

Percursos de Maquinagem Realizados com Robôs

Inês Figueiredo Baptista

Dissertação de Mestrado

Orientadores:

Professor Paulo Abreu

Professor Manuel Romano Barbosa



MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Especialização em Automação

Junho de 2016

*“O começo de todas as ciências é o
espanto de as coisas serem o que são”*

Aristóteles

Resumo

Atualmente, os robôs desempenham um papel muito relevante no setor industrial, possibilitando a realização de tarefas complexas com uma grande produtividade e flexibilidade, aliadas a um baixo custo. Porém, no campo da maquinagem, mais concretamente, a execução de operações de fresagem é feita maioritariamente por máquinas CNC. A baixa rigidez estrutural, baixa exatidão e as limitações das ferramentas de software direcionadas para a programação e simulação de robôs para maquinagem, ao contrário das máquinas CNC, são as principais razões para a sua reduzida utilização neste campo.

Nesta dissertação são analisadas algumas das diferentes especificações disponíveis nestas aplicações, nomeadamente no Mastercam®/Robotmaster®, e avaliadas as suas implicações em trajetórias de fresagem e nos programas gerados para a linguagem do robô. A avaliação da influência da parametrização e programação recorre ao software de programação *offline* RobotStudio® e em particular à funcionalidade *Signal Analyzer*. Foram consideradas operações de maquinagem elementares e operações de *pocketing*. Verificou-se que o parâmetro *Zone* é determinante na trajetória (velocidade e percurso) executada pelo robô. Quanto maior for o parâmetro *Zone*, maior é o afastamento ao percurso programado e menor é a variação da velocidade relativamente à velocidade programada. Foram analisadas oito estratégias de maquinagem de *pockets* disponíveis e parametrizadas no Mastercam. A análise concentrou-se na verificação da extensão dos programas referentes a cada operação, nos seus tempos de simulação, assim como a potência elétrica consumida e a velocidade do TCP durante a sua execução. Diferentes estratégias de maquinagem correspondem a tempos de maquinagem distintos. A escolha de uma estratégia de maquinagem condiciona a ocorrência de picos de consumo de potência elétrica e a suavidade do perfil de velocidades. Estes picos estão associados às mudanças de direção nas trajetórias.

No que respeita à maquinagem com robôs industriais, a fresagem é ainda uma área em desenvolvimento e com bastante potencial, de modo a tirar partido das vantagens do uso de robôs.

Abstract

Nowadays, robots play a very important role in the industrial sector, making it possible to perform complex tasks with high productivity and flexibility, combined with low cost. However, particularly in the machining industry, implementation of milling operations is mainly performed by CNC machines. Unlike these, low structural rigidity, low accuracy and software limitations characterize robot programming of machining operations, which are the main reasons for the limited use of robots in this field.

In this dissertation some of the different specifications available in these programming tools, in particular Mastercam®/Robotmaster®, are analyzed and its implications in milling trajectories and in the programs generated for the robot are evaluated. The evaluation of the parameterization and programming makes use of offline programming software RobotStudio and particularly the Signal Analyzer functionality. Elementary machining operations and pocketing operations were considered. It was found that the *Zone parameter* is determinant in the trajectory (speed and path) executed by the robot. For a greater *Zone parameter*, higher distance to the programmed path and lower velocity variation from the programmed speed were obtained. Eight pocketing strategies available in Mastercam were analyzed. The analysis focused on the robot programs extension for each operation, in its simulation time and also on the consumed electric power and TPC speed. Different machining strategies correspond to different machining times and the used machining strategy affects the occurrence of electric power consumption peaks and velocity path smoothness. These peaks are associated with the changes of direction in the trajectories.

When it comes to industrial robots machining, milling operations are still a developing area with plenty of potential, in order to exploit the benefits of robot use.

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Professor Paulo Abreu e Professor Manuel Romano Barbosa, por toda a atenção e tempo disponibilizados ao longo da realização deste trabalho, pelas críticas construtivas e todo o conhecimento que me transmitiram, um enorme agradecimento.

À minha família, especialmente aos meus pais, pelo empenho em proporcionar-me um futuro de oportunidades e não hesitar em prestar sempre as melhores condições para que eu pudesse alcançar esta etapa com sucesso, um sincero obrigado.

Ao meu namorado, Igor Camarinha, pelo apoio incondicional e por toda a motivação dada ao longo destes meses, um agradecimento especial.

Aos meus amigos, que me acompanharam desde o primeiro dia e me proporcionaram momentos de aprendizagem e boa disposição nestes anos, um grande obrigado.

Índice de Conteúdos

1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos da Dissertação	2
1.3. Etapas do Projeto	3
1.4. Estrutura da Dissertação	4
2. Maquinagem com Robôs Industriais.....	5
2.1. Robôs Industriais	5
2.1.1. Origem e Evolução	5
2.1.2. Fabricantes	6
2.1.3. Aplicações	7
2.2. Maquinagem	9
2.3. Fresagem com Robôs Industriais.....	14
3. Programação de Robôs.....	19
3.1. Programação Online	19
3.2. Programação Offline	21
3.3. Softwares para Programação de Robôs Industriais	22
3.4. Mastercam / Robotmaster.....	25
4. Estratégias de Maquinagem e Funções de Interpolação.....	31
4.1. Estratégias de Maquinagem.....	32
4.2. Funções de Interpolação a Nível do Robô.....	35
5. Casos de Estudo e Análise de Resultados	37
5.1. Metodologia e Procedimentos	38
5.2. Análise de Percurso Linear entre Três Pontos.....	41
5.3. Análise de Percurso Linear entre Quatro Pontos - MoveL.....	49
5.4. Análise de Percurso entre Cinco Pontos.....	52
5.5. Análise do Parâmetro “ <i>Roll Cutter Around Corners</i> ”	54
5.6. Análise Comparativa de Estratégias de Maquinagem	55
6. Conclusões	63
Referências	65
Anexos.....	69

Anexo 1 - Gráficos das Trajetórias Executadas pelo Robô	69
Anexo 2 – Gráficos da Potência Elétrica Consumida.....	73
Anexo 3 – Gráficos dos Perfis de Velocidade do TCP	76

Índice de Figuras

Figura 1 - Unimate, o primeiro robô [3].	5
Figura 2 - Robô industrial ABB IRB 260 [4].	5
Figura 3 - Fornecimento mundial anual estimado de robôs industriais [5].	6
Figura 4 - Percentagem de robôs industriais vendidos em 2014 por atividade industrial [5].	7
Figura 5 - Esquema da fresagem tangencial concordante [17].	10
Figura 6 - Esquema da fresagem tangencial discordante [17].	10
Figura 7 - Esquema da fresagem frontal [17].	10
Figura 8 - Tipos de fresas e alguns exemplos [18].	11
Figura 9 - Realização de uma escultura por um robô [31].	17
Figura 10 - Exemplo de uma programação on-line [34].	20
Figura 11 - Etapas principais da programação <i>offline</i> .	21
Figura 12 - Métodos de programação de um robô para maquinagem.	24
Figura 13 - Exemplo de simulação do ambiente Mastercam/Robotmaster.	27
Figura 14 - Esquema de uma trajetória realizada com uma configuração por Seguimento de Perfil.	28
Figura 15 - Exemplo da otimização de uma operação no Robotmaster.	29
Figura 16 - Exemplo de duas configurações possíveis para o robô para a mesma posição/orientação da ferramenta.	31
Figura 17 - Conceito do parâmetro <i>Zone</i> e as zonas e pontos de relevo associados [41].	36
Figura 18 - Processo utilizado na análise dos casos de estudo deste trabalho.	37
Figura 19 - Representação parcial da trajetória de canto realizada pelo robô para as operações simuladas em torno do ponto P2.	42
Figura 20 - Perfil de velocidade do TCP para as operações de canto simuladas com parâmetro <i>Zone</i> z1 e z10 e velocidade programada de 20 mm/s.	43
Figura 21 - Perfil de velocidade do TCP para as operações de canto simuladas com parâmetro <i>Zone</i> z1 e z10 e uma velocidade programada de 200 mm/s.	43
Figura 22 - Representação parcial do perfil de velocidade do TCP para as operações de canto simuladas com parâmetro <i>Zone</i> z1 e z10 e uma velocidade programada de 20 mm/s.	44
Figura 23 - Representação parcial do perfil de velocidade do TCP para as operações de canto simuladas com parâmetro <i>Zone</i> z1 e z10 e uma velocidade programada de 200 mm/s.	45

Figura 24 - Distância ao ponto de inversão (P2) para diferentes <i>Zones</i> e velocidades de 20 e 200 mm/s.	46
Figura 25 - Representação parcial da trajetória em linha realizada pelo robô para diferentes <i>Zones</i> e uma velocidade de 20 mm/s.	47
Figura 26 - Representação parcial da trajetória em linha realizada pelo robô para diferentes <i>Zones</i> e uma velocidade de 200 mm/s.	47
Figura 27 - Perfil de velocidades do TCP para diferentes <i>Zones</i> e uma velocidade de 20 mm/s.	47
Figura 28 - Perfil de velocidades do TCP para diferentes <i>Zones</i> e uma velocidade de 200 mm/s.	47
Figura 29 - Posição do TCP sem P2 programada a uma velocidade de 20 mm/s.	48
Figura 30 - Posição do TCP sem P2 programado a uma velocidade de 200 mm/s.	48
Figura 31 - Perfil de velocidades do TCP para diferentes <i>Zones</i> e uma velocidade de 20 mm/s.	48
Figura 32 - Perfil de velocidades do TCP para diferentes <i>Zones</i> e uma velocidade de 200 mm/s.	48
Figura 33 - Trajetória programada para o robô.	49
Figura 34 - Trajetória esperada.	49
Figura 35 - Posição do TCP para diferentes <i>Zones</i> , velocidade de 20 mm/s e distância entre P2 e P3 de 5 mm.	49
Figura 36 - Posição do TCP para diferentes <i>Zones</i> , velocidade de 200 mm/s e distância entre P2 e P3 de 5 mm.	50
Figura 37 - Posição do TCP para diferentes <i>Zones</i> , velocidade de 20 mm/s e distância entre P2 e P3 de 10 mm.	51
Figura 38 - Posição do TCP para diferentes <i>Zones</i> , velocidade de 200 mm/s e distância entre P2 e P3 de 10 mm.	51
Figura 39 - Trajetória programada para o robô.	52
Figura 40 - Posição do TCP para diferentes <i>Zones</i> , 20 mm/s e distância entre P2 e P3 de 5 mm.	52
Figura 41 - Posição do TCP para diferentes <i>Zones</i> , 200 mm/s e distância entre P2 e P3 de 5 mm.	52
Figura 42 - Posição do TCP para diferentes <i>Zones</i> , 20 mm/s e distância entre P2 e P3 de 10 mm.	53

Figura 43 - Posição do TCP para diferentes <i>Zones</i> , 200 mm/s e distância entre P2 e P3 de 10 mm.	53
Figura 44 - Posição do TCP para diferentes <i>Zones</i> , 20 mm/s e distância entre P2 e P3 de 20 mm.	53
Figura 45 - Posição do TCP para diferentes <i>Zones</i> , 200 mm/s e distância entre P2 e P3 de 20 mm.	53
Figura 46 - Contorno com arredondamento dos cantos.	54
Figura 47 - Contorno sem arredondamento dos cantos.	54
Figura 48 - Trajetória determinada pelo Mastercam para a estratégia de Maquinagem a Alta Velocidade (6).	57
Figura 49 - Gráfico da potência consumida para as estratégias 3 e 8.	59
Figura 50 - Gráfico da potência consumida para as estratégias 1 e 7.	59
Figura 51 - Perfil de velocidade do TCP para a estratégia 1.	61
Figura 52 - Perfil de velocidade do TCP para a estratégia 7.	61
Figura 53 - Perfil de velocidade do TCP para a estratégia 8.	61

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Diagrama de Gantt do presente projeto.....	3
Tabela 2 - Estrutura série vs. estrutura paralela.....	8
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens da utilização de robôs industriais em maquinagem [2].	15
Tabela 4 - Exemplos de robôs industriais para operações de maquinagem.	16
Tabela 5 - Fabricantes de robôs, software de programação <i>offline</i> e linguagens de programação.	22
Tabela 6 - Métodos de corte para o desbaste de <i>pockets</i>	33
Tabela 7 - Métodos de corte em operações de facejamento.	33
Tabela 8 - Tipos de desbaste superficial disponíveis no Mastercam.	34
Tabela 9 - Exemplos de valores de <i>zonedata</i> pré-definidos no sistema.....	36
Tabela 10 - Parâmetros específicos de cada caso de estudo.....	39
Tabela 11 - Casos de estudo para analisar trajetórias, perfis de velocidade e a influência do parâmetro <i>Zone</i>	41
Tabela 12 - Operações simuladas no estudo da trajetória de canto.	42
Tabela 13 - Comparação de estratégias de maquinagem.....	56

1. Introdução

Neste primeiro capítulo da dissertação é apresentado o tema a desenvolver, bem como os objetivos que se pretendem atingir com este trabalho. É feita também a contextualização do mesmo, por forma a tornar compreensível a temática abordada e a motivação para a realização deste projeto. Numa parte final, é descrita a estrutura da dissertação e os assuntos tratados em cada capítulo.

1.1. Contextualização

A procura crescente por produtos com um preço mais baixo aliado a uma melhor qualidade cria a necessidade de um constante avanço tecnológico, por forma a que as empresas melhorem a sua produtividade e se mantenham atualizadas. Para além disto, dá-se um aumento dos níveis de segurança fabril, tanto de equipamentos como pela substituição dos operadores na realização de tarefas indesejáveis.

A utilização de robôs tem vindo a crescer exponencialmente devido à grande competitividade nos setores da produção industrial. Atualmente verifica-se que a indústria automóvel representa o maior consumidor de robôs, para tarefas de manuseamento, soldadura, pintura, corte, entre outras, seguida da indústria de componentes elétricos/eletrónicos [1].

Relativamente a operações de maquinagem, verifica-se que estas ainda correspondem a uma pequena parte do mercado dos robôs industriais. As técnicas de remoção de material, como a fresagem por CNC, mostraram a sua capacidade de lidar com múltiplos desafios de maquinagem deste processo. No entanto, podem considerar-se como limitação, por um lado, o menor volume de trabalho da máquina CNC comparativamente ao volume de trabalho de um robô. Por outro lado, um robô industrial possui, à partida, 6 eixos, enquanto na maquinagem CNC é frequente a maquinagem em 3 eixos ou 5 eixos [2].

Assim, o recurso a robôs industriais para a realização destas operações pode responder melhor a estas limitações, apesar de também possuírem inconvenientes:

- a nível da rigidez estrutural;
- a nível da exatidão;

- a nível das ferramentas de software disponíveis para a sua programação, que não estão direcionadas para operações de maquinagem, dificultando a definição de percursos de maquinagem.

Como tal, um método utilizado na programação de robôs industriais para operações de maquinagem consiste em recorrer a softwares de CAM (*Computer Aided Manufacturing*), tradicionalmente usados para gerar programas de CN (Comando Numérico), envolvendo a utilização de pós-processadores particulares como forma de adaptação à linguagem de programação de robôs.

As ferramentas de software de CAM disponibilizam um conjunto de funcionalidades alargadas e parametrizações com impacto nas trajetórias realizadas pelo robô. Assim, e introduzindo o tema da dissertação em desenvolvimento, o presente trabalho pretende explorar e analisar as distintas opções de escolha e parametrização das estratégias de maquinagem que se colocam aquando da programação de robôs industriais para maquinar peças.

1.2. Objetivos da Dissertação

A presente dissertação tem como principal objetivo o estudo e a avaliação do modo de programação de robôs industriais para maquinagem, recorrendo às aplicações *Mastercam®* /*Robotmaster®* e *RobotStudio®* para simulação das várias etapas na obtenção do programa de maquinagem até à sua execução num robô industrial.

Assim, a concretização deste projeto tem a finalidade de:

- analisar as diferentes especificações geralmente disponíveis para as estratégias de maquinagem com robôs;
- verificar as implicações de diferentes métodos de interpolação em trajetórias de maquinagem na obtenção de uma dada forma;
- avaliar as respetivas consequências na criação de programas na linguagem do robô e nas trajetórias geradas, em termos de desempenho, extensão dos programas e características das formas obtidas.

1.3. Etapas do Projeto

A realização deste trabalho envolveu as seguintes etapas:

1. Pesquisa e estado da arte sobre maquinagem com robôs industriais
2. Definição e caracterização do processo de fresagem
3. Familiarização com software de programação off-line *Mastercam /Robotmaster*
4. Estratégias de maquinagem e parametrização
5. Análise de influência de métodos de interpolação nos programas gerados para o robô
6. Relatório final

A calendarização e duração das fases anteriores estão explicitadas no diagrama de Gantt da Tabela 1.

Tabela 1 - Diagrama de Gantt do presente projeto.

Tarefa	Fev. 2016		Março 2016				Abril 2016				Maio 2016				Junho 2016		
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17
1. Pesquisa/ Estado da Arte																	
2. Definição e caracterização do processo de fresagem																	
3. Familiarização com software de programação																	
4. Estratégias de maquinagem e parametrização																	
5. Análise de influência de métodos de interpolação																	
6. Escrita da Dissertação																	

1.4. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1 – Parte introdutória, já apresentada, onde é explicitado o âmbito deste projeto, é feita uma contextualização do tema e são expostos os objetivos da dissertação.
- Capítulo 2 – Introdução aos robôs industriais, sua evolução, aplicações e principais fabricantes. Breve descrição do conceito de maquinagem e caracterização do processo de fresagem, processo de maior relevância neste trabalho. Exposição do estado da arte sobre maquinagem com robôs industriais.
- Capítulo 3 – Descrição dos métodos de programação de robôs, linguagem utilizada, e análise dos softwares utilizados para este fim.
- Capítulo 4 – Estudo das estratégias de maquinagem disponíveis e funções de interpolação existentes para os percursos realizados por robôs.
- Capítulo 5 – Análise da parametrização de percursos de maquinagem nos programas gerados para o robô, por forma a avaliar diferentes alternativas para a obtenção de uma determinada forma.
- Capítulo 6 – Conclusões sobre todo o trabalho desenvolvido.

No fim constam as Referências consultadas para a realização desta dissertação, seguidas dos Anexos.

2. Maquinagem com Robôs Industriais

2.1. Robôs Industriais

2.1.1. Origem e Evolução

As primeiras alusões a robôs datam de 3500 anos AC, quando os gregos e os romanos incorporaram a ideia de mecanismos com movimentos automáticos. A construção de pequenos brinquedos e aparelhos mecânicos, como por exemplo relógios de água, também foram um passo evolutivo da robótica. Só em 1923, Karel Capek, um dramaturgo checo, utiliza pela primeira vez o termo robô, significando trabalhador forçado ou escravo e usado para referir máquinas desenhadas à imagem do homem para realizar o tipo de trabalho humano [3].

A robótica teve uma evolução radical no século XX, com a criação de máquinas cada vez mais sofisticadas e complexas e até mesmo robôs que se confundem com seres humanos em termos de locomoção e autonomia na realização de tarefas.

O crescimento e evolução do setor industrial tornou pertinente o aparecimento de robôs capazes de desempenhar tarefas consideradas perigosas ou monótonas para operadores humanos assim como aumentar a produtividade. Com o desenvolvimento dos primeiros sistemas de comando numérico e computadores foi possível chegar à criação do primeiro robô industrial em 1960, o Unimate. A Figura 1 e a Figura 2 exemplificam algumas das diferenças entre o primeiro robô, de 1960, e um robô moderno, tendo-se verificado uma grande evolução tecnológica: maior compacidade, maior complexidade mecânica e eletrônica.



Figura 1 - Unimate, o primeiro robô [3].



Figura 2 - Robô industrial ABB IRB 260 [4].

As vantagens associadas à utilização de robôs na realização de tarefas desagradáveis para os operadores, com grande eficiência e produtividade a um baixo custo, levou ao aumento significativo do recurso a robôs em aplicações industriais. Segundo a Federação Internacional da Robótica (*International Federation of Robotics – IFR*), a venda de robôs tem tido um crescimento significativo, à exceção do ano de 2009, como pode ser observado na Figura 3.

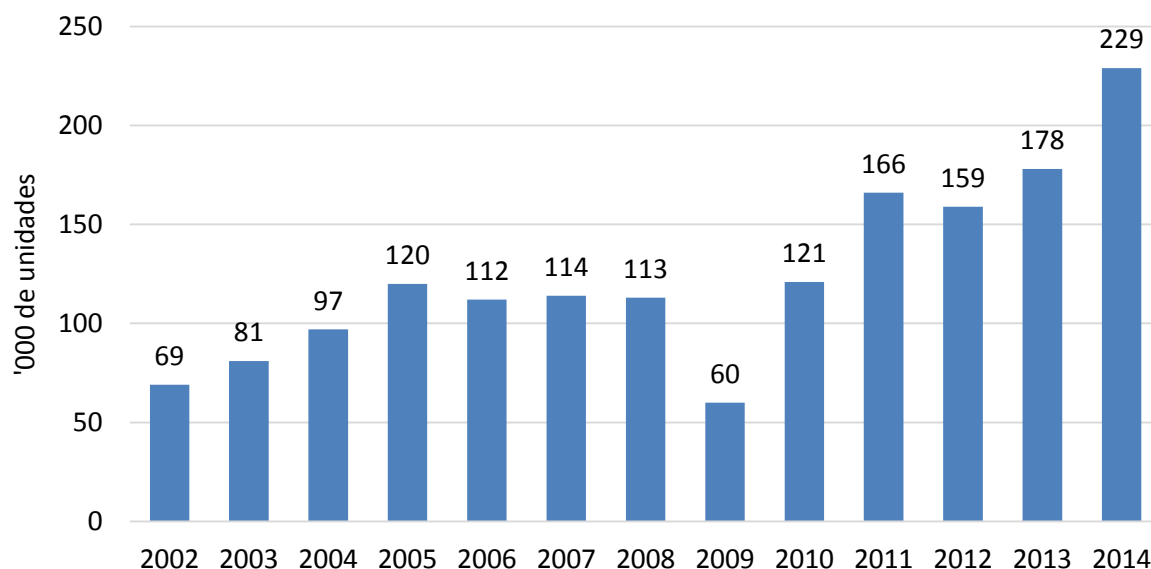


Figura 3 - Fornecimento mundial anual estimado de robôs industriais [5].

O uso de robôs industriais juntamente com os sistemas CAD (*Computer Aided Design*) e CAM (*Computer Aided Manufacturing*), caracteriza a última tendência na automatização dos processos de fabrico em geral [6], prevendo-se um grande crescimento nos próximos anos.

2.1.2. Fabricantes

Com o desenvolvimento tecnológico e com a evolução dos primeiros robôs, surgiram diversas empresas dedicadas a esta temática e outras expandiram as suas áreas de negócio. Os principais fabricantes mundiais de robôs industriais, são a suíça ABB, a japonesa Fanuc, a alemã Kuka e também a Yaskawa Motoman, empresa americana subsidiária da japonesa Yaskawa Electric Corporation. A maioria destes fabricantes, para além de produzirem robôs industriais, detêm também outras áreas de negócio, como é o caso de servomotores, controladores e soluções de automação.

Os robôs industriais disponibilizados pela ABB e a Motomam possuem capacidades de carga de gama média (desde 2 até ~800 Kg). A Fanuc e a Kuka, para além de fornecerem robôs industriais desta gama, comercializam robôs para cargas elevadas e trabalhos pesados (cargas desde 2 até ~2300 Kg) [7-10]. Para além disto, disponibilizam robôs para aplicações específicas, como pintura ou soldadura.

2.1.3. Aplicações

No contexto industrial, os robôs são utilizados para realizar operações de transporte de materiais, operações de inspeção e teste, montagem e operações de processo, como por exemplo, tarefas de maquinagem, soldadura, pintura ou corte. Na Figura 4 estão representadas as distribuições relativas dos robôs industriais pelas diversas aplicações.

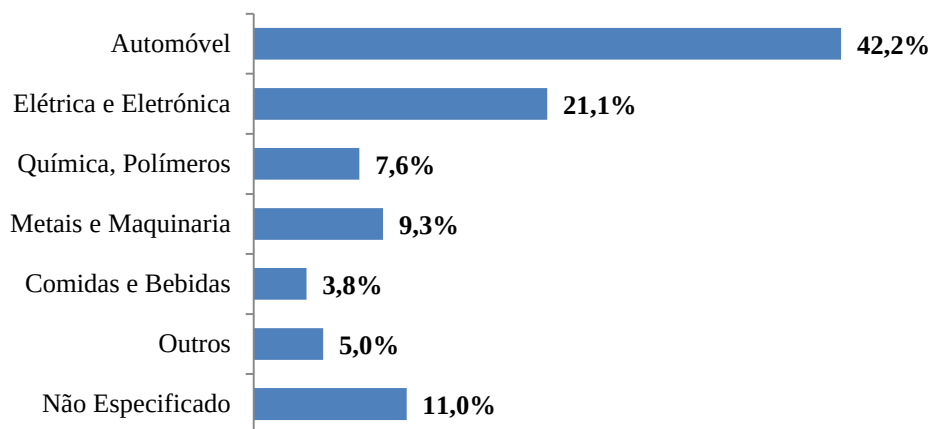


Figura 4 –Percentagem de robôs industriais vendidos em 2014 por atividade industrial [5].

É de salientar que a utilização de robôs industriais em aplicações específicas de maquinagem é muito reduzida e, de acordo com a RIA [11], as vendas anuais de robôs industriais para esta área foram inferiores a 5% em 2008. Há ainda que ter em consideração que dentro desta área de maquinagem as operações mais comuns são a rebarbagem e o polimento, pelo que a fresagem é um campo de aplicação ainda com pouca expressão [11].

Em termos de configuração física, os robôs podem ser de estrutura paralela ou estrutura série. A Tabela 2 opõe as características dos dois tipos de configuração.

Tabela 2 - Estrutura série vs. estrutura paralela.

Estrutura Série	Estrutura Paralela
• Baixa rigidez estrutural • Baixa compacidade • Elevada inércia • Grande volume de trabalho • Fraca capacidade de posicionamento • Fraca relação peso da estrutura/ carga manipulada (ex: IRB 2400 – 380kg/20kg) 	• Elevada rigidez estrutural • Elevada compacidade • Baixa inércia • Reduzido volume de trabalho • Boa capacidade de posicionamento • Boa relação peso da estrutura/ carga manipulada (ex: IRB360 120kg/8kg) 

A estrutura série é a mais comum, devido ao grande volume de trabalho oferecido, necessário para diversas aplicações, como as referidas na Figura 4. O aparecimento de robôs mais rápidos e autônomos vem num momento em que as empresas - desde as aeroespaciais e defesa às de equipamentos médicos e de consumo - estão sob uma crescente pressão para responder rapidamente às preferências e expectativas do cliente, que se traduzem em ciclos de vida dos produtos cada vez mais curtos. Deste modo, fábricas onde são usados robôs, serão altamente automatizadas e simultaneamente flexíveis para produzir diferentes variações de um mesmo produto de um modo mais rápido e barato, por exemplo com o recurso a tecnologias de mudança rápida de ferramenta [12].

