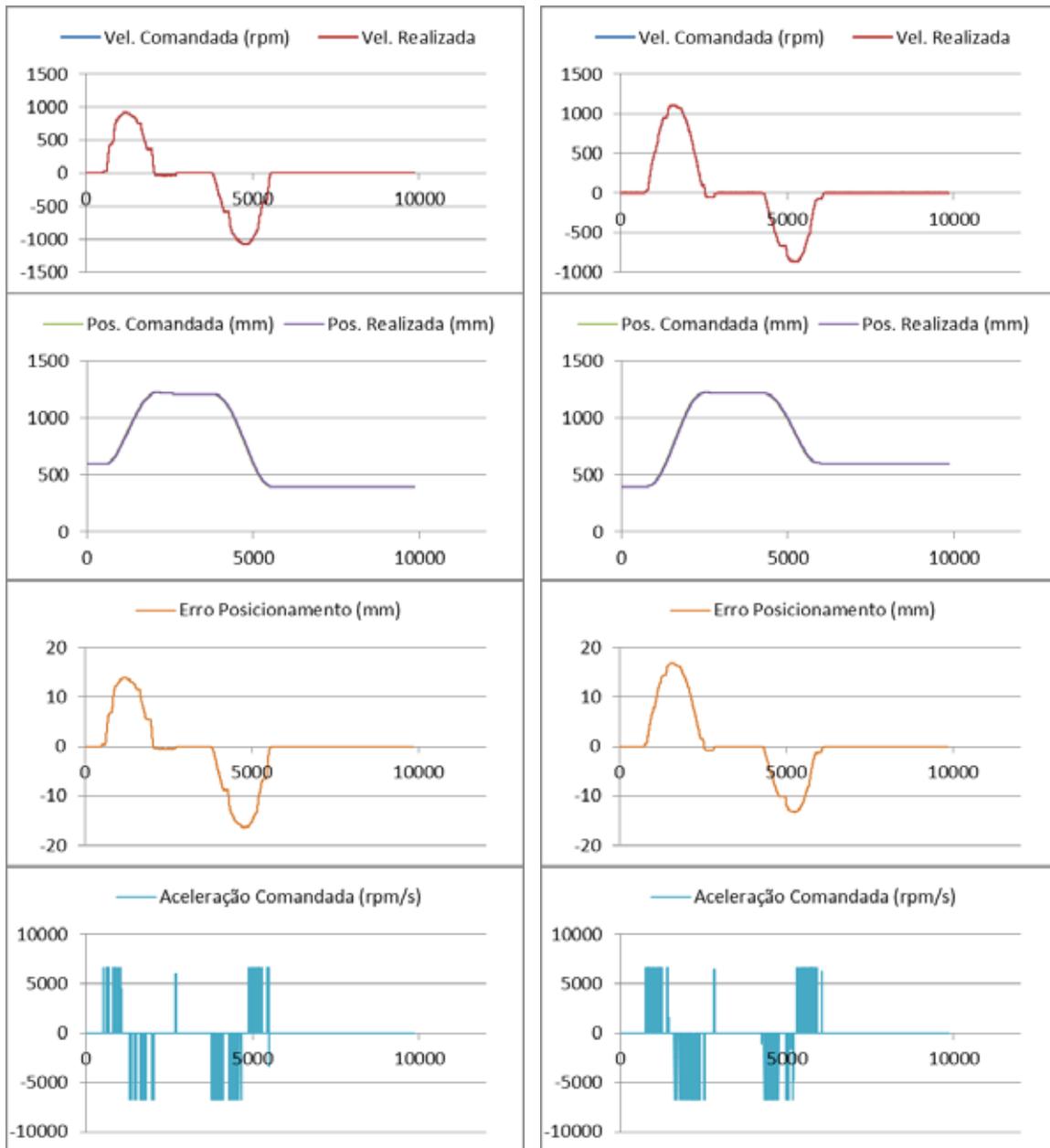


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.28 - Coletânea de curvas das grandezas cinemáticas, para o caso I2 de movimentação interpolada com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1



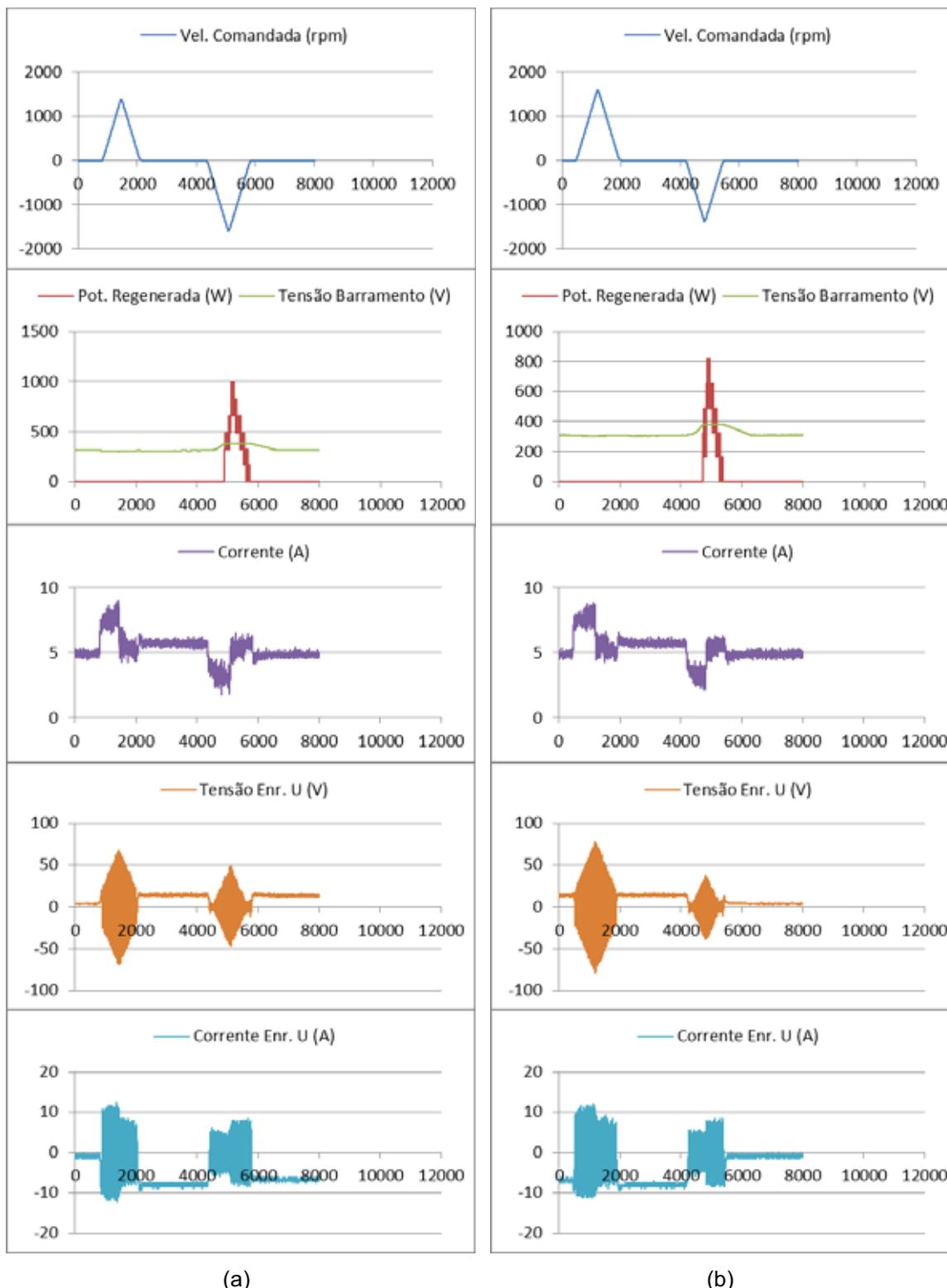
(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

As figuras 4.29 até 4.32 apresentam os resultados experimentais obtidos para o sistema de acionamento do eixo Z do robô possuindo uma carga acoplada de 30Kg e realizando as movimentações relacionadas com os trajetos definidos de P1 para P4 e de P4 para P1 considerando os casos de movimentação direta e interpolada D3 e I3.

Figura 4.29 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso D3 de movimentação direta com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1



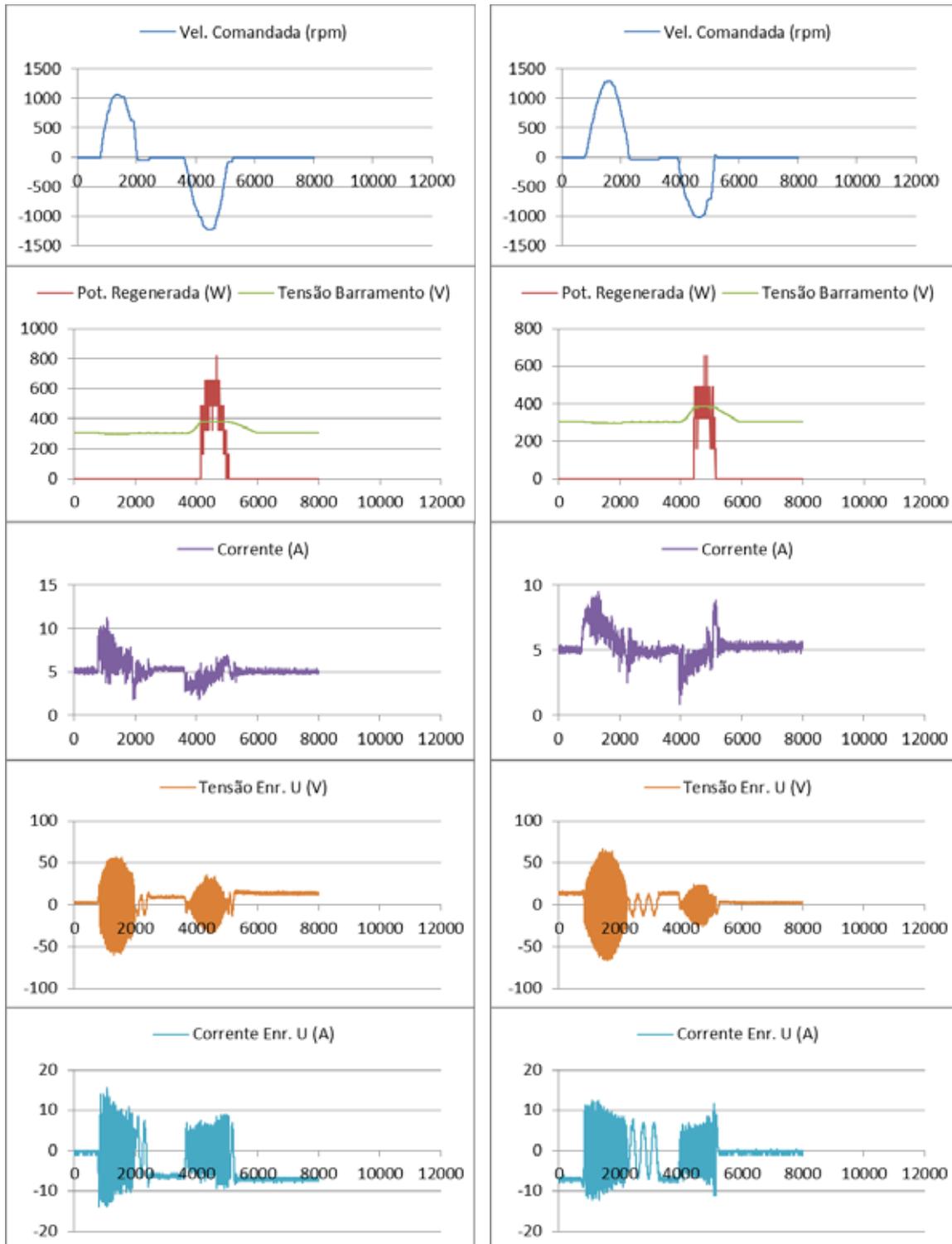
(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

As constatações com relação à possibilidade de regeneração de energia continuam sendo válidas para a realização dos movimentos considerando as configurações dinâmicas delimitadas pelos casos D3 e I3.

