

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE  
FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL**

**Mauricio Rodrigues Policena**

**PROJETO PRELIMINAR DE UMA MÁQUINA DE SERRA DE FITA  
AUTOMÁTICA PARA CORTE DE PLACAS VISANDO  
À INDÚSTRIA 4.0**

Passo Fundo

2016

**Mauricio Rodrigues Policena**

**PROJETO PRELIMINAR DE UMA MÁQUINA DE SERRA DE FITA  
AUTOMÁTICA PARA CORTE DE PLACAS VISANDO  
À INDÚSTRIA 4.0**

Orientador: Prof. Dr. Nilson Luiz Maziero

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo, dezembro de 2016.

**PROJETO PRELIMINAR DE UMA MÁQUINA DE SERRA DE FITA  
AUTOMÁTICA PARA CORTE DE PLACAS VISANDO  
À INDÚSTRIA 4.0**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 05 de dezembro de 2016.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Nilson Luiz Maziero  
Orientador

Professor Doutor José Renê Freitas Gassen  
Instituto Federal Sul-rio-grandense - IFSUL

Professor Doutor Luiz Airton Consalter  
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Márcio Walber  
Universidade de Passo Fundo

*Aos meus pais, João Célio (in memoriam) e  
Olila, minha amada Cássia e meu filho  
Henrique*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me inspirar nos momentos que encontrei dificuldades.

Aos meus pais João Célio (*in memoriam*) e Olila, pela vida, perseverança e pelos ensinamentos.

Ao meu filho Henrique por me recolocar no caminho dos estudos.

A minha companheira Cássia pela paciência, carinho, apoio, auxílio e amor incondicional nos momentos mais difíceis dessa jornada.

Ao meu orientador professor Dr. Nilson Luiz Maziero, pela orientação, paciência e sabedoria no desenvolvimento desse trabalho.

A meus colegas e professores do Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação, pelos conhecimentos compartilhados durante o curso de Mestrado.

A meus colegas do Instituto Federal Sul-rio-grandense pelo auxílio e sugestões no decorrer dessa caminhada.

A banca examinadora composta pelos professores Dr. José Renê Freitas Gassen, Dr. Luiz Airton Consalter, Dr. Márcio Walber e Dr. Nilson Luiz Maziero, pelas contribuições, considerações e sugestões.

Ao professor Me. Cláudio André Lopes de Oliveira pela presteza, amparo e esclarecimentos. Sou muito grato pela contribuição.

Enfim, agradeço a todos que, de certa forma, ajudaram na realização deste trabalho.

*Que Deus me dê serenidade para aceitar as coisas que não posso mudar, coragem para mudar as que posso e sabedoria para distinguir entre elas.*

*Reinhold Niebuhr.*

## RESUMO

O presente trabalho trata do processo de corte de chapas planas; ele estuda e propõe uma alternativa de projeto para uma serra de fita CNC com capacidade para o corte reto e curvo de madeira e derivados, polímeros e acrílico. O objetivo do trabalho é obter o projeto preliminar de uma serra de fita com sistemas automáticos de controle e acionamento. Para o desenvolvimento utilizou-se a metodologia de projeto dos autores Pahl e Beitz que é composta por quatro fases. Organizado em especificação do projeto, projeto conceitual, anteprojecto e projeto detalhado, o trabalho apresenta uma máquina gerenciada por *software* composta, basicamente, por volantes, lâmina de serra, eixos, sistema de torção da lâmina e giro de mesa; ainda sugere exemplos de programação para serrar placas. Como resultado, obteve-se o conceito de uma máquina para corte de chapas que vem ao encontro da quarta revolução industrial e da assim denominada Indústria 4.0, que é compreendida basicamente por: digitalização, integração de sistemas e utilização de informações em tempo real. Na serra de fita CNC, há possibilidade para entrada de dados sobre material, ferramenta e processo, que ocorrem por intermédio das telas do *software* de gerenciamento; e o modelamento matemático possibilita um autodiagnóstico do equipamento durante a operação.

*Palavras-chave: Projeto preliminar. Corte de placas. Serra de fita CNC. Indústria 4.0.*

## ABSTRACT

The present work addresses the process of cutting flat plates; it studies and proposes a project alternative for a CNC band saw with the ability to cut straight and curve wood and wood products, polymers, and acrylic. The objective of the study is get the preliminary project of a band saw with automatic systems for control and drive. For the development, the Pahl and Beitz authors' design methodology was used, which is composed of four phases. Organized in design specification, conceptual design, preliminary design and detailed design, the work presents a software-driven machine, made of steering wheels, saw blade, shafts, torsion system, and turntable; yet suggests programming examples for sawing boards. As a result, the concept of a machine for cutting plates was obtained, matching the concepts of the fourth industrial revolution and the so-called Industry 4.0, which is basically comprised of: scanning, system integration and use of information in real time. In the CNC band saw, there is a possibility for data entry on material, tool and process, which occur through the management software screens; and the mathematical modeling allows a self-diagnosis of the equipment during operation.

*Keywords: Preliminary project. Cutting of plates. CNC band saw. Industry 4.0.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fases de desenvolvimento do projeto. ....	23
Figura 2 – Funil de decisões, com redução progressiva dos riscos. ....	24
Figura 3 - Procedimento geral para o desenvolvimento do projeto.....	25
Figura 4 – Constituição formal de uma lista de requisitos. ....	25
Figura 5 – Linha mestra com lista de características principais. ....	26
Figura 6 – Formação de uma estrutura de função pela subdivisão de uma função global em subfunções. ....	26
Figura 7 – Constituição básica de um esquema classificatório com subfunções de uma função global e suas respectivas soluções. ....	27
Figura 8 – Árvore de objetivos. ....	28
Figura 9 – Etapas de trabalho principais no anteprojeto. ....	29
Figura 10 – Componentes de uma máquina de fita vertical. ....	30
Figura 11 – Cortes retos realizados em serras de fita: a) prancha áspera; b) prancha acabada. ....	31
Figura 12 – Cortes retos realizados em serras de fita: a) detalhes marcenaria; b) desdobro de tábuas. ....	31
Figura 13 – Cortes curvos realizados em serras de fita: a) placas finas; b) placas de maior espessura; c) geometrias complexas para artesanato. ....	32
Figura 14 – Cortes de toras: a) concavidades em madeira verde; b) transformação de troncos em placas. ....	32
Figura 15 – Primeira serra de fita. ....	33
Figura 16 – Serra de fita com controle numérico por teclado. ....	33
Figura 17 – Serra de fita com método de serrar programável. ....	34
Figura 18 – Serra de fita para corte de peças em forma de barra. ....	35
Figura 19 – Geometria de um dente de serra. ....	36
Figura 20 – Componentes de uma lâmina de serra. ....	36
Figura 21 - Largura lâminas estreitas x Raio de corte. ....	37
Figura 22 – Perfis de dentes para lâminas estreitas. ....	38
Figura 23 – Formas de travamento dos dentes em lâminas de serras. ....	39
Figura 24 – Geometria de um dente de serra. ....	39
Figura 25 – Esforços no corte perpendicular às fibras da madeira. ....	41
Figura 26 – Serra de fita da Centauro. ....	42

Figura 27 – Serra fita da Fulpow. ....	42
Figura 28 – Serra de fita da Warsaw. ....	43
Figura 29 – Robô para corte de placas. ....	43
Figura 30 – Esquema de funcionamento máquina CNC. ....	44
Figura 31 – Eixos ortogonais primários e de rotação. ....	45
Figura 32 – Principais partes de um servomotor. ....	46
Figura 33 – Encoder incremental. ....	46
Figura 34 – Encoder absoluto. ....	47
Figura 35 – Ponto zero peça (PZP). ....	47
Figura 36 – Programação por coordenadas absolutas. ....	48
Figura 37 – Programação por coordenadas incrementais. ....	48
Figura 38 – Fluxograma do trabalho. ....	55
Figura 39 – Linha mestra do projeto. ....	56
Figura 40 – Representação da placa e da lâmina vistas de cima: a) corte reto; b) corte curvo; c) corte misto. ....	57
Figura 41 – Eixos direcionais padronizados. ....	59
Figura 42 – Eixos direcionais do equipamento. ....	59
Figura 43 – Sistema de eixos. ....	59
Figura 44 – Corte reto e em curva através do giro da lâmina. ....	60
Figura 45 – Corte reto com mudança de trajetória em um quarto de círculo. ....	61
Figura 46 – Corte com giro simultâneo da lâmina e da mesa. ....	61
Figura 47 – Movimentos da lâmina e da mesa. ....	62
Figura 48 – Função global. ....	65
Figura 49 – Desmembramento das funções principais. ....	65
Figura 50 – Variante de solução V1. ....	71
Figura 51 – Variante de solução V2. ....	72
Figura 52 – Organograma dos objetivos. ....	73
Figura 53 – Perspectiva frente e lateral da serra de fita. ....	76
Figura 54 – Perspectiva lateral e parte posterior da serra de fita. ....	76
Figura 55 – Eixos da máquina. ....	77
Figura 56 – Detalhamento guias lineares da máquina. ....	78
Figura 57 – Ponto zero da peça. ....	78
Figura 58 – Sistema de esticamento da lâmina. ....	79
Figura 59 – Medição do deslocamento da lâmina. ....	80

Figura 60 – Fluxograma do sistema de controle e esticamento da lâmina. ....	80
Figura 61 – Dente serrando em trajetória reta e curva de acordo com o giro da lâmina. ....	81
Figura 62 – Sistema de torção da lâmina. ....	82
Figura 63 – Detalhamento mecanismo de giro da lâmina. ....	82
Figura 64 – Dente serrando em trajetória curva com giro da mesa e da lâmina. ....	83
Figura 65 – Sistema de rotação da mesa. ....	84
Figura 66 – Sistema de rotação da lâmina e da mesa. ....	84
Figura 67 – Acionamento dos eixos X e Z. ....	85
Figura 68 – Diagrama de funcionamento da serra de fita automática. ....	86
Figura 69 – Perspectiva, vistas e detalhes da serra de fita automática. ....	87
Figura 70 – Tela inicial do <i>software</i> . ....	88
Figura 71 – Menu SERRA FITA CNC. ....	88
Figura 72 – Opção SOBRE do Menu SERRA FITA CNC. ....	89
Figura 73 – Menu CONFIGURAÇÃO. ....	89
Figura 74 – Sistema de eixos do Menu CONFIGURAÇÃO. ....	90
Figura 75 – Aba Configurações do Menu CONFIGURAÇÕES. ....	90
Figura 76 – Peça a ser cortada considerando a torção da lâmina. ....	91
Figura 77 – Início do corte com lâmina na posição P1. ....	93
Figura 78 – Corte entre a posição P1 e P2. ....	94
Figura 79 – Corte entre a posição P2 e P3. ....	94
Figura 80 – Corte entre a posição P3 e P4. ....	95
Figura 81 – Corte entre a posição P4 e P5. ....	95
Figura 82 – Corte entre a posição P5 e P6. ....	96
Figura 83 – Peça a ser cortada considerando o giro da mesa. ....	96
Figura 84 – Início do corte com giro da mesa na posição P1. ....	97
Figura 85 – Corte entre a posição P1 e P2, com giro da mesa. ....	98
Figura 86 – Corte entre a posição P2 e P3, com giro da mesa. ....	98
Figura 87 – Corte entre a posição P3 e P4, com giro da mesa. ....	99
Figura 88 – Corte entre a posição P4 e P5, com giro da mesa. ....	99
Figura 89 – Corte entre a posição P5 e P6, com giro da mesa. ....	100
Figura 90 – Peça a ser cortada considerando torção da lâmina e giro da mesa. ....	100
Figura 91 – Posicionamento da peça para iniciar o corte na posição P1. ....	101
Figura 92 – Corte reto até a posição P2. ....	102
Figura 93 – Corte em curva até a posição P3, com torção máxima da lâmina. ....	102

Figura 94 – Corte em curva até a posição P4, torção máxima da lâmina e giro da mesa. ....	103
Figura 95 – Corte em curva até a posição P5, lâmina e mesa retornam a posição zero. ....	103
Figura 96 – Corte reto até a posição P6. ....	104
Figura 97 – Forças: a) estrutura; b) na lâmina. ....	105
Figura 98 – Força de avanço na mesa. ....	108
Figura 99 – Força de avanço na mesa para corte curvo. ....	108
Figura 100 – Força de avanço sobre os rolamentos. ....	109
Figura 101 – Forças e momentos atuantes na fixação da placa. ....	110
Figura 102 – Forças atuantes nas guias. ....	111
Figura 103 – Forças atuantes no volante superior. ....	111
Figura 104 – Forças atuantes no volante inferior. ....	112
Figura 105 – Torque atuante na lâmina. ....	113
Figura 106 – Velocidade de avanço no eixo Z. ....	114
Figura 107 – Decomposição da velocidade de avanço nos eixos. ....	115
Figura 108 – Relação entre a velocidade de avanço e o raio de curvatura. ....	116
Figura 109 – Pontos na lâmina tangentes à curvatura. ....	116
Figura 110 – Elementos da lâmina. ....	117
Figura 111 – Curvatura tangente à lateral interna da lâmina. ....	118
Figura 112 – Deslocamento entre dois pontos e raio de curvatura. ....	118
Figura 113 – Deslocamento entre 2 pontos em relação ao eixo Z. ....	119
Figura 114 – Esquema sistema de giro da mesa. ....	120
Figura 115 – Determinação do ângulo sistema de torção da lâmina. ....	120
Figura 116 – Ângulo para sistema coroa e sem-fim da lâmina. ....	121
Figura 117 – Arco formado pelos pontos P1 e P2. ....	122
Figura 118 – Esquema de movimentação no eixo Z. ....	122
Figura 119 – Inércia do sistema de torção da lâmina. ....	124

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de requisitos do projeto.....	58
Tabela 2 – Resultado do processo de abstração. ....	64
Tabela 3 – Matriz morfológica das possíveis soluções. ....	66
Tabela 4 – Avaliação das possíveis soluções. ....	69
Tabela 5 – Seleção das possíveis variantes de soluções.....	70
Tabela 6 – Esquema de avaliação para atribuição de valores.....	74
Tabela 7 – Avaliação das variantes V1 e V2.....	75
Tabela 8 – Programa para cortar a trajetória. ....	92
Tabela 9 – Programa para cortar a trajetória considerando o giro da mesa.....	97
Tabela 10 – Programa para cortar a trajetória considerando torção da lâmina e giro da mesa. .....	101
Tabela 11 – Comparação de equações para determinar o raio de curvatura a ser cortado. ....	118

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Desenho Auxiliado por Computador
CAE	Engenharia Assistida por Computador
CAM	Manufatura Assistida por Computador
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CLP	Controlador Lógico Programável
DIN	Deutsches Institut für Normung
IHM	Interface Homem Máquina
PDP	Projeto e Desenvolvimento de Produtos
PZP	Ponto Zero Peça
QR CODE	Código de Resposta Rápido
RFID	Identificação por Radiofrequência
US	United States
USPTO	United States Patent and Trademark Office

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\theta$	Eixo de giro
$\gamma_f$	Ângulo de saída da ferramenta
$\alpha_f$	Ângulo de folga da ferramenta
$\beta_f$	Ângulo de cunha da ferramenta
$D_v$	Diâmetro dos volantes
$e$	Espessura da lâmina
$F_c$	Força de corte
$F_a$	Força de avanço
$h$	Espessura do cavaco
$j$	Critério
$k$	Espessura de corte
$n$	Número de revoluções por minuto do volante motor
$Owv_j$	Valor Global
$p$	Passo
$R$	Força resultante
$s$	Folga lateral
$V_c$	Velocidade de corte
$V_f$	Velocidade de avanço
$V_{ij}$	Subvalor da variante $i$ em relação ao critério $j$
$V_{max}$	Valor máximo de todas as variantes
$W_i$	Peso $i$ do critério $j$
$X_i$	Valor global segundo o valor máximo
$Gw$	Valor global
$Gwg$	Valor global ponderado

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Justificativa.....	18
1.2	Metodologia da pesquisa .....	19
1.3	Objetivos do trabalho .....	19
1.3.1	Objetivo geral .....	20
1.3.2	Objetivos específicos: .....	20
1.4	Estrutura do trabalho .....	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1	Metodologias projetuais para desenvolvimento de produtos .....	21
2.1.1	Metodologia projetual proposta por Back (2008).....	22
2.1.2	Metodologia projetual proposta por Mike Baxter (2011).....	23
2.1.3	Metodologia projetual proposta por Pahl e Beitz (2013).....	24
2.2	Máquinas de corte com lâmina de serra de fita .....	30
2.2.1	Operações realizadas em serras de fita verticais.....	31
2.2.2	Principais patentes de serra de fita.....	32
2.3	Lâmina de serra .....	35
2.3.1	Geometria da cunha cortante .....	35
2.3.2	Elementos para escolha da lâmina .....	37
2.3.3	Parâmetros de corte.....	40
2.4	Fabricantes de serras fitas automatizadas.....	41
2.5	Princípios de CNC .....	43
2.5.1	Eixos em máquinas CNC.....	45
2.5.2	Servomotores .....	45
2.5.3	Princípios de Programação CNC. ....	48
2.5.4	Trabalhos na Literatura .....	49
2.5.5	Indústria 4.0 .....	52
3	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	55
3.1	Etapas do trabalho .....	55
3.2	Especificação do projeto (1ª fase) .....	56
3.2.1	Delimitação do projeto.....	57
3.2.2	Lista de requisitos .....	57
3.3	Projeto conceitual (2ª fase).....	63

3.3.1	Abstração e elaboração da estrutura de funções .....	63
3.3.2	Combinações dos princípios de funcionamento .....	66
3.3.3	Concretização das variantes de solução .....	71
3.3.4	Análise quantitativa das variantes .....	72
3.4	Anteprojeto (3ª fase) .....	75
3.4.1	Sistema de eixos .....	77
3.4.2	Sistema de esticamento .....	79
3.4.3	Sistema de torção da lâmina .....	81
3.4.4	Sistema de rotação da mesa .....	83
3.4.5	Sistema de controle: definição das trajetórias e método de controle dos motores .....	85
3.5	Projeto detalhado (4ª fase) .....	86
3.6	Concepção do software de gerenciamento da máquina – Serra Fita CNC .....	88
3.7	Exemplo de programação .....	91
4	MODELOS MATEMÁTICOS PARA A AUTOMAÇÃO DA MÁQUINA .....	105
4.1.1	Força de esticamento da serra .....	105
4.1.2	Análise de forças de corte e potência .....	106
4.1.3	Torque de avanço da mesa .....	108
4.1.4	Velocidade do motor de acionamento .....	112
4.1.5	Rotação da lâmina ( $n_L$ ) quando da torção .....	115
4.1.6	Rotação da mesa com a torção da lâmina .....	118
4.1.7	Análise da mesa em movimento de rotação .....	122
4.1.8	Análise no eixo Z com relação à dinâmica .....	122
4.1.9	Movimento do acionamento da torção da lâmina .....	124
5	APLICANDO O CONCEITO DE INDÚSTRIA 4.0 À CONCEPÇÃO .....	126
5.1.1	Autodiagnóstico .....	126
5.1.2	Autoprogramação .....	127
5.1.3	Comunicação .....	128
5.1.4	Máquinas inteligentes .....	128
6	CONCLUSÃO .....	130
6.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	131
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	132
	APÊNDICE A – Telas do <i>software</i> supervisorio .....	137
	APÊNDICE B – Exemplo numérico utilizando variáveis de processo .....	144

## 1 INTRODUÇÃO

Com o advento do computador, muitas máquinas de acionamento manual foram automatizadas com o uso do CNC, surgindo, assim, um novo grupo de máquinas para vários setores produtivos. É o caso dos tornos e centros de usinagens, das dobradeiras, máquinas de corte a laser, máquinas de eletroerosão, fresadoras para madeira, dentre outras. Atualmente ainda há espaço para o desenvolvimento de máquinas com controle numérico computadorizado (CNC). De acordo com Ludwig et al. (2013), a chegada de tais equipamentos no setor moveleiro ocorreu a partir de 1995; os autores mencionam que em 2011, o setor produziu 1,75% da receita total líquida da indústria de transformação brasileira o que corresponde a R\$ 35,1 bilhões.

Chapas planas de materiais como madeira, acrílico e polímeros são utilizadas em diversos setores. O corte das mesmas pode ser realizado por processos como laser, com o uso de serra circular e fresas; essas máquinas, porém, apresentam algumas limitações. A serra circular permite apenas o corte em linha reta da borda da peça e gera grande quantidade de resíduo e significativa perda de material. Esta perda pode ser reduzida no caso de uma fresadora com ferramenta de pequeno diâmetro, no entanto, devido à menor rigidez aumenta a possibilidade de quebra da mesma. O laser, por sua vez, pode queimar e escurecer as superfícies.

O uso de serras de fita para o corte de peças a partir de placas possui grande aplicação. Por serem máquinas de construção mais simples, já disponíveis no mercado, este tipo de processo permite o corte de peças com contornos variáveis. Através do uso de serras de fita, é possível efetuar o corte de peças de grande espessura, que os outros processos não permitem.

No mercado brasileiro, até o momento, não foi identificado nenhum fabricante de serra de fita CNC, o que abre espaço para este estudo. A proposta deste trabalho é desenvolver a concepção de uma máquina que opere nas condições de uma serra de fita com sistemas de comando e controle CNC, desenvolver o conceito e as definições dos sistemas funcionais mecânicos envolvidos. Para tanto, serão definidos e avaliados os dispositivos de acionamento e movimentação, as restrições das serras de fita, a dependência dos sistemas, a cinemática dos acionamentos e o processo.

### 1.1 Justificativa

Peças com contorno em linha reta ou curvas, quando serradas com lâmina de fita geram menor quantidade de serragem, pois as dimensões do corte são menores quando

comparados a outros processos. A concepção da máquina tem em seu horizonte o conceito da Indústria 4.0, como no monitoramento da força de esticamento e análise dos parâmetros de corte.

Com o corte de superfícies em raio permitido pelas serras de fita automáticas, operações em serras circulares e fresamentos seriam diminuídas, reduzindo a quantidade de resíduo gerado, minimizando o tempo de fabricação de peças do setor moveleiro, além de substituir máquinas em determinadas tarefas.

## **1.2 Metodologia da pesquisa**

O trabalho inicia com a revisão bibliográfica que visa estruturar e contribuir com o desenvolvimento dando suporte às escolhas.

No desenvolvimento do trabalho utilizou-se a metodologia proposta por Pahl et al. (2013) que é composta de quatro fases: especificação do produto, projeto conceitual, anteprojetado e projeto detalhado.

Na especificação do produto elencam-se características que o equipamento deva ter e elabora-se uma lista com requisitos de acordo com a linha mestra. No projeto conceitual utiliza-se da abstração para esclarecer o problema de projeto e chegar à estrutura de funções; buscam-se princípios de funcionamento; listam-se as variantes de solução e faz-se a análise das mesmas; a mais adequada passa para fase seguinte;

Na fase de anteprojetado são expostos os desenhos dos componentes e montagens. Explanções em relação aos princípios de funcionamento e suas relações. Na última fase são apresentadas as principais medidas, dimensões da estrutura e detalhes.

O desenvolvimento é completado com a proposição de telas para um *software* de gerenciamento do equipamento, exemplos da programação para o corte de trajetórias e modelamento matemático. Tais itens reforçam a serra de fita CNC ao conceito da Indústria 4.0.

## **1.3 Objetivos do trabalho**

A seguir são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos, que buscam ser alcançados na proposição do trabalho.

### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral consiste em obter o projeto preliminar de uma serra de fita automática para corte de chapas planas, com a utilização de comando CNC.

### 1.3.2 Objetivos específicos:

Os objetivos específicos são:

- Obter a forma construtiva e funcional da máquina;
- Utilizar metodologia de projeto;
- Definir os dispositivos envolvidos nas diversas operações;
- Obter o anteprojeto com as principais especificações da máquina;
- Adequar a concepção no contexto da Indústria 4.0.

## 1.4 Estrutura do trabalho

No primeiro capítulo, tem-se a introdução, justificativa, objetivo geral e objetivos específicos e metodologia a ser utilizada.

No segundo, faz-se uma revisão bibliográfica sobre: algumas metodologias projetuais; o estado da arte de máquinas que utilizam serra de fita para o corte de madeira; patentes sobre equipamentos similares; características da lâmina de serra; fabricantes de serras CNC; princípios de CNC e programação; trabalhos na Literatura que abordem máquinas CNC; a chegada da Indústria 4.0 finaliza a revisão.

No terceiro é apresentado o desenvolvimento com as quatro fases da metodologia de projeto.

No quarto, o modelamento matemático com equações para análise de dados operacionais e parâmetros de corte, os quais podem ser executados em programas computacionais específicos.

No quinto, são tecidos comentários e análises do equipamento diante da industrialização virtual, que deve ser realidade em um futuro próximo.

No sexto, têm-se as conclusões do estudo e as sugestões para trabalhos futuros.

No Apêndice A são apresentadas algumas telas do *software* de gerenciamento e controle com comentários sobre configurações do equipamento, dados do material a ser serrado e da lâmina de serra.

No Apêndice B é apresentado um exemplo numérico do modelamento matemático.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo abordam-se, sinteticamente: as metodologias projetuais de Back et al. (2008), Baxter (2011) e Pahl & Beitz (2013); as máquinas para cortar madeira e seus componentes; o estado da arte acerca do desenvolvimento de serras; as características da lâmina de serra; as máquinas automáticas que utilizam serra de fita para corte; princípios de programação CNC; alguns trabalhos sobre equipamentos CNC presentes na Literatura; e apresentação do conceito e contextualização da Indústria 4.0.

### 2.1 Metodologias projetuais para desenvolvimento de produtos

Back et al. (2008) sugerem que a atividade de produção remonta aos primórdios da civilização humana. Produtos eram elaborados diretamente por artesãos antes da Revolução Industrial passando a ser produzidos em maior escala com o surgimento das fábricas.

Para Lövgren (2002), há indícios da aplicação de métodos na solução de problemas e na geração de ideias com Leonardo da Vinci e durante a Segunda Guerra, quando pesquisadores estudavam a organização do pensamento com o intuito de aperfeiçoar processos produtivos e atividades de projeto.

Segundo Araujo (2009), a primeira conferência sobre metodologias de projeto ocorreu em Londres, no ano de 1962, surgindo, assim, o tema como área de estudo e pesquisa. Dada a relevância que o assunto assumiu, surgiram inúmeras literaturas específicas com base em técnicas e metodologias de projeto para concepção e tomada de decisões.

Para Back et al. (2008) todo projeto de engenharia é uma atividade direcionada ao atendimento das necessidades humanas, em especial aquelas que podem ser realizadas por princípios tecnológicos da nossa cultura.

Almeida (2000) relata que nos últimos anos inúmeras metodologias projetuais surgiram devido à importância que o assunto ganhou, principalmente para a implantação de sistemas inteligentes de projeto auxiliado por computador. Metodologias clássicas são basicamente formadas sem consideração de implementações em ambientes computacionais, já as novas metodologias de Projeto Conceitual são propostas de adaptações de algumas metodologias clássicas para transferência em sistemas computacionais.

Pahl et al. (2013) citam que, nesse contexto, métodos de projeto e desenvolvimento de produtos (PDP) buscam despertar as habilidades individuais do projetista, intensificando a capacidade de produção e de invenção, não desvalorizando, porém, a intuição de um projetista

talentoso e experiente. O procedimento metodológico torna o projeto compreensível e passível de ser ensinado à equipe multidisciplinar.

Para Back et al. (2008), planejar um projeto requer a identificação das atividades a serem desenvolvidas, sequência ou simultaneidade dessas atividades, tempos e recursos necessários, responsabilidade pelas atividades, início e conclusão do projeto.

Baxter (2011) aborda que a atividade projetual requer o uso de métodos sistemáticos que definem objetivos de forma clara, precisa, particular e verificável para esclarecimento de um problema específico, sendo que tais requisitos devem ser revistos frequentemente.

De acordo com Pahl et al. (2013), metodologia projetual trata de um procedimento orientado por problemas e que pode ser aplicada em qualquer área do conhecimento, ela incentiva invenções, mas precisa ser compatível com conhecimentos de outras disciplinas, não gerar soluções ao acaso, permitir ajustes para uso no computador, ser fácil de ensinar e aprender. Deve planejar o trabalho orientando os gestores de projeto, com indicações concretas de condutas a serem observadas no desenvolvimento de um produto.

Ao analisarmos metodologias de projeto, notamos certa inclinação de algumas para o *design* do produto. Já outras focam em custos e mercado, enquanto que algumas são indicadas especificamente para projetos técnicos de sistemas mecânicos. Segue uma análise das principais metodologias projetuais utilizadas.

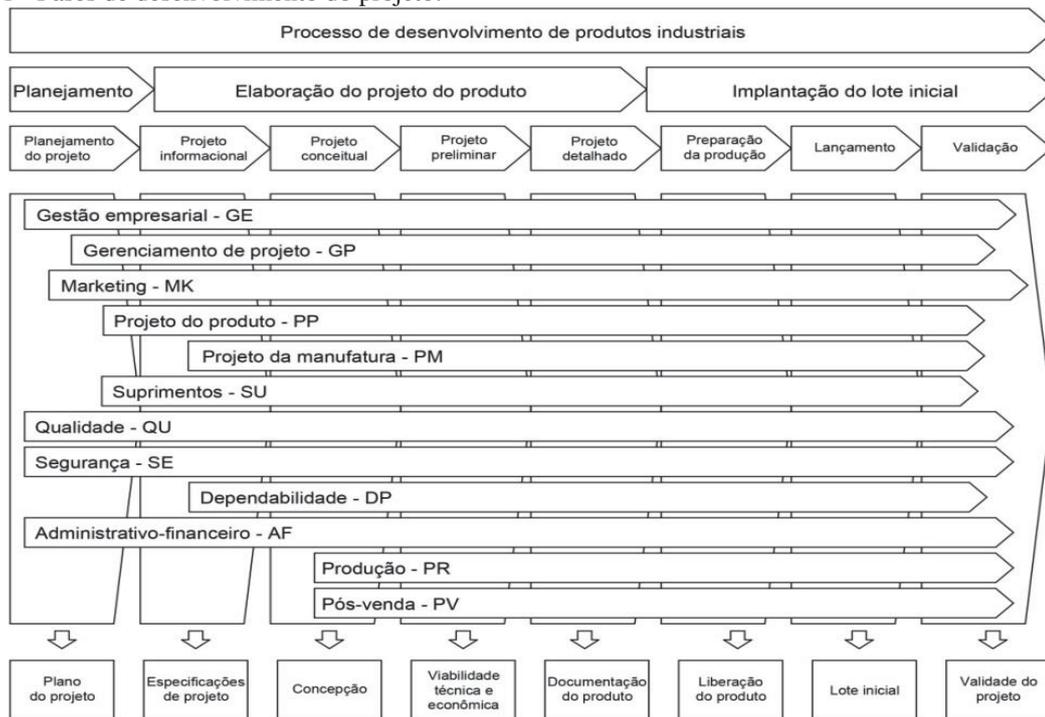
### **2.1.1 Metodologia projetual proposta por Back (2008)**

A metodologia proposta por Back et al. (2008) é apoiada nos princípios da engenharia simultânea e no gerenciamento de projetos. O procedimento adotado por esse autor ocorre de forma integrada. O desenvolvimento do produto é mais detalhado, alcançando do planejamento à validação do produto.

A metodologia compreende três macrofases, decompostas em oito fases no processo de desenvolvimento do produto (Figura 1). Ocorre uma avaliação do resultado obtido no final de cada fase, autorizando, ou não, a passagem para a fase seguinte. As fases são decompostas em atividades, as quais, por sua vez, são desdobradas em tarefas. Possui fases em todos os setores da empresa, o que diminui a probabilidade de fracasso do produto, entretanto, para alguns casos pode ser muito ampla a utilização de todas as fases.

A metodologia de Romano (2013) está alinhada com os princípios e as 8 fases da metodologia de Back, porém é voltada para máquinas e equipamentos agrícolas. Schöffel (2014) utilizou as 5 fases iniciais da metodologia de Romano, na adaptação de uma colhedora de soja, para recolher resíduos oriundos da colheita.

Figura 1 - Fases de desenvolvimento do projeto.



Fonte: Romano *apud* Back et al., 2008.

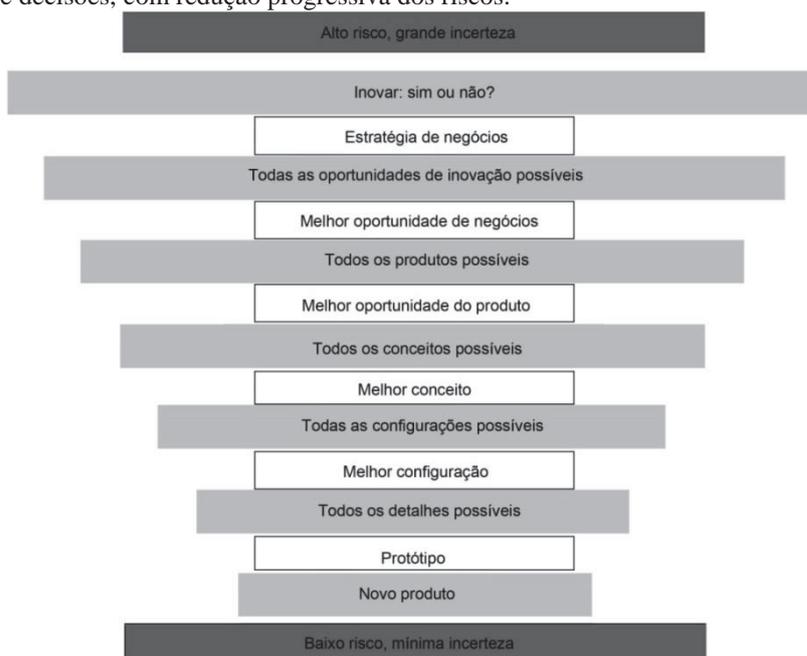
### 2.1.2 Metodologia projetual proposta por Mike Baxter (2011)

A metodologia proposta por Baxter (2011) tem como objetivo desenvolver novos produtos, tomando como referência empresas modernas. Visa a desenvolver tanto o aspecto visual dos produtos, assim como a fabricação, necessidades do mercado, redução de custos, confiabilidade e preocupação com o meio ambiente. Design, ergonomia e antropometria norteiam o desenvolvimento do produto. De acordo com Mello (2011), esta metodologia dá ênfase às questões mercadológicas devido a inovação estar atrelada ao sucesso dos negócios.

Baxter (2011) emprega o funil de decisões (Figura 2) para visualizar as variações do risco e da incerteza. É um processo convergente de tomadas de decisões pelo qual se inicia o desenvolvimento de projeto com alto grau de risco e incerteza, e gradativamente com sua execução, a situação se reverte, passando a apresentar baixo risco e um mínimo grau de incerteza. As formas retangulares sombreadas representam as alternativas possíveis e as formas retangulares vazadas apresentam as decisões durante a seleção de alternativas.

Baxter (2011) enfatiza a geração de conceitos para reduzir o problema do projeto conceitual aos seus elementos básicos, alavancando grande número de alternativas possíveis tendo como base a interação do produto com o usuário.

Figura 2 – Funil de decisões, com redução progressiva dos riscos.



Fonte: Adaptado de Baxter, 2011.

Mello (2011) reitera que a metodologia de Baxter faz uma análise do ciclo de vida visando diminuir a agressão ao meio ambiente, pois considera a entrada de matéria-prima até seu retorno à fábrica. A estrutura do método é fechada enquanto projeto conceitual e projeto detalhado são pouco explorados.

### 2.1.3 Metodologia projetual proposta por Pahl e Beitz (2013)

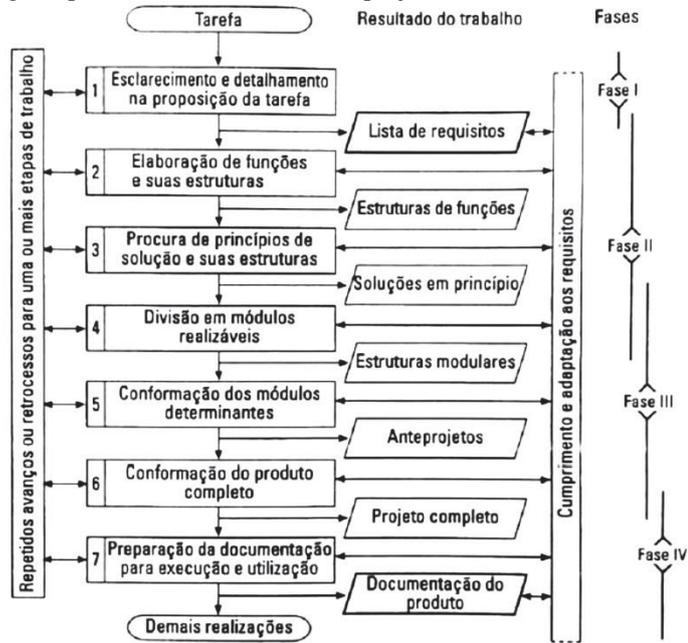
A metodologia projetual proposta por Pahl et al. (2013), reflete a linha de pesquisa alemã na área de projeto de produtos. O desenvolvimento de um projeto se desdobra ao longo de quatro fases principais (Figura 3):

- esclarecimento e definição metódica da tarefa;
- métodos para concepção;
- metodologia para anteprojecto;
- métodos para o detalhamento.

A metodologia proposta por Baxter (2011) foca mais no *design* para produtos novos, a metodologia de Back et al. (2008) é ampla e vislumbra o projeto integrado do produto, desde o ciclo de vida até a validação do produto, já a metodologia utilizada por Pahl et al. (2013) é mais compacta e direcionada ao projeto mecânico, priorizando características ligadas à engenharia envolvida no projeto. Mello (2011) reitera que a metodologia proposta por Pahl et

al. (2013) requer enorme criatividade do projetista e essa capacidade influencia no resultado final do projeto.

Figura 3 - Procedimento geral para o desenvolvimento do projeto.



Fonte: Pahl et al., 2013.

Pahl et al. (2013) caracterizam a primeira fase pela elaboração da lista de requisitos do produto, contendo aspectos relativos à funcionalidade e ao desempenho do produto, além de prazos e custos. Tais requisitos são classificados em necessidades (exigências) e vontades (desejos) norteando a tomada de decisões nas características de um projeto. A Figura 4 indica uma lista de requisitos de um arranjo formal.

Figura 4 – Constituição formal de uma lista de requisitos.

Edição:

Usuário		Lista de requisitos		Identificação	
		para	Projeto	Classificação	folha:
			Produto	pág.:	
Modifi- cação	D/E	Exigências			Requisitos
data de alteração	assinalar se D (desejo) ou E (exigência)	Objeto ou propriedade com indicações da			Equipe de projeto responsável
		Quantidade ou Qualidade			
		Se for o caso, em subsistemas (grupo de funções ou conjuntos ou de subtítulos da diretriz)			
Substitui edição de:					

Fonte: Pahl et al., 2013.

A lista de requisitos é composta por dois estágios: no primeiro, são definidos e documentados os requisitos óbvios; já no segundo, os requisitos são complementados, ou melhor detalhados, sempre que houver necessidade. Para complementar e ampliar os requisitos, utilizam-se dois métodos: o trabalho segundo uma linha mestra, as listas de características principais (Figura 5) e a técnica do cenário, que esquematiza o ciclo de vida de um produto desde sua produção, fases intermediárias e sucateamento.

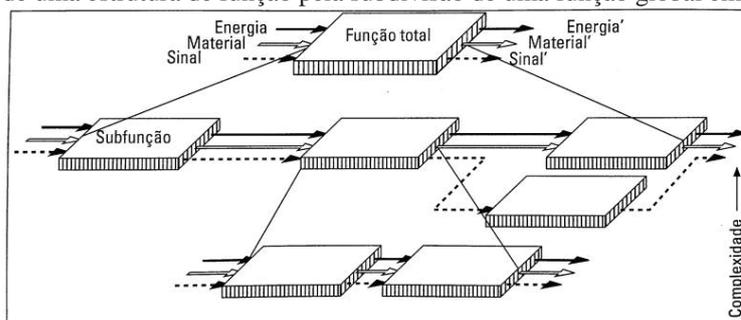
Figura 5 – Linha mestra com lista de características principais.

Característica principal	Exemplos
Geometria	Tamanho, altura, largura, comprimento, diâmetro, demanda de espaço, quantidade, disposição, conexão, supressão e ampliação
Cinemática	Tipo de movimento, direção do movimento, velocidade, aceleração
Forças	Magnitude da força, direção da força, frequência da força, peso, carregamento, deformação, rigidez, propriedades elásticas, estabilidade, ressonância
Energia	Potência, eficiência, perdas por atrito, ventilação, variáveis de estado, como pressão, temperatura, humidade, aquecimento, resfriamento, energia de abastecimento, armazenamento, capacidade, conversão de energia
Matéria	Propriedades físicas e químicas do produto de entrada e saída, material auxiliar, substâncias prescritas (lei de alimentos e semelhantes), fluxo de material e transporte
Sinal	Sinais de entrada e saída, tipo de mostrador, aparelhos para produção e monitoramento, forma do sinal
Segurança	Princípios de segurança diretos, sistemas protetores, segurança industrial, segurança no trabalho, segurança ambiental
Ergonomia	Relação homem-máquina: operação, tipos de operação, disposição clara, iluminação, desenho
Produção	Limitações do local da produção, máxima medida fabricável, processo produtivo preferido, meios de produção, qualidade possível e tolerâncias
Controle de qualidade	Possibilidades de teste e medição, prescrições especiais (TÜV, ASME, DIN, ISO, especificações AD)
Montagem	Prescrições especiais de montagem, montagem, embutimento, montagem do canteiro de obras, bases de equipamentos
Transporte	Limitações através de guinchos, bitola ferroviária, vias de transporte por tamanho e peso, tipo e restrições do transporte
Operação	Baixo ruído, taxa de desgaste, aplicação e domínio de utilização, condições de uso (atmosfera sulfurosa, trópicos)
Manutenção	Livre de revisão ou número e intervalo de tempo entre revisões, inspeção, troca, conserto, pintura, lavagem
Reciclagem	Reaproveitamento, reprocessamento, disposição final, armazenamento
Custos	Máximos custos de fabricação, custo de ferramentas, investimento, amortização
Prazo	Fim do desenvolvimento, plano em rede para etapas intermediárias, prazo de entrega

Fonte: Pahl et al., 2013.

Após o esclarecimento dos problemas por meio da lista de requisitos, parte-se para a segunda fase, a concepção. Inicialmente, faz-se uma abstração a fim de identificar o problema a ser resolvido. A abstração objetiva a inovação e a melhoria do projeto, são buscadas ideias novas com o intuito de chegar ao ponto principal do projeto e identificar a função global e suas condicionantes (Figura 6).

Figura 6 – Formação de uma estrutura de função pela subdivisão de uma função global em subfunções.



Fonte: Pahl et al., 2013.

Para Back (2008), a função global é definida como sendo uma relação entre causa e efeito das grandezas de entrada e saída. Para Pahl et al. (2013), uma função pode ser entendida como uma relação entre entrada e saída do sistema técnico com o propósito de realizar uma determinada tarefa. Em um processo técnico, energia, material e sinal são transferidos e/ou modificados.

Dependendo da complexidade da tarefa a ser solucionada, a função global deve ser desdobrada em subfunções de menor complexidade. Posteriormente à definição da função global, é elaborada uma lista com funções e subfunções a serem desenvolvidas.

