

Jhonattan Gutjahr

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA  
CNC, MODULAR E RECONFIGURÁVEL, PARA PROCESSOS  
LASER**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner.

Coorientador: Prof. Dr. Eng. Milton Pereira.

Florianópolis  
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Gutjahr, Jhonattan

Desenvolvimento e implementação de um sistema CNC,  
modular e reconfigurável, para processos LASER / Jhonattan  
Gutjahr ; orientador, Walter Lindolfo Weingaertner ;  
coorientador, Milton Pereira. - Florianópolis, SC, 2016.  
196 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica.

Inclui referências


1. Engenharia Mecânica. 2. Processos LASER. 3. Projeto  
de Máquinas. 4. Comando Numérico Computadorizado (CNC). 5.  
Modularidade e Reconfigurabilidade. I. Weingaertner,  
Walter Lindolfo. II. Pereira, Milton. III. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica. IV. Título.


Jhonattan Gutjahr


## DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA CNC, MODULAR E RECONFIGURÁVEL, PARA PROCESSOS LASER

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.


Florianópolis, 26 de abril de 2016.

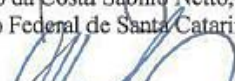
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

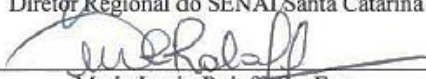
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner – Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

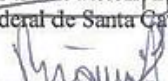
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Milton Pereira, Dr. Eng. – Coorientador  
Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

### Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Aurélio da Costa Sabino Netto, Dr. Eng.  
Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

  
\_\_\_\_\_  
Jefferson de Oliveira Gomes, Dr. Eng.  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA  
Diretor Regional do SENAI Santa Catarina

  
\_\_\_\_\_  
Mario Lucio Roloff, Dr. Eng.  
Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

  
\_\_\_\_\_  
Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC



*Dedico este trabalho a Deus, que me sustentou e capacitou para iniciar e concluir esta importante fase da minha carreira. A Ele, Criador, no qual toda ciência tem início e fim.*

*Soli Deo Gloria*

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters that appear to be 'SDE'.



## AGRADECIMENTOS

A realização, conclusão e sucesso deste trabalho não seriam possíveis sem o auxílio, colaboração e carinho de pessoas que durante todo o tempo, me deram suporte pessoal e técnico para me dedicar a este trabalho, e força para continuar nos momentos de dificuldade.

Primeiramente, agradeço a Deus, Soberano e Criador de tudo, por me conceder conhecimento, capacidade, vontade e condições de iniciar, desenvolver e concluir este trabalho. Agradeço pelo cuidado, providência e amor, demonstrados a mim e a minha família durante esta jornada. Agradeço pela Criação, tão magnífica e misteriosa, que nos instiga a estudá-la e conhecê-la, e pela qual nos prova diariamente, o grandioso poder com que domina o universo. A Ele, dedico este trabalho – *Soli Deo Gloria*.

Agradeço, de forma bastante especial, a minha amada esposa Esther Faria do Amaral Gutjahr, por sua constante parceria desde que nos conhecemos. Seu constante incentivo foi o motivo de eu iniciar o mestrado e seu suporte, amizade, amor, cuidado, carinho e paciência foram os motivos que me fizeram terminá-lo. Obrigado por estar comigo em todos os momentos, bons ou ruins, e por SEMPRE me incentivar a fazer aquilo que me faz feliz, independente do quanto isso te custe. Você tornou este trabalho possível. Eu amo e admiro muito você!

Agradeço ao meu filho, Isaque do Amaral Gutjahr, pela grande alegria que trouxe à minha vida no meio do desenvolvimento deste trabalho. Sua “fofura” e ternura me deram ainda mais ânimo e força para seguir em frente. Você foi uma surpresa muito bem-vinda na minha vida, filho! Eu amo muito você e espero que, no futuro, você possa usufruir do fruto deste meu trabalho.

Agradeço aos meus pais, Sinézia T. Wollinger Gutjahr e Liberto Gutjahr, pela minha criação e educação. Sempre deram grande valor a minha educação e, sem dúvida, são responsáveis por poder chegar até aqui! Obrigado Pai e Mãe!

Aos meus sogros, Silvano do Amaral e Valéria Faria do Amaral, por todo seu apoio, carinho e admiração sempre demonstrados a mim e ao meu trabalho. Afirmando, com toda certeza, que qualquer homem me invejaria se conhecesse os sogros que tenho! Obrigado, especialmente, por me confiarem o bem mais valioso que tinham, minha amada esposa!

Agradeço ao Professor Walter Lindolfo Weingaertner, pela grande oportunidade confiada a mim. Em todos os momentos, demonstrou confiança na minha capacidade técnica, dando-me tranquilidade e apoio em

todas as decisões tomadas. Agradeço por todo o conhecimento transmitido, em suas aulas, em suas orientações e em nossas conversas. Iniciei o mestrado admirando-o como um grande pesquisador e professor. Terminei o mestrado admirando ainda mais, e também o considerando um amigo. Muito obrigado professor Walter, pela sua indispensável orientação!

Agradeço ao Professor Milton Pereira, por todo seu apoio demonstrado desde minha graduação. Suas orientações e conselhos foram indispensáveis para que fossem alcançados os objetivos do trabalho. Seu ânimo e disposição em ajudar sempre foram notórios, sou muito grato por isso.

A todos os colegas de laboratório, agradeço de forma bastante especial. Obrigado pela tranquila convivência e pelos momentos de colaboração, momentos de “fazer força”, momentos de descontração, momentos do “café da Alaíde”. Enfim, vocês também são responsáveis pela conclusão deste trabalho. Assim, agradeço a: Daniel Alexandre Rolon, Wei Lin, Luiz Barbeta, Luiz Felipe Klöppel, Leonardo de Melo, Leandro Schmitz, Ismael Lutz, Estiven Sánchez, Dyonad Scolaro (Dydi), Ricardo Knoblauch, Rodrigo Blödorn, Tiemi (a tal da Mariana Tamura), Davi Ochoa, Leopoldo Wruck, Luiz Eduardo dos Santos Paes, Danilo Vieira (Goiano), Leonardo Santana.

Agradeço aos bolsistas de Iniciação Científica que fizeram parte deste desenvolvimento: Tito Ribeiro Motter, Artur Schutz Ferreira, Aguilinaldo Carvalho, Larissa Santana, Viviane Kettermann, Matheus Souza, Nicolas Medeiros, Marina Mandelli, Jordana Carvalho Arruda, Adriano Pereira, Bruno Alves.

Agradeço ao Fernando Bordin, o Gimli, *son of Glóin*, pela sua grande amizade durante o tempo de mestrado. Obrigado pelas suas colaborações técnicas, sempre feitas com muita disposição e sinceridade. Obrigado também pelas conversas descontraídas, que sempre culminavam em temas de engenharias ou em *The Lord of the Rings!*

Agradeço, de forma bastante especial, ao Cláudio Abílio da Silveira, o Claudinho, primeiramente pela sua excelência profissional, sempre admirado por todos. Suas contribuições foram indispensáveis para que este trabalho fosse concluído com êxito. Foi para mim um privilégio poder trabalhar e aprender com você durante estes dois anos. Muito obrigado, meu amigo!

Agradeço a Raphael Anselmo e Milton Anselmo, responsáveis pela empresa Tecflex, pelas colaborações técnicas, dispondo-se sempre a ajudar naquilo que era necessário! Também agradeço à Siemens do Bra-



sil, pelo fornecimento dos principais equipamentos deste projeto, em especial ao técnico Renato, responsável pelo *start-up* do CNC, propondo-se a fazer muito mais que sua própria obrigação.

Agradeço a Patrícia Burger e ao Marco Aurélio Goes, funcionários do IEL-SC, pela grande ajuda na administração financeira do projeto REDE METALURGICA, possibilitando que todos os equipamentos e dispositivos fossem adquiridos para a conclusão do trabalho.

Agradeço às pessoas que me auxiliaram, mesmo estando absolutamente fora do ambiente de trabalho. Dentre estas, agradeço ao Edvan Seiki, pela sua SEMPRE grande disposição em me ajudar tecnicamente, com seu grande conhecimento na área eletroeletrônica, além de sua constante amizade, desde minha graduação. Também sou grato ao Caio Ribeiro Motter por utilizar seu talento na área de desenho para desenvolver as artes para gravação dos botões do PCE, ajudando de forma tão disposta e dedicada. Também agradeço às empresas Welle Tecnologia LASER (Virgínia e Jordana) e Techlux (Gerson Ferreira) por realizarem todos os processos de gravação a LASER nas diversas placas de identificação do sistema, com grande qualidade e gratuitamente.

Agradeço ao Jayme Soares Junior (*Main Street*) e Beatriz Schmitz Fernandes, pelas aulas de Inglês e Alemão, respectivamente, tão essenciais para o meu desenvolvimento profissional durante o mestrado.