Figura 4.30 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso I3 de movimentação interpolada com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1



(a)

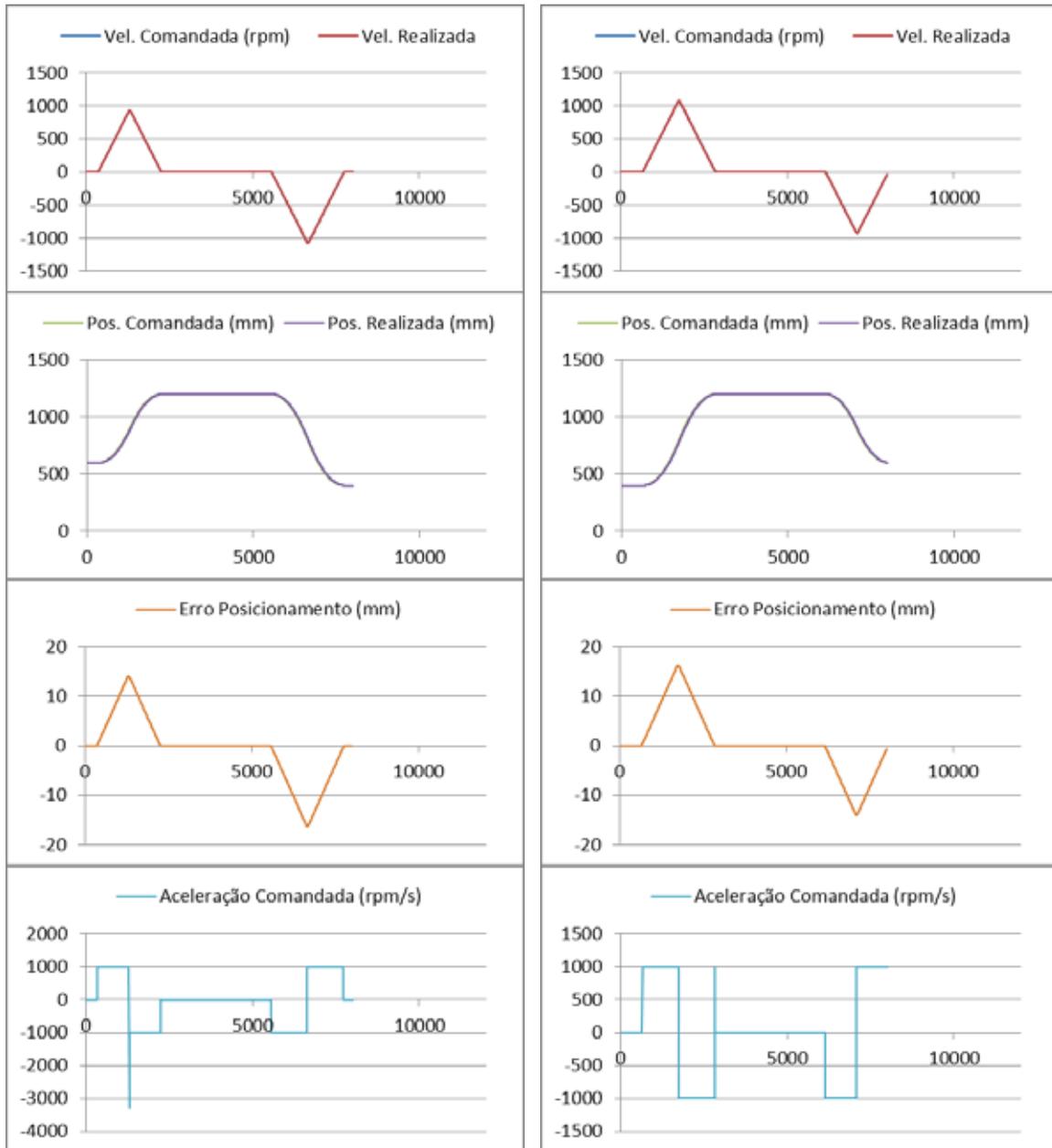
(b)

Fonte: Próprio Autor

Com relação aos tempos totais para a realização dos movimentos, apesar da configuração envolvendo trajetórias interpoladas continuar realizando as tarefas de deslocamento em menor tempo, nestas condições os

tempos totais resultantes da configuração por trajetórias direta possuem relação menor que os casos anteriores e se tornam quase equivalentes, como na trajetória P4-P1.

Figura 4.31 - Coletânea de curvas das grandezas cinemáticas, para o caso D3 de movimentação direta com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

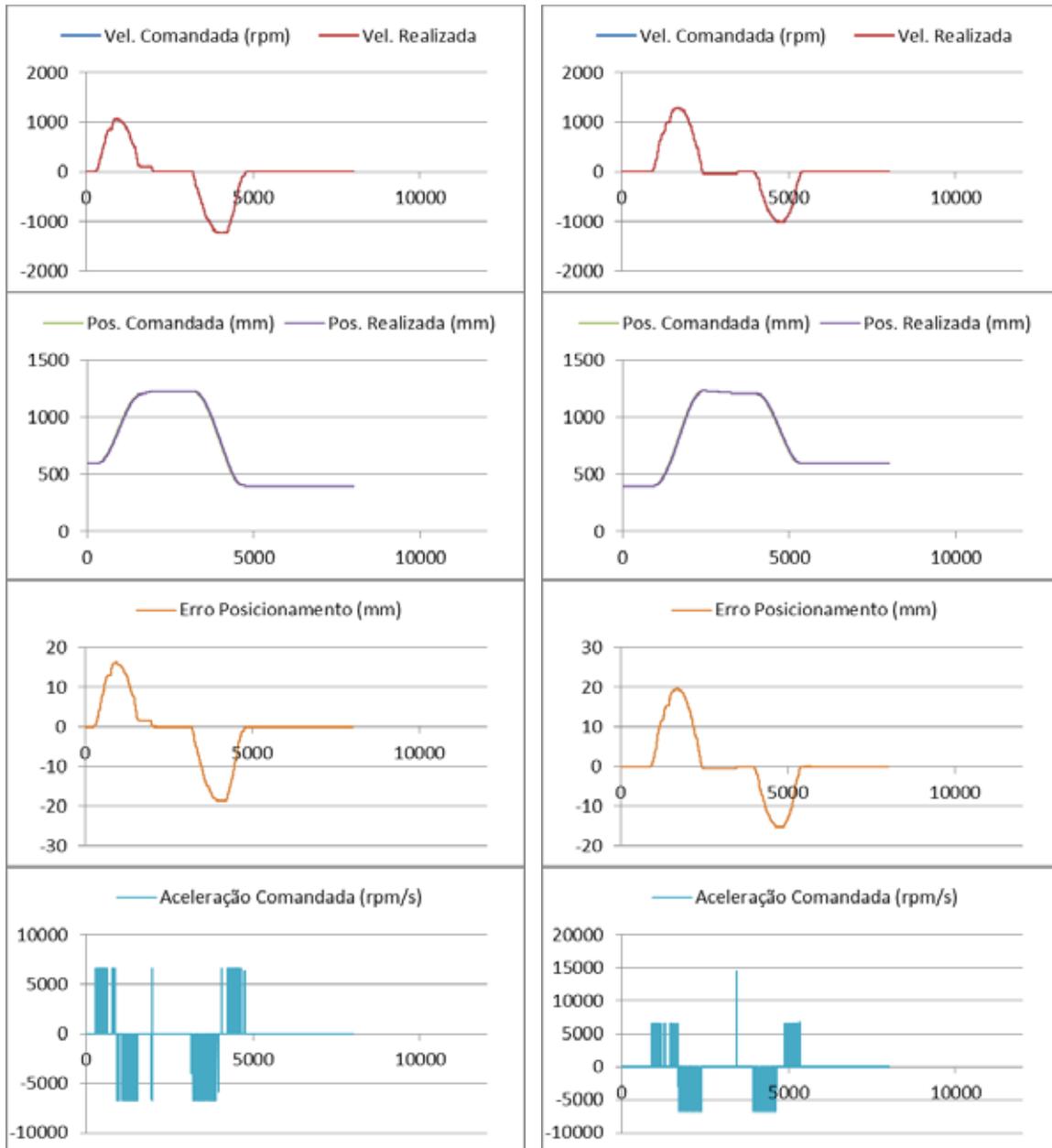


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.32 - Coletânea de curvas das grandezas cinemáticas, para o caso I3 de movimentação interpolada com carga de 30Kg: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1



(a)

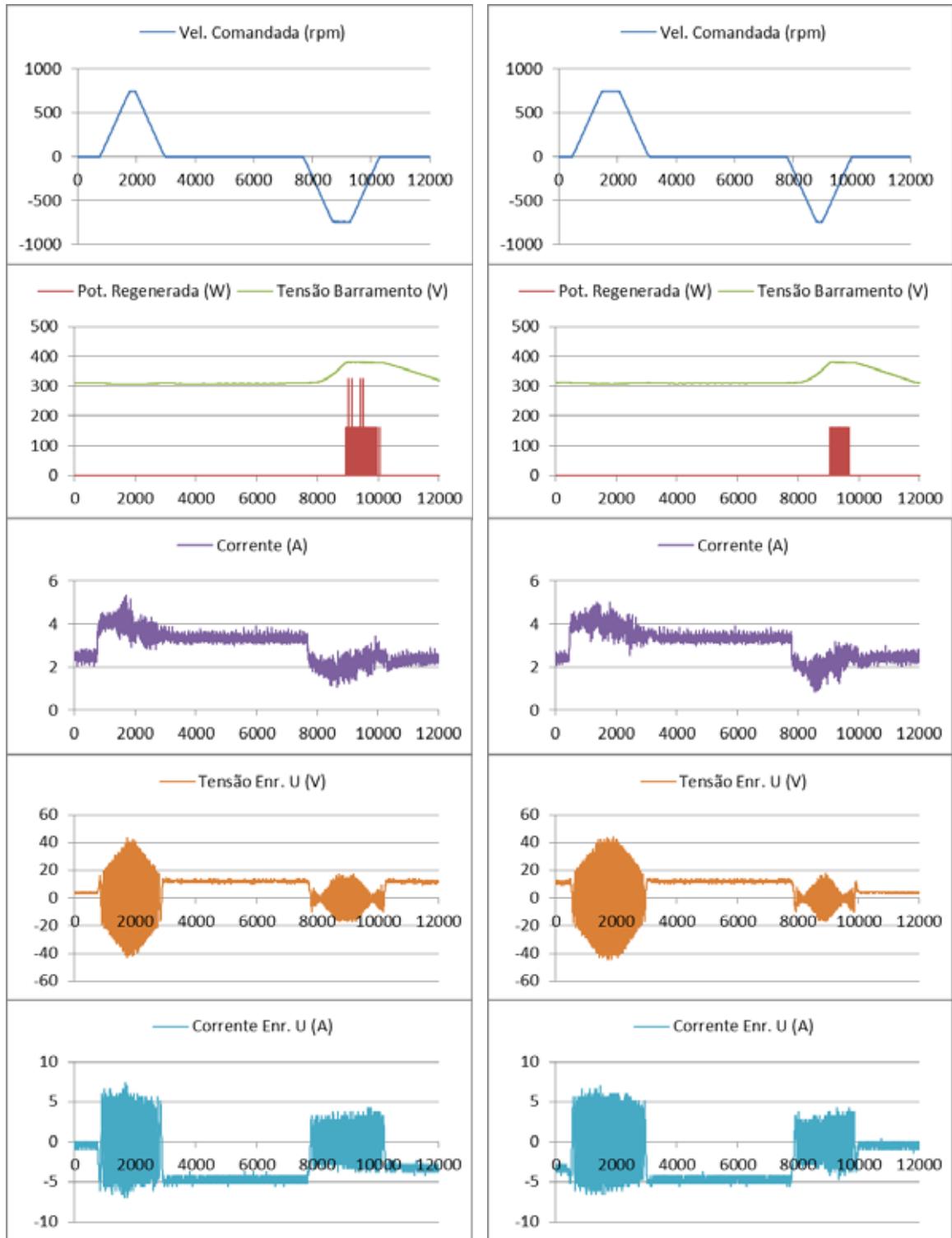
(b)

Fonte: Próprio Autor

Os tempos demandados para a realização das trajetórias para os casos direto e interpolado são respectivamente, (4,5s:P1-P4 e 4,4s:P4-P3) e (5,0s:P1-P4 e 5,0s:P4-P3). Todavia, a realização do movimento considerando a estratégia de trajetória direta requer a utilização de um maior volume dentro do cubo de organização para realizar a tarefa que a estratégia baseada em interpolação. As figuras 4.33 até 4.38 apresentam os resultados experimentais obtidos para o sistema de acionamento do eixo Z do robô possuindo operação a vazio e realizando as movimentações relacionadas com os trajetos P1-P4 e

de P4-P1 considerando os casos de movimentação direta e interpolada descritos nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Figura 4.33 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso D1 de movimentação direta considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