Na combinação sistemática de princípios de funcionamento, utiliza-se uma tabela na qual constam, na primeira coluna, a subfunção/funções a serem satisfeitas e, em suas respectivas linhas, os princípios de funcionamentos descobertos. Ao ligar os princípios de funcionamento escolhidos, se obtém uma possível estrutura de funcionamento como solução global (Figura 7).

Figura 7 – Constituição básica de um esquema classificatório com subfunções de uma função global e suas respectivas soluções.



Fonte: Pahl et al., 2013.

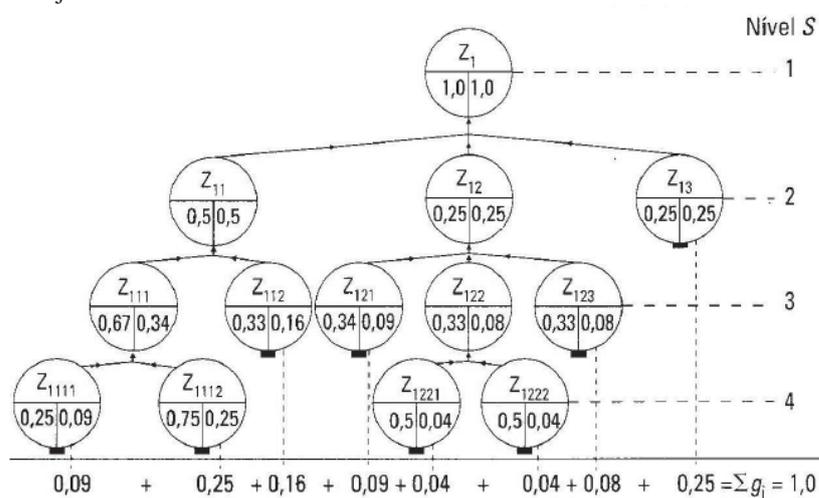
As propostas de variantes de solução elaboradas no desenvolvimento da estrutura de funcionamento não são suficientemente concretas para se tomar uma decisão, porém precisam considerar diretrizes tais como segurança, ergonomia, controle, montagem, transporte, emprego, manutenção, reciclagem e gastos.

Para Pahl (2013), os critérios de avaliação objetivam sequenciar os princípios técnicos que satisfaçam determinadas subfunções. São arbitrados valores absolutos para as variantes e para os critérios. Como resultado, obtém-se uma variante ótima ou uma ordem de preferências hierárquicas de variantes.

Critérios de avaliação são elaborados e sua importância é identificada dentro da função global da solução, com a atribuição de pesos. Na análise de valor ponderam-se os critérios de

0 a 1 ou de 0 a 100 sendo que a soma dos critérios deve ser igual a 1 ou 100. Assim pode-se elaborar uma árvore de metas com os critérios e os valores de ponderação (Figura 8).

Figura 8 – Árvore de objetivos.



Fonte: Pahl et al., 2013.

Na terceira fase da metodologia de Pahl et al. (2013), denominada projeto preliminar ou anteprojecto, é definida a configuração da solução segundo critérios técnicos e econômicos tendo como base a estrutura de funcionamento ou solução básica. O objetivo dessa fase de anteprojecto é que se tenha um projeto suficientemente definido para que possa ser feita uma avaliação final de fatores tais como durabilidade, possibilidade de produção e montagem, características de uso e custeio. De igual modo são considerados aspectos de segurança, produção, montagem, ergonomia, reciclagem, custos e prazos.

Várias tarefas são desenvolvidas simultaneamente, dentre elas tem-se as definições: dos materiais e das dimensões principais do produto, dos processos de manufatura e a complementação das funções auxiliares. Devem ser levados em conta aspectos tecnológicos e econômicos (Figura 9).

O destaque da fase de anteprojecto é que ela não é utilizada exclusivamente no desenvolvimento de produtos novos, podendo ser utilizada na melhoria de produtos, correção de falhas e projeto de produtos derivados de outros já existentes.

Na quarta fase de Pahl et al. (2013), tem-se o detalhamento. É a parte do projeto que tem como objetivo a documentação da estrutura de construção para um objeto técnico através de desenhos de componentes individuais ou para fabricação, desenhos de conjuntos e desenhos completos com listas de peças.

Figura 9 – Etapas de trabalho principais no anteprojecto.



Fonte: Pahl et al., 2013.

O projeto detalhado tem como documentação, estruturas de produto, prescrições de produção, montagem e transporte, bem como manuais de operação. Estas informações conjuntamente com a revisão de possibilidades de produção e os custos finais constituem a documentação do produto e servem de embasamento para sua fabricação.

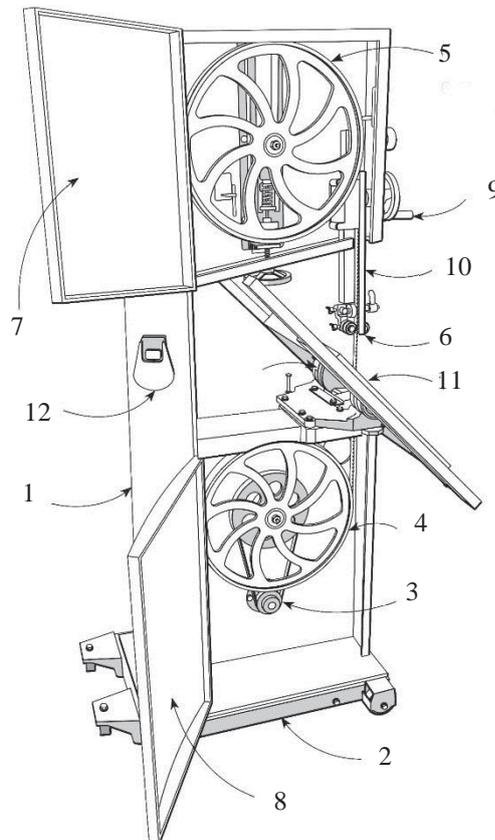
Atualmente, na fase de detalhamento, o emprego de sistemas informatizados é amplamente utilizado através das tecnologias CAD, CAE e CAM. É importante que se tenha conexão informatizada entre os setores envolvidos com a fabricação do produto e que a etapa de detalhamento não seja suprimida a fim mensurar os custos de produção. Assim, evitam-se erros na produção gerando um produto final de qualidade.

## 2.2 Máquinas de corte com lâmina de serra de fita

As serras de fita dividem-se basicamente em verticais, horizontais e inclinadas. Essa classificação é devida à disposição da lâmina de corte. De acordo com Gonçalves (2000), serras verticais possibilitam o corte em reto e em curvas, enquanto serras horizontais são destinadas às operações de corte e desdobro de toras.

Segundo Johnson (2012), o funcionamento e os componentes básicos de uma máquina de fita vertical (Figura 10) são: a estrutura (1) que sustenta os componentes; a base (2) que fica apoiada ao solo e auxilia a estrutura; o motor de acionamento (3) que possui um sistema de transmissão compreendido por polias e correias que transmitem movimento até o volante inferior (4), este é interligado ao volante superior (5) através da lâmina (6); uma porta (7) fecha o compartimento do volante superior e outra porta (8) protege o volante inferior; para esticar a lâmina, tem-se um manípulo (9) que movimenta um sistema com molas e fuso; uma guia regulável (10) ajusta a espessura de corte protegendo a lâmina (4); sobre a mesa (11) que pode ser fixa ou regulável, é depositada a placa para ser cortada; o equipamento dispõe de um botão de emergência (12) para caso ocorra algum imprevisto.

Figura 10 – Componentes de uma máquina de fita vertical.



Fonte: Adaptado de Johnson, 2012.

### 2.2.1 Operações realizadas em serras de fita verticais

Serras de fitas possibilitam realizar o corte reto em pranchas e painéis de variadas espessuras e comprimentos (Figura 11). O corte de pranchas espessas e ásperas (Figura 11-a) pode ser usado para criar painéis, placas e folheados de madeira. Pranchas aplainadas (Figura 11-b) podem ser cortadas em sarrafos e ripas para serem utilizadas em aplicações que requerem acabamento prévio e posterior montagem.

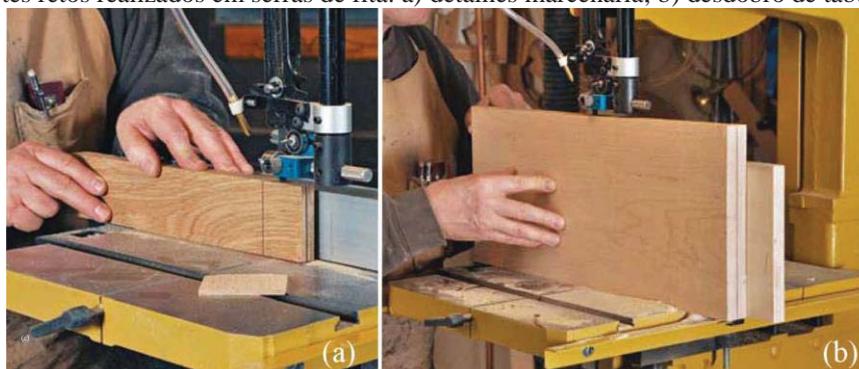
Figura 11 – Cortes retos realizados em serras de fita: a) prancha áspera; b) prancha acabada.



Fonte: Adaptado de Johnson, 2012.

Placas com bom acabamento são serradas para uso em marcenaria, na execução de detalhes e cavidades em móveis, gavetas e janelas (Figura 12-a). Em operações de desdobro, que é a transformação da espessura da madeira em pedaços mais finos (Figura 12-b), são confeccionadas tábuas e portas de utensílios de escritório.

Figura 12 – Cortes retos realizados em serras de fita: a) detalhes marcenaria; b) desdobro de tábuas.

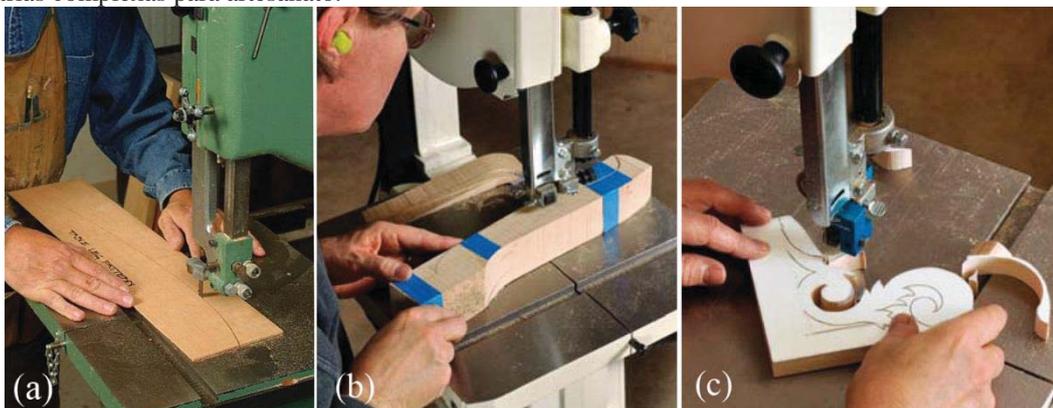


Fonte: Adaptado de Johnson, 2012.

O corte em curva de placas finas (Figura 13-a) ou de maior espessura (Figura 13-b) é empregado na confecção de adornos e geometrias trabalhadas de placas. Peças de artesanato são cortadas com geometrias complexas para adereços e objetos decorativos (Figura 13-c). A

parte comum de todos os cortes curvos é que são feitos manualmente, ou seja, com a presença de um operador com destreza. Apesar da habilidade do mesmo, não se tem garantia de que as peças resultantes fiquem idênticas.

Figura 13 – Cortes curvos realizados em serras de fita: a) placas finas; b) placas de maior espessura; c) geometrias complexas para artesanato.



Fonte: Adaptado de Johnson, 2012.

Em serras de fita vertical também é possível o corte não só de placas, como também de pequenas toras. Podem-se transformar pedaços de madeira verde em bancos, blocos ou superfícies côncavas (Figura 14-a). Com o uso de acessórios pode-se converter pequenos troncos em placas de madeira para pequenos projetos (Figura 14-b).

Figura 14 – Cortes de toras: a) concavidades em madeira verde; b) transformação de troncos em placas.



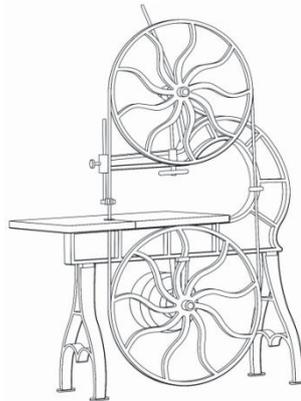
Fonte: Adaptado de Johnson, 2012.

## 2.2.2 Principais patentes de serra de fita

De acordo com Johnson (2012), a mais antiga patente registrada para uma serra de fita foi concedida ao inglês William Newberry em 1809 (Figura 15). A falta de um método eficaz para juntar as extremidades da lâmina resultou em frequentes fracassos. Quase 40 anos se

passaram até que a francesa Anne Paulin Crepin desenvolvesse uma técnica para soldar a lâmina da serra de fita de modo que a mesma pudesse suportar os esforços de serrar e dobrar em volta dos volantes. Ela solicitou uma patente em 1846 e, logo depois, a fabricante A. Perin & Company de Paris, França, comprou os direitos de sua inovação. Combinando método de soldagem de Crepin com novos aços, ligas e técnicas de têmpera avançados, Perin criou a primeira lâmina de serra fita "moderna". Em pouco tempo, a serra de fita tornou-se uma ferramenta central em muitos equipamentos de marcenarias.

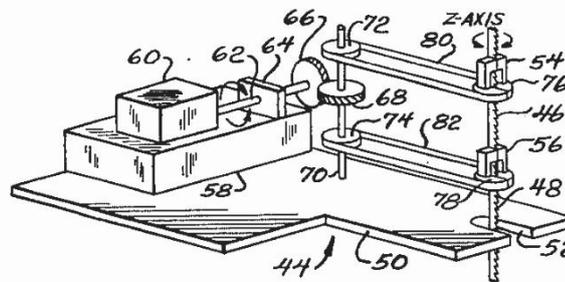
Figura 15 – Primeira serra de fita.



Fonte: Johnson, 2012.

A Agência de Patentes dos Estados Unidos (USPTO) possui alguns registros em seu banco de dados, tais como a patente US 3908723 (Figura 16), de Robert S. Hill e Holly Springs, de 27 de março de 1974. Ela aborda um sistema de giro da serra (46) compreendido por um motor (60) na qual são fixadas engrenagens (66) em seu eixo (70) e movimentam um conjunto de polias inferior (74) e superior (72), com transmissão por correias (80 e 82) até polias superior (76) e inferior (78), ambas com fenda, por onde desliza a lâmina (46) da serra.

Figura 16 – Serra de fita com controle numérico por teclado.

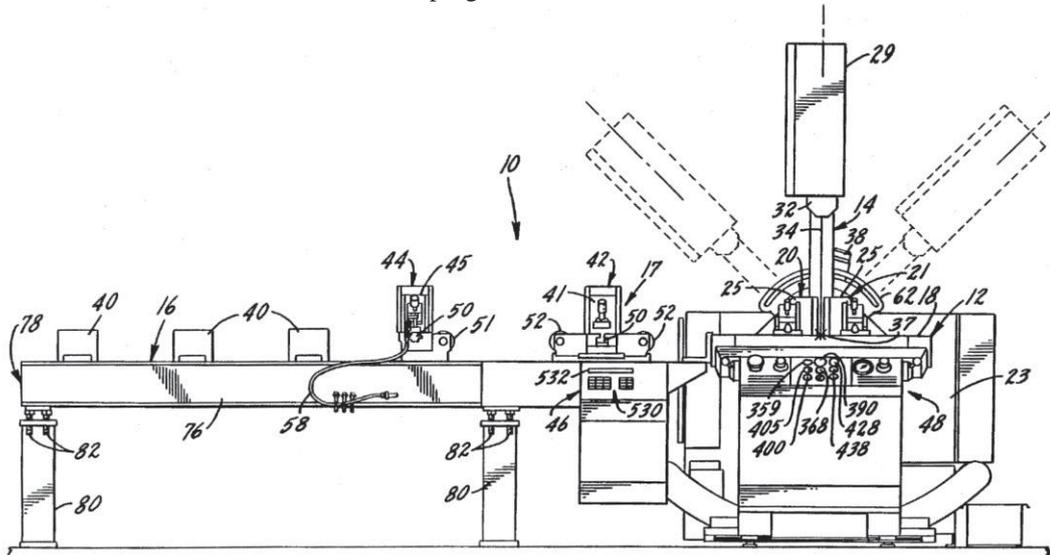


Fonte: UNITED STATE PATENT 3908723, 1974.

A patente US 4866630 (Figura 17), de David R. Beaman, James M. Grossman e Alfonso Bello, de 14 de abril de 1986, trata de um equipamento com alimentação automática,

compreendido por uma mesa de transporte (16) com uma coluna vertical (14) que suporta o volante superior (29) e gira em torno de um eixo vertical (37). Um controlador programável (46) armazena uma série de etapas para serrar em sua memória, programáveis com o uso do teclado (530) e visíveis na tela (532). A serra é capaz de corrigir cada comprimento da peça que é transportada por rolos (40) e fixada na morsa (25). Num painel de controle, estão os comandos de ligar (359), avanço da mesa (368), botão de emergência (390) e acionamento (400) das bombas hidráulicas (42 e 44). Ao pressionar o botão de início (359), o controlador (46) recebe sinais de incremento de movimento que são decodificados para determinar a direção percorrida. O operador pode programar um corte enquanto a serra realiza outra operação.

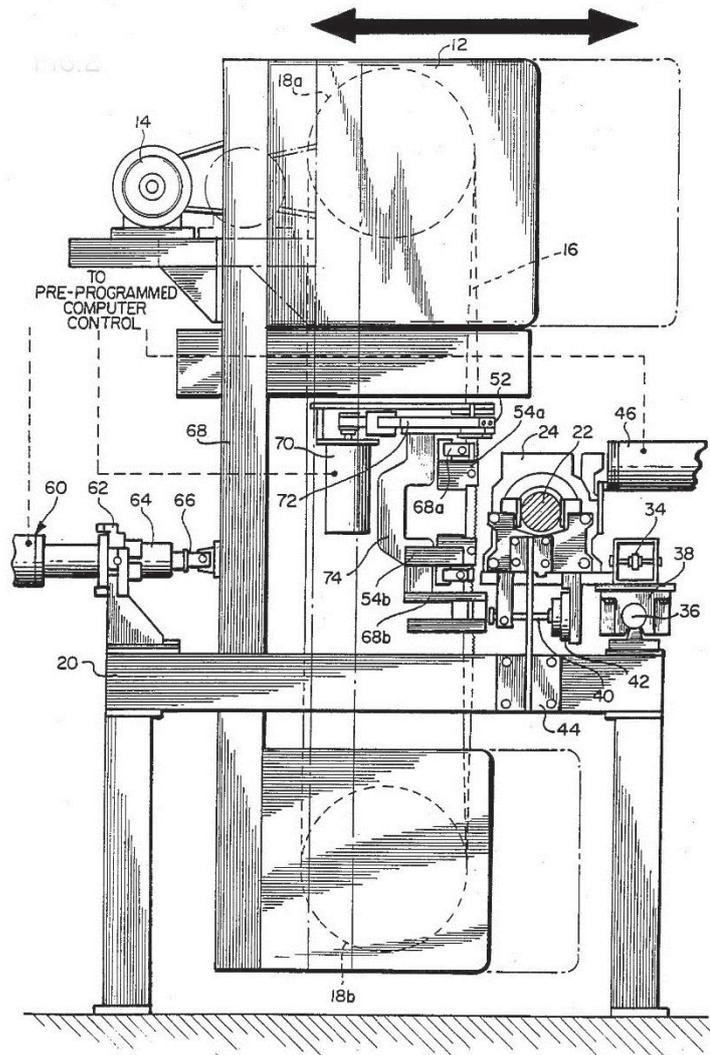
Figura 17 – Serra de fita com método de serrar programável.



Fonte: UNITED STATE PATENT 4866630, 1986.

A patente US 4926728 (Figura 18) de James Kawabata e Niles M., de 28 de fevereiro de 1989, trata de uma serra para corte de barras, composta por um lâmina (16) que é montada sobre um volante inferior (18b) e um volante superior (18a), que está ligado a um motor (14). Os movimentos são controlados por computador (21), fazendo com que ocorra o deslocamento sobre uma base fixa (20) na qual a estrutura, que suporta os volantes e a lâmina, desliza. O diferencial de tal invento é a possibilidade de cortar barras cilíndricas (22), fixadas por meio de um conjunto com pinça (24), cuja abertura é regulada por um servo motor (46). É possível realizar cortes retos, angulares em até 180° através do deslocamento da mesa.

Figura 18 – Serra de fita para corte de peças em forma de barra.



Fonte: UNITED STATE PATENT 4926728, 1989.

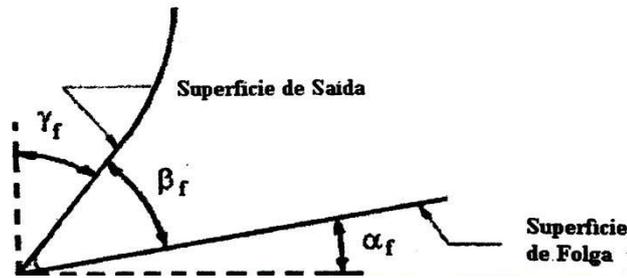
## 2.3 Lâmina de serra

Para escolha das lâminas da serra de fita é preciso levar em conta fatores tais como comprimento, largura, espessura, forma do dente, passo e ângulo de ataque.

### 2.3.1 Geometria da cunha cortante

Gonçalves (2000) elenca os principais elementos da geometria de corte (Figura 19) para um dente de serra de fita: 1) a superfície de saída, a superfície da cunha de corte sobre a qual desliza o cavaco, 2) a superfície de folga, a superfície da cunha de corte responsável pela folga entre a ferramenta e a superfície de usinagem e, 3) a aresta de corte, a aresta da cunha de corte formada pelas superfícies de saída e de folga.

Figura 19 – Geometria de um dente de serra.



Fonte: Gonçalves, 2000.

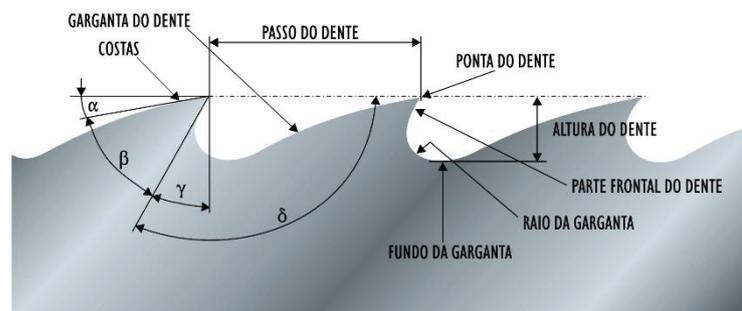
Néri (2003) descreve os principais ângulos para uma ferramenta de corte (Figura 20).

O ângulo de folga ( $\alpha_f$ ), formado entre a superfície de folga e a superfície usinada da peça; Gonçalves (2000) sugere que grandes valores possibilitam menor contato da madeira com partes não cortantes da lâmina. Pequenos valores permitem grandes ângulos de cunha e dentes mais robustos.

O ângulo de cunha ( $\beta_f$ ) ou ângulo de ataque é formado entre a superfície de saída e a superfície de folga da cunha cortante. Para Gonçalves (2000), este ângulo determina a resistência mecânica do dente: quando pequeno torna a serra frágil e quando grande restringe a velocidade de avanço requerendo maior potência para o corte.

O ângulo de saída ( $\gamma_f$ ), formado entre a superfície de saída e um plano perpendicular à superfície usinada. Gonçalves (2000) reporta que em velocidades de avanço altas são necessários maiores ângulos de saída. Para o corte de madeiras duras, necessitam-se serras com menores ângulos de saída do que para o corte de madeiras macias.

Figura 20 – Componentes de uma lâmina de serra.



Fonte: Saturno, 2015.

Para Gonçalves (2000), a garganta possui duas funções: alocar a serragem produzida durante o serramento e removê-la para fora da região do corte, pois um volume de material acima da capacidade resultaria em serragem removida pelas laterais da lâmina, ocorrendo compressão entre madeira e lâmina, aumentando o atrito e, conseqüentemente, elevando a força de corte.

O passo é a distância entre a ponta de dois dentes adjacentes. Gonçalves (2000) informa que para um incremento na velocidade de corte, faz-se necessário um passo maior e também a diminuição da velocidade de avanço. Madeiras duras e madeiras secas devem ser cortadas com passos menores do que para madeiras macias e verdes; já madeiras abrasivas requerem passos maiores. Saturno (2015) recomenda manter de 6 a 12 dentes trabalhando em contato com a seção do material.

Segundo Gonçalves (2000), serras com poucos dentes trabalhando na madeira (passo grande) podem deslocar-se lateralmente, aumentando a largura de corte e a força de corte devido ao contato lateral da lâmina com a madeira.

### 2.3.2 Elementos para escolha da lâmina

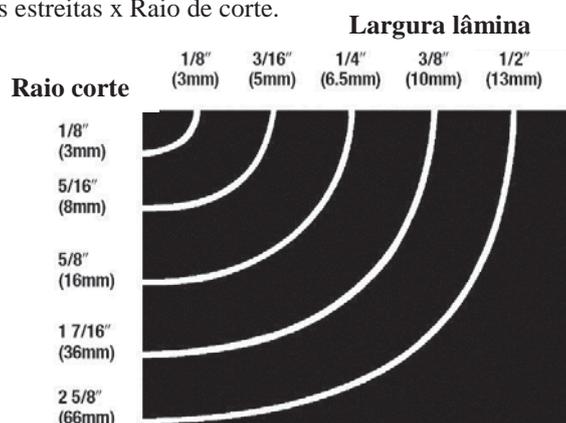
Alguns elementos devem ser levados em conta para a escolha de uma lâmina de serra; são eles: largura, espessura, perfil dos dentes, travamento e largura de corte.

Gonçalves (2000) classifica as lâminas em largas (largura superior a duas polegadas e meia) e estreitas (inferior a duas polegadas). Também relata que, devido à colisão lateral, as lâminas largas são destinadas a cortes retos, enquanto lâminas estreitas produzem cortes retos e curvos.

Os fabricantes Saturno (2015) e Sandvik (1999) corroboram a recomendação de se evitar o atrito das costas da serra com a madeira, sugerindo também o uso serras estreitas. Em ambas as fontes não foram encontrados relatos acerca de um critério para a escolha da largura da lâmina de até 2”.

Devido às limitações da ferramenta, fabricantes de lâminas como Starret (2010) e Amada (2015) recomendam que a largura da lâmina determine o raio de curvatura em cortes curvos (Figura 21).

Figura 21 - Largura lâminas estreitas x Raio de corte.

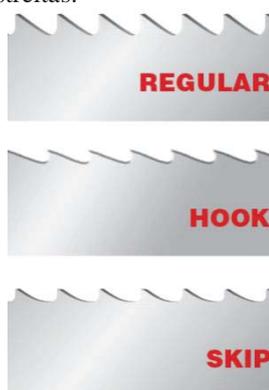


Fonte: Adaptado de Starrett, 2010.

Sandvik (1999) recomenda que lâminas com espessura inferiores a 1,47 milímetros devem obedecer à relação 1/1000 em relação ao diâmetro do volante. Já lâminas superiores a essa espessura devem obedecer à relação 1/1200 em relação ao diâmetro do volante. Saturno (2015) menciona que, para um diâmetro de volante de 1000 mm, a espessura da serra pode variar de 0,83 a 1,0 mm.

Starret (2010) indica três perfis de dentes (Figura 22) para lâminas estreitas, são eles: regular, hook e skip.

Figura 22 – Perfis de dentes para lâminas estreitas.



Fonte: Starrett, 2010.

Regular, um dente convencional utilizado para serrar em linha reta; possui ângulo de saída igual a zero. Segundo Gonçalves (2000), esse é o perfil mais resistente, possui pequena garganta, sendo indicado para madeira seca e dura.

Hook possui inclinação positiva, ou seja, um ângulo de saída diferente de zero. Com um valor de  $10^\circ$ , é indicado para corte de madeiras e materiais não ferrosos. Gonçalves (2000) relata que o perfil Hook possui grande garganta e dentes esbeltos, o que o torna de uso geral.

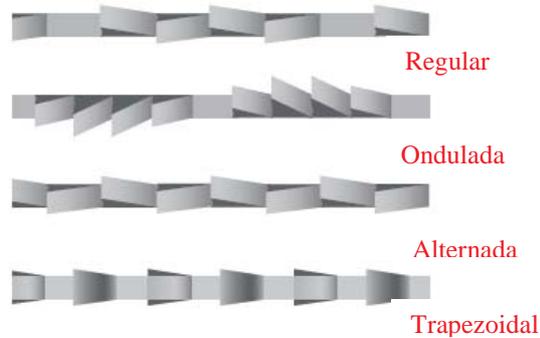
Skip apresenta ângulo de saída igual a zero e com gargantas rasas; é indicado para o corte de grandes seções de material e madeiras macias.

De acordo com Néri (2003), no corte longitudinal com serra de fita, o dente deve separar e cortar as faces laterais para passar livremente dentro da ranhura de corte. Para evitar o atrito da serra contra os lados do corte, a espessura da serra deve ser mais larga que a espessura da fita, o que é feito pela trava do dente.

Gonçalves (2000) considera um artifício que propicia folga lateral no corte, resultado de um alívio no corpo da serra no contato com a madeira. Ele recomenda meia espessura da serra de cada lado para cortar madeiras macias; para madeiras duras, aconselha um quarto da espessura da serra, de cada lado.

Starret (2010) classifica o travamento em quatro formas diferentes: regular, ondulada, alternada e trapezoidal (Figura 23).

Figura 23 – Formas de travamento dos dentes em lâminas de serras.



Fonte: Starrett, 2010.

**Regular** - sequência de um conjunto de dentes à direita e à esquerda, seguidos de um dente reto. Para Saturno (2015), o dente reto retira o cavaco e permite facilidade de penetração da lâmina no material.

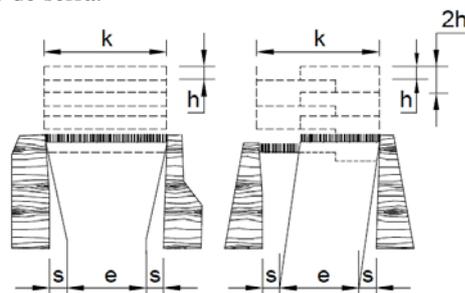
**Ondulada** - grupos de dentes definidos para cada um dos lados da lâmina, com quantidades variáveis de configurações em um padrão controlado.

**Alternadas** - uma sequência de dentes travados alternadamente para a esquerda e para a direita continuamente.

**Trapezoidal** - ponta de carboneto especial soldada na extremidade do dente, sendo ligeiramente mais espessa do que a lâmina.

A largura de corte ( $k$ ) corresponde à seção transversal do cavaco. No serramento, ela resulta da espessura da lâmina ( $e$ ), mais a folga lateral ( $s$ ) proveniente do travamento dos dentes (Figura 24). Para Gonçalves (2000), a folga lateral deve ser ajustada de acordo com os parâmetros de corte, tipo e geometria do dente, pelo equipamento e pelo tipo de madeira. Por exemplo, uma lâmina com 1 mm de espessura e um travamento de metade da espessura para cada lado, produziria uma largura de corte de 2 mm no corte de madeiras macias.

Figura 24 – Geometria de um dente de serra.



Fonte: Adaptado de Gonçalves, 2000.

### 2.3.3 Parâmetros de corte

A operação de corte possui características quantificáveis através de números. Velocidade de corte e velocidade de avanço são grandezas numéricas e dois parâmetros importantes desse processo.

#### Velocidade de Corte

É a distância que a aresta de corte percorre na unidade de tempo, sendo proporcional ao diâmetro e à rotação dos volantes, sendo calculada pela equação (2.1):

$$V_c = \frac{\pi D_v n}{60} \quad (2.1)$$

Onde:

$V_c$  = Velocidade de corte (m/s);

$D_v$  = Diâmetro dos volantes (m);

$n$  = Número de revoluções por minuto do volante motor (rpm).

Segundo Gonçalves (2000), as velocidades usuais em máquina de serra de fita variam de acordo com a madeira: madeiras macias - até 50 m/s; madeiras duras – entre 40 e 46 m/s; e madeiras extremamente duras de 30 a 35 m/s.

De acordo com a Sandvik (1999), a velocidade de corte é uma variável importante para a qualidade do serrado e para a produtividade. Considera o valor normal de 35 a 45 m/s.

#### Velocidade de avanço ou velocidade de alimentação

Trata-se da velocidade entre ferramenta e madeira. Em operações de desdobro, as velocidades de avanço indicadas estão entre 15 a 100 m/min. Podem ser calculadas pela equação (2.2):

$$V_f = \frac{60 V_c h}{p} \quad (2.2)$$

Onde:

$V_f$  = Velocidade de avanço (m/min);

$h$  = Espessura do cavaco (mm);

$p$  = Passo do dente (mm).

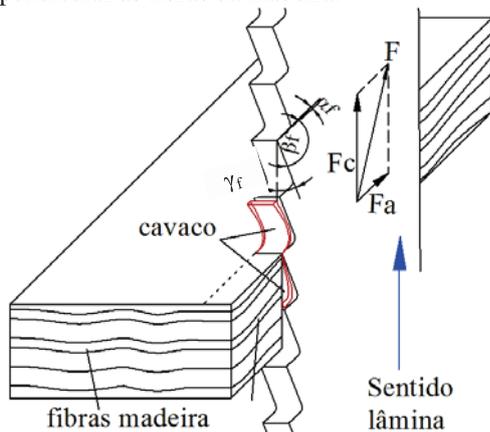
Gonçalves (2000) relata que, em baixas velocidades de avanço, tem-se a fricção da aresta de corte com a madeira, elevando-se a força de corte. Em altas velocidades, há o preenchimento da garganta dos dentes, aumentando a fricção da serragem com a lâmina e a madeira, incrementando a força de corte.

### Forças de corte

De acordo com Néri (2003), as forças de corte desenvolvidas durante a usinagem da madeira (força paralela, normal e lateral) podem ser medidas por instrumentos denominados dinamômetros ou célula de carga.

Para Gonçalves (2000) a força de corte tende a ser maior no corte perpendicular às fibras do que no corte paralelo às fibras. Os ângulos de folga ( $\alpha_f$ ) e cunha ( $\beta_f$ ) têm pequena influência sobre o esforço de corte comparado ao ângulo de saída ( $\gamma_f$ ). Quanto maior este for, menor será o esforço de corte. A Figura 25 ilustra esses esforços, no corte perpendicular às fibras, de uma prancha de madeira, com lâmina de serra de fita contendo dentes do formato regular, com um ângulo de saída ( $\gamma_f$ ) de  $10^\circ$ . A força de corte ( $F_c$ ) é paralela ao deslocamento do dente e a força de avanço ( $F_a$ ) é perpendicular. A força ( $F$ ) é a resultante do sistema.

Figura 25 – Esforços no corte perpendicular às fibras da madeira.



Fonte: Autor.

### 2.4 Fabricantes de serras fitas automatizadas

Dentre os fabricantes de serras de fita automáticas, podem ser citados a Centauro, a Fulpow e a Warsaw.

A Centauro (2015) possui a serra CNC modelo SAWFLEX. Possui 3 volantes de 800 mm de diâmetro, movimento nos eixos X e Y, corta placas de 1500 x 900 x 150 mm com velocidade da lâmina de até 1800 m/min e um sistema de giro da lâmina em até  $180^\circ$  (Figura

26). Com a possibilidade de cortes curvos, dispensa o riscamento na madeira, o que pode ser mais produtivo quando usado em placas para móveis, pés de cadeira, cabeceira de cama, molduras de quadros, moldes para calçados, estrutura para instrumentos musicais, etc.

Figura 26 – Serra de fita da Centauro.



Fonte: Centauro, 2015.

Na máquina da Fulpow (2015), a mesa pode ser inclinada, corta placas de 2500 x 1250 x 150 mm, variados formatos, com sistema de giro da lâmina de 180°, possui volantes com 890 mm de diâmetro, velocidade da lâmina de até 2000 m/min e movimentação da mesa em X e Y (Figura 27).

Figura 27 – Serra fita da Fulpow.



Fonte: Fulpow, 2015.

A serra CNC da Warsaw (2015) possui movimento em X e Y, corta placas de 1500 x 500 x 350 mm (Figura 28), volante com 910 mm de diâmetro. Possui sistema de giro, mas o fabricante não especifica quantos graus pode variar, restringindo-se a informar que a máquina requer lâminas com largura de 9,52 a 19 mm.

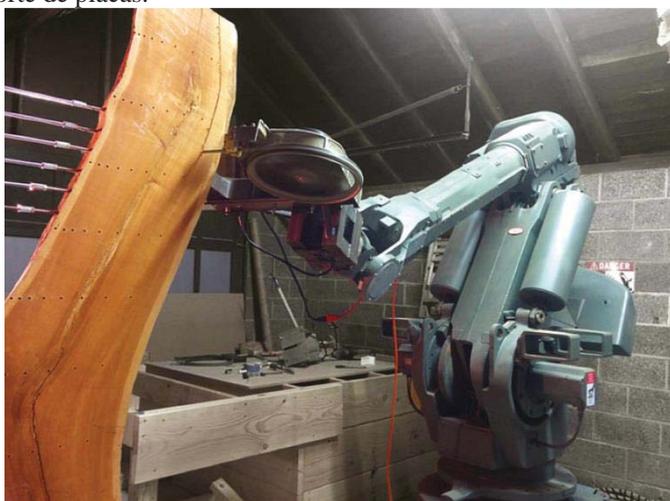
Figura 28 – Serra de fita da Warsaw.



Fonte: Warsaw, 2015.

Há trabalhos de cunho investigativo acerca do corte curvo com lâminas de fita, como Johns e Foley (2014), os quais propõem o estudo de uma serra de fita horizontal acoplada a um robô, capaz de cortar pranchas de madeira para construção de objetos de decoração de interiores (Figura 29).

Figura 29 – Robô para corte de placas.



Fonte: Johns e Foley, 2014.

## 2.5 Princípios de CNC

De acordo com Capelli (2002), Comando Numérico Computadorizado (CNC) trata de um computador dedicado ao controle de movimento dos eixos de uma máquina operatriz. Pesquisas surgiram durante a Segunda Guerra Mundial, objetivando a produção de peças de precisão e em grandes lotes, para a fabricação de aviões de guerra.

Bayer et al. (2011) reportam que máquinas CNC foram criadas a partir de máquinas convencionais: as mesmas tiveram que ser reprojetadas para atender as demandas de produtividade, qualidade e rigidez.

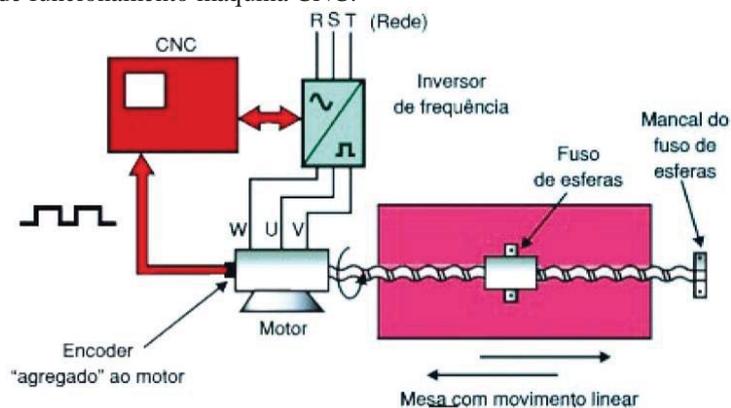
Leite et al. (2015) relatam que, com o desenvolvimento de microprocessadores e a tecnologia de precisão, na década de 70, tornou-se possível a produção com CNC. De acordo com Bayer et al. (2011), a Romi fabricou, no Brasil, o primeiro torno com controle numérico em 1971.

Araújo (2012) considera CNC como todo o dispositivo capaz de conduzir os movimentos de posicionamento de um órgão mecânico, em que os comandos relativos a esse movimento são elaborados de forma totalmente automática a partir de informações numéricas definidas manualmente ou através de um programa.

Fitzpatrick (2013) aborda que a maior parte de um programa para CNC é composta de coordenadas dos pontos que se referem às distâncias até os eixos. As coordenadas X, Y, Z são empregadas para movimento da ferramenta, posicionamento da ferramenta em relação à peça e como referência.

De acordo com Capelli (2002), o CNC comunica-se com a periferia da máquina através do módulo I/O (*input/output*). Sensores, fins de curso, relés, contadores e eletroválvulas são ativados através desse módulo. O CNC comanda os servomotores através de um drive de potência: o inversor de frequência. Esse controle é feito por intermédio de um sinal analógico de comando (0 a 10 Vcc). Um encoder (transdutor óptico) é responsável por indicar a correta posição em que o eixo se encontra. Ele gera pulsos seriais de referência que são contados pelo CNC e processados como unidade de deslocamento (Figura 30).

Figura 30 – Esquema de funcionamento máquina CNC.



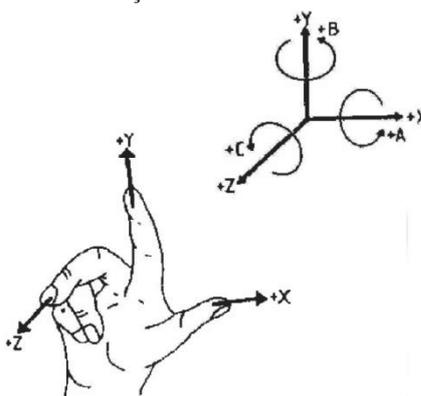
Fonte: Capelli, 2002.

### 2.5.1 Eixos em máquinas CNC

Segundo Fitzpatrick (2013) há 9 eixos universalmente utilizados em usinagem CNC. Com movimentos em linha reta tem-se os 3 eixos lineares primários X, Y, Z. Para cada eixo cartesiano está associado um eixo de rotação A, B e C (rotacionam em torno dos eixos X, Y e Z, respectivamente). Os 3 eixos faltantes, U, V e W, são chamados de lineares auxiliares e são adicionados para uma produção multiaxial ou multitarefa.

Os sentidos dos eixos são determinados pela regra da mão direita (Figura 31), conforme DIN 66217. O polegar corresponde ao sentido positivo do eixo imaginário X. O indicador está atrelado ao sentido positivo do eixo Y. O dedo médio indica o sentido positivo do eixo Z; em máquinas ferramentas o mesmo deve ser paralelo ou coincidente com o eixo árvore principal. Posicionando o polegar da mão direita ao longo da direção positiva do eixo, os demais dedos se curvam no sentido positivo do eixo rotativo.

Figura 31 – Eixos ortogonais primários e de rotação.