*“- Bem, este é o fim, Sam Gamgi – disse uma voz ao seu lado. E ali estava Frodo, pálido e exausto, e apesar disso era Frodo novamente; agora em seus olhos só havia paz; nem luta de vontade, nem loucura, nem qualquer temor. Seu fardo fora levado. Ali estava o querido mestre dos doces dias do Condado. ”*

(O Senhor dos Anéis – O Retorno do Rei, J.  
R. R. Tolkien)



## RESUMO

A tecnologia LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) tem ganhado grande importância e atenção nos meios produtivos, em meio à grande competitividade e contínua busca por aumento da qualidade, bem como a diminuição dos custos dos processos. É utilizada na realização de processos de união, adição e remoção de material. O desenvolvimento de fontes LASER de fibra com múltiplos módulos e a fusão de pacotes de fibras, tornou possível a geração de feixes com altíssimas potências em uma única fibra de saída. O uso destas fontes associadas a processos de fabricação tem se tornado frequente, carecendo de pesquisas para desenvolvimento e otimização destes. Os processos LASER estão associados a sistemas automatizados de produção, como células robotizadas e sistemas comandados numericamente - CNC. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema LASER de alta potência (10 kW), composto por módulos de comando e controle, sistemas periféricos, e um sistema mecânico de movimentação de três eixos (configuração cartesiana), empregando um CNC industrial, de forma a tornar o sistema apto na realização dos processos de soldagem LASER autógena, LASER *cladding* e tratamento térmico localizado a LASER, desenvolvido observando aspectos relacionados à modularidade e reconfigurabilidade. No processo de desenvolvimento, fez-se necessária a adequação da infraestrutura física do local de instalação e operação do sistema LASER de elevada potência, para a manutenção da segurança do operador do sistema, de pessoas do entorno e do próprio equipamento, em concordância com regulamentação e normas internacionais. Obtêm-se a total integração entre o LASER e o CNC e, a partir de programas inseridos em Código-G, é possível ajustar os parâmetros da fonte LASER e realizar os comandos para habilitar e desabilitar a emissão do feixe LASER. Com o CNC, também são acionados equipamentos periféricos para execução dos processos. Ao final é verificado o correto funcionamento do sistema LASER, de acordo com as especificações de projeto, determinadas na fase de projeto informacional do modelo de referência utilizado. Mostra-se que as especificações são, em boa parte, alcançadas e até superadas em alguns aspectos.

**Palavras-chave:** CNC; Soldagem LASER; LASER *cladding*; Modularidade; Reconfigurabilidade



## ABSTRACT

The LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) technology has won great importance and attention in the production environment, amid great competitiveness and continuous search for quality increase and process cost decrease. It is used to obtain joints, to add and to remove material. After the development of fiber LASER with multiple modules sources, it was possible to generate high-power beams. The use of these sources associated to manufacturing processes became recurrent, lacking researches to develop and optimize it. The LASER processes are associated to automated manufacturing systems, such as robotized cells and numerically controlled systems (Computer Numerical Control – CNC). This study presents the development of a high-power LASER system (10 kW), using an industrial CNC to control a three axis mechanical motion system (Cartesian configuration), in order to perform autogenous LASER welding processes, LASER cladding and localized LASER heat treatment. This LASER system presents characteristics of modularity and reconfigurability. To perform research experiments, it was necessary the adequate the physical infrastructure of the installation and equipment operation site, to guarantee the operator, as well as the surrounding people and own equipment safety, in accordance to the international regulation and standards. As result it was obtained the complete integration between the LASER system and the CNC, where program written in G-Code, permits to adjust the values of power and perform commands to enable and disable the LASER beam emission. The CNC system also activate peripheral equipments necessary to execute the processes. The work concludes with the verification of the correct operation of the LASER system, according the specifications, defined on the informational design phase of the employed reference model and shows that all specifications are largely achieved and even surpassed in some aspects.

**Keywords:** *CNC, LASER welding, LASER cladding; modularity; Reconfigurability.*





## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução da Potência gerada por fontes LASER (CO <sub>2</sub> , Nd:YAG e Fibra (Yb) de 1960 até 2010 .....	33
Figura 2.2 – Esquemático de um LASER de Fibra de alta potência com geração em múltiplos módulos.....	34
Figura 2.3 – LASERs de Fibra (Yb) IPG Photonics® de múltiplos módulos .....	35
Figura 2.4 – Representação esquemática de um processo de Soldagem a LASER nos modos de condução de calor e <i>keyhole</i> .....	39
Figura 2.5 – Ilustração do processo de soldagem LASER no modo <i>keyhole</i> .....	39
Figura 2.6 – Princípio do processo de soldagem híbrida LASER-Arco.....	42
Figura 2.7 – Princípio do processo de <i>cladding</i> .....	44
Figura 2.8 – Concepção de <i>powder feeder</i> para processo de <i>cladding</i> .....	45
Figura 2.9 – Imagens dos diferentes tipos de bocais de <i>cladding</i> e seus respectivos feixes de pó .....	46
Figura 2.10 – Princípio do processo de têmpera a LASER e ciclos térmicos de alteração microestrutural.....	49
Figura 2.11 – Áreas do olho afetadas pelos diferentes comprimentos de onda.....	53
Figura 2.12 – Sistemas e fluxo de informações de um CNC .....	56
Figura 2.13 – Modelos de IHM em diferentes fabricantes.....	58
Figura 2.14 - Estrutura de uma <i>word</i> em Código-G.....	61
Figura 3.1 – Influências percentuais sobre o custo do produto .....	65
Figura 3.2 – Etapas do ciclo de vida de um produto .....	68
Figura 3.3 – Fonte LASER IPG® YLS – 10000.....	70
Figura 3.4 – Configuração do cabeçote óptico Precitec .....	73
Figura 3.5 – Representação – Vista superior do ambiente de instalação do sistema LASER de elevada potência .....	75
Figura 3.6 – Função global do sistema LASER.....	79
Figura 3.7 – Síntese funcional do sistema LASER .....	83
Figura 4.1 – Representação renderizada do PCP – Setores do Painel.....	95
Figura 4.2 – Estrutura externa, interfaces de comunicação e componentes internos do PCP montado .....	98
Figura 4.3 – Componentes <i>Booksize</i> – NCU, <i>drivers</i> e fonte - PCP .....	100
Figura 4.4 – Topologia da rede DriveCLIQ do PCP.....	102
Figura 4.5 – Seção (A) do PCP montada – alimentação e proteção.....	106
Figura 4.6 – Seções F e G do PCP .....	110
Figura 4.7 – Circuito de <i>intertravamento</i> – Parte I .....	112
Figura 4.8 – Relé de Emergência e esquema de funcionamento.....	114
Figura 4.9 – Circuito de <i>Intertravamento</i> – Parte II.....	114
Figura 4.10 – Circuito de <i>Intertravamento</i> – Parte III .....	117
Figura 4.11 – Seção B do PCP – Relés da lógica e de <i>intertravamento</i> .....	121
Figura 4.12 – Placa de Interface com conectores.....	122
Figura 4.13 – Organização do circuito de sinais – PCP .....	124
Figura 4.14 – Renderização PCE.....	126
Figura 4.15 – Alocação de componentes no interior do PCE .....	127

Figura 4.16 – Operator Panel OP10C .....	129
Figura 4.17 –Interface do <i>software</i> SINUMERIK Operate .....	129
Figura 4.18 – MCP 483 PN e teclas personalizadas .....	131
Figura 4.19 – Placa de botões e sinalizadores – PCE .....	132
Figura 4.20 – Placa de conectores – PCE .....	135
Figura 4.21 – BHG Siemens .....	136
Figura 4.22 – Painel de Comando Externo – PCE.....	137
Figura 4.23 – Configuração de montagem – Guias lineares de rolos cruzados .....	139
Figura 4.24 – Módulo de movimentação linear Aerotech® ATS416 .....	139
Figura 4.25 – Módulos de movimentação – Modelo computacional .....	141
Figura 4.26 – Placa de passagem de cabos – PCP .....	143
Figura 4.27 – Representação esquemática dos componentes do sistema mecânico de acionamento dos módulos de movimentação – Mancal Fixo .....	146
Figura 4.28 – Sistema de movimentação mecânica do sistema LASER.....	147
Figura 4.29 – Portas de acesso à Sala de Processos LASER .....	149
Figura 4.30 – Equipamentos de monitoramento da Sala de Comando .....	150
Figura 4.31 – Central e ponto de alimentação – Gases de processo .....	151
Figura 4.32 – Painel de proteção elétrica – LASER e <i>chiller</i> .....	153
Figura 4.33 – Aterramento do sistema LASER .....	154
Figura 4.34 – Alimentador de pó e bocal de <i>cladding</i> .....	157
Figura 4.35 – Filtro-aspirador Filter Master, com braço articulado de 3 metros, fabricante Kemper .....	157
Figura 5.1 – Procedimento de posicionamento da peça em relação ao feixe LASER .....	166
Figura 5.2 – Alinhamento e sujeição da peça durante o processo.....	166
Figura 5.3 – Amostras de soldagem LASER autógena.....	167
Figura 5.4 – Efeito de passes sucessivos do feixe LASER sobre a superfície um Aço ABNT 1045.....	168

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Característica dos diferentes LASERs .....	32
Tabela 2.2 – Faixas de valores e parâmetros típicos do processo de soldagem LASER não híbrida.....	43
Tabela 2.3 – Parâmetros importantes no processo de <i>cladding</i> .....	47
Tabela 2.4 – Principais parâmetros e valores no processo de têmpera a LASER .....	49
Tabela 3.1 – Especificações de projeto .....	77
Tabela 5.1 – Situação de atendimento das especificações de projeto .....	169