As tendências atuais da robótica envolvem a colaboração entre robôs e operadores, partilhando o mesmo espaço de trabalho – Robôs Colaborativos. Para além disso, sistemas sensoriais de força e visão avançados têm um papel mais relevante no auxílio ao funcionamento dos robôs, permitindo a simplificação do processo de programação dos robôs, bem como a utilização de sistemas de controlo que permitem implementar comportamentos automáticos em situações de surgimento de algum impedimento nas operações diárias [13].

As operações de montagem de componentes é uma das áreas que têm vindo a adotar a utilização de robôs colaborativos.

2.2. Maquinagem

Maquinagem é o termo utilizado para descrever o processo de fabrico de peças por remoção de material. As operações de maquinagem são usualmente categorizadas em [14-16]:

- processos de corte convencionais por arranque de apra, por exemplo, torneamento, aplainamento, furação, mandrilagem, fresagem, brochagem, limagem, entre outros.
- processos abrasivos, por exemplo polimento ou retificação, entre outros.
- processos não-tradicionais – recurso a fontes de energia elétrica e química, por exemplo, maquinagem eletroquímica, maquinagem por feixe de eletrões, entre outros.

Os processos convencionais de maquinagem mais relevantes são o torneamento, a furação e a fresagem. Neste trabalho e de acordo com a temática da dissertação, é considerado apenas o processo de fresagem, visto ser um dos processos de fabrico em que o emprego de robôs industriais tem vindo a ser utilizado.

Fresagem

Este processo de maquinagem consiste na remoção de material com o auxílio de ferramentas rotativas com múltiplas arestas de corte, como vista à obtenção de superfícies com forma e acabamentos específicos. Durante esta operação, tipicamente uma ferramenta está fixa, enquanto a mesa, onde a peça a ser maquinada está fixada, se desloca de acordo com uma dada trajetória [17]. Existem também máquinas em que a ferramenta se desloca.

Existem duas técnicas distintas de remoção de material por este processo:

- Fresagem Tangencial – O eixo da ferramenta está disposto na horizontal, paralelo com a superfície. Esta técnica subdivide-se ainda em dois tipos de fresagem:
 - ✓ Concordante - A fresa gira na mesma direção do movimento da peça, como se pode observar na Figura 5. Em casos em que a árvore não é suficientemente rígida, a fresa pode escalar a peça e as arestas de corte danificam-se.

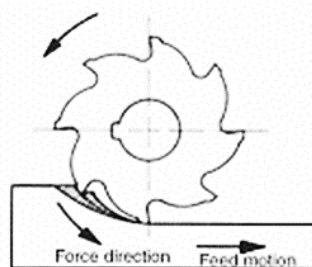


Figura 5 - Esquema da fresagem tangencial concordante [17].

- ✓ Discordante – A fresa gira na direção oposta à do movimento da peça, como pode ser verificado na Figura 6. Nesta situação, verifica-se o risco de a peça de trabalho ser puxada para fora do suporte, ou da mesa se deformar, no entanto, métodos adequados de fixação podem evitar este problema.

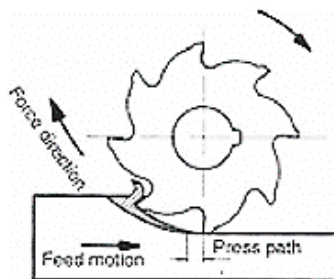


Figura 6 - Esquema da fresagem tangencial discordante [17].

- Fresagem Frontal – O eixo da ferramenta está disposto perpendicularmente à superfície a maquinar, como pode ser observado na Figura 7. A face da fresa atua como ferramenta de corte secundária e suaviza a superfície fresada. Como tal, as peças maquinadas com esta técnica apresentam uma grande qualidade superficial.

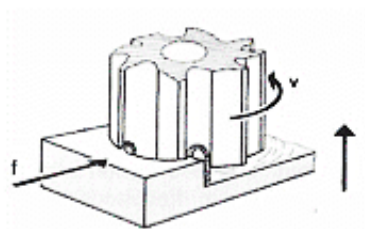


Figura 7 - Esquema da fresagem frontal [17].

Existem também casos em que os dois tipos básicos de fresagem ocorrem simultaneamente [15], ou fresagem com ferramentas cuja forma corresponde ao contorno final a ser obtido [17].

De entre os diversos tipos de fresas, podem observar-se alguns exemplos na Figura 8, sendo: (a) fresas para facejar, ranhurar, fazer cavidades, (b) fresas cilíndricas – para desbaste/acabamento de superfícies planas, (c) fresas de disco – para fazer cortes ou ranhuras, (d) fresas de forma – prismáticas (d1) ou angulares (d2) [18].

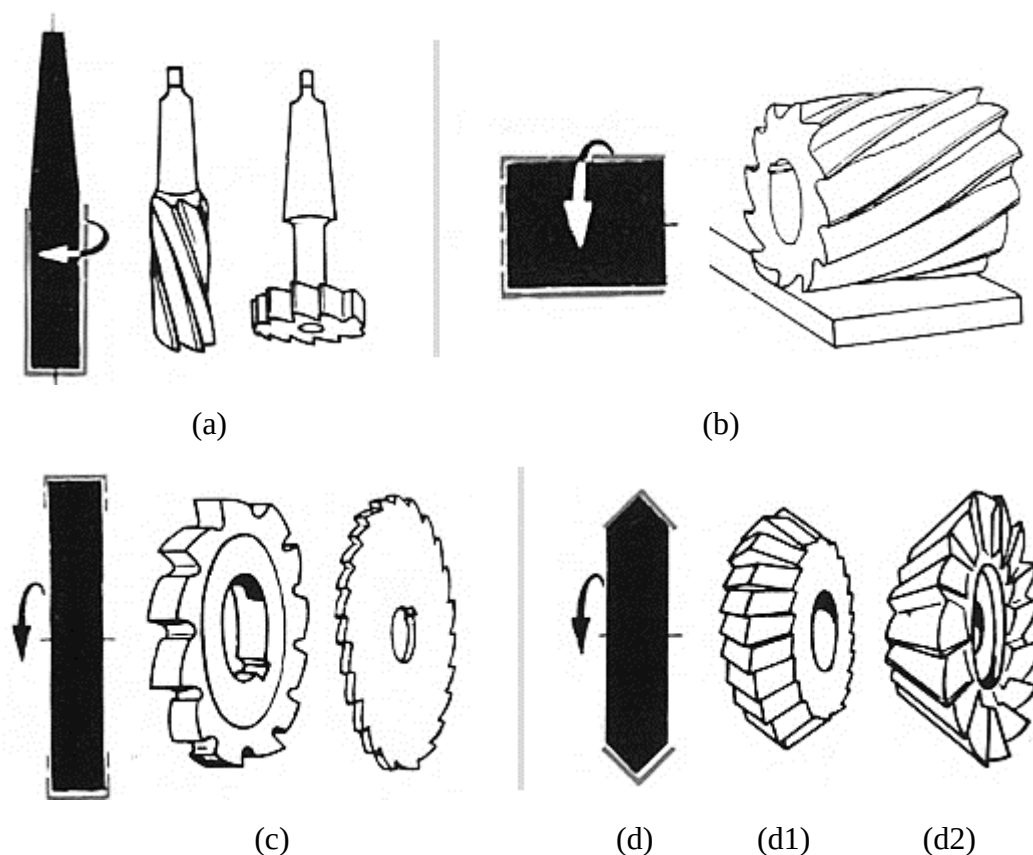


Figura 8 - Tipos de fresas e alguns exemplos [18].

De um modo geral, as operações de maquinagem são realizadas com o recurso às tecnologias de Comando Numérico (CN). Estas surgiram com a evolução da eletrónica e trouxeram mudanças significativas ao setor da produção, principalmente à indústria do processamento de metal, permitindo a realização de operações de maquinagem, através de instruções especificamente codificadas pelo sistema de controlo da máquina [19].

O desenvolvimento dos computadores deu lugar à tecnologia de Comando Numérico Computorizado (CNC), procedente do CN. A par da evolução do CN surgiram os sistemas de CAM para facilitar e flexibilizar o processo de programação de operações de maquinagem para peças complexas [20].

Parâmetros de Fresagem

Na especificação de uma operação de maquinagem é necessário definir um conjunto de determinados parâmetros, nomeadamente:

- **Velocidade de rotação (n) [rpm]** – velocidade angular da fresa
- **Velocidade de avanço (v_f) [mm/min]** - velocidade instantânea do ponto selecionado sobre a aresta de corte em relação à peça, no movimento de avanço
- **Profundidade de corte (a_p) [mm]** - distância que a fresa penetra na peça, na direção do seu eixo

Estes parâmetros dependem do processo de maquinagem a realizar, da ferramenta a utilizar e respetiva forma, do material a maquinar e da potência disponível no motor da árvore. Para além destes parâmetros fundamentais, o processo de fresagem é ainda caracterizado por [21]:

- **Velocidade de corte (v_c) [m/min]** - velocidade tangencial instantânea do ponto selecionado sobre a aresta de corte em relação à peça, no movimento de corte

$$v_c[m/min] = \pi \cdot D \cdot n$$

- **Penetração de Trabalho (a_e) [mm]** - quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço
- **Avanço por dente (f_z) [mm]** - Distância linear percorrida por um dente da ferramenta no intervalo em que dois dentes consecutivos entram em corte
- **Largura de corte (w) [mm]** - No máximo igual ao diâmetro da ferramenta
- **Diâmetro (D) [mm]** – Diâmetro da fresa
- **Número de dentes (z)** - Número total de dentes que a fresa contém
- **Passo [mm]** - Distância que uma ferramenta se desloca entre as passagens de percurso adjacentes
- **Tempo de corte (t_c) [s]** - Tempo que a ferramenta está efetivamente em corte
- **Taxa de remoção de material (Q) [mm³/min]** - Volume de material removido por unidade de tempo

$$Q = a_p \cdot a_e \cdot v_f, \quad \text{com } v_f = n \cdot z \cdot f_z$$

Retirar volume de material de uma peça através deste processo pode ser conseguido através de diferentes estratégias. Estas resultam das possíveis combinações de valores dos parâmetros de maquinagem e dos percursos definidos. A seleção de uma delas tem implicações na execução das tarefas programadas, uma vez que afetam de forma distinta o desempenho do processo em termos de múltiplos parâmetros, como tempo, velocidade, acabamento superficial, extensão dos programas gerados.

Um procedimento realizado num curto período de tempo pode ser aparentemente desejável, no entanto há que considerar que o custo poderá não ser adequado ou que a ferramenta sofrerá um desgaste rápido. É, pois, necessário definir e ajustar de modo eficiente os parâmetros envolvidos (material, ferramenta, propriedades de corte, ...) por forma a otimizar o processo de maquinagem. A utilização de sistemas de CAM, como software de simulação também, permite testar múltiplas combinações de ferramentas e identificar as estratégias de maquinagem mais adequadas.

2.3. Fresagem com Robôs Industriais

Durante muitas décadas, o custo e a taxa de produção foram os principais critérios a ter em conta nos processos de fabrico, recorrendo-se a sistemas de grande volume de produção, dedicados por forma a ser economicamente rentável e sustentável.

No entanto, com a evolução tecnológica e o desenvolvimento de novos paradigmas de produção, a fase da produção em massa tem vindo a ser substituída pelos nichos de mercado com necessidades específicas. Assim, os objetivos atuais consistem na criação de produtos que atendam a uma base diversificada de clientes, com um curto ciclo de desenvolvimento, conjuntamente com um baixo preço e alta qualidade, em quantidade suficiente para atender à procura [22].

Deste modo, o conceito de flexibilidade tem tido uma importância crescente no mercado para fazer face à concorrência, ajudando os fabricantes a produzir variantes e personalizar produtos existentes. Nesta perspetiva, os robôs industriais podem responder a estas necessidades, presentes e futuras, com uma boa relação custo/qualidade [12].

Atualmente, os robôs industriais são maioritariamente usados em processos de soldadura, pintura e manuseamento de materiais, com excelentes desempenhos. Operações de maquinagem robotizada constituem uma pequena parte das vendas existentes, sendo a rebarbagem e polimento as tarefas predominantes. Contudo, este tem sido um segmento em crescimento [11, 23]. Estes procedimentos são geralmente realizados por máquinas CNC.

Os robôs têm potencial para substituir/complementar as máquinas CNC a um custo inferior, mas possuem também algumas limitações, razões pelas quais a sua utilização atual para processos de maquinagem ainda é insatisfatória. Para além disso, a programação dos robôs pode tirar partido das mesmas ferramentas CAM usadas na programação de máquinas CNC. Na Tabela 3, são explicitadas as principais vantagens e problemas dos robôs industriais nesta aplicação, para além das já referidas anteriormente.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens da utilização de robôs industriais em maquinagem [2].

Vantagens	• Possibilidade de maquinar peças de grandes dimensões • Baixo número de operações, devido ao grande volume de trabalho • Capacidade de maquinar peças com geometria complexa e detalhada (em maquinagem CNC seriam necessárias posições e técnicas especiais de fixação) • Maquinagem eficiente de diversos materiais, madeira, cera, espuma e materiais similares, sem sacrificar o grau de exatidão
Desvantagens	• Baixa rigidez do robô (aproximadamente 1 N/μm enquanto as máquinas CNC apresentam uma rigidez da ordem dos 50 N/μm). De notar que este parâmetro depende fortemente da configuração do robô • Grande dificuldade em obter boa exatidão, comparativamente com as máquinas CNC – Robôs: 1mm; Fresadoras: até 0.001mm [24] • Maior suscetibilidade às forças geradas durante o processo de maquinagem e incapacidade de as suportar • Menor qualidade superficial devida a vibrações. A baixa frequência natural do corpo do robô leva à possibilidade de ocorrência de fenómenos de ressonância • Sistemas de programação e simulação com incapacidade de gerar trajetos 100% corretos - Problemas na tradução da informação CAM em trajetórias para o robô • Possibilidade de ocorrência de colisões entre a ferramenta e a peça durante a maquinagem de ocos ou cavidades profundas

Numa perspetiva de mercado, a maquinagem realizada por robôs dificilmente substituirá a maquinagem CNC, mas é apropriada para processos onde uma máquina CNC pode ser vista como demasiado qualificada. A robótica é, pois, encarada como uma alternativa viável para a maquinagem, em particular de múltiplos materiais, dependendo da dureza, do acabamento superficial pretendido e a complexidade e dimensões do produto acabado [23].

Como referido, devido às baixas exatidão e taxa de remoção de material, as aplicações atuais dos robôs industriais em operações de maquinagem dizem respeito a rebarbagem e acabamento [25].

No mercado atual existem já robôs desenvolvidos especificamente para operações de maquinagem, tais como os exemplificados na Tabela 4.

Tabela 4 - Exemplos de robôs industriais para operações de maquinagem.

ABB – IRB 6660 [26]	• Primeiro robô do mercado dedicado a operações de pré-maquinagem • Fresagem, corte, retificação, acabamento • Rígido, compacto e robusto para suportar elevadas forças durante a maquinagem – Braço paralelo confere maior rigidez • Boa exatidão	
Fanuc LR Mate 200iC [27]	• Maior rigidez permitindo movimentos suaves sem vibração a grande velocidade de operação • Maquinagem, manuseamento, montagem, inspeção • Elevada compacidade • Boa exatidão	
Motoman HP20D Series [28]	• Elevada rigidez e compacidade • Maquinagem, manuseamento, montagem, soldadura • Elevada produtividade devido às velocidades elevadas de operação • Boa exatidão	
Staubli RX160 HSM [29]	• Combinação de elevada rigidez, exatidão e velocidade • Maquinagem e soldadura em diversos materiais • Elevada produtividade devido à possibilidade de mudança automática de ferramenta • Robô com <i>spindle</i> integrado e compatível com diversos <i>spindles</i> para maquinagem	

Recentemente, sobretudo em Itália, os robôs têm vindo a ser utilizados na realização de esculturas, tanto em mármore, granito ou madeira [30]. Esta é uma aplicação que permite a produção de peças artísticas de grandes dimensões e geometria complexa, mas que não requer uma exatidão dimensional significativa.

Para além de estátuas como as da Figura 9, os robôs são também usados para maquinar banheiras, bacias, fontes, chaminés, lápides, colunas, entre outras aplicações [31].



Figura 9 - Realização de uma escultura por um robô [31].

3. Programação de Robôs

Tal como referido anteriormente, uma solução robótica representa uma excelente solução de produtividade e flexibilidade. No entanto, a programação de um robô industrial para uma aplicação específica é ainda bastante complexa, demorada e cara [32].

Um robô industrial, sendo um manipulador reprogramável projetado para movimentar peças ou ferramentas ao longo de uma trajetória previamente estabelecida [33] requer que sejam ensinados, não só os pontos a serem visitados, mas também a sua configuração e orientação da ferramenta, por forma a garantir que o percurso é realizado de forma coerente e eficiente. Esta programação pode, pois, ser feita através de dois modos diferentes: *online* e *offline*. Estas duas estratégias apresentam tanto aspetos positivos como limitações, fazendo com que certas aplicações sejam mais ou menos adequadas a cada um. Estes métodos são explicados nas secções seguintes.

3.1. Programação Online

Este tipo de programação consiste no guiamento do robô pelo operador ao longo da trajetória pretendida, sendo gravados pontos específicos no controlador do mesmo. Estes pontos memorizados são usados para definir percursos. O operador é responsável por levar o robô para as posições e orientações desejadas, garantindo que não ocorrerão colisões nas movimentações entre essas localizações [32].

A programação *online* pode ser feita por dois modos:

- Guiamento Direto – O robô é movido diretamente pelo operador pelo percurso desejado;
- Via Consola de Programação – O robô é movido pelo operador de forma indireta através de uma consola de programação.

A Figura 10 mostra um exemplo de um robô a ser programado de forma *online*, por guiamento direto.

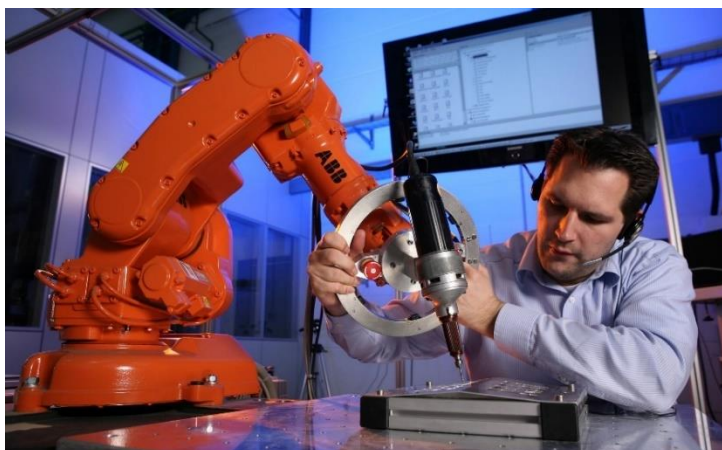


Figura 10 - Exemplo de uma programação on-line [34].

Este método, apesar da sua aparente simplicidade, apresenta alguns inconvenientes:

- processo longo e complicado, situação agravada para peças de geometria complexa;
- grande número de testes a realizar antes de o programa ser satisfatório e fiável;
- falta de flexibilidade na reutilização – o processo tem de ser repetido integralmente mesmo para peças com pequenas variações;
- quando está a ser ensinado, o robô não pode ser usado para produção;
- risco elevado para o operador durante a programação e sujeito a ambientes adversos;
- inadequado para tarefas que exigem maior rigor geométrico.

Apesar destas desvantagens, a programação *online* é ainda o único meio de programação escolhido por pequenas e médias empresas por ser economicamente viável, uma vez que os softwares de programação e simulação têm um custo elevado e requerem capacidade técnica para os usar.

Têm também vindo a ser propostas várias técnicas usando informação sensorial por forma a melhorar e tornar a programação *online* mais intuitiva e cada vez menos dependente das capacidades do operador [32].

No que diz respeito a operações de maquinagem, este processo de programação não é apropriado. Adicionalmente, para a maquinagem do interior de peças, torna-se complexa a definição dos contornos e profundidade de penetração da ferramenta.

3.2. Programação Offline

Recorrendo a modelos CAD do objeto de trabalho e da célula robótica, a programação *offline* consiste em criar e simular programas para o robô usando softwares adequados para esta finalidade. Este método é bastante utilizado em sistemas de produção em grande escala. O utilizador pode testar o alcance, colisões e ajustar parâmetros relacionados com o movimento do robô antes de descarregar o programa para o mesmo [32].

A Figura 11, adaptada de [32], representa esquematicamente a sequência de tarefas associadas à programação *offline* no software Robotstudio, mas cujos passos principais são comuns a outros softwares de programação e simulação existentes. É um procedimento mais complexo que o anterior, pois, para além de serem definidos os pontos a serem alcançados pelo robô (*targets*) e respetiva configuração, é necessário planejar a trajetória e otimizar o processo.

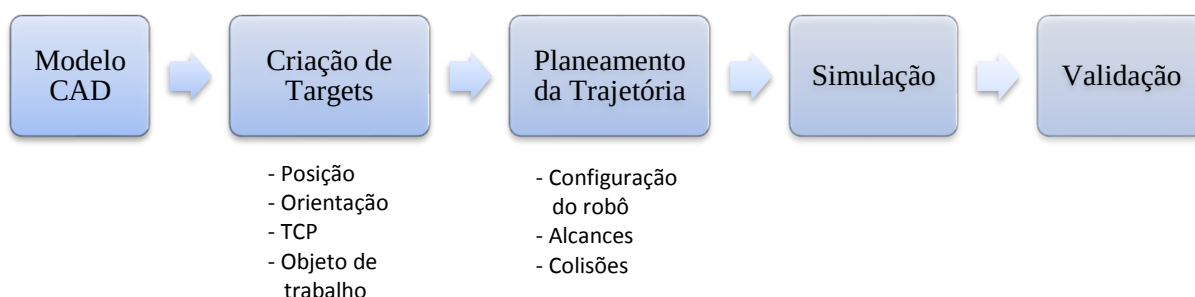


Figura 11 - Etapas principais da programação *offline*.

Comparativamente com a programação *online*, este método apresenta vantagens importantes:

- não é necessário o robô - minimização do tempo de não produção e eliminação do perigo associado à permanência em ambientes potencialmente perigosos;
- os programas gerados são mais flexíveis – alterações são rapidamente efetuadas sem ser necessário refazer todo o programa;
- os programas podem ser simulados – confirmação dos movimentos do robô e minimização das probabilidades de erro – aumento da produtividade e segurança.

No entanto também apresenta limitações e problemas, tais como [35]:

- erros de tradução/interpretação da linguagem de programação do software de simulação;

- erros de modelização cinemática, dinâmica, do ambiente de trabalho e dos processos a simular;
- necessidade de calibração dos programas gerados.

Esta é uma técnica apenas viável para empresas com grandes volumes de produção, visto acarretar elevados custos de software, tempo despendido para desenvolver programas para uma aplicação específica e por requerer técnicos com conhecimentos avançados de programação.

3.3. Softwares para Programação de Robôs Industriais

Quando se faz referência a máquinas de CN, é de notar a existência de uma linguagem de programação normalizada (ISO 6983) que unifica a sua linguagem independentemente do fabricante. Pelo contrário, a linguagem de programação de robôs industriais varia de fabricante para fabricante levando a que cada fabricante disponibilize o respetivo software de programação *offline*. A falta de padronização dos métodos de programação de robôs coloca certos desafios, no entanto, há um conjunto padrão de instruções de movimento e funcionalidades básicas.

A Tabela 5 apresenta exemplos de *softwares* de programação *offline* e respetivas linguagens de programação para fabricantes de robôs industriais.

Tabela 5 - Fabricantes de robôs, software de programação *offline* e linguagens de programação.

Fabricante	Software	Linguagem
ABB	RobotStudio	Rapid
Fanuc	Robotguide	Karel
Kuka	KukaSim	KRL
Motoman	Motosim	Inform II
Kawasaki	PC-Roset	AS
Stäubli	Stäubli Robotic Suite	V+
Mitsubishi	RoboExplorer	MRL

Existem também disponíveis softwares genéricos de programação e simulação de robôs, tais como:

- Workspace [www.workspaceit.com]
- Octopuz [octopuz.com/]
- Robcad / Tecnomatix – Siemens [www.plm.automation.siemens.com]
- Easy-rob [www.easy-rob.com/]
- RobotWorks – Add-on para SolidWorks [www.robotworks-eu.com]
- Delmia | Robotics - Dassault Systemes [www.3ds.com/products-services/delmia]

Estes softwares permitem a programação e simulação de robôs de múltiplos fabricantes para diversas aplicações, como pintura, manuseamento, soldadura, entre outras. No entanto, para operações de maquinagem apresentam limitações. Como tal, torna-se necessário recorrer a outras aplicações.

De um modo geral, utiliza-se uma ferramenta de software CAM para gerar os percursos de maquinagem e manipular a orientação da ferramenta, a partir do modelo da peça. Sendo softwares de uso genérico, as informações obtidas e a programação feita nestes softwares têm que ser convertidas para a máquina pretendida (máquina CNC, robô, ...), usando pós-processadores para realizar a conversão e otimização das trajetórias de maquinagem [36].

Este processo implica uma sequência de etapas, tal como se observa de modo simplificado na Figura 12. Nesta figura os grupos 2 e 3 representam processos de gerar um programa em linguagem do robô menos expeditos quando comparados com o grupo 1. O processo expresso pelo grupo 2 baseia-se na utilização de um programa de maquinagem em código G (linguagem normalizada para comando numérico) que é posteriormente convertido através de um programa dedicado (conversor) para a linguagem específica de um dado robô. O terceiro grupo evidencia a programação de um robô para maquinagem diretamente a partir do software de programação genérica de um robô, no entanto, esta não é uma solução prática.