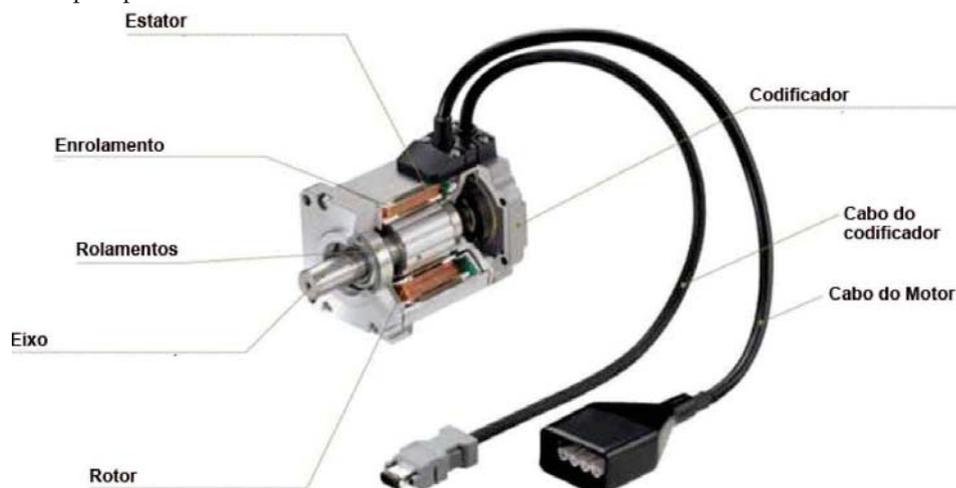


Fonte: Bayer et al., 2011.

### 2.5.2 Servomotores

Segundo Ottoboni (2002), um servomotor é uma máquina síncrona composta por um estator (parte fixa) e um rotor (parte móvel). O estator não pode ser ligado diretamente à rede, pois utiliza uma bobinagem especialmente confeccionada para proporcionar alta dinâmica ao sistema. O rotor é composto por ímãs permanentes dispostos linearmente sobre o mesmo. Um transformador de alta frequência (resolver) gera sinais de velocidade e posição. Um codificador (encoder) repassa esses sinais ao controlador (Figura 32).

Figura 32 – Principais partes de um servomotor.

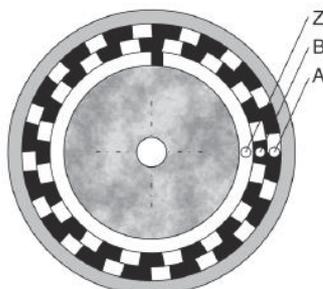


Fonte: Ottoboni, 2002.

Para Carvalho (2011), servomotor é um dispositivo especial, projetado para atender necessidades específicas que um motor convencional não atenderia. O conjunto do estator é acionado por um servocontrolador ou servoconversor. Há um painel eletrônico para acionamento, controle e ajustes das variáveis do servomotor.

Matos (2012) caracteriza o encoder como um conversor de movimentos angulares ou lineares em grandezas elétricas, que são transformadas em informações binárias. Nos encoders incrementais (Figura 33), pulsos são gerados (A e B) provenientes de duas marcações radiais, igualmente espaçadas, que permitem a detecção da posição pela contagem dos pulsos e do sentido de rotação pelo defasamento das faixas A e B. A posição é determinada pela soma da distância percorrida a partir de uma posição de referência. Um terceiro ponto (Z) fornece a indicação do final de uma volta e início da contagem dos pulsos.

Figura 33 – Encoder incremental.

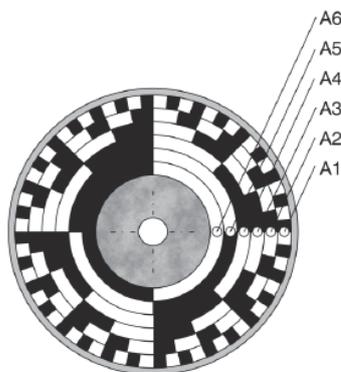


Fonte: Matos, 2012.

Matos (2012) cita também os encoders absolutos (Figura 34), em que cada posição do disco corresponde a uma combinação de sinais (A1, A2, A3, A4, A5 e A6) fornecidos por intermédio de sensores ópticos ou magnéticas que detectam a passagem das marcas do disco.

Nesse modelo, a velocidade é determinada através da derivada da posição, programada digitalmente.

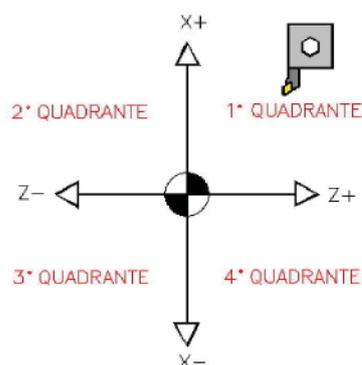
Figura 34 – Encoder absoluto.



Fonte: Matos, 2012.

Fitzpatrick (2013) apresenta dois sistemas de coordenadas para deslocamento em um equipamento CNC, que são as coordenadas cartesianas, compostas de valores em X, Y e Z. Há também as coordenadas polares, que são compreendidas por valores de raio (R) e ângulo (A). É necessário um ponto de partida referencial na preparação do programa, chamado de ponto zero peça (PZP). Por convenção na engenharia, o mesmo é representado como um círculo de alvo (Figura 35).

Figura 35 – Ponto zero peça (PZP).

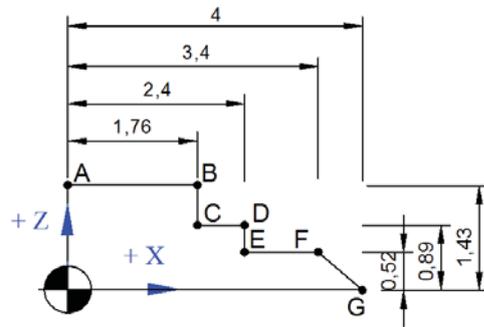


Fonte: Fitzpatrick, 2013.

Com a definição do PZP são definidos quadrantes e a partir destes são atribuídos sinais positivo ou negativo na dimensão a ser programada em função do quadrante onde a ferramenta se desloca. Há duas maneiras diferentes de usar coordenadas cartesianas e polares. Uma delas é por coordenadas absolutas, que referenciam os valores de distância a partir da origem. Na peça da Figura 36, os eixos X e Z estão no quadrante positivo, o percurso para

corte do ponto A, passando por B, C, D, E, F, G até chegar ao PZP segue as coordenadas absolutas.

Figura 36 – Programação por coordenadas absolutas.

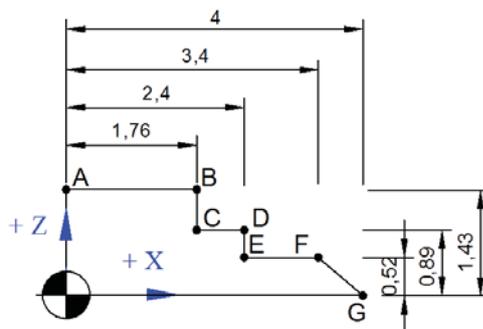


Movimento	Coordenadas Absolutas	
	X	Z
Em A	X 0	Z 1.43
De A para B	X 1.76	Z 1.43
De B para C	X 1.76	Z 0.89
De C para D	X 2.4	Z 0.89
De D para E	X 2.4	Z 0.52
De E para F	X 3.4	Z 0.52
De F para G	X 4	Z 0
De G para PZP	X 0	Z 0

Fonte: Adaptado de Fitzpatrick, 2013.

Outra forma de programar é por coordenadas incrementais; nessas, os valores de deslocamento consideram como referência o último ponto. Na peça da Figura 37, a trajetória é a mesma da Figura 36, só que quando o deslocamento ocorre na orientação do sistema de eixos, as coordenadas são positivas. Já quando o deslocamento é contrário à orientação desses eixos, ou seja, para esquerda e para baixo, as coordenadas possuem valor negativo.

Figura 37 – Programação por coordenadas incrementais.



Movimento	Coordenadas Incrementais	
	X	Z
Em A	X 0	Z 1.43
De A para B	X 1.76	Z 0
De B para C	X 0	Z -0.54
De C para D	X 0.64	Z 0
De D para E	X 0	Z -0.37
De E para F	X 1	Z 0
De F para G	X 0.6	Z -0.52
De G para PZP	X -4	Z 0

Fonte: Adaptado de Fitzpatrick, 2013.

### 2.5.3 Princípios de Programação CNC.

Oliveira (2011) classifica os métodos de programação CNC em 4 formas: programação manual, linguagem de alto nível, sistemas gráfico interativos e sistemas CAD/CAM.

Para Oliveira (2011), na programação manual e de alto nível, o programador elabora o programa que é testado através da simulação na própria máquina. Na programação manual, o programa pode ser digitado num editor de texto do computador e enviado para a máquina através de cabo ou cartão de memória. Já a linguagem de alto nível requer um pós-processador, uma base de dados para convertê-la em um código específico, para cada tipo de máquina. Em sistemas gráficos interativos, a programação assistida pelo computador gera o programa final.

Para Meneghello (2003), os *softwares* CAD/CAM interpretam a geometria das peças por meio da leitura de algoritmos computacionais, com dados de projeto ou percurso da ferramenta, gerando programas com uso das informações de um banco de dados customizável. O sistema calcula e define as estratégias de usinagem na forma de trajetórias e parâmetros de operação.

#### **2.5.4 Trabalhos na Literatura**

Sanches (2009) utilizou técnicas de projeto aplicadas no desenvolvimento de um conceito de fresadora CNC visando à aplicação para fins didáticos, porém não fez a construção física da máquina.

Araujo (2009) aplicou a metodologia de projeto para geração de conceitos que compõem o protótipo de uma minimáquina de cerâmica de alumina. O autor fabricou o protótipo e validou o mesmo através de corte em corpos de prova.

Paredes (2013) projetou e fabricou uma máquina-ferramenta CNC tipo Router com um adaptador para o controlador LinuxCNC; foi modelado um sistema geral que abrange o ciclo de vida do projeto de uma peça prismática desde o projeto CAD até sua usinagem.

Figueiredo et al. (2014) simularam o corte de uma figura na forma de triângulo; para isso estudaram a conversão de arquivos de texto produzidos em desenhos construídos em *softwares* CAD, estenderam para um arquivo no formato XML que possui tamanho menor que os arquivos gerados pelos programas de desenho, encaminharam a um programa (CAM) que processa as coordenadas de corte, especificação do material e espessura. Após isso, os dados foram enviados para um microcontrolador Arduino, que simula o controle dos motores de uma máquina de corte CNC.

Meneghello (2003) utilizou recursos de sistemas CAD/CAM traduzindo arquivos gráficos para uma linguagem de programação utilizada em sistemas robóticos. Realizou o fresamento de superfícies complexas, adequando os parâmetros do processo às restrições dos sistemas robóticos.

Bianchi (1996) estudou a concepção de uma máquina controlada por CNC, tipo pórtico, dedicada à medição e usinagem de peças de grande comprimento, com superfícies planas e curvaturas suaves. O estudo levou em consideração a possibilidade de produção de famílias de peças utilizando recursos CAD e CAM para fresamento de madeira na indústria moveleira.

Cherem et al. (2010) desenvolveram o projeto e construíram o protótipo de uma mesa birrotativa modular para ser integrada em uma fresadora CNC TRIAC PC, de 3 eixos. A mesa possibilitou rotacionar simultaneamente os eixos A (deslocamento angular de  $+90^\circ$ ) e C (deslocamento angular livre). Utilizaram o *software* R2xTune para configuração e parametrização. Usinaram um corpo de prova com geometria complexa a fim de validar o sincronismo dos equipamentos. Os movimentos tiveram boa resposta dinâmica e Cherem et al. (2010) indicam a substituição dos motores de passo da fresadora, para melhorar a resposta do sistema.

Silveira (2015) desenvolveu um posicionador cartesiano para um sistema de impressão 3D com filamento, também criou o cabeçote extrusor que movimenta de forma controlada o filamento. O protótipo foi concebido com utilização de metodologia de projeto, contando com parte eletroeletrônica e mecânica: estrutura, mecanismo e acionamentos. Eixos X e Y na mesa, e eixo Z para altura do bico extrusor. A integração CAD-CAM-CNC foi possível devido à compatibilidade da cadeia de *softwares* utilizados. Uma das dificuldades do processo foi o reconhecimento da temperatura no bico extrusor. Algumas peças foram impressas, dentre elas uma similar à torre do jogo de xadrez, com sucessivas camadas depositadas necessitando de variação no orifício do bico extrusor para melhorar o acabamento.

Gonçalves (2014) desenvolveu o protótipo de uma impressora 3D com filamento, utilizando o *software* LinuxCNC. O foco do seu trabalho foi na adaptação do *software*, pois o mesmo é concebido para controle de máquinas ferramentas CNC. Ele utilizou uma estrutura de madeira, dimensionou eixos e motores de passo. Há poucas imagens do projeto e a validação se deu pela conversão de um arquivo de impressão (.stl), com a forma de uma *Bitcoin*, em um arquivo interpretável pelo LinuxCNC. O arquivo foi carregado, o protótipo executou os movimentos validando o conceito e o sistema.

Carvalho et al. (2008a) desenvolveram o projeto e a construção de um robô manipulador CNC para soldar tubos danificados em caldeiras de usinas termoeletricas. O protótipo possui 4 graus de liberdade e é adaptado à superfície dos tubos, solda pelo processo MIG/MAG em posição vertical descendente e com vantagens sobre o processo de

recuperação manual. Utilizou uma interface homem-máquina (IHM) com monitor sensível ao toque e um controlador chamado *Mach3*.

Carvalho et al. (2008b) relatam o uso de um *software* auxiliar *Screen4* para construção de uma interface específica para o processo de soldagem. Carvalho (2009) informa que o protótipo partiu de um primeiro robô, porém o manipulador CNC foi construído com outro *layout*. Relata o uso do mesmo para soldagem orbital de tubos através da adaptação de um trilho com base magnética podendo ser usado no processo Plasma com adição de pó. Destaca que o projeto é um robô flexível, podendo ser utilizado para outros fins industriais e acadêmicos.

Huang et al. (2016) desenvolveram o *software* para ser utilizado em máquinas CNC de eletroerosão por penetração com 5 eixos, em plataforma Linux. Com o desenvolvimento conseguiram usinar as cavidades de rotores de turbina em uma liga de níquel.

Callegaro et al. (2012) desenvolveram um equipamento com capacidade para realizar sequência de movimentos automáticos e programados por computador para ser utilizado em recuperações de movimentos de pessoas lesionadas no cotovelo e antebraço. Utilizaram metodologia projetual de Back et al. (2008) nas fases de planejamento e projeto conceitual. Construíram o protótipo com motores de passo, utilizaram o *software Mach3*, que contém um arquivo de texto com a sequência de movimento, criada em código G, pelo fisioterapeuta.

Poll (2008) desenvolveu uma metodologia para transformar calandras de tubos e chapas convencionais em equipamentos com sistema automático programável, para execução de peças em raios fixos e variáveis. Apresentou o projeto mecânico conceitual e propôs o ajuste dos parâmetros de operação através do processamento de uma imagem extraída de uma foto da peça conformada. A metodologia reconheceu o desenho de uma peça em sistema CAD gerando um programa CNC para execução da peça. Devido a isso, a autora relata ser possível transformar uma calandra convencional em programável (CNC).

Yan et al. (2004) construíram o protótipo de uma micromáquina de eletroerosão a fio, com controle CNC em 2 eixos. Desenvolveram *software* para controle em arquitetura aberta, o sistema de transporte do fio e a fonte de energia. No teste de corte, utilizaram um fio de latão com 0,07 mm de diâmetro.

Gordon e Hillery (2005) desenvolveram uma router CNC, com deslocamento nos eixos X e Y. A estrutura foi feita de perfis metálicos quadrados (metalon), com uma base em concreto, e o sistema de eixos apoiados em perfis modulares de alumínio. O protótipo foi desenvolvido nos laboratórios da Universidade de Limerick, na Irlanda. A interface gráfica foi

desenvolvida em linguagem C++. Analisaram a estrutura com *software* de elementos finitos ELFEN.

Miranda (2009) desenvolveu um programa para fins didáticos denominado *AutoCAM* em linguagem de programação *Visual Basic*. As entradas do programa são o modelo tridimensional virtual da peça e informações fornecidas pelo usuário na interface do programa. O código gerado é aplicável em máquinas CNC. Para validar o modelo, o autor utilizou um protótipo didático de fresadora CNC, com três eixos que são movimentados por motores de passo. A ferramenta de corte era uma microretífica que usinou um bloco de isopor. Após a aplicação de todos os códigos gerados, obteve-se a peça final, validando o programa.

Karunakaran et al. (2009) adaptaram um centro de usinagem CNC de três eixos para realizar a deposição por camadas com solda MIG/MAG e comparar os tempos de usinagem na construção de um molde com essa técnica de deposição e usinagem. Concluíram que o processo foi mais rápido e custou cerca de 77% do valor da usinagem convencional.

Gesser et al. (2010) desenvolveram um sistema integrador para controle de equipamentos, baseado no controlador *Mach 3*, com a finalidade de controlar uma fresadora didática com quatro eixos para modelagem. Em um segundo projeto, automatizaram uma mesa CNC para corte plasma. Como resultados, conseguiram usinar superfícies complexas na fresadora didática e cortar uma roda dentada na mesa de corte plasma.

Félix e Filho (2009) desenvolveram uma máquina CNC para prototipagem em isopor; com uso de metodologia de projeto, construíram o protótipo utilizando motores de passo. A ferramenta para cortar o isopor foi um fio de cobre aquecido. Utilizaram *software* livre para controle das operações de corte. Cortaram retângulos, círculos e curvas. O protótipo apresentou atrito nas buchas, superior ao estimado o que gerou imperfeições em algumas superfícies cortadas.

### **2.5.5 Indústria 4.0**

Indústria 4.0 corresponde à nova revolução industrial em andamento no mundo. De acordo com uma pesquisa da Fundação Dom Cabral (2016), o termo surgiu em 2011 na Feira de Hannover (Alemanha) como estratégia do governo alemão para o desenvolvimento de alta tecnologia. A ideia inicial começou em 2006, por intermédio do projeto *High Tech Strategy*, que reuniu as principais lideranças de inovação e tecnologia no país; elas estabeleceram um plano de ação para aumentar a produtividade da indústria alemã e fornecer soluções de ciência e tecnologia em diversas áreas do conhecimento.

Rüßmann et al. (2015) listam as 9 tecnologias principais na Indústria 4.0:

- Robôs automatizados – futuramente serão capazes de interagir com outras máquinas e com os seres humanos;
- Manufatura aditiva – compreendida pelo uso de impressoras 3D para produção de peças através da adição de matéria-prima;
- Simulação – operadores testam produtos na fase de concepção, diminuindo tempo de criação e otimizando processos;
- Integração vertical e horizontal de sistemas – através da digitalização dos dados, é possível integrar sistemas de TI em uma cadeia automatizada;
- Internet das coisas industriais – sensores e dispositivos conectam máquinas a uma rede de computadores centralizando a automação do controle;
- Big data e Analytics – identificam falhas nos processos da empresa, melhoram a qualidade da produção, economizam energia tornando mais eficiente a utilização de recursos;
- Nuvem – banco de dados acessível de qualquer lugar do mundo, através de vários dispositivos conectados à internet;
- Segurança cibernética – meios de comunicação aprimorados e confiáveis;
- Realidade aumentada – interação de objetos reais com objetos virtuais, por exemplo, o jogo Pokémon Go®.

Para Schuh et al. (2014), uma digitalização consistente e a interligação dos sistemas produtivos que possuem *Cyber-Physical Systems*, robôs e máquinas inteligentes, *Big Data* e melhor qualidade de conexão, eficiência e descentralização energética, industrialização virtual e fábrica 4.0, farão parte da nova revolução industrial. Segundo Hermann et al. (2015), ao contrário das outras revoluções industriais que foram diagnosticadas depois, os acontecimentos da Indústria 4.0 estão sendo previstos como tendência.

O conceito de fábrica 4.0 ou fábrica inteligente corresponde à utilização de dados e informações de fornecedores integrados em tempo real para a solução de problemas na fábrica. Assim máquinas e equipamentos com sensores monitoram o processo e se ajustam ao melhor desempenho em tempo real. De acordo com Felipe (2015), o objetivo é tornar a produção mais independente, permitindo uma customização em massa. Com personalização em grande quantidade, obtêm-se produtos com características próprias, com erros de produção próximos a zero.

Máquinas inteligentes, além de produzirem, efetuarão o controle do produto resultante e registrarão todos os dados do processo, gerando uma otimização logística entre os elos de

uma cadeia produtiva, de modo a permitir rastrear as informações da matéria-prima com o uso de etiquetas de identificação por radiofrequência (RFID), até o produto final, que conterà informações aos clientes dispostas no código de resposta rápido (QR CODE) e podem ser lidas por smartphones. Como consequência, a gestão da produção será totalmente automatizada, controlando diretamente as máquinas a fim de obter o melhor desempenho do sistema. Para isso, a Fábrica 4.0 necessita de máquinas, equipamentos, sistemas automatizados e *softwares* mais versáteis.

No Brasil, a Confederação Nacional da Indústria (CNI), realizou, em janeiro de 2016, uma pesquisa com 2225 empresas de vários segmentos, a fim de detectar o avanço de tecnologias com enfoque na Indústria 4.0. A CNI classificou as empresas por intensidade tecnológica, e o setor de móveis foi classificado como de baixa intensidade. Ainda de acordo com o estudo, no ramo moveleiro 22% das empresas utilizam tecnologias digitais no desenvolvimento de seus produtos, tais como: sistemas integrados de engenharia para desenvolvimento de produtos, impressão 3D, análises e simulação em modelos virtuais, processamento e análise de grandes quantidades de dados (*big data*), projetos de manufatura por computador (CAD/CAM). Tal averiguação deixou o setor moveleiro na sétima posição entre onze setores.

Silva (2015) apresenta o projeto de uma fábrica de ensino para ser implantada na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP), baseada no contexto do conceito de Indústria 4.0. Ela realiza uma revisão do conceito do sistema e tece uma formatação de como a fábrica pode ser criada nas dependências da universidade, assim como dos equipamentos a serem utilizados dentro dessa visão.

Neste capítulo foi apresentada a pesquisa realizada em relação a metodologias de projeto, patentes, equipamentos, características de ferramentas, inovações e trabalhos desenvolvidos. Sempre que possível buscou-se trabalhos recentes em especial nos últimos cinco anos. Ressalta-se a importância do que foi estudado. Os itens pesquisados são significativos e servem de subsídio para o andamento do trabalho, que segue no desenvolvimento do projeto, modelamento matemático, discussões e na conclusão.

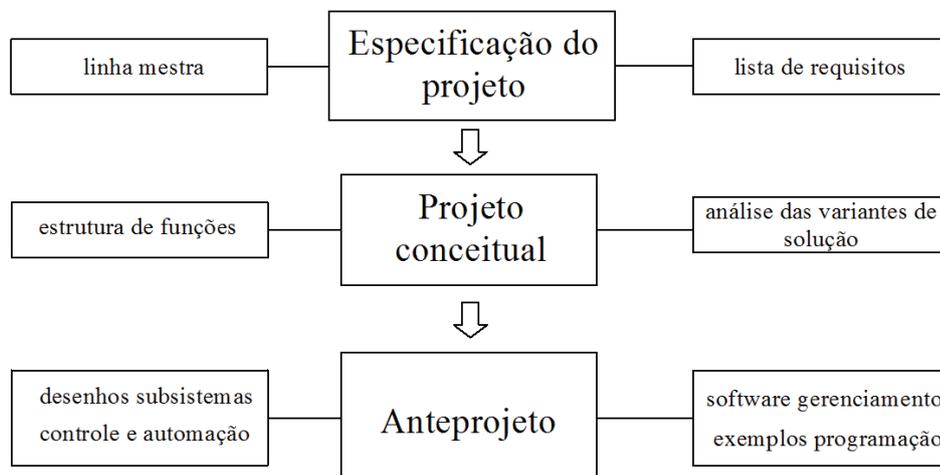
### 3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo é realizado o desenvolvimento do conceito da serra de fita CNC para cortes de placas planas de madeira e derivados. Com foco no processo de corte de madeira, é proposta uma estratégia para o projeto de uma serra de fita CNC com capacidade para corte em linha reta e em curva, cujo desenvolvimento foi baseado na metodologia de projeto de Pahl et al. (2013). Tal metodologia foi adotada, pois apresenta uma abordagem mais compacta no desenvolvimento de produtos, é focada na área de engenharia e sistemas técnicos, prevalecendo as características de projeto mecânico sobre o gerenciamento do produto e o *design*.

#### 3.1 Etapas do trabalho

O fluxograma proposto (Figura 38) dá a sequência de desenvolvimento do estudo. Começa pela especificação do projeto, na qual é apresentada sua delimitação e elaborada uma lista de requisitos seguindo a linha mestra para concepção do produto. Após parte-se para o projeto conceitual, que consiste em aplicar o princípio da abstração para chegar à função global e estrutura de funções. Na elaboração dos princípios de funcionamento determinam-se as variáveis de solução; faz-se a análise de valor para determinar a solução ideal chegando à fase de anteprojetado. Nessa fase a solução mais promissora é levada adiante e são apresentados os desenhos do equipamento na sua forma geral, sistema de controle e automação, detalhamento de alguns subsistemas: torção da lâmina e giro da mesa. Também foram desenvolvidas telas de um *software* para supervisão e gerenciamento da serra de fita CNC. Por fim, são apresentados exemplos de programação para o corte de uma placa.

Figura 38 – Fluxograma do trabalho.



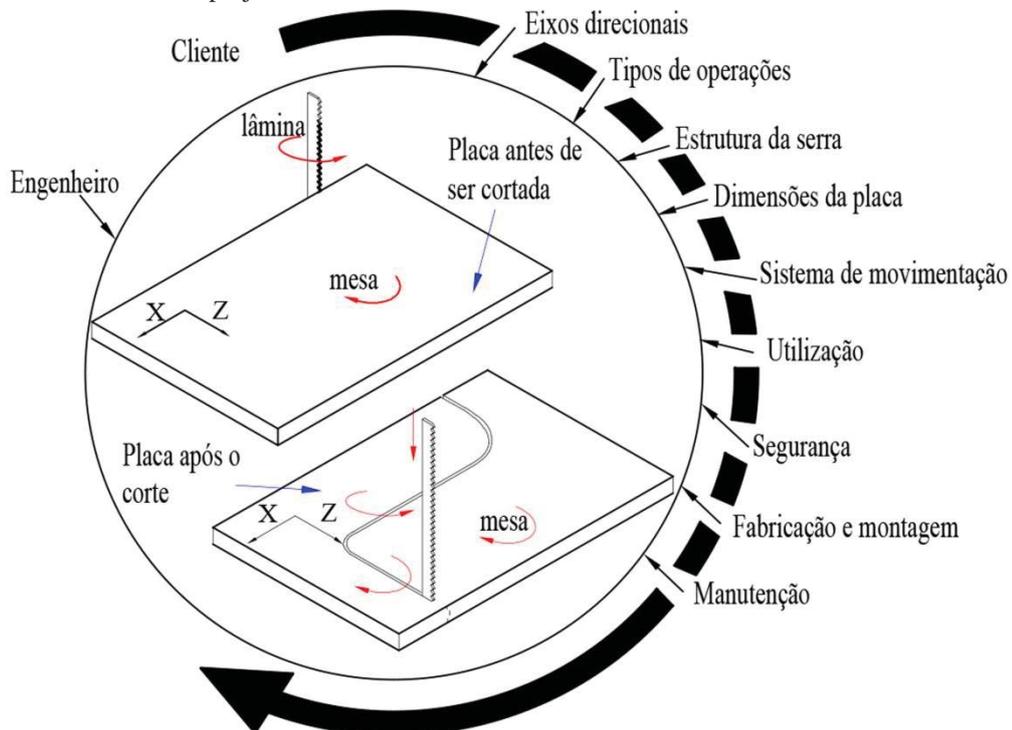
Fonte: Autor.

### 3.2 Especificação do projeto (1ª fase)

A primeira fase da metodologia de projeto de Pahl et al. (2013) é caracterizada inicialmente pela especificação do produto seguindo uma linha mestra, na qual as características do mesmo são elencadas a fim de atender sua finalidade e suprir as necessidades dos clientes. Em um segundo momento, uma lista com os requisitos do produto é elaborada. Quanto mais claras forem as exigências e condições de uso do produto, mais precisa é a solução do problema de projeto.

A Figura 39 ilustra o processo de desenvolvimento da serra de fita automática, de acordo com a linha mestra. Normalmente tem-se uma equipe de projeto para elaboração do produto, no entanto, para este caso, a elaboração é de responsabilidade do engenheiro e projetista. Os requisitos do cliente para esse trabalho são: serrar placas de diversos materiais, qualidade na superfície serrada, cortar geometrias retas e curvas, possuir comando numérico computadorizado (CNC) e ser seguro.

Figura 39 – Linha mestra do projeto.



Fonte: Autor.

Os itens da linha mestra consideraram a experiência do projetista, produtos existentes, patentes, informações obtidas com fabricantes de ferramentas e possíveis clientes.

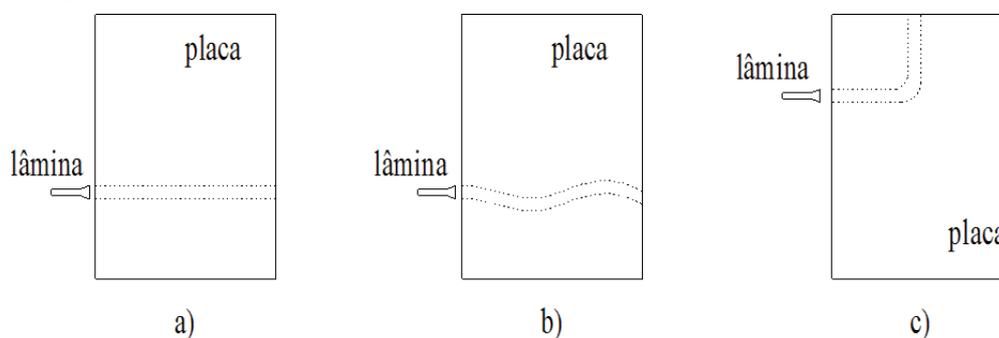
### 3.2.1 Delimitação do projeto

O projeto da serra de fita CNC restringe-se ao corte de placas, que podem ser de madeira maciça, MDF ou compensado naval, tendo em vista que são produtos utilizados na indústria moveleira. Para tanto, foi considerado uma placa plana com 1000 mm de comprimento, 600 mm de largura e 30 mm de espessura. Trata-se de valores inferiores às dimensões de placas comerciais, tornando o equipamento de menor porte.

O estado da arte a respeito do corte em madeira remonta à utilização de lâminas de serra e serras de discos (circulares). Há tentativas no uso de outros meios, conforme relatado na introdução, porém com pouco sucesso. A essência do projeto trata de um equipamento que permita cortes em trajetórias retilíneas e curvilíneas; para tanto se considera o uso de lâmina de metal como ferramenta de corte.

O projeto do produto tem como requisito que a lâmina realize cortes em linha reta (Figura 40-a), em trajetórias curvas (Figura 40-b) e de forma mista: iniciando reto no lado maior da placa, realizando uma curvatura em 90° e saindo no lado menor da placa (Figura 40-c).

Figura 40 – Representação da placa e da lâmina vistas de cima: a) corte reto; b) corte curvo; c) corte misto.



Fonte: Autor.

### 3.2.2 Lista de requisitos

A partir da elaboração da linha mestra e da delimitação do projeto, foram definidos os requisitos que o projeto deve atender e que estão presentes na Tabela 1. Nesta tabela são apresentados os itens da linha mestra e o requisito que cada item deve possuir. Na coluna central observam-se princípios construtivos norteadores da máquina. A exigência (E) é algo impositivo, ou seja, o requisito precisa ser atendido, enquanto que desejo (D) trata de uma sugestão a ser levada em consideração quando possível, ambos são apresentados na coluna da esquerda.

Tabela 1 – Lista de requisitos do projeto.

E/D	Lista de requisitos para a serra de fita CNC		
	Data: 22/12/15	Página: 1/1	Folha: 1/1
	Requisitos		Responsável
<b>E</b> <b>E</b>	1. Eixos direcionais - Eixos devem estar de acordo com a DIN 66217; - Movimentos lineares e rotacionais nos eixos.		Mauricio
<b>E</b>	2. Tipos de operações - Realizar cortes retos e curvos;		
<b>E</b> <b>D</b>	3. Estrutura da serra - Resistir aos esforços da operação; - Considerar força de esticamento da lâmina.		
<b>E</b> <b>D</b>	4. Dimensões da placa - Serrar placas de até 1000 x 600 x 30 mm de espessura; - Serrar diferentes materiais com qualidade superficial.		
<b>E</b> <b>D</b>	5. Sistema de movimentação - Deslocamento nos eixos de forma automática; - Usar motores elétricos.		
<b>E</b> <b>D</b>	6. Utilização - Possuir componentes simples; - Sistema que monitore parâmetros de operação.		
<b>E</b> <b>E</b> <b>E</b>	7. Segurança - Evitar possíveis causas de acidentes; - Estar de acordo com a norma regulamentadora NR 12; - Possuir sistema de exaustão.		
<b>D</b> <b>D</b> <b>D</b>	8. Fabricação e montagem - Montagem do equipamento de forma simples e rápida; - Padronização de peças; - Custos de produção dos componentes compatível.		
<b>D</b> <b>D</b>	9. Manutenção - Peças acessíveis no mercado; - Permitir coleta da serragem.		

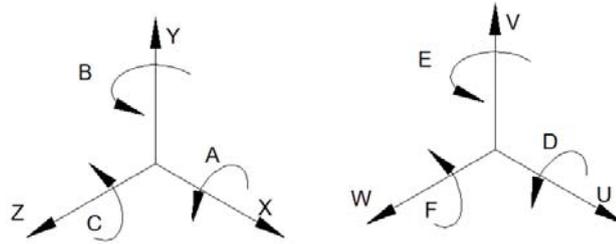
Fonte: Autor.

Após a elaboração da lista de requisitos segue explicação dos itens:

### 1. Eixos direcionais

No sistema de eixos padronizados (Figura 41) tem-se a apresentação do sistema de eixos principais X, Y e Z, com os respectivos movimentos de rotação A, B e C. Para o conjunto de eixos paralelos, tem-se os eixos U, V e W e os movimentos de rotação D, E e F, em torno dos eixos paralelos.

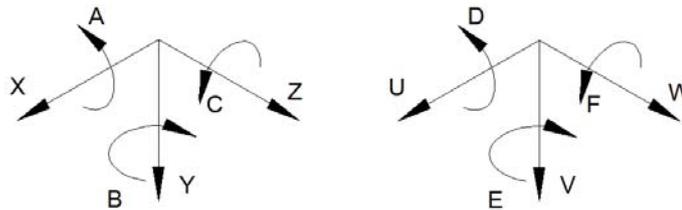
Figura 41 – Eixos direcionais padronizados.



Fonte: Adaptado de Fitzpatrick, 2013.

No sistema de eixos direcionais do equipamento (Figura 42) têm-se os movimentos direcionais nos eixos X, Y e Z. Não há movimentos lineares nos eixos paralelos U, V e W. O eixo de rotação B corresponde à torção da lâmina de serra em relação ao eixo Y. A mesa possui sistema de rotação, compreendido pelo eixo E girando em torno de V, que é paralelo ao eixo Y.

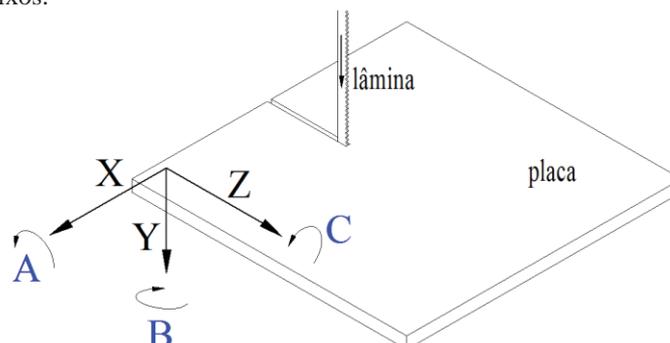
Figura 42 – Eixos direcionais do equipamento.



Fonte: Adaptado de Fitzpatrick, 2013.

O sistema de eixos foi definido baseado nos princípios dos eixos CNC; a DIN 66217 recomenda que o eixo Z deva ser o eixo árvore. Os demais eixos foram definidos pela regra da mão direita, polegar - eixo X, o indicador - eixo Y e dedo médio - eixo Z. Para o sentido de giro, o polegar representa a direção do eixo, enquanto que os demais dedos contornam o eixo e indicam o sentido de giro (Figura 43).

Figura 43 – Sistema de eixos.



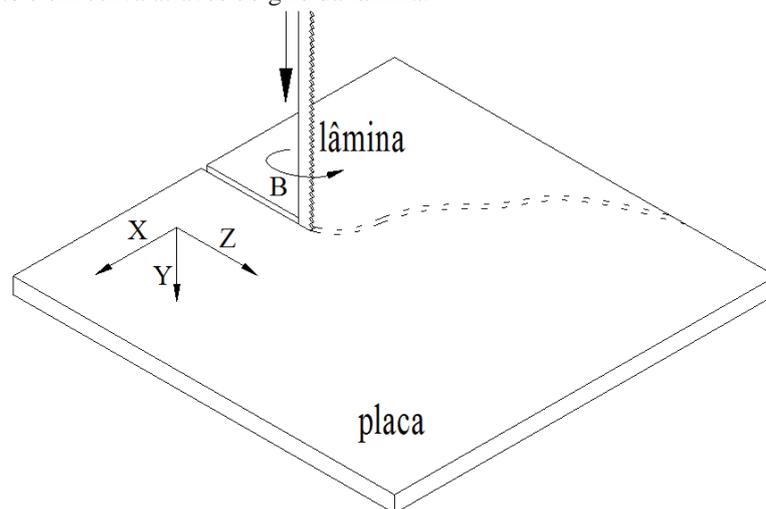
Fonte: Autor.

## 2. Tipos de operações

Para que ocorra o corte, a lâmina deve estar assentada sobre volantes. A placa é apoiada sobre a mesa e ambas se deslocam nos eixos lineares X e Z. A placa vai ao encontro dos dentes da lâmina deslocando-se somente no eixo Z para dar início a um corte reto. Em um dado instante a lâmina é girada, (eixo B), dando início ao corte em trajetória curva, onde ocorre o deslocamento combinado da placa em ambos os eixos direcionais X e Z. O serrado é concluído com a lâmina saindo na face da placa que é paralela ao eixo Z (Figura 44).

A combinação dos movimentos nos eixos X e Z, ao mesmo tempo, não permite efetuar o corte reto, pois a lâmina deve ficar paralela à trajetória.

Figura 44 – Corte reto e em curva através do giro da lâmina.

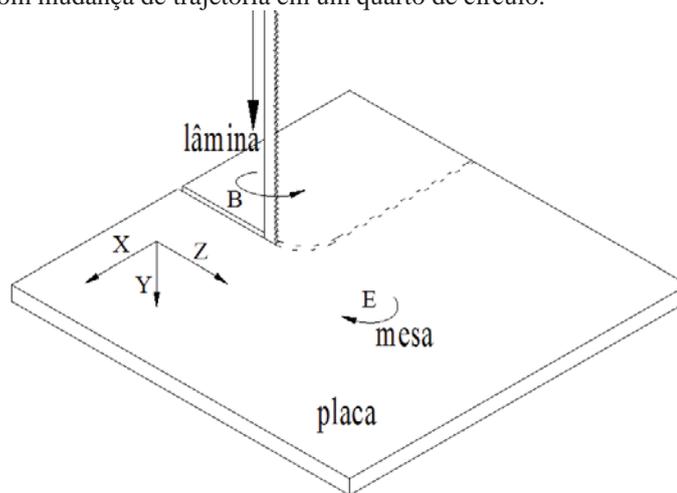


Fonte: Autor.

Com os dois movimentos de giro, isto é, a torção da lâmina e a rotação da mesa onde a placa está fixada tem-se um corte curvo adequado. A combinação dos movimentos lineares nos eixos X e Z, com os movimentos de rotação em torno dos eixos Y e V, possibilita a obtenção de cortes complexos.

A torção da lâmina combinada com os movimentos simultâneos dos eixos X e Z da mesa, os quais deslocam a placa de forma contínua possibilitando um serrado de curvas com a trajetória que resulte em um quarto (1/4) de círculo, ou seja, 90° em relação ao contato inicial dos dentes da lâmina na placa, o serrado começa na face paralela ao eixo X e termina na face paralela ao eixo Z (Figura 45).

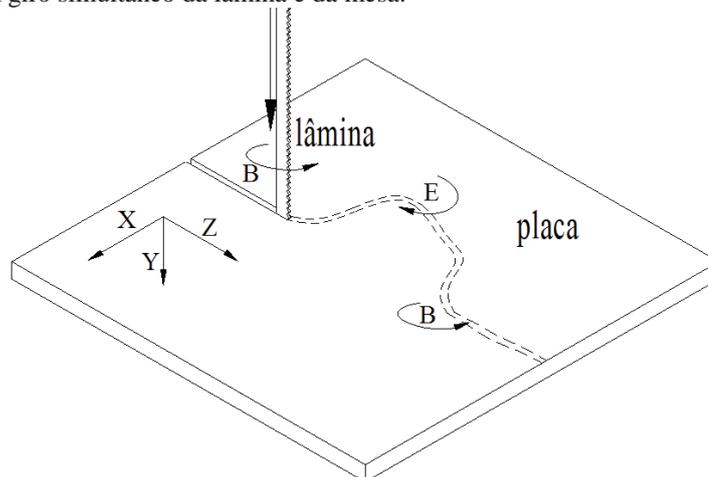
Figura 45 – Corte reto com mudança de trajetória em um quarto de círculo.



Fonte: Autor.

Com o movimento de giro combinado entre lâmina e mesa, é possível a lâmina entrar paralela ao eixo Z e cortar em linha reta e, com um giro na lâmina no sentido anti-horário, cortar uma trajetória curva tendo o auxílio do giro na mesa que contém a placa. A mesa também está se deslocando em ambos os eixos direcionais, X e Z. Completando a trajetória curva programada, a lâmina segue cortando em linha reta até sair na face oposta ao início do corte, que é paralela ao eixo X (Figura 46).

Figura 46 – Corte com giro simultâneo da lâmina e da mesa.



Fonte: Autor.

### 3. Estrutura da serra

A estrutura da serra de fita deve suportar os esforços envolvidos durante o serramento. Com o desejável monitoramento da força de esticamento na lâmina, tem-se a concepção de um equipamento com autodiagnóstico vislumbrando o conceito da Indústria 4.0.

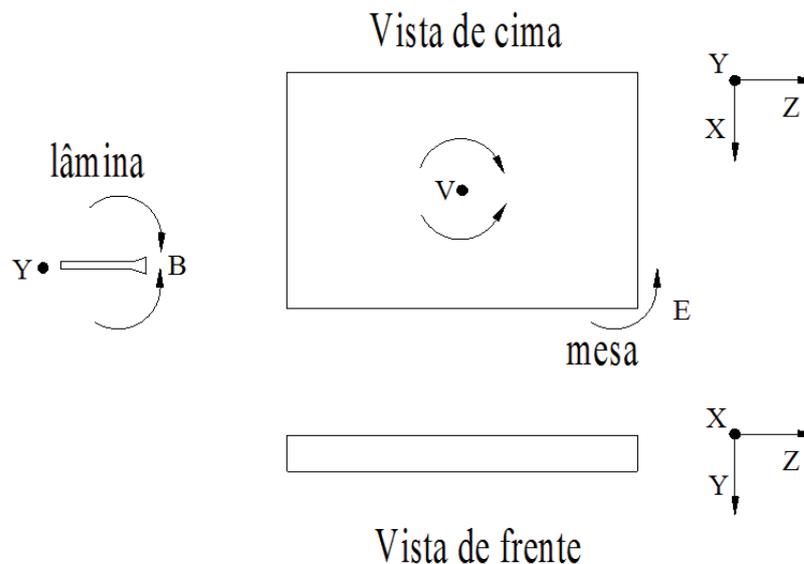
#### 4. Dimensões da placa

O propósito da serra de fita é serrar placas planas de madeira e derivados, MDF e compensado naval. As dimensões das placas interferem nas medidas do equipamento, assim, as placas devem ter até 1000 mm de comprimento, 600 mm de largura e 30 mm de espessura. Para garantir uma qualidade na superfície serrada é desejável que a máquina apure os dados de corte assim como o estado de afiação da ferramenta, integrando-a na Indústria 4.0.