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	2 Dimensões ou Bidimensional
3D	3 Dimensões ou Tridimensional
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
CA	Corrente Alternada
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CC	Corrente Contínua
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CF-CARD	<i>Compact Flash Card</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CW	<i>Continuous Wave</i>
DB	Conector elétrico D-Sub de 25 pinos (Norma IEEE 1284)
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DML	<i>Dedicated Manufacturing Line</i>
DR	Diferencial Residual
EBW	<i>Electron Beam Welding</i>
FBD	<i>Function Block Diagram</i>
FMS	<i>Flexible Manufacturing System</i>
HAZ	<i>Heat Affected Zone</i>
HD	<i>Hard Disk</i>
I/O	<i>Inputs e Outputs</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IHM	Interface Humano Máquina
IL	<i>Instruction List</i>
ILT	<i>Fraunhofer-Institut für Lasertechnik</i>
IPT	<i>Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IWF	<i>Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LBW	<i>LASER Beam Welding</i>
LD	<i>Ladder Diagram</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LG	<i>Line Generator</i>
LMD	<i>LASER Metal Deposition</i>

LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
LZH	LASER <i>Zentrum Hannover</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MCP	<i>Machine Operator Panel</i>
MDI	<i>Multiple Document Interface</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
NA	Normalmente Aberto
NC	<i>Numerical Control</i>
NCK	<i>Numerical Control Kernel</i>
NCU	<i>Numerical Control Unit</i>
Nd:YAG	<i>Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet</i>
NF	Normalmente Fechado
NR	Norma Regulamentadora
OP	<i>Operator Panel</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PCE	Painel de Comando Externo
PCP	Painel de Comando Principal
PCU	<i>Personal Computer Unit</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PRODIP	Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos
RJ-45	Conector <i>Registered Jack - 45</i>
RM	<i>Reconfigurable Machine</i>
RMS	<i>Reconfigurable Machine System</i>
SL	<i>Solution Line</i>
SLM	<i>Selective LASER Melting</i>
SMX	Sistema de Movimentação X
SMY	Sistema de Movimentação Y
SMZ	Sistema de Movimentação Z
ST	<i>Structured Text</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
TTT	Tempo – Temperatura – Transformação
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UV	Ultravioleta
Vac	Tensão em corrente alternada
Vcc	Tensão em corrente contínua
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZTA	Zona Termicamente Afetada

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>25</b>
<b>1.1</b>	<b>Apresentação do problema.....</b>	<b>27</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>28</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>28</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho.....</b>	<b>28</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>31</b>
<b>2.1</b>	<b>Tecnologia LASER e Suas Aplicações.....</b>	<b>31</b>
2.1.1	LASER de Fibra de Alta Potência .....	33
2.1.2	Tecnologia dos processos de fabricação com LASER.....	36
2.1.2.1	Soldagem a LASER .....	37
2.1.2.2	LASER <i>Cladding</i> – Revestimento .....	43
2.1.2.3	Tratamento Térmico com LASER .....	47
2.1.3	Segurança em sistemas LASER.....	50
2.1.3.1	Classificação dos LASERs. ....	50
2.1.3.2	Critérios de Segurança .....	51
<b>2.2</b>	<b>Tecnologia de Comando Numérico Computadorizado .....</b>	<b>54</b>
2.2.1	Caracterização de um CNC.....	54
2.2.1.2	IHM – Interface Humano-Máquina .....	57
2.2.1.3	NCK – <i>Numerical Control Kernel</i> .....	58
2.2.1.4	CLP – Controlador Lógico Programável .....	59
2.2.2	Programas em sistemas CNC.....	60
2.2.3	CNC aplicado a máquinas LASER .....	62
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO .....</b>	<b>65</b>
<b>3.1</b>	<b>Projeto Informacional .....</b>	<b>67</b>
3.1.1	O Objeto de Desenvolvimento.....	67
3.1.2	Ciclo de Vida e Usuários do Projeto.....	68
3.1.3	Restrições de Projeto .....	69
3.1.3.1	Fonte LASER.....	70
3.1.3.2	Cabeçote Óptico.....	71
3.1.3.3	Ambiente de Instalação e Operação do Sistema LASER.....	73
3.1.3.4	Sistema de Comando Numérico.....	75
3.1.4	Determinação das Especificações de Projeto.....	76
<b>3.2</b>	<b>Projeto Conceitual .....</b>	<b>78</b>
3.2.1	Função Global do Sistema .....	79
3.2.2	Determinação dos Subsistemas (Módulos).....	80
3.2.3	Síntese de Funções do Sistema .....	82
3.2.4	Princípios de solução .....	84
3.2.4.1	Painel de Comando Principal (PCP).....	84

3.2.4.2	Painel de Comando Externo (PCE) .....	86
3.2.4.3	Módulos de Movimentação .....	87
3.2.4.4	Infraestrutura .....	88
3.2.4.5	LASER e Óptica .....	91
3.2.4.6	Periféricos.....	92
<b>4</b>	<b>PROJETO E EXECUÇÃO.....</b>	<b>93</b>
<b>4.1</b>	<b>Painel de Comando Principal.....</b>	<b>93</b>
4.1.1	Desenvolvimento Mecânico .....	94
4.1.2	Composição do Sistema CNC .....	98
4.1.3	Desenvolvimento Elétrico e de Potência .....	105
4.1.4	Desenvolvimento da Lógica e de Sinais.....	110
4.1.5	Interfaces de Comunicação do PCP.....	121
<b>4.2</b>	<b>Painel de Comando Externo .....</b>	<b>125</b>
4.2.1	Desenvolvimento Mecânico .....	125
4.2.2	Composição do Sistema CNC .....	128
4.2.3	Operação e Comunicação do PCE.....	131
<b>4.3</b>	<b>Módulos de Movimentação .....</b>	<b>137</b>
4.3.1	Avaliação das necessidades de readequação .....	138
4.3.2	Modelagem computacional.....	140
4.3.3	Seleção dos componentes de movimentação.....	141
<b>4.4</b>	<b>Adequações na Infraestrutura.....</b>	<b>148</b>
<b>4.5</b>	<b>Equipamentos Periféricos .....</b>	<b>154</b>
<b>4.6</b>	<b>Configuração do CNC .....</b>	<b>158</b>
<b>5</b>	<b>VALIDAÇÃO DO SISTEMA LASER .....</b>	<b>161</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>171</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>175</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>179</b>
	<b>APÊNDICE A - SISTEMAS MODULARES .....</b>	<b>185</b>
	<b>APÊNDICE B - SISTEMAS RECONFIGURÁVEIS .....</b>	<b>189</b>
	<b>ANEXO A – CARACTERÍSTICAS LASER .....</b>	<b>195</b>
	<b>ANEXO B - PRODIP.....</b>	<b>196</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Competitividade, qualidade e custo definem bem o atual cenário dos meios produtivos. Em busca da produção de bens de consumo com baixo custo e qualidade adequada, as indústrias procuram manter sua competitividade, fazendo uso de processos de fabricação cada vez mais adequados, que supram e, se possível, superem suas demandas produtivas. Neste ambiente, o LASER tem recebido uma posição de destaque.

Em 1960, foi gerado o primeiro feixe LASER da história. A partir de 1963, a interação do feixe com a matéria tem motivado inúmeras pesquisas, visando otimizar e desenvolver novos processos de fabricação que utilizem esta ferramenta como efetuator [1], [2].

A introdução da tecnologia LASER nos meios industriais possibilitou aumentar de forma bastante significativa as capacidades dos processos, as velocidades de processamento de materiais, qualidades finais e diminuição dos custos produtivos. Além disto, permitiu reduzir retrabalhos posteriores e, em alguns casos, até excluir processos intermediários de fabricação. Estes avanços impulsionaram as pesquisas da tecnologia LASER e também das interações do LASER com os mais diversos materiais e processos.

Há uma variedade de processos possíveis de serem efetuados utilizando a energia luminosa de um feixe LASER. Com ela é possível efetuar a união, remoção e adição de materiais. Dentre estes, é possível destacar os processos de corte, soldagem, marcação, *cladding* (revestimento), ablação, tratamentos térmicos, refusão, polimento, usinagem, dentre outros [1].

Em 2002, a tecnologia de LASER de fibra passou a ser usada em equipamentos industriais e comerciais. O surgimento desta tecnologia, em especial com o desenvolvimento da técnica de geração de feixe em múltiplos módulos, revolucionou os processos que utilizam o LASER como efetuator final. Com esta tecnologia, tem sido possível alcançar valores de potência outrora inimagináveis, aumentando sobremaneira a capacidade dos processos. Além disto, tem sido possível produzir fontes LASER cada vez menores, mais baratas e com valores de eficiência energética superiores a 35% [3].

Assim, os LASERs de elevada potência têm ganho um lugar de destaque, especialmente nos processos de corte e soldagem. Espessuras de soldagem de 125mm utilizando feixes LASER de 70 kW em um único passe já foram alcançadas, um resultado impensável para técnicas de soldagem tradicionais, como soldagem a arco voltaico [4]. Espessuras de corte de 25mm têm sido possíveis utilizando LASERs de alta potência,

conseguindo melhor qualidade das superfícies de corte, em relação à qualidade obtida em outros processos de corte térmico, como Plasma e Oxi-corte. Além disso, as taxas de produtividade nos processos são elevadas, fazendo com que muitas empresas migrem para o uso de processos LASER, apesar do elevado custo de utilização destes equipamentos. Velocidades de corte superiores a 100 m/min têm sido possíveis utilizando técnicas de corte a LASER de alta velocidade para chapas de pequenas espessuras (1mm)[1].