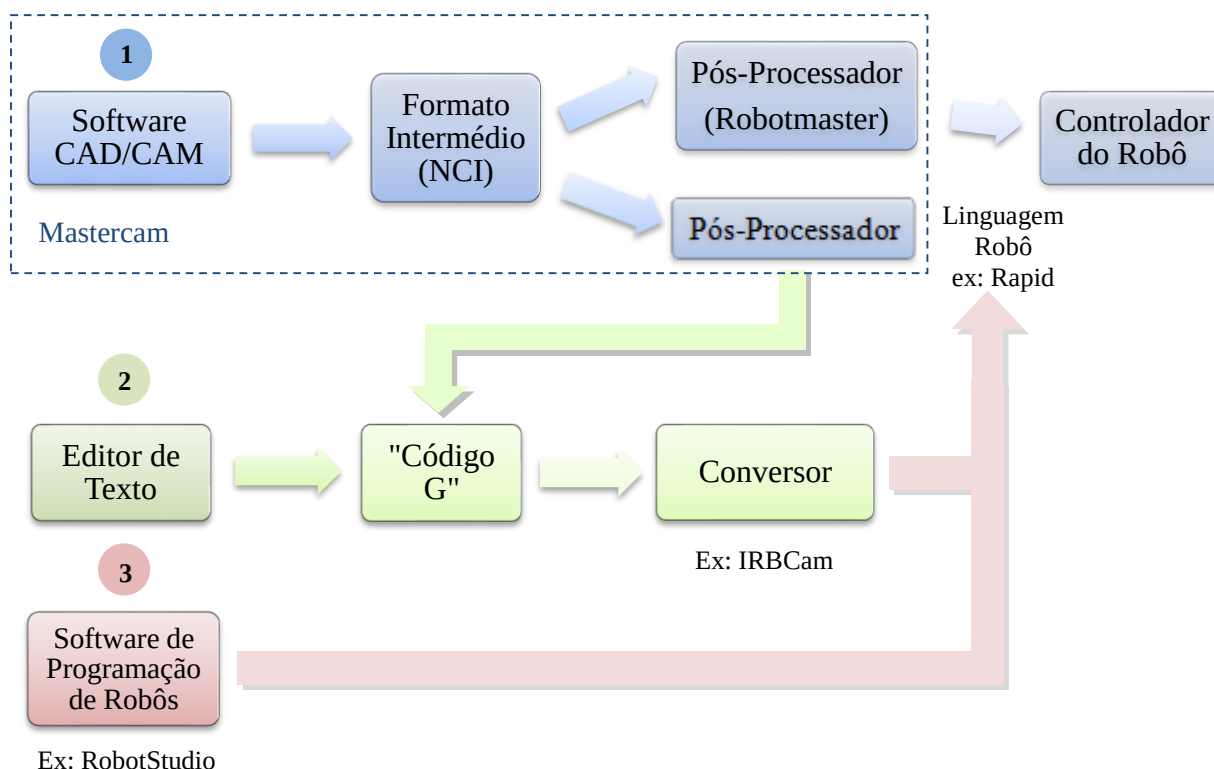


Figura 12 – Métodos de programação de um robô para maquinagem.

O processo representado pelo grupo 1 (Figura 12) é o método utilizado e evidenciado neste trabalho para a geração de programas de maquinagem para robôs. O processo parte da utilização de sistemas CAD/CAM permitindo a definição da peça a obter e do bloco, ou forma, inicial do material para assim determinar as estratégias de maquinagem. A partir da definição dos percursos de maquinagem nestes softwares, resulta um ficheiro em formato intermédio (ex: *CLdata – Cutter-Location Data file*) que é pós-processado. Este ficheiro contém a definição da trajetória da ferramenta e as operações de maquinagem associadas [36]. Este formato de ficheiro, não sendo adaptado aos controladores dos robôs industriais requer uma conversão para uma linguagem compatível [37]. Assim, um pós-processador adequado à máquina final executa a compatibilização entre as linguagens usadas no ficheiro intermédio e no controlador do robô.

De um modo geral, as funções de um pós-processador são [36]:

- converter a informação para o sistema de coordenadas da máquina (robô), em coordenadas absolutas ou incrementais, de acordo com o desejado;
- verificar as limitações da máquina (sobrecursos, interferências, velocidades permitidas, ...);
- definir velocidades adequadas à máquina;

- definir comandos de movimento para a máquina especificada e respetivo controlador.

Os pós-processadores podem encontrar-se integrados nos softwares de CAM ou separados destes, constituindo uma aplicação independente.

A realização deste trabalho envolveu a utilização do software Mastercam com o *add-on* Robotmaster que providencia um pós-processador para a linguagem de programação de robôs da ABB. Para além da solução adotada existem outras alternativas possíveis, nomeadamente de softwares de CAM que integram pós-processadores para robôs industriais:

- Sprutcam / Sprutcam Robot [www.sprutcam.com/home/sprutcam-robot]
- Delcam PowerMill Robot [www.delcam.com/software/powermill]

Outras soluções possíveis que se enquadram no grupo 2 da figura incluem:

- IRBCam [www.irbcam.com]
- Eureka [www.roboris.it]
- CAM Converter [www.abb.com]
- CAMRob [www.kuka.com]
- G-Code Converter [www.motoman.com]

É ainda de assinalar, para o software de programação genérico da ABB, RobotStudio, a existência do *add-on Machining PowerPac* vocacionado para operações de maquinagem. Porém, este está limitado a operações de polimento e rebarbagem e, comparativamente com os programas de CAM e Softwares de conversão (integrados ou não), possui funcionalidades reduzidas [38].

3.4. Mastercam / Robotmaster

Mastercam é um dos softwares CAM mais conhecidos e utilizados [39]. Apresenta várias funcionalidades comuns a softwares deste tipo, que permitem e auxiliam a criação de programas de maquinagem, incluindo:

- funcionalidades de CAD – Criação de modelos sólidos e importação de modelos em múltiplos formatos (.stl, .sld, .stp, ...);

- funcionalidades de CAM para vários processos de maquinagem como torneamento, fresagem e furação [40];
- definição de estratégias e parâmetros de maquinagem - contornos, *pockets*, furos, facejamentos;
- biblioteca de ferramentas;
- simulação dos percursos de maquinagem, do processo de maquinagem e da máquina;
- geração do programa CN para a máquina.

Por outro lado, a aplicação Robotmaster é uma solução flexível e eficiente de programação de robôs que é integrada no software Mastercam. Este *add-on* disponibiliza vários pós-processadores para a programação de robôs de diferentes fabricantes. Possibilita, também, a simulação e validação dos programas gerados [39].

A configuração de uma operação de maquinagem com robôs a partir do Robotmaster é realizada em duas etapas:

- **Configurações Globais** – Seleção do robô e do *spindle*, especificação da posição do objeto de trabalho relativamente ao robô, ajuste das definições da ferramenta e do seu movimento.
- **Configurações Locais** – Especificação de parâmetros para cada operação: configuração da orientação da ferramenta e validação das operações, por forma a garantir que os percursos de maquinagem são realizáveis pelo robô, isto é, não ocorrem colisões, o robô não ultrapassa os seus limites de junta ou não assume configurações singulares.

Na Figura 13 está representado um exemplo de utilização da aplicação Robotmaster na simulação de um percurso de maquinagem definido no Mastercam.

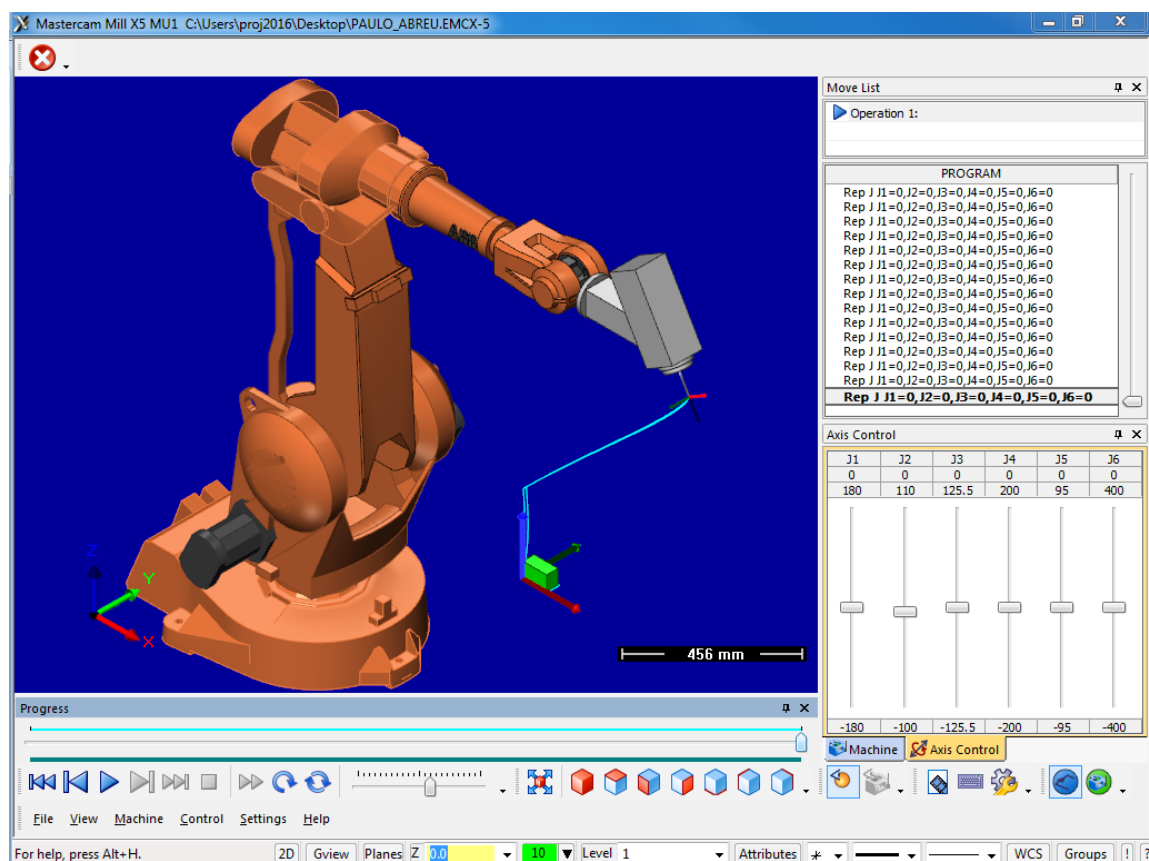


Figura 13 - Exemplo de simulação do ambiente Mastercam/Robotmaster.

Nas definições das configurações locais de uma operação é especificada a orientação do TCP da ferramenta para cada ponto da trajetória. O Robotmaster tem disponíveis três métodos de cálculo da orientação da ferramenta: Interpolação Esférica, Plano da Ferramenta e Seguimento de Perfil, que devem ser selecionados em função da trajetória a executar. Quando, no Mastercam, a operação de maquinagem (do tipo contorno ou *pocket*) é definida no plano da ferramenta estão disponíveis estas três estratégias no Robotmaster. Já para operações no Mastercam definidas como multieixos (*multiaxis toolpath*), apenas a Interpolação Esférica e o Seguimento de Perfil estão disponíveis.

- Interpolação Esférica – É possível selecionar se a orientação da ferramenta em torno do seu eixo se mantém fixa ou pode variar ao longo da trajetória.
- Seguimento de Perfil – Define a orientação da ferramenta em relação à direção de movimento da trajetória. O eixo X da ferramenta é orientado com base no referencial usado para a definição do ponto seguinte da trajetória, conforme pode ser observado na Figura 14.

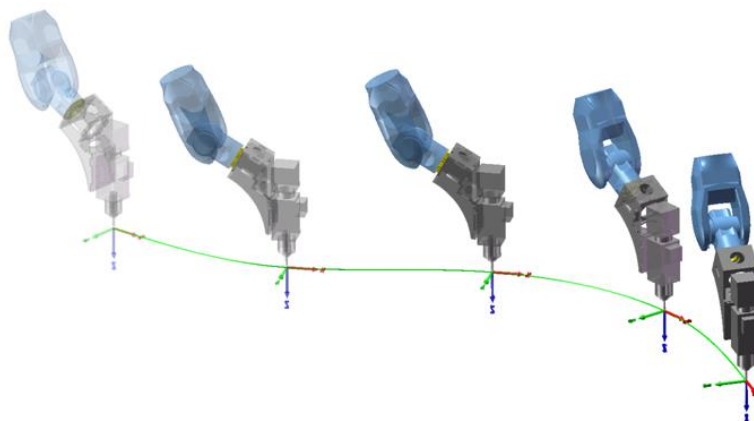


Figura 14 - Esquema de uma trajetória realizada com uma configuração por Seguimento de Perfil.

- Plano da Ferramenta – Com este método a orientação da ferramenta, em torno do seu eixo Z, é mantida fixa ao longo da trajetória.

Após a seleção do método de cálculo da orientação da ferramenta é necessário proceder à sua validação, de maneira a encontrar as configurações mais adequadas que o robô irá assumir na realização de uma tarefa ao percorrer uma determinada trajetória. Este passo é essencial, uma vez que averigua a capacidade do robô (e do TCP) em alcançar todas as posições do percurso pretendido. Este processo é feito de modo automático e com visualização gráfica. Caso o robô não consiga cumprir a trajetória, o utilizador tem a possibilidade de ajustar graficamente a parametrização para obter uma possível solução.

Na Figura 15 é possível verificar que a operação em causa está validada, uma vez que a curva de configuração se encontra a verde. Se a curva atravessasse a zona amarela, que representa os limites de junta, esta operação não seria validada e necessitaria de alterações, por exemplo ajustando a orientação da ferramenta.

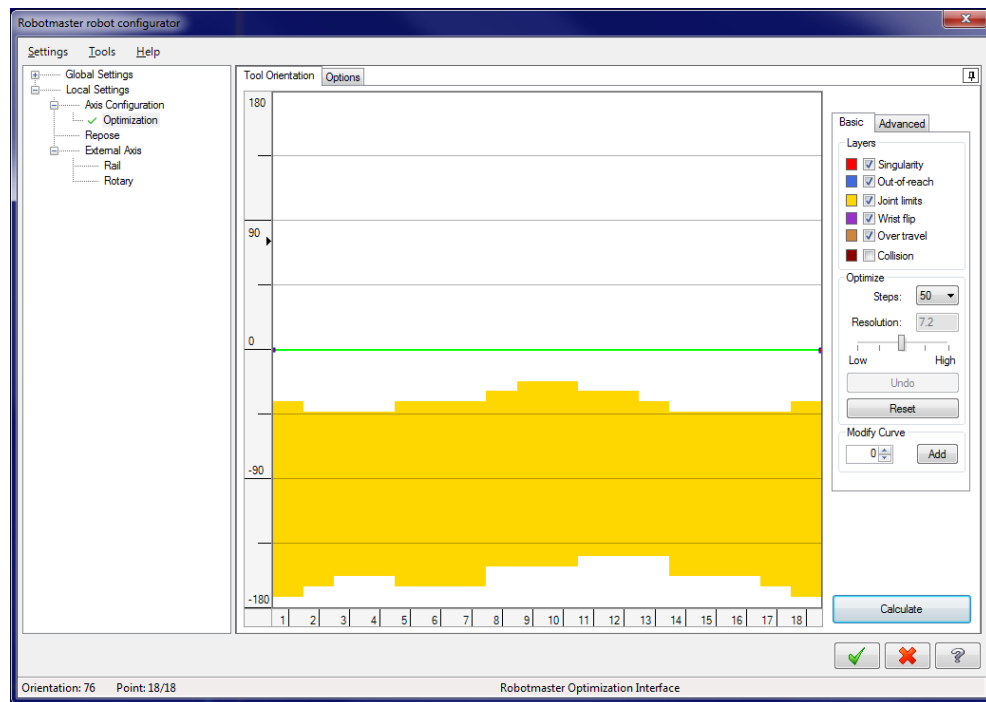


Figura 15 - Exemplo da otimização de uma operação no Robotmaster.

Esta é, pois, uma ferramenta poderosa e fundamental para garantir que as operações definidas são exequíveis, de acordo com o robô e ferramenta selecionados, permitindo assim, a sua implementação em ambiente real sem necessidade de recorrer aos softwares específicos de programação de robôs de cada fabricante.

4. Estratégias de Maquinagem e Funções de Interpolação

A realização de uma tarefa por um robô implica que este se movimente no espaço, segundo uma sequência de pontos e orientação da ferramenta ao longo do tempo, que corresponde à trajetória pretendida. Para cada posição e orientação é necessário definir qual a configuração que o robô deve tomar, pois devido à sua estrutura cinemática, podem existir diversas soluções de configurações (Figura 16).



Figura 16 - Exemplo de duas configurações possíveis para o robô para a mesma posição/orientação da ferramenta.

Quando se pretende gerar um programa para um robô a partir da especificação de um determinado percurso, é imprescindível definir as configurações a utilizar, por forma a assegurar o movimento possível e coerente do robô na realização de tarefas.

No caso da maquinagem para obter a mesma peça/geometria, é possível definir percursos alternativos, isto é, seguindo caminhos diferentes. Estas estratégias podem ter implicações nos parâmetros de desempenho, tais como tempo de execução, volume de material removido e qualidade de acabamento, perfil de velocidades, entre outros.

A existência de diferentes estratégias de maquinagem resulta em formas distintas de movimentação do elemento terminal da ferramenta (TCP) recorrendo aos diferentes tipos de interpolação usados no controlador da máquina. Estes definem o movimento entre pontos consecutivos da trajetória descrita pela ferramenta.

Nas subsecções seguintes são apresentadas as estratégias de maquinagem disponibilizadas pelo software usado neste trabalho e os métodos de interpolação geralmente usados nos controladores dos robôs, os quais traduzem os percursos definidos em Mastercam.

4.1. Estratégias de Maquinagem

A existência de diferentes estratégias permite definir o processo mais adequado à maquinagem de uma determinada geometria, em termos de comportamento e acabamento superficial. Portanto, a utilização de uma dada estratégia depende da combinação dos parâmetros envolvidos (velocidade, ferramenta, material), da forma da peça a maquinar e do desempenho pretendido, por exemplo o tempo de execução.

O software Mastercam disponibiliza várias estratégias de maquinagem, que possibilitam a definição de percursos, exteriores ou interiores, cavidades ou bossas e podendo ser realizadas operações de desbaste ou acabamento. De acordo com a estratégia de maquinagem e ferramenta selecionadas, é gerada uma trajetória automaticamente pelo software. As velocidades associadas a uma operação podem ser ajustadas manualmente, bem como os valores de tolerâncias dimensionais, número de passes, movimentos de aproximação, entre outros. As estratégias de maquinagem disponibilizadas no Mastercam são as seguintes:

- **Pocket** – Remoção de material de um limite fechado criando cavidades. Existem 8 opções de geração de *pockets* (Tabela 6). 
- **Contorno** – Remoção de material segundo uma trajetória definida por um conjunto de curvas. Pode ser um contorno 2D ou 3D. 
- **Facejamento** – Preparação de uma superfície para operações de maquinagem posteriores. Existem 4 opções de maquinagem de faces (Tabela 7). 
- **Furação** – Realização de furos, podendo ser gerada uma trajetória para a furação de vários pontos em sequência. 
- **Desbaste Superficial** – Remoção rápida e em vários passes de um grande volume de material, usando-se geralmente ferramentas mais largas. Estratégias de desbaste disponíveis (Tabela 8).

Tabela 6 - Métodos de corte para o desbaste de *pockets*.

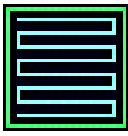
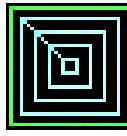
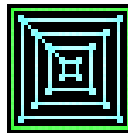
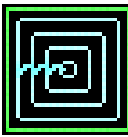
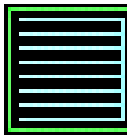
Zigzag	Espiral Sobreposição Constante	Espiral Paralela	Espiral Paralela Cantos Retocados
			
Espiral de Morph	Alta Velocidade	Direção Única	Espiral Real
			

Tabela 7 - Métodos de corte em operações de facejamento.

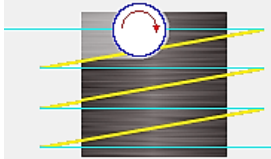
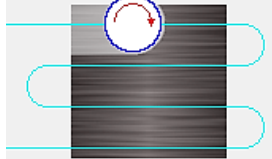
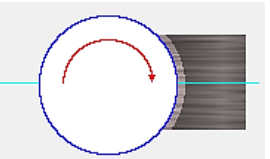
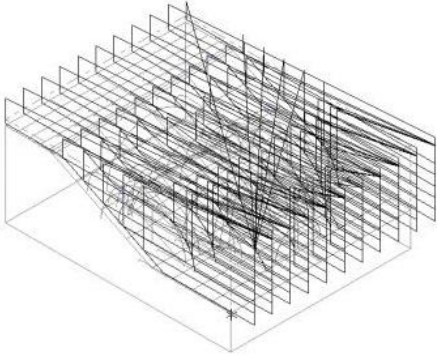
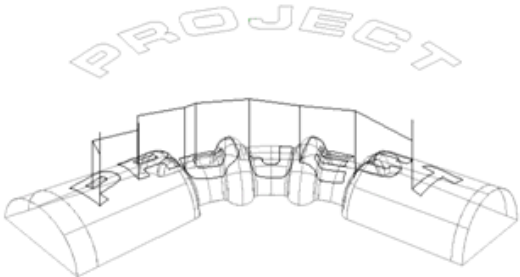
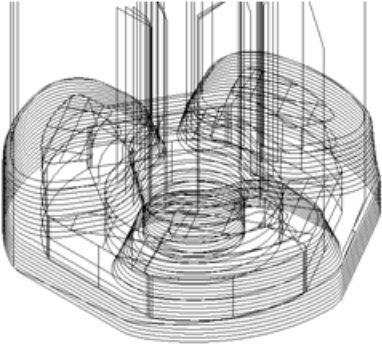
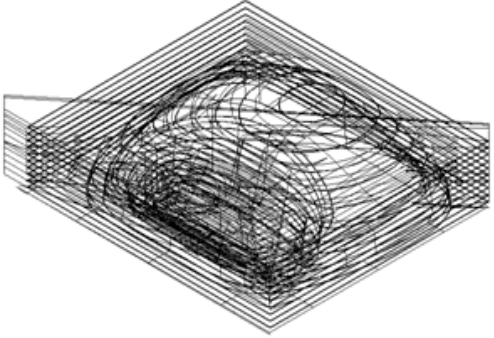
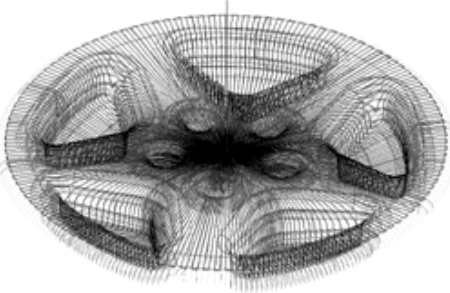
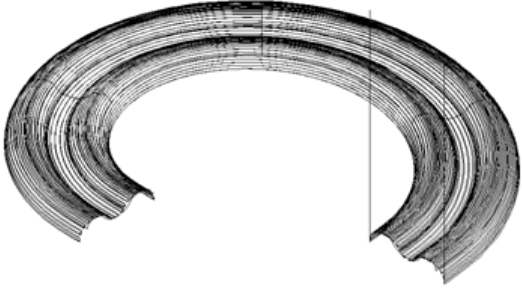
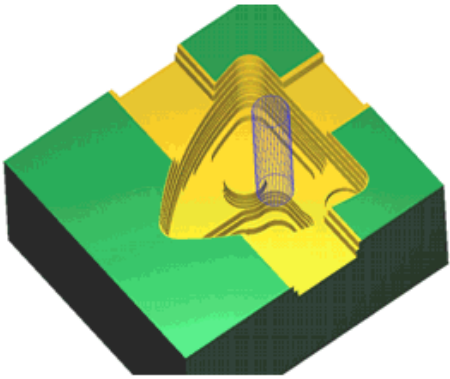
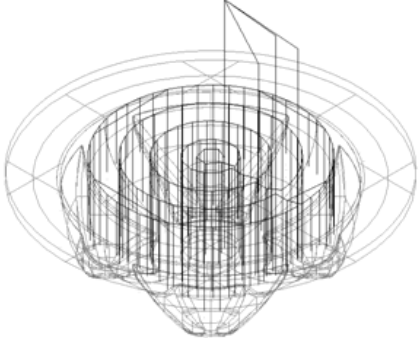
Direção Única	Zigzag	Passagem Única	Dinâmico
			

Tabela 8 - Tipos de desbaste superficial disponíveis no Mastercam.

Paralelo	Projeção
	
Contorno	Pocket
	
Radial	Linha de Fluxo
	
Desbaste Residual	Desbaste por Furação
	

4.2. Funções de Interpolação a Nível do Robô

As estratégias de maquinagem definidas no Mastercam que dão origem a um determinado percurso da ferramenta são, posteriormente, processadas para gerar um programa na linguagem do robô. O programa gerado utiliza as instruções de movimentação disponíveis no controlador do robô e que tipicamente incluem três tipos de interpolação elementares:

- **Interpolação de Juntas** – O movimento do elemento terminal da ferramenta (TCP) não é conhecido *à priori* no espaço. Em maquinagem é apenas usada em movimentos de aproximação.
- **Interpolação Linear** – O movimento do elemento terminal da ferramenta (TCP) é feito segundo trajetórias lineares.
- **Interpolação Circular** – O movimento do elemento terminal da ferramenta (TCP) é feito segundo trajetórias circulares.



Em cada uma destas interpolações, para além da velocidade de movimentação, é necessário definir o parâmetro *Zone*. Este parâmetro é muito importante, uma vez que condiciona a trajetória executada pelo o robô em torno dos pontos usados para definir um dado percurso, o que é particularmente relevante no caso da maquinagem, pois pode ter influencia não só no percurso como também na velocidade. Na linguagem Rapid, este parâmetro *Zone* é definido por um vetor de sete componentes, identificado por *Zonedata* := [finep(bool), pzone_tcp (num), pzone_ori(num), pzone_eax(num), zone_ori(num), zone_leax(num), zone_reax (num)].

Na definição deste vetor, o parâmetro *finep* especifica se o robô se deve imobilizar no ponto programado ou se pode deve ajustar a trajetória tendo em consideração os outros parâmetros. O parâmetro *pzone_tcp* define o raio em torno do ponto programado que corresponde à zona em que a trajetória do TCP pode ser ajustada em função do ponto seguinte.

O parâmetro *pzone_ori* define o raio em torno do ponto programado que corresponde à zona em que é possível iniciar a reorientação da ferramenta em função do ponto seguinte. O parâmetro *Zone_ori* define a zona de reorientação da ferramenta, expressa em graus. Os parâmetros *pzone-eax* e *zone_leax* e *zone_reax* definem ajustes possíveis quando são utilizados eixos externos com o robô. Na Figura 17 é apresentado o conceito do parâmetro *Zone*.