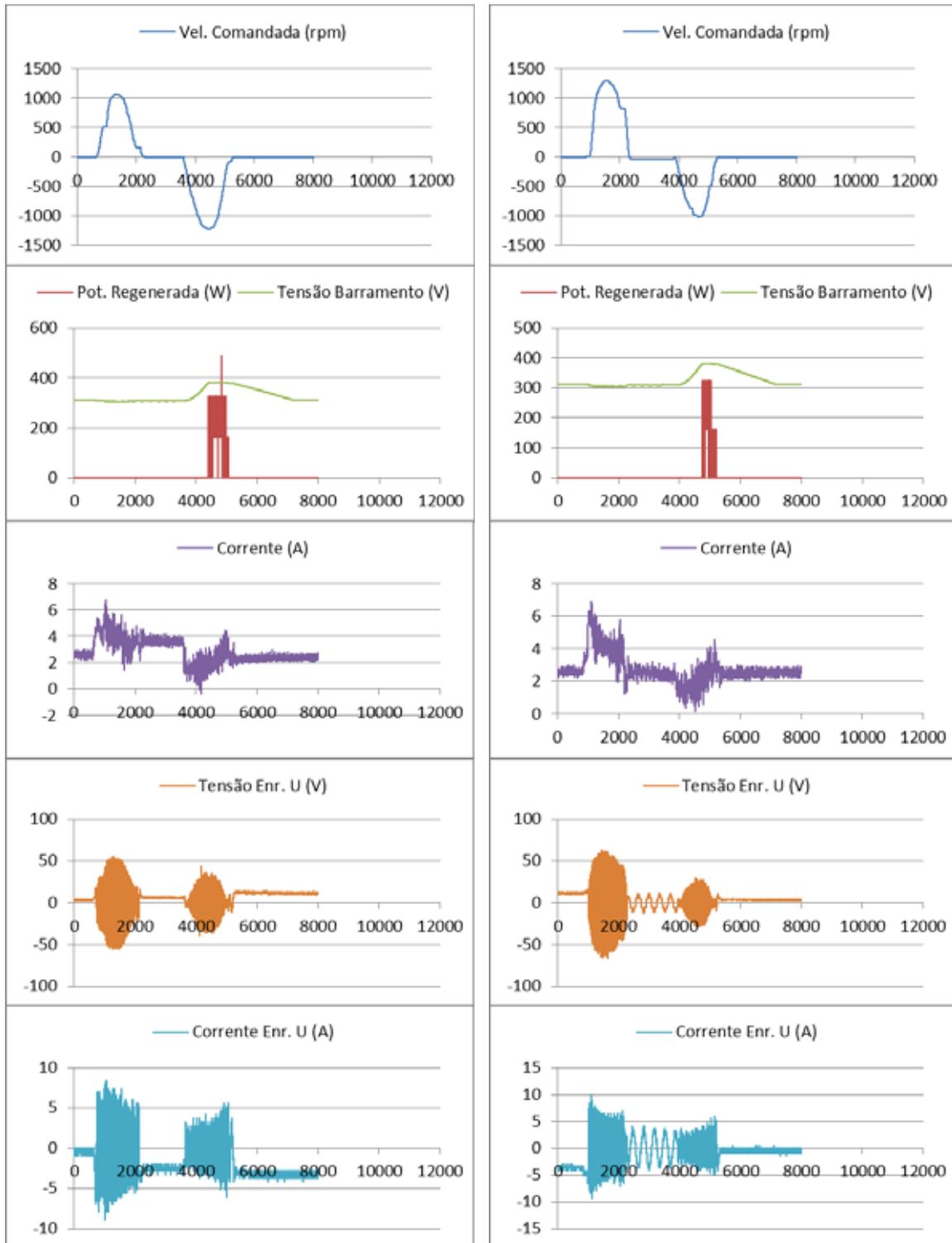


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.34 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso I1 de movimentação interpolada considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

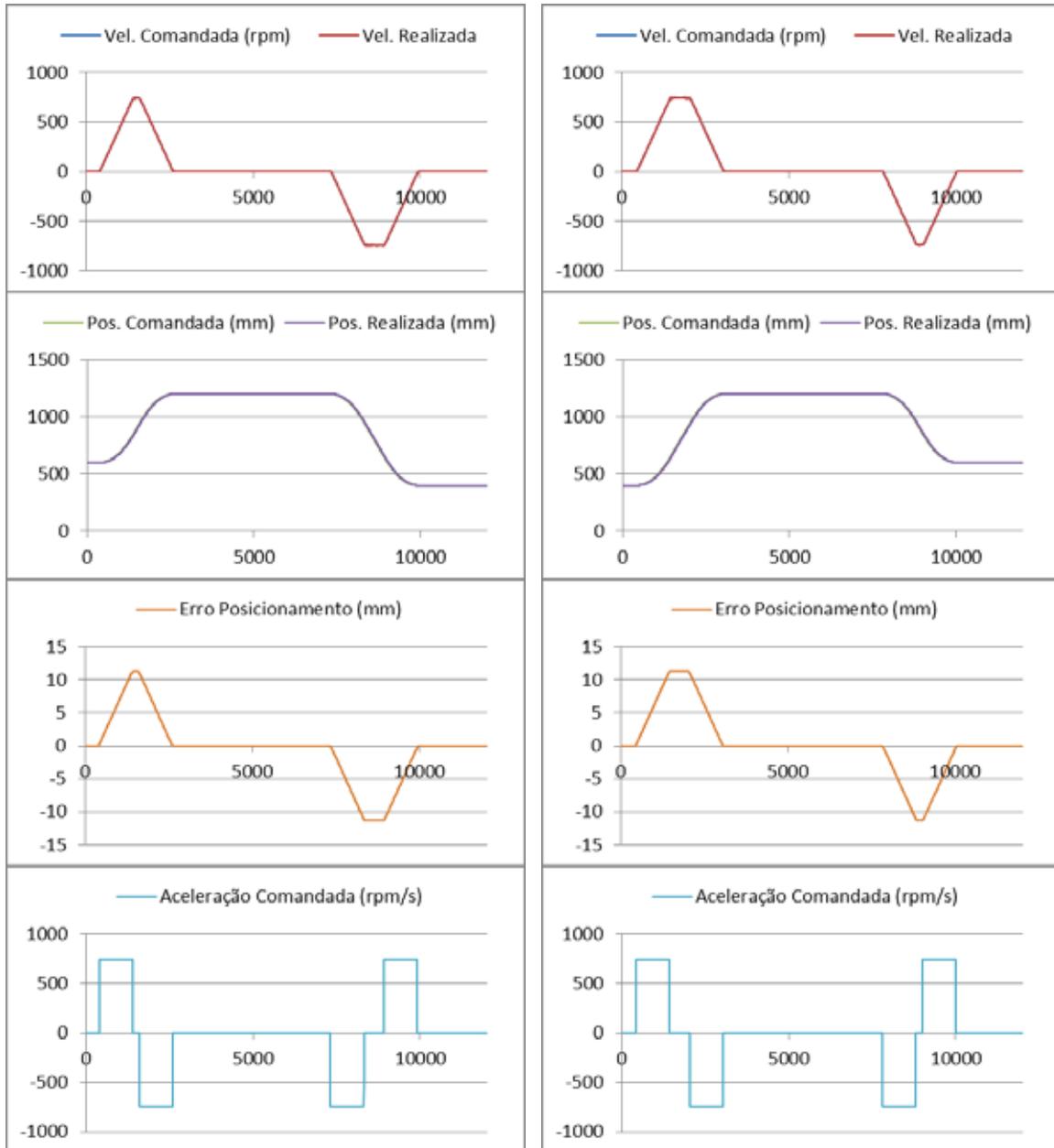


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.35 - Coletânea de curvas das grandezas de movimento, para o caso D1 de movimentação direta considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

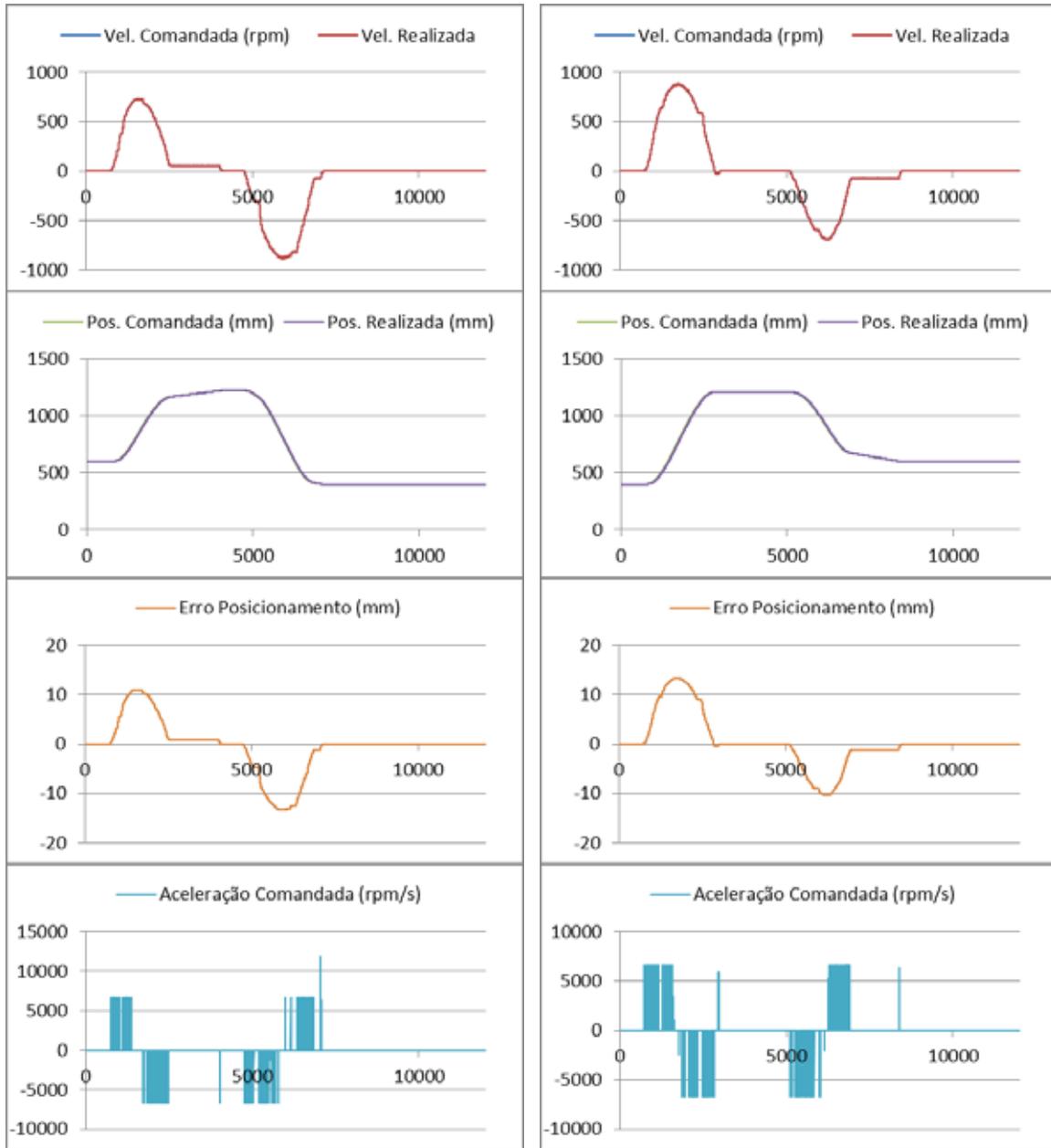


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.36 - Coletânea de curvas das grandezas de movimento, para o caso I1 de movimentação direta considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

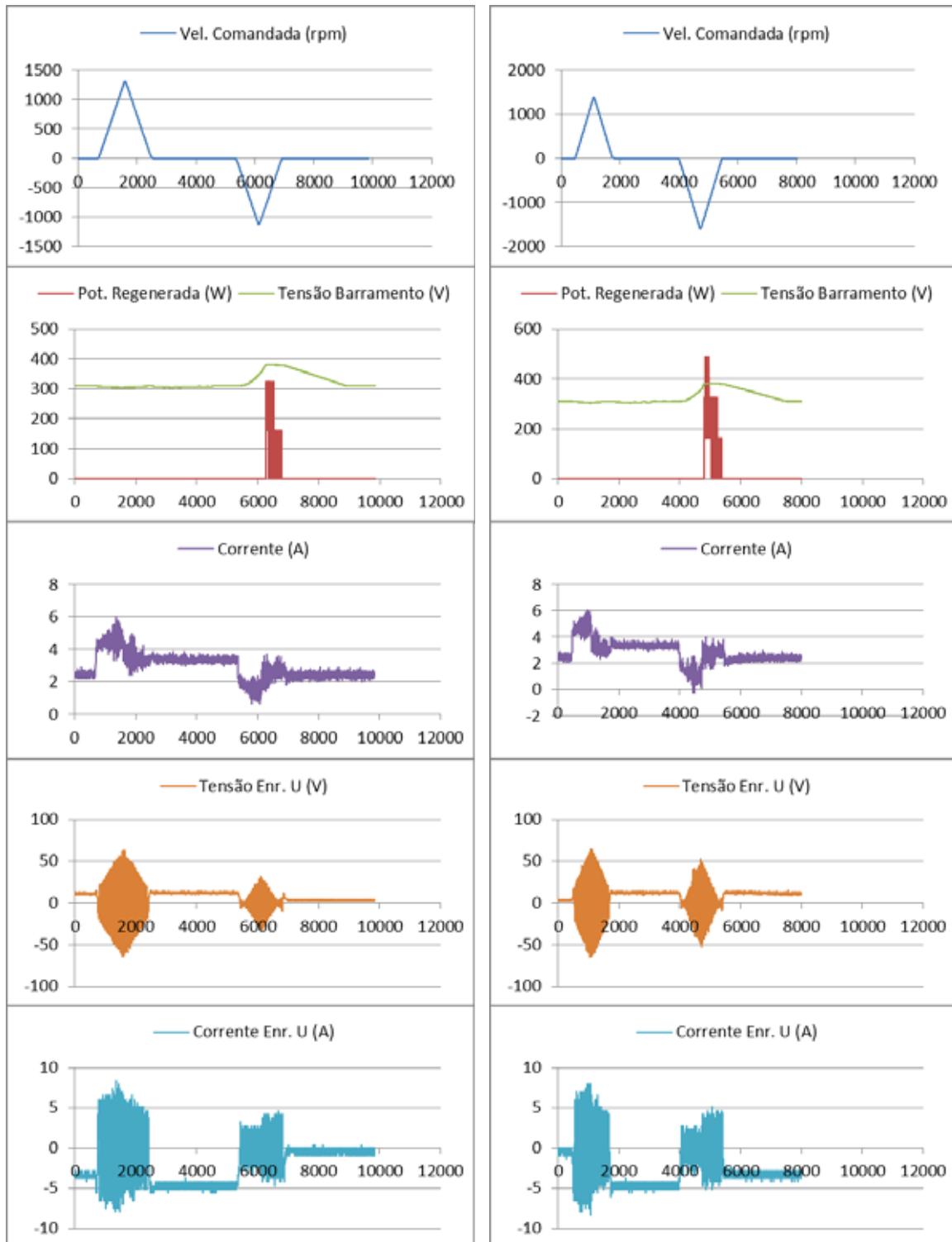


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.37 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso D2 de movimentação direta considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