Os processos LASER são altamente dependentes das tecnologias de automação de máquinas, pois não é usual efetuar um processo LASER de forma manual. Em um ambiente industrial isto é ainda mais claro, onde o ideal é que haja um controle bastante restrito dos parâmetros do processo para que este seja otimizado e se torne econômica e tecnicamente viável. Neste contexto, sistemas robóticos, seriais e paralelos, assim como sistemas comandados numericamente (CNC), têm se destacado.

O Brasil carece de centros especializados para realização de pesquisas nos processos de fabricação com LASER. O principal motivo disto é o custo elevado para se adquirir o equipamento e para montar uma infraestrutura adequada para sua segura e correta operação, especialmente quando se refere a sistemas LASER de alta potência. Além disto, um fator que dificulta maior difusão de pesquisas na área é a carência de recursos humanos especializados em processos e na tecnologia LASER. Apesar disto, existe a demanda para pesquisa e desenvolvimento destes processos, especialmente para as áreas de construção naval e de petróleo e gás.

Assim, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema LASER de elevada potência, no intuito de que este seja apto para a realização de pesquisas nas áreas de processos LASER, sendo o foco principal voltado aos processos de soldagem a LASER, LASER *cladding* e tratamento térmico localizado. Este sistema é uma composição de módulos de comando e controle, de movimentação mecânica (desenvolvidos no escopo do projeto) bem como de sistemas periféricos relacionados aos processos de interesse, todos estes associados a uma fonte LASER de alta potência (10 kW). Também relacionado ao sistema, visando operacionalizá-lo, é desenvolvida toda a infraestrutura necessária para sua correta e segura instalação e operação.

Para controle do sistema, é empregado comando numérico computadorizado (CNC) industrial, modelo Siemens Sinumerik 840D SL, sendo feito, a partir deste, o comando de todos os módulos e periféricos que compõem o sistema LASER, além, é claro, do controle de movimento.

Para o desenvolvimento do trabalho, é utilizado um modelo de referência de metodologia para desenvolvimento de projeto de produtos, o

PRODIP [5], através do qual são realizadas e apresentadas as fases de Projeto Informacional e Projeto Conceitual. De forma complementar, são usadas diversas outras referências no campo da metodologia, visando auxiliar o processo de projeto.

## 1.1 Apresentação do problema

O Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP – há anos tem trabalhado no desenvolvimento de projetos e pesquisas na área de fabricação e projeto de máquinas e sistemas. Os principais processos pesquisados no LMP são: torneamento, fresamento, furação, brochamento, retificação, lapidação, remoção por descargas elétricas, torneamento de ultraprecisão, dentre outros; possuindo a infraestrutura necessária para estes desenvolvimentos.

Na área de projetos e sistemas, destacam-se projetos de máquinas de ultraprecisão, mancais aerostáticos, sistemas robóticos de cinemática paralela, sistemas de lapidação, desenvolvimentos de impressoras 3D, entre outros. Há alguns anos, iniciaram-se pesquisas na área de processos LASER, surgindo assim a seção LASER do LMP. Na fase inicial, tendo em vista a não disponibilidade de equipamentos apropriados para realização das pesquisas, os trabalhos se resumiram a atividades em parceiros na Alemanha (IPT, ILT, IPK, LZH) e Suíça (IWF Inspire).

No ano de 2010, o projeto Rede Metalúrgica, financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – permitiu iniciar a instalação de uma infraestrutura, com avançada tecnologia, para o desenvolvimento de aplicações LASER de elevada potência, visando beneficiar especialmente a área de Petróleo e Gás.

Assim, fez-se necessário o desenvolvimento de projetos que tivessem como objetivo a operacionalização de um LASER de alta potência, adquirido para suprir as necessidades do projeto. Diversos sistemas foram desenvolvidos, utilizando comandos numéricos de baixo custo baseados em PC. No entanto, nenhum sistema LASER capaz de realizar os processos de fabricação propostos no escopo do projeto havia sido desenvolvido, especialmente devido às grandes adequações na infraestrutura necessárias para correta e segura operacionalização do sistema.

Neste contexto este trabalho foi inserido, objetivando desenvolver um sistema LASER de alta potência, utilizando os equipamentos (LASER, Cabeçote Óptico) adquiridos no contexto do projeto, com objetivo de possibilitar a realização de pesquisas avançadas na área de processos

LASER para o contexto brasileiro atual, com foco especial para os processos de soldagem LASER, LASER *cladding* e tratamento térmico localizado.

## 1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema LASER de alta potência (10 kW) para o processamento de materiais, utilizando um comando numérico industrial, com características de modularidade e reconfigurabilidade, bem como a adequação da infraestrutura do ambiente de instalação e operação para a efetiva implementação do equipamento, oferecendo um ambiente de alta segurança para operação do sistema.

## 1.3 Objetivos Específicos

Neste contexto, estão inclusos os seguintes objetivos específicos, que deverão ser alcançados ao longo do projeto:

- a) desenvolver um sistema mecânico, para movimentação relativa entre feixe LASER e peça;
- b) desenvolver um painel eletroeletrônico de lógica e de potência;
- c) integrar o sistema de Comando Numérico Computadorizado de modelo industrial;
- d) desenvolver e adequar a infraestrutura física para instalação do LASER;
- e) projetar e implementar uma lógica de segurança de operação do equipamento;
- f) modularizar os diversos sistemas e garantir a capacidade de reconfigurabilidade do equipamento;
- g) elaborar uma interface entre Comando Numérico e a fonte LASER e demais equipamentos integrados ao sistema;
- h) possibilitar a realização de mais de um processo com o mesmo equipamento de forma não simultânea.

## 1.4 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está dividida em 7 Capítulos, organizados sequencial e cronologicamente de acordo com as fases de desenvolvimento do projeto. Cada Capítulo é dividido em Subcapítulos, estes em Seções e estas em Subseções, quando necessário.

O Capítulo 2, denominado “Revisão Bibliográfica”, apresenta o conceito de todas as grandes áreas que tangenciam o desenvolvimento do projeto, baseando-se em literaturas técnicas, dando ao leitor embasamento teórico suficientemente aprofundado para os Capítulos seguintes. Este Capítulo é dividido em 2 Subcapítulos que abordas as duas principais grandes áreas do projeto: Tecnologia LASER e Suas Aplicações e a Tecnologia de Comando Numérico Computadorizado.

O Capítulo 3, “Metodologia de Desenvolvimento do Projeto”, apresenta o modelo de referência utilizado e descreve, de forma resumida, duas das principais fases da aplicação da metodologia de projeto: Projeto Informacional e o Projeto Conceitual. Neste capítulo são mescladas partes de revisão bibliográfica, sobre a metodologia do projeto, modelos de referência e ferramentas de auxílio ao projeto, bem como a aplicação da metodologia ao trabalho proposto.

O Capítulo 4, denominado “Projeto e Execução”, aborda o projeto técnico do sistema desenvolvido, apresentando no decorrer do texto as decisões tomadas, justificando-as e mostrando os resultados relacionados à construção dos diversos módulos e sistemas.

O Capítulo 5, “Validação do Sistema LASER”, apresenta os resultados que foram obtidos com o sistema LASER desenvolvido, avaliando qualitativamente todas as características que foram obtidas, trazendo ao final uma avaliação de acordo com as especificações de projeto que foram definidas na fase de Projeto Informacional, no Capítulo 3.

O Capítulo 6, “Conclusão”, apresenta as conclusões que puderam ser feitas a partir do desenvolvimento, fazendo uma comparação e análise a partir dos objetivos, geral e específicos propostos.

O Capítulo 7, “Sugestões para Trabalhos Futuros”, traz uma série de sugestões, tanto para trabalhos de cunho semelhante, como para projetos de continuidade ao proposto nesta dissertação, baseando-se em características observadas na revisão bibliográfica, que permitem a melhoria do equipamento e o aumento na sua capacidade de processo, apontando também as lacunas identificadas durante o próprio desenvolvimento.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Capítulo 2 “Revisão Bibliográfica” tem o objetivo de trazer uma revisão das tecnologias e conceitos das grandes e pequenas áreas que permeiam o projeto do objeto de desenvolvimento, dando ao leitor ferramentas teóricas para uma possível confrontação com o que é discutido no decorrer do trabalho. Assim, esta revisão foi dividida de acordo com as grandes áreas, as quais dão nome aos Subcapítulos: Tecnologia LASER e suas Aplicações; A Tecnologia de Comando Numérico Computadorizado; Sistemas Modulares e Sistemas Reconfiguráveis.

### 2.1 Tecnologia LASER e Suas Aplicações

O conhecimento da tecnologia LASER e a forma com que esta é aplicada nos meios industriais é essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Nesta revisão, o objetivo não é a abordagem da teoria física envolvida na geração do LASER, muito menos nos aspectos especiais da luz. O objetivo é mostrar, de forma geral, os principais processos que utilizam esta ferramenta e suas características fundamentais, com o objetivo de tornar compreensível as decisões feitas durante o desenvolvimento do projeto. Desta forma, o LASER, neste trabalho, será abordado do ponto de vista de um usuário da tecnologia.

LASER é o acrônimo da expressão da língua inglesa: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* - Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação. Por conceito, o LASER é um tipo especial de luz, monocromática, coerente e com possibilidade de extrema focagem [1], [6].

Em 1960, no Hughes Research Laboratory, Malibu – Califórnia – EUA, o pesquisador Theodore Maiman demonstrou a geração de um LASER de Rubi, o qual é considerado, historicamente, o primeiro LASER gerado [7]. A partir de 1963 a interação entre o LASER e os diversos materiais tem sido investigada. Atualmente, uma variedade de processos industriais utilizam o LASER como efetivador final, o que aumenta ainda mais as necessidades de conhecimento das interações entre LASER-Matéria e das necessidades e possibilidades de automação destes processos [1], [2].