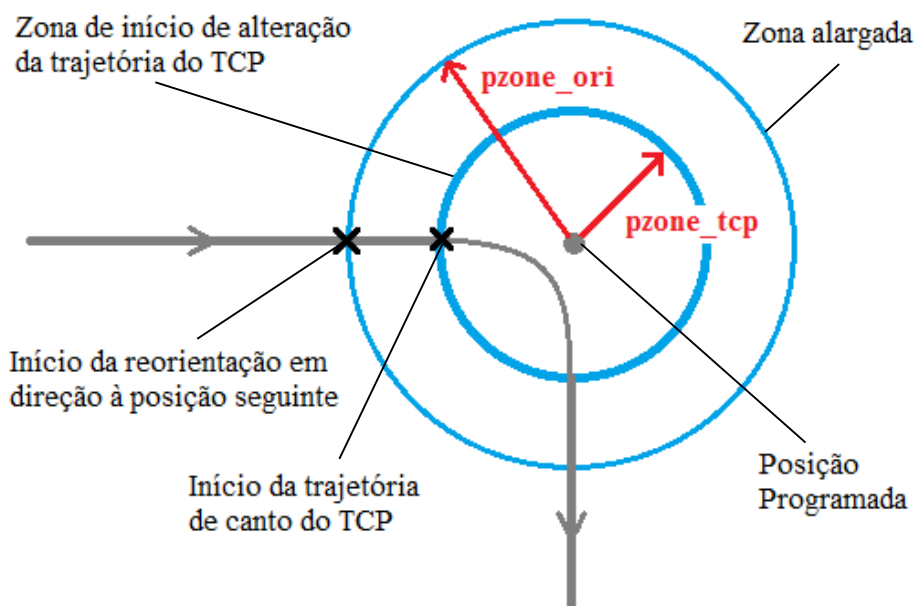


Figura 17 - Conceito do parâmetro *Zone* e as zonas e pontos de relevo associados [41].

A linguagem Rapid providencia uma forma automática de configuração destes parâmetros para um conjunto de valores pré-estabelecidos, recorrendo ao uso dos parâmetros “fine” ou “Z1”, “Z5”, “Z10”, entre outros. Na Tabela 9 são apresentados algumas das predefinições existentes.

Os parâmetros de *zonedata* têm que ser especificados aquando da programação com o Mastercam/Robotmaster, existindo a possibilidade de utilizar quer os valores pré-estabelecidos, quer definir individualmente os vários parâmetros.

Tabela 9 - Exemplos de valores de *zonedata* pré-definidos no sistema.

Nome	Trajétória do TCP	Orientação [mm]	Eixos Externos	Orientação [°]	Eixo Linear	Eixo Rotativo
	pzone_tcp	pzone_ori	pzone_eax	zone_ori	zone_leax	zone_reax
z0	0.3 mm	0.3 mm	0.3 mm	0.03°	0.3 mm	0.03°
z1	1 mm	1 mm	1 mm	0.1°	1 mm	0.1°
z5	5 mm	8 mm	8 mm	0.8°	8 mm	0.8°
z10	10 mm	15 mm	15 mm	1.5°	15 mm	1.5°
z20	20 mm	30 mm	30 mm	3.0°	30 mm	3.0°
z100	100 mm	150 mm	150 mm	15°	150 mm	15°

5. Casos de Estudo e Análise de Resultados

O software Mastercam, tal como referido anteriormente, é utilizado na criação de trajetórias para diversas aplicações, como o torneamento e a fresagem, sendo para tal atribuída uma máquina genérica para a qual será definido o percurso.

Por forma a compreender o processo, quando aplicado a robôs industriais, são averiguados quais os parâmetros ajustáveis e os aspetos comuns à programação de uma fresadora vertical e de um robô específicos. De uma forma simplificada, é mostrado na Figura 18 o método de trabalho adotado neste capítulo, desde a parametrização realizada em Mastercam/Robotmaster até à execução da trajetória de maquinagem com o robô.

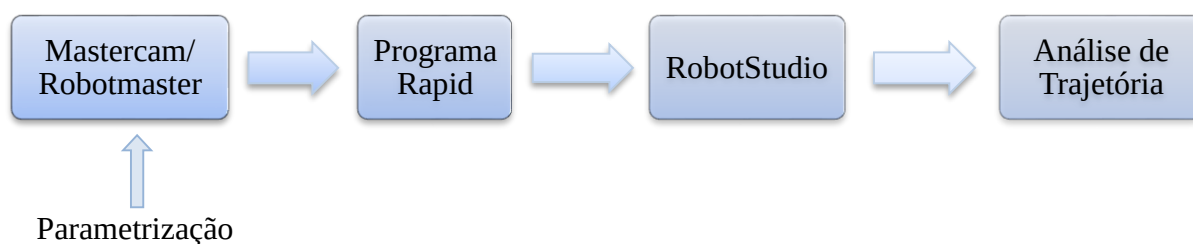


Figura 18 - Processo utilizado na análise dos casos de estudo deste trabalho.

É, então, realizada uma análise da influência da parametrização e programação em ambiente Mastercam/ Robotmaster nos percursos de maquinagem a realizar pelo robô. Assim, pretende-se avaliar as implicações das parametrizações no programa gerado em termos de:

- extensão do programa – número de linhas geradas; verificação do número de pontos criados;
- tempo de execução;
- trajetória e perfil de velocidades;
- potência consumida.

Partindo da análise de movimentos elementares, pertinentes para a compreensão dos princípios de funcionamento das estratégias de maquinagem disponíveis no software, é feito o estudo dos referidos parâmetros e de outras situações relevantes, sendo considerados os seguintes casos de estudo:

1. Análise de percurso linear entre três pontos
2. Análise de percurso linear entre quatro pontos
3. Análise de percurso linear entre cinco pontos
4. Análise do parâmetro “*Roll Cutter Around Corners*”
5. Análise comparativa de estratégias de maquinagem

5.1. Metodologia e Procedimentos

A metodologia adotada na análise dos casos de estudo, desde a definição de programas de maquinagem até à sua simulação e análise, pode sintetizar-se nas seguintes fases estruturadas em função do software utilizado:

Ambiente Mastercam/Robotmaster

1. Definição da geometria da peça ou contorno (utilizando as suas funções de CAD)
2. Definição do percurso de maquinagem, seleção da ferramenta e ajuste dos diferentes parâmetros para um robô industrial da ABB
3. Ajuste de configurações em Robotmaster
 - × Configurações Globais (*Global Settings*)
 - Seleção do modelo do robô ABB – IRB 2400
 - Definição da posição da peça a maquinar relativamente ao robô
 - Configuração dos movimentos e parâmetros associados
 - × Configurações Locais (*Local Settings*)
 - Configuração dos eixos – definição da orientação da ferramenta ao longo do percurso de maquinagem
 - Otimização/validação da orientação da ferramenta
4. Simulação em Mastercam/Robotmaster
5. Geração do código Rapid

Ambiente RobotStudio

6. Importação do código e simulação
 - × Verificação – Colisões e Configurações do Robô
 - × Validação e análise
7. Análise de desempenho com recurso a funcionalidades do *Signal Analyzer* (perfil de velocidade do TCP, trajetórias, potência elétrica consumida, tempo de execução).

Seleção de Parâmetros

No Mastercam/Robotmaster é definida a estratégia de maquinagem e os respetivos parâmetros (ferramenta, velocidades, etc.), bem como o robô e o *spindle* a utilizar. Na Tabela 10 são apresentados os parâmetros analisados em cada caso de estudo.

Tabela 10 - Parâmetros específicos de cada caso de estudo.

Parâmetros	Casos de Estudo				
	1	2	3	4	5
Parâmetro <i>Zone</i>	X	X	X		
Velocidade de avanço	X	X	X		
Parâmetro de Corte - “ <i>Roll Cutter Around Corners</i> ”				X	
Estratégia de Maquinagem					X
Número de Testes (Total: 63)	10	16	27	2	8

A determinação da velocidade do robô durante o movimento de corte foi feita com base nos valores de referência indicados no livro *Machinery’s handbook* [42], partindo da especificação dos materiais a maquinar e características da ferramenta a utilizar. Apesar de o trabalho envolver apenas simulação, os valores adotados correspondem a uma situação passível de ser implementada com o equipamento existente no laboratório. Assim, utilizou-se como valor de referência uma velocidade de avanço de 22 mm/s, tendo em consideração os dados seguintes:

- Ferramenta: HSS – Diâmetro de 25mm [D]
- Peça: Alumínio
- Número de Dentes [z]: 2
- Fresagem de Topo – Dados tabelados:

Avanço por dente:

$$f_t = 0.008 \text{ in/dente} = 0.2 \text{ mm/dente}$$

Velocidade de corte:

$$v_c = 8520 \text{ ft/min} = 4.3 \text{ m/s}$$

Velocidade de rotação do *spindle*:

$$n[rpm] = \frac{1000 v}{\pi D} = 3285 \text{ rpm}$$

Velocidade de avanço:

$$v_f = \text{feed rate} = n \times z \times f_t = 1314 \text{ mm/min}$$

$$v_f = 22 \text{ mm/s}$$

Da realização de diferentes testes em ambiente Mastercam/Robotstudio e o pós-processamento de várias operações comprovou-se um erro de conversão das unidades da velocidade de avanço [38]. No Mastercam esta vem expressa em mm/min, não sendo feita a conversão para mm/s, unidades usadas no Rapid, obrigando à sua alteração manual no programa.

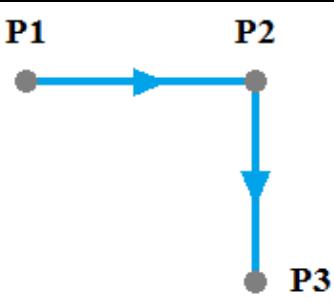
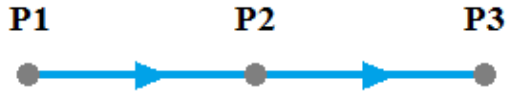
5.2. Análise de Percurso Linear entre Três Pontos

Objetivo: Examinar as trajetórias e os perfis de velocidades em movimentos lineares entre três pontos tendo em consideração as diferentes velocidades programadas e os diferentes parâmetros *Zone* usados na instrução de interpolação linear (MoveL).

Para tal, são analisados três casos distintos de trajetórias elementares no plano horizontal entre três pontos distantes de 200 mm, sucessivamente, por forma a garantir que a velocidade programada é atingida. As velocidades utilizadas correspondem à velocidade de avanço calculada de 20 mm/s e uma velocidade 10 vezes superior (200 mm/s).

Os três casos de estudo são, um percurso de canto (mudança de direção a 90°), um percurso de vaivém ao longo da mesma linha e um percurso em linha (Tabela 11). Em cada caso foram utilizados diferentes parâmetros *Zone* diferentes por forma a conjuntamente com o valor da velocidade, avaliar o seu impacto nas trajetórias executadas.

Tabela 11 - Casos de estudo para analisar trajetórias, perfis de velocidade e a influência do parâmetro *Zone*.

Casos de Estudo	Trajetória Realizada
Canto	
Vaivém	
Linha	

Canto

A Tabela 12 apresenta as operações simuladas e os respetivos parâmetros utilizados.

Tabela 12 - Operações simuladas no estudo da trajetória de canto.

Parâmetros	Operações Simuladas			
	A	B	C	D
Zone	z1	z1	z10	z10
Velocidade	v20	v200	v20	v200

As simulações realizadas para as quatro operações relativamente ao posicionamento do TCP durante a execução da trajetória programada permitiram obter os resultados apresentados na Figura 19, sendo de realçar os seguintes aspetos:

- durante as trajetórias programadas com z1, a trajetória do TCP em torno do ponto P2 (200,200) foi alterada em conformidade com a especificação do parâmetro *Zone* (1mm);
- estas ilações são as mesmas para as trajetórias programadas com z10.

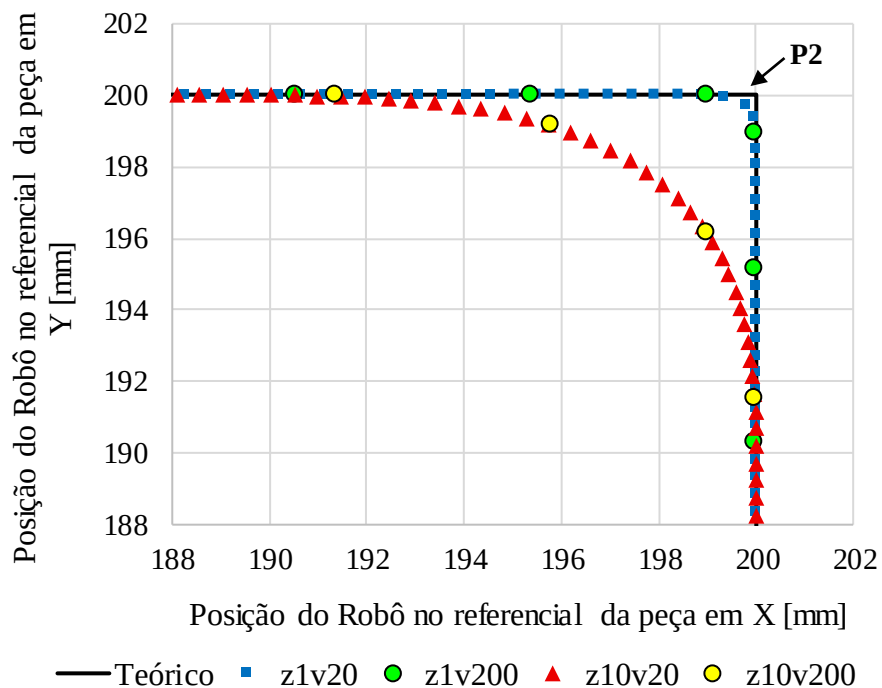


Figura 19 - Representação parcial da trajetória de canto realizada pelo robô para as operações simuladas em torno do ponto P2.

É possível verificar que a trajetória não é afetada pela velocidade, uma vez que a reorientação é realizada a partir do mesmo ponto, sendo apenas função do parâmetro *Zone* utilizado.

Na Figura 20 e na Figura 21 é possível observar os perfis de velocidade do TCP durante a realização de todo o percurso programado. Verifica-se, para o caso de velocidade igual a 20 mm/s, e em maior detalhe na Figura 22, que:

- para a trajetória com z1, no ponto de mudança de direção há uma diminuição brusca da velocidade da ordem dos 4 mm/s, correspondente a uma diminuição de 20% da velocidade programada;
- para a trajetória com z10, a variação de velocidade em torno do mesmo ponto é muito menor, de aproximadamente 0.2 mm/s, correspondente a uma variação de 0.1% da velocidade programada.

As operações realizadas a uma velocidade de 200 mm/s (B e D), as curvas da Figura 19 não estão sobrepostas, uma vez que a base de tempo de 24 ms usada nas simulações não permitiu obter um traçado contínuo. No entanto, este não é um fator impeditivo da análise de resultados, uma vez que os valores disponíveis se sobrepõem.

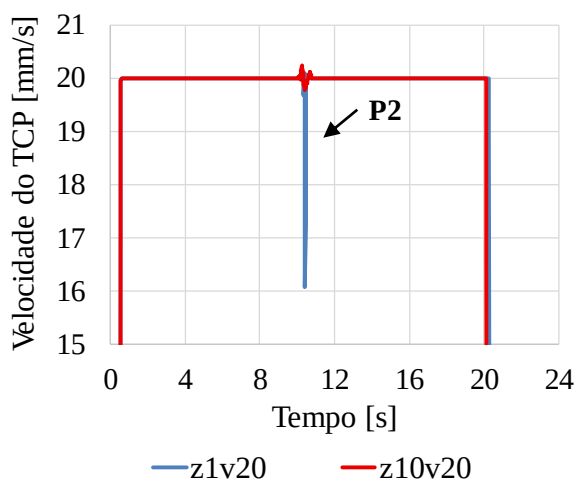


Figura 20 - Perfil de velocidade do TCP para as operações de canto simuladas com parâmetro *Zone* z1 e z10 e velocidade programada de 20 mm/s.

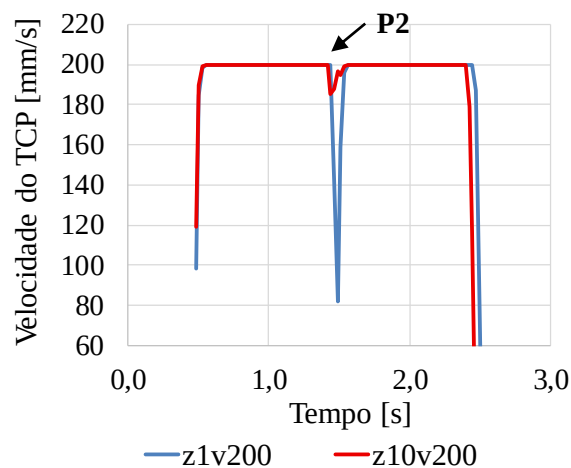


Figura 21 - Perfil de velocidade do TCP para as operações de canto simuladas com parâmetro *Zone* z1 e z10 e uma velocidade programada de 200 mm/s.

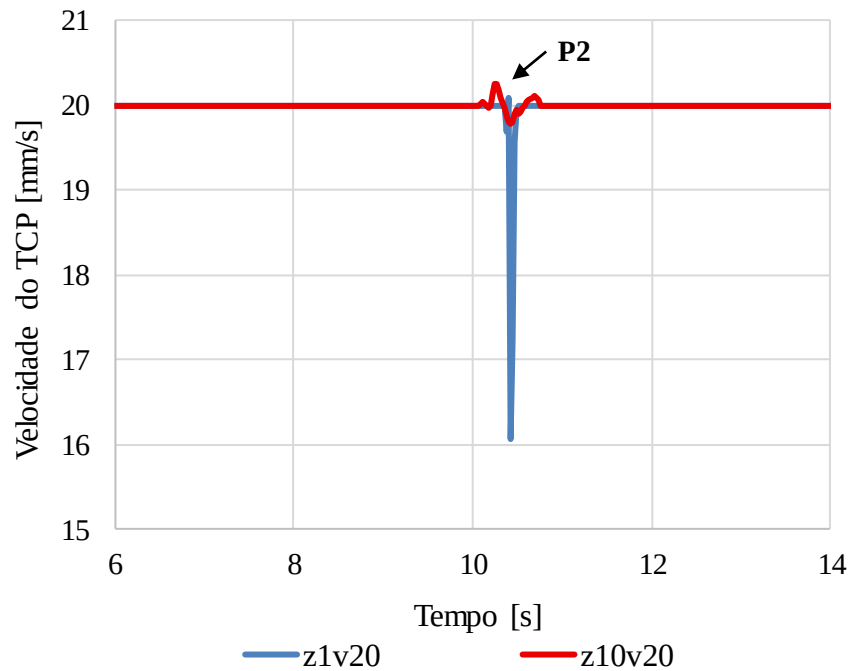


Figura 22 - Representação parcial do perfil de velocidade do TCP para as operações de canto simuladas com parâmetro *Zone* z1 e z10 e uma velocidade programada de 20 mm/s.

Os perfis de velocidade do TCP na trajetória realizada a uma velocidade de 200 mm/s, tem um comportamento em torno do ponto P2 que pode ser observado na Figura 23. Tal como para a situação anterior podem observar-se os seguintes aspetos:

- para a trajetória com z1, no ponto de mudança de direção há uma diminuição brusca da velocidade de aproximadamente 120 mm/s, correspondente a uma diminuição de 60% da velocidade programada;
- para a trajetória com z10 a variação de velocidade em torno do mesmo ponto é muito menor e de aproximadamente 10 mm/s, correspondente a uma variação de 5% da velocidade programada.

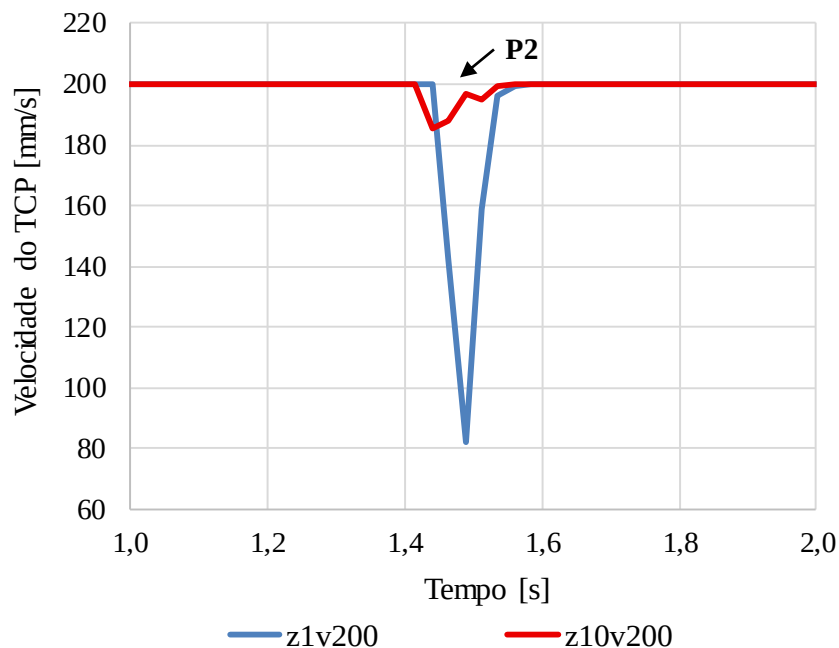


Figura 23 - Representação parcial do perfil de velocidade do TCP para as operações de canto simuladas com parâmetro *Zone* z1 e z10 e uma velocidade programada de 200 mm/s.

Comparativamente à situação anterior, constata-se que quanto maior a velocidade de movimentação programada, maior a sua variação na mudança de direção relativamente ao valor programado. Por outro lado, o parâmetro *Zone* apenas influencia o perfil de velocidade em torno do ponto P2 da trajetória.

Vaivém

Para este caso foram feitas simulações para trajetórias com diferentes parâmetros *Zone* para as duas velocidades consideradas inicialmente, 20 e 200 mm/s. Neste movimento de vaivém, a trajetória em torno do ponto P2 é função do parâmetro *Zone*, pelo que a distância é reportada no gráfico da Figura 24. É possível notar o seguinte:

- quanto maior o parâmetro *Zone*, mais cedo o robô faz a inversão do seu movimento, ou seja, a uma maior distância do ponto P2. Esta distância, que teoricamente seria igual ao parâmetro *Zone* definido, corresponde a aproximadamente metade do mesmo. Isto é, por exemplo para a trajetória com z10, o robô inverte o movimento a sensivelmente 5 mm de distância de P2, uma vez que o ponto efetivo de inversão da trajetória é diferente do ponto de início da desaceleração do movimento;

- este comportamento é idêntico tanto para uma velocidade de 20 mm/s como para 200 mm/s.

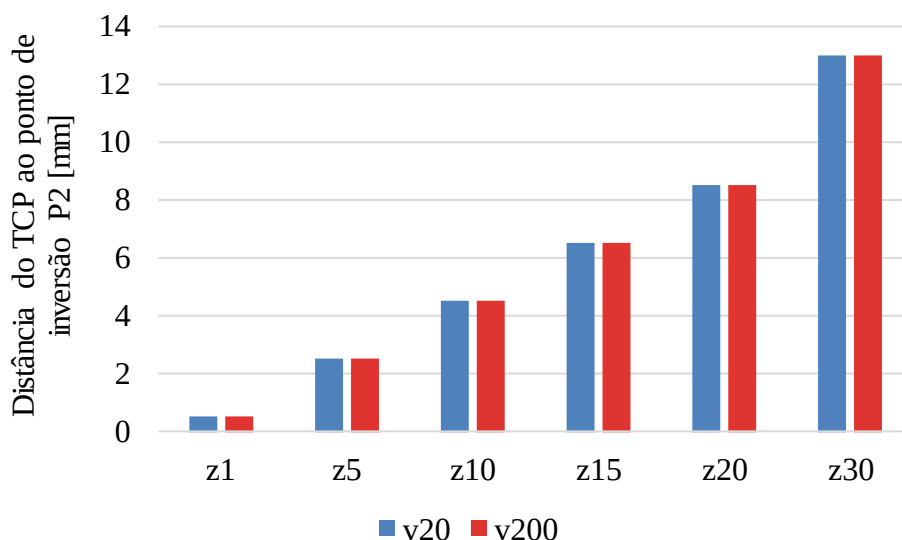


Figura 24 - Distância ao ponto de inversão (P2) para diferentes Zones e velocidades de 20 e 200 mm/s.

É, pois, possível inferir que, tal como na trajetória de canto, a velocidade do movimento não influencia o percurso descrito pelo robô, sendo este último apenas função do parâmetro *Zone*. No caso da maquinagem, o conhecimento deste comportamento é relevante ao condicionar o percurso efetuado e diretamente o volume de material removido.

Linha

A partir das simulações realizadas para esta situação foram estudadas as trajetórias lineares descritas pelo robô, as quais podem ser observadas nas Figura 25 e Figura 26, respetivamente para as duas velocidades consideradas de 20 e 200 mm/s. Foram utilizados três parâmetros *Zone* diferentes, sendo de salientar o seguinte:

- a trajetória segue um percurso linear, sem a ocorrência de variações posicionais significativas para ambos os casos, notando-se apenas uma ligeira perturbação após a passagem pelo ponto P2 de uma ordem bastante inferior à décima de milímetro;
- o parâmetro *Zone* não influencia o comportamento do robô durante a sua passagem pelo ponto intermédio (P2).

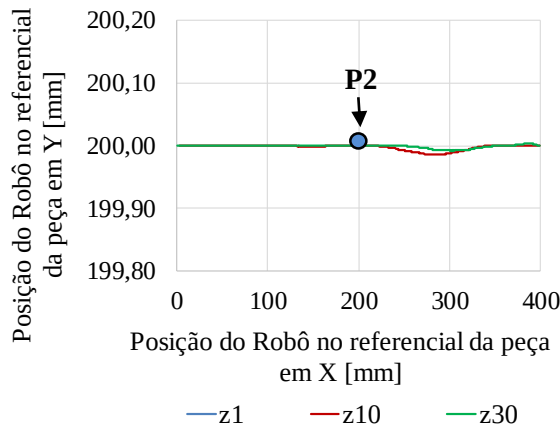


Figura 25 - Representação da trajetória em linha realizada pelo robô para diferentes *Zones* e uma velocidade de 20 mm/s.

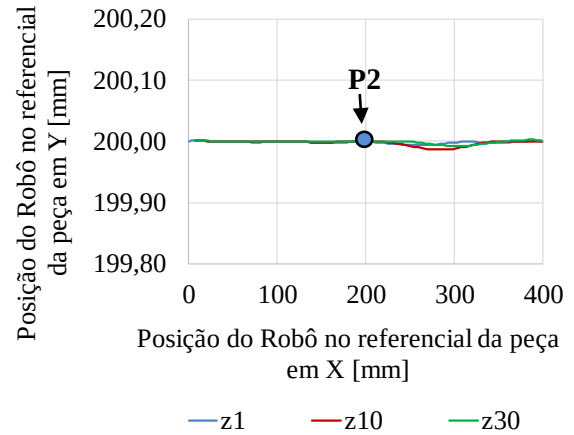


Figura 26 - Representação da trajetória em linha realizada pelo robô para diferentes *Zones* e uma velocidade de 200 mm/s.