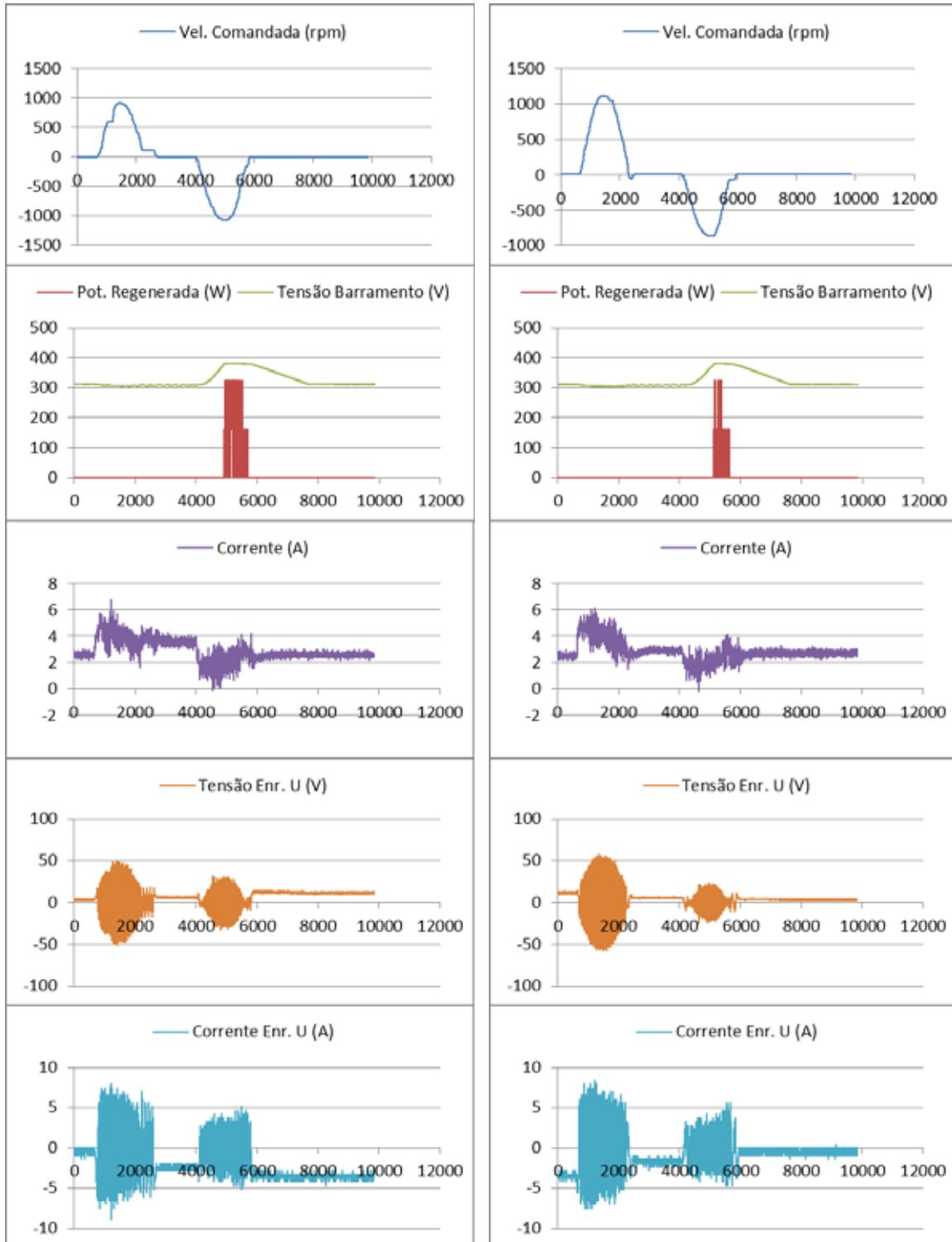


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.38 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso I2 de movimentação interpolada considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

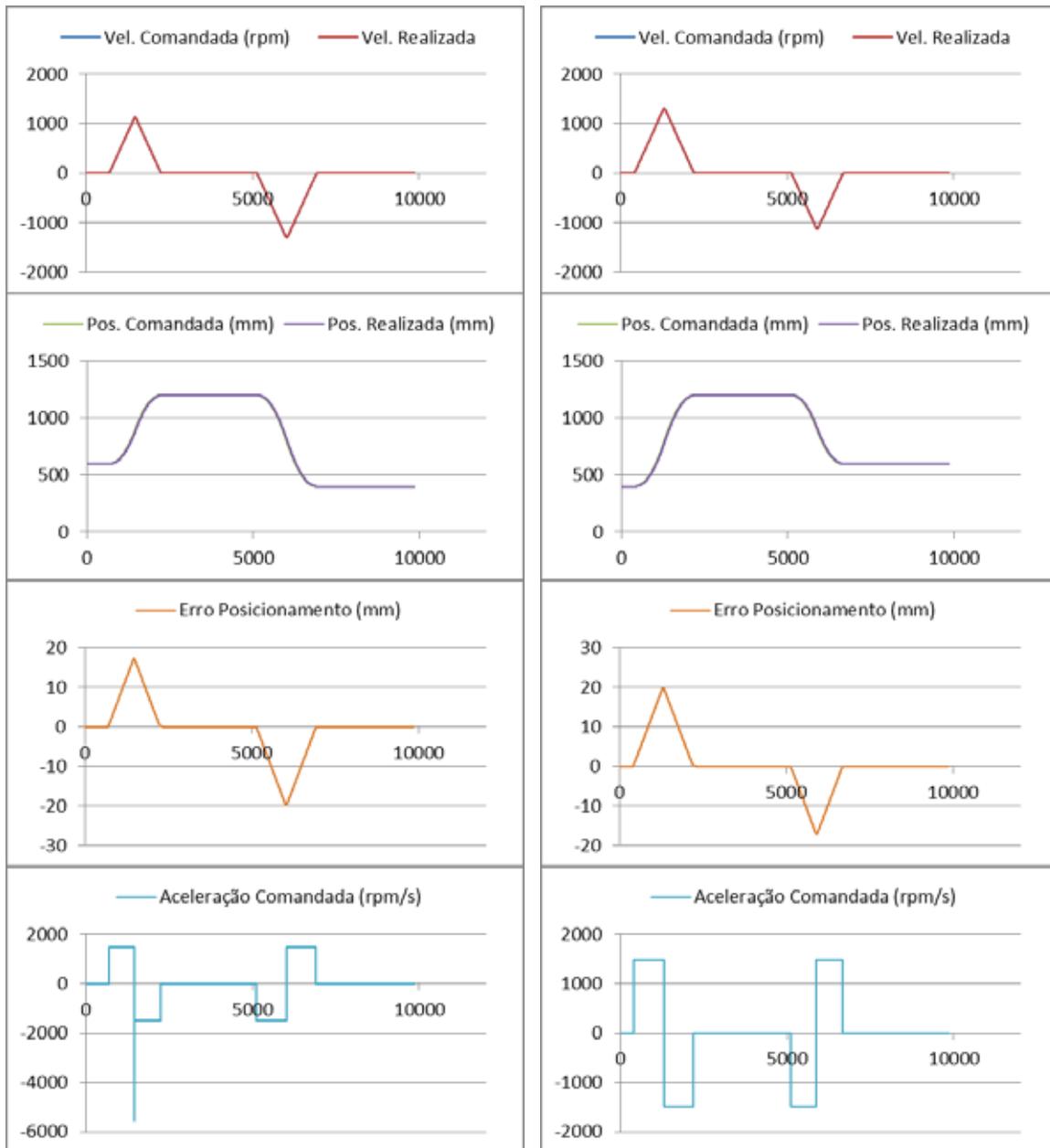


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.39 - Coletânea de curvas das grandezas de movimento, para o caso D2 de movimentação direta considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

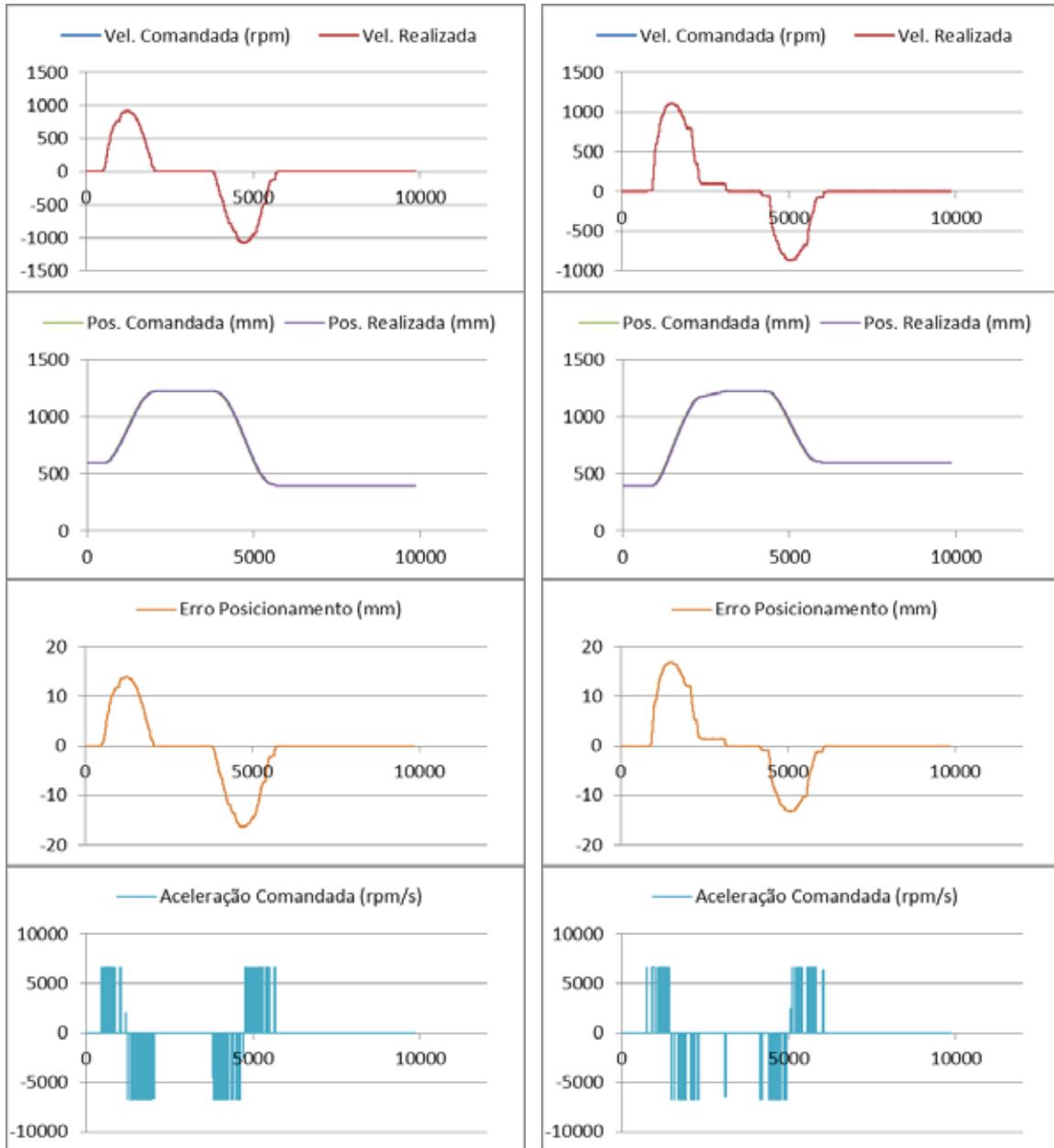


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.40 - Coletânea de curvas das grandezas de movimento, para o caso I2 de movimentação interpolada considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