Há várias tecnologias diferentes disponíveis e desenvolvidas para gerar um feixe LASER. Algumas são bastante recentes e outras estão se tornando obsoletas. Uma diferenciação bastante importante entre os diversos tipos de LASER é o comprimento de onda  $\lambda$  da luz gerada. Este

parâmetro tem uma influência muito importante na interação do LASER com o material.

Para que um LASER cause um efeito sobre uma peça, em qualquer processo de fabricação que o utilize como efetivador final, é necessário que o feixe incida sobre a peça a ser trabalhada com a densidade de energia adequada. A luz incidente é, em parte, absorvida e, em parte, refletida. A energia absorvida é estimada como sendo

$$W_A = \iint A(\lambda, I) I(\lambda, r, t) d^2r dt \quad (2.1)$$

onde “A” é o coeficiente de absorção e “I” é a intensidade do feixe, dependente do raio (r) do feixe incidente sobre a peça, do tempo em que esta incidência é efetiva (t) e do comprimento de onda ( $\lambda$ ) [1]. O comprimento de onda  $\lambda$  é a variável que incide em ambos os termos da função e, portanto, tem influência direta sobre a quantidade de energia absorvida pelo material. A absorção de energia também depende das propriedades físicas do material, da geometria e do acabamento da superfície da peça. O diâmetro do feixe que age sobre a peça depende do comprimento de onda ( $\lambda$ ), da qualidade do feixe gerado na fonte LASER e do sistema óptico de foco utilizado [1].

A Tabela 2.1 apresenta alguns dos diferentes tipos de LASER, associando o comprimento de onda característico e a potência média disponível para tais tecnologias de geração. Neste trabalho, o foco será dado ao LASER de fibra.

Tabela 2.1 – Característica dos diferentes LASERs (Adaptado de [6])

LASER	$\lambda$ (nm) <sup>1</sup>	Faixa de Potência (W)
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	10 600 nm	10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>+4</sup> W
Nd:YAG	1060 nm	10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>+2</sup> W
Nd:Vidro	1050 nm	10 <sup>0</sup> W
Íon de Argônio	514,5 nm	10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>-1</sup> W
Fibra	1064 nm	10 <sup>1</sup> a 10 <sup>+5</sup> W
Excimer	248 nm	10 <sup>0</sup> a 10 <sup>+2</sup> W

<sup>1</sup> Os comprimentos de onda indicados na tabela são os usuais. Alguns deles não são alterados, como é o caso do LASER de Fibra e de CO<sub>2</sub>. No entanto, alguns LASERs como os de Excimer e Íon de Argônio podem sofrer grandes alterações (propositais), dependendo de características específicas dos seus ressonadores [7], como é o caso do LASER de Fibra e de CO<sub>2</sub>. No entanto, alguns LASERs como os de Excimer e Íon de Argônio podem sofrer grandes alterações (propositais), dependendo de características específicas dos seus ressonadores [7].



### 2.1.1 LASER de Fibra de Alta Potência

Desde 1960, a tecnologia LASER vem passando por muitas mudanças e progressos, com o desenvolvimento de novas formas de geração e a possibilidade de obtenção de grandes potências nos feixes [7]. Estes progressos são refletidos, sobretudo, nos processos de fabricação que utilizam o LASER como efetuator final. A Figura 2.1 ilustra um gráfico que mostra, no decorrer dos anos, o aumento da potência nos LASERs de CO<sub>2</sub>, Nd: YAG e Fibra (Yb).

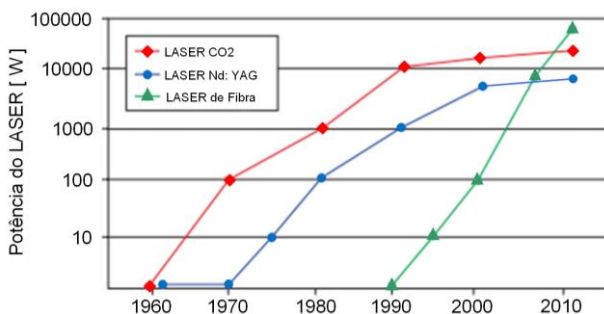


Figura 2.1 – Evolução da Potência gerada por fontes LASER (CO<sub>2</sub>, Nd:YAG e Fibra (Yb) de 1960 até 2010 (Adaptado de [7])

O LASER de fibra tem ganho um destaque especial, principalmente a partir de 2002, quando estas fontes começaram a ser comercializadas em equipamentos industriais e militares. Há uma série de vantagens na tecnologia de Fibra em relação as demais, especialmente se comparada com as tecnologias Nd: YAG e CO<sub>2</sub>. Podem-se destacar [7]:

- a) confiabilidade e robustez;
- b) maior eficiência energética;
- c) baixa necessidade de manutenção;
- d) equipamento com pequenas dimensões e volume;
- e) capacidade de operação no modo *Continuous Wave* – Pulso Contínuo (CW) em grandes potências e com excelente qualidade de feixe;
- f) rápida inicialização e operação em máxima potência, sem necessidade de ciclos de aquecimento;
- g) flexibilidade na entrega do feixe para a operação, devido à condução por fibra;
- h) baixo custo (em relação a outros LASERs).

Recentemente, com o desenvolvimento da tecnologia de geração de LASER de fibra em múltiplos módulos, tem sido possível obter potências de saída na ordem de grandeza de 100 kW, aumentando a quantidade de módulos de geração no equipamento. A Figura 2.2 apresenta de forma esquemática o conceito desta tecnologia. O entendimento da lógica de funcionamento é bastante simples, no entanto, o entendimento dos fenômenos físicos e dos dispositivos que a compõe é complexo<sup>2</sup> [7].

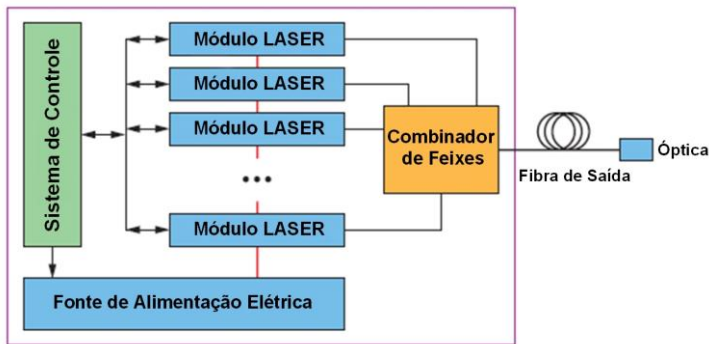


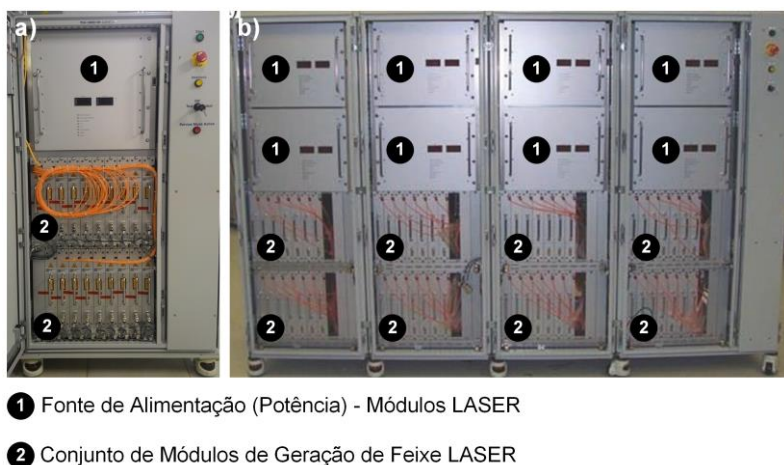
Figura 2.2 – Esquemático de um LASER de Fibra de alta potência com geração em múltiplos módulos (Adaptado de [7])

O elemento chave desta tecnologia é o Combinador de Feixes (*Beam Combiner*). O feixe LASER na saída do equipamento é gerado por uma série de módulos, alimentados por uma ou mais fontes de alimentação elétrica, que são responsáveis pela geração de uma parcela da potência do feixe LASER da saída. Estes feixes de menor potência são combinados de forma que as potências sejam somadas e, principalmente, mantendo a qualidade do feixe adequada para as operações que serão realizadas com o LASER [7]. Esta tecnologia foi desenvolvida inicialmente para a área de telecomunicações e adaptada para grandes potências pela empresa IPG Photonics®. Com esta tecnologia, é possível alcançar valores de potência de saída que, no início do século XXI, eram considerados inviáveis de serem gerados. A potência dos módulos, individualmente, é limitada. No entanto, é possível adicionar mais módulos ao equipamento para compor o valor de potência final de saída do feixe LASER. Assim,

<sup>2</sup> Esta tecnologia de geração de LASER de fibra em múltiplos módulos é exclusiva da empresa IPG Photonics®. Esta empresa foi a primeira a conseguir a união dos feixes de fibras, de forma a garantir uma boa qualidade no único feixe de saída. Não há informações disponíveis sobre esta tecnologia de união de feixes de fibras ópticas.

os equipamentos LASER de fibra de Itérbio (Yb) em múltiplos módulos podem trabalhar com quantidades fixas de módulos: 1, 1-7 e 1-19 módulos, sendo este número limitado pela característica do combinador de feixes [3].