#### 5. Sistema de movimentação

A mesa avança ao longo dos eixos direcionais. A lâmina não apresenta este movimento de avanço, porém rotaciona no sentido horário e anti-horário, em relação ao eixo Y. Vista de cima, a mesa também gira em relação ao eixo V (Figura 47). Para ter precisão nos movimentos, é recomendável o uso de servomotores que asseguram o acionamento CNC em seus eixos.

Figura 47 – Movimentos da lâmina e da mesa.



Fonte: Autor.

#### 6. Utilização

O equipamento deve possuir interfaces amigáveis para que o usuário possa operá-lo de forma simples maximizando a produção. Coletar e analisar os dados do processo de corte em tempo real torna a serra de fita um diferencial, permitindo que ela se adapte às condições do processo atendendo ao conceito da Indústria 4.0.

#### 7. Segurança

A serra de fita deve ser a mais segura possível, estando adequada a NR 12 impedindo acionamentos acidentais ou deliberados, acesso às partes móveis durante seu funcionamento;

também permitir a exaustão da serragem, garantindo à segurança do operador contra a inalação de poeiras que possam prejudicar sua saúde.

### **8. Fabricação e montagem**

Padronizar peças auxilia na montagem tornando-a mais rápida, diminuindo gastos com mão de obra e menores custos na produção dos componentes, o que torna o produto competitivo no mercado. Ao utilizar peças que utilizam poucos processos convencionais de fabricação tem-se um projeto fácil.

### **9. Manutenção**

O acesso às peças de reposição no mercado garante uma manutenção fácil. A armazenagem da serragem evita a deposição e acúmulo de partículas indesejáveis nas partes móveis do equipamento aumentando a vida útil dos componentes.

Após a elaboração da lista de requisitos seguindo a linha mestra, passa-se a segunda fase da metodologia de projeto proposta por Pahl et al. (2013) que é a fase do projeto conceitual.

## **3.3 Projeto conceitual (2ª fase)**

O projeto conceitual é a segunda fase da metodologia de projeto de Pahl et al. (2013). No início utiliza-se da abstração para esclarecimento do problema de projeto chegando-se na função global e estrutura de funções. Após são elencados os princípios de funcionamento apropriados, não se fixando apenas em uma solução. Tais princípios combinados resultam na estrutura de funcionamento e por consequência na solução preliminar.

A etapa se inicia com a elaboração da abstração; obtenção da função global, subfunções e aos princípios de atendimento das mesmas.

### **3.3.1 Abstração e elaboração da estrutura de funções**

Na abstração é feita uma análise dos itens da lista de requisitos em relação às condicionantes funcionais. O objetivo é determinar a estrutura funcional sem fixar uma solução em particular ou como única possibilidade. Busca-se conhecer o geral e principal chegando ao núcleo do problema de projeto e, por conseguinte na função global e suas subfunções. Pahl et al. (2013) recomenda que o procedimento siga as seguintes etapas:

- a) Primeiro: suprimir as vontades mentalmente;
- b) Segundo: considerar os requisitos que afetam diretamente as principais funções;
- c) Terceiro: converter requisitos quantitativos em qualitativos;

- d) Quarto: ampliar os requisitos do item anterior;
- e) Quinto: formular o problema de forma neutra em relação à solução.

A Tabela 2 apresenta o resultado das cinco etapas que auxiliam na elaboração da estrutura de funções.

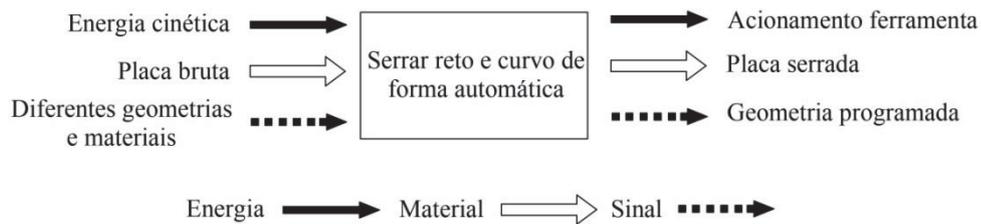
Tabela 2 – Resultado do processo de abstração.

<p>Resultado da 1ª e 2ª etapas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Movimentos lineares e rotacionais nos eixos.</li> <li>• Realizar cortes retos e curvos.</li> <li>• Resistir aos esforços da operação.</li> <li>• Serrar placas de até 1000 x 600 x 30 mm de espessura.</li> <li>• Serrar diferentes materiais com qualidade superficial.</li> <li>• Deslocamento nos eixos de forma automática.</li> <li>• Sistema que monitore parâmetros de operação.</li> <li>• Equipamento de acordo com a norma regulamentadora NR 12.</li> <li>• Projeto de utilização e fabricação simples.</li> <li>• Peças padronizadas e acessíveis no mercado.</li> </ul>
<p>Resultado da 3ª etapa</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Serrar diferentes geometrias e dimensões de variados materiais.</li> <li>• Movimentos automáticos nos eixos direcionais.</li> <li>• Manter a lâmina com a força de esticamento adequada.</li> <li>• Movimentar a placa através de comando numérico computadorizado (CNC).</li> <li>• Dispositivo de acionamento.</li> <li>• Estrutura que suporte esforços.</li> </ul>
<p>Resultado da 4ª etapa</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Torcer lâmina e girar mesa para serrar na geometria programada.</li> <li>• Prender placa e movimentá-la nos eixos direcionais.</li> <li>• Tensionar lâmina.</li> <li>• Posicionar e direcionar placa.</li> <li>• Acionar lâmina.</li> <li>• Estrutura que suporte e absorva esforços.</li> </ul>
<p>Resultado da 5ª etapa</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fixar, posicionar e movimentar automaticamente uma placa, nos eixos direcionais, serrando em geometrias retas e curvas, suportando os esforços do processo.</li> </ul>

Fonte: Autor.

Formulado o problema a partir da abstração, é possível apresentar o núcleo da tarefa global e indicar a função global mediante a utilização de um diagrama de blocos. A inter-relação entre variáveis de entrada e saída orientam a conversão de energia, material e/ou sinal, de forma neutra no caminho de chegar à solução. A Figura 48 apresenta a estrutura da função global.

Figura 48 – Função global.



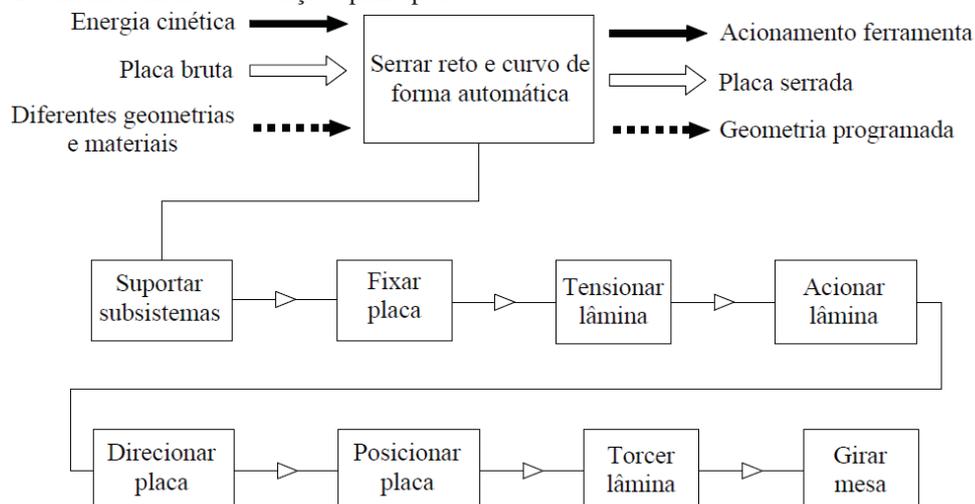
Fonte: Autor.

De acordo com Pahl et al. (2013) a função global pode ser desdobrada em subfunções de menor complexidade. A interligação das subfunções resulta na estrutura da função, que representa a função global.

Os objetivos desta etapa são: simplificar o desdobramento da função global para posterior busca dos princípios de solução; e interligar as subfunções em uma estrutura de função simples, clara e confiável.

A Figura 49 apresenta a estrutura de funções que atendem a função global. As subfunções são funções primárias, ou seja, satisfazem diretamente à função global. Tais subfunções foram elaboradas de acordo com a sequência de serramento de uma placa, em uma serra de fita CNC.

Figura 49 – Desmembramento das funções principais.



Fonte: Autor.

A primeira etapa consiste da sustentação dos sistemas de fixação, suporte e movimentação da placa e da ferramenta; a segunda compreende a configuração para fixação da placa; a terceira contempla o tensionamento da lâmina de serra, sendo importante para garantir a qualidade do serrado e a integridade da ferramenta; a quarta etapa apresenta a forma de acionamento da lâmina; a quinta, o direcionamento da placa nos eixos; a sexta, o sistema de movimentação da placa; a sétima aborda o sistema para torcer a lâmina realizando cortes retos e em pequenas curvas; e por fim, a oitava etapa trata do sistema para girar a mesa e auxiliar nos cortes curvos de geometrias complexas.

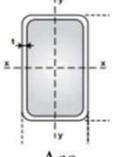
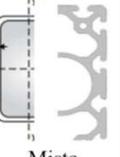
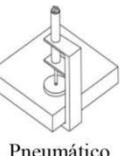
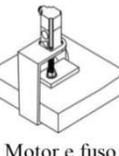
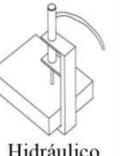
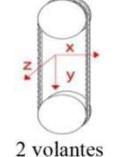
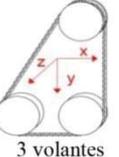
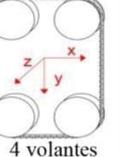
Elaborada a estrutura de funções, parte-se para a busca por soluções que atendam a função global do projeto. Com o desmembramento das subfunções, são definidos os princípios de funcionamento e estudada a solução mais exequível.

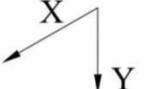
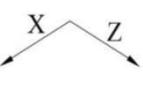
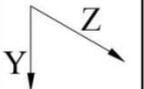
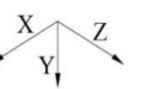
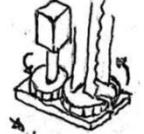
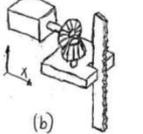
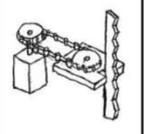
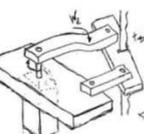
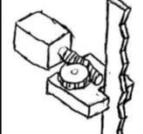
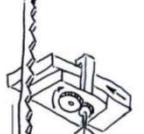
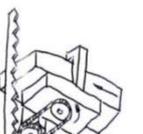
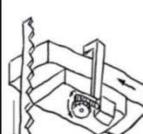
### 3.3.2 Combinações dos princípios de funcionamento

Na estruturação dos princípios de funcionamento de cada subfunção, foram pesquisadas de três a cinco opções para atender as necessidades do projeto. As variantes elencadas tratam possibilidades de funcionamento tendo em vista aplicações similares e já existentes.

A Tabela 3 ilustra a matriz morfológica das possíveis soluções sendo composta por oito linhas e seis colunas, na qual são apresentadas as alternativas de soluções que correspondam à função global do projeto. Após é realizada a descrição das variantes que se encontram nas linhas e colunas a fim de elucidar as possíveis escolhas.

Tabela 3 – Matriz morfológica das possíveis soluções.

SUBFUNÇÕES		POSSÍVEIS CONCEPÇÕES				
		A	B	C	D	E
1	Suportar subsistemas	 Aço	 Alumínio	 Misto		
2	Fixar placa	 Pneumático	 Motor e fuso	 Hidráulico		
3	Tensionar lâmina	 2 volantes	 3 volantes	 4 volantes		

4	Acionar lâmina	 Motor elétrico e inversor de frequência	 Motor elétrico e redutor	 Motor hidráulico	 Motor pneumático	
5	Direcionar placa	 Eixos X e Y	 Eixos X e Z	 Eixos Y e Z	 Eixos X, Y e Z	
6	Posicionar placa	 Recirculação externa	 Recirculação interna esférica	 Recirculação interna final		
7	Torcer lâmina	 Engrenagens dentes retos	 Engrenagens cônicas	 Corrente	 4 barras	 Coroa e sem-fim
8	Girar mesa	 Engrenagens dentes retos	 Corrente	 Engrenagens cônicas	 4 barras	 Coroa e sem-fim

Fonte: Autor.

Segue a explanação dos itens da Tabela 3:

1. Para sustentar os subsistemas: volantes, sistemas de posicionamento, transmissão e acessórios, têm-se na linha um, três opções de solução: na coluna A, uma estrutura de perfis retangulares de aço que é similar às utilizadas na construção de equipamentos; na coluna B, têm-se perfis de alumínio estrutural Prodomus (2016) que auxiliam em uma modularização; a coluna C ilustra uma estrutura mista, composta por perfis de aço e de alumínio estrutural.

2. Na fixação da placa apresentada na segunda linha, são apresentadas três opções de solução: a coluna A apresenta um sistema pneumático com ventosas para fixar as placas; a coluna B apresenta um sistema composto por motor e fuso; a coluna C elenca um sistema hidráulico por meio de um cilindro que se desloca e prende a placa.

3. Para tensionar a lâmina de fita, são apresentadas três opções na terceira linha: na coluna A, o esticamento com dois volantes que é similar as serras convencionais; na coluna B uma opção com três volantes; e na coluna C a sugestão é por quatro volantes requerendo uma estrutura mais robusta.

4. O acionamento dos volantes que sustentam a lâmina, na linha quatro inclui quatro opções: na coluna A, um motor elétrico acionado com um inversor de frequência; na coluna B, acionamento por motor elétrico com caixa de redução acoplada; na coluna C, a utilização de acionamento por um motor pneumático; e na coluna D, o acionamento por um motor hidráulico.

5. O direcionamento da placa nos eixos é tratado na linha cinco e tem quatro opções: na coluna A, possibilidade de deslocar nos eixos X e Y; coluna B, deslocamento em X e Z; na coluna C, deslocamento em Y e Z; e na coluna D, deslocamento nos três eixos, X, Y e Z.

6. O posicionamento da placa com fusos de esferas recirculantes é abordado na sexta linha tendo três opções: na coluna A, o fuso de esferas com recirculação externa na castanha; na coluna B, recirculação interna no fuso; e na coluna C, recirculação interna no final, com furo no interior da castanha.

7. Uma das principais características do projeto, o corte de geometrias em curva, é atendido em parte pela torção da lâmina e está presente na sétima linha com cinco opções, todas com acionamento por servomotor: na coluna A, têm-se duas engrenagens de dentes retos sendo que em uma delas há uma fenda por onde passa a lâmina; na coluna B, duas engrenagens cônicas na qual um delas ficaria concêntrica a uma placa que direcionaria a lâmina; na coluna C, duas engrenagens que são movidas por intermédio de uma corrente; a coluna D apresenta um mecanismo de 4 barras conectado a uma placa que transmite o movimento à lâmina; e na coluna E, um sistema composto por uma coroa e parafuso sem-fim.

8. O giro da mesa complementa o corte de geometrias em curva, está proposto na oitava linha, também com cinco opções e acionamento por servomotor: na coluna A, têm-se engrenagens de dentes retos e com uma delas concêntrica ao centro da mesa; na coluna B, a mesa tem em seu centro uma engrenagem que é movida por uma corrente; na coluna C, engrenagens cônicas giram a mesa; na coluna D, um mecanismo de 4 barras rotaciona a mesa; e na coluna E, coroa e parafuso sem-fim são responsáveis pelo movimento de giro da mesa.

Devido ao grande número de variantes de soluções é necessário realizar uma análise qualitativa e descartar as que não atendem aos requisitos básicos. Tal avaliação é importante visto que as variantes devem ser compatíveis entre si.

A Tabela 4 identifica as variantes de solução descritas para escolha das que mais se enquadram no projeto. Elas devem satisfazer alguns quesitos como: se são condizentes com a lista de requisitos; se podem ser facilmente implementadas; se atendem aos critérios mínimos de segurança; e se são realizáveis. Nem todos os princípios de solução satisfazem todas as exigências propostas. Como critério de seleção, o símbolo de positivo (+) significa que a

solução atende completamente as exigências, o sinal negativo (-) quando não atende um ou mais itens das exigências e o sinal de interrogação (?), quando é necessário mais informações para tomar a decisão.

Tabela 4 – Avaliação das possíveis soluções.

Lista de Seleção das Variantes de Solução							Pág.: 1	
		Projeto: Serra de fita CNC						
Subfunções	Lista de variáveis	Avaliar alternativas de solução de acordo com os critérios de seleção				Decidir		
		Simbologia:				Simbologia:		
		(+)				Sim		(+) Prosseguir com o desenvolvimento da solução
		(-)				Não		(-) Descartar solução.
		(?)				Escassez de informações		(?) Conseguir informação.
		As exigências da lista de requisitos foram satisfeitas						
		Pode ser implantada facilmente						
		Atende a requisitos de Segurança						
Realizáveis em princípio								
Observações (referências, justificativas)							Decisão	
1 Suportar subsistemas	L1CA	+	+	-	-	Equipamento pesado afetando a segurança	-	
	L1CB	+	+	+	-	Dificuldades na montagem	-	
	L1CC	+	+	+	+		+	
2 Fixar placa	L2CA	+	+	+	+		+	
	L2CB	+	+	+	+		+	
	L2CC	+	+	-	-	Serragem pode interferir no funcionamento	-	
3 Tensionar lâmina	L3CA	+	+	+	+		+	
	L3CB	-	+	+	-	Montagem não é simples	-	
	L3CC	-	+	-	-	Muitos componentes, estrutura robusta.	-	
4 Acionar lâmina	L4CA	+	+	+	+		+	
	L4CB	+	+	+	+		+	
	L4CC	+	+	-	-	Dificuldade de controlar	-	
	L4CD	-	-	+	-	Dificuldade de implementar	-	
5 Direcionar placa	L5CA	+	-	-	+	Interfere na estrutura do equipamento	-	
	L5CB	+	+	+	+		+	
	L5CC	+	-	-	+	Interfere na estrutura do equipamento	-	
	L5CD	+	+	+	+		+	
6 Posicionar placa	L6CA	+	+	+	+		+	
	L6CB	-	+	+	+	Dificuldade na manutenção	-	
	L6CC	-	+	+	+	Dificuldade na manutenção	-	
7 Torcer lâmina	L7CA	+	+	+	-	Montagem demorada	-	
	L7CB	+	-	+	-	Dificuldade de ajustar na estrutura	-	
	L7CC	+	+	+	-	Muitas peças	-	
	L7CD	+	-	-	-	Dificuldade de executar o movimento	-	
	L7CE	+	+	+	+		+	
8 Girar mesa	L8CA	+	+	+	-	Montagem demorada	-	
	L8CB	+	+	+	-	Muitas peças	-	
	L8CC	+	-	+	-	Dificuldade de ajustar na estrutura	-	
	L8CD	+	-	-	-	Dificuldade de executar o movimento	-	
	L8CE	+	+	+	+		+	

Fonte: Autor.

As soluções mais promissoras, com sinal positivo, são indicadas na Tabela 5 e seguiram para a etapa de concretização e análise.

Tabela 5 – Seleção das possíveis variantes de soluções.

SUBFUNÇÕES		POSSÍVEIS CONCEPÇÕES				
		A	B	C	D	E
1	Suportar subsistemas	 Aço	 Alumínio	 Misto		
2	Fixar placa	 Pneumático	 Motor e fuso	 Hidráulico		
3	Tensionar lâmina	 2 volantes	 3 volantes	 4 volantes		
4	Acionar lâmina	 Motor elétrico e inversor de frequência	 Motor elétrico e redutor	 Motor hidráulico	 Motor pneumático	
5	Direcionar placa	 Eixos X e Y	 Eixos X e Z	 Eixos Y e Z	 Eixos X, Y e Z	
6	Posicionar placa	 Recirculação externa	 Recirculação interna esférica	 Recirculação interna final		
7	Torcer lâmina	 Engrenagens dentes retos	 Engrenagens cônicas	 Corrente	 4 barras	 Coroa e sem-fim
8	Girar mesa	 Engrenagens dentes retos	 Corrente	 Engrenagens cônicas	 4 barras	 Coroa e sem-fim

Fonte: Autor.

V1 V2

Para a variante de solução V1, tem-se uma estrutura de construção mista entre perfis de aço e alumínio estrutural, com fixação da placa realizada por ventosas pneumáticas, esticamento da lâmina com dois volantes, acionamento da lâmina com motor elétrico e inversor de frequência, placas sendo direcionadas nos eixos X e Z, posicionamento da placa por servomotor e fuso de esferas com recirculação externa, sistema de torção da lâmina e giro da mesa executado por servomotor, coroa e parafuso sem-fim.

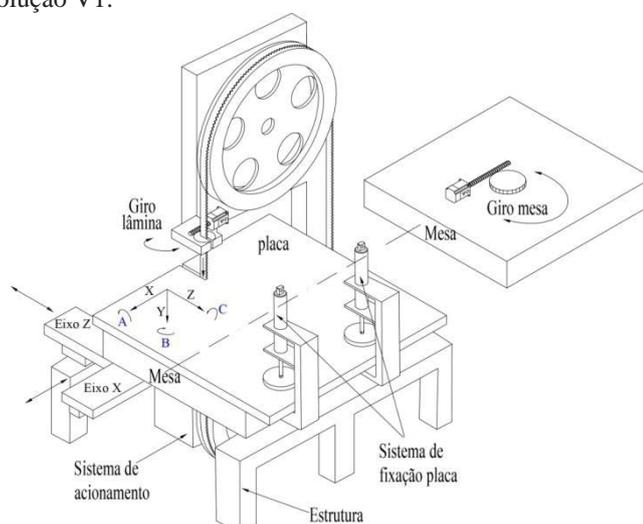
A variante de solução V2 é similar a V1, porém apresenta para fixação da placa um sistema composto por motor e fuso. Possibilita deslocamento nos três eixos direcionais X, Y e Z. Em relação ao acionamento da lâmina, prevê acionamento com o motor elétrico acoplado a um redutor.

Na etapa de concretização as duas variantes mais promissoras serão avaliadas por uma análise quantitativa, a fim de definir a solução mais adequada para o projeto da serra de fita CNC.

### 3.3.3 Concretização das variantes de solução

Para resolver o problema de projeto as combinações das variantes mais favoráveis foram esboçadas em concepções. A Figura 50 apresenta o esboço da variante de solução V1, composta pela estrutura que sustenta os volantes na qual a lâmina é tensionada. O acionamento ocorre por um motor elétrico e inversor de frequência. A movimentação se dá ao longo dos eixos X e Z. A fixação da placa é realizada por cilindros pneumáticos. A lâmina é torcida por um sistema com servomotor, parafuso sem-fim e coroa. Tal princípio é o mesmo adotado para o giro da mesa.

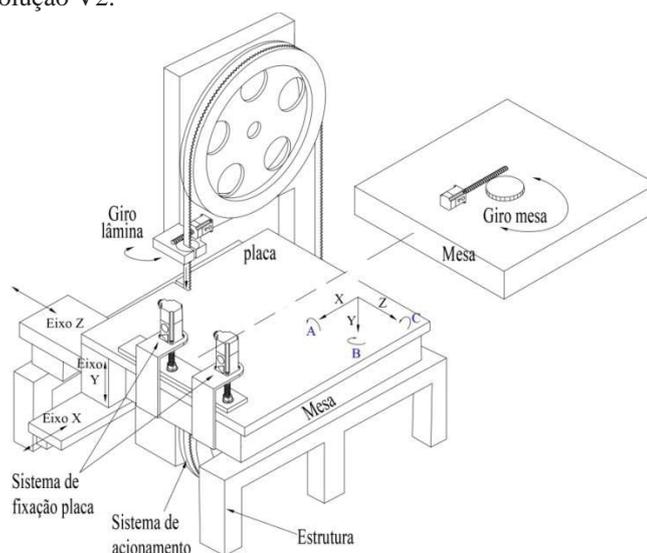
Figura 50 – Variante de solução V1.



Fonte: Autor.

A Figura 51 ilustra a variante de solução V2. O acionamento da lâmina ocorre com motor elétrico e redutor. Já o sistema de movimentação da mesa com a placa, ocorre nos 3 eixos: X, Y e Z. A fixação da placa apresenta um motor e fuso que prensam um suporte contra a placa. A estrutura e os sistemas para torção da lâmina e giro da mesa são idênticos à variante V1.

Figura 51 – Variante de solução V2.



Fonte: Autor.

Para identificar a variante de solução mais promissora, uma análise quantitativa é realizada.

### 3.3.4 Análise quantitativa das variantes

Para auxiliar na tomada de decisão de qual variante é a melhor para ser desenvolvida na fase de anteprojeto, foi utilizada uma análise quantitativa através do método de comparação de pontos. As necessidades e condições para suprir a finalidade do equipamento, foram pontuadas para cada solução. Os valores variaram de acordo com a precisão que a solução se aproxima da ideal. Os critérios de avaliação e ponderação foram baseados na lista de requisitos, possuem caráter intuitivo com ênfase no que é mais importante para o projeto considerando a experiência do projetista em relação ao produto pretendido.

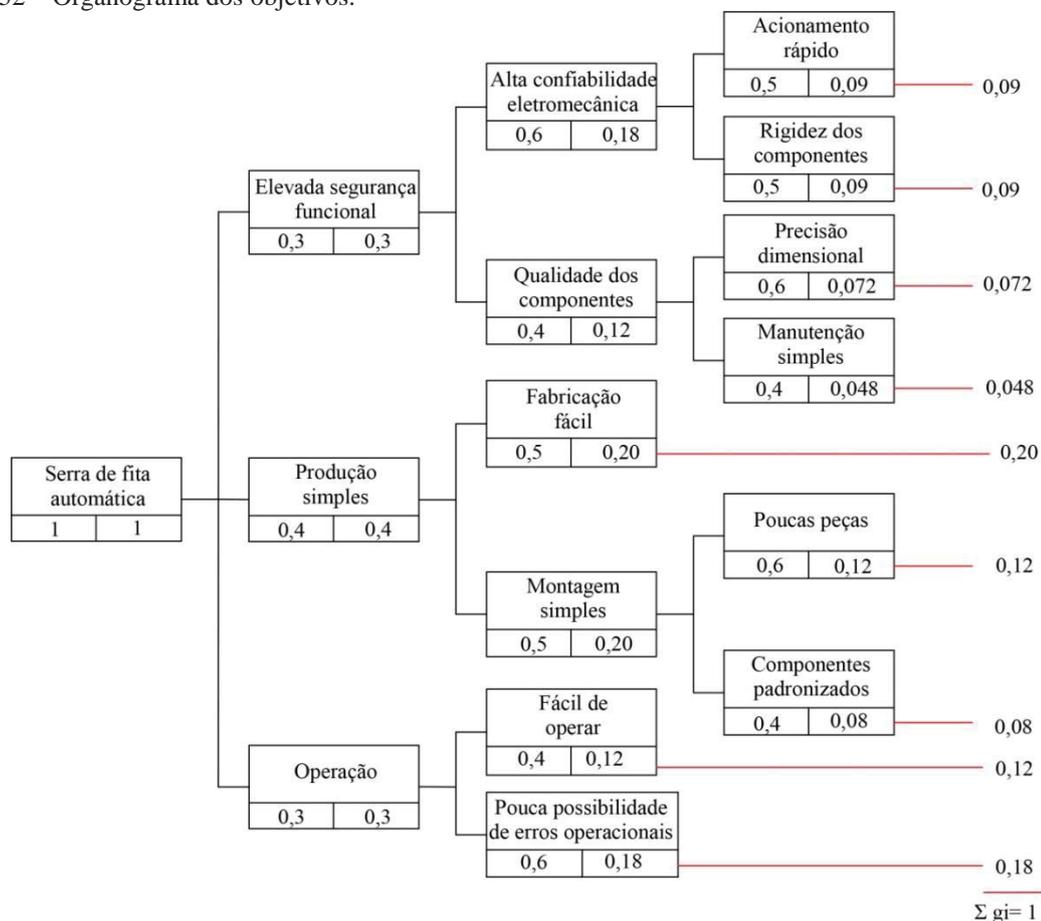
Na fase de avaliação, a primeira etapa consiste na obtenção do organograma de objetivos, sugerido pela metodologia de Pahl et al. (2013), que determina nível a nível os fatores de ponderação com valores entre 0 e 1. A soma dos fatores de ponderação de cada

nível deve ser sempre igual a 1. A análise por etapa permite obter os fatores de ponderação através dos objetivos de maior complexidade para os de menor.

A Figura 52 apresenta o organograma dos objetivos com quatro níveis. O primeiro representa a meta, ou seja, a serra de fita automática. O segundo compreende os três critérios mais relevantes para o equipamento: elevada segurança funcional da máquina no geral; produção simples das peças e componentes que são fabricados para montagem; e operação da máquina que deve ocorrer de forma simples. O terceiro e quarto nível desmembram os critérios do segundo nível com características funcionais, manutenção e quesitos de fabricação e obtenção.

O valor numérico é obtido pela multiplicação do fator de ponderação desse nível (valor da esquerda) pelo fator de ponderação de níveis superiores (valor da esquerda). Por exemplo: o fator de ponderação é 0,6 para “alta confiabilidade eletromecânica”, no terceiro nível; o mesmo é multiplicado pelo valor 0,3 da “elevada segurança funcional” (2º nível), resultando em 0,18 que é o valor da direita (3º nível). Tal analogia é seguida para o quarto nível, cujo somatório dos fatores resulta um (1).

Figura 52 – Organograma dos objetivos.



Após obter os fatores de ponderação, os objetivos foram avaliados de acordo com a diretriz da VDI 2225 *apud* Pahl et al. (2013). Dessa forma, a escala de valores da VDI 2225 vai de 0 a 4, na qual o valor zero (0) representa uma solução insatisfatória, o valor um (1) para solução ainda sustentável, dois (2) solução suficiente, três (3) solução boa e quatro (4) solução muito boa. A Tabela 6 apresenta a magnitude dos valores para os parâmetros objetivos finais provenientes do organograma.

Tabela 6 – Esquema de avaliação para atribuição de valores.

Escala de valores		Magnitude dos Valores								
Análise de valor Pontos	VDI 2225 Pontos	Acionamento rápido	Rigidez dos componentes	Precisão dimensional	Manutenção simples	Fabricação fácil	Poucas peças	Componentes padronizados	Fácil de operar	Pouca possibilidade de erros de operação
0	0	Muito lento	Muito baixa	Impreciso	Muito complicado	Muito difícil	Muito elevado	Muito baixo	Muito difícil	Muito alto
1										
2	1	Lento	Baixa	Pouco preciso	Complicado	Difícil	Elevado	Baixo	Difícil	Alto
3										
4	2	Normal	Média	Média	Média	Regular	Médio	Médio	Regular	Médio
5										
6	3	Rápido	Elevada	Preciso	Simples	Fácil	Poucas	Elevado	Fácil	Pouco
7										
8	4	Muito rápido	Bem elevada	Muito preciso	Muito simples	Muito fácil	Muito poucas	Bem elevado	Muito fácil	Muito pouco
9										
10										

Fonte: Autor.

Com os parâmetros objetivos valorados, foi realizada a avaliação das duas variantes de solução para a serra de fita automática, presentes na Tabela 7. Cada variante foi analisada de acordo com os nove critérios de avaliação (coluna 1) provenientes do organograma de objetivos que são derivados da lista de requisitos.

Na segunda coluna da Tabela 7, encontram-se os fatores de ponderação provenientes da árvore de objetivos; na terceira, os parâmetros para análise de cada critério e, na quarta, as unidades de medidas dos critérios de avaliação.

Na coluna característica é atribuída a situação de cada critério, enquanto que na coluna valor ( $W_i$ ) é atribuído o valor numérico da solução de acordo com a VDI 2225 *apud* Pahl et al. (2013). O valor ponderado é obtido da multiplicação do fator de ponderação pelo valor da VDI 2225, de 0 a 4, conforme características de cada critério.

Com o somatório dos critérios, obtém-se o valor global  $GW_i$ . O valor parcial da solução ( $W_i$ ), resulta do valor global ( $GW_i$ ) dividido pelo número de critérios (9) vezes o valor máximo possível para cada critério (4). Assim, para a variante 1, tem-se 28 dividido por ( $9 \times 4 = 36$ ), resultando no valor global  $W_1 = 0,78$ . O valor global ponderado ( $GW_{g_i}$ ) resulta do somatório dos valores ponderados de cada solução.

Tabela 7 – Avaliação das variantes V1 e V2.

Critérios de avaliação			Parâmetros		Variante 1			Variante 2		
N	Critério	fator	Nome	Unid.	Caract. (e <sub>i1</sub> )	Valor (W <sub>i1</sub> )	Valor pond.	Caract. (e <sub>i2</sub> )	Valor (W <sub>i2</sub> )	Valor pond.
1	Acionamento rápido	0,09	Rápida resposta	-	Muito rápido	4	0,36	Rápido	3	0,27
2	Rigidez dos componentes	0,09	Confiabilidade	-	Elevada	3	0,27	Média	2	0,18
3	Precisão dimensional	0,072	Qualidade componentes	-	Preciso	3	0,216	Preciso	3	0,216
4	Manutenção simples	0,048	Simplicidade na manutenção	-	Simples	3	0,144	Simples	3	0,144
5	Fabricação fácil	0,20	Simplicidade na fabricação	-	Fácil	3	0,6	Fácil	3	0,6
6	Poucas peças	0,12	Quantidade de componentes	-	Poucas	3	0,36	Média	2	0,24
7	Componentes padronizados	0,08	Peças padronizadas	-	Elevado	3	0,24	Elevado	3	0,24
8	Fácil de operar	0,12	Facilidade na operação	-	Fácil	3	0,36	Regular	2	0,24
9	Pouca possibilidade de erros de operação	0,18	Possibilidade de erros na operação	-	Pouco	3	0,54	Médio	2	0,36
		$\Sigma g_i=1$				$GW_1 = 28$	$GW_{g1} = 3,09$		$GW_2 = 23$	$GW_{g2} = 2,49$
						$W_1 = 0,78$	$W_{g1} = 0,309$		$W_2 = 0,64$	$W_{g2} = 0,249$

Fonte: Autor.

A partir da avaliação das duas variantes de solução, desponta com maior valor global a variante de solução V1, tratando-se da melhor escolha para prosseguir na próxima etapa. A VDI 2225 *apud* Pahl et al. (2013) recomenda que a solução com maior valor global seja levada adiante na fase de anteprojeto.

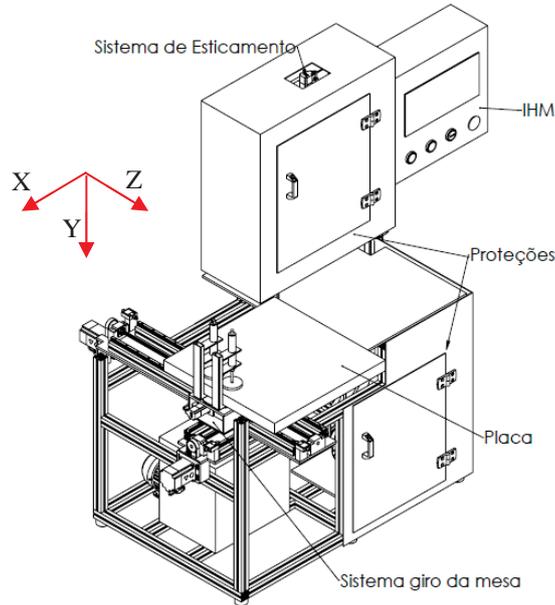
### 3.4 Anteprojeto (3ª fase)

Esta é a terceira fase da metodologia de projeto de Pahl et al. (2013). De acordo com o autor, nessa fase parte-se da estrutura de funcionamento e constrói-se de maneira clara e completa a estrutura do produto. É preciso dar ênfase às definições concretas de subconjuntos e componentes específicos. Assim, subsidiado pela lista de requisitos e corroborado pela estrutura de funções, chega-se ao anteprojeto do equipamento (Figuras 53 e 54), a partir da variante V1, a qual é exposta de forma geral e sequencialmente em seus subsistemas; também eixos e definições são pormenorizados e explicados.

A Figura 53 apresenta a serra de fita em perspectiva privilegiando sua parte frontal, que é composta pela Interface Homem/Máquina (IHM) com os botões de acionamento, parada, emergência e sinalização. Têm-se as proteções dos volantes, superior e inferior, para evitar acidentes, também há o sistema de esticamento automático da lâmina para monitorar a

tensão na mesma e corrigi-la durante a operação, e o sistema de giro da placa, onde está situada a placa.

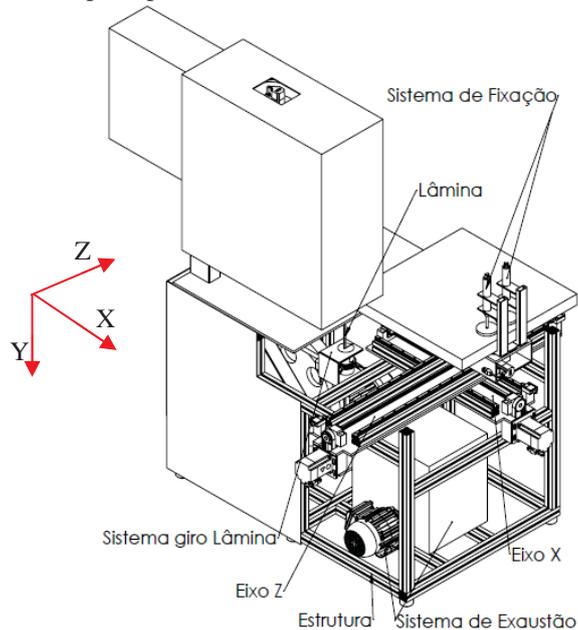
Figura 53 – Perspectiva frente e lateral da serra de fita.



Fonte: Autor.

A Figura 54 apresenta a estrutura evidenciando os perfis modulares, sistema de fixação da placa composto por cilindros pneumáticos e os eixos direcionais da mesa X e Z. Ilustra o sistema de exaustão, composto por motor e reservatório para armazenamento da serragem.

Figura 54 – Perspectiva lateral e parte posterior da serra de fita.



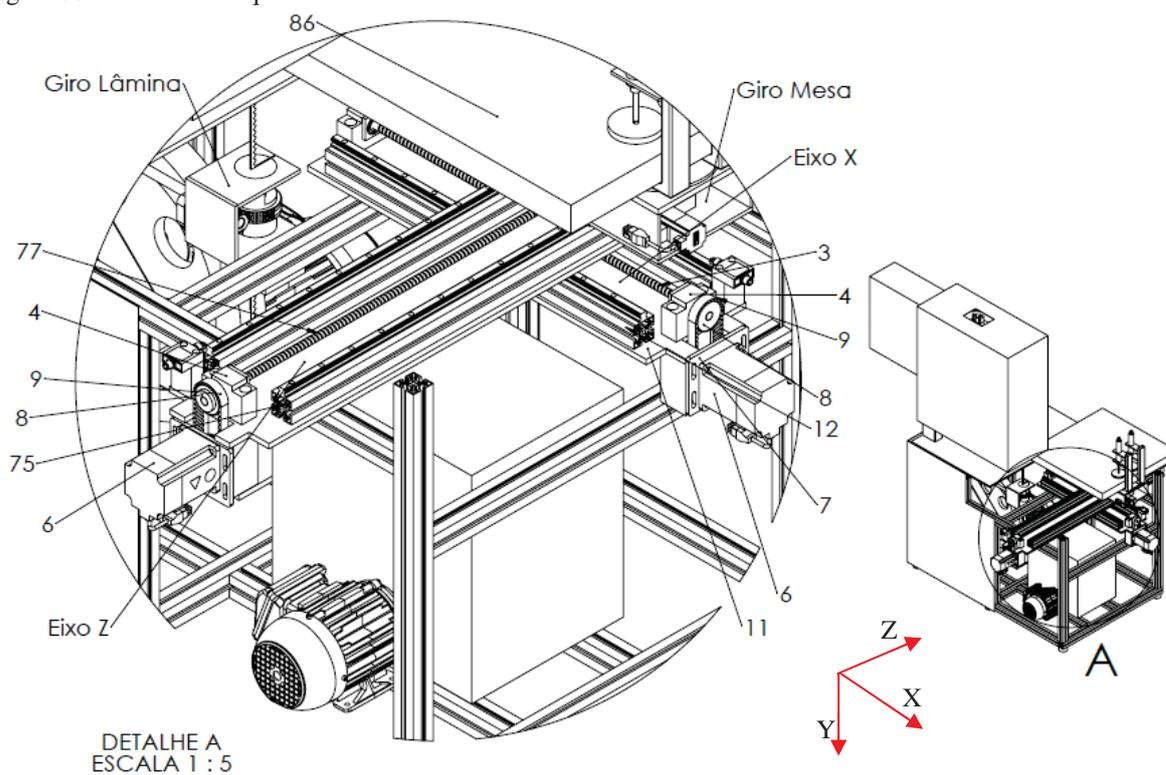
Fonte: Autor.

### 3.4.1 Sistema de eixos

De acordo com as definições do equipamento, o sistema para movimentação da mesa é composto pelos eixos transversal X e longitudinal Z (Figura 55). A placa (86) não muda de altura, portanto os deslocamentos ocorrem em X e Z. Os sistemas são acionados por servomotores (6), com transmissão por polias (8) e correia dentada (9). As mesmas são alojadas na extremidade dos fusos de esferas (3 e 77), que ficam sustentados por mancais (4) e rolamentos. Todo esse conjunto está apoiado sobre uma chapa metálica (11), que suporta perfis modulares de alumínio (12 e 75) na qual são montados os patins das guias lineares, conferindo precisão ao movimento linear de cada eixo.

Sobre o eixo Z está situada a mesa giratória, compreendida pelo mecanismo de giro e suportes que sustentam os cilindros pneumáticos, responsáveis pela fixação da placa. Tal dispositivo será detalhado no sistema de rotação da mesa.

Figura 55 – Eixos da máquina.