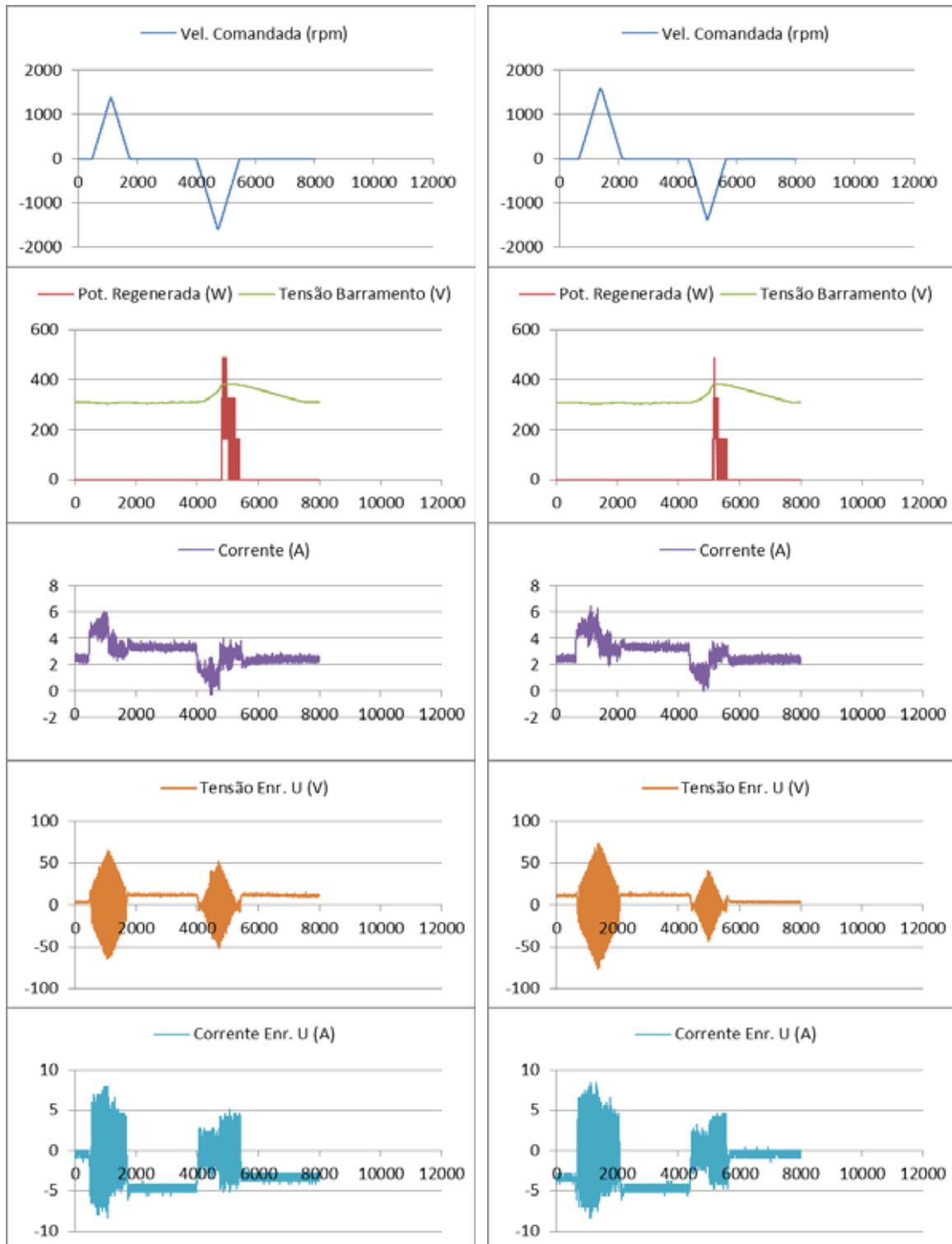


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.41 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso D3 de movimentação direta considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

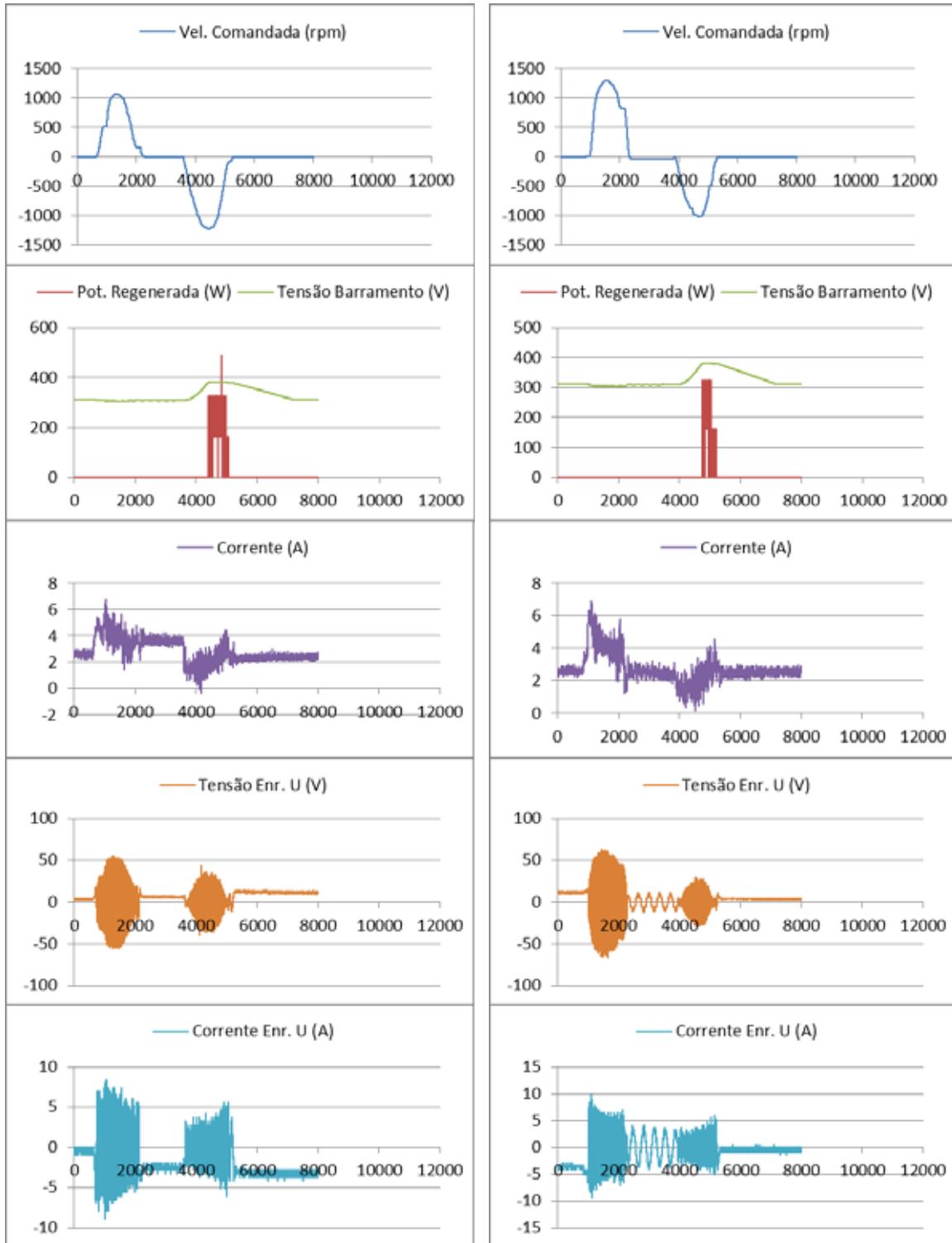


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.42 - Coletânea de curvas das grandezas de energia, para o caso I3 de movimentação interpolada considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1

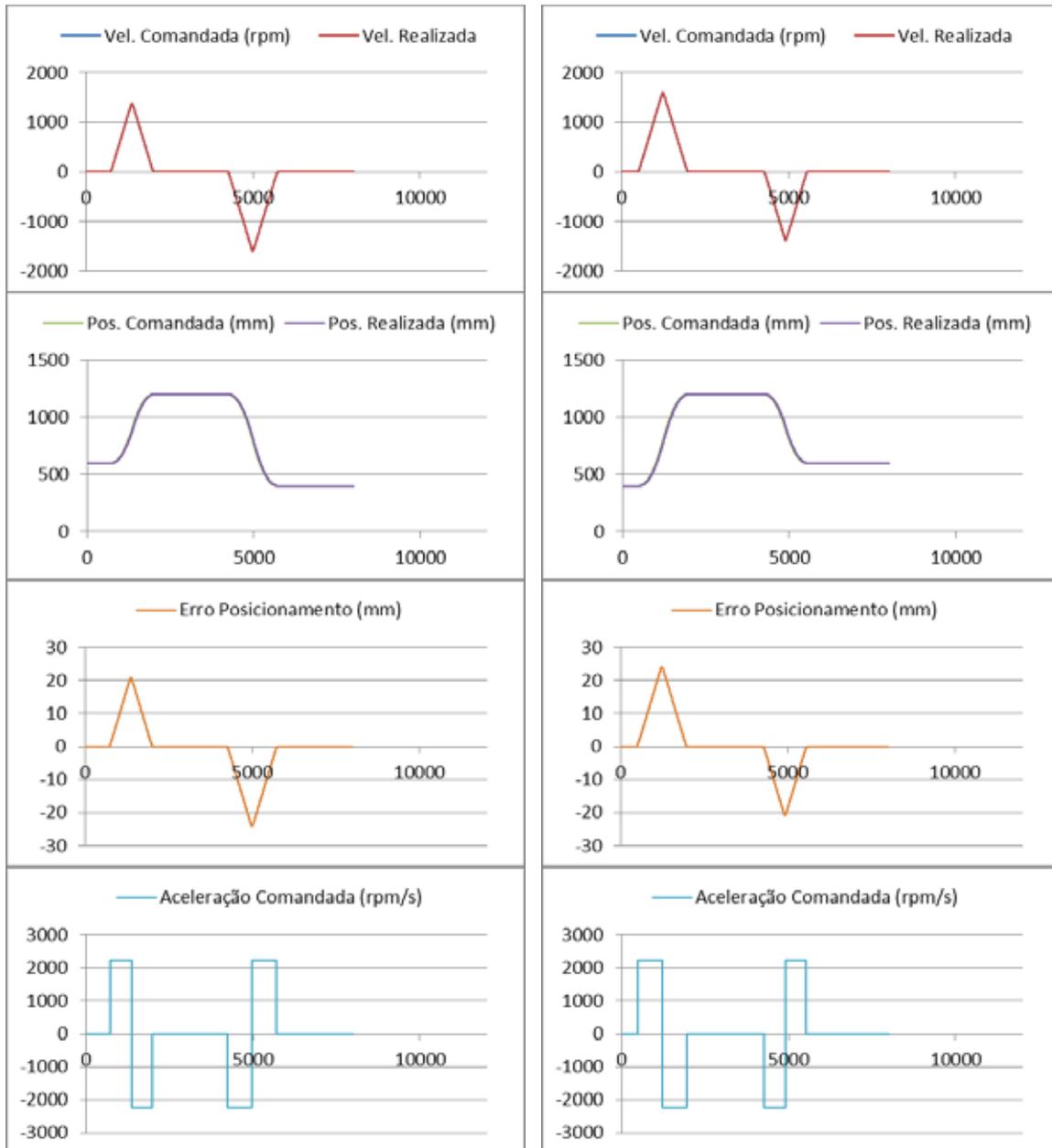


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.43 - Coletânea de curvas das grandezas de movimento, para o caso D3 de movimentação direta considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1