Apesar da qualidade do feixe gerado por um LASER com múltiplos módulos ser adequada para a maioria dos processos que utilizam LASERs de alta potência, a qualidade do feixe gerado em equipamentos de um único módulo é superior. A potência de um LASER de fibra com um único módulo é da ordem de 4 kW com um feixe de alta qualidade e com dimensões muito pequenas, possibilitando obter altas densidades de energia [8]. A Figura 2.3 mostra a estrutura modular de um LASER de fibra de Itérbio (Yb) IPG Photonics® de múltiplos módulos a) 50 kW [7]; b) 10 kW; evidenciando as fontes de alimentação e os módulos de geração de feixe LASER.



1 Fonte de Alimentação (Potência) - Módulos LASER

2 Conjunto de Módulos de Geração de Feixe LASER

Figura 2.3– LASERs de Fibra (Yb) IPG Photonics® de múltiplos módulos ( a - [7]; b - Autor )

Na parte superior de ambos os equipamentos, encontra-se a(s) fonte(s) de tensão responsável pela alimentação dos módulos de geração do LASER. Abaixo da(s) fonte(s), há uma série de módulos, cada um responsável pela geração de uma parcela da potência do feixe de saída.

Atualmente, o LASER de maior potência no mundo está instalado no laboratório NADEX LASER R&D, no Japão. Trata-se de um LASER de fibra de Itérbio (Yb) em múltiplos módulos, também produzido pela empresa IPG Photonics®, com potência de saída de 100 kW (101,3 kW

potência medida), com 35,4% de eficiência energética. Este equipamento possui 90 módulos de geração de LASER de 1,2 kW cada, combinados em 6 subconjuntos de 15 módulos (combinador de 19-1), os quais, por sua vez, são combinados por um combinador de 7-1. Com este equipamento, tem sido possível realizar soldas com profundidade de 38 mm em velocidades de 3m/min. Experimentos realizados em vácuo, com potência de 70 kW, têm possibilitado soldagens de 125mm de espessura, ambas em aço inoxidável SUS 304 com diâmetro do ponto focal de 1mm e utilizando a técnica *deep penetration welding (keyhole)*. Esta tecnologia, segundo o fabricante IPG<sup>®</sup>, já está adequada para produzir LASERS de 150 a 200kW de potência de saída [3], [4], [9].

Na bibliografia atual, não há uma definição rígida, que permita determinar qual potência caracteriza um LASER como sendo de alta ou elevada potência, podendo-se encontrar variadas informações, dependendo do autor e do ano de publicação do texto. A Norma ANSI 136.5 [10] define algumas classes de LASERS de acordo, principalmente, com a periculosidade da incidência do feixe sobre a pele e sobre os olhos, sendo a mais elevada a Classe 4. Esta classe inclui LASERS a partir da potência de 0.5 W, ou seja, uma potência consideravelmente pequena, tendo em vista a necessária para a realização de processos de fabricação, especialmente no âmbito da indústria metal mecânica. O conceito “alta potência” pode variar com o tempo. Por exemplo, no início da década de 1990, potências de 1 kW, em LASERS de Nd:YAG eram consideradas altíssimas, tendo em vista as tecnologias e os métodos de obtenção deste feixe na época [11]. Hoje, LASERS de fibra em múltiplos módulos, ou de disco, com potências de 10 kW ou mais, são comuns.

### 2.1.2 Tecnologia dos processos de fabricação com LASER

O feixe LASER é uma ferramenta deveras versátil. Com a mesma fonte LASER é possível aquecer, fundir e vaporizar materiais a ele exposto<sup>3</sup>, desde que a fonte LASER e o sistema óptico associado sejam adequados ao processamento de materiais. Assim, nos processos de manufatura, o LASER tem sido utilizado para cortar, soldar, tratar termicamente,

---

<sup>3</sup> Esta afirmação é verdadeira apenas para materiais refletivos e não para materiais transmissivos. Um feixe de LASER de fibra, com comprimento de 1064nm, que incide sobre a superfície de um material transmissivo para este comprimento de onda, como o vidro, por exemplo, não tem o mesmo efeito que ocorre quando incide sobre o material refletivo, pois o material transmissivo não absorve o comprimento de onda indicado.

Também deve-se observar que nem todo material sofre as mudanças de fases citadas. Por exemplo, uma madeira exposta a um feixe LASER não atinge um estado líquido e, portanto, não funde.

marcar, gravar, usinar, adicionar camadas de materiais diversos em substratos (LASER *cladding*) e construir estruturas em 3D (manufatura aditiva) [1][2].

O objetivo desta seção é apontar alguns dos principais processos de fabricação com LASER, focando nos que são de interesse para o desenvolvimento do trabalho.

### 2.1.2.1 Soldagem a LASER

A soldagem a LASER é um processo de soldagem por fusão, sem contato, que tem como objetivo a união de materiais, efetivada pelo aquecimento proveniente da incidência de um feixe LASER sobre a peça [2][12]. Possui algumas propriedades semelhantes à soldagem por feixe de elétrons, principalmente devido à grande densidade de energia envolvida no processamento [12]. Devido, principalmente, à alta concentração de energia, causada pela pequena dimensão do ponto focal (*spot size*), a energia total envolvida no processo de soldagem a LASER é relativamente pequena, comparando com outros processos de soldagem. Estas características proporcionam baixas taxas de distorção e uma zona termicamente afetada (ZTA)<sup>4</sup> pequena no material processado, em comparação aos processos de soldagem a arco voltaico, por exemplo [2]. Na literatura, a nomenclatura LBW é usual, em que a sigla é um acrônimo do termo inglês *LASER Beam Welding*. Dependendo da densidade de energia, o processo de soldagem a LASER é efetuado de dois diferentes modos:

- a) soldagem por Condução de Calor (*Heat Conduction Welding*)<sup>5</sup>;
- b) soldagem de Penetração Profunda (*Deep Penetration Welding*) [1] ou mais conhecida como *Keyhole Welding* [11].

Durante o processo de soldagem, a peça é aquecida pela incidência do feixe do LASER sobre o material. Esta incidência possui uma densidade de energia que é dada pela relação entre a potência do feixe (W) e a área do ponto focal que incide sobre a peça (cm<sup>2</sup>) - W/cm<sup>2</sup>. Se o material muda de fase, do sólido para o líquido, sem que haja evaporação (transformação para fase gasosa), a soldagem é considerada por condução de

---

<sup>4</sup> O termo “Zona Termicamente Afetada - ZTA” é uma tradução do termo “*heat-affected zone - HAZ*” [8], [11], encontrado na literatura técnica em inglês. O termo “Zona Afetada pelo Calor - ZAC” também é encontrado na literatura [60]. Neste texto, será padronizado o uso do primeiro, sob o acrônimo ZTA.

<sup>5</sup> A Soldagem por Condução de Calor (*Heat Conduction Welding*) também pode ser encontrada na literatura em inglês como *Conduction Limited Welding* [2]. No entanto, a primeira será usada como padrão deste texto.

calor. Geralmente, a densidade de energia está abaixo de  $10^6$  W/cm<sup>2</sup>. A soldagem por condução de calor é possível quando a energia absorvida pelo material é suficiente para fundir o material na zona de soldagem, porém, insuficiente para a vaporização e formação de plasma a partir do vapor metálico [1], [2]. Nesta condição de soldagem, a relação entre a profundidade e a largura do cordão sempre será menor que 1 e a profundidade do cordão depende exclusivamente da característica de condução de calor, particular de cada material, se os demais parâmetros permanecerem constantes [1]. Neste modo de soldagem, o ponto focal do feixe LASER é, geralmente, deslocado em relação à superfície da peça, de tal forma que seu diâmetro aumente, levando a uma densidade de energia menor, de modo que as temperaturas na região do processo atinjam um valor abaixo do limiar de transformação para a fase gasosa [11].

Quando a densidade de energia é suficiente para elevar a temperatura do substrato, de forma que a temperatura de ebulição seja atingida, parte do material evapora, formando vapor metálico ionizado (plasma). Este plasma, em temperaturas, acima de 2000 K em soldagens efetuadas com LASER de Nd:YAG [11], tende a se expandir, resultando em uma força de recuo que empurra o material fundido, levando a formação de uma cavidade denominada de *keyhole*, sendo a estabilidade de sua formação dependente do equilíbrio das forças envolvidas (força de recuo da pressão de vapor, tensão superficial e forças hidrostáticas causadas pelo atrito do vapor que se move pela superfície fundida). Este efeito, de acordo com a norma DIN32511, é denominado *deep penetration welding effect* (efeito da soldagem de penetração profunda) [1].

Neste modo de soldagem, a penetração é muito maior que no modo de condução de calor e é possível efetuar soldagens de materiais com grandes espessuras. Para ocorrer o *keyhole*, uma densidade de energia  $\geq 10^6$  W/cm<sup>2</sup> (10 MW/cm<sup>2</sup>) é, em geral, necessária. Nesta condição, a relação entre a profundidade de soldagem e a espessura do cordão, também conhecida como “fator de forma”, pode ser superior a 10:1 [11], [13]. A Figura 2.4 ilustra esquematicamente os perfis transversais e axiais (em relação à direção do cordão) dos modos de condução de calor e *keyhole*.