De forma análoga aos casos anteriores, foram analisados os perfis de velocidade para 20 e 200 mm/s (Figura 27 e Figura 28). Observa-se que:

- nas trajetórias executadas a 20 mm/s, a velocidade mantém-se uniforme não havendo alterações em torno do ponto P2, sendo este comportamento idêntico para os casos com diferentes parâmetros *Zone*;
- nas trajetórias executadas a 200 mm/s verificam-se ligeiras perturbações na velocidade do TPC após a passagem por P2, no entanto estas não são significativas (da ordem dos 0.1 mm/s relativamente aos 200 mm/s).

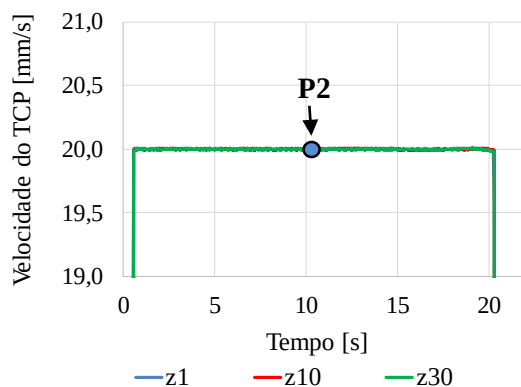


Figura 27 - Perfil de velocidades do TCP para diferentes *Zones* e uma velocidade de 20 mm/s.

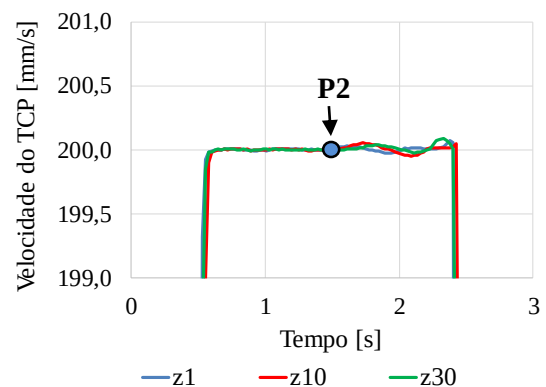


Figura 28 - Perfil de velocidades do TCP para diferentes *Zones* e uma velocidade de 200 mm/s.

Por forma a avaliar o efeito no comportamento do robô da utilização do ponto P2 na definição da trajetória entre P1 e P3, contido na linha entre P1 e P3, foi definida uma operação idêntica, em linha, sem a programação de P2. Na Figura 29 e na Figura 30 são apresentadas a

trajetórias descritas pelo robô e na Figura 31 e na Figura 32 é apresentado os perfis de velocidade. Verifica-se que a não utilização do ponto P2 para a definição da trajetória não introduz alterações relevantes comparativamente à sua utilização.

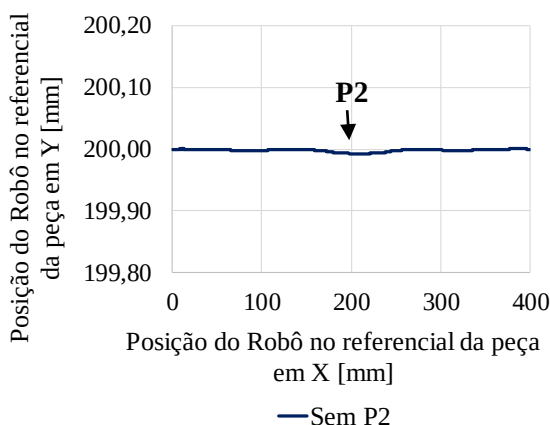


Figura 29 - Posição do TCP sem P2 programada a uma velocidade de 20 mm/s.

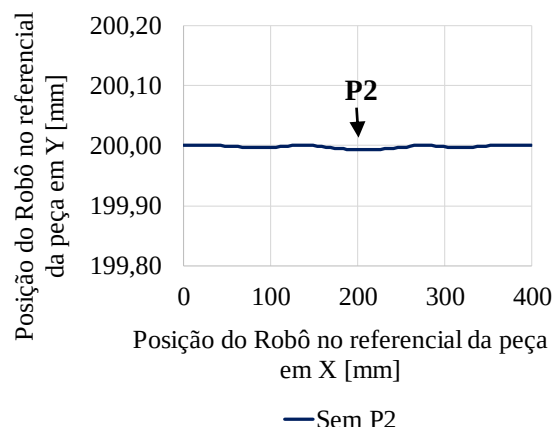


Figura 30 - Posição do TCP sem P2 programado a uma velocidade de 200 mm/s.

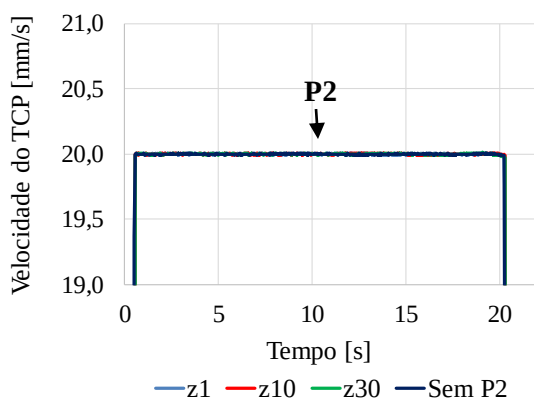


Figura 31 - Perfil de velocidades do TCP para diferentes Zones e uma velocidade de 20 mm/s.

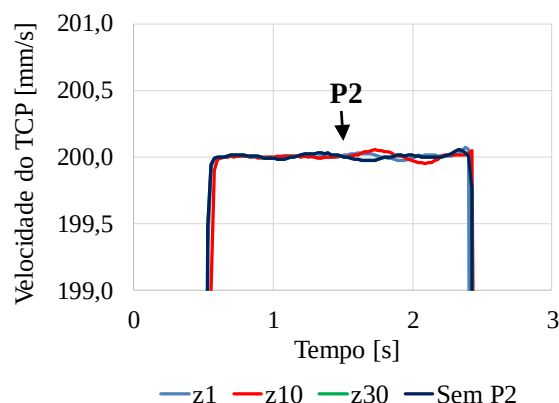


Figura 32 - Perfil de velocidades do TCP para diferentes Zones e uma velocidade de 200 mm/s.

Tal como nos casos analisados previamente constata-se que a trajetória e o perfil de velocidade não são afetadas pelo parâmetro *Zone* nem pelo valor da velocidade utilizado. O ponto P2 não influencia o desempenho do robô, visto o comportamento deste ser equivalente para as operações programadas com e sem este ponto.

5.3. Análise de Percurso Linear entre Quatro Pontos

Objetivo: Examinar as trajetórias e os perfis de velocidades em movimentos lineares entre quatro pontos tendo em consideração a velocidade programada da trajetória e o parâmetro *Zone* usado nas instruções de interpolação linear MoveL.

Visto ter-se verificado a influência do parâmetro *Zone* na trajetória considerou-se pertinente averiguar o efeito desta parametrização numa situação como a descrita na Figura 33. É avaliado o comportamento do robô ao descrever uma trajetória em U, com diferentes parâmetros *Zone* para os pontos P2 e P3. À partida, pressupõe-se que o percurso do robô, para *Zones* superiores à distância entre os pontos P2 e P3 a trajetória se afaste de forma acentuada do percurso pretendido, como a Figura 34 mostra esquematicamente.

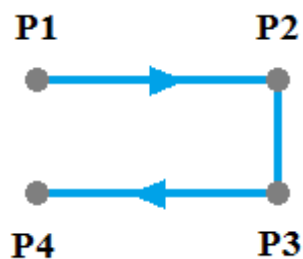


Figura 33 - Trajetória programada para o robô.

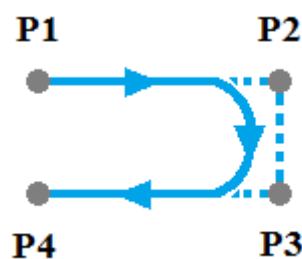


Figura 34 - Trajetória esperada.

Para velocidades de 20 e 200 mm/s, distância de 5 mm entre P2 e P3 e parâmetros *Zone* z1, z5, z10 e z100 obtiveram-se os resultados para as trajetórias descritas pelo robô apresentados nas Figura 35 (20 mm/s) e Figura 36 (200 mm/s).

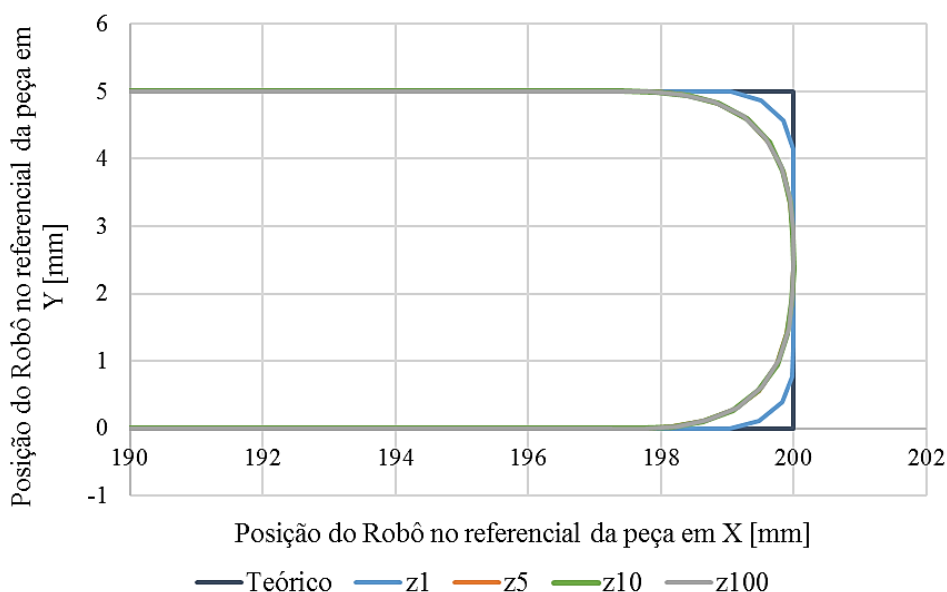


Figura 35 - Posição do TCP para diferentes *Zones*, velocidade de 20 mm/s e distância entre P2 e P3 de 5 mm.

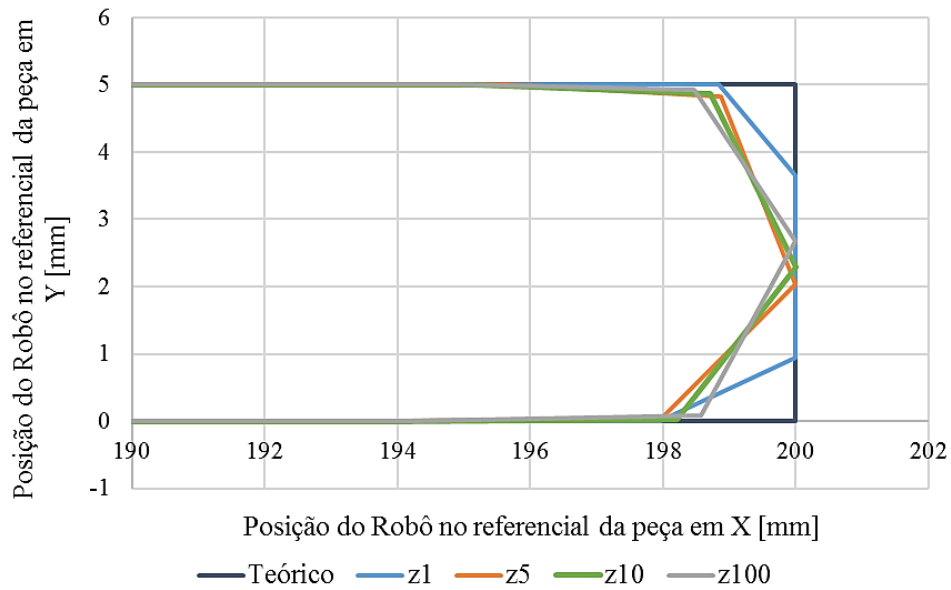


Figura 36 - Posição do TCP para diferentes Zones, velocidade de 200 mm/s e distância entre P2 e P3 de 5 mm.

Verifica-se que:

- para um parâmetro z1, o robô altera a sua trajetória em torno dos pontos P2 e P3 conforme o esperado, para ambas as velocidades de execução da trajetória;
- para uma velocidade de 20 mm/s, as trajetórias em torno de P2 e P3 com z5, z10 e z100 são idênticas;
- para uma velocidade de 200 mm/s, as trajetórias com fatores z5, z10 e z100 são praticamente coincidentes;
- em todos os casos o robô atinge a cota X= 200 mm;
- para as operações simuladas a maior velocidade é notória uma variação mais acentuada das trajetórias relativamente ao percurso teórico, comparativamente com as simulações realizadas a 20 mm/s, no entanto, pouco significativa.

É, assim, novamente, confirmado que a trajetória não é influenciada pela velocidade, mas sim dependente do Zone utilizado. Para Zones de valor igual ou superior à distância entre P2 e P3, o comportamento do robô é semelhante e praticamente coincidente, contrariamente ao que foi inicialmente pressuposto, conforme a Figura 34.

Para corroborar este último facto, realizaram-se as mesmas simulações para uma distância entre P2 e P3 igual a 10 mm. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figura 37 e Figura 38:

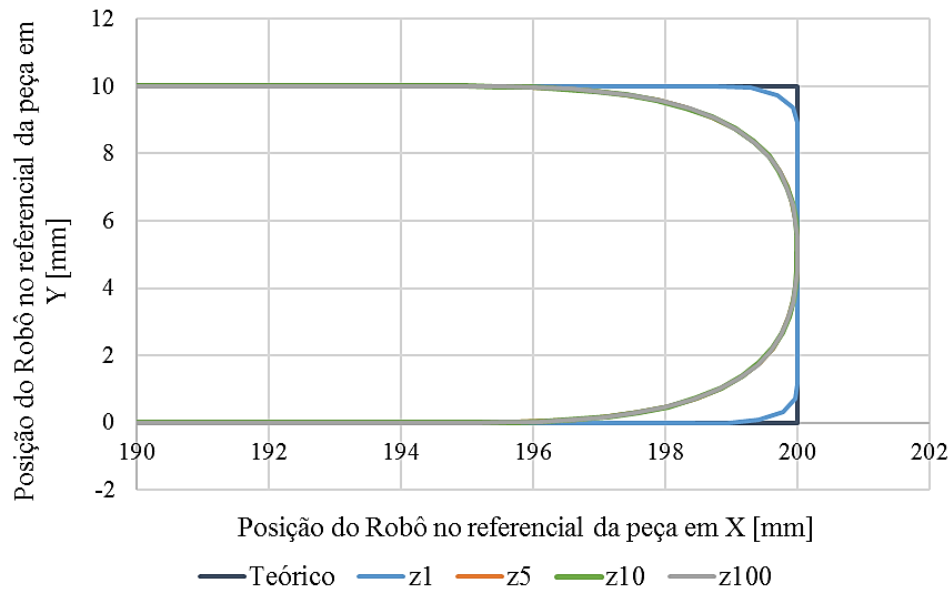


Figura 37 - Posição do TCP para diferentes Zones, velocidade de 20 mm/s e distância entre P2 e P3 de 10 mm.

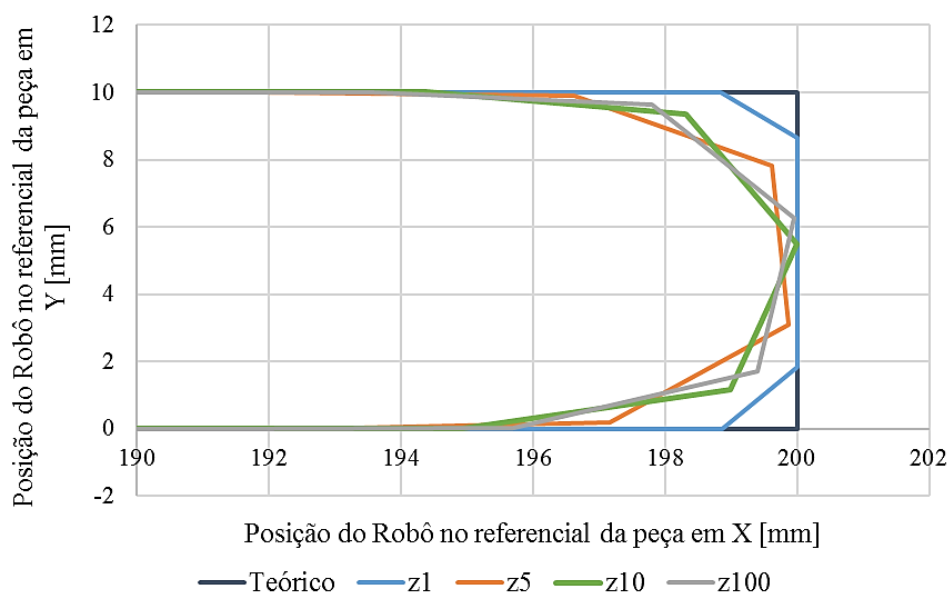


Figura 38 - Posição do TCP para diferentes Zones, velocidade de 200 mm/s e distância entre P2 e P3 de 10 mm.

Verifica-se, assim, que o comportamento da trajetória do robô é semelhante ao caso anterior, não havendo influência da distância entre os pontos P2 e P3.

5.4. Análise de Percurso entre Cinco Pontos

Objetivo: Examinar as trajetórias em movimentos lineares entre cinco pontos tendo em consideração duas velocidades distintas e o parâmetro *Zone* usado nas instruções de interpolação linear (MoveL) e interpolação circular (MoveC).

Neste caso de estudo é feita uma análise semelhante à do ponto anterior, centrada agora na observação do comportamento do robô na execução da trajetória programada. A grande diferença reside no tipo de movimento entre os pontos P2 e P3, que é realizado por meio de uma interpolação circular, tendo sido necessário definir o ponto P5 (Figura 39). Os três casos estudados correspondem a três movimentos de interpolação circular de diâmetros distintos – 5, 10 e 20 mm, para velocidades de 20 e 200 mm/s e parâmetros *Zone* z1, z5, z10 e z100, definidos para os pontos P2, P3 e P5.

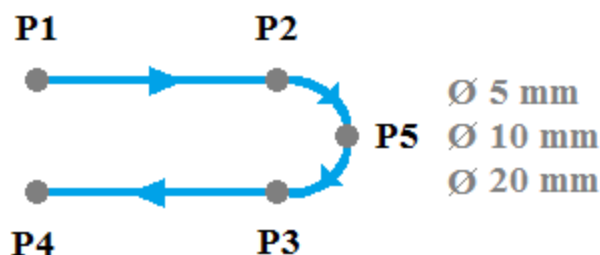


Figura 39 - Trajetória programada para o robô.

Após a programação e simulação das diferentes situações, obtiveram-se os resultados apresentados nas Figura 40 à Figura 45.

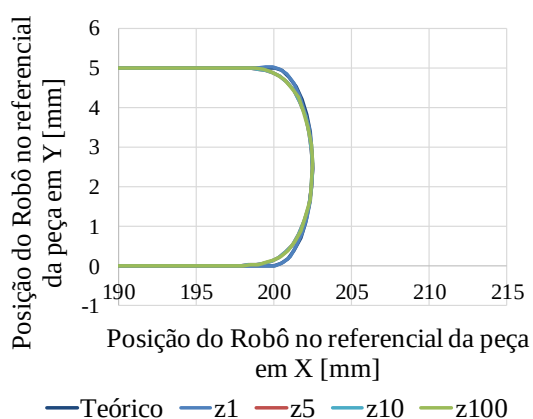


Figura 40 - Posição do TCP para diferentes *Zones*, 20 mm/s e distância entre P2 e P3 de 5 mm.

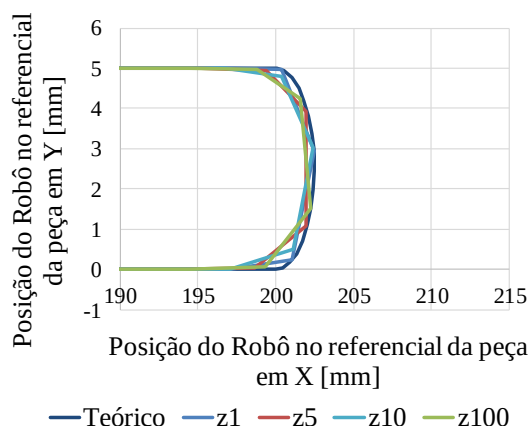


Figura 41 - Posição do TCP para diferentes *Zones*, 200 mm/s e distância entre P2 e P3 de 5 mm.

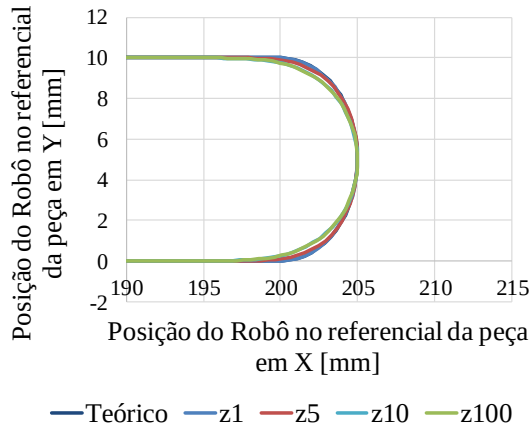


Figura 42 - Posição do TCP para diferentes *Zones*, 20 mm/s e distância entre P2 e P3 de 10 mm.

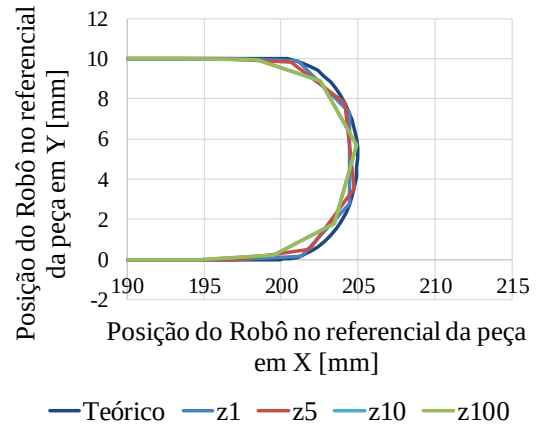


Figura 43 - Posição do TCP para diferentes *Zones*, 200 mm/s e distância entre P2 e P3 de 10 mm.

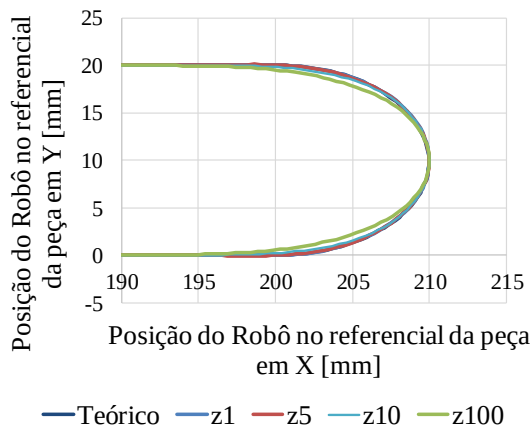


Figura 44 - Posição do TCP para diferentes *Zones*, 20 mm/s e distância entre P2 e P3 de 20 mm.

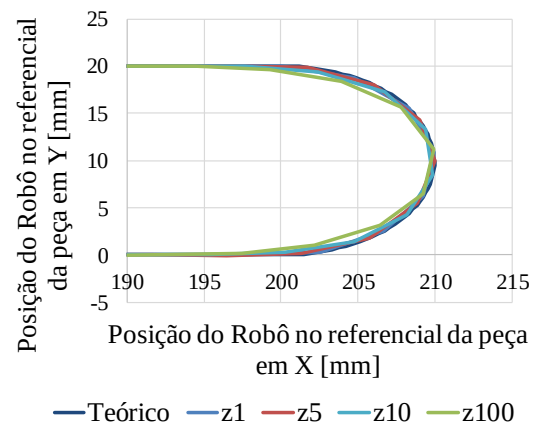


Figura 45 - Posição do TCP para diferentes *Zones*, 200 mm/s e distância entre P2 e P3 de 20 mm.

Da observação e análise dos resultados, é de notar o seguinte:

- o parâmetro *Zone* apenas influencia a trajetória em torno dos pontos P2 e P3, não afetando a trajetória em torno do ponto P5. A influência do parâmetro *Zone* ao utilizar interpolações circulares tem um menor efeito na forma da trajetória em relação às interpolações lineares;
- nas trajetórias executadas à velocidade de 200 mm/s, apesar de ser visível uma maior variação e afastamento em relação à trajetória teórica, estes não são significativas;
- a velocidade não tem efeito na trajetória executada do robô quando comparados casos de menor e maior velocidade.

5.5. Análise do Parâmetro “Roll Cutter Around Corners”

Objetivo: Avaliar o impacto do parâmetro “Roll Cutter Around Corners” no processamento das operações de maquinagem e nos programas gerados relativamente à utilização de interpolações lineares e circulares. Este parâmetro só está disponível quando se seleciona a funcionalidade de compensação automática da ferramenta, naturalmente importante na maquinagem.

Na definição dos critérios de corte de cada operação de maquinagem, o Mastercam permite selecionar o tipo de arredondamento a executar nos cantos através do parâmetro “Roll Cutter Around Corners” – Arredondamento nos Cantos. Este insere movimentos em arco nos cantos durante a trajetória, permitindo 3 alternativas:

- Sem arredondamentos (*None*) – Maquinagem de cantos sem arredondamentos;
- Ângulos inferiores a 135° (*Sharp*) – Maquinagem com arredondamento em torno de cantos com uma amplitude igual ou inferior a 135°. Esta opção é selecionada por defeito pelo Mastercam;
- Todos os cantos (*All*) – Maquinagem com arredondamento de todo o tipo de cantos e criação de um movimento suave para a ferramenta.

Recorrendo a uma geometria simples – retângulo de dimensões 210x290 mm – definiram-se duas operações de contorno com os mesmos movimentos, parâmetros de corte e ferramenta de 25 mm de diâmetro:

- contorno exterior com arredondamento de cantos tipo *Sharp* (Figura 46);
- contorno exterior sem arredondamento (Figura 47).

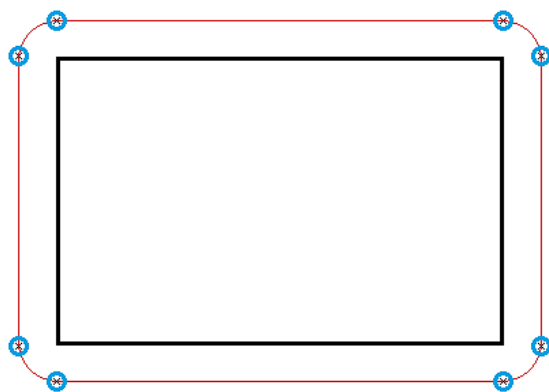


Figura 46 - Contorno com arredondamento dos cantos.