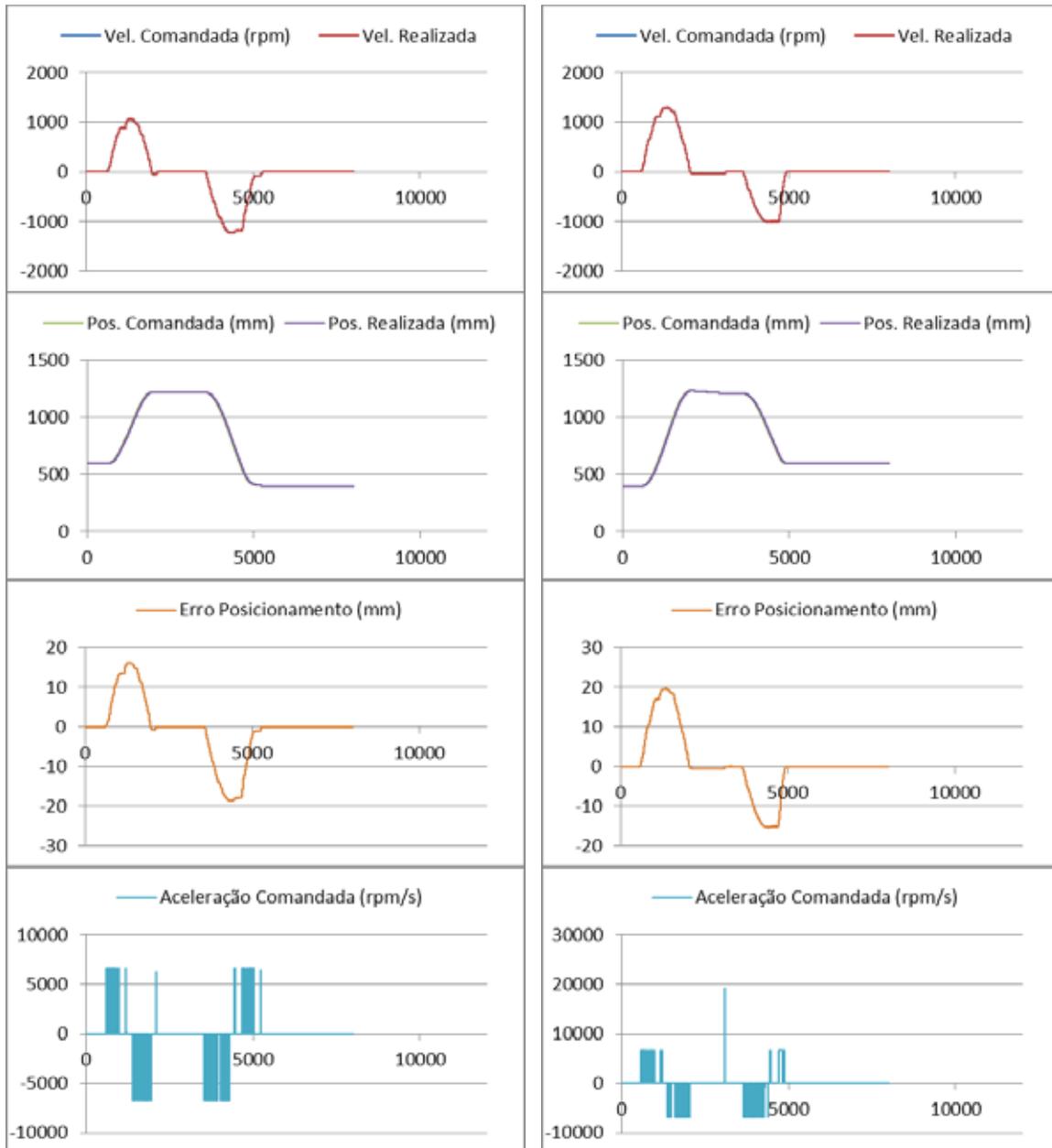
(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Através das figuras 4.33 até 4.38 é possível constatar pelas curvas apresentadas de registro de potência dissipada no resistor de regeneração que em todos os casos, mesmo considerando uma situação de deslocamento apenas do robô, ou seja, com operação a vazio, existe ainda montante de energia que pode ser reaproveitada através de um arranjo com um conversor específico para diminuir o consumo de energia demandado no processo ou para colaborar com o armazenamento de energia em um sistema de emergência.

Figura 4.44 - Coletânea de curvas das grandezas de movimento, para o caso I3 de movimentação interpolada considerando operação a vazio: (a) P1 para P4 e (b) de P4 para P1



(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Apesar da configuração dos compensadores PID ter sido sintonizada para o caso de carga nominal (30Kg), ratifica-se através das figuras 4.39 até 4.44 que na condição de operação a vazio o robô proposto ainda continua seguindo as trajetórias de forma satisfatória com erros de posicionamento pequenos.

Além disso, o movimento é realizado demandando aproximadamente o mesmo intervalo de tempo demandado na situação de carga nominal (30Kg), atendendo as necessidades da aplicação desejada de paletização.

As tabelas 4.3 e 4.4 apresentam coletâneas de informações compiladas dos resultados obtidos em todos os testes experimentais para os casos de movimentação direta e interpolada, para as condições de operação com carga de 30Kg e a vazio, respectivamente.

A coletânea das informações é composta pelas seguintes grandezas: potência média de entrada requerida pelo servodriver do eixo Z (P_{IN-Z}), as potências média e máxima dissipadas na resistência acoplada ao servodriver do eixo Z durante o processo de regeneração ($P_{REG-AVG}$ e $P_{REG-MAX}$), o intervalo de tempo demandado pelo processo de dissipação de energia no processo de regeneração (ΔT_{REG}) e o intervalo de tempo demandado para a realização do movimento (ΔT_{MOV}). A determinação dos valores médios foi calculada considerando o intervalo de tempo total da realização do movimento como período de integração.

Tabela 4.3 – Coletânea de dados para os casos de movimentação direta e interpolada considerando carga de 30 kg.

Casos	P_{IN-Z} (kW)	$P_{REG-AVG}$ (W)	$P_{REG-MAX}$ (W)	ΔT_{REG} (s)	ΔT_{MOV} (s)
D1(P1-P4)	1,857	23,582	325	1,71	11,114
D1(P4-P1)	1,872	14,059	325	1,21	11,152
D2(P1-P4)	2,684	56,896	824	1,08	6,222
D2(P4-P1)	2,713	36,909	656	0,83	6,218
D3(P1-P4)	2,660	74,359	994	0,89	5,029
D3(P4-P1)	2,690	49,122	824	0,69	5,016
I1(P1-P4)	3,154	51,541	489	1,26	6,342
I1(P4-P1)	3,096	31,754	325	1,00	6,306
I2(P1-P4)	3,198	69,737	656	1,07	5,202
I2(P4-P1)	3,081	42,31	489	0,86	5,310
I3(P1-P4)	2,929	85,058	824	0,94	4,459
I3(P4-P1)	3,006	57,469	656	0,73	4,399

Fonte: Próprio Autor

Tabela 4.4 – Coletânea de dados para os casos de movimentação direta e interpolada considerando operação a vazio.

Casos	P_{IN-Z} (kW)	P_{REG-AVG} (W)	P_{REG-MAX} (W)	ΔT_{REG} (s)	ΔT_{MOV} (s)
D1(P1-P4)	1,195	9,978	325	1,231	9,518
D1(P4-P1)	1,224	4,863	162	0,846	9,518
D2(P1-P4)	1,455	17,132	489	0,796	6,224
D2(P4-P1)	1,489	9,671	325	0,592	6,224
D3(P1-P4)	1,452	21,967	489	0,639	5,015
D3(P4-P1)	1,483	12,243	489	0,489	5,005
I1(P1-P4)	1,718	17,358	325	1,012	6,301
I1(P4-P1)	1,75	8,283	325	0,707	6,433
I2(P1-P4)	1,776	22,481	325	0,904	5,16
I2(P4-P1)	1,681	10,641	325	0,57	5,32
I3(P1-P4)	1,518	26,245	489	0,754	4,625
I3(P4-P1)	1,609	14,977	325	0,533	4,337

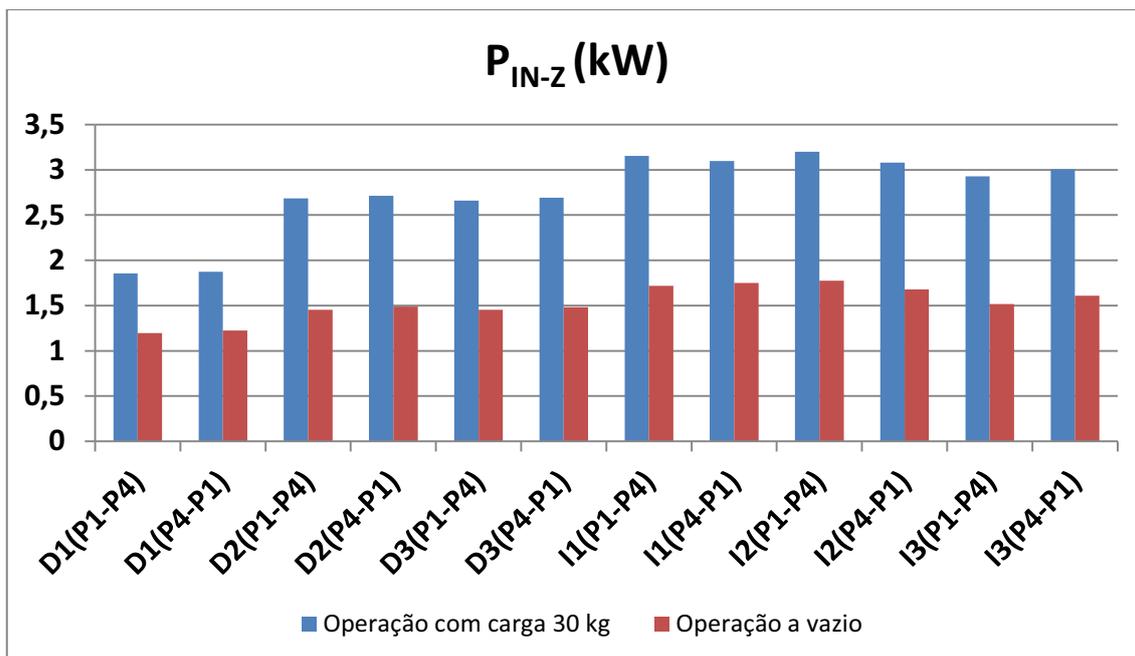
Fonte: Próprio Autor

A Figura 4.45 mostra o gráfico de barras das potências médias de entrada requeridas pelo servodriver do eixo Z nos casos avaliados, onde é possível constatar que os casos de movimentação interpolada demandam uma potência maior que os casos de movimentação direta e que mesmo nos casos de operação a vazio o sistema de energia relacionado com o eixo Z consome energia para realizar os movimentos.

As potências demandadas para a realização dos trajetos de ida e retorno para cada um dos casos de movimentação testados são equivalentes. A maior potência requerida nos movimentos com carregamento de carga ocorreu no caso de movimento interpolado I2 (P1-P4) de 3,2 kW, enquanto a menor potência ocorreu no caso de movimento direto D1 (P1-P4) igual a 1,85 kW.

Os gráficos de barras das potências médias e máximas dissipadas na resistência acoplada ao servodriver do eixo Z durante o processo de regeneração nos casos avaliados são apresentados nas Figuras 4.46 e 4.47.

Figura 4.45 – Gráfico de barras das potências médias de entrada requeridas pelo servodriver do eixo Z nos casos avaliados.



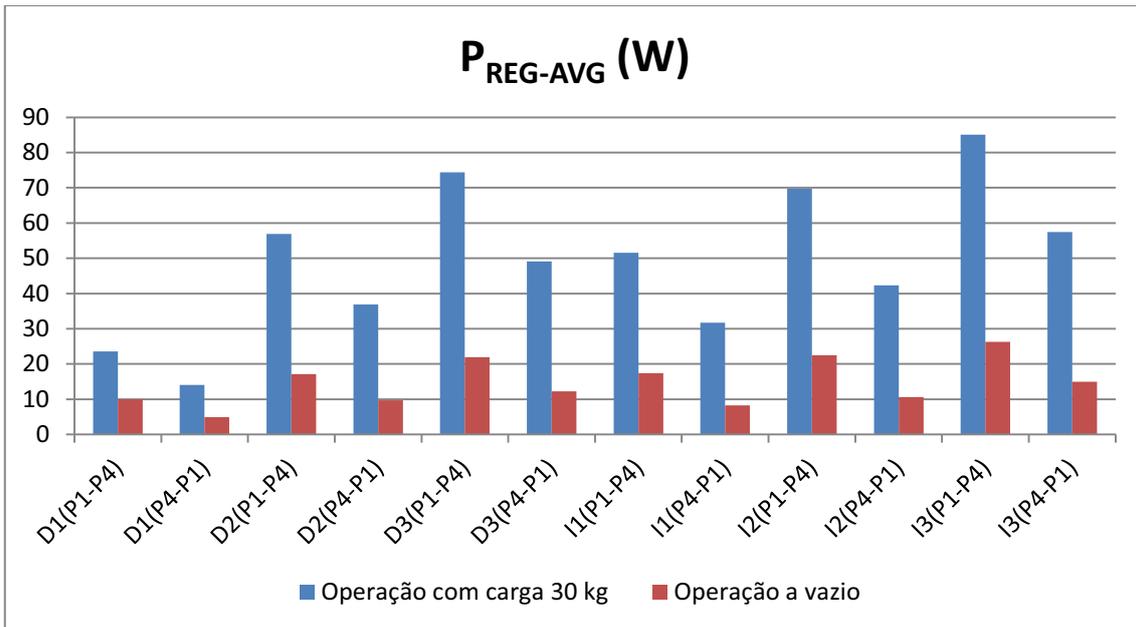
Fonte: Próprio Autor

Apesar dos casos relacionados com a realização do movimento direto terem apresentado maiores valores instantâneos de potências máximas dissipadas na resistência, chegando a 994 W no caso D3(P1-P4), os valores das potências médias dissipadas apresentaram valores menores que os obtidos para os casos de movimentações interpoladas.

Este aspecto ocorre devido os intervalos de tempo demandados com a dissipação de energia na resistência serem maiores nos casos de movimentação direta que os obtidos nos casos equivalentes de movimentação interpolada, conforme mostra a figura 4.48.