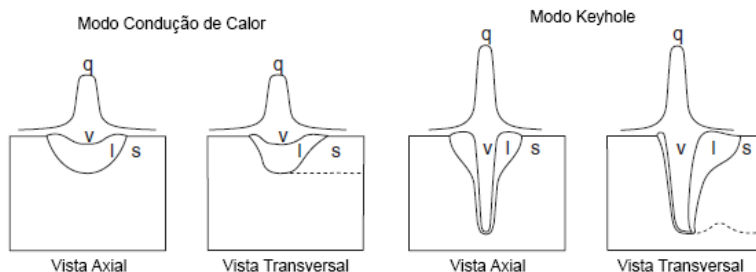


Figura 2.4 – Representação esquemática de um processo de Soldagem a LASER nos modos de condução de calor e *keyhole* (Adaptado de [11])

O processo de soldagem a LASER pode ser autógeno (sem a adição de material) ou com material de adição [1]. A Figura 2.5 ilustra o processo de soldagem no modo *keyhole* a) autógeno e b) com adição de material.

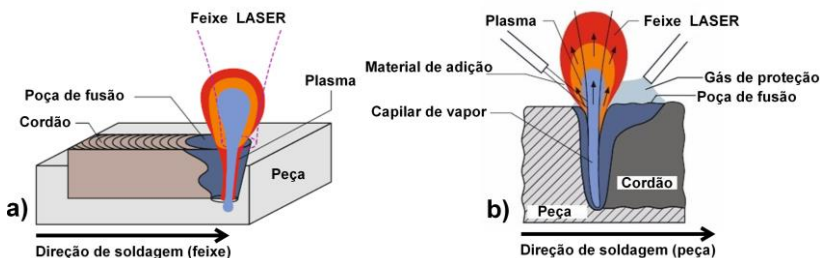


Figura 2.5 – Ilustração do processo de soldagem LASER no modo *keyhole* (Adaptado de [1])

A soldagem a LASER é usada nos mais diversos setores industriais, destacando-se: aeroespacial, naval, biomedicina e bioengenharia, elétrica e eletrônica, dentre outras [2]. Destacam-se como vantagens em relação aos processos de soldagem por chama e arco elétrico:

- a zona termicamente afetada (ZTA) é pequena;
- a quantidade de energia total (calor) é baixa;
- as velocidades de soldagem podem ser elevadas, chegando a atingir valores superiores a 10 m/min [11];
- não há contaminação por contato durante o processo;
- permite profundas penetrações com um cordão estreito;
- a exatidão alcançável com o processo é elevada;
- baixas taxas de deformação e distorções nas peças processadas;

- h) possibilita a união de materiais dissimilares [14];
- i) pode requerer mas, em geral, não necessita de tratamento térmico posterior.

Há também algumas desvantagens e limitações no uso da tecnologia de soldagem a LASER. Dentre estas, destacam-se:

- a) dificuldade de processar materiais com alta refletividade, exemplo alumínio;
- b) os investimentos iniciais para aquisição do equipamento, assim como os custos de manutenção e operação (recursos humanos especializados) ainda são elevados;
- c) necessidade de treinamento especial dos operadores (devido à automatização e periculosidade do processo);
- d) precisa de uma infraestrutura de segurança rebuscada, em especial quando trata-se de LASERs de alta potência;
- e) é difícil de operar “em campo” devido a infraestrutura necessária à fonte LASER e às restrições de segurança;
- f) as superfícies que formam a junta devem ser de boa qualidade, macro e microgeométrica, além de necessitar de cuidado quanto à fixação das peças soldadas, para que o processo seja possível e estável;
- g) na maior parte das aplicações, é um processo automatizado, sendo necessário empregar manipuladores robóticos ou máquinas automáticas (numericamente comandadas, por exemplo);

Relacionado ao processo de soldagem por feixe de elétrons (*Electron Beam Welding* - EBW), que possui, sobretudo, a semelhança de possuir uma alta densidade de energia, a soldagem a LASER possui a vantagem de, para o processamento, não necessitar de evacuação da região de trabalho.

A maior parte das vantagens citadas são em decorrência da característica de alta densidade de energia que o feixe LASER oferece. Isto faz com que a quantidade de energia necessária para fundir o material seja menor o que, por consequência, aquece menos a peça, fazendo com que a ZTA seja pequena e haja poucas mudanças microestruturais no material soldado [1], [2], [11].

Com relação as desvantagens, a mais restritiva é a relacionada aos custos. As fontes LASER, especialmente as de alta potência, ainda são muito caras, tanto na aquisição como na manutenção. Além deste investimento, existem outros custos, como adequação da infraestrutura para a instalação e operação do equipamento com segurança e da aquisição de



sistemas de movimentação, robóticos ou CNC, para efetuar as movimentações relativas do processo (feixe-peça); além disto, há também o custo operacional, por causa da necessidade de recursos humanos especializados para realizar o processo [2]. No entanto, estes altos custos devem ser considerados sob a perspectiva de que a inserção de um processo de soldagem a LASER em um meio produtivo pode levar a uma elevação considerável nas taxas de produção, isto por causa das altas velocidades, grandes profundidades dos cordões e baixas distorções na peça, quando comparado aos processos convencionais, como soldagem a arco voltaico, por exemplo [1].

Com o intuito de aumentar o rendimento dos processos de soldagem a LASER, foram desenvolvidos processos híbridos, que combinam o feixe do LASER com outras técnicas de soldagem, especialmente as de arco voltaico (TIG (*Tungsten Inert Gas*) e MIG/MAG (*Metal Inert/Active Gas*)). Os principais processos a arco que vêm sendo combinados com o LASER são o MIG/MAG. No ano 2000, a instituição Alemã Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT) desenvolveu o primeiro sistema industrial de soldagem híbrida LASER-MIG. Desde então, o processo tem sido utilizado em processos industriais, especialmente na construção naval, em que são necessárias soldagens de chapas espessas e na indústria automobilística, na qual o anseio pelo aumento da produtividade é constante e necessário [1], [11].

Uma característica interessante do processo híbrido LASER-Arco é o potencial de unir as características de ambos processos, além de oferecer características exclusivas de cada configuração híbrida, inexistentes nos processos puros. Em um processo híbrido LASER-MIG/MAG, por exemplo, o LASER oferece a energia para a formação do *keyhole*. O processo MIG/MAG oferece uma parcela adicional de energia, possibilitando regular os gradientes de temperatura de resfriamento, além de permitir a adição de material na região da poça fundida. Na configuração híbrida, aproveita-se o gás do processo MIG/MAG, utilizado para a formação do arco voltaico, para fornecer uma atmosfera apropriada para a região da poça fundida, tornando-se desnecessária a alimentação de gás exclusiva para a região do feixe do LASER, que é uma característica da soldagem não híbrida [1], [11]. A Figura 2.6 mostra, de forma esquemática, a soldagem híbrida LASER-Arco [1].

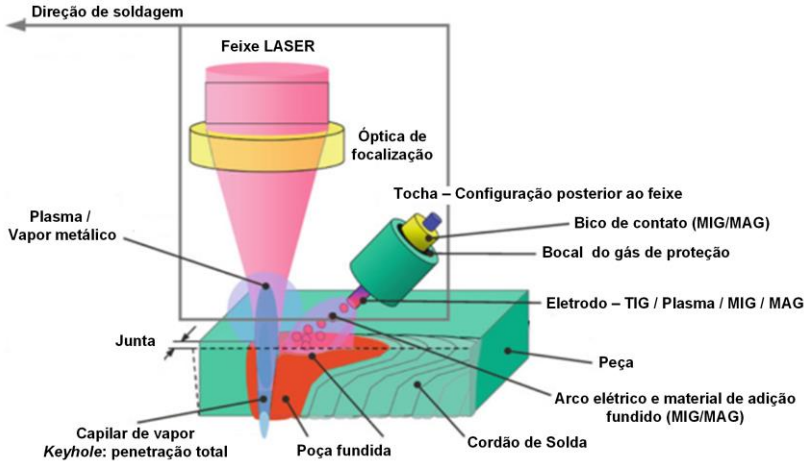


Figura 2.6 – Princípio do processo de soldagem híbrida LASER-Arco (Adaptado de [1])

Na união dos processos, uma quantidade significativa de novos parâmetros variáveis de entrada deve ser controlada. Isto permite um maior controle e flexibilidade do processo, adequando-o às condições do material, do projeto e de manufatura. Além disto, esta combinação permite aumentar ainda mais as velocidades de processo a ponto de se obter, aproximadamente, a soma das velocidades de ambos os processos individualmente [1].

As exigências na preparação da junta a ser soldada na soldagem híbrida são menores que na soldagem só com o LASER, onde as duas partes justapostas não devem apresentar nenhuma folga, uma vez que não há adição de material (quando autógena). A adição de material efetuada pelo processo a arco compensa as imperfeições da junta. Além disto, na soldagem híbrida, aumenta-se a profundidade que pode ser soldada, possibilitando processos com penetração completa em apenas uma passagem [1].

Muitos desenvolvimentos têm sido feitos na área de processos de soldagem a LASER, podendo-se destacar: comparações entre resultados obtidos com diferentes fontes de geração do feixe LASER ( $\text{CO}_2$  e Fibra, por exemplo) [15]; análises aprofundadas nas regiões de importância do processo, como as paredes formadas no *keyhole* [16]; definição de parâmetros para soldagem de ligas de materiais, como titânio [17] e superligas de níquel (Inconel 617 e 718, por exemplo) [15]; desenvolvimento de soldagem de materiais dissimilares (como aço e alumínio) [18]. Pesquisas,

muito recentes, mostram a união de um material metálico e um termoplástico, utilizando LASER pulsado em nanosegundos (ns) [14].