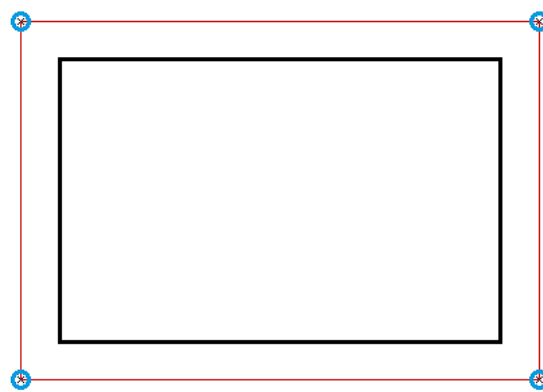


Figura 47 - Contorno sem arredondamento dos cantos.

O processamento de ambas as operações permitiu verificar a existência de diferenças significativas na execução das mesmas e consequentemente diferentes programas para o robô.

A operação com arredondamento dos cantos criou interpolações circulares, aumentando, assim, o número de pontos e respectivas instruções de movimento. Para geometrias de elevado detalhe e complexidade, este parâmetro pode ter um efeito significativo na extensão dos programas de maquinagem gerados para o robô.

5.6. Análise Comparativa de Estratégias de Maquinagem

Objetivo: Averiguar o funcionamento e o desempenho das diferentes estratégias de maquinagem disponíveis no Mastercam para a execução de *pockets*.

Para tal, recorreu-se a uma geometria simples, por forma a avaliar os princípios e funcionalidades básicos, e foram gerados os percursos de maquinagem de acordo com as oito alternativas de realização de *pockets*, apresentadas anteriormente na Tabela 6. Em todas estas estratégias mantiveram-se as mesmas condições de maquinagem e considerando uma única passagem para executar um *pocket* retangular de dimensões 210x290 mm, com parâmetro *Zone z1* e velocidade igual a 22 mm/s.

A simulação e avaliação de cada operação de maquinagem foi realizada com base na funcionalidade “*Signal Analyzer*”. Assim, foram analisados os seguintes critérios:

- extensão dos programas;
- tempo de simulação;
- potência consumida;
- perfil de velocidade do TCP.

Os dados disponibilizados pelo *Signal Analyzer* podem ser observados diretamente em gráficos no programa e também podem ser exportados para Excel, permitindo uma análise mais detalhada dos mesmos. Com base nos dados obtidos, apresentam-se no Anexo 1 os oito gráficos representativos dos percursos de maquinagem testados para as oito estratégias. Os dados quantitativos sintetizam-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Comparação de estratégias de maquinagem.

		1	2	3	4	5	6	7	8
									
Nº Linhas do Programa		59	64	69	132	209	1142	115	84
Tempo de Simulação [s]		238	238	248	263	341	729	269	349
Distância Percorrida [mm] ¹	Mov. Avanço	5070	5092	5326	5628	7395	15938	5140	7573
	Mov. Aproximação	119	433	119	119	180	192	4263	124
Energia Consumida Total [kJ]		47.5	47.3	49.5	52.3	67.6	145.6	55.0	69.7

Esta tabela, para além da extensão do programa, tempo de simulação e energia consumida, contém ainda dados correspondentes às distâncias percorridas, à velocidade máxima (aproximação) e à velocidade de avanço. Estas distâncias foram obtidas na simulação com Mastercam, uma vez que a funcionalidade *Signal Analyzer* não fornece diretamente os dados relativos à distância percorrida total, mas apenas o conjunto de pontos associado ao percurso realizado. Desta forma, estas distâncias devem ser consideradas como valores de referência na análise dos programas do robô.

Extensão dos Programas e Tempo de Simulação

Relativamente ao tempo de simulação e extensão de cada programa de maquinagem foram obtidos os resultados apresentados. Analisando os dados da tabela podem salientar-se os seguintes aspetos:

- em geral, todas as estratégias correspondem a programas com extensões diferentes, desde valores próximos de um mínimo de 59 linhas até um valor máximo de 1142, passando por valores intermédios (ex. 132, 209). O valor máximo justifica-se pela

¹ Simulação em Mastercam.

parametrização particular da estratégia 6, Maquinagem de Alta Velocidade, que consistia na utilização de múltiplos movimentos circulares ao longo do percurso (Figura 48). O número de linhas para cada estratégia parece está coerente com a subdivisão em segmentos lineares ou circulares do percurso associada a cada estratégia.

- Relativamente aos tempos de simulação e tendo em conta as distâncias percorridas de referência, verifica-se que a escolha de uma dada estratégia, mesmo com um programa de extensão similar pode levar a tempos de simulação e distâncias percorridas bastante diferentes. Por exemplo, comparando o número de linhas da estratégia 3 (69) com da estratégia 8 (84), apresentam tempos de simulação bastante diferentes, 248 e 349, respetivamente. Ou seja, percursos com segmentos lineares, comparativamente com percursos em espiral contínua, geram programas com distâncias percorridas menores, e, portanto, tempo total de execução menor. Neste caso particular, tal deve-se à forma retangular do *pocket* a obter, que no caso da estratégia 8 (Espirai Real) obriga à sobreposição do percurso quando se atinge os limites do *pocket* (Operação 8 – Anexo 1).
- Naturalmente, não é possível estabelecer uma relação direta entre a extensão do programa e o tempo de simulação, uma vez que este estará associado ao percurso correspondente a cada instrução de movimento e não necessariamente ao número de instruções. Por exemplo, comparando as estratégias 5 e 8, realizadas num tempo semelhante, mas com um número de linhas bastante diferente.
- Verifica-se que a estratégia em Zizzag (1) é a que gera o programa de menor extensão, distância percorrida e tempo de simulação.

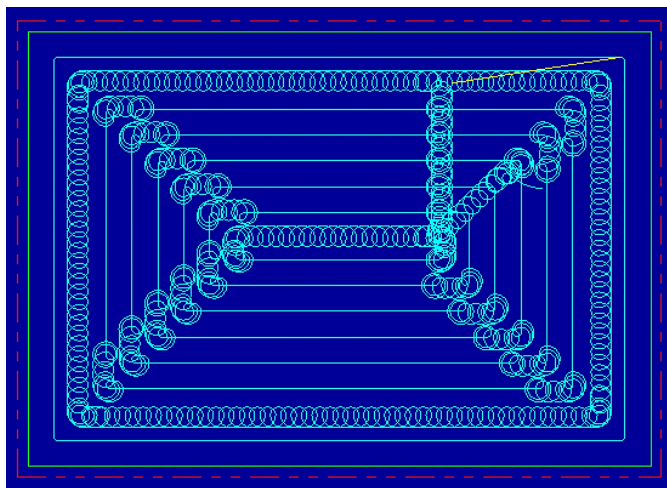


Figura 48 - Trajetória determinada pelo Mastercam para a estratégia de Maquinagem a Alta Velocidade (6).

Potência Consumida

Uma das funcionalidades do Signal Analyzer é disponibilizar a potência elétrica consumida em cada instante de tempo e a energia total ao executar a trajetória. Estes dados permitem avaliar a eficiência na realização da trajetória em termos globais, bem como as variações ao longo da execução dos vários movimentos.

Em relação à potência instantânea, o Anexo 2 inclui os gráficos relativos às várias estratégias. Em termos globais, nestes gráficos e analisando os dados da Tabela 13, podem salientar-se os seguintes aspetos:

- a energia total consumida nas várias estratégias está em linha com o tempo de execução e distâncias percorridas de referência. Considerando uma potência média com base na energia consumida e tempo de simulação verifica-se que as estratégias têm valores médios similares (199 W), destacando-se apenas a estratégia 7 (Direção Única) com um valor de 204 W. O valor para esta estratégia justifica-se pelo maior número de movimentos em velocidade rápida, uma vez que a maquinagem só é executada numa direção.
- Em geral, nestes gráficos, observam-se valores de potência extremos correspondentes aos movimentos de aproximação para início do percurso de maquinagem. Para além destes valores extremos é possível também verificar, na generalidade, picos de potência que se associam a mudanças de trajetória nos percursos de maquinagem.
- Considerando os dois casos particulares das estratégias 3 e 8 pode observar-se na Figura 49 as diferenças resultantes de movimentos base lineares (3) e movimentos base circulares (8). Na estratégia 3 surgem maiores perturbações nas alterações de movimento, enquanto que na estratégia 8 se verifica uma maior continuidade na evolução da curva de potência.

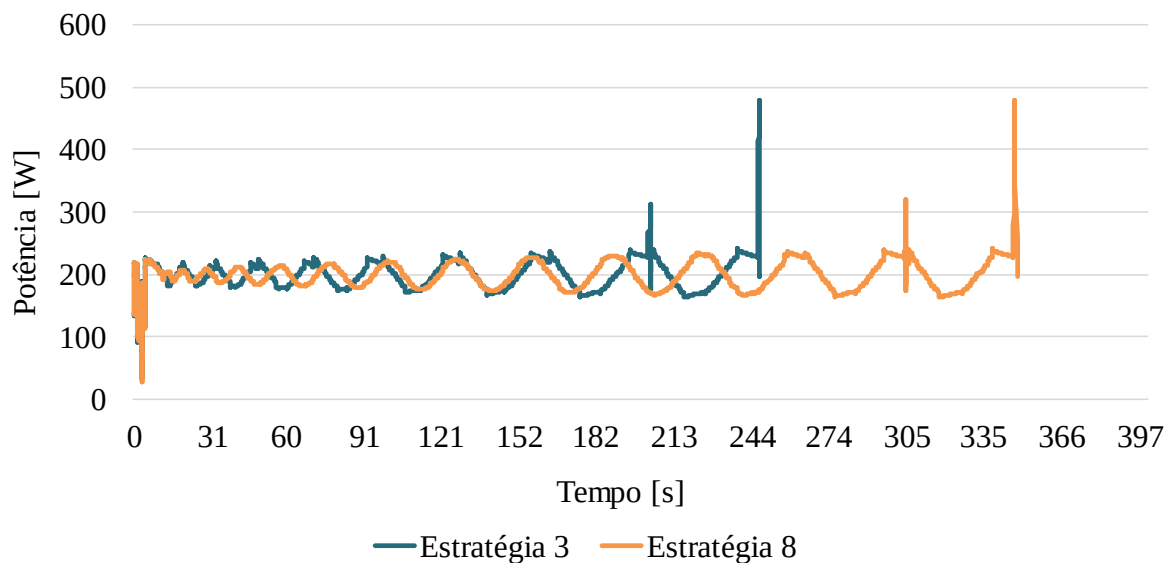


Figura 49 - Gráfico da potência consumida para as estratégias 3 e 8.

Comparando as estratégias 1 e 7 (Figura 50), a variação brusca da potência em estratégias baseadas em movimentos lineares é ainda mais acentuada quando as variações de velocidade são maiores.

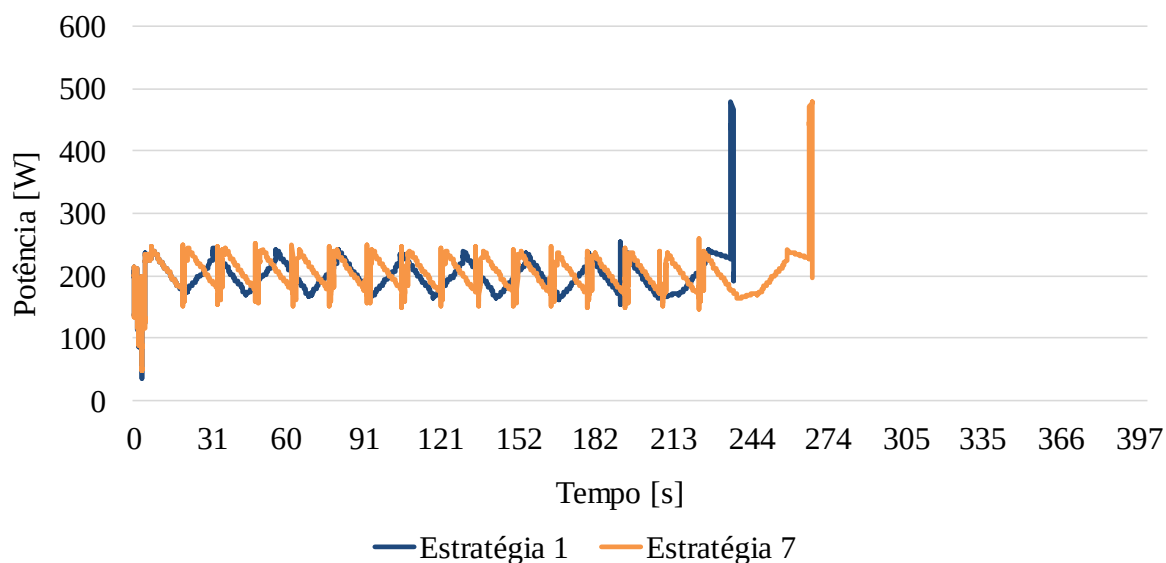


Figura 50 - Gráfico da potência consumida para as estratégias 1 e 7.

Em relação a valores de potência máximos e mínimos, a estratégia 7 (Figura 50), apresenta uma gama de potências a variar entre os 150 e os 250 W ao longo de todo o percurso. Enquanto que na estratégia 8 estes valores só são atingidos nos últimos movimentos.

Perfil de Velocidades do TCP

A análise dos perfis de velocidade do TCP ao longo de todo o percurso é importante, particularmente no que diz respeito à velocidade de avanço, uma vez que é normalmente desejável que esta se mantenha constante durante a maquinagem. Nestes testes foi considerada uma velocidade de avanço de 22 mm/s e uma velocidade de aproximação rápida de 300 mm/s. Os valores médios da velocidade de avanço, tendo em conta os tempos de simulação e as distâncias percorridas de referência (Tabela 13), correspondem aproximadamente a 22 mm/s. De notar que na execução destas trajetórias foi utilizado o parâmetro *Zone z1* em todas as instruções de movimento.

Relativamente à análise detalhada ao longo da execução das trajetórias, os perfis de velocidade do TCP apresentam-se no Anexo 3 para as várias estratégias. A análise destes gráficos permite fazer as seguintes observações:

- distinguem-se facilmente valores extremos de velocidade, que correspondem aos movimentos de aproximação (300 mm/s);
- para as várias estratégias testadas o perfil de velocidade tem variações em torno do valor de velocidade média (22 mm/s), correspondentes a picos associados às alterações da direção do movimento. Por exemplo, relativamente à estratégia 1 (Figura 51) verificam-se diminuições de velocidade nos pontos de mudança de direção, onde a ferramenta descreve uma trajetória em U;
- a estratégia 7 (Figura 52), Maquinagem em Direção Única, evidencia um perfil de velocidades em que é visível a utilização de um grande número de movimentos de aproximação. É de assinalar que, como seria de esperar, os picos de velocidades coincidem com os picos de consumo de potência elétrica;
- a estratégia 8 (Figura 53), Espiral Real, apresenta o perfil de velocidades mais suave, comparativamente com todas as outras estratégias. Isto deve-se ao facto de o movimento ser continuamente descrito por interpolações circulares, as quais evitam que o TCP altere a sua direção e, consequentemente, reduza a sua velocidade.

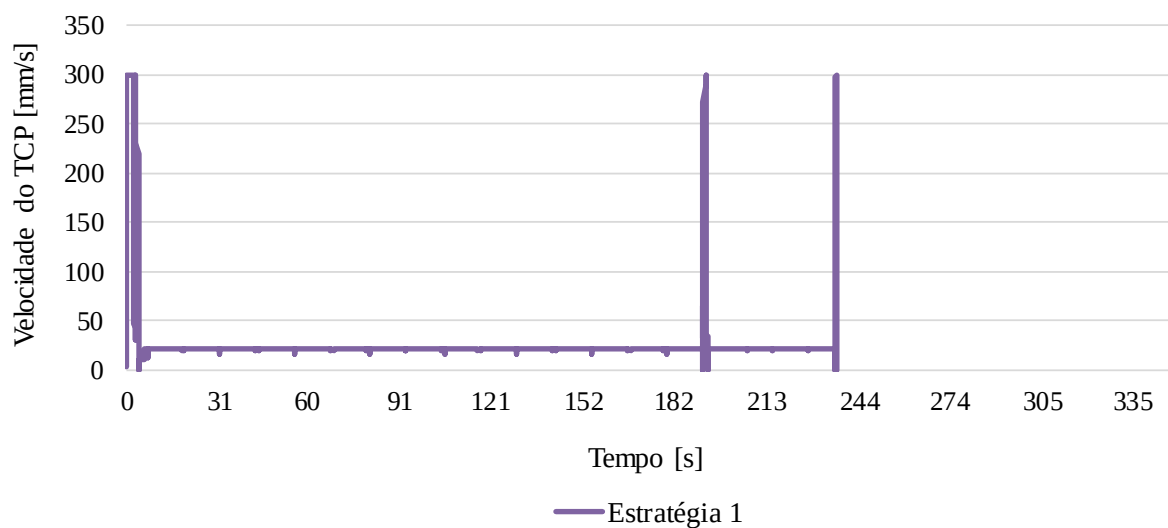


Figura 51 - Perfil de velocidade do TCP para a estratégia 1.

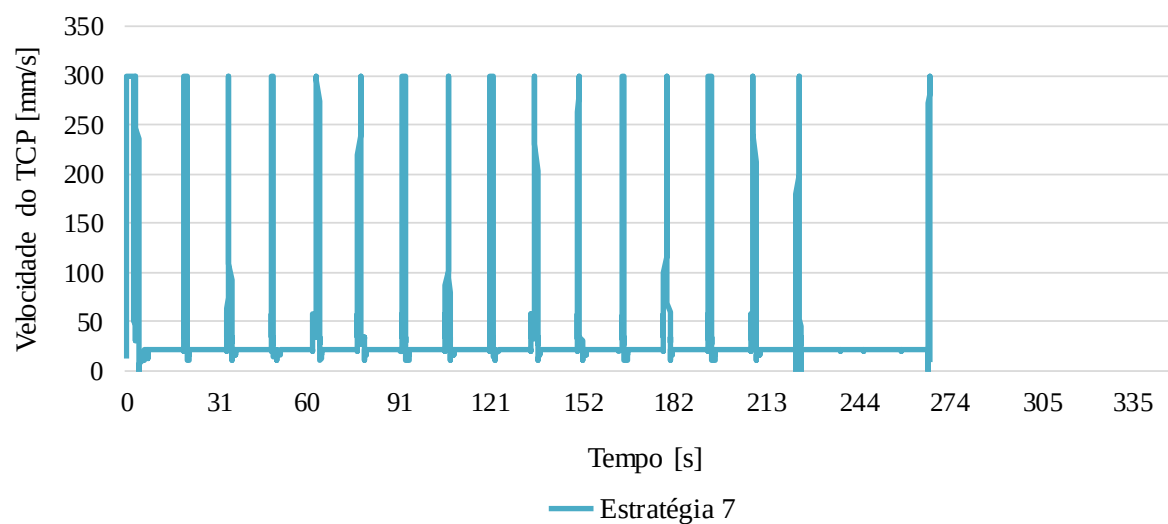


Figura 52 - Perfil de velocidade do TCP para a estratégia 7.

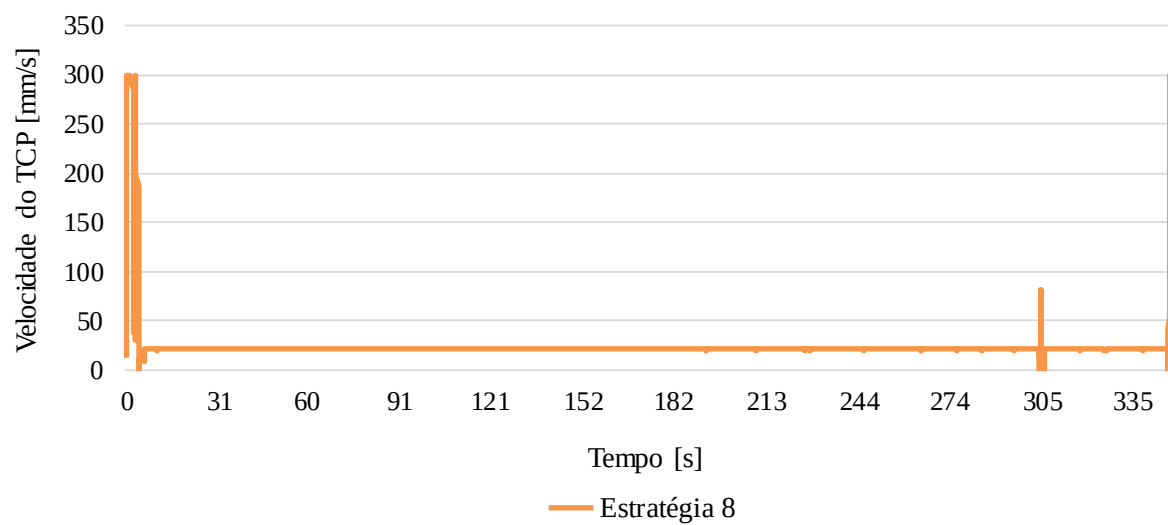


Figura 53 - Perfil de velocidade do TCP para a estratégia 8.

6. Conclusões

No que respeita a aplicações de maquinagem, a utilização de robôs industriais é ainda pouco expressiva devido às limitações dos robôs ao nível da rigidez estrutural, da exatidão e das ferramentas de programação existentes. Por outro lado, a flexibilidade dos robôs na realização de diversas operações a custo inferior e a programação de robôs utilizando as ferramentas CAD/CAM usadas em máquinas CNC, permite encarar a robótica como uma alternativa viável no setor da maquinagem, mas limitada a nichos de mercado. Como tal, no mercado atual são já comercializados robôs desenvolvidos especificamente para aplicações de maquinagem, estando a verificar-se um crescimento notável da sua utilização neste campo.

A programação de robôs para este tipo de tarefas recorrendo a ferramentas CAD/CAM parte de um modelo CAD da peça a maquinar, sobre o qual são definidas as trajetórias e operações de maquinagem a executar. Estas são, depois, pós-processadas para a linguagem específica do robô a utilizar, simuladas e validadas. As aplicações de conversão e pós-processamento podem encontrar-se integradas nos softwares CAM, ou serem softwares independentes. Neste trabalho foi utilizado o software Mastercam/Robotmaster que dispõe de um pós-processador integrado.

A avaliação da influência da parametrização e programação em ambiente Mastercam/Robotmaster nos percursos de maquinagem a realizar pelo robô é feita em termos da performance e comportamento do robô recorrendo ao software de programação *offline* RobotStudio e em particular à funcionalidade *Signal Analyzer*. Foram consideradas operações de maquinagem elementares e operações de *pocketing*.

A análise de operações de maquinagem elementares envolveu a definição de contornos lineares e circulares, tendo permitido concluir que:

- o *Zone* é um parâmetro determinante na trajetória (velocidade e percurso) executada pelo robô. Verificou-se que quanto maior for o parâmetro *Zone*, maior é o afastamento ao percurso programado e menor é a variação da velocidade relativamente à velocidade programada;
- a velocidade programada, dentro de velocidades típicas de maquinagem, não influencia a execução trajetória;

- na execução de uma trajetória linear definida por um conjunto de pontos colineares, a presença dos pontos intermédios não tem influência significativa no perfil de velocidade do TCP, desde que não seja utilizado comando *Zone fine*.

Relativamente às oito estratégias de maquinagem de *pockets* disponíveis e parametrizadas no Mastercam, a análise concentrou-se na verificação da extensão dos programas referentes a cada operação, nos seus tempos de simulação, assim como a potência elétrica consumida e a velocidade do TCP durante a sua execução. Conclui-se o seguinte:

- o recurso a uma dada estratégia, mesmo gerando um programa de extensão similar a outras, pode implicar a tempos de execução e distâncias percorridas bastante diferentes;
- diferentes estratégias de maquinagem correspondem a tempos de maquinagem distintos;
- a escolha de uma estratégia de maquinagem condiciona a ocorrência de picos de consumo de potência elétrica. Estes picos estão associados às mudanças de direção nas trajetórias;
- o perfil de potência mostrou-se semelhante para as diferentes estratégias estudadas, sendo apenas de salientar que a estratégia Direção Única (7) manifesta o perfil mais variável;
- a estratégia “Espiral Real” (8), como utiliza interpolações circulares e não implica variações súbitas de direção apresenta um perfil de velocidade suave e constante ao longo do percurso de maquinagem.

É possível constatar que a aplicação Mastercam/Robotmaster é uma ferramenta útil e prática para a programação de robôs para tarefas de maquinagem, que apresenta múltiplas funcionalidades e especificações que têm diferentes implicações nas trajetórias de maquinagem.

A maquinagem, mais concretamente a fresagem, é ainda um campo de aplicações para robôs industriais a ser mais desenvolvido e melhorado, por forma a tirar partido das vantagens destes.

Como trabalhos futuros sugere-se a implementação em ambiente real dos casos de estudo, avaliação de resultados com base em diferentes parâmetros de acabamento/tolerância e validação das simulações.

Referências

1. Guizzo, E. *The Rise of the Machines*. IEEE Spectrum 2008; Available from: <http://spectrum.ieee.org/robotics/industrial-robots/the-rise-of-the-machines/0>.
2. Pandremenos, J., et al., *Machining with robots: a critical review*. Proceedings of DET2011, 2011.
3. THOCP. *Timeline of Robotics*. 2013 [cited 2016 Fevereiro]; Available from: <http://www.thocp.net/reference/robotics/robotics.html>.
4. ABB. *IRB 260*. 2016 [cited 2016 Fevereiro]; Available from: <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-260>.
5. International Federation of Robotics. *World Robotics 2015 Industrial Robots*. 2015 [cited 2016 Fevereiro]; Available from: <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>.
6. Craig, J.J., *Introduction to robotics: mechanics and control*. Vol. 3. 2005: Pearson Prentice Hall Upper Saddle River.
7. ABB. *Robot selector*. 2016 [cited 2016 Março]; Available from: <http://new.abb.com/products/robotics/robot-selector>.
8. FANUC Corporation. *Robot Lineup*. 2016 [cited 2016 Março]; Available from: <http://www.fanuc.co.jp/en/product/robot/lineup/index.html>.
9. KUKA. *Our Industrial Robots*. 2016 [cited 2016 Março]; Available from: http://www.kuka-robotics.com/en/products/industrial_robots/.
10. Yaskawa America Inc. *Motoman Robots: Industrial Robot Arm Models*. 2016 [cited 2016 Março]; Available from: <http://www.motoman.com/products/robots/default.php>.
11. Chen, Y. and F. Dong, *Robot machining: recent development and future research issues*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. 66(9-12): p. 1489-1497.
12. PricewaterhouseCoopers, *The new hire: How a new generation of robots is transforming manufacturing*. 2014.
13. Chambers, N. *Top Six Trends in Industrial Robotics*. 2014 [cited 2016 Abril]; Available from: <http://www.roboticstomorrow.com/article/2014/09/top-six-trends-in-industrial-robotics/4726/>.
14. Michigan Technological University. *Machining Page*. [cited 2016 Fevereiro]; Available from: <http://www.mfg.mtu.edu/cyberman/machining.html>.
15. Ferraresi, D., *Fundamentos da Usinagem dos Metais*, in *Fundamentos da Usinagem dos Metais*, E.E.B. LTDA, Editor. 2003.
16. Samanta, S. and S. Chakraborty, *Parametric optimization of some non-traditional machining processes using artificial bee colony algorithm*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2011. 24(6): p. 946-957.
17. Tschätsch, H., *Applied machining technology*. 2010: Springer Science & Business Media.