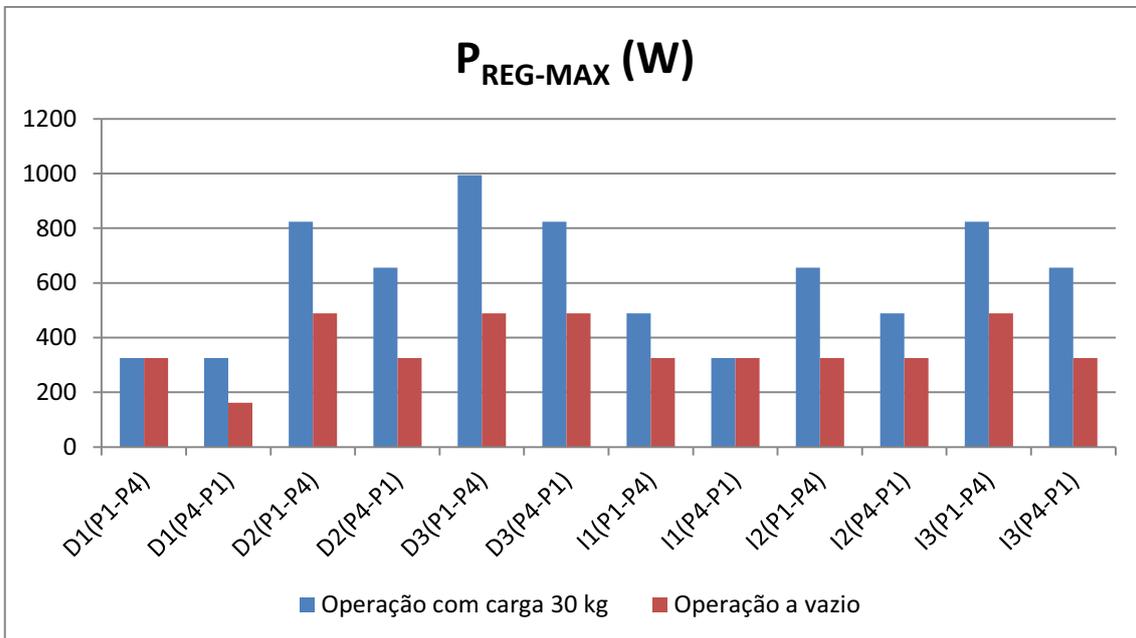
Alem disso, constatou-se que em virtude da intensidade do deslocamento espacial na vertical, os sentidos (P1-P4) apresentaram valores de potência média dissipada maiores que os obtidos para os sentidos (P4-P1).

Figura 4.46 – Gráfico de barras das potências médias dissipadas na resistência acoplada ao servodriver do eixo Z durante o processo de regeneração nos casos avaliados.



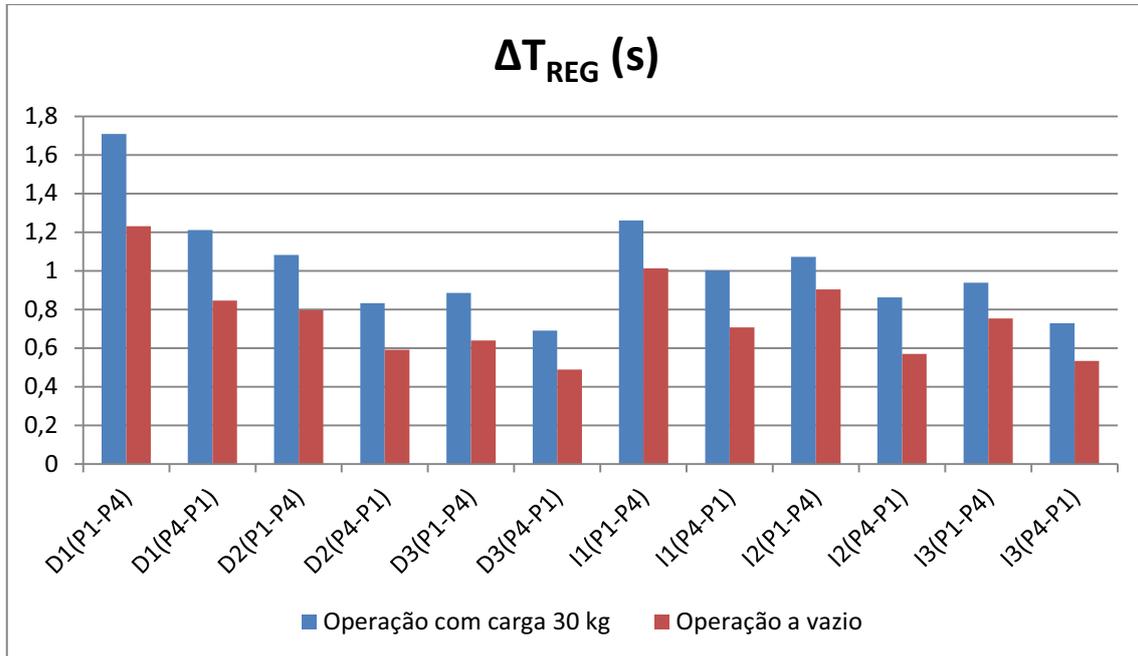
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.47 – Gráfico de barras das potências máximas dissipadas na resistência acoplada ao servodriver do eixo Z durante o processo de regeneração nos casos avaliados.



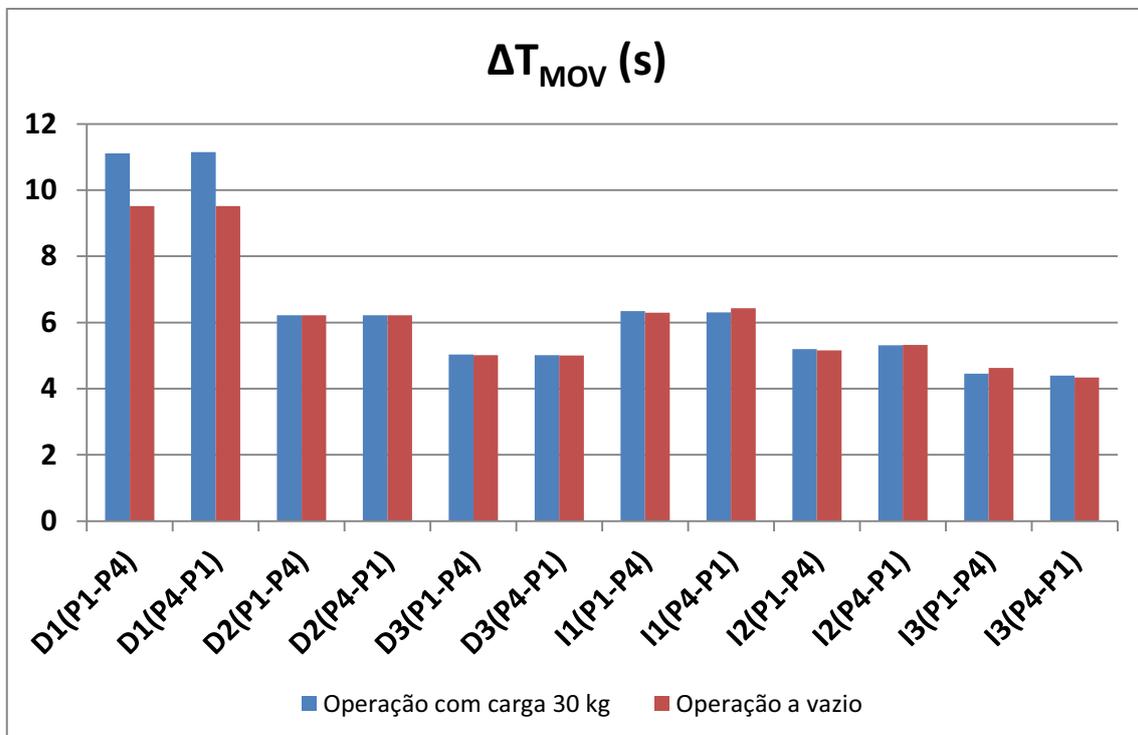
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.48 – Gráfico de barras do intervalo de tempo que das potências médias dissipadas na resistência acoplada ao servodriver do eixo Z durante o processo de regeneração nos casos avaliados.



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.49 – Gráfico de barras dos intervalos de tempo demandados para a realização do movimento nos casos avaliados.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 4.45 mostra o gráfico de barras dos intervalos de tempo demandados para a realização do movimento nos casos avaliados, onde é possível constatar que para a realização dos movimentos em ambos os sentidos (P1-P4, P4-P1), independente das situações de carregamento e operação a vazio, os tempos demandados são equivalentes. Sendo a exceção o resultado obtido para o caso de movimentação direta D1.

É importante ressaltar que os tempos ainda não consideram os tempos estimados para a realização do ato de agarrar e da soltar o produto pelo dispositivo de coleta (garra). Estes intervalos de tempos podem ser estimados como sendo 1s para realização das duas ações.

Considerando os tempos totais obtidos nos testes, determinados pela soma dos intervalos de tempo demandados para a realização da trajetória de ida e de volta e para a atuação do dispositivo de coleta, constata-se que todos os tempos estão em conformidade com as aplicações de baixa cadência e os tempos devido a movimentação interpolada são menores em comparação aos obtidos devido a movimentação direta. Além disso, o caso de movimentação interpolada I3 permitiu a realização da ação característica da paletização em 10s, enquanto o caso de movimentação direta D3 alcançou a capacidade de movimentação em 11s, representando uma movimentação de aproximadamente seis produtos por minuto que pode ser entendida como sendo uma cadência média.

4.4 Custo Financeiro

Com o objetivo de demonstrar a possibilidade do enquadramento da proposta como sendo uma opção de baixo custo em relação às opções de robôs disponíveis no mercado para a mesma finalidade, a tabela 4.5 apresenta um descritivo resumido dos custos financeiros dos equipamentos empregados para a construção do protótipo do robô proposto.

Apesar do total financeiro apresentado na tabela 4.5, estima-se que o preço sugerido de venda do produto possa alcançar o valor de R\$120.000,00, com todos os acessórios de manipulação (garra) e equipamentos de proteção em acordo com a NR12.

Um robô articulado equivalente, com toda a integração de proteção e acessórios de manipulação (garras), de acordo com propostas obtidas no mercado, possui um preço de venda sugerido em torno de 150% deste valor, para a mesma capacidade de peso e cadência. Desta forma, a proposta representa uma opção de menor custo relativo para a realização da tarefa de manipulação de produtos para paletização.

Tabela 4.5 - descritivo resumido dos custos financeiros dos equipamentos empregados para a construção do protótipo do robô proposto.

Descrição	Qtd	Preço Un.	Total
Trilho Guia Linear	12,18	R\$ 246,83	R\$ 3.006,33
Patins Guia Linear	9	R\$ 115,13	R\$ 1.036,13
Polias Sincronizadoras 24-8M-30/6F	8	R\$ 58,00	R\$ 464,00
Presilhas Correias Sincronizadas Perfil Alto	2	R\$ 198,00	R\$ 396,00
Presilhas Correias Sincronizadas Perfil Baixo	6	R\$ 130,00	R\$ 780,00
Correia Sincronizada Aberta 8M-30 (metros)	22	R\$ 48,00	R\$ 1.056,00
Correia Sincronizada Fechada 560-8M-30	1	R\$ 30,00	R\$ 30,00
Acoplamento de Precisão AGS-24	1	R\$ 286,00	R\$ 286,00
Tubos/Estrutura	1	R\$ 2.489,20	R\$ 2.489,20
Corte Laser	1	R\$ 1.375,00	R\$ 1.375,00
Usinagem	1	R\$ 2.831,00	R\$ 2.831,00
Pintura/Zincagem	1	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00
Mancais 25mm	6	R\$ 55,10	R\$ 330,60
Rolamentos Roletes	8	R\$ 12,35	R\$ 98,80
Rolamentos Eixos Motores	2	R\$ 38,00	R\$ 76,00
Rolamento Garra	1	R\$ 142,50	R\$ 142,50
Sensores Indutivos 2mm faceado	8	R\$ 100,00	R\$ 800,00
Parafusos M6 e M5	1	R\$ 300,00	R\$ 300,00
Esteira Porta Cabos	1	R\$ 605,61	R\$ 605,61
Motores/Drives	1	R\$ 16.431,15	R\$ 16.431,15
Redutores	4	R\$ 1.004,00	R\$ 4.016,00
PC/Monitor	1	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
Painel/Miscelânea	1	R\$ 3.000,00	R\$ 3.000,00
Total			R\$ 43.050,31

Fonte: Próprio Autor

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a análise, projeto e o desenvolvimento de um robô manipulador do tipo cartesiano para realizar o processo de paletização de produtos, podendo manipular de cargas variando de 20Kg a 30Kg, envolvendo ciclos de movimentação variando de 7 a 14 segundos, caracterizando para estas situações uma cadência denominada de média a baixa.

Foram avaliadas soluções de dispositivos e estratégias de operação para propiciar o emprego de dispositivos convencionais e de baixo custo na construção da proposta de forma a propiciar potencial de redução significativa do custo relacionado com a construção, a implantação e a manutenção de um robô manipulador industrial, em linhas de baixa e média cadência, onde a amortização do investimento em robôs de manipulação existentes no mercado usualmente importados não é alcançada.

O desenvolvimento do robô manipulador foi fundamentado em um robô do tipo cartesiano, com controle por injeção de posições empregando drives de acionamento denominados “inteligentes”, por possuírem circuitos de controle de eixos únicos internos.