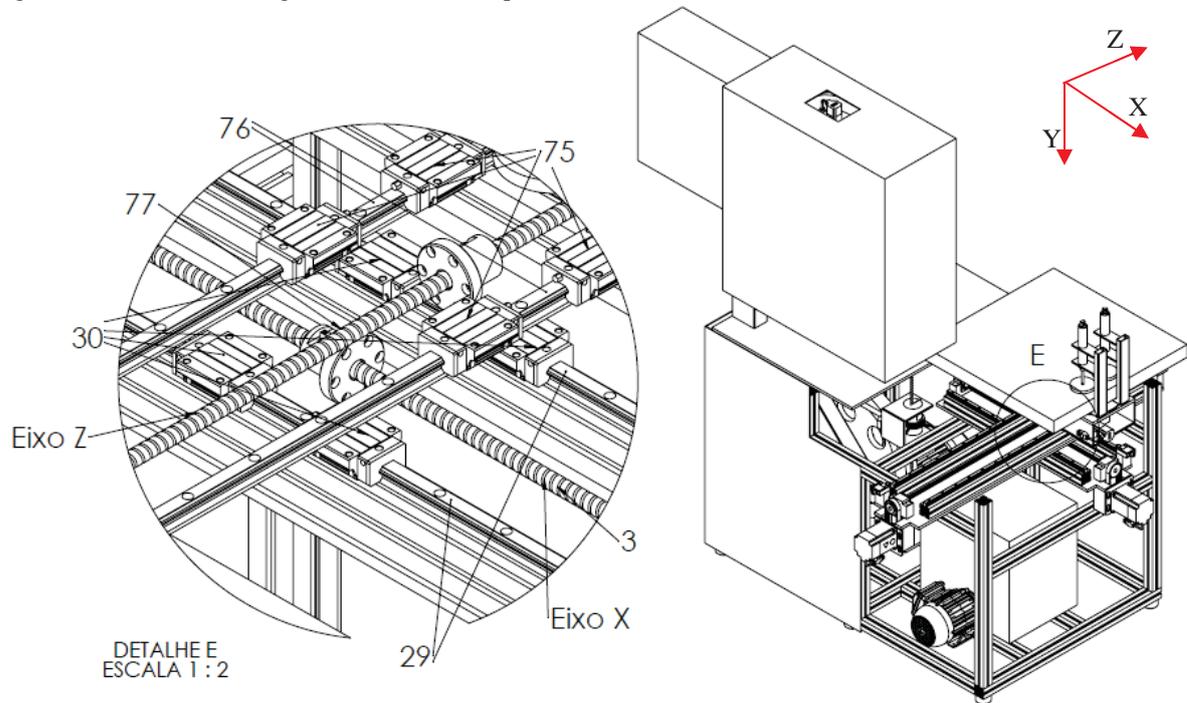


Fonte: Autor.

A Figura 56 ilustra o detalhamento dos componentes que auxiliam no deslocamento nos eixos X e Z. No eixo X há um conjunto de guias lineares compreendidas por quatro patins (30) que deslizam por trilhos (29) quando o fuso de esferas (3) é acionado, transformando o

movimento de rotação do servo em deslocamento linear. No eixo Z, também há quatro patins (75) que se deslocam sobre os trilhos (76), quando o fuso de esferas (77) é acionado.

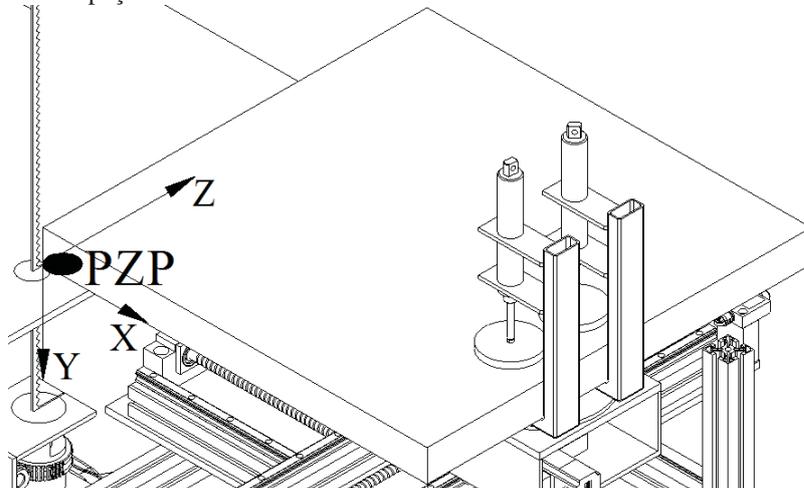
Figura 56 – Detalhamento guias lineares da máquina.



Fonte: Autor.

O ponto zero da peça serve como referência inicial para o sistema de coordenadas, sendo indispensável na programação dos eixos para efetuar o corte. Em uma perspectiva da placa, o ponto zero da peça (PZP) está situado no canto inferior esquerdo. Dessa forma, os eixos X e Z são positivos em relação à origem, o que facilita a programação (Figura 57).

Figura 57 – Ponto zero da peça.

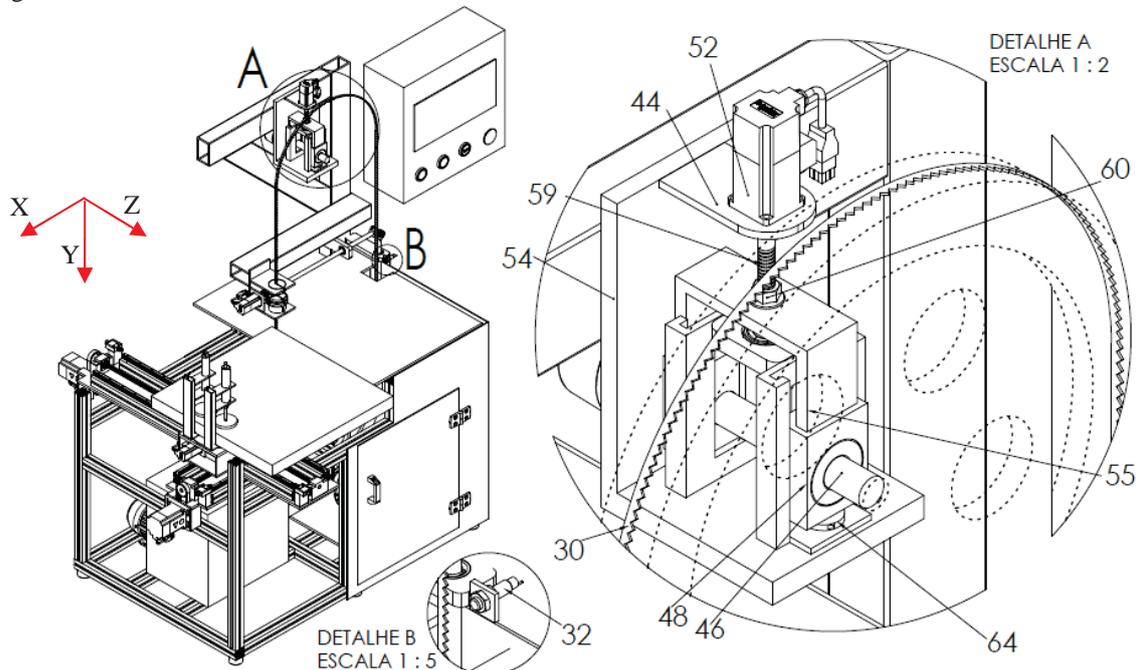


Fonte: Autor.

### 3.4.2 Sistema de esticamento

Para que a lâmina não escorregue sobre o volante, dificultando a operação de corte ou interferindo no acabamento da superfície, a máquina terá monitoramento da tensão de esticamento durante a operação, atendendo ao conceito da Indústria 4.0. A Figura 58 apresenta o sistema de esticamento; o volante superior foi representado de forma tracejada a fim de indicar o assentamento da lâmina (30). O monitoramento da tensão pode ser obtido com o uso de uma célula de carga (64), que mede a força na guia regulável (48). Nela está mancalizado o eixo (46), que sustenta o volante. Tal guia desliza por suportes (55) conectados a uma porca (60) na qual se desloca um fuso (59), o qual está conectado a um servomotor (52) que é fixado em uma base (44). Todo esse sistema está apoiado sobre uma estrutura (54) em forma de “L” ligada à estrutura da serra de fita. Os valores medidos pela célula de carga são transmitidos para o sistema de controle. Através do *software* de monitoramento, é feita a análise do valor da força mínima estipulada e são enviados ao servo (52).

Figura 58 – Sistema de esticamento da lâmina.

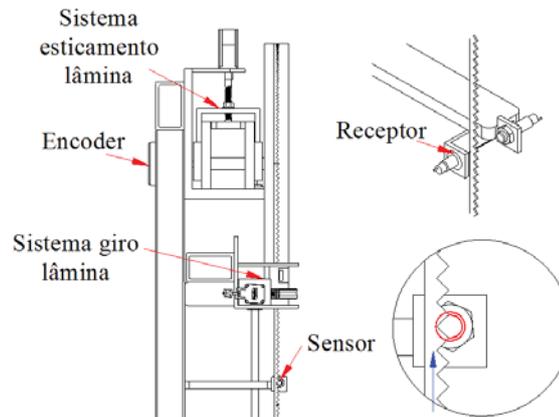


Fonte: Autor.

O escorregamento da lâmina é monitorado no volante superior. Um sensor (32) detecta o deslocamento dos dentes da lâmina num dado tempo, transmitindo essas informações ao *software* supervisor. Em caso de escorregamento da lâmina (30) no volante, a velocidade da lâmina diminui em relação à velocidade do volante. Tais dados são informados para o servomotor (52) do esticador, que desloca o volante até atingir o valor da força estipulado.

Em operação do equipamento, essa velocidade é monitorada pelo *software* supervisório e repassada ao servomotor responsável pelo esticamento da lâmina (Figura 59). O autodiagnóstico do funcionamento também remete a Indústria 4.0.

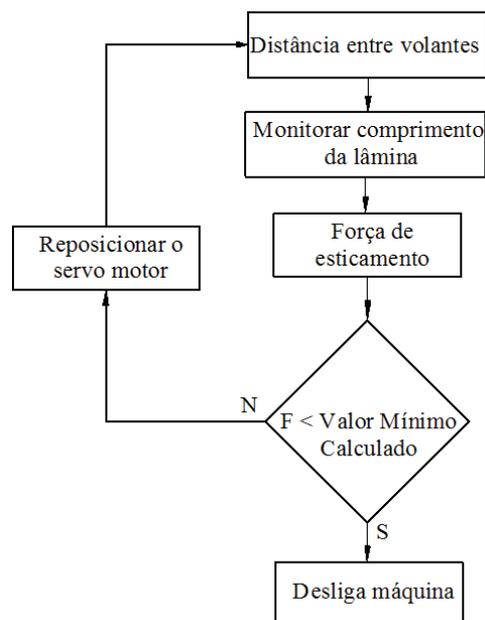
Figura 59 – Medição do deslocamento da lâmina.



Fonte: Autor.

Com o monitoramento da força de esticamento da lâmina, através da distância entre os volantes durante a operação, é possível determinar se a lâmina rompeu e que ação o equipamento realizaria no caso de tal acontecimento. O diagnóstico ocorre de acordo com o fluxograma da Figura 60, ou seja, se a distância entre os volantes divergir do programado, a lâmina pode ter se rompido ou escorregado dos volantes.

Figura 60 – Fluxograma do sistema de controle e esticamento da lâmina.

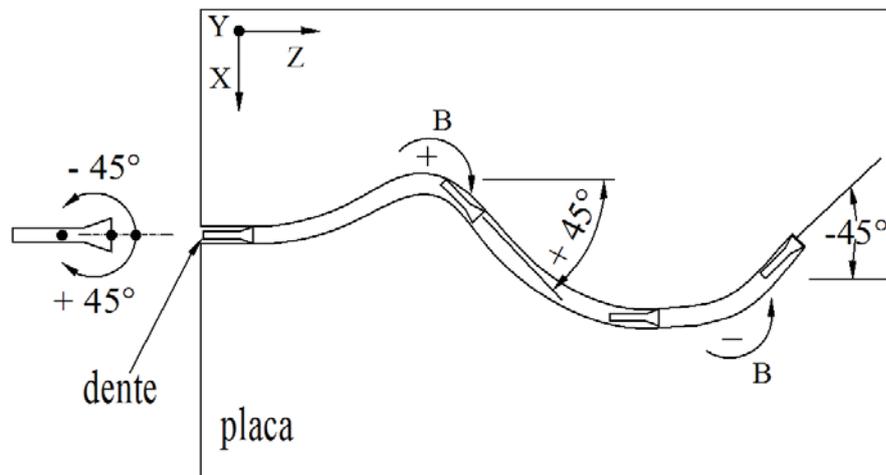


Fonte: Autor.

### 3.4.3 Sistema de torção da lâmina

O movimento esquemático de torção na lâmina (Figura 61), representado pelo eixo B, é indicado pela fabricante Sul Corte (2016) em  $+45^\circ$  e  $-45^\circ$ , totalizando  $90^\circ$  de giro, permitindo cortes em curva e cortes retos. A placa se desloca nos eixos X e Z, enquanto que o dente da lâmina ataca-a de cima para baixo. A placa avança e os dentes da lâmina são rotacionados em  $45^\circ$  no sentido positivo do eixo Y (horário), o mesmo tem direção positiva para baixo. Na sequência da trajetória, os dentes são rotacionados em  $45^\circ$  no sentido anti-horário (sinal negativo).

Figura 61 – Dente serrando em trajetória reta e curva de acordo com o giro da lâmina.

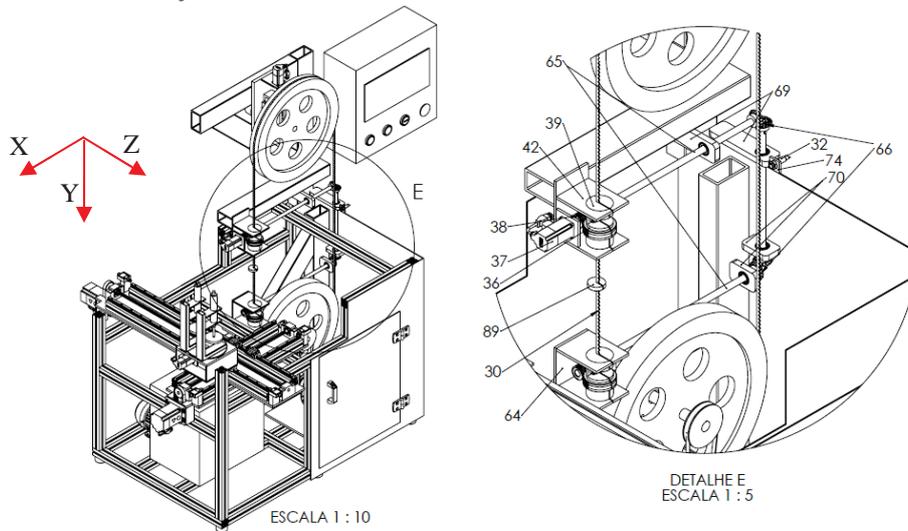


Fonte: Autor.

No sistema de torção da lâmina (Figura 62), algumas peças foram ocultadas para detalhá-lo melhor. A lâmina (30) passa por dentro de uma bucha (89) conectada à tampa superior (ocultada). O sistema de torção é composto por um servomotor (37), que aciona um parafuso sem-fim (38) ligado a uma coroa (36). A mesma possui dentes em apenas  $180^\circ$ , conectado a ela há outra bucha (39) com uma fenda no meio por onde passa a lâmina da serra e permite a montagem (detalhada na Figura 63).

A interligação dos sistemas responsáveis pelo giro da lâmina é mecânica, com eixos (65) e mancais superiores (69) e inferiores (70). Na extremidade dos eixos (65) encontram-se dois pares de engrenagens cônicas (66). Esse eixo está interligado ao mecanismo inferior (64), possuindo os mesmos componentes com exceção do servomotor. O sensor (32) que monitora o deslocamento dos dentes da lâmina de serra (30) é preso a um suporte (74).

Figura 62 – Sistema de torção da lâmina.

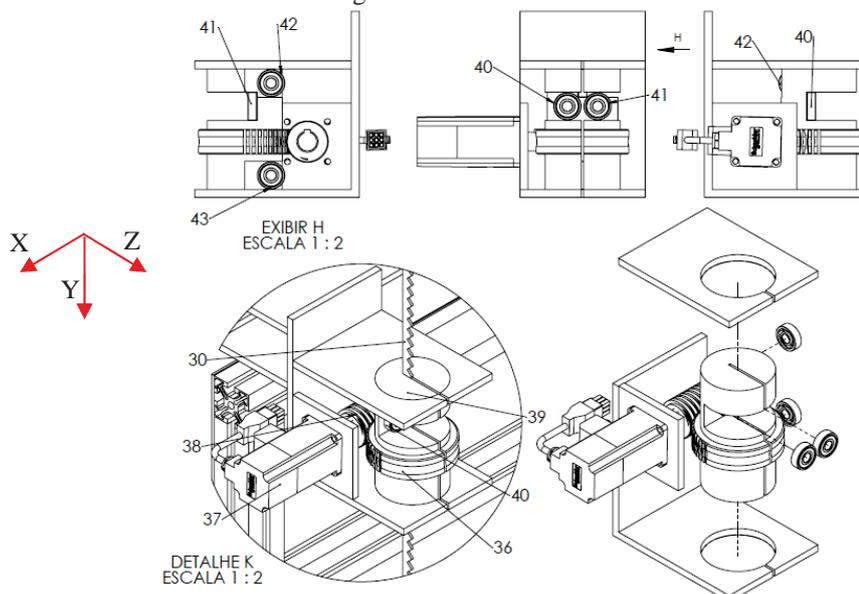


Fonte: Autor.

A Figura 63 detalha o mecanismo de torção da lâmina, o mesmo é representado em perspectiva e em vistas. Na perspectiva observa-se todo o mecanismo com o servo (37), parafuso sem-fim (38), coroa (36) e bucha com fenda (39). A lâmina (30) passa por dentro da fenda, sua lateral é guiada e desliza sobre dois rolamentos (40 e 41). Um rolamento superior (42) e outro inferior (43) direcionam e guiam a parte traseira da lâmina, fazendo-a deslizar sobre os mesmos.

O comprimento da referida fenda é suficiente para que as extremidades dos dentes da lâmina fiquem no centro da bucha (39), permitindo que a lâmina gire e corte de acordo com a trajetória definida na programação.

Figura 63 – Detalhamento mecanismo de giro da lâmina.

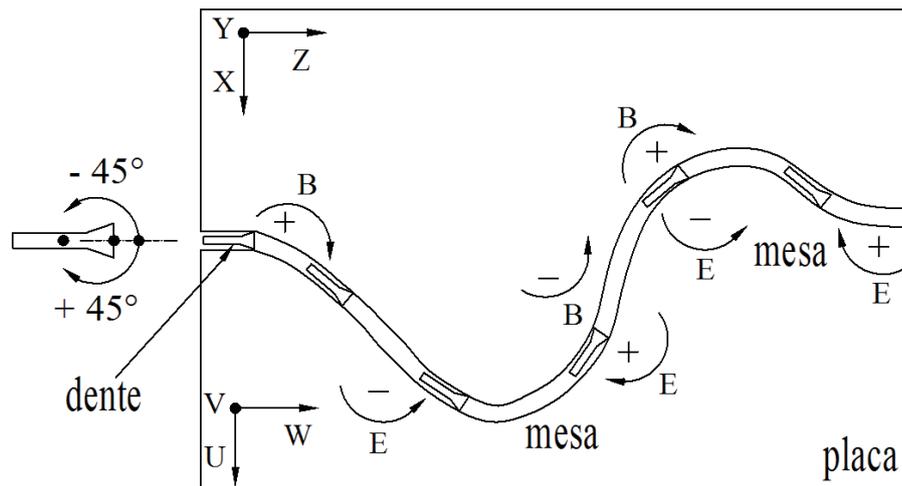


Fonte: Autor.

### 3.4.4 Sistema de rotação da mesa

Na representação da rotação da mesa, o giro da mesma pode ocorrer em até  $180^\circ$  o que auxilia no corte de meia circunferência, por exemplo, podendo ser obtido de forma combinada com a torção da lâmina. Na Figura 64, os sentidos de giro acima da trajetória são da lâmina (eixo B) e os sentidos abaixo da trajetória representam o giro da mesa (eixo E). Assim, a placa, ao se deslocar em X e Z, é atacada pelos dentes da lâmina de cima para baixo. A lâmina é torcida em sentido horário (sinal positivo), enquanto que a mesa gira no sentido anti-horário (sinal negativo). Na metade da placa a lâmina passa a girar em sentido anti-horário (sinal negativo) e a mesa gira em sentido horário (sinal positivo). Para finalizar o corte em trajetória curva, a lâmina volta a girar em sentido horário e, a mesa, no sentido contrário.

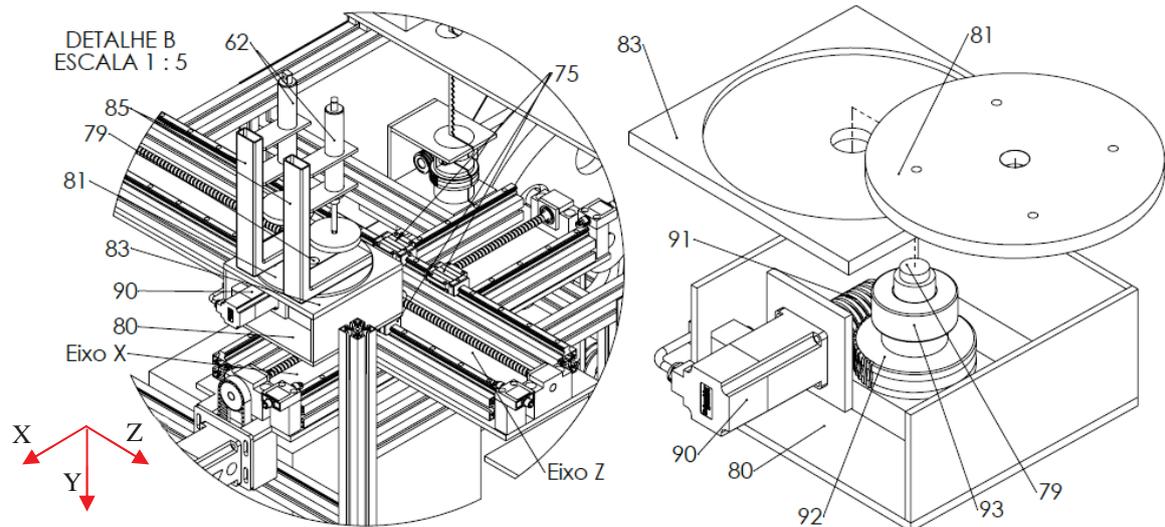
Figura 64 – Dente serrando em trajetória curva com giro da mesa e da lâmina.



Fonte: Autor.

A Figura 65 apresenta o sistema de rotação da mesa (80), compreendido por um servomotor (90) conectado a um parafuso sem-fim (91), o qual transmite movimento à coroa (92) que é conectada à mesa através de um eixo (79). Sobre o prato estão os suportes (85) que sustentam os cilindros pneumáticos (62), responsáveis por fixar a placa, que foi ocultada na figura. O prato (81) rotaciona de acordo com o giro da coroa (92), sendo guiado por um rebaixo na tampa superior (83). Na parte inferior da tampa é mancalizado o rolamento (93). A mesa rotativa está fixada aos patins, que se deslocam nas guias lineares do eixo Z.

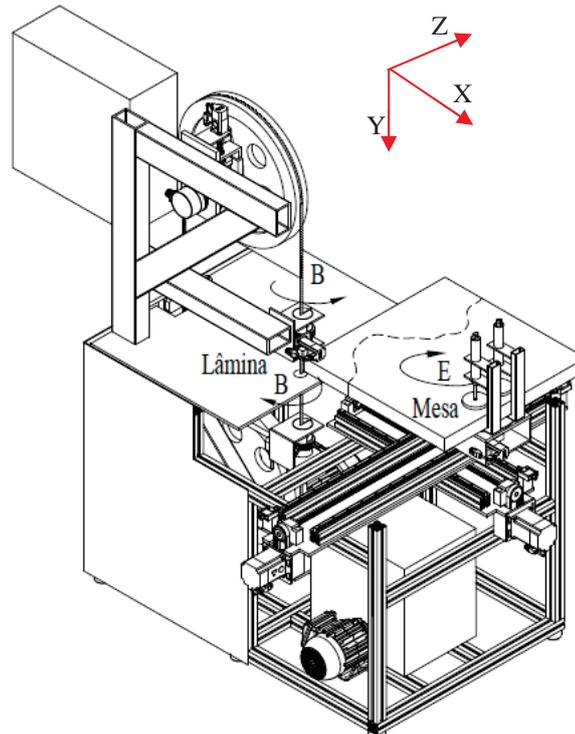
Figura 65 – Sistema de rotação da mesa.



Fonte: Autor.

Os sistemas de torção da lâmina e rotação da mesa permitem que na combinação de ambos os movimentos de giro se consiga cortar em trajetórias curvas. Lâmina e mesa podem rotacionar no mesmo sentido ou em sentidos opostos, garantindo o corte na trajetória curva programada (Figura 66). O controle de cada movimento, bem como o deslocamento em cada eixo, será realizado via *software* de programação específico.

Figura 66 – Sistema de rotação da lâmina e da mesa.



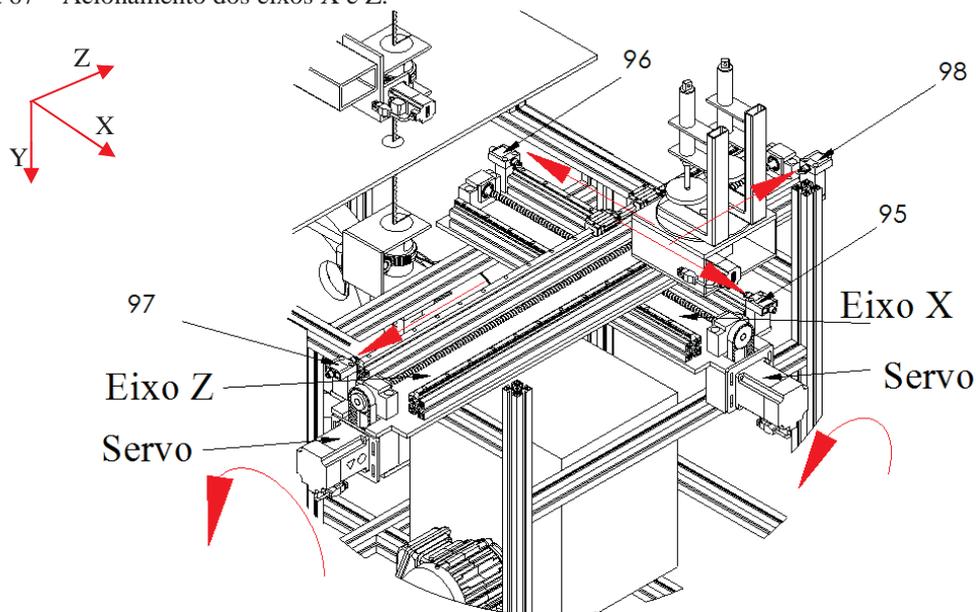
Fonte: Autor.

### 3.4.5 Sistema de controle: definição das trajetórias e método de controle dos motores

A Figura 67 ilustra o deslocamento nos eixos. Ao acionar o servo do eixo X no sentido anti-horário, o mesmo desloca a placa ao encontro da lateral da lâmina até chegar ao fim de curso (96), que desliga o servo. Se o servo girar no sentido horário, a placa se desloca até acionar o fim de curso (95), garantido a segurança do operador.

No deslocamento da placa no eixo Z, o servo, ao ser acionado no sentido anti-horário, movimentava a placa afastando-a da lâmina até chegar ao fim de curso (98). Se a rotação do servo for revertida (sentido horário), a placa se movimenta de encontro aos dentes da lâmina e em direção ao fim de curso (97), que desliga o acionamento do eixo, evitando acidentes para o usuário.

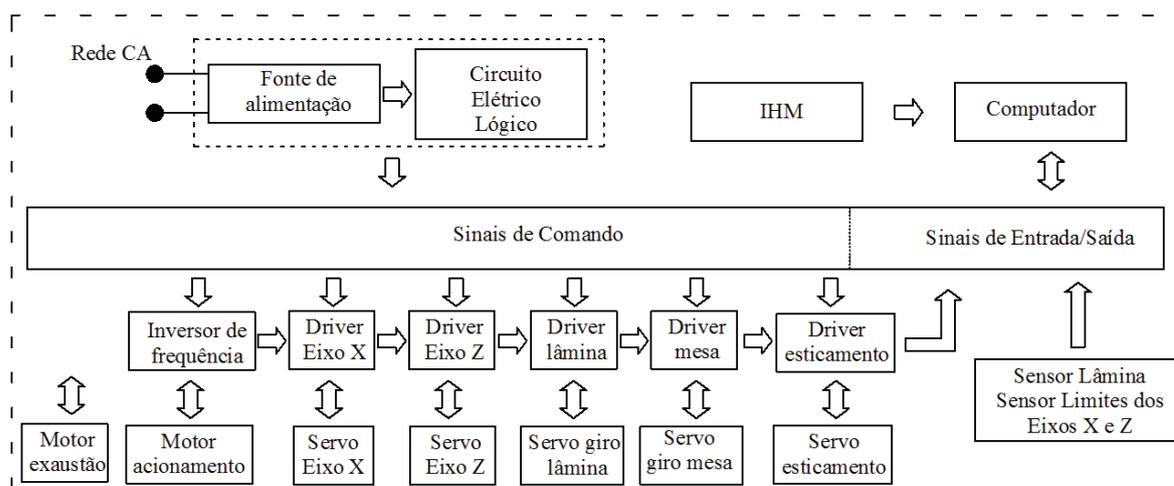
Figura 67 – Acionamento dos eixos X e Z.



Fonte: Autor.

A Figura 68 ilustra a lógica de automação e o controle da serra de fita. O equipamento necessita de alimentação da rede elétrica, que chega a um circuito de potência (Elétrico) e de comando (Lógico) realizado por um controlador lógico programável (CLP). Os sinais de comando são enviados aos drivers, que controlam a posição e velocidade dos servomotores: eixos X e Z, giro da mesa, torção e esticamento da lâmina. A variação da rotação no motor principal é controlada por um inversor de frequência. Sensores de posição transmitem informações ao computador. A Interface Homem/Máquina (IHM) comunica ao computador os dados referentes aos parâmetros de operação, tais como, por exemplo, a força de esticamento da lâmina.

Figura 68 – Diagrama de funcionamento da serra de fita automática.



Fonte: Autor.

### 3.5 Projeto detalhado (4ª fase)

O detalhamento compreende a quarta fase da metodologia de Pahl et al. (2013) e complementa o projeto de um produto técnico. É caracterizada pela indicação definitiva da forma, dimensionamento, acabamento superficial de todas as peças, definição de todos os materiais e as operações de fabricação.

Para este projeto não foi construído protótipo, dessa forma o detalhamento resume-se às dimensões macro da serra de fita automática, e aos perfis da estrutura com as respectivas medidas.

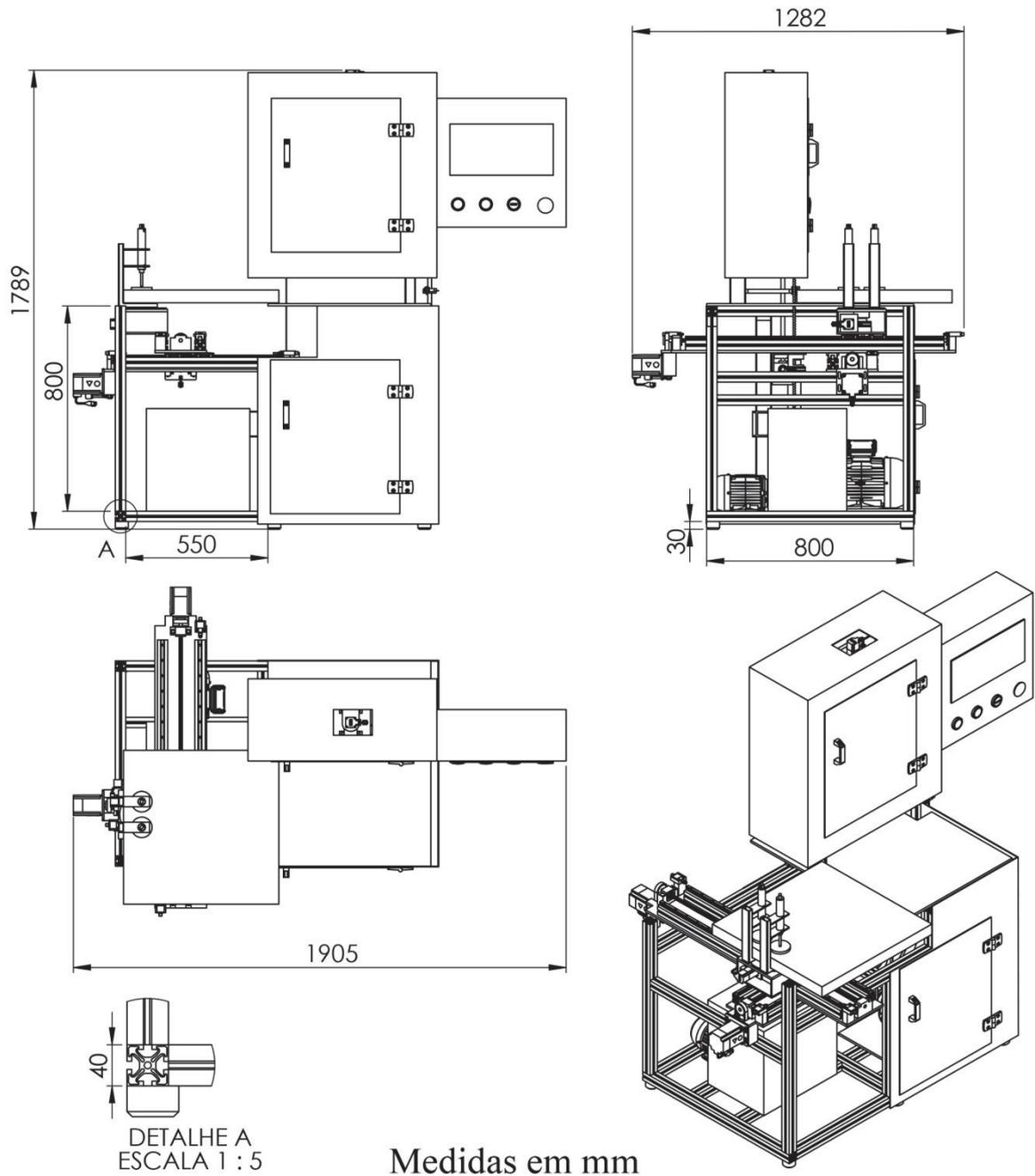
Na serra de fita automática buscou-se atender a lista de requisitos na sua totalidade e no quesito relacionado à fabricação e montagem, mais especificamente quanto à padronização de peças. Buscou-se também um projeto fácil, ou seja, que utilize poucos processos de fabricação para confecção das peças e com máquinas convencionais. Nas peças atentou-se em geometrias simples e com cantos arredondados para evitar concentradores de tensão.

As principais cotas da máquina estão indicadas na Figura 69. A estrutura é composta por perfis de alumínio estrutural Prodomus (2016). O material escolhido tem formato quadrado com 40 mm de lado. Sua montagem requer fixadores apropriados com parafusos que se encaixam nas cavidades dos perfis.

Para padronização e facilidade na fabricação, os perfis da estrutura foram idealizados com comprimento de 550 mm, vista frontal da Figura 69; perfis para altura e largura com 800 mm, vista lateral esquerda da Figura 69. Tal fato possibilita que barras de alumínio estrutural

sejam cortadas nas medidas referidas, dado acabamento na região cortada, ficando prontas para uma manufatura simples e rápida.

Figura 69 – Perspectiva, vistas e detalhes da serra de fita automática.



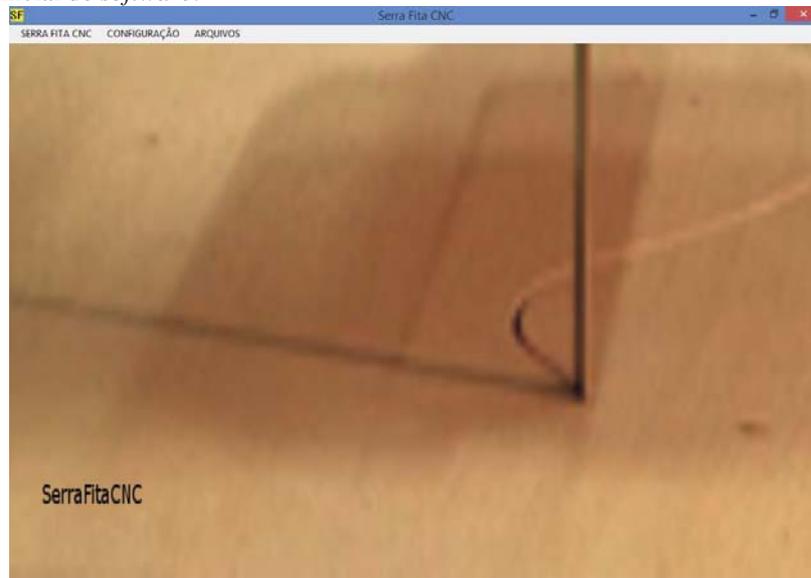
Fonte: Autor.

### 3.6 Concepção do software de gerenciamento da máquina – Serra Fita CNC

Para complementar a concepção da serra de fita CNC, é apresentado o conceito do *software* de gerenciamento da máquina. As telas foram construídas no programa *Visual Basic*.

O *software* de gerenciamento da máquina é composto por uma tela inicial, com menus e quadros de diálogos. A descrição inicia com a tela inicial do *software*, composta por menus suspensos que apresentam uma série de opções. São elas: **SERRA FITA CNC**, **CONFIGURAÇÃO** e **ARQUIVOS** (Figura 70).

Figura 70 – Tela inicial do *software*.



Fonte: Autor.

Clicando em **SERRA FITA CNC** é aberto um menu em cascata que apresenta as opções: **Sobre**, **HELP** e **Sair** (Figura 71).

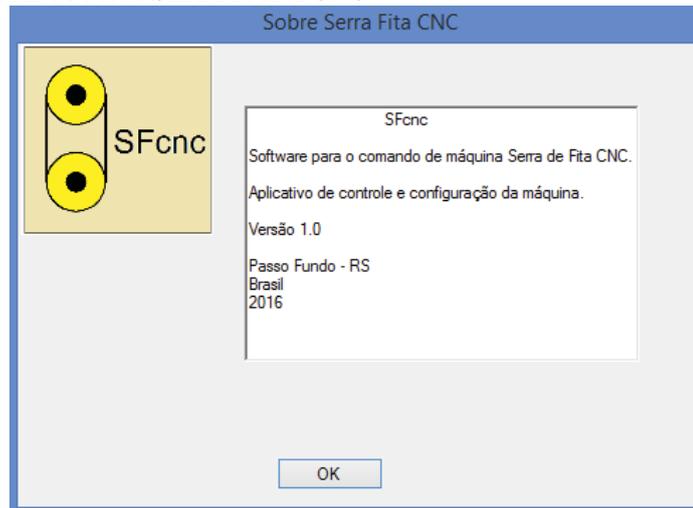
Figura 71 – Menu SERRA FITA CNC.



Fonte: Autor.

A opção **Sobre** apresenta uma descrição das informações a respeito do *software*, como aplicação, versão, origem, etc. A opção **HELP** apresenta um manual de definição, operação e manutenção tanto do *software* como da máquina. Já a opção **Sair**, encerra as operações do *software* (Figura 72).

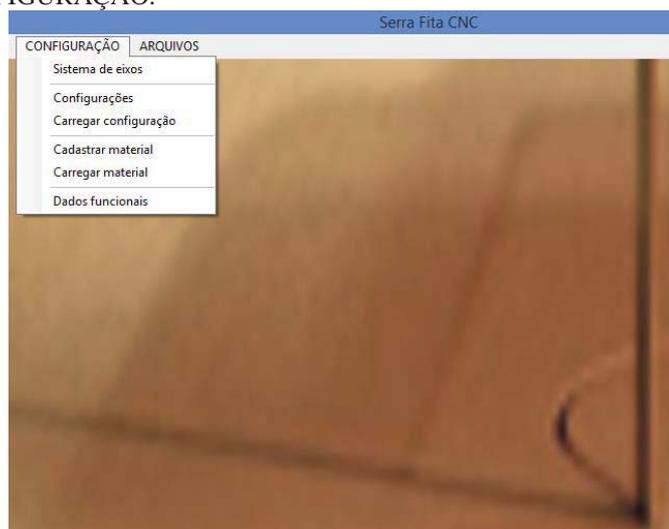
Figura 72 – Opção SOBRE do Menu SERRA FITA CNC.



Fonte: Autor.

A opção **CONFIGURAÇÃO** permite inserir uma série de informações a respeito tanto da máquina, condições de operação e processos, como a respeito dos materiais e ferramenta utilizados (Figura 73).

Figura 73 – Menu CONFIGURAÇÃO.



Fonte: Autor.

A opção **Sistema de eixos** apresenta a descrição dos eixos da referida máquina já configurada (Figura 74).

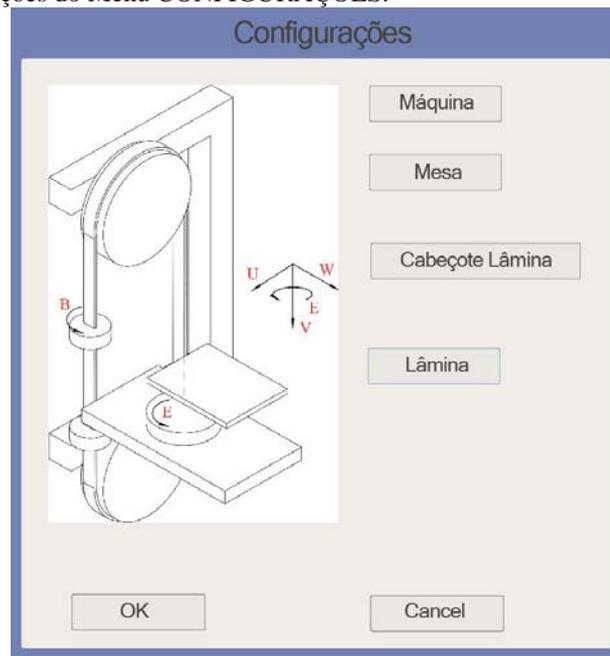
Figura 74 – Sistema de eixos do Menu CONFIGURAÇÃO.



Fonte: Autor.

Escolhendo a opção **Configurações**, abre-se o quadro de diálogo que apresenta quatro botões que representam grupos de informações a respeito da máquina (Figura 75). No botão **Máquina** é possível indicar as especificações como potência e rotação dos motores. Botão **Mesa**, são indicadas as dimensões dos eixos e o ângulo de giro. No **Cabeçote Lâmina** é possível indicar quantos graus a lâmina pode ser torcida para ambos os sentidos. No botão **Lâmina** é possível colocar as dimensões, material e ângulos da ferramenta.

Figura 75 – Aba Configurações do Menu CONFIGURAÇÕES.



Fonte: Autor.

No apêndice A, são detalhadas as demais telas do *software* de gerenciamento. Ao inserir informações sobre o material, por exemplo, a serra de fita CNC confronta com suas configurações contidas em um banco de dados, indicando se há possibilidade de cortá-lo e os parâmetros para realizar o corte atendendo a ideia de autoprogramação oriunda da Indústria 4.0.