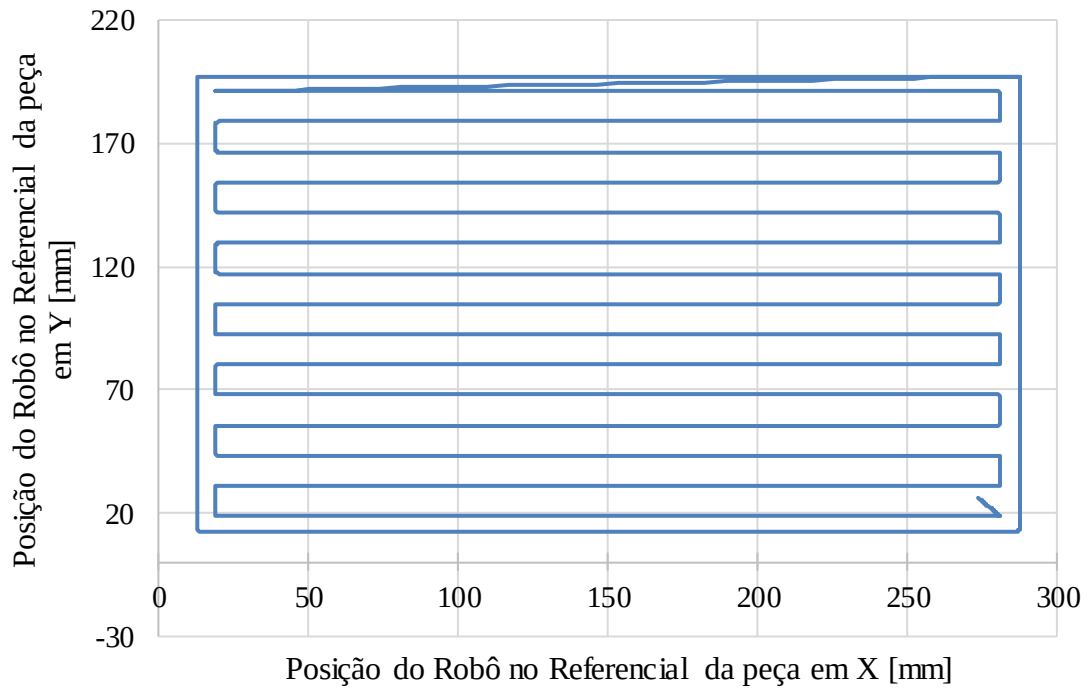
18. Boothroyd, G. and W. Knight, *Fundamentals of machining and machine tools*, 1989. Reproduced with permission of the copyright owner. Further reproduction prohibited without permission.
19. Smid, P., *CNC programming handbook*. 2007: Industrial Press.
20. Krar, S.F., A. Gill, and P. Smid, *Computer numerical control simplified*. 2001: Industrial Press Inc.
21. Grupo CIMM. *Variáveis e Parâmetros de Corte*. 2016 [cited 2016 Março]; Available from: http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/4861-variaveis-e-parametros-de-corte#.Vt7LFX2LSUk.
22. Chryssolouris, G., *Manufacturing systems: theory and practice*. 2013: Springer Science & Business Media.
23. DePree, J. and C. Gesswein, *Robotic Machining White Paper Project*. 2008, Halcyon Development.
24. European Commission. *0.05 mm: a new accuracy standard for industrial robots*. 2014 [cited 2016 Abril]; Available from: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/news/005-mm-new-accuracy-standard-industrial-robots>.
25. Lehmann, C., et al., *Machining with industrial robots: the COMET project approach*, in *Robotics in Smart Manufacturing*. 2013, Springer. p. 27-36.
26. ABB. *IRB 6660 for pre machining*. 2016 [cited 2016 Fevereiro]; Available from: <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-6660-for-pre-machining>.
27. Fanuc Robotics, *LR Mate 200iC Series & R-30iA Mate Controller*. 2009.
28. Motoman, *HP20D-Series*. 2012.
29. Gerling, H., *Alrededor de las máquinas-herramienta*. 2002: Reverté.
30. QD Robotics. *Process robotics - Stone, Marble, Granite, Plaster of Paris*. 2016 [cited 2016 Fevereiro]; Available from: <http://www.qdrobotics.com/eng/stone.php>.
31. T&D Robotics S.r.l. *T&D Robotics Lapisystem*. 2016 [cited 2016 Fevereiro]; Available from: <http://www.stonecontact.com/products-138484/t-d-robotics-lapisystem>.
32. Pan, Z., et al., *Recent progress on programming methods for industrial robots*. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012. 28(2): p. 87-94.
33. Zieliński, C. and P. Warszawska, *Robot programming methods*. 1995: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
34. Haegele, M. *The European Robot Initiative for Strengthening the Competitiveness of SMEs in Manufacturing*. 2014 [cited 2016 Fevereiro]; Available from: <http://sparc-robotics.eu/smerobot-smerobotics/>.
35. Henriques, R.V.B., *Programação e Simulação de Robôs*. 2002.
36. Chang, C.-H. and M.A. Melkanoff, *NC machine programming & software design*. 1988: Prentice-Hall, Inc.
37. Leatham-Jones, B., *Introduction to computer numerical control*. 1986: Pitman Publishing.
38. Antunes, J.P.M.D., *Programação de robôs industriais em operações de maquinagem*, in *DEMec*. 2015, Universidade do Porto: Porto.

39. Robotmaster. *Why Robotmaster*. 2016 [cited 2016 Março]; Available from: <http://www.robotmaster.com/en/why-robotmaster>.
40. Mastercam. *Milling Solutions*. 2016 [cited 2016 Março]; Available from: <http://www.mastercam.com/en-us/Solutions/Milling-Solutions>.
41. ABB Robotics, *Technical reference manual - RAPID Instructions, Functions and Data types*. 2010, Sweden: ABB.
42. Oberg, E., et al., *Machinery's handbook*. Vol. 200. 2004: Industrial Press New York.

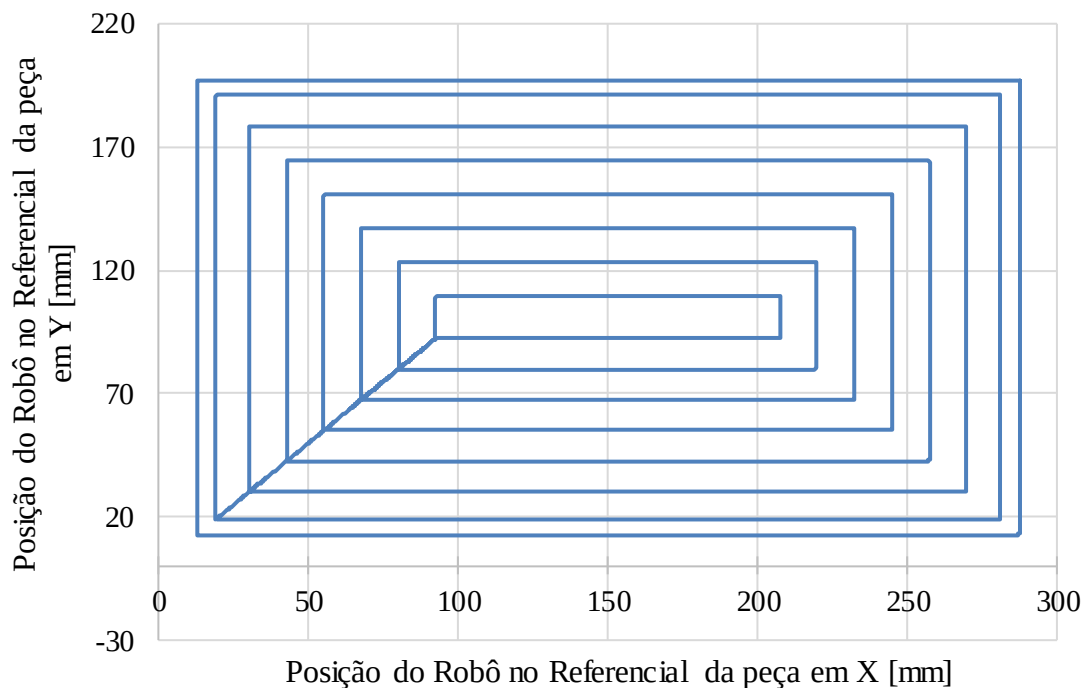
Anexos

Anexo 1 - Gráficos das Trajetórias Executadas pelo Robô

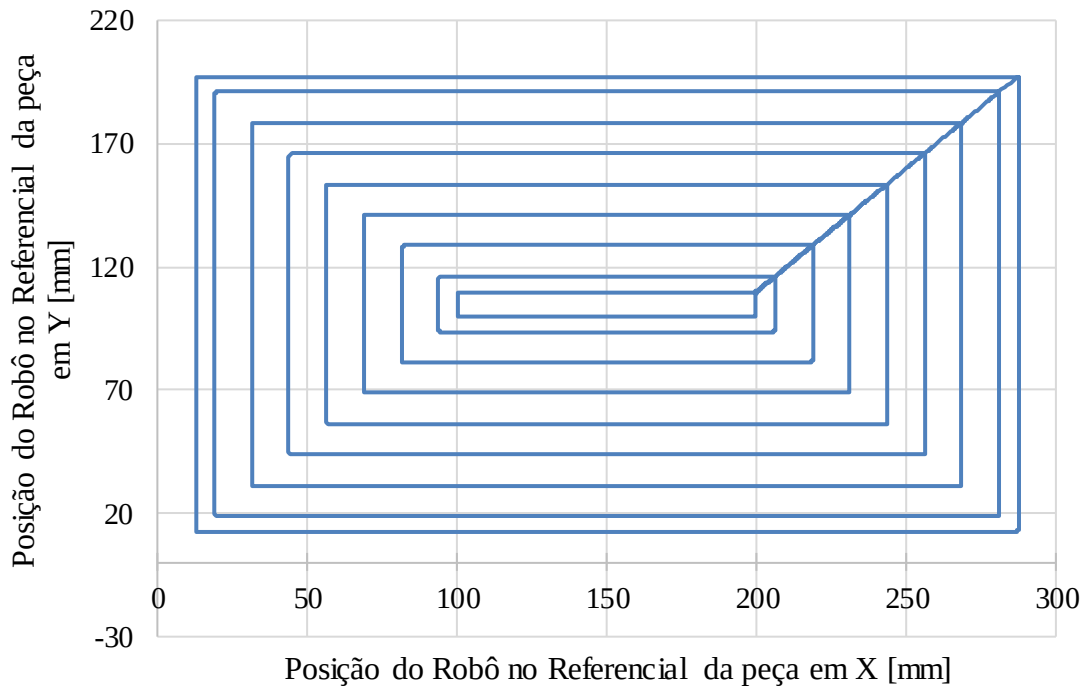
Operação 1 – Estratégia de Maquinagem: Zigzag



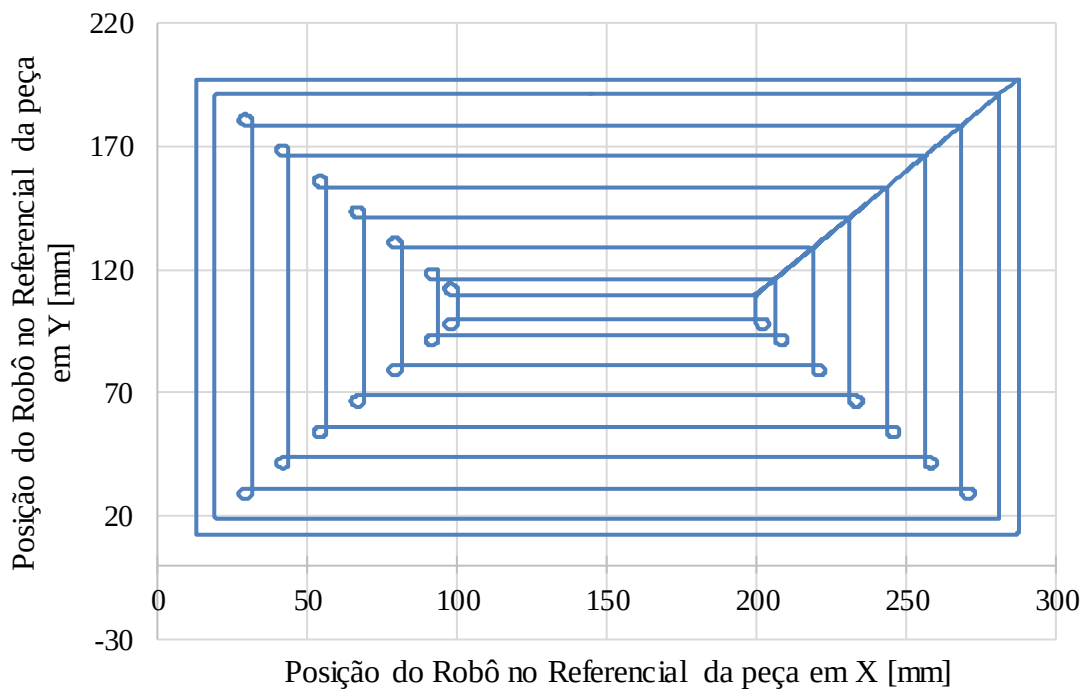
Operação 2 – Estratégia de Maquinagem: Espiral de Sobreposição Constante



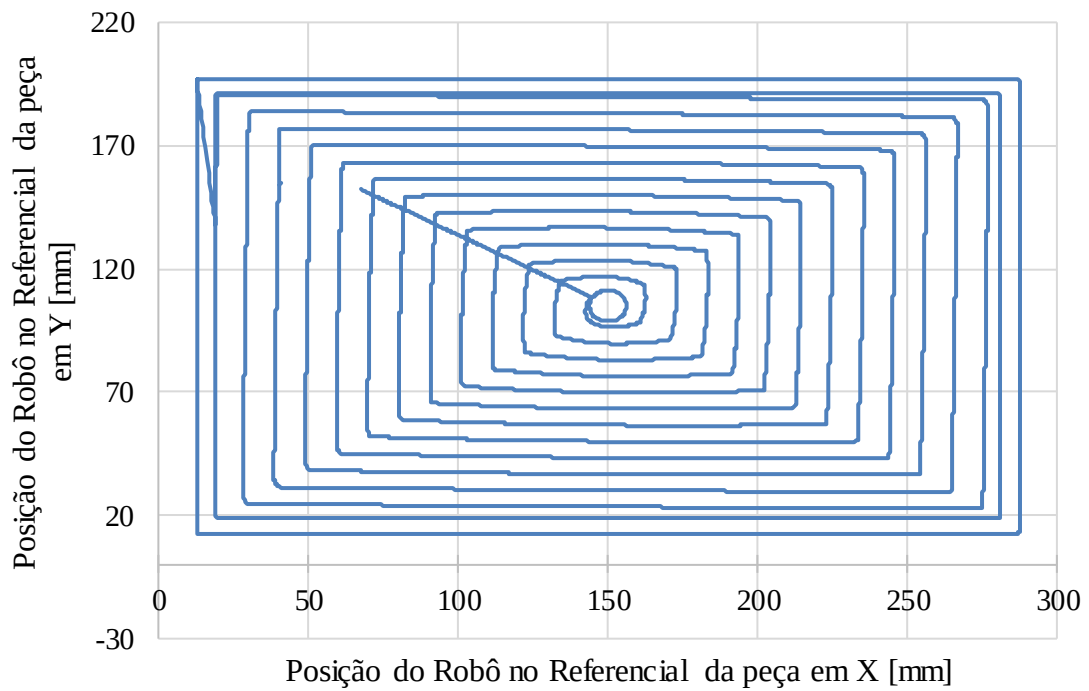
Operação 3 – Estratégia de Maquinagem: Espiral Paralela



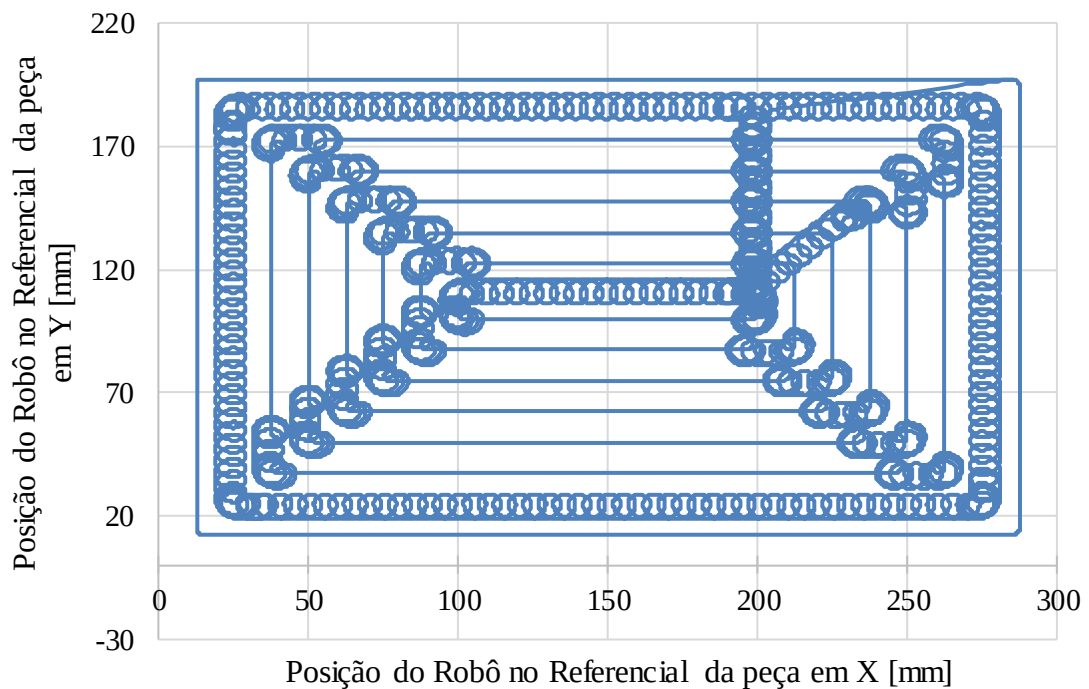
Operação 4 – Estratégia de Maquinagem: Espiral Paralela, Cantos Retocados



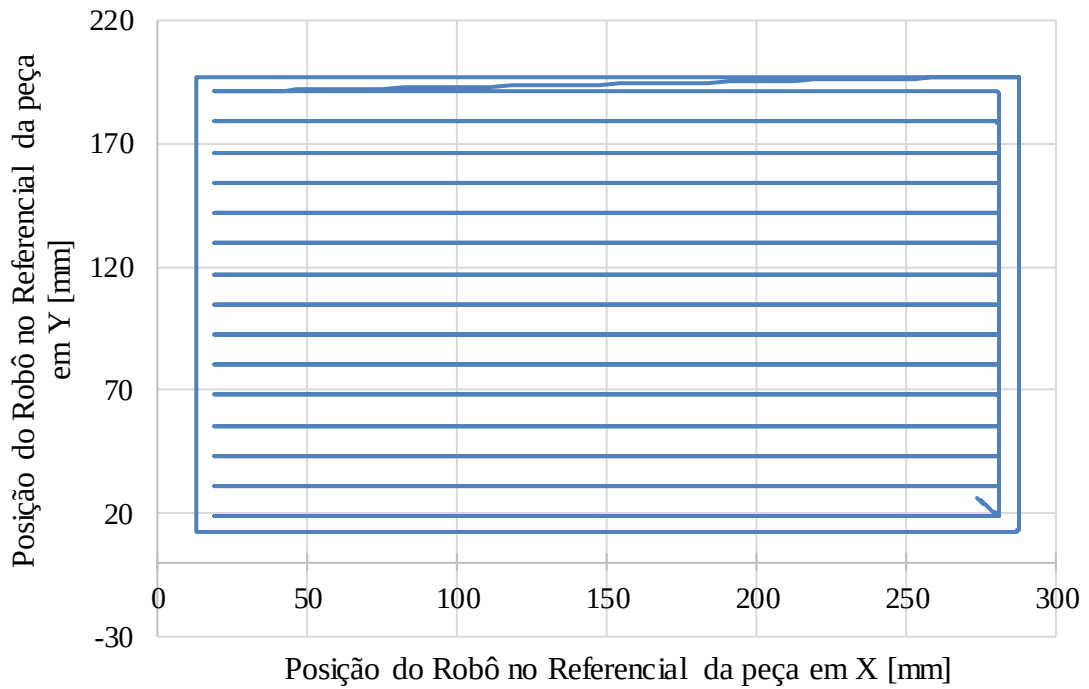
Operação 5 – Estratégia de Maquinagem: Espiral de Morph



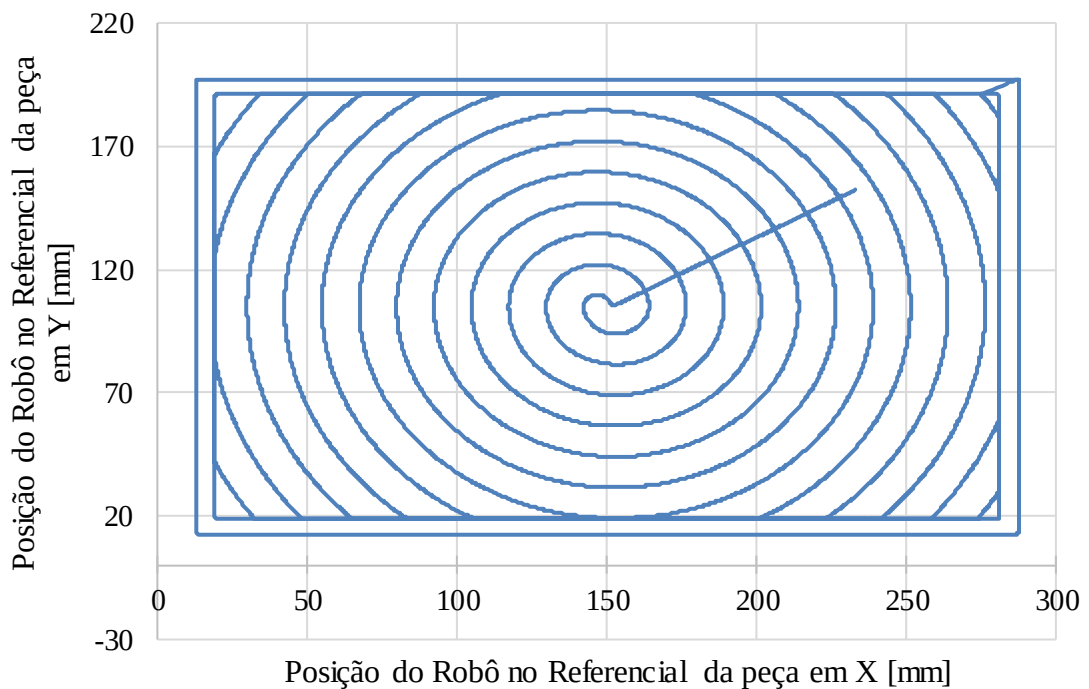
Operação 6 – Estratégia de Maquinagem: Alta Velocidade



Operação 7 – Estratégia de Maquinagem: Direção Única



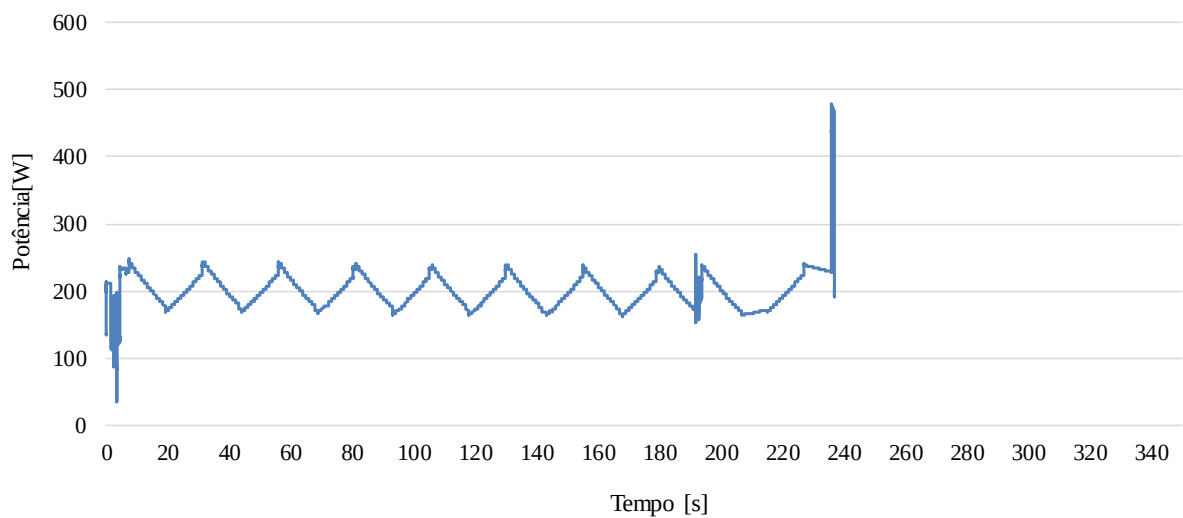
Operação 8 – Estratégia de Maquinagem: Espiral Real



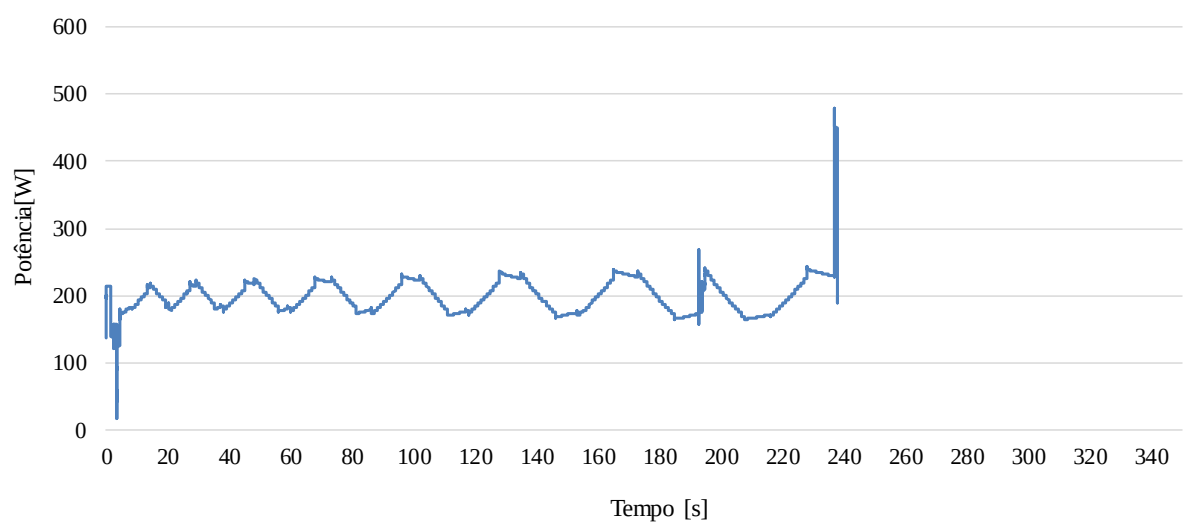
Anexo 2 - Gráficos da Potência Elétrica Consumida

Os gráficos são apresentados com a mesma escala e gama de valores por forma a haver um termo comparativo entre as várias estratégias, com exceção da estratégia 6, cuja gama de tempo se alastra até à ordem dos 1000s.