Foram realizados testes experimentais considerando a definição de um caso de estudo envolvendo um movimento característico de deslocamento de ida e retorno de produto usualmente encontrado nas áreas de aplicação pretendidas para o protótipo. Especificamente, foram consideradas duas situações de carregamento, com carga nominal de 30Kg e a vazio, e com as trajetórias sendo geradas considerando interpolação e movimento direto.

Os testes experimentais demonstraram que em todas as situações avaliadas o robô manipulador proposto conseguiu seguir a trajetória fornecida de forma adequada possuindo pequeno erro relativo de posicionamento.

Adicionalmente, constatou-se em todos os movimentos realizados no sentido de descida que os atuadores do eixo Z necessitam de um processo de frenagem dissipativa para dissipar parcelas de energia e evitar que o aumento da tensão no barramento de alimentação atinja níveis de operação insegura. Caso o sistema empregado na dissipação desta energia seja substituído por um conversor estático conectado a um barramento cooperativo com o barramento principal, processo de frenagem dissipativa pode ser modificado

para um processo de frenagem regenerativa, onde esta energia pode ser reaproveitada resultando em uma possível redução do consumo total demandado para a realização dos movimentos pelo robô proposto.

Com relação às metodologias de construção de trajetórias avaliadas, direta e interpolada, em todos os casos os intervalos de tempo resultantes para a realização do movimento foram menores que o requerido para a aplicação em linhas de baixa e média cadencia. Além disso, o emprego da estratégia baseada no fornecimento da trajetória interpolada resultou em tempos menores para a realização dos movimentos especificados. Entretanto, para os casos D3 e I3, os intervalos de tempo resultantes para as estratégias direta se aproximaram dos intervalos de tempo resultantes da estratégia interpolada.

Por outro lado, a utilização de componentes com boa relação de custo e média precisão para o sistema de transmissão alcançou resultados superiores aos requeridos para o processo, ratificados nos testes de movimentação, onde os erros de posicionamento causados pela imprecisão dos componentes quase não foram percebidos, possibilitando um movimento suave e uma entrega precisa do produto ao respectivo destino.

A adaptação de tubos Metalon para construção da estrutura também foi bastante satisfatória. Além de atender os requisitos iniciais de baixo custo e fácil reposição, mostrou-se bastante robusta nas movimentações, com pequenas vibrações que não interferiram na realização do trajeto.

O desenvolvimento do software de controle e da interface refletiu em benefícios para a proposta no que concerne aos aspectos de que a interface praticamente elimina a necessidade de profissionais treinados para a reprogramação do robô, além de ter a capacidade de fornecer informações precisas sobre todo o processo de manipulação, facilitando a manutenção dos equipamentos e também o gerenciamento de produção da célula. O software de controle, baseado na linguagem C#.NET, atendeu as exigências operacionais, tanto para a realização dos cálculos envolvidos na interpolação dos pontos do trajeto quanto para o envio de posições para os drives. O intervalo entre amostras alcançado foi de 20ms, o que proporcionou uma movimentação suave e precisa.

6 TRABALHOS FUTUROS

A proposta de robô manipulador desenvolvida tem potencial para ser aplicada não somente em sistemas de manipulação para paletização, mas também para aplicações que envolvem a ação de posicionamento dos mais diversos tipos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHIOCHETTA, J. C.; HATAKEYAMA, K.; LEITE, M. L. G. Evolução histórica da indústria brasileira: desafios, oportunidades e formas de gestão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, XXIII, 2004, Brasília. **Anais eletrônicos...** Brasília: UnB, 2004. Disponível em: < http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2004/artigos/08_190.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2014.
- [2] CRESPO, S. G. **Indústria no governo Dilma tem pior desempenho desde Collor**. São Paulo: UOL Economia, 2014. Apresenta textos especializados sobre economia no Brasil. Disponível em: <<http://achadoseconomicos.blogosfera.uol.com.br/2014/02/04/industria-no-governo-dilma-tem-pior-desempenho-desde-collor/>>. Acesso em: 24 mar. 2014.
- [3] BRUCIAPAGLIA, A. H.; FARINES, J. M.; CURY, J. E. R. A automação no processo produtivo: desafios e perspectivas. **Nexus Ciência e Tecnologia**, Florianópolis, v. 1, n. 1, p. 28-31, 2001.
- [4] VIEIRA, S. Mercado de robôs caminha para o 'gargalo'. **Revista Mecatrônica**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 10-12, abr. 2003. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1064-mercado-de-robots-caminha-para-o-gargalo>>. Acesso em: 24 mar. 2014.
- [5] AYRES, M. **Os robôs no Brasil e no mundo**. São Paulo: UOL Tecnologia, out. 2007. Apresenta textos especializados sobre tecnologia. Disponível em: <<http://tecnologia.uol.com.br/ultnot/2007/10/01/-ult4213u146.jhtm>>. Acesso em: 25 mar. 2014.
- [6] SALVES, D. **Brasil avança em robótica, mas ainda sofre com infraestrutura**. São Paulo: UOL Tecnologia, dez. 2011. Apresenta textos especializados sobre tecnologia. Disponível em: <<http://tecnologia.terra.com.br/robos/brasil-avanca-em-robotica-mas-ainda-sofre-com-infraestrutura,72f84dbea5bda310VgnCLD200000bbcccb0aRCRD.html>>. Acesso em : 25 mar. 2014.

- [7] INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS. **World robotics 2013 industrial robots report: executive summary**. Germany, 2013. 21 p. Disponível em: <www.ifr.org/industrial-robots/statistics>. Acesso em: 24 mar. 2014.
- [8] SALIM, M. **Os 10 países mais robotizados do mundo**. São Paulo: Revista Exame Economia, jan. 2012. Apresenta textos especializados sobre economia no Brasil. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/economia/noticias/os-10-paises-mais-robotizados-do-mundo>>. Acesso em: 24 mar. 2014.
- [9] GUIZZO, E. The rise of the machines. **IEEE Spectrum**, New York, v. 45, n. 12, 2008, p. 88-88. Disponível em: <<http://spectrum.ieee.org/robotics/industrial-robots/the-rise-of-the-machines>>. Acesso em: 25 mar. 2014.
- [10] BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **BNDES Finame – Financiamento de Máquinas e Equipamentos**. Brasília: BNDES, 2014. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Apoio_Financeiro/Produtos/FINAME_Maquinas_e_Equipamentos/>. Acesso em: 25 mar. 2014.
- [11] Yoshikawa, T. **Foundations of Robotics: Analysis and Control**. Massachusetts: The MIT Press, p. 298, Jan. 2003.
- [12] SICILIANO, B.; VILLANI, L.; SCIAVICCO, L.; ORIOLO, G. **Robotics: Modelling, Planning and Control**. 2nd ed. London: Springer-Verlag London, p. 632, Mar. 2011.
- [13] MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO (MTE). **Manual de aplicação da norma regulamentadora nº 17 – NR17**. 2. Ed. Brasília: Secretaria de Inspeção do Trabalho, p. 101, 2002.
- [14] SHELL R. L.; HALL E. L. **Handbook Of Industrial Automation**. New York: Marcel Dekker, Inc, p. 857, 2000.
- [15] GUIZZO E. Three engineers, hundreds of robots, one warehouse. **IEEE Spectrum**, New York, v. 45, n. 7, Jul. 2008, p. 26-34.
- [16] ECHELMEYER, W.; KIRCHHEIM, A; WELLBROCK, E. Robotics-logistics: challenges for automation of logistic processes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION AND

- LOGISTICS, II, 2008, Qingdao. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2008. p. 2099-2103.
- [17] ZHU, X.; LI, C.; QIU, W. The researchment and application based on palletizing robot management controlling system project. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON E-BUSINESS AND E-GOVERNMENT, II, 2011, Shanghai. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2011. p. 1-6.
- [18] XIAOQING, G.; JIDONG, W. Mechanical design and kinematic analysis of a new kind of palletizing robot. In: IEEE International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, II, 2011, Hohhot. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2011. p. 404-408.
- [19] JASPER, D. et al. Automated robot-based separation and palletizing of microcomponents. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ASSEMBLY AND MANUFACTURING, III, 2011, Tampere. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2011. p. 1-6.
- [20] SCHUSTER, M. et al. Stable stacking for the distributor's pallet packing problem. In: IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, XIX, 2010, Taipei. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2010. p. 3646-3651.
- [21] ZHANG, L. et al. Reformation of the transfusion bags' secondary packaging line using parallel robot. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS AND AUTOMATION, III, 2007, Harbin. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2007. p. 2043-2048.
- [22] WAWERLA, J.; VAUGHAN, R.T. A fast and frugal method for team-task allocation in a multi-robot transportation system. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2010, Anchorage. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2010. p. 1432-1437.
- [23] CHEN, H. B. et al. Adaptive control on wire feeding in robot arc welding system. In: IEEE CONFERENCE ON ROBOTICS, AUTOMATION AND MECHATRONICS, III, 2008, Chengdu. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2008. p. 119-122.

- [24] TEOH, B. E.; RAGAVAN, S.V. PAINTbot - FPGA based wall painting service robot prototype. In: IEEE RECENT ADVANCES IN INTELLIGENT COMPUTATIONAL SYSTEMS, I, 2011, Trivandrum. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2011. p. 777-782.
- [25] ENDO, M. et al. A car transportation system by multiple mobile robots – iCART. In: IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, XVII, 2008, Nice. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2008. p. 2795-2801.
- [26] KASHIWAZAKI, K. et al. A car transportation system using multiple mobile robots: iCART II. In: IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, XX, 2011, San Francisco. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2011. p. 4593-4600.
- [27] INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS AND UNITED NATIONS. **World robotics 2005: statistics, market analysis, case studies and profitability of robot investment.** Geneva: United Nations, p. 408, 2005.
- [28] PIETSCH, I.T. et al. How to reach the dynamic limits of parallel robots? An autonomous control approach. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, New York, v. 2, n. 4, Oct. 2005, p. 369-380.
- [29] CONSTANTINESCU D.; CROFT, E. A. Smooth and time-optimal trajectory planning for industrial manipulators along specified paths. **Journal of Robotic Systems**, v. 17, n. 5, p. 233-249, 2000.
- [30] PIAZZI, A; VISIOLI, A. Global minimum-time trajectory planning of mechanical manipulators using interval analysis. **International Journal of Control**, v. 71, n. 4, Nov. 1998, p. 631–652.
- [31] RUBIO, F. et al. The simultaneous algorithm and the best interpolation function for trajectory planning. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 37, n. 5, Aug. 2010, p. 441-451.
- [32] Zheng, C.; Su, Y.; Müller, P. C. Simple online smooth trajectory generations for industrial systems, **Mechatronics**, New York, v. 19, n. 4, Jun. 2009, p. 571-576.

- [33] FIELD, G.; STEPANENKO, Y. Iterative dynamic programming: an approach to minimum energy trajectory planning for robotic manipulators. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, XV, 1996, Minneapolis. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 1996. p. 2755–2760.
- [34] GREGORY, J.; OLIVARES, A.; STAFFETTI, E. Energy-optimal trajectory planning for robot manipulators with holonomic constraints. **Systems & Control Letters**, v. 61, n. 2, Feb. 2012, p. 279-291.
- [35] RUBIO, F. et al. Optimal time trajectories for industrial robots with torque, power, jerk and energy consumed constraints. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 39, n. 1, Jan. 2012, p. 92-100.
- [36] PIAZZI, A; VISIOLI, A. Global minimum-jerk trajectory planning of robot manipulators. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. 47, n. 1, 2000, p. 140–149.
- [37] GASPARETTO, A.; ZANOTTO, V. A technique for time-jerk optimal planning of robot trajectories. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, New York, v. 24, n. 3, 2008, p. 415–426.
- [38] DONG, J.; FERREIRA, P.M.; STORI, J.A. Feed-rate optimization with jerk constraints for generating minimum-time trajectories, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, New York, v. 47, n. 12, Oct. 2007, p. 1941-1955.
- [39] Mattmüller, J.; Gisler, D. Calculating a near time-optimal jerk-constrained trajectory along a specified smooth path, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, city, v. 45, n. 9-10, Dec. 2009, p. 1007-1016.
- [40] ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP. Disponível em: <<http://www.ethercat.org/>>. Acesso em: 22 Apr. 2014.
- [41] CAN IN AUTOMATION. Disponível em: <<http://www.can-cia.org/>>. Acesso em: 25 mar. 2014.
- [42] THE MODBUS ORGANIZATION. Disponível em: <<http://www.modbus.org/>>. Acesso em: 22 Apr. 2014.
- [43] MICROSOFT DEVELOPER NETWORK, **Memory-Mapped Files**. Redmond: Microsoft, 2014. Disponível em:

<<http://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd997372.aspx/>>. Acesso em: 22 Apr. 2014.

[44] CPLUSPLUS.COM. Disponível em: <<http://www.cplusplus.com/>>. Acesso em: Apr. 2014.

[45] CODE PROJECT, **Head-to-head-benchmark-Csharp-vs-NET**. Canada: Code Project, 2011. Disponível em: <<http://www.codeproject.com/Articles/212856/Head-to-head-benchmark-Csharp-vs-NET>>. Acesso em: Apr. 2014.