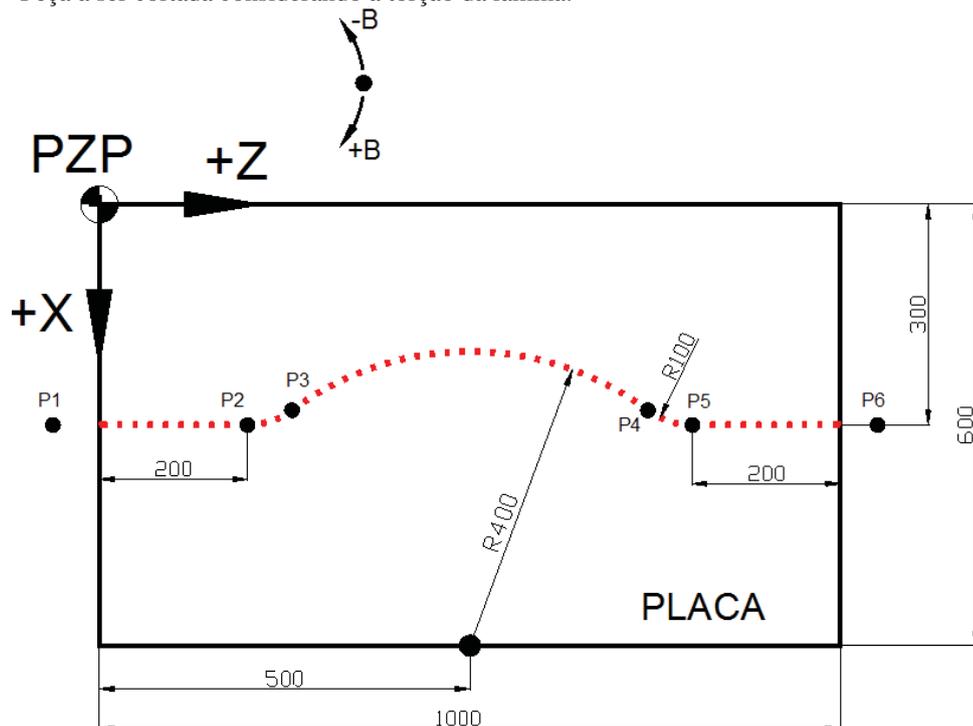
### 3.7 Exemplo de programação

A programação para executar o corte de uma placa é apresentada prevendo movimentos lineares nos eixos X e Z, e movimentos de rotação: primeiro, com torção da lâmina (eixo B); segundo, com giro da mesa (eixo E); por último, outra trajetória de corte para outra placa, mas com movimentos simultâneos, tanto de torção da lâmina como de giro da mesa.

#### a) Programa considerando a torção da lâmina – eixo B rotaciona em relação a Y

O programa para cortar a placa da Figura 76 considera o sistema de torção da lâmina para realizar o corte na trajetória (linha tracejada) definida dos pontos P1 a P6, ambos afastados 50 mm da peça. A Tabela 8 apresenta o programa (o código) para executar a trajetória.

Figura 76 – Peça a ser cortada considerando a torção da lâmina.



Fonte: Autor.

Tabela 8 – Programa para cortar a trajetória.

	G90 (sistema absoluto)
	G18 (plano de trabalho X Z)
	S1000 M3
	.
	G42 G94
P1	G0 X300 Z-50 B0
P2	G1 X300 Z200 B0 F3500
P3	G3 X280 Z260 I-100 K0 B-37 F3500
P4	G2 X280 Z740 I320 K240 B53 F3500
P5	G3 X300 Z800 I-80 K60 B0 F3500
P6	G1 X300 Z1050 B0 F3500
	G40
	.
	M30

Fonte: Autor.

O significado das letras e códigos é descrito a seguir:

B = giro da lâmina de serra;

E = giro da mesa;

I K = centro de interpolação (incremental, a partir do ponto inicial do arco);

F = avanço em mm/min;

S = rotação ou velocidade de corte da serra;

M = sentido de deslocamento da serra (neste caso M3 é horário);

G40= cancela compensação do raio da ferramenta;

G42= ativa compensação do raio da ferramenta (direita);

G90= sistema de coordenadas absolutas;

G18= plano de trabalho XZ;

G94= estabelece o avanço em mm/min;

S= velocidade do eixo árvore.

### **G90 (sistema absoluto)**

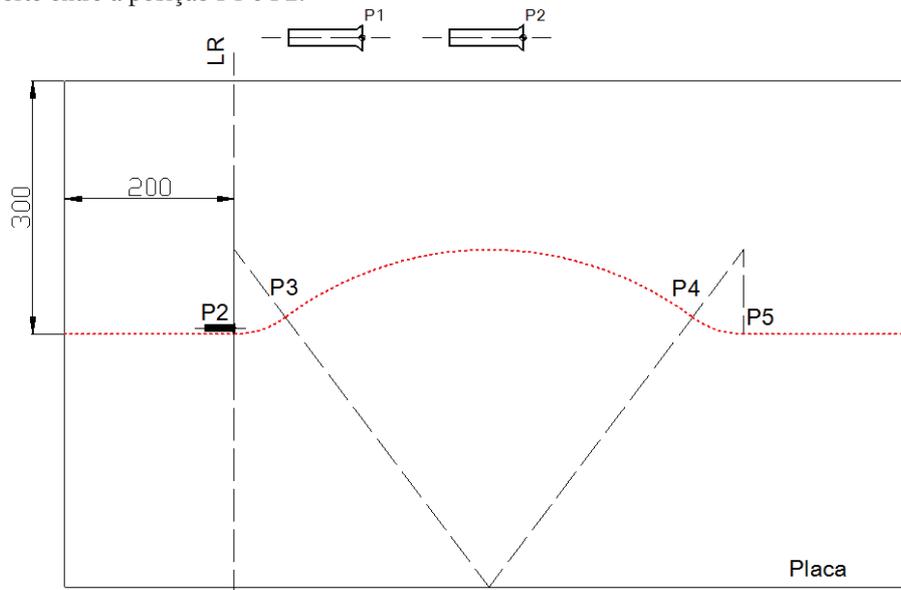
Esta linha de comando especifica que o sistema de coordenadas é contado a partir do zero codificado na origem da peça PZP. Todas as coordenadas são informadas a partir deste ponto.

### **G18 (plano de trabalho X Z)**

Informa que o plano na qual a máquina vai realizar a trajetória é o XZ.



Figura 78 – Corte entre a posição P1 e P2.

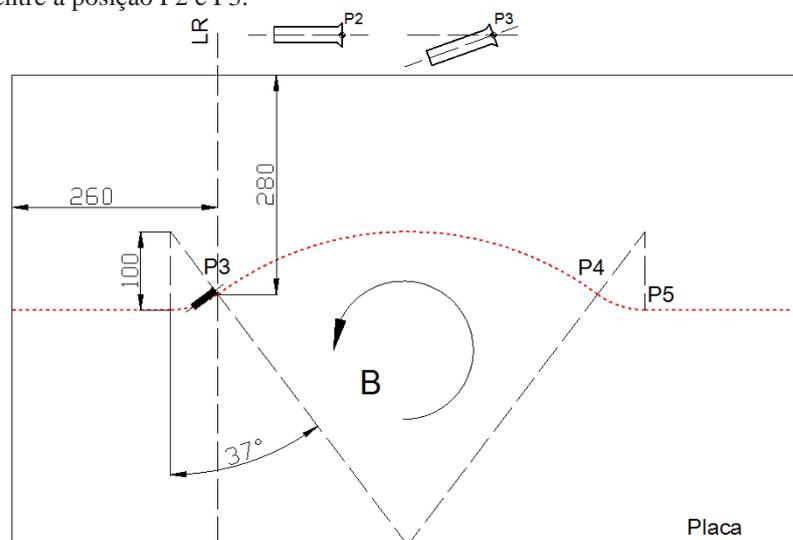


Fonte: Autor.

### **G3 X280 Z260 I-100 K0 B-37 F3500**

O comando configura uma interpolação circular anti-horária (G3), iniciando nas coordenadas X300 e Z200, para se deslocar em arco até a coordenada X280 e Z260, que corresponde ao final do arco entre os pontos P2 e P3 (Figura 79). I e K são as coordenadas do centro de interpolação do arco relacionada à coordenada incremental com relação ao ponto inicial do arco no caso I -100 e K= 0. O parâmetro B vale  $-37^\circ$ , que é o ângulo interno do arco, do qual a lâmina de serra deverá ser torcida progressivamente até atingir o valor. A velocidade de avanço F continua 3500 mm/min. F é a velocidade na frente da lâmina.

Figura 79 – Corte entre a posição P2 e P3.

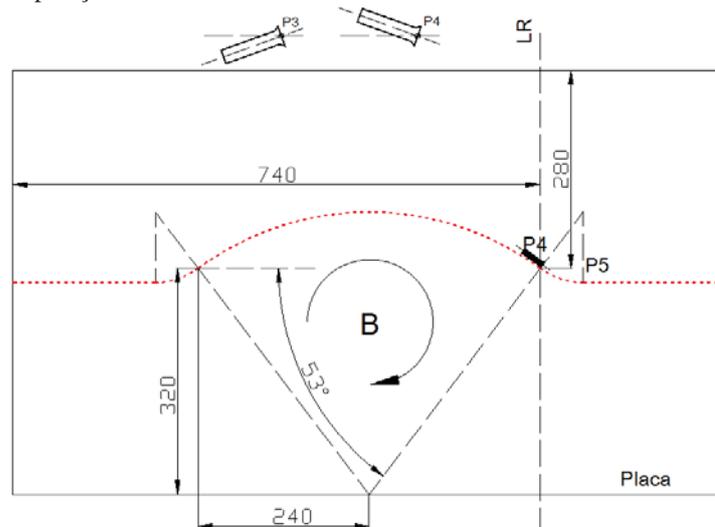


Fonte: Autor.

### **G2 X280 Z740 I320 K240 B53 F3500**

O comando configura a interpolação circular horária (G2), iniciando na coordenada X280 e Z260 e terminando na coordenada X280 e Z740. O centro de interpolação circular é incremental, medido a partir do ponto inicial I 320 e K 240. Nesta trajetória, a lâmina de serra deverá ser torcida  $53^\circ$  progressivamente até atingir o ponto final do arco em X280 Z740 (Figura 80). A velocidade de avanço continua mesma.

Figura 80 – Corte entre a posição P3 e P4.

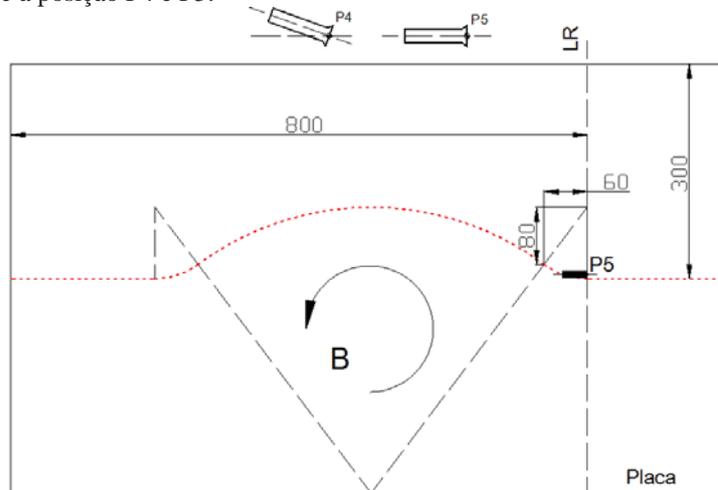


Fonte: Autor.

### **G3 X300 Z800 I-80 K60 B0 F3500**

O comando configura a interpolação circular anti-horária (G3), iniciando nas coordenadas X300 e Z800. As coordenadas incrementais do centro do arco com relação ao ponto inicial e I = -80 e K= 60 fazem com que a torção da lâmina (B) retorne a zero grau até o final da trajetória (Figura 81).

Figura 81 – Corte entre a posição P4 e P5.

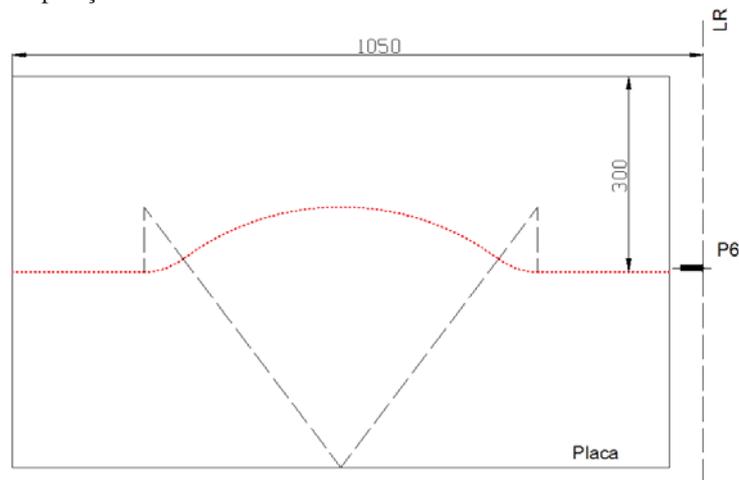


Fonte: Autor.

### G1 X300 Z1050 B0 F3500

Por fim, é apresentada a interpolação linear do ponto de referência até as coordenadas X300 e Z1050 no ponto P6 fora da peça (Figura 82), mantendo durante a trajetória a lâmina paralela ao eixo Z.

Figura 82 – Corte entre a posição P5 e P6.

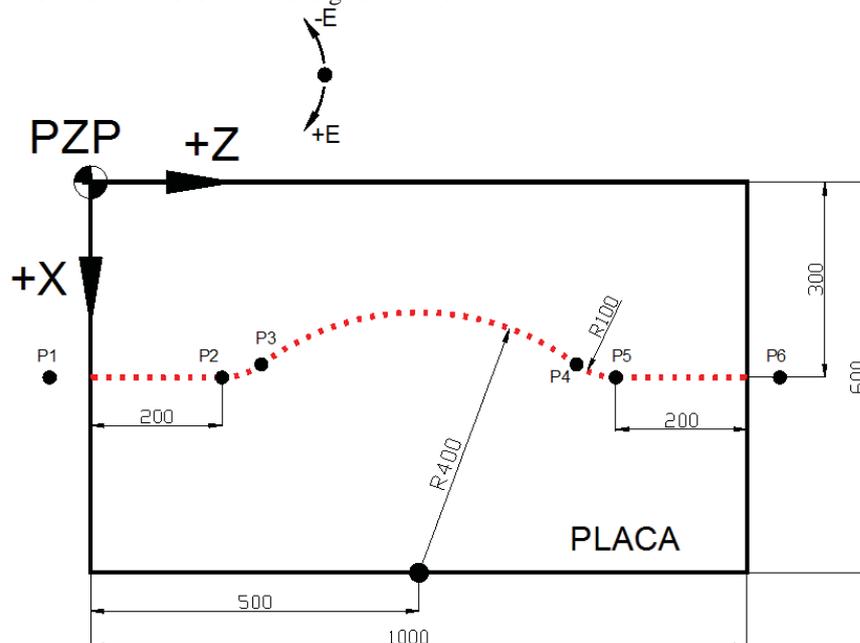


Fonte: Autor.

### b) Programa considerando o giro da mesa – eixo E rotaciona em relação a V

O programa para cortar a placa da Figura 83 considera o sistema de giro da mesa (eixo E), para realizar o corte na trajetória (linha tracejada) definida dos pontos P1 a P6.

Figura 83 – Peça a ser cortada considerando o giro da mesa.



Fonte: Autor.

A Tabela 9 apresenta o código para executar a trajetória programada.

Tabela 9 – Programa para cortar a trajetória considerando o giro da mesa.

	G90 (sistema absoluto)
	G18 (plano de trabalho X Z)
	S1000 M3
	.
	.
	G42 G94
P1	G0 X300 Z-50 E0
P2	G1 X300 Z200 E0 F3500
P3	G2 X280 Z260 I-100 K0 E37 F3500
P4	G3 X280 Z740 I320 K240 E-53 F3500
P5	G2 X300 Z800 I-80 K60 E0 F3500
P6	G1 X300 Z1050 E0 F3500
	G40
	.
	.
	.
	M30

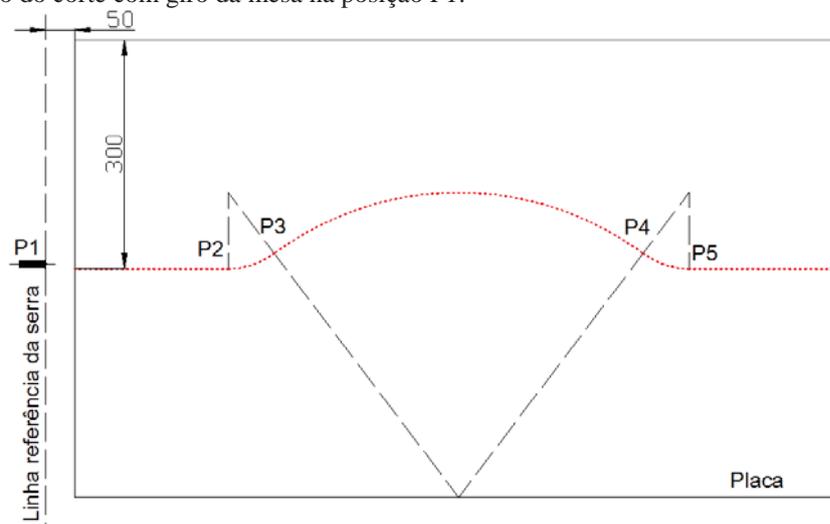
Fonte: Autor.

O significado dos códigos é descrito a seguir:

### **G0 X300 Z-50 E0**

O comando manda a ponta da lâmina de serra se deslocar em velocidade rápida para a posição X 300 e Z-50, que é a posição P1. A lâmina de serra é mantida alinhada com o eixo Z, pois o ângulo em torno do eixo E fica parado, valendo, portanto, zero (Figura 84).

Figura 84 – Início do corte com giro da mesa na posição P1.

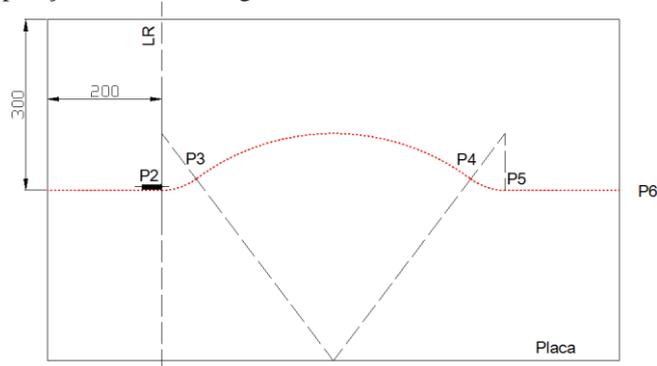


Fonte: Autor.

### G1 X300 Z200 E0 F3500

O comando configura uma interpolação linear (G1) e desloca a peça para posição X300 e Z200 em linha reta, com a lâmina paralela ao eixo Z, pois E vale zero (Figura 85), a uma velocidade de avanço (F) é de 3500 mm/min.

Figura 85 – Corte entre a posição P1 e P2, com giro da mesa.

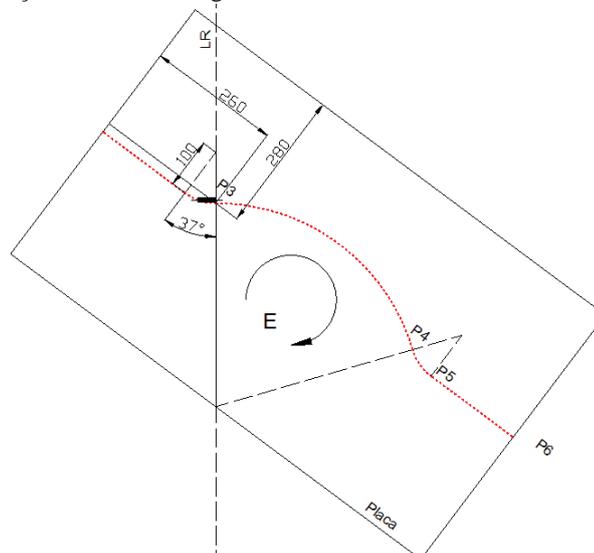


Fonte: Autor.

### G2 X280 Z260 I-100 K0 E37 F3500

O comando configura uma interpolação circular horária (G2), iniciando nas coordenadas X300 e Z200, para se deslocar em arco até a coordenada X280 e Z260, que corresponde ao final do arco entre os pontos P2 e P3 (Figura 86). I e K são as coordenadas do centro de interpolação do arco relacionada à coordenada incremental com relação ao ponto inicial do arco no caso I -100 e K= 0. O parâmetro E vale 37°, que é o ângulo interno do arco, do qual a mesa é girada progressivamente até atingir o valor. A velocidade de avanço F equivale a 3500 mm/min. F é a velocidade na frente da lâmina.

Figura 86 – Corte entre a posição P2 e P3, com giro da mesa.

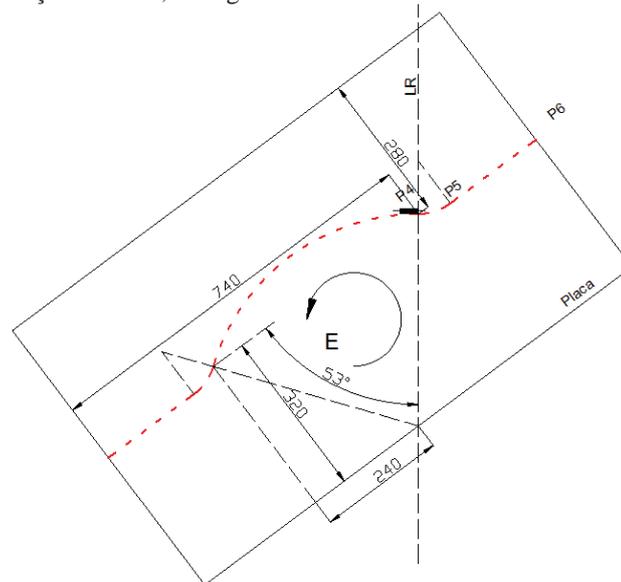


Fonte: Autor.

### **G3 X280 Z740 I320 K240 E-53 F3500**

O comando configura a interpolação circular anti-horária (G3), iniciando na coordenada X280 e Z260 e terminando na coordenada X280 e Z740. Vem a ser centro de interpolação circular incremental, medido a partir do ponto inicial I 320 e K 240. Nesta trajetória, a mesa deverá ser girada  $-53^\circ$  progressivamente até atingir o ponto final do arco em X280 Z740 (Figura 87). A velocidade de avanço continua igual.

Figura 87 – Corte entre a posição P3 e P4, com giro da mesa.

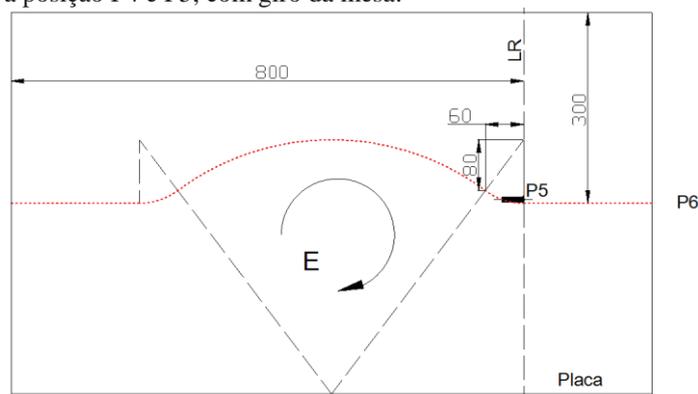


Fonte: Autor.

### **G2 X300 Z800 I-80 K60 E0 F3500**

O comando configura a interpolação circular horária (G2), iniciando nas coordenadas X300 e Z800. As coordenadas incrementais do centro do arco com relação ao ponto inicial e  $I = -80$  e  $K = 60$  fazem com que o giro da mesa (E) retorne a zero grau até o final da trajetória (Figura 88).

Figura 88 – Corte entre a posição P4 e P5, com giro da mesa.

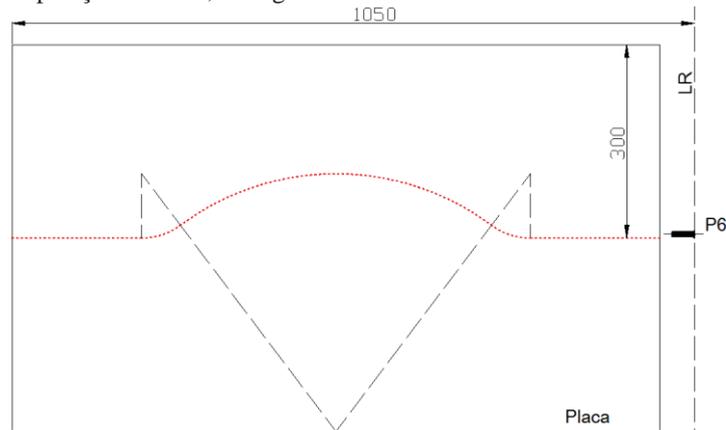


Fonte: Autor.

### G1 X300 Z1050 E0 F3500

Por fim, a interpolação linear do ponto de referência até as coordenadas X300 e Z1050 no ponto P6 fora da peça (Figura 89), mantendo durante a trajetória a lâmina paralela ao eixo Z.

Figura 89 – Corte entre a posição P5 e P6, com giro da mesa.

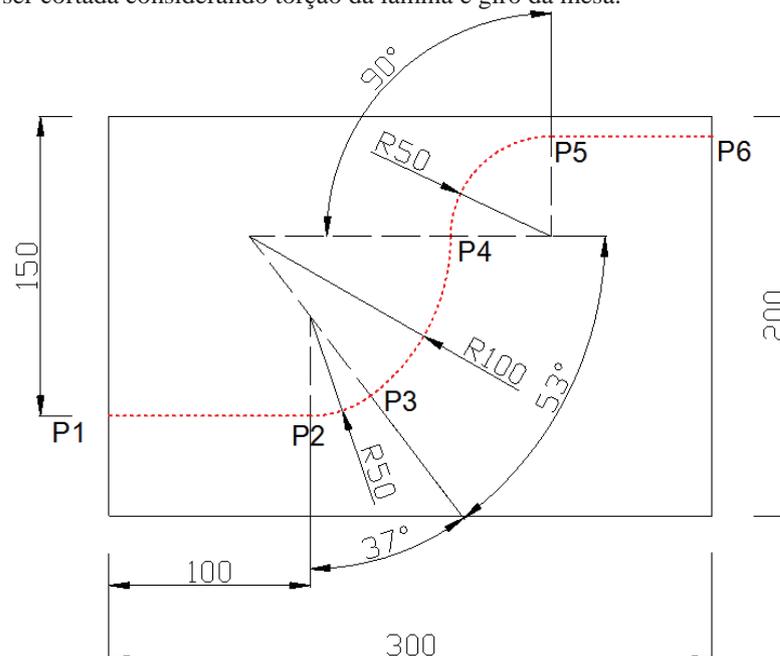


Fonte: Autor.

### c) Programa considerando a torção da lâmina (eixo B) e rotação da mesa (eixo E)

O programa abaixo é indicado para o corte de uma placa de dimensões e raios menores (Figura 90), considerando torção da lâmina e giro da mesa, na trajetória dos pontos P1 a P6, conforme linha tracejada.

Figura 90 – Peça a ser cortada considerando torção da lâmina e giro da mesa.



Fonte: Autor.

A Tabela 10 apresenta o código para executar a trajetória programada.

Tabela 10 – Programa para cortar a trajetória considerando torção da lâmina e giro da mesa.

	G90 (sistema absoluto)
	G18 (plano de trabalho X Z)
	S1000 M3
	.
	.
	G42 G94
P1	G0 X150 Z-50 B0 E0
P2	G1 X150 Z100 B0 E0 F3500
P3	G3 X140.43 Z129.42 I-50 K0 B-37 E0 F3500
P4	G2 X60.07 Z169.91 I-100 K-60.56 E53 F3500
P5	G3 X10.07 Z220.53 I K50 B0 E90 F3500
P6	G1 X10.07 Z350 B0 E0 F3500
	G40
	.
	.
	M30

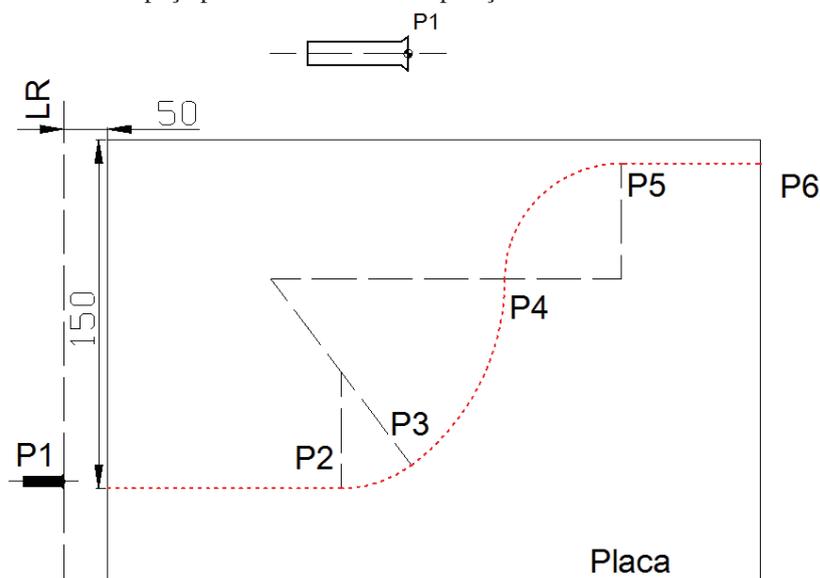
Fonte: Autor.

As letras possuem as mesmas funções dos outros exemplos e o significado do código é descrito a seguir:

### **G0 X150 Z-50 B0 E0**

A mesa com a placa se posiciona para iniciar o corte (Figura 91), estando a lâmina distante 50 mm da lateral da placa. O desenho da lâmina de serra, acima das figuras, representa a posição de entrada e de saída da lâmina.

Figura 91 – Posicionamento da peça para iniciar o corte na posição P1.

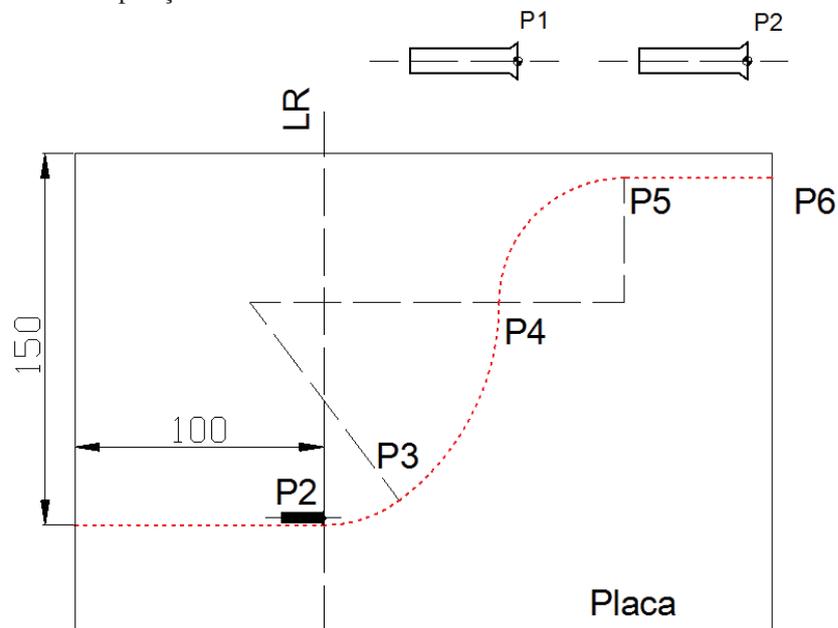


Fonte: Autor.

### G1 X150 Z100 B0 E0 F3500

A lâmina efetua o corte no trecho reto até o início da primeira curva (Figura 92).

Figura 92 – Corte reto até a posição P2.

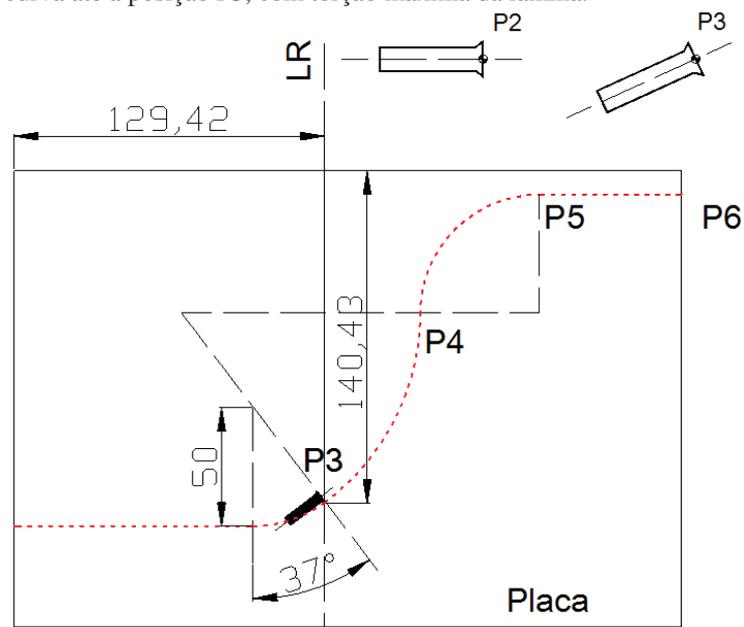


Fonte: Autor.

### G3 X140.43 Z129.42 I-50 K0 B-37 E0 F3500

Lâmina é torcida de um ângulo de  $-37^\circ$  ao final do curso, permanecendo a mesa sem rotação. Considerar que a lâmina efetuou o máximo da torção (Figura 93).

Figura 93 – Corte em curva até a posição P3, com torção máxima da lâmina.

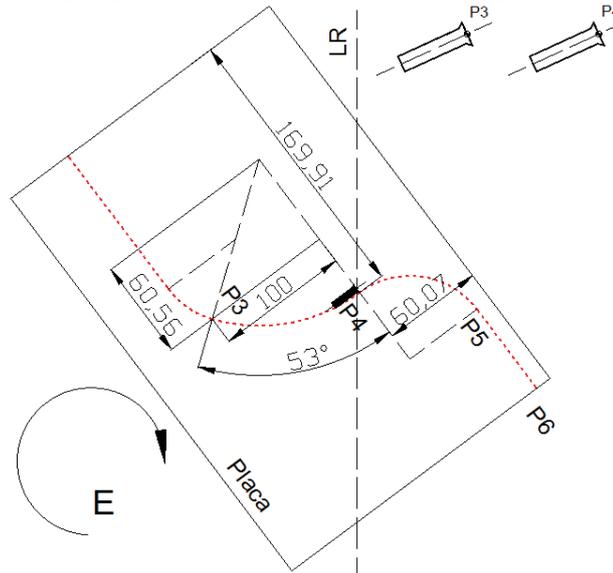


Fonte: Autor.

### G2 X60.07 Z169.91 I-100 K-60.56 E53 F3500

Mesa sofre uma rotação de  $53^\circ$  para continuar o corte da curva, e a lâmina permanece estacionária em  $-37^\circ$  (Figura 94).

Figura 94 – Corte em curva até a posição P4, torção máxima da lâmina e giro da mesa.

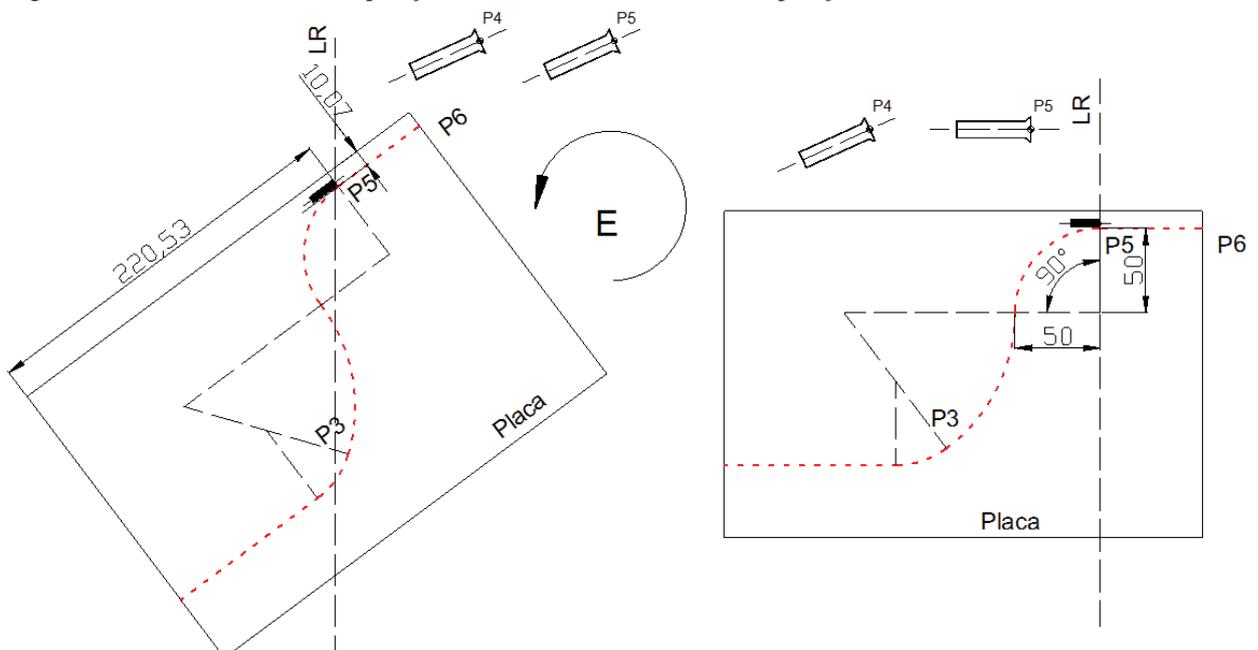


Fonte: Autor.

### G3 X10.07 Z220.53 I K50 B0 E90 F3500

Lâmina retorna à posição zero grau e a mesa também retorna a zero grau durante a trajetória (Figura 95).

Figura 95 – Corte em curva até a posição P5, lâmina e mesa retornam a posição zero.

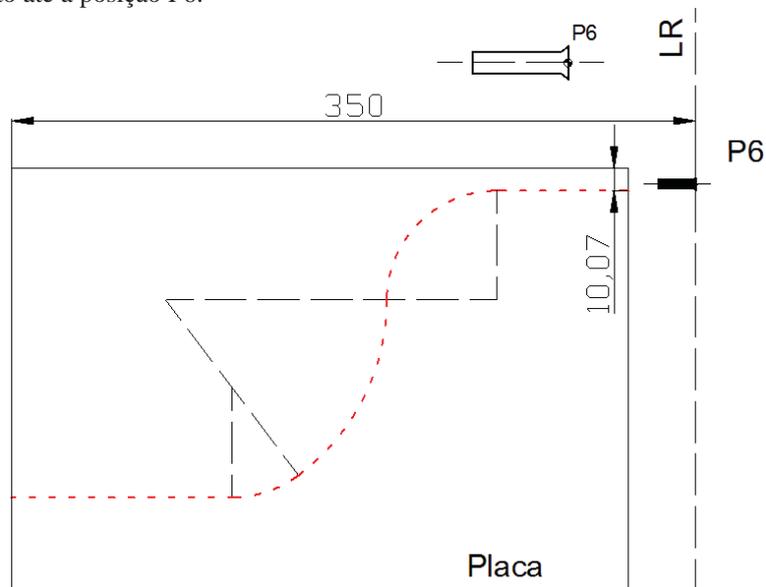


Fonte: Autor.

**G1 X10.07 Z350 B0 E0 F3500**

Mesa se desloca para o corte reto final (Figura 96).

Figura 96 – Corte reto até a posição P6.



Fonte: Autor.

Ao longo deste capítulo foi desenvolvido o projeto da serra de fita automática, utilizando as quatro fases da metodologia projetual de Pahl et al. (2013) o que permitiu progredir gradualmente iniciando nas ideias e características, passando pela concepção, princípios de funcionamento, ilustrações das escolhas juntamente com explicações, detalhamento do geral, e programação das operações, buscando o atendimento da lista de requisitos. Um equipamento que garanta segurança ao usuário permitindo montagem simples e rápida com peças padronizadas, mas com algo inovador conectado à Indústria 4.0 refletido na possibilidade de gerenciar a manufatura e a autoprogramação.

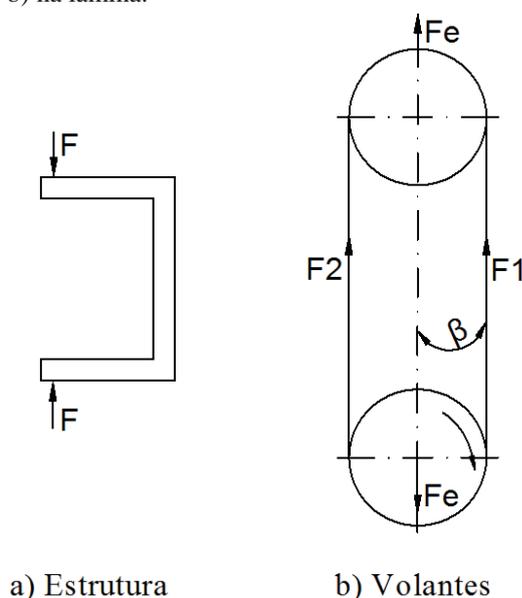
## 4 MODELOS MATEMÁTICOS PARA A AUTOMAÇÃO DA MÁQUINA

Nesta etapa, são feitas análises e apresentados o equacionamento para determinar a força de esticamento da lâmina, as análises de força e potência de corte, o torque nos eixos, as forças nas guias e nos eixos dos volantes, a velocidade do motor principal e dos eixos, a velocidade em pulsos por segundo nos eixos, o torque e rotação na lâmina. A maioria das equações utilizadas é oriunda da resistência dos materiais, da mecânica aplicada e da estática. No Apêndice B é apresentado um exemplo numérico. Dados estes que podem ser calculados e implementados via *software* de gerenciamento da máquina, permitindo obterem-se dados iniciais e de funcionamento para o serramento de placas.

### 4.1.1 Força de esticamento da serra

A força de esticamento da lâmina atua tentando deformar a estrutura, que é analisada em forma de “C” (Figura 97-a). Em relação aos volantes, a força de esticamento da lâmina (Figura 97-b) pode ser determinada utilizando-se a equação (4.1). O não esticamento da lâmina, ocasiona o funcionamento inadequado da máquina. O modelo matemático permite avaliar os valores em equilíbrio servindo de referência inicial.

Figura 97 – Forças: a) estrutura; b) na lâmina.



Fonte: Autor.

Assim a força de esticamento é dada por:

$$F_e = (F_1 + F_2) \cos \beta \quad (4.1)$$

Onde:

$F_e$  = Força de esticamento;

$F_1$  = Força no lado tenso da lâmina;

$F_2$  = Força no lado frouxo da lâmina;

$\beta$  = ângulo formado entre a força no lado frouxo e a força de esticamento.

Como os volantes possuem o mesmo diâmetro,  $\beta=0$ .

Para determinar as forças no lado tenso e no lado frouxo, têm-se as equações (4.2) e (4.3), respectivamente:

$$F_1 = F \frac{e^{\mu\theta}}{(e^{\mu\theta}) - 1} \quad (4.2)$$

$$F_2 = F \frac{1}{(e^{\mu\theta}) - 1} \quad (4.3)$$

Onde:

$\mu$  = Coeficiente de atrito entre lâmina e volante;

$\theta$  = ângulo (em radianos) de abraçamento, é de  $180^\circ$ . Logo  $\theta = 2\pi$ ;

$F$  = é função da força de corte que a serra de fita exerce.