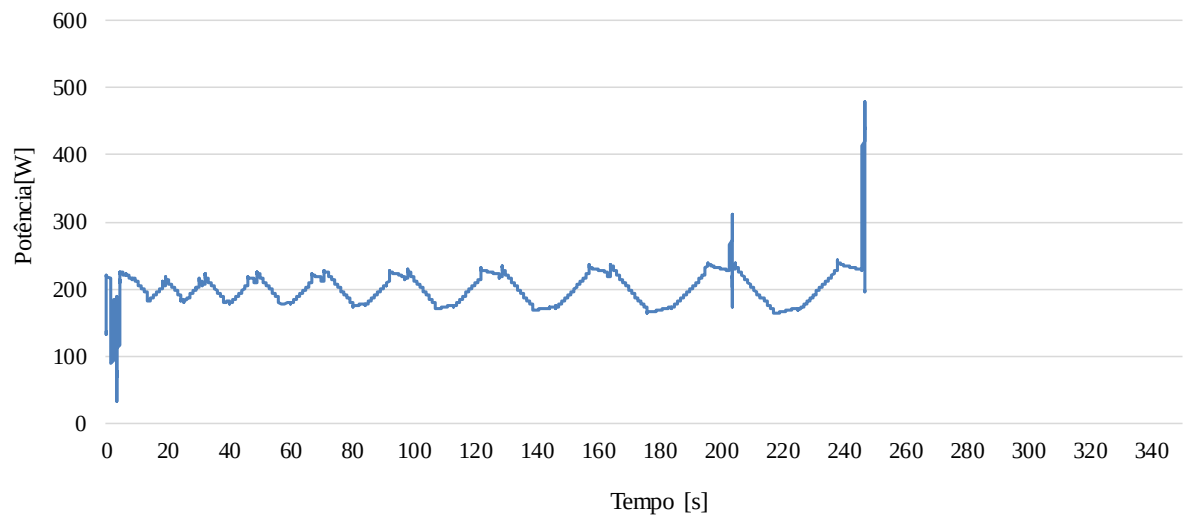
Estratégia 1



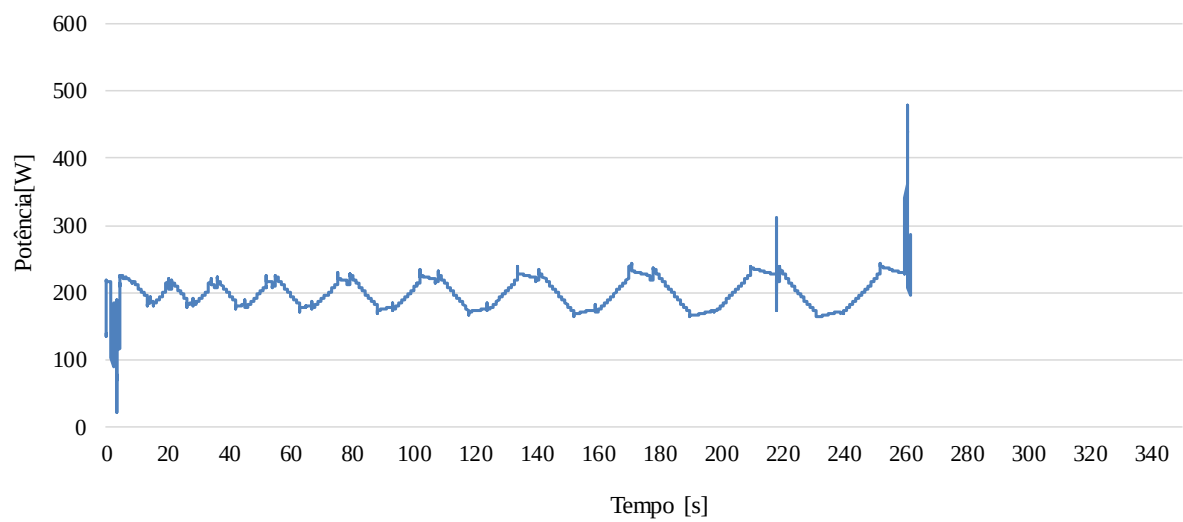
Estratégia 2



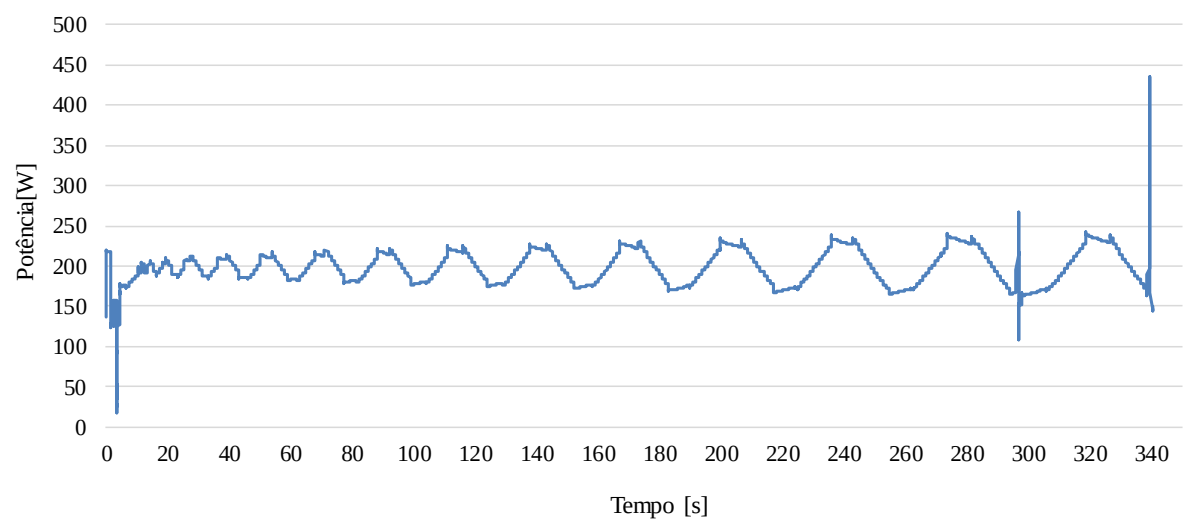
Estratégia 3



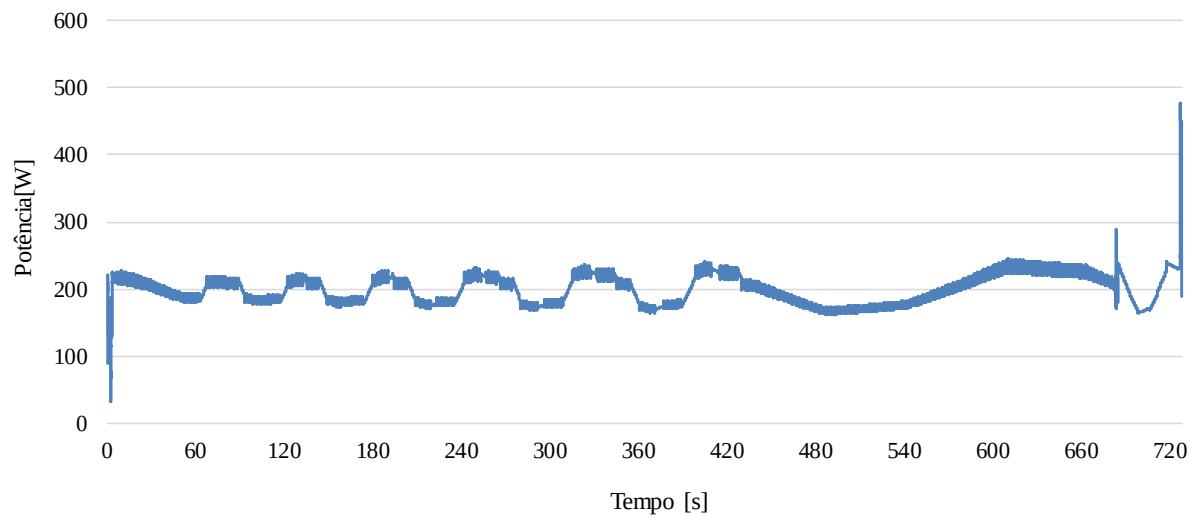
Estratégia 4



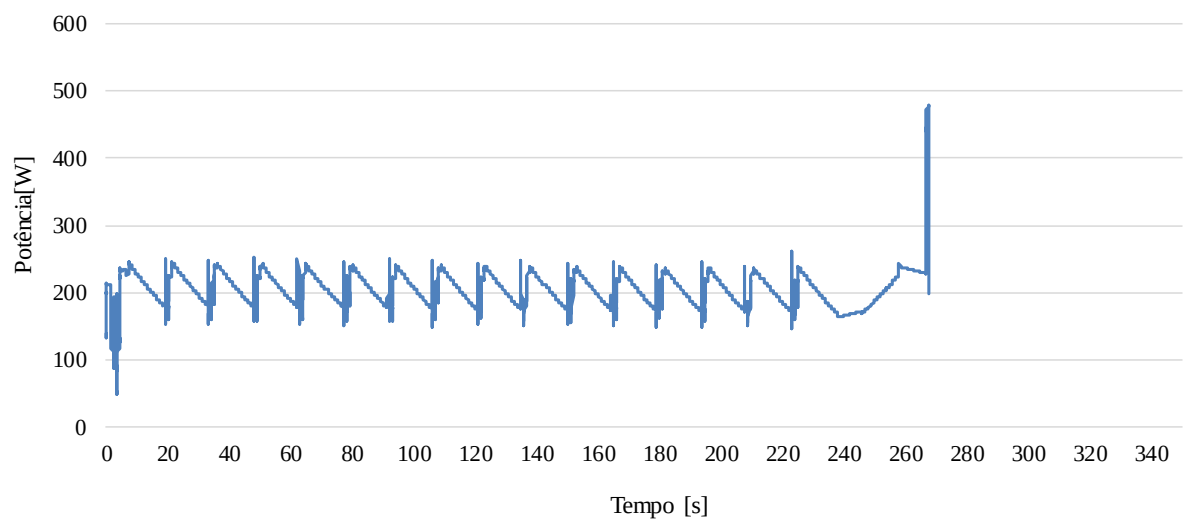
Estratégia 5



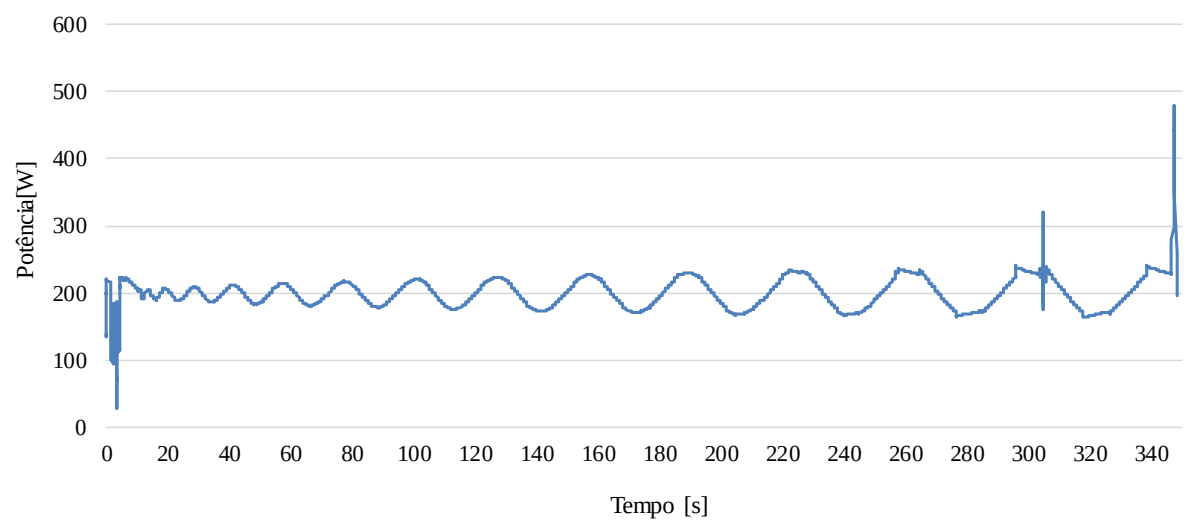
Estratégia 6



Estratégia 7



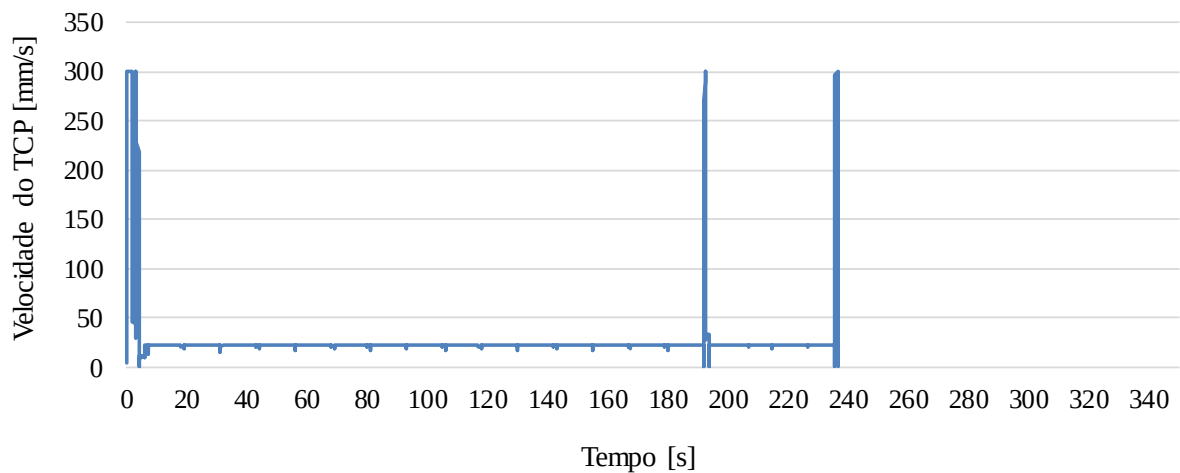
Estratégia 8



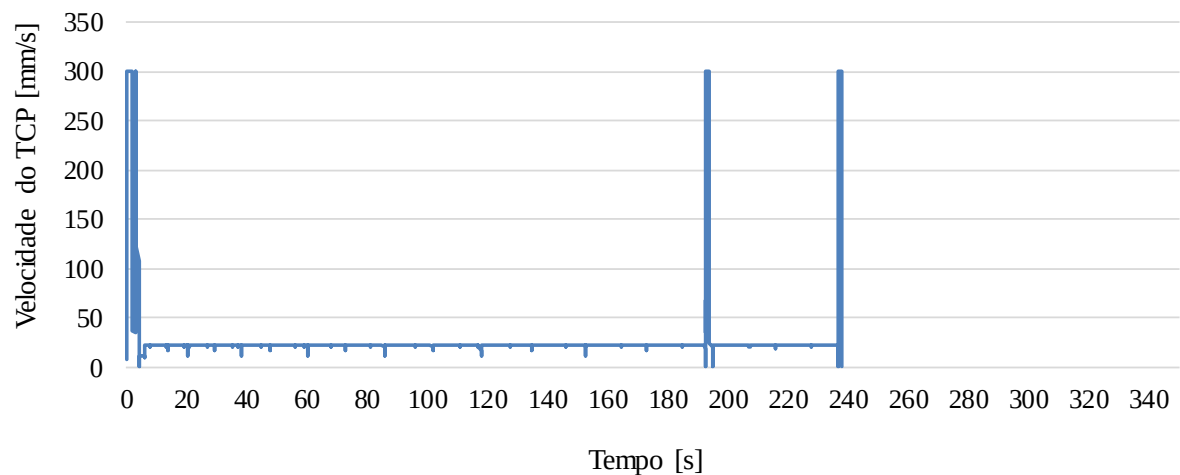
Anexo 3 - Gráficos dos Perfis de Velocidade do TCP

Os gráficos são apresentados com a mesma escala e gama de valores por forma a haver um termo comparativo entre as várias estratégias, com exceção da estratégia 6, cuja gama de tempo se estende até uma ordem de 1000s.

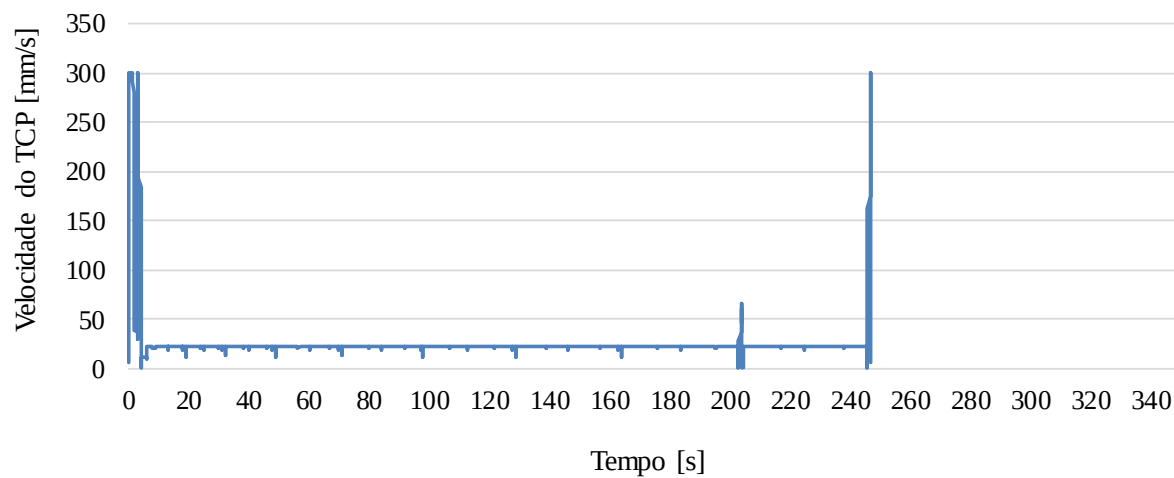
Estratégia 1



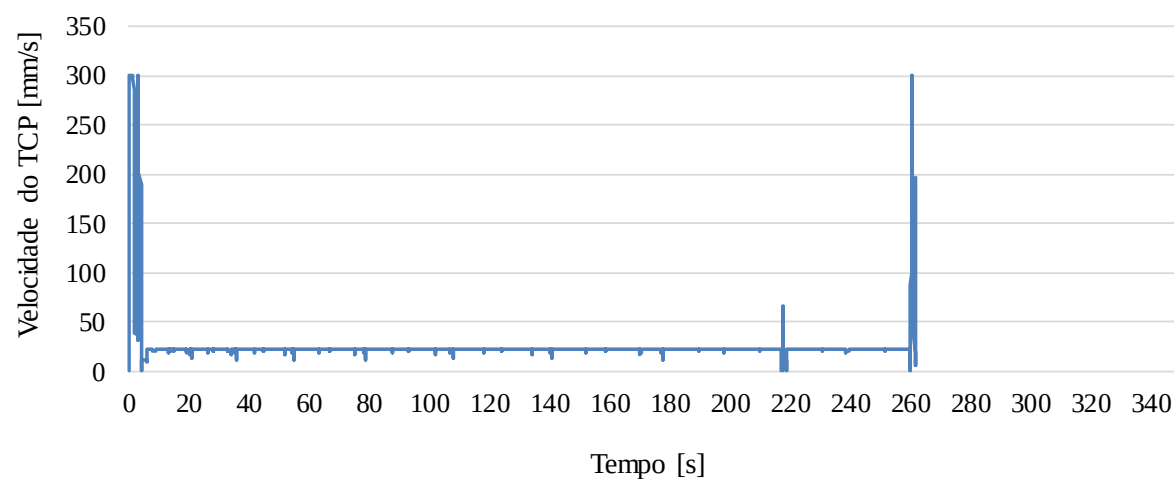
Estratégia 2



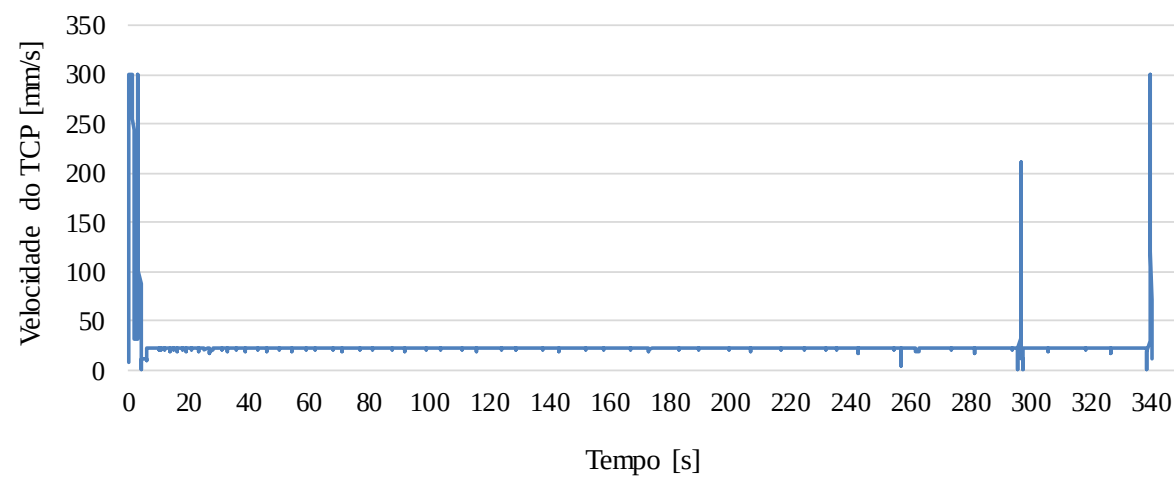
Estratégia 3



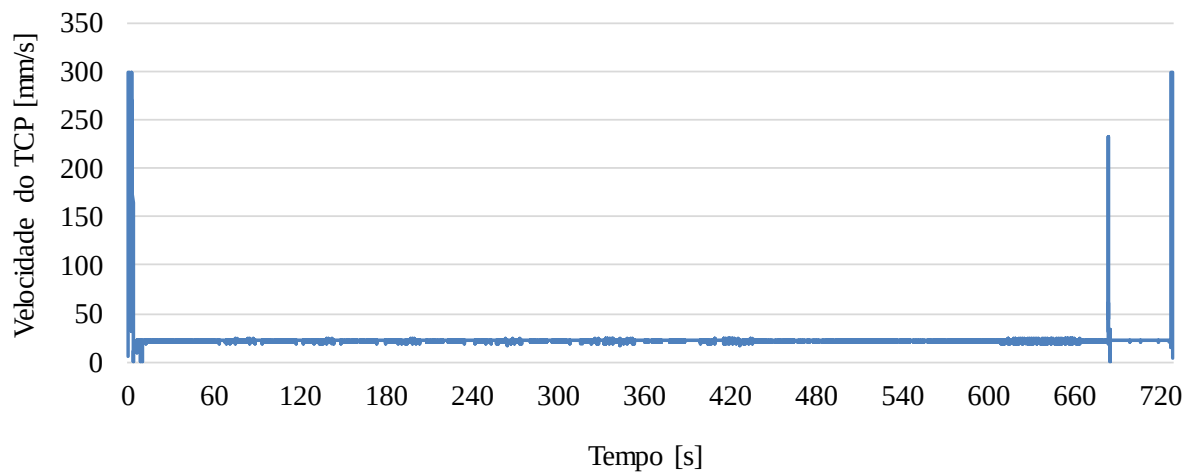
Estratégia 4



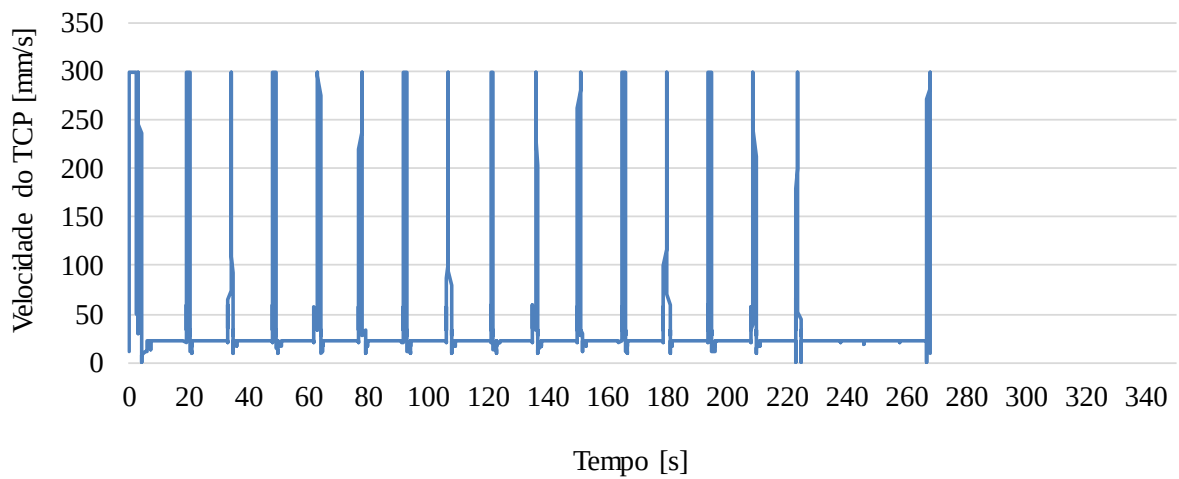
Estratégia 5



Estratégia 6



Estratégia 7



Estratégia 8