Assim:

$$F_e = F \left( \frac{e^{\mu 2\pi}}{e^{\mu 2\pi} - 1} + \frac{1}{e^{\mu 2\pi} - 1} \right)$$

$$F_e = F \left( \frac{e^{\mu 2\pi} + 1}{e^{\mu 2\pi} - 1} \right)$$

#### 4.1.2 Análise de forças de corte e potência

De acordo com Gonçalves (2000), podemos adotar o mesmo procedimento utilizado para determinar a pressão específica de corte da usinagem de materiais metálicos para exprimir a força de corte em madeira, com o uso da equação (4.4).

$$P_c = Ks_1 b h^{1-z} \quad (4.4)$$

Onde:

$P_c$  = Força de corte (daN);

$Ks_1$  = Pressão específica de corte ou constante específica do material (daN/mm<sup>2</sup> ou kgf/mm<sup>2</sup>);

$b$  = Largura de corte ou comprimento atuante da aresta (mm);

$h$  = Espessura de corte (mm);

$1 - z$  = Coeficiente adimensional.

Para calcular a espessura de corte (espessura do cavaco) utiliza-se a equação (4.5).

$$h = \frac{V_f p}{60 V_c} \quad (4.5)$$

Onde:

$V_f$  = Velocidade de avanço (m/min).

$p$  = Passo da serra (mm);

$V_c$  = Velocidade de corte (m/s).

Assim:

$$\text{Força de corte} \rightarrow P_c = K s_1 b \left( \frac{V_f p}{60 V_c} \right)^{1-z}$$

Logo, é possível calcular a potência no eixo do volante utilizando a equação (4.6).

$$N = M \omega \quad (4.6)$$

Onde:

$N$  = Potência (W);

$M$  = Torque (N m)

$\omega$  = Velocidade angular do volante (rd/s);

Com a equação (4.7) calcula-se a velocidade angular do volante.

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \quad (4.7)$$

Onde:

$n$  = Rotação volante (rpm).

Com a equação (4.8) calcula-se o torque no eixo do volante.

$$M = \frac{P_c D_V}{2} \quad (4.8)$$

Onde:

$D_V$  = Diâmetro do volante (m);

Assim:

$$N_V = \frac{P_c D_V}{2} \frac{\pi n}{30} = \frac{P_c D_V \pi n}{60}$$

Considerando o rendimento da serra de  $\eta_s$  tem-se a potência no eixo do volante pela equação (4.9).

$$N_{\text{Eixo volante}} = \frac{N_V}{\eta_s} \quad (4.9)$$

Considerando uma transmissão por correia entre o eixo do volante e o motor, com a equação (4.10) é possível calcular a potência do motor.

$$N_{\text{motor}} = \frac{N_{\text{Eixo volante}}}{\eta_c \eta_R} \quad (4.10)$$

Onde:

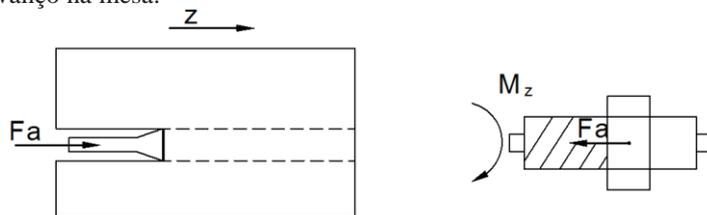
$\eta_c$  = Rendimento da correia;

$\eta_R$  = Rendimento da transmissão.

### 4.1.3 Torque de avanço da mesa

A Figura 98 ilustra a força de avanço e o momento no eixo Z para corte em linha reta. A força de avanço ( $F_a$ ) é função da condição de corte. O momento no eixo Z pode ser calculado com a equação (4.11).

Figura 98 – Força de avanço na mesa.



Fonte: Autor.

$$M_z = \frac{(\mu + \tan \beta) F_a D_m}{(1 - \mu \tan \beta) 2} \quad (4.11)$$

Onde:

$\mu$  = Coeficiente de atrito entre a porca e o parafuso;

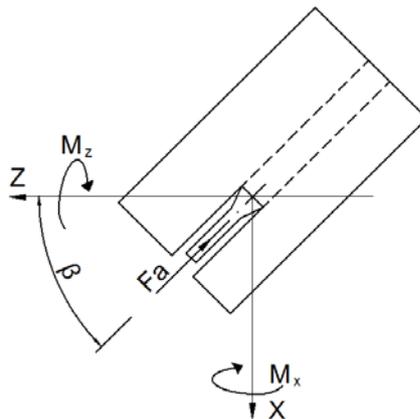
$\beta$  = Ângulo da trajetória em relação ao eixo Z (função da trajetória);

$D_m$  = Diâmetro médio do parafuso (m);

$F_a$  = Força de avanço, que é função da condição de corte (N).

A Figura 99 apresenta o deslocamento de um dente para o corte em trajetória curva, os momentos nos eixos e a força de avanço.

Figura 99 – Força de avanço na mesa para corte curvo.



Fonte: Autor.

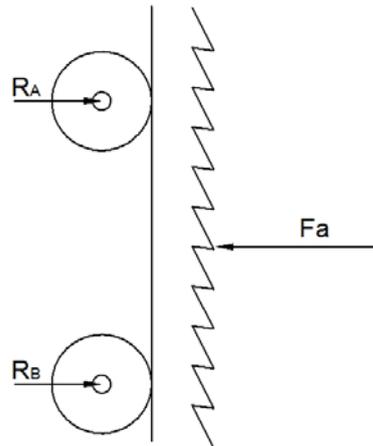
Dessa forma, os momentos no eixo X e Z são, respectivamente:

$$M_x = \frac{(\mu + \tan \beta) F_a \sin \beta}{(1 - \mu \tan \beta)} \frac{D_m}{2}$$

$$M_z = \frac{(\mu + \tan \beta) F_a \cos \beta}{(1 - \mu \tan \beta)} \frac{D_m}{2}$$

Do mesmo modo, a lâmina da serra ficará apoiada atrás por dois rolamentos, conforme a Figura 100.

Figura 100 – Força de avanço sobre os rolamentos.



Fonte: Autor.

Cada rolamento suporta metade da força de avanço, ou seja,  $R_A = R_B = Fa/2$ . É possível determinar a rotação do rolamento com a equação (4.12) para calcular a vida do rolamento.

$$n_R = \frac{30 \omega_R}{\pi} \quad (4.12)$$

Onde:

$n_R$  = Rotação rolamento (rpm);

$\omega_R$  = Velocidade angular do rolamento (rd/s).

A velocidade angular do rolamento pode ser determinada com a equação (4.13).

$$\omega_R = \frac{2 V_L}{D_R} \quad (4.13)$$

Onde:

$V_L$  = Velocidade da lâmina (m/s);

$D_R$  = Diâmetro do rolamento (m).

Assim:

$$n_R = \frac{30}{\pi} \frac{2 V_c}{D_R} \quad n_R = \frac{60}{\pi} \frac{V_c}{D_R}$$

Sabendo  $R_A$  e  $R_B$ , o tipo de rolamento e a rotação, é possível calcular a vida do rolamento. A SKF (2016) indica a equação (4.14) para calcular a vida nominal básica ( $L_{10h}$ ), em horas operacionais com 90% de confiabilidade.

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 n_R} \left( \frac{C}{P} \right)^p \quad (4.14)$$

Onde:

$C$  = Classificação de carga dinâmica básica (kN);

$P$  = Carga dinâmica equivalente do rolamento (kN);

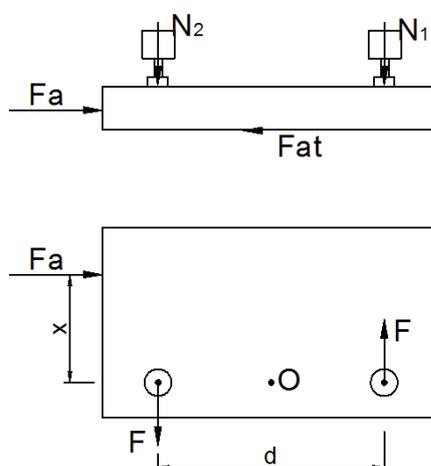
$p$  = Expoente da equação de vida: 3 - para rolamento de esferas; 10/3 - para rolamento de rolos.

Dessa forma, o *software* de gerenciamento pode sinalizar quando chegou ao número de horas operacionais calculadas e avisar a troca dos rolamentos.

#### a) Fixação da placa

A Figura 101 ilustra as forças atuantes na fixação da placa. A força de atrito pode ser calculada pela equação (4.15).

Figura 101 – Forças e momentos atuantes na fixação da placa.



Fonte: Autor.

$$F_{at} = (N_1 + N_2) \mu \quad (4.15)$$

Onde:

$N_1$  e  $N_2$  = Forças normais à placa devido à fixação (N);

$\mu$  = Coeficiente de atrito.

É possível determinar o momento em relação ao ponto O, que fica no centro das fixações:

$$M_o = -F_a x + F d = 0 \quad \rightarrow F = F_{at}$$

$$-F_a x + (N_1 + N_2) \mu d = 0$$

Assim tem-se a força mínima efetuada pelas fixações:

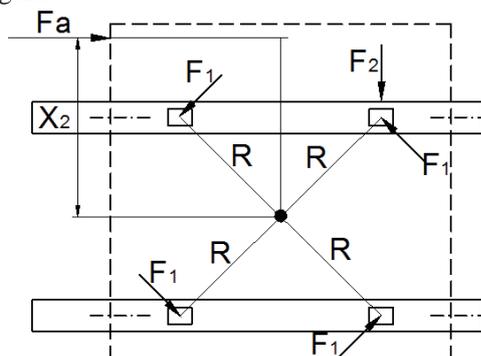
$$(N_1 + N_2) = \frac{F_a x}{\mu d}$$

$$N_1 = N_2 = N \quad \rightarrow \quad N = \frac{F_a x}{2\mu d}$$

### b) Forças atuantes nas guias

A Figura 102 apresenta as forças ( $F_1$  e  $F_2$ ) atuantes nas guias, sendo que  $F_1$  é transmitida nos patins e  $F_2$  age sobre a guia; considerando que a mesa tende a girar em torno do centro devido à força de avanço ( $F_a$ ), a força de corte comprime a mesa contra as guias.

Figura 102 – Forças atuantes nas guias.

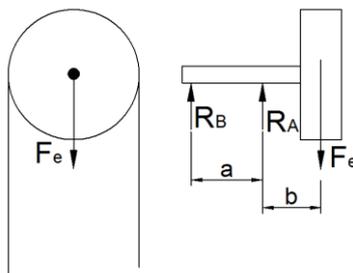


Fonte: Autor.

### c) Forças atuando no eixo do volante superior

As forças que atuam no volante inferior são a força de esticamento ( $F_e$ ) e as reações nos mancais dos rolamentos ( $R_A$  e  $R_B$ ) de acordo com a Figura 103.

Figura 103 – Forças atuantes no volante superior.



Fonte: Autor.

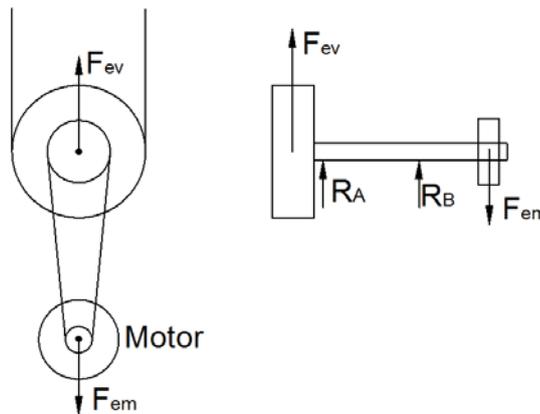
As reações são obtidas com as equações de equilíbrio ( $\Sigma F_y=0$  e  $\Sigma M=0$ ). Assim temos:

$$R_A = \frac{F_e b}{a} \text{ e } R_B = F_e \left(1 - \frac{b}{a}\right)$$

#### d) Forças atuando no volante inferior

As forças que atuam no volante inferior são a força de esticamento no volante ( $F_{ev}$ ), as reações nos mancais dos rolamentos ( $R_A$  e  $R_B$ ), mais a força de esticamento proveniente do motor, conforme a Figura 104.

Figura 104 – Forças atuantes no volante inferior.



Fonte: Autor.

#### 4.1.4 Velocidade do motor de acionamento

A velocidade no motor principal pode ser obtida com o uso da equação (4.16), que aborda a relação de transmissão.

$$i = \frac{n_m}{n_v} = \frac{d_v}{d_m} \quad (4.16)$$

Onde:

$i$  = Relação de transmissão;

$n_m$  = Rotação no motor principal (rpm);

$n_v$  = Rotação no volante (rpm);

$d_v$  = Diâmetro do volante (mm);

$d_m$  = Diâmetro da polia no eixo do motor (mm).

Logo tem-se que:

$$n_m = n_v i \rightarrow i = \frac{d_v}{d_m} \rightarrow n_m = \frac{n_v d_v}{d_m}$$

A rotação do volante depende da velocidade angular do mesmo que pode ser obtida com equação (4.12 e 4.13):

$$n_v = \frac{30 \omega_v}{\pi} \rightarrow \omega_v = \frac{2 V_c}{d_v} \rightarrow n_v = \frac{30}{\pi} \frac{2 V_c}{d_v}$$

Assim a rotação no motor fica:

$$n_m = \frac{60}{\pi} \frac{V_c}{d_v} \frac{d_v}{d_m} \quad n_m = \frac{60 V_c}{\pi d_m}$$

### a) Velocidade em pulsos/segundo nos servos dos eixos

A velocidade em pulsos por segundo pode ser obtida sabendo-se o número de divisões do encoder ( $E_c$ ) e a rotação do servo, através da equação (4.17).

$$n_{ps} = \frac{n_m E_c}{60} \quad (4.17)$$

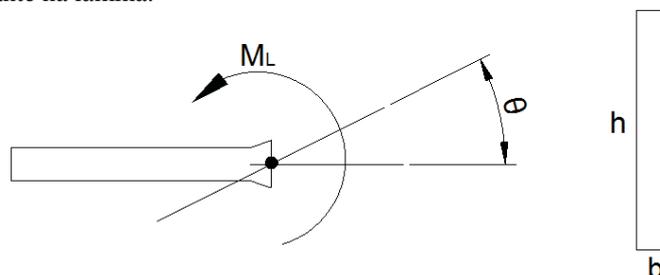
Substituindo a equação (4.17) na rotação do motor chega-se à velocidade em pulsos por segundo:

$$n_{ps} = \frac{60}{\pi} \frac{E_c}{60} \frac{V_c}{d_m} \quad \rightarrow \quad n_{ps} = \frac{E_c V_c}{\pi d_m}$$

### b) Torque da lâmina

O torque na lâmina ( $M_L=T$ ) é devido ao esforço de torção na mesma, que pode ser considerada como uma barra retangular (Figura 105).

Figura 105 – Torque atuante na lâmina.



Fonte: Autor.

A máxima tensão de cisalhamento é obtida com a equação (4.18).

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{T}{c_1 h b^2} \quad (4.18)$$

Onde:

$\tau_{m\acute{a}x}$  = Tensão máxima de cisalhamento (MPa);

$T$  = Torque na lâmina (N mm);

$h$  = Largura da lâmina (mm);

$b$  = Espessura da lâmina (mm);

$c_1$  = Coeficiente que depende da relação entre  $h/b$ .

O ângulo de torção pode ser obtido com a equação (4.19).

$$\theta = \frac{TL}{c_2 G h b^3} \quad (4.19)$$

Onde:

$\theta$  = Ângulo de torção (rad);

$L$  = Comprimento da lâmina (mm);

$G$  = Módulo de elasticidade transversal (GPa);

$c_2$  = Coeficiente que depende da relação entre h/b.

Pode-se relacionar o torque na lâmina, o ângulo de torção e o comprimento da lâmina a partir da tensão máxima de cisalhamento da lâmina. Os coeficientes  $c_1$  e  $c_2$  possuem o valor de 0,312 quando a relação h/b for igual a 10.

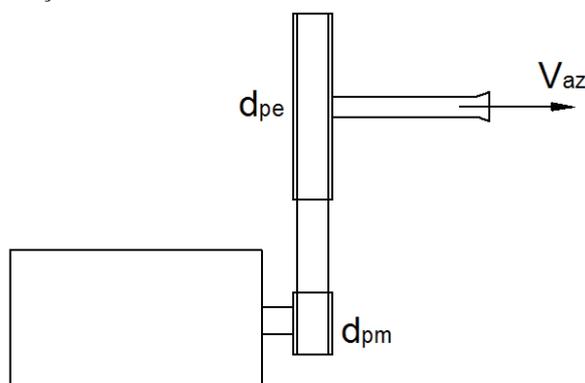
Substituindo os valores temos:

$$T = \tau_{m\acute{a}x} c_1 h b^2 \quad \rightarrow \quad \theta = \frac{\tau_{m\acute{a}x} L}{b G}$$

### c) Rotação do eixo Z

A velocidade de avanço depende da rotação do eixo e do passo do parafuso, equação (4.20) e Figura 106.

Figura 106 – Velocidade de avanço no eixo Z.



Fonte: Autor.

$$V_{az} = n_E p \quad (4.20)$$

Onde:

$V_{az}$  = Velocidade de avanço da mesa (m/s);

$n_E$  = Rotação no eixo (rpm);

$p$  = Passo do parafuso de transmissão (m).

Utilizando o diâmetro das polias do eixo e do motor, na relação de transmissão da equação (4.16) tem-se:

$$n_m = i n_E \quad \rightarrow \quad i = \frac{n_m}{n_E} = \frac{d_{pE}}{d_{pm}} \quad \rightarrow \quad n_e = \frac{V_{az}}{p}$$

$$n_m = \frac{d_{pE} V_{az}}{d_{pm} p}$$

Dessa forma, a velocidade em pulsos por segundo é:

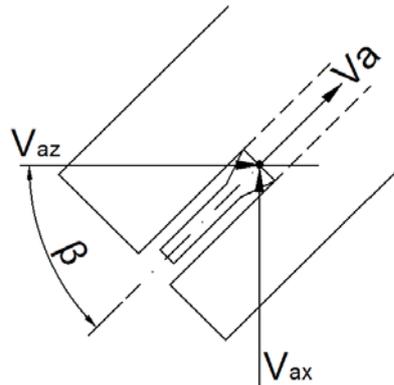
$$n_{ps} = \frac{d_{pE} V_{az}}{d_{pm} p} \frac{E_c}{60}$$

Para o eixo X utiliza-se o mesmo equacionamento para calcular a velocidade de avanço ( $V_{AX}$ ).

#### d) Rotação nos eixos Z e X combinados

A rotação nos eixos Z e X combinados permite efetuar trajetórias fora do eixo Z. Pode ser uma trajetória em linha reta ou em curva (Figura 107).

Figura 107 – Decomposição da velocidade de avanço nos eixos.



Fonte: Autor.

A decomposição da velocidade de avanço nos eixos X e Z resulta em:

$$V_{az} = V_a \cos \beta \text{ e } V_{ax} = V_a \sin \beta$$

Assim a velocidade em pulsos/segundo fica:

Para o eixo Z:

$$n_{psZ} = \frac{d_{pE} V_{az} \cos \alpha}{d_{pm} p} \frac{E_c}{60}$$

Para o eixo X:

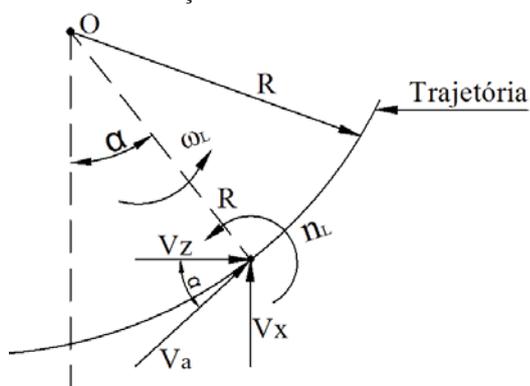
$$n_{psX} = \frac{d_{pE} V_{az} \sin \alpha}{d_{pm} p} \frac{E_c}{60}$$

#### 4.1.5 Rotação da lâmina ( $n_L$ ) quando da torção

O cálculo da rotação da lâmina é importante para garantir que os dentes e não as partes laterais da lâmina ataquem a placa, proporcionando um serrado paralelo à trajetória curva em

consonância com as velocidades dos eixos X e Z em função do raio de curvatura programado (Figura 108).

Figura 108 – Relação entre a velocidade de avanço e o raio de curvatura.



Fonte: Autor.

A velocidade de avanço ( $V_A$ ) decomposta resulta  $V_X$  e  $V_Z$ . A velocidade angular da lâmina ( $\omega_L$ ) pode ser calculada pela equação (4.13). Assim a rotação da lâmina resulta em:

$$n_L = \frac{30 \omega_L}{\pi} \rightarrow \omega_L = \frac{V_A}{R} \rightarrow n_L = \frac{30 V_A}{\pi R}$$

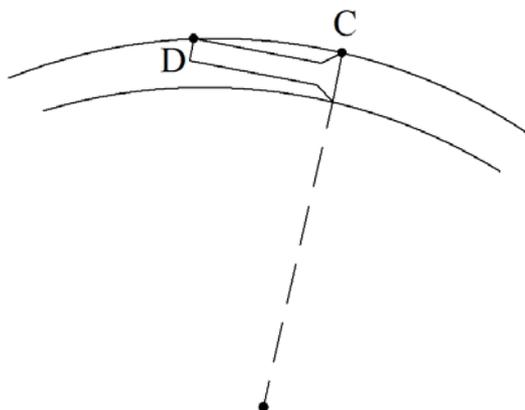
Onde:

$R$  = Raio de curvatura da curva efetuada (m);

$V_A$  = Velocidade de avanço da serra (m/s).

Barcík (2003) realizou a análise da trajetória de uma serra de fita para determinar o raio de curvatura em função das dimensões da lâmina. Na primeira condição, ele considerou que a borda de corte forma uma linha reta com o centro de curvatura e assim forma o canal no qual a lâmina é tangente externamente nos pontos C e D (Figura 109).

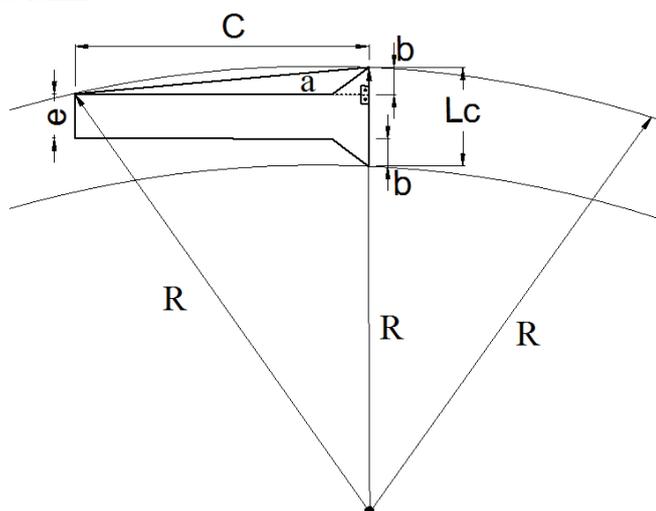
Figura 109 – Pontos na lâmina tangentes à curvatura.



Fonte: Adaptado de Barcík, 2003.

Barcík (2003) relacionou o raio de curvatura ( $R$ ) com a largura da lâmina ( $C$ ), a espessura ( $e$ ), o travamento ( $b$ ) e a largura de corte ( $L_c$ ), considerando, para isso, os elementos da lâmina como um triângulo retângulo (Figura 110).

Figura 110 – Elementos da lâmina.



Fonte: Adaptado de Barcík, 2003.

Assim tem-se o equacionamento:

$$a^2 = C^2 + b^2 \rightarrow b = \frac{L_c - e}{2}$$

Para o raio de curvatura tem-se:

$$R^2 = C^2 + (R - b)^2 \rightarrow R^2 = C^2 + R^2 - 2Rb + b^2 \rightarrow R = \frac{C^2 + b^2}{2b}$$

Para o autor,  $b^2$  é um valor muito pequeno podendo ser considerado igual a zero ( $b^2 = 0$ ). Dessa forma chegou ao valor do raio de curvatura que foi considerado ruim para:

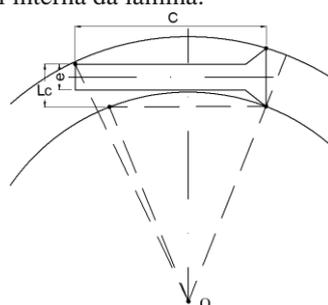
$$R = \frac{0,5 C^2}{b}$$

Em outra análise, Barcík (2003) assume que a curvatura é tangente à lateral interna da lâmina (Figura 111), no que resulta a relação:

$$R \geq \frac{0,086 C^2}{b}$$

Este posicionamento da lâmina durante a operação de corte numa curva permite trabalhar com raios de curvaturas menores.

Figura 111 – Curvatura tangente à lateral interna da lâmina.



Fonte: Adaptado de Barčík, 2003.

A Tabela 11 contém as duas equações apresentadas por Barčík (2003); assumindo os mesmos valores para a lâmina de serra, pode-se observar que a equação da coluna da direita mostra um ganho com relação ao menor raio de curvatura.

Tabela 11 – Comparação de equações para determinar o raio de curvatura a ser cortado.

$R = \frac{0,5 C^2}{b}$	$R \geq \frac{0,086 C^2}{b}$
C= 10 mm e b = 0,5 mm	C= 10 mm e b = 0,5 mm
R = 100 mm	R = 17,2 mm

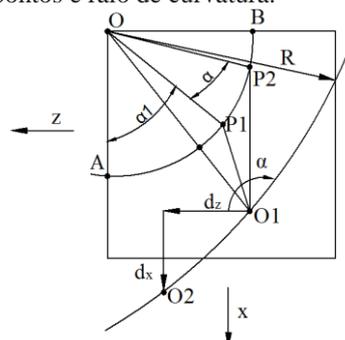
Fonte: Autor.

Desta forma, utilizando a segunda metodologia, podem ser obtidas peças com raios de curvatura menores. Para isso, é necessária a implementação da análise da trajetória da lâmina levando em conta o deslocamento da serra do modo descrito na Figura 111.

#### 4.1.6 Rotação da mesa com a torção da lâmina

Para a mesa, a Figura 112 ilustra o deslocamento entre dois pontos em um serrado em curva. A lâmina sofre a torção e a mesa se desloca em Z e X.

Figura 112 – Deslocamento entre dois pontos e raio de curvatura.



Fonte: Autor.

Considerando o deslocamento da lâmina entre os pontos P1 e P2 em um tempo  $t_0$ , a mesa gira em torno do ponto “O1” de um ângulo  $\alpha$  e o ponto “O1” se desloca  $dz$  e  $dx$  para a nova posição “O2”. Assim tudo deve girar em torno do ponto “O” de centro de curvatura de arco AB.

A mesa deve se deslocar:

$$\text{em } Z \rightarrow V_z = \frac{d_z}{t} \quad \text{em } X \rightarrow V_x = \frac{d_x}{2}$$

A rotação da mesa para que o centro “O1” se desloque para a posição “O2” descrevendo um arco de círculo com o centro “O”, é obtida pela equação (4.21).

$$\omega_m = \frac{\alpha}{t} \quad (4.21)$$

Onde:

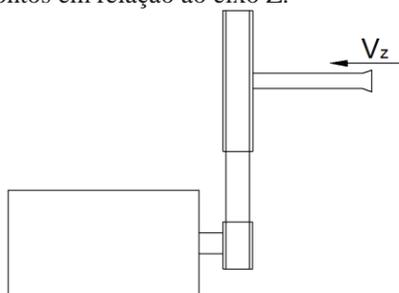
$\omega_m$  = Velocidade angular do giro da lâmina (rd/s);

$\alpha$  = É função da trajetória

$t$  = Tempo (s).

A Figura 113 ilustra o deslocamento de um ponto ao outro referente ao motor Z, responsável por movimentar a lâmina.

Figura 113 – Deslocamento entre 2 pontos em relação ao eixo Z.



Fonte: Autor.

Com a relação de transmissão, obtém-se a velocidade em pulsos por segundo para o motor Z com o seguinte equacionamento:

$$n_z = \frac{V_z}{\text{passo}} \rightarrow i = \frac{n_L}{n_z} \rightarrow n_L = n_z i \rightarrow n_L = \frac{V_z i}{\text{passo}}$$

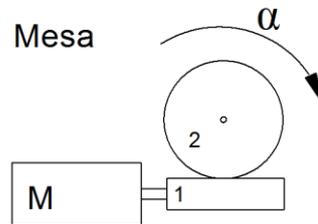
Dessa forma, a velocidade em pulsos por segundo é:

$$n_{pz/s} = \frac{V_z}{\text{passo}} i E_c$$

$$n_{px/s} = \frac{V_x}{\text{passo}} i E_c$$

A Figura 114 apresenta o esquema do sistema de giro da mesa, formado pelo motor, parafuso sem fim (1) e a coroa (2).

Figura 114 – Esquema sistema de giro da mesa.



Fonte: Autor.

Com a relação de transmissão chega-se à velocidade angular da mesa.

$$i = \frac{\omega_L}{\omega_2} \rightarrow \omega_L = i \omega_2 \rightarrow \omega_2 = \omega_m$$

$$\omega_m = \frac{\alpha}{t} \rightarrow \omega_L = i \frac{\alpha}{t}$$

Assim, a velocidade em pulsos por segundo para a mesa fica:

$$n_{pm/s} = \frac{i}{2\pi} \frac{\alpha}{t} E_c$$

Como o parâmetro é a velocidade de avanço ( $V_A$ ), a decomposição da mesma nos eixos considera os ângulos que dependem da trajetória de corte e resulta em:

$$V_z = V_A \cos(\alpha_i + \alpha) \text{ e } V_x = V_A \sin(\alpha_i + \alpha)$$

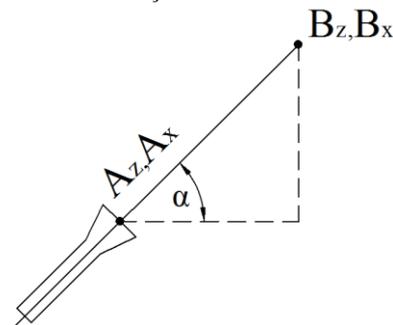
Substituindo a velocidade em pulsos por segundo dos eixos tem-se:

$$n_{pz/s} = \frac{V_A \cos(\alpha_i + \alpha)}{\text{passo}} i E_c$$

$$n_{px/s} = \frac{V_A \sin(\alpha_i + \alpha)}{\text{passo}} i E_c$$

A Figura 115 apresenta os elementos para determinar o ângulo ( $\alpha$ ) no sistema de torção da lâmina utilizando a equação (4.22).

Figura 115 – Determinação do ângulo sistema de torção da lâmina.



Fonte: Autor.

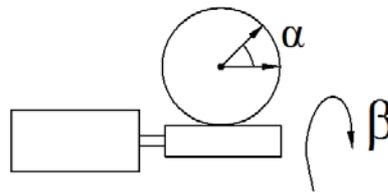
$$\alpha = \text{arc tg} \frac{B_x - A_x}{B_z - A_z} \quad (4.22)$$

A equação remonta às relações do triângulo retângulo. Assim, tem-se:

$$\alpha = \sqrt{(B_z - A_z)^2 + (B_x - A_x)^2}$$

Considerando o giro de torção da lâmina ( $\alpha$ ), se o sistema possui coroa e sem-fim (Figura 116) com relação de transmissão ( $i$ ) pode-se chegar ao número de pulsos no motor.

Figura 116 – Ângulo para sistema coroa e sem-fim da lâmina.



Fonte: Autor.

Logo:

$$i = \frac{\beta}{\alpha} \rightarrow \beta = i \alpha$$

Assim o número de pulsos do motor, para girar o ângulo ( $\alpha$ ) na lâmina fica:

$$n_p = \frac{i \alpha}{2\pi} E_c$$

Considerando que a mesa se desloca de A para B, tem-se:

$$n_{pz} = \frac{B_z - A_z}{\text{passo}} i_z E_c$$

$$n_{px} = \frac{B_x - A_x}{\text{passo}} i_x E_c$$

Se  $V_A$ ,  $V_z = V_A \cos(\alpha)$  e  $V_x = V_A \sin(\alpha)$ , a velocidade em pulsos segundo resulta:

$$n_{pz} = \frac{V_A \cos(\alpha)}{\text{passo}} E_c i_z$$

$$n_{px} = \frac{V_A \sin(\alpha)}{\text{passo}} E_c i_x$$

Onde:

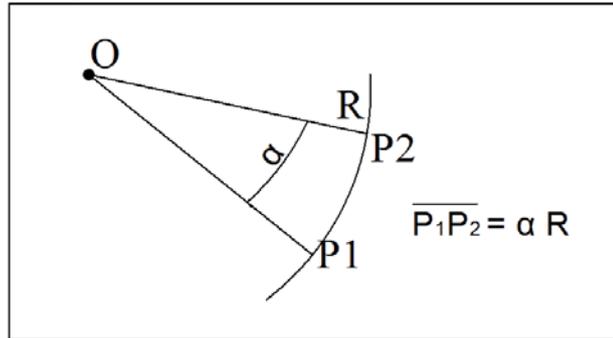
$$\cos \alpha = \frac{B_z - A_z}{\sqrt{(B_z - A_z)^2 + (B_x - A_x)^2}}$$

$$\sin \alpha = \frac{B_x - A_x}{\sqrt{(B_z - A_z)^2 + (B_x - A_x)^2}}$$

#### 4.1.7 Análise da mesa em movimento de rotação

A Figura 117 aborda o arco formado pelos pontos P1 e P2 em função do deslocamento no tempo. O ponto “O” corresponde ao centro de curvatura da curva cortada.

Figura 117 – Arco formado pelos pontos P1 e P2.



Fonte: Autor.

Substituindo o tempo, chega-se à velocidade em pulsos por segundo da mesa em função da velocidade de avanço ( $V_A$ ) e do raio de curvatura ( $R$ ).

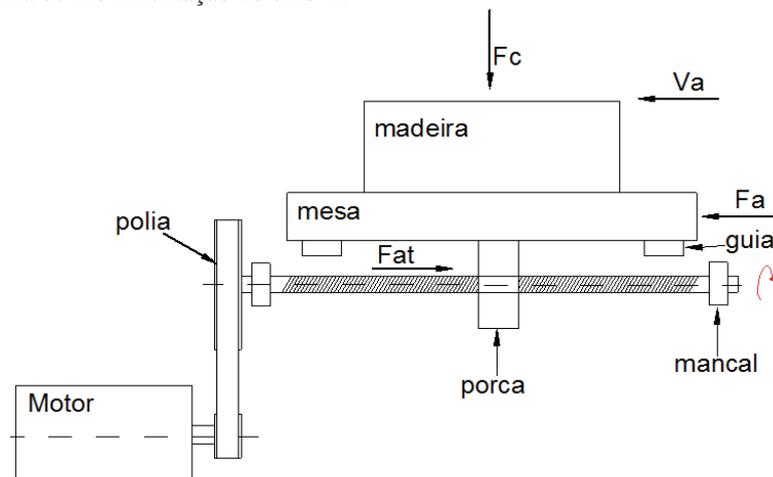
$$X = V t \rightarrow t = \frac{X}{V} \rightarrow t = \frac{\alpha R}{V_A}$$

$$n_{pm/s} = \frac{i}{2\pi} \frac{E_c V_A}{R}$$

#### 4.1.8 Análise no eixo Z com relação à dinâmica

Considerando a descrição básica da estrutura e formas de atuação no eixo Z, tem-se o esquema de movimentação no referido eixo (Figura 118).

Figura 118 – Esquema de movimentação no eixo Z.



Fonte: Autor.

Considerando a equação geral das máquinas (4.23), tem-se na partida:

$$\int_{t_0}^{t_1} N_{mot} dt = \frac{1}{2} \sum m V_1^2 - V_0^2 + \frac{1}{2} \sum I (W_1^2 - W_0^2) + \int_{t_0}^{t_1} N_r dt \quad (4.23)$$

Onde:

$\int_{t_0}^{t_1} N_{mot} dt$  – A primeira parcela corresponde ao trabalho motor necessário para movimentar a mesa nas condições descritas a partir do motor.

$\frac{1}{2} \sum m (V_1^2 - V_0^2)$  – A primeira parcela do lado direito da igualdade corresponde às inércias de translação.

$\frac{1}{2} \sum I (W_1^2 - W_0^2)$  – A segunda parcela são as inércias de rotação.

A última parcela corresponde ao trabalho resistente útil e passivo.

Assim a equação pode ser descrita:

$$\frac{1}{2} M_m W_m t_1 = \frac{1}{2} \sum m V_1^2 + \frac{1}{2} \sum I W_1^2 + \int_{t_0}^{t_1} N_r dt$$

Resolvendo a equação e considerando na partida, ou seja, na pior situação, tem-se:

$$M_m = \frac{\sum m V_1^2 + \sum I W_1^2 + \int_{t_0}^{t_1} N_r dt}{W_m t_1}$$

Resolvendo cada parcela da equação resultará:

$$\begin{aligned} \sum m V_1^2 &= (m_m + m_p + m_{md}) V_a^2 \\ \sum I W_1^2 &= (I_m + I_{pm}) W_m^2 + (I_{pf} + I_p) W_f^2 \\ \int_{t_0}^{t_1} N_r dt &= F_a V_a t_1 + M_{atm} W_m t_1 \end{aligned}$$

$$M_{atm} = \frac{M_{atf}}{i} \rightarrow i = \frac{d_2}{d_1}$$

$$M_{atf} = \left( \tan \alpha \cdot F_a X \cdot \frac{d_f}{2} \cdot \delta \right) + M_{at\ mancal}$$

Onde  $\delta$  é o coeficiente de rolamento.

$$F_a X = F_a + (F_c + P_m + P_{md}) \cdot \mu$$

Onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito das guias.

$$M_{atf} = \left( \tan \alpha \cdot F_a X \cdot \frac{d_f}{2} \cdot \delta \right) + \mu \frac{d}{2} F_R$$

Onde  $F_R$  é a carga radial no fuso.

Uma análise semelhante pode ser efetuada para o eixo X.

#### 4.1.9 Movimento do acionamento da torção da lâmina

O torque dinâmico pode ser obtido a partir da equação geral das máquinas (4.23).

$$\int_{t_0}^{t_1} N_m dt = \frac{1}{2} m(V_1^2 - V_o^2) + \frac{1}{2} I(W_1^2 - W_o^2) + \int_{t_0}^{t_1} N_r dt$$

Onde  $V_o = 0$  e não há massa em translação.

$$\int_{t_0}^{t_1} N_m dt = \frac{1}{2} I W_1^2 + \int_{t_0}^{t_1} N_r dt$$

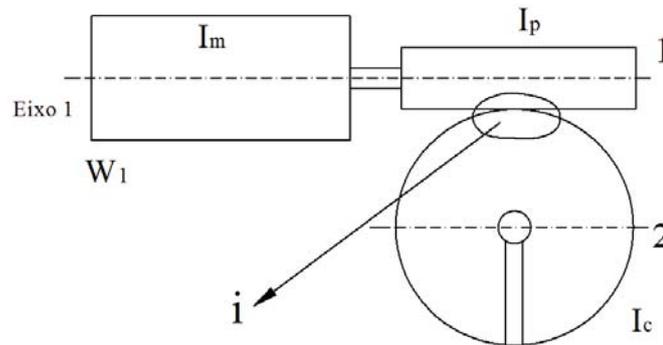
Como deseja-se saber o torque, tem-se:

$$\frac{M W_1 t_1}{2} = \frac{1}{2} I W_1^2 + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} N_r dt$$

$$M = \frac{I W_1^2 + \int_{t_0}^{t_1} N_r dt}{W_1 t_1}$$

Onde  $I_m$  corresponde a inércia total do sistema no eixo do motor (Figura 119).

Figura 119 – Inércia do sistema de torção da lâmina.



Fonte: Autor.

A inércia do eixo 1, equação (4.24), depende da inércia do motor ( $I_m$ ), do parafuso sem-fim ( $I_p$ ) e da coroa ( $I_c$ ).

$$I_{Eixo\ 1} = (I_m + I_p) + \frac{I_c}{\eta i^2} \quad (4.24)$$

$$\int_{t_0}^{t_1} N_r dt = \frac{M_2}{i} \frac{W_1 t_1}{\eta}$$

$$M_1 = \frac{\left( (I_m + I_p) + \frac{I_c}{\eta i^2} \right) W_1^2 + \frac{M_2}{i} \frac{W_1 t_1}{\eta}}{W_1 t_1}$$

Ao longo do capítulo foi exposto o equacionamento prévio para: acionamento nos eixos, esforços em componentes, parâmetros de corte, deslocamento da mesa em trajetórias programadas. Tal análise pode ser aplicada com um *software* de monitoramento e diagnóstico em tempo real de acordo com a operação de corte. Este benefício contribui para o controle, acionamento e operação da serra de fita automática, integrando-a aos equipamentos autossuficientes e com capacidade em oferecer informações sobre seu estado funcional.

## 5 APLICANDO O CONCEITO DE INDÚSTRIA 4.0 À CONCEPÇÃO

A quarta Revolução Industrial que estamos vivenciando é baseada na interface entre o mundo real e o virtual, o que permite ter-se a inteligência artificial, que se manifesta através de veículos sem condutores, por exemplo. No que tange à serra de fita automática, esta assenta-se sobre quatro pilares: autodiagnóstico, autoprogramação, comunicação e máquinas inteligentes. Pelo autodiagnóstico, o equipamento é capaz de antever problemas e monitorar as soluções; a autoprogramação permite à máquina aprender com a rotina; em relação à comunicação, a possibilidade de otimização logística entre os elos de uma cadeia produtiva; a máquina inteligente, por fim, será capaz de customizar em massa produtos a partir da análise de preferência dos usuários.

### 5.1.1 Autodiagnóstico

Baseado no conceito de máquinas inteligentes para serem aplicadas, pode-se utilizar uma série de sensores para diagnóstico de funcionamento e manutenção.

Considerando que há um motor de acionamento do volante para a lâmina de serra, é possível monitorar a corrente exigida pelo motor e realizar um diagnóstico. Assim pode-se ler e registrar a corrente para o funcionamento em vazio, que serve para um diagnóstico inicial, o qual pode verificar se há, por exemplo, um mau funcionamento dos rolamentos com relação ao aumento da corrente no motor.

Também é possível verificar se os dentes da lâmina de serra ainda possuem uma afiação em condições de cortar adequadamente, sabendo a corrente exigida para o corte de uma determinada placa de madeira, que exige uma condição de operação, e emitido um alerta sobre tal situação. Esta análise da corrente pode ser estendida aos motores de acionamento da mesa principal. No monitoramento, pode-se verificar: a velocidade de avanço e ajustar; se o tempo de corte aumentou; e se a corrente é maior que a exigida;

A utilização do sistema de esticamento automático da lâmina de serra, implantado no volante superior, permite realizar também uma análise operacional. Caso a força de esticamento aumente, é sinal que está sendo exigida uma força de corte maior. Caso a força de esticamento torne-se zero, é sinal de que a lâmina deve ter rompido e a máquina deve parar.

O uso de sensores de rotação no volante do motor e do esticador permite verificar também se está havendo escorregamento da lâmina, o que representaria um esforço de corte maior e que, portanto, o esticamento deve ser aumentado. Isto é detectado se há diferença de rotação entre os dois volantes.

A movimentação das mesas e da torção da lâmina de serra em vazio vai permitir verificar, por meio da corrente de cada motor, se o sistema está em condições de operação; caso a corrente aumente a um valor excessivo, a ser determinado, pode sinalizar que há problemas, por exemplo, nos mancais, nas guias, etc.

Através do tempo de operação, pode-se monitorar a vida dos rolamentos, que foi informada inicialmente nos parâmetros da máquina, o que é dado em horas sobre determinadas condições de rotação e força. Conhecendo a força de esticamento, a rotação do volante e monitorando o tempo de operação, é possível estimar a vida dos rolamentos dos volantes e alertar quando está próximo da hora de substituir.

Para cada operação em que mudam estas condições, o sistema recalcula a estimativa e registra estes dados para informar quando da necessidade de realizar a troca dos respectivos componentes. Isto é válido para as guias das mesas.

Com o uso da computação em nuvem (*Big Data*), todas essas informações de autodiagnóstico são salvas, processadas e armazenadas permitindo o acesso em lugares remotos, via *smartphone*. Deste modo é possível aperfeiçoar o desempenho das máquinas.

### **5.1.2 Autoprogramação**

Dentro do conceito de autoprogramação, os *softwares* de apoio da máquina devem efetuar o planejamento da operação de corte, verificando antes os parâmetros do processo, se é viável para determinada máquina, a partir do desenho das peças, efetuar o corte programado, ou não. Se for possível cortar, os softwares realizam o plano de processo. A este conceito denomina-se planejamento de processo auxiliado por computador (CAPP).

Com o uso de QR CODE ou outro tipo de identificador de leitura colocado sobre o material a ser cortado, pode-se extrair as informações automaticamente da peça e ajustar os parâmetros de trabalho da máquina.

O sistema deve ser capaz de ler e interpretar determinados formatos de representação de projetos em CAD, de modo a efetuar todas as tarefas autônomas para a manufatura.

Com o uso de sensores em diversas partes da máquina, como, por exemplo, para monitorar a corrente dos diversos motores que trabalham associados, é possível armazenar os dados das leituras para que sofram um tratamento matemático adequado, a fim de aperfeiçoar os parâmetros de operação da máquina em tempo real.

Análises da potência de corte no serramento de diferentes materiais, obtido pelo controle das velocidades de corte e de avanço, auxiliam na determinação dos parâmetros de máxima produtividade.

Por exemplo, em função da variação da força de corte de uma placa de compensado, uma vez que uma placa é diferente da outra em função das madeiras utilizadas, é possível configurar a velocidade de avanço e de corte em função dos dados lidos a respeito do desempenho dos motores e adequar o resultado em função do acabamento resultante e do menor tempo possível de operação. Pode-se dizer, assim, que as máquinas podem aprender com a experiência. Desta forma podem readaptar a produção em função do tempo real de produção.

### **5.1.3 Comunicação**

Para atender os requisitos de máquina inteligente, a mesma deve estar conectada via internet com outras máquinas do sistema de produção.

Por exemplo, se for verificado que pode ser aumentada a velocidade de corte e de avanço e as condições do material o permitirem dentro das limitações da máquina, significa que o tempo necessário para serrar uma placa vai diminuir, sendo, portanto, necessário providenciar matéria-prima antes do programado inicialmente. A máquina deverá informar o sistema de controle que deve providenciar mais matéria-prima para um tempo específico determinado por ela calculado.

Por outro lado, a identificação da matéria-prima a ser cortada através de etiquetas identificadoras ou chips integrados, permite que a máquina se configure para as condições, como ajustar os parâmetros de velocidade e forças a serem atingidas já registradas no banco de dados referentes à matéria-prima. Ou ler novas informações de um material que nunca foi utilizado e, por meio das informações associadas à matéria-prima, informar a máquina.

Também em função do processo a ser utilizado, o conjunto de informações associado à matéria-prima pode informar os parâmetros de trabalho para os diversos processos que a matéria-prima poderia passar, como, por exemplo, além do serramento por serra de fita, por serra circular ou mesmo fresamento. Desta forma, o fabricante da matéria-prima informaria as condições de processamento do referido material.

O uso de etiquetas tipo QR CODE ou RFID possibilita transmitir informações da matéria-prima ao produto final, o que permite continuar o sistema de informações integrado.

### **5.1.4 Máquinas inteligentes**

Dentro deste contexto, com máquinas integradas ao meio ambiente, nada mais importante do que a própria máquina processar os seus resíduos para reaproveitamento. Assim

pode-se dotar uma máquina que recolha os resíduos de madeira do processo e execute a prensagem do mesmo durante o processo, resultando, dessa forma, *briquets* de resíduo de madeira prontos para o uso ao saírem da máquina durante o processo. Ou também pode-se utilizar os resíduos provenientes do serrado para manufatura aditiva e prototipagem, ou seja impressão 3D a partir de serragem. Resolve-se, dessa maneira, o problema dos detritos resultantes do processo.

Com a análise dos parâmetros de operação a máquina pode ter lâminas de serra diferentes, de acordo com os materiais, ou seja, a espessura da lâmina ou o número de dentes por polegada. Assim a máquina deve ter um sistema de troca automática, para que possa ser cortado qualquer tipo de material em função dos pedidos, entrando no sistema *just in time* (cortado na hora exata para reduzir estoques).

A integração entre fábricas distintas de uma mesma cadeia de suprimentos, uma tendência da Indústria 4.0, possibilitará que o fabricante de lâminas mapeie o desempenho de suas ferramentas melhorando o desenvolvimento de seus produtos, além de precisar a vida da lâmina.

A conexão digital da máquina com o produto acabado garantirá a rastreabilidade do mesmo, a peça cortada terá um registro e uma memória do produto. A empresa vai coletar dados de uso e preferências do cliente em tempo real e, com a digitalização no desenvolvimento de produtos, um scanner 3D com câmera de infravermelho vai ler os dados antropométricos do usuário e enviar tais informações para a serra de fita CNC, que corta as placas para uma cadeira customizada, por exemplo.

## 6 CONCLUSÃO

O objetivo geral desse trabalho foi obter o projeto preliminar de uma serra de fita automática para corte de chapas planas visando à aplicação do conceito de Indústria 4.0, com a utilização de comando CNC. Como objetivos específicos tinham-se: obter a forma construtiva e funcional da máquina; utilizar metodologia de projeto; definição dos dispositivos envolvidos nas diversas operações; obtenção do anteprojeto com as principais especificações da máquina; adequação à concepção no contexto da Indústria 4.0. Assim, acredito que tais objetivos foram alcançados.

O diferencial da serra de fita automática é o mecanismo para cortar trajetórias curvas. O fator limitante no corte curvo é a lâmina de serra fita, pois possui limites quanto à torção, o que interfere no raio a ser cortado. A escolha pela metodologia de Pahl et al. (2013) foi a mais adequada para o sistema técnico em questão, pois aborda com propriedade os requisitos de projeto, características e funcionalidades.

O uso de metodologia de projeto organizou o desenvolvimento do produto. O atendimento da lista de requisitos norteou o projeto buscando-se um equipamento com segurança, facilidades de operação e montagem, com peças padronizadas, armazenamento de resíduos provenientes do serrado, que considerasse parâmetros de operação e estivesse de acordo à nova Revolução Industrial.

Para a automação e controle dos motores foi apresentada uma visão geral com sistemas elétrico, lógico, CLP e IHM. Essa é uma tendência de quem projeta equipamentos, seguindo uma metodologia projetual, na qual uma equipe de projeto trabalha de forma integrada com outras áreas do conhecimento.

As telas do *software* de gerenciamento ou supervisor mostram que a serra de fita proposta pode formar um banco de dados com informações do material a ser cortado. Assim, o usuário entraria com as características e o equipamento responderia sobre a viabilidade do corte nas condições determinadas. Com autodiagnóstico, dados seriam passados à equipe de manutenção, fornecedores de rolamentos e fabricantes de lâminas de serra, o que auxilia no aprimoramento de seus produtos. Na Indústria 4.0 tais informações serão obtidas em tempo real.

A programação apresentada como exemplo, é para o corte de uma placa em trajetória simples que contém poucas curvas. Apresentou poucas linhas quando considerou torção da lâmina e giro da mesa. A combinação dos movimentos de giro proporciona um modelamento

com complexidade matemática para controle dos motores devido aos movimentos combinados dos eixos.

O modelamento matemático buscou apresentar o equacionamento geral para a serra de fita CNC que pudesse inferir alguns parâmetros da operação. Manter a tensão de esticamento constante em uma lâmina de serra, durante a operação, é um desafio; corrigí-la durante o corte é benéfico, pois melhora a qualidade do serrado.

O trabalho abordou inovações como o conceito de uma serra de fita que pudesse cortar em curva e mais ainda dois sistemas de giro para realizar a programação, ou seja, a complexidade de programar em quatro eixos. Outra inovação é apresentar uma máquina com autodiagnóstico abordando o conceito de Indústria 4.0, que é recente e explorado em poucos estudos.

## 6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para estudos futuros, relacionados ao presente trabalho, apresentam-se:

- Projeto prevendo uma máquina com 6 eixos (4 já projetados), onde inclui inclinação da mesa em torno dos eixos X e Z;
- Desenvolvimento de um sistema de troca automática da lâmina de serra de fita;
- Análise estrutural por elementos finitos no sistema de torção da lâmina;
- Construção física do protótipo estudado;
- Estudo para aproveitamento do resíduo gerado na impressão 3D de madeira;
- Automação do equipamento em célula integrada de manufatura atendendo ao conceito de Indústria 4.0;
- Projeto detalhado de toda automação e controle;
- Desenvolvimento da programação do *software* de gerenciamento;
- *Software* com programação para gerar o programa CNC a partir do desenho da peça;
- Desenvolvimento de programa para planejamento do processo de corte com serra de fita;
- Desenvolvimento de programa para cortar a placa, seguindo a trajetória guiada por um sensor infravermelho, considerando que seja projetada uma imagem sobre a placa de madeira a ser cortada e a máquina segue o desenho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. F. Estudo e escolha de metodologia para o projeto conceitual. In: **Revista de Ciências e Tecnologia**. Piracicaba, v. 8, n. 16, p. 31-42, 2000.

Amada Produtos. Disponível em: <<http://www.amada.com>>. Acesso em: Maio 2015.

ARAÚJO, J. E. G. **Sistematização da Preparação e Organização do Trabalho de Máquinas CNC na FELINO, S.A.** Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012.

ARAUJO, L.A.O. **Projeto conceitual e construção de um protótipo de uma minimáquina para o corte de substratos de Alumina.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J. C. **Projeto Integrado de Produtos: planejamento, concepção e modelagem.** Barueri, SP: Manole, 2008.

BARCÍK, S. Experimental cutting on the table band-sawing machine. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 61, n. 4, p. 313–320, set. 2003.

BAXTER, Mike. **Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos.** 3. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

BAYER, F. M.; ECKHARDT, M.; MACHADO, R. **Automação de Sistemas.** 4. ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria; Escola Técnica Aberta do Brasil, 2011.

BIANCHI, K. E. **Concepção de uma máquina CNC para medição e usinagem de peças em madeira.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

CALLEGARO, A. M.; DIAS, A. S.; LIMBERGUER, I. F. Prototipo de un equipo de movimiento pasivo continuo para el codo y antebrazo. **Espacios**, v. 33, n. 1, p. 15-20, 2012.

CAPELLI, A. Máquinas CNC. **Mecatrônica Atual**, n. 3, p. 30-35, abr. 2002.

CARVALHO, G. **Máquinas elétricas: teoria e ensaios.** 4. ed. São Paulo: Érica, 2011.

CARVALHO, R. S.; DUTRA, J. C.; BONACORSO, N. G. Desenvolvimento de um manipulador CNC robótico para recuperação por soldagem dos tubos das caldeiras de termelétricas. In: 63º Congresso anual da ABM. 2008. Santos. **Anais.** 2008a. CD.

CARVALHO, R. S.; DUTRA, J. C.; BONACORSO, N. G. Implementação de controlador CNC de baixo custo em manipulador robótico para a soldagem. In: 5º CONEM. Salvador. **Anais.** 2008b. CD.

CARVALHO, R. S. **Robô CNC para a automação da soldagem MIG/MAG em posições e situações de extrema dificuldade.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

Centauro Equipamentos. Disponível em: <<http://www.centauro.com>>. Acesso em: Mar. 2015.

CHEREM, L. P.; BONACORSO, N. G.; GESSER, F. J. Desenvolvimento de uma mesa birrotativa modular para integração com fresadoras CNC de baixo custo visando usinagens de modelos complexos em cinco eixos simultâneos. **Revista Técnico Científica do IFSC**, v. 2, n. 1, p. 24-32, 2010.

Confederação Nacional da Indústria. Desafios para a Indústria 4.0 no Brasil. Disponível em: <<http://www.pedbrasil.org.br/ped/artigos/079F8BA3E7E5281B.0%20no%20Brasil.pdf>>. Acesso em: Mar. 2016.

FELIPE, A. Bem-vindo à Indústria 4.0. *Revista P & S – Indústria e Tecnologia*, v. 1, n. 491, p. 16-17, nov. 2015.

FÉLIX, A. C. C.; FILHO, W. B. V. Desenvolvimento de uma máquina CNC com dois pares de eixos paralelos para prototipagem. In: 5º COBEF. 2009. Belo Horizonte-MG. **Anais**. 2009.

FIGUEIREDO, H. R.; ZAMBERLAN, A. O.; PEROZZO, R. F.; VIEIRA, S. A. G. Proposta de Integração Entre CAD e CNC para Máquina de Corte. In: 7º SULCOMP. 2014. Criciúma-SC: EDIUNESC. **Anais**. 2014.

FITZPATRICK, Michael. **Introdução aos processos de usinagem**. Porto Alegre: AMGH 2013.

Fulpow Equipamentos. Disponível em: <<http://www.fulpow.com.tw>>. Acesso em: Jun. 2015.

Fundação Dom Cabral. O que seria a Indústria 4.0? Disponível em: <[http://www.fdc.org.br/professoresepesquisa/nucleos/Documents/inovacao/digitalizacao/boletim\\_digitalizacao\\_fevereiro2016.pdf](http://www.fdc.org.br/professoresepesquisa/nucleos/Documents/inovacao/digitalizacao/boletim_digitalizacao_fevereiro2016.pdf)>. Acesso em: Abr. 2016.

GESSER, F. J.; CHEREM, L. P.; BONACORSO, N. G.; LUCAS, R. P. Desenvolvimento de uma interface de condicionamento de sinais empregada na automatização de máquinas por controladores CNC baseados em PC. In: 18º Congresso Brasileiro de Automática. 2010. Bonito-MS: **Anais**. 2010.

GONÇALVES, J. F. O. **Impressora 3D com Linux**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2014.

GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da madeira**. USC: Bauru, 2000.

GORDON, S.; HILLERY, M. T. Development of a high-speed CNC cutting machine using linear motors. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 166, n. 3, p. 321-329, 2005.

HERMANN, M; PENTTEK, T; OTTO, B. Design principles for Industrie 4.0 Scenarios: a Literature Review. 2015. Disponível em: <<http://www.snom.mb.tu-dortmund.de/cms/de/>>

forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4\_0-Scenarios.pdf>. Acesso em: Jun. 2016.

HUANG, H.; CHI, G.; WANG, Z. Development and application of software for open and soft multi-axis EDM CNC systems. **Advanced Manufacturing Technology**, v. 82, n. 1-4, p. 1-12, jan. 2016.

JOHNS, R. L.; FOLEY, N. Bandsawn Bands Feature-Based Design and Fabrication of Nested Freeform Surfaces in Wood. **Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design**, p. 17-32, mar. 2014.

JOHNSON, R. Taunton's Complete Illustrated Guide to Bandsaws, 2012. Disponível em: <<https://www.finewoodworking.com/assets/downloads/GuideToBandsaws.pdf>>. Acesso em: Ago. 2015.

KARUNAKARAN, K. P.; SURYAKUMAR S.; PUSHPA, V.; AKULA, S. Retrofitment of a CNC machine for hybrid layered manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 45, n. 7, p. 690-703, dec. 2009.

LEITE, W. O.; RUBIO, J. C. C.; DUDUCH, J. G.; ALMEIDA, P. E. M. Correcting geometric deviations of CNC Machine-Tools: An approach with Artificial Neural Networks. **Applied Soft Computing**, v. 36, p. 114-124, nov. 2015.

LÖVGREN, R. **Product development methods: Leonardo Da Vinci versus modern engineering education**. SEFIrenze 2002. Firenze 8-11 Settembre 2002.

LUDWIG, J. P.; PALOSCHI, R. B.; SOUZA, J. Processos de usinagem de madeira: comparação entre processos. In: 4º Encontro Fluminense de Engenharia de Produção-EFEPRO. 2013. Volta Redonda-RJ: **Anais**. 2013.

MATOS, N. M. R. **Análise do funcionamento de um servomotor de corrente alternada com ímãs permanentes**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2012.

MELLO, W. **Proposta de um método aberto de Projeto de Produto – Três Alternativas de Criação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MENEGHELLO, G. P. **Aplicação de um sistema robótico utilizando recursos de sistemas CAD/CAM para o processo de fresamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

MIRANDA, R. J. C. **Desenvolvimento de um programa didático computacional destinado à geração de códigos de comando numérico a partir de modelos 3D obtidos em plataforma CAD considerando a técnica prototipagem rápida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

NÉRI, A. C. **Parâmetros de corte na usinagem de madeiras de reflorestamento**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

OLIVEIRA, C. A. L. **Uma metodologia de integração CAD/CAM através da aplicação de ciclos de usinagem na programação CNC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

OTTOBONI, A. Servo-acionamentos. **Mecatrônica Atual**, n. 6, p. 7-14, out. 2002.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, H. K. **Projeto na Engenharia**. São Paulo: Blucher, 2013.

PAREDES, M. E. G. **Desenvolvimento de uma fresadora CNC aderente à norma STEP-NC baseado no controlador de máquina avançado (EMC2)**. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

Perfis Modulares Prodomus. Disponível em: <<http://www.prodromus.com.br/>>. Acesso em: Jan. 2016.

POLL, M. T. **Uma metodologia para automação do processo de conformação por calandras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

ROMANO, L. N. **Desenvolvimento de máquinas agrícolas: planejamento, projeto e produção**. Santa Maria: Blucher, 2013.

RÜßMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALDNER, M.; JUSTUS, J.; ENGEL, P.; HARNISCH M. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. Apr. 2015. Disponível em: <[https://www.bcgperspectives.com/content/articles/engineered\\_products\\_project\\_business\\_industry\\_40\\_future\\_productivity\\_growth\\_manufacturing\\_industries/](https://www.bcgperspectives.com/content/articles/engineered_products_project_business_industry_40_future_productivity_growth_manufacturing_industries/)>. Acesso em: Jul. 2016.

SANCHES, J. M. **Desenvolvimento de uma fresadora CNC de baixo custo para fins didáticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

Sandvik Catálogo. The Handbook: production, use and maintenance of wood bandsaw blades. Mai. 1999.

Saturno Serras. Disponível em: <<http://www.saturno-net.com.br>>. Acesso em: Jul. 2015.

SCHÖFFEL, R. **Desenvolvimento de um equipamento recolhedor de resíduos de colheita da soja**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia, Universidade de Passo Fundo, 2014.

SCHUH, G.; POTENTE, T.; POTENTE, C. W.; WEBER, A. R.; PROTE, J. P. Collaboration Mechanisms to Increase Productivity in the Context of Industrie 4.0. **Procedia CIRP**, v. 19, n. 2 CIRP RoMac, p. 51-56, 2014.

SILVA, J. C. **Fábrica POLI**: concepção de uma fábrica de ensino no contexto da Indústria 4.0. Monografia (Engenharia de Produção) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SILVEIRA, C. A. **Integração de um sistema de impressão 3D em uma arquitetura modular de posicionamento cartesiano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SKF Rolamentos. Catálogo geral, 2016. Disponível em: <<http://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/super-precision-bearings/principles/bearing-life-and-load-ratings/dynamic-bearing-loads-and-life/index.html>>. Acesso em: Ago. 2016.

Starret. Catálogo Band Saw Blades, 2010. Disponível em: <<http://www.starrett.com.br>>. Acesso em: Abr. 2015.

Sul Corte Catálogo de serras fita. Disponível em: <<http://www.sulcorte.com.br/pt/produtos/categoria/serras-fita>>. Acesso em: Fev. 2016.

UNITED STATE PATENT. David R. Beaman; James M. Grossman; Alfonso Bello. Programmable band saw and method of sawing. US 4866630, 14/04/1986.

UNITED STATE PATENT. James Kawabata; Niles M. Band saw for cutting shaped pieces of bar stock. US 4926728, 28/02/1989.

UNITED STATE PATENT. Robert S. Hill; Holly Springs. Numerical controlled bandsaw for keyboards. US 3908723, 27/03/1974.

Warsaw Equipamentos. Disponível em: <<http://www.warsawmachinery.com>>. Acesso em: Out. 2015.

YAN, M. T.; HUANG, C. W.; FANG, C. C.; CHANG, C. X. Development of a prototype Micro-Wire-EDM machine. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 149, n.1-3, p. 99-105, 2004.

## APÊNDICE A – Telas do *software* supervisor

Seguem as explicações a respeito dos menus contidos no *software* supervisor:

Clicando em **Máquina**, novo quadro de diálogo se abre com uma série de informações a serem inseridas a respeito da máquina (Figura A.1).

**Garganta (mm):** é a distância entre a lâmina e a coluna da máquina. É o espaço livre entre elas.

**Distância máxima entre centros (mm):** é a distância máxima entre centros que os volantes podem ser deslocados.

**Distância mínima entre centros (mm):** é a distância mínima entre centros que os volantes podem ser deslocados.

**Coefficiente de atrito entre lâmina e volante:** é o valor que corresponde à descrição do atrito entre a lâmina e o volante, que depende do material de ambos.

**Potência motor principal (kW):** é o valor da potência do motor de acionamento da serra de fita.

**Rotação máxima do motor principal (rpm):** é a rotação máxima que o motor pode suportar dentro da sua capacidade.

**Potência motor eixo X (kW):** é o valor da potência do motor de acionamento para o deslocamento da mesa na direção X.

**Rotação máxima do motor eixo X (rpm):** é a rotação máxima que o motor que aciona a mesa na direção X pode suportar dentro da sua capacidade.

**Potência motor eixo Z (kW):** é o valor da potência do motor de acionamento para o deslocamento da mesa na direção Z.

**Rotação máxima do motor eixo Z (rpm):** é a rotação máxima que o motor que aciona a mesa na direção Z pode suportar dentro da sua capacidade.

**Potência motor torção lâmina (kW):** é o valor da potência do motor de acionamento para executar a torção da lâmina.

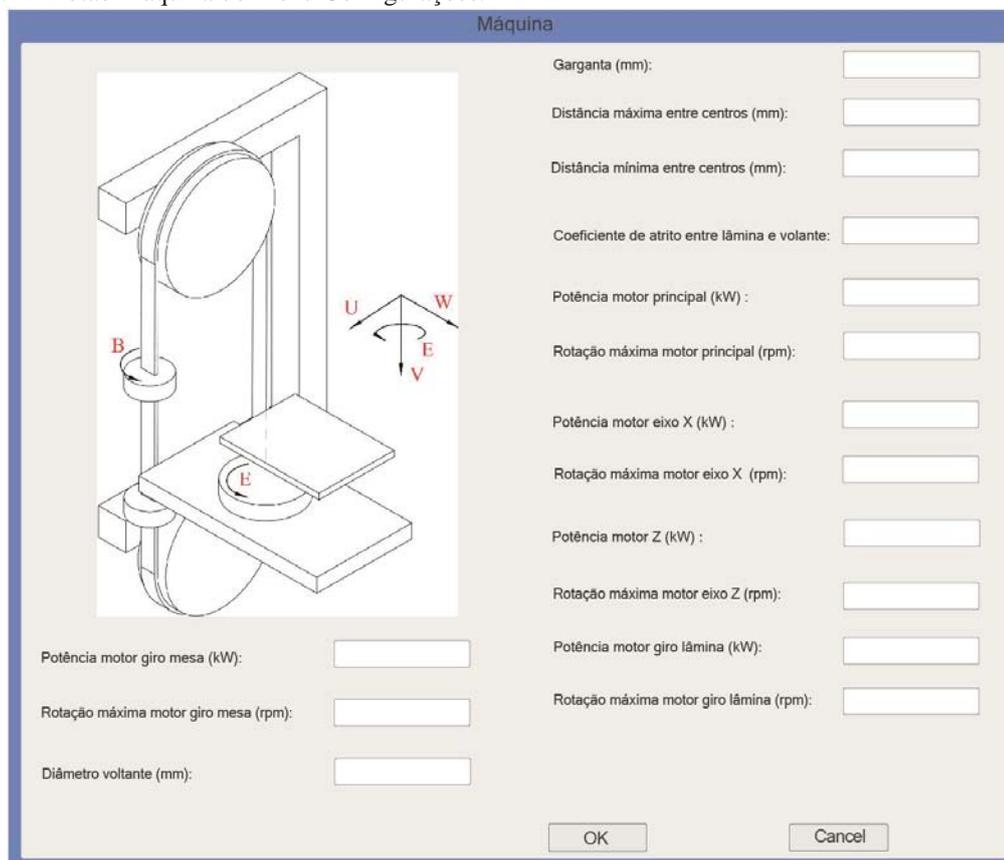
**Rotação máxima do motor torção lâmina (rpm):** é a rotação máxima que o motor que aciona o mecanismo de torcer a lâmina pode suportar dentro da sua capacidade.

**Potência do motor giro mesa (kW):** é o valor da potência do motor de acionamento para executar a rotação da mesa.

**Rotação máxima do motor giro mesa (rpm):** é a rotação máxima que o motor que aciona o mecanismo de rotacionar a mesa pode suportar dentro da sua capacidade.

**Diâmetro do volante (mm):** É o valor que define o diâmetro de ambos os volantes da máquina, onde está montada a fita de corte (Figura 83).

Figura A.1 – Botão Máquina do Menu Configurações.



Fonte: Autor.

Ao clicar no botão **Mesa** abre-se novo quadro de diálogo, que configura as informações sobre a mesa da máquina (Figura A.2).

**Dimensão X (mm):** dimensão da mesa na direção do eixo X.

**Dimensão Z (mm):** dimensão da mesa na direção do eixo Z.

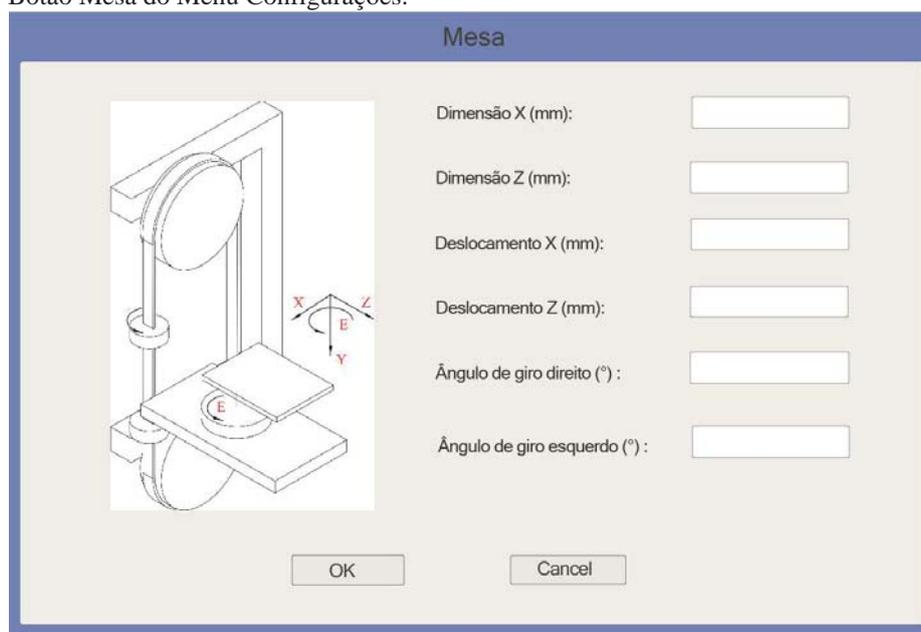
**Deslocamento X (mm):** deslocamento da mesa na direção do eixo X a partir do ponto zero.

**Deslocamento Z (mm):** deslocamento da mesa na direção do eixo Z a partir do ponto zero.

**Ângulo de giro direito (°):** é o valor em graus que a mesa pode girar em torno do seu eixo.

**Ângulo de giro esquerdo (°):** é o valor em graus que a mesa pode girar em torno do seu eixo.

Figura A.2 – Botão Mesa do Menu Configurações.



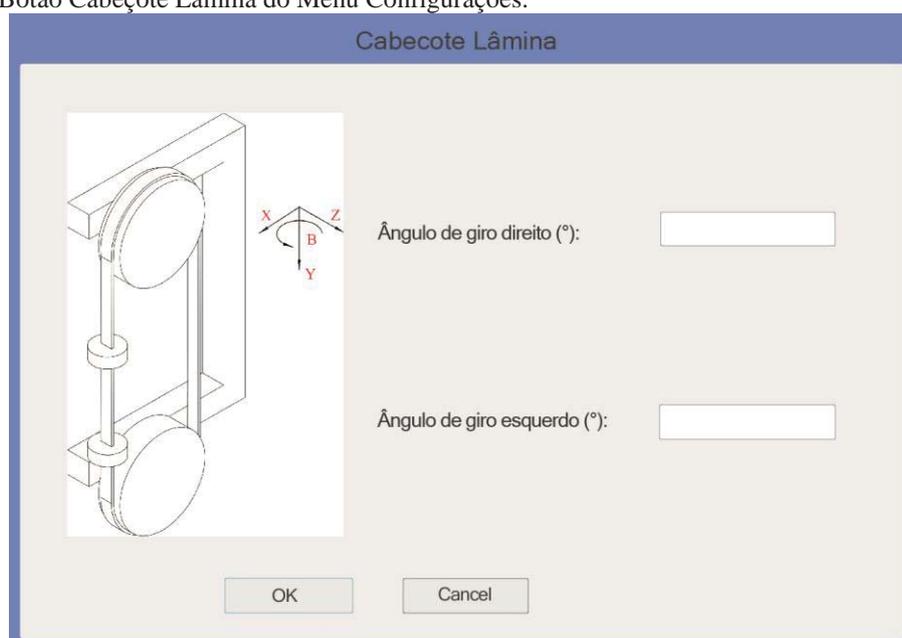
Fonte: Autor.

Escolhendo o botão **Cabeçote lâmina** pode-se definir o ângulo de giro ou torção da lâmina com relação à trajetória de corte (Figura A.3).

**Ângulo de giro direito (°):** é o valor em graus que a lâmina pode ser torcida com relação à trajetória. O ângulo medido é visto de cima da mesa.

**Ângulo de giro esquerdo (°):** é o valor em graus que a lâmina pode ser torcida com relação à trajetória. O ângulo medido é visto de cima da mesa.

Figura A.3 – Botão Cabeçote Lâmina do Menu Configurações.



Fonte: Autor.

Escolhendo o botão **Lâmina** pode-se definir as características da lâmina de corte (Figura A.4).

**Nome:** vai definir uma ferramenta específica para uma aplicação.

**Comprimento (mm):** qual o comprimento a ser cortado da lâmina para a máquina.

**Espessura (mm):** espessura para a lâmina.

**Largura de corte (mm):** é a largura que resulta no corte da peça. É função do travamento dos dentes da serra.

**Número de dentes por polegada:** é a quantidade de dentes que podem ser contados numa distância de uma polegada.

**Velocidade de corte (m/min):** é a velocidade da lâmina de corte em função dos materiais a serem cortados.

**Velocidade de avanço (m/min):** é a velocidade de avanço da lâmina de corte em função dos materiais a serem cortados; influencia a velocidade de avanço da mesa nos eixos X e Z.

**Força de tração na lâmina (N):** é o valor máximo que a lâmina pode ser tracionada segundo o fabricante.

Figura A.4 – Botão Lâmina do Menu Configurações.

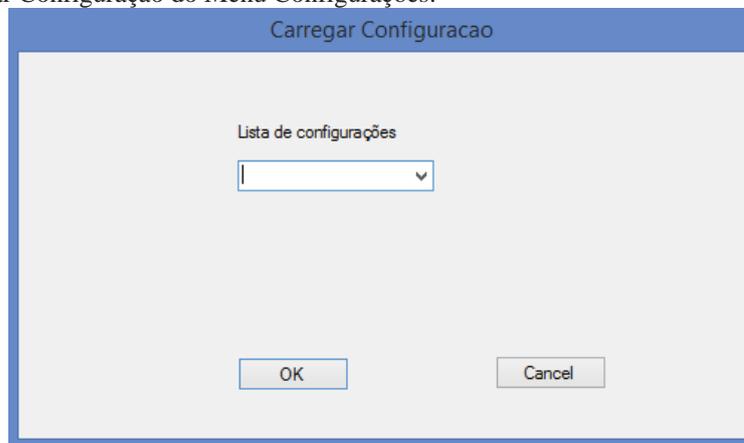
The image shows a software configuration window titled "Lâmina". At the top, there is a technical diagram of a saw tooth with various parts labeled: "GARGANTA DO DENTE", "COSTAS", "PASSO DO DENTE", "PONTA DO DENTE", "ALTURA DO DENTE", "PARTE FRONTAL DO DENTE", "FUNDO DA GARGANTA", and "RAIOS DA GARGANTA". Below the diagram, there are two columns of input fields. The left column contains: "Nome:", "Comprimento (mm):", "Espessura (mm):", and "Largura de corte (mm):". The right column contains: "Número de dentes por polegada:", "Velocidade de corte (mm/min):", "Velocidade de avanço (m/min):", and "Força de tração na lâmina (N):". At the bottom of the window, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Fonte: Autor.

**Carregar configuração** (Figura A.5) equivale a escolher uma característica de máquina e ferramentas estipuladas que foram definidas nos quadros anteriores. Escolhendo uma configuração, as informações serão carregadas automaticamente configurando a máquina

para a operação. As configurações podem estar ligadas à característica dos materiais a serem cortados.

Figura A.5 – Carregar Configuração do Menu Configurações.



Fonte: Autor.

**Cadastrar material** equivale a definir as características dos materiais a serem utilizados nas operações (Figura A.6).

**Nome material:** o nome como é identificada a placa do referido material.

**Densidade do material (kg/m<sup>3</sup>):** é a densidade do material a ser cortado.

**Espessura (mm):** e a espessura da placa do material.

**Largura (mm):** é a dimensão da placa do material medida na direção do eixo X, quando a placa está na máquina.

**Comprimento (mm):** é a dimensão da placa do material medida na direção do eixo Z, quando a placa está na máquina.

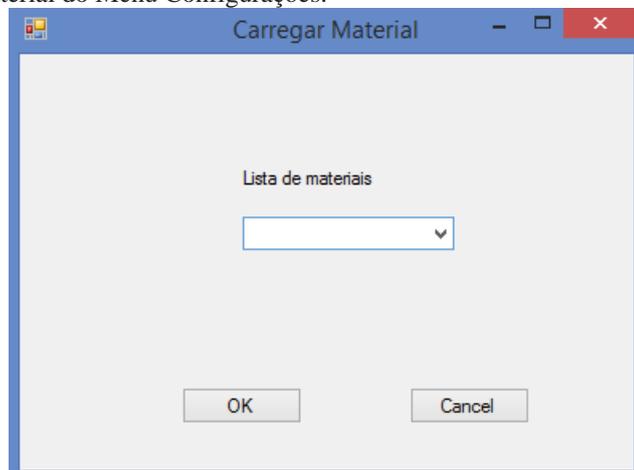
Figura A.6 – Cadastrar Material do Menu Configurações.



Fonte: Autor.

A função **Carregar material** equivale a identificar o material que carrega especificamente todas as informações cadastradas no banco de dados (Figura A.7).

Figura A.7 – Carregar Material do Menu Configurações.



Fonte: Autor.

A função **Dados funcionais** apresenta resultados calculados a partir das informações registradas e carregadas no sistema para confrontar com os parâmetros da máquina de modo a obter o melhor rendimento do processo (Figura A.8).

Como resultado pode-se ter:

**Potência de corte (kW):** calcula a potência de corte em função das condições de operação.

**Comprimento máximo da lâmina (mm):** calcula o comprimento máximo a partir do deslocamento máximo dos volantes.

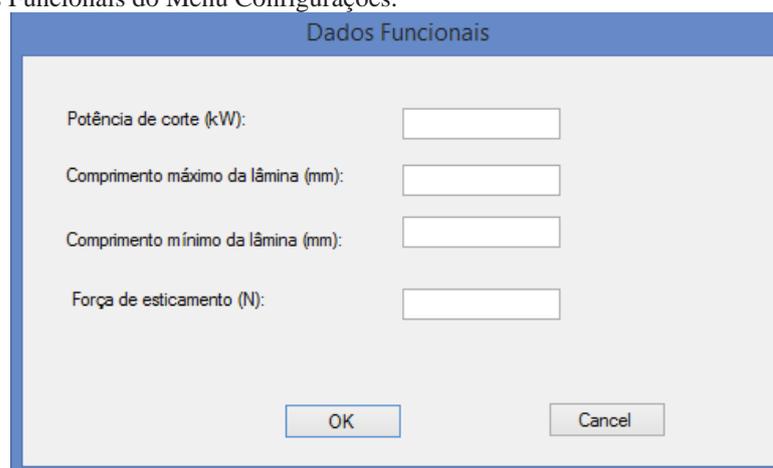
**Comprimento mínimo da lâmina (mm):** calcula o comprimento mínimo a partir do deslocamento mínimo dos volantes.

**Força de esticamento (N):** calcula a força de esticamento teórica mínima a ser utilizada.

**Rotação do motor principal (rpm):** calcula a rotação levando em conta a velocidade de corte recomendada para o material, espessura do material e a relação de transmissão entre o motor e o volante de acionamento.

**Força de avanço estimada (N):** força paralela à lâmina de serra e atuante contra o movimento de avanço.

Figura A.8 – Dados Funcionais do Menu Configurações.



The image shows a software dialog box titled "Dados Funcionais" (Functional Data). It contains four input fields for configuration parameters, each with a corresponding label to its left. At the bottom of the dialog, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Label	Input Field
Potência de corte (kW):	<input type="text"/>
Comprimento máximo da lâmina (mm):	<input type="text"/>
Comprimento mínimo da lâmina (mm):	<input type="text"/>
Força de esticamento (N):	<input type="text"/>

Fonte: Autor.

## APÊNDICE B – Exemplo numérico utilizando variáveis de processo

Equacionamento que permite obter os dados iniciais do processo e a partir dos resultados coletados em tempo real, otimizar os parâmetros do processo.

Para cálculo da força de corte foi considerado uma lâmina com 0,8 mm de espessura e mais meia espessura de cada lado para a folga lateral, tem-se:

$$b = 0,4 + 0,8 + 0,4 \quad b = 1,6 \text{ mm}$$

Considerando um ângulo de saída ( $\gamma=10^\circ$ ), a pressão específica de corte e o coeficiente adimensional para “Eucalipto” da Tabela B.1.

Tabela B.1 – Pressão específica de corte e coeficiente adimensional para diferentes ângulos e madeiras.

Espécie	$\gamma$	Ks1(N/mm <sup>2</sup> )	1-Z
Pinus	24°	3,94	0,71
	17°	5,08	0,78
	10°	5,33	0,75
Cedro	24°	5,28	0,82
	17°	6,55	0,80
	10°	7,18	0,81
Pinho	24°	6,68	0,70
	17°	7,83	0,82
	10°	7,58	0,81
Eucalipto	24°	6,83	0,79
	17°	7,87	0,75
	10°	8,84	0,84
Imbuia	24°	4,37	0,66
	17°	5,24	0,67
	10°	6,64	0,81

Fonte: Adaptado de Gonçalves, 2000.

O exemplo numérico é apresentado na Tabela B.2; na coluna da esquerda tem-se a variável desejada, na coluna central a equação utilizada e, na coluna da direita, os valores e resultados.

Os valores estipulados foram obtidos da literatura consultada.

Velocidade de corte para Madeira = 30 m/s a 50 m/s<sup>1</sup>; velocidade de avanço = 3500 mm/min.

Coeficiente de atrito  $\mu=0,15$ ; Raio de curvatura = 400 mm.

### Dados da lâmina:

Passo = 5 mm; h = 0,38 mm; largura = 10 mm; espessura = 0,8 mm; tensão de cisalhamento material da lâmina = 500 Mpa.

### Dados do volante:

<sup>1</sup> Indicada para serramento de madeira (Gonçalves, 2000).

Diâmetro = 500 mm; rotação = 70 rpm; diâmetro polia volante = 200 mm.

**Dados rolamentos sistema de torção da lâmina:**

Rolamento de esferas; diâmetro externo = 50 mm; carga dinâmica (C) = 55,3 kN; carga equivalente = 10 kN;

**Dados fuso de esferas:**

Diâmetro do fuso = 20 mm; passo = 10 mm; diâmetro polia eixo = 80 mm;

Encoder = 1024 divisões;

Rotação servo nos eixos direcionais = 2000 rpm.

Tabela B.2 – Exemplo numérico.

Variável Desejada	Equação	Resultado
Força de corte	$P_c = Ks_1 b h^{1-z}$	$P_c = 8,84 \times 1,6 (0,38)^{0,84} = 6,27 \text{ kgf}$ $= 62,75 \text{ N}$
Força de esticamento	$F_e = F \left( \frac{e^{\mu 2\pi} + 1}{e^{\mu 2\pi} - 1} \right)$	$F_e = 62,75 \left( \frac{e^{0,15 \times 2\pi} + 1}{e^{0,15 \times 2\pi} - 1} \right) = 143,45 \text{ N}$
Área lâmina	$A = e \times L$	$A = 0,8 \times 10 = 0,8 \text{ mm}^2$
Tensão na lâmina	$\sigma_e = \frac{F_e}{A}$	$\sigma_e = \frac{143,45}{0,8} = 179 \text{ MPa}$
Potência motor acionamento	$N_V = P_c \times V_c$	$N_V = 62,75 \times 30 = 1882,5 \text{ W}$
Velocidade da lâmina	$V_L = \frac{n_V \pi R_V}{30}$	$V_L = \frac{70 \times \pi \times 0,5}{30} = 3,67 \text{ m/s}$
Rotação rolamentos torção lâmina	$n_R = \frac{60}{\pi} \frac{V_L}{D_R}$	$n_R = \frac{60}{\pi} \frac{3,67}{0,05} = 1400 \text{ rpm}$
Vida em horas de trabalho	$L_{10h} = \frac{10^6}{60 n_R} \left( \frac{C}{P} \right)^p$	$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \times 1400} \left( \frac{55,3}{10} \right)^3 = 2011 \text{ h}$
Rotação motor acionamento	$n_m = \frac{60 V_c}{\pi d_m}$	$n_m = \frac{60 \times 30}{\pi \times 0,2} = 2865 \text{ rpm}$
Torque torção lâmina	$T = \tau_{m\acute{a}x} c_1 h b^2$	$T = 500 \times 0,312 \times 10 \times 0,8^2 = 998 \text{ Nmm}$
Velocidade de avanço eixo Z	$V_{az} = n_E p$	$V_{az} = \frac{2000}{60} \times 10 = 334 \text{ mm/s}$
Velocidade pulsos/s eixo Z	$n_{ps} = \frac{d_{pE} V_{az} E_c}{d_{pm} p 60}$	$n_{ps} = \frac{120 \times 334 \times 1024}{80 \times 10 \times 60} = 855 \text{ pulsos/s}$
Rotação sistema torção lâmina	$n_L = \frac{30 V_A}{\pi R}$	$n_L = \frac{30 \times 3500}{\pi \times 400} = 83,55 \text{ rpm}$

Fonte: Autor.