De acordo com as pesquisas realizadas na literatura mundial, tendo em vista as principais características e variáveis do processo, pôde-se observar alguns parâmetros típicos relacionados ao processo de soldagem a LASER, não híbrida. A Tabela 2.2 apresenta estas características [1], [2], [11], [15], [16], [17], [18], [19].

Tabela 2.2 – Faixas de valores e parâmetros típicos do processo de soldagem LASER não híbrida.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores típicos</b>	<b>Unidade</b>
Velocidade de avanço	1000 - 10000	mm/min
Potência do LASER Fibra	1000 - 8000	W
Gás de proteção	Ar, He, Misturas	-
Vazão do gás	3 - 20	l/min
Diâmetro fibra	100, 200, 400, 300, 600	µm

Além destes parâmetros, com frequência são encontradas na literatura alterações no ângulo de incidência do feixe LASER e o deslocamento do ponto focal em relação à superfície da peça soldada. Em processos de soldagem híbrida LASER-MIG/MAG ainda são variados os parâmetros do processo de soldagem a arco puro como tensão, corrente velocidade de alimentação do arame, e o ângulo resultante entre o eixo do feixe do LASER e do arame do processo MIG/MAG [8].

#### 2.1.2.2 LASER *Cladding* – Revestimento

A manufatura aditiva tem motivado e impulsionado uma série de desenvolvimentos e pesquisas, e causado uma verdadeira revolução na área de processos de fabricação. Componentes que outrora eram de difícil, ou por vezes, impossível fabricação, hoje são possíveis de serem fabricados utilizando algum processo que tenha como princípio a manufatura aditiva. Sem dúvida, um dos principais fatores para a utilização desta tecnologia foi a popularização e acessibilidade de *softwares* da cadeia CAD / CAM.

A Tecnologia LASER começou a ser utilizada no campo da manufatura aditiva no ano de 1986, com um processo denominado Estereolitografia, desenvolvido por Chuck Hull, em que era usado um LASER UV (ultravioleta) e um foto-polímero no estado líquido, o qual era varrido pelo feixe LASER e curado nas regiões atingidas por este [2]. O termo

Impressão 3D se popularizou com a manufatura aditiva. No entanto, nem toda manufatura aditiva é uma impressão 3D.

Uma tecnologia aditiva de bastante interesse é a deposição de metais por LASER (*LASER Metal Deposition - LMD*), que em algumas situações também é denominada de *LASER cladding*<sup>6</sup>. A principal função deste processo é depositar finas camadas, com objetivo de conferir propriedades específicas ao material de base ou de recuperar componentes com danificações nas superfícies, usando materiais com propriedades mecânicas iguais ou superiores ao material de base do componente. Esta tecnologia possui uma série de vantagens. Entre elas, destacam-se [1], [20], [21]:

- a) interação metalúrgica entre o material de adição e o substrato;
- b) baixa porosidade e defeitos metalúrgicos;
- c) camadas finas, entre 0,1mm e 1,5mm;
- d) mínima deformação térmica da peça;
- e) permite a utilização de diversas ligas e materiais;
- f) baixa diluição;

O processo se caracteriza pela adição e fusão de um material metálico em forma de pó sobre um substrato. A Figura 2.7 ilustra esquematicamente o princípio de funcionamento do processo.

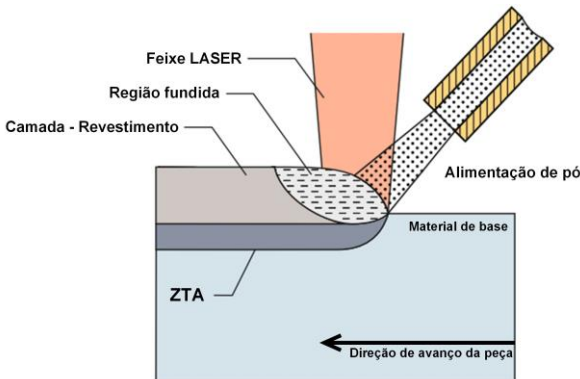


Figura 2.7 – Princípio do processo de *cladding* (Adaptado de [1])

<sup>6</sup> Uma possível tradução da palavra *cladding* para a língua portuguesa é a palavra *revestimento*. No entanto, *cladding* tem um entendimento mais amplo, abrangendo também todos os processos de revestimento sem fusão do material de base, os de formação de uma liga com o material de base e os de dispersão de elementos de liga não fundidos no material de base (óxidos, nitretos e carbonetos). Durante o texto, foi padronizado o uso do termo em inglês.

A faixa de tamanho de grão do material de adição está entre  $20\ \mu\text{m}$  e  $100\ \mu\text{m}$ . Este pó é alimentado na área de trabalho propulsionado por um gás de transporte, que, na região do processo, também serve como gás de proteção da região fundida. Um modelo de mecanismo utilizados para a alimentação de pó (*powder feeder*) é ilustrado na Figura 2.8.

Neste sistema, o pó colocado em um reservatório (que pode conter acoplado um misturador) cai por gravidade sobre um disco com uma ranhura. A dimensão desta ranhura define a massa de pó que será disponibilizada (g). A taxa de alimentação (g/min) é dada pela rotação deste disco. O pó é aspirado para o interior do tubo de transporte pelo princípio de Venturi, fazendo com que os grãos sejam transportados para a região de trabalho pelo gás. As variáveis que influenciam a taxa de alimentação do pó metálico são a rotação do disco, o diâmetro do disco, a altura e a largura da ranhura e a densidade do material. No entanto a única variável livre no processo de alimentação é a rotação do disco. Um aumento na vazão do gás não influencia na taxa de alimentação, tendo em vista que o disco não pode prover mais material. No entanto, um aumento nesta vazão irá aumentar a velocidade com que os grãos são expelidos na região de trabalho pelo bocal de trabalho, de forma que a vazão de gás também deve ser otimizada para cada aplicação. [2].

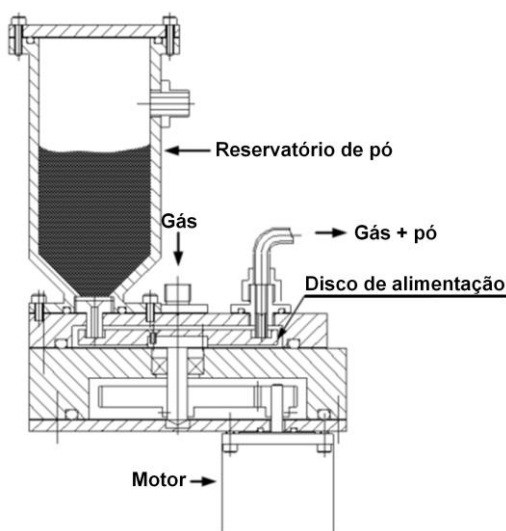


Figura 2.8 – Concepção de *powder feeder* para processo de *cladding* (Adaptado de [2])

O bocal por onde o pó é alimentado na área de trabalho irá disponibilizar o material na região do processo com uma característica bem definida de distribuição dos grãos e posição em relação ao feixe LASER. No mercado, encontram-se vários modelos de bocais. A Figura 2.9 apresenta três concepções distintas de bocais e a forma do fluxo de pó respectiva a cada um. O bocal injetor de pó (a) aplica o pó pela lateral do eixo do LASER, em um ângulo e distância pré-estabelecidos para a região de trabalho. Este bocal não é adequado para trabalhar em processos 3D ou 2D com sentido e direção de movimentação variáveis. Nos bocais injetores de pó coaxial descontínuo (b) e coaxial contínuo (c), o pó é expelido de forma coaxial e convergente ao feixe LASER, sendo formado um feixe cônico de pó para a região focal. Ambos bocais podem trabalhar com LASER *cladding* em 3D [1]. Os bocais coaxiais permitem ajustar a posição do foco do pó e do LASER, objetivando a otimização da deposição. Em geral, ambos pontos focais são posicionados coincidentemente sobre a superfície de trabalho [21][22].

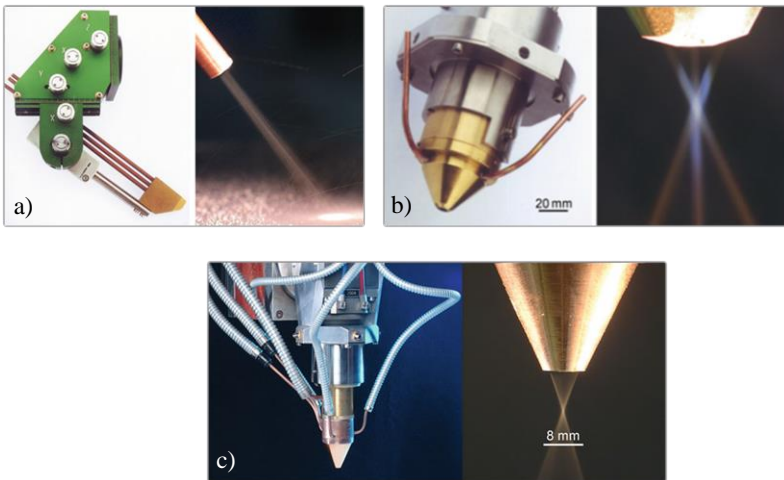


Figura 2.9 – Imagens dos diferentes tipos de bocais de *cladding* e seus respectivos feixes de pó (Adaptado de [1])

A Tabela 2.3 apresenta os principais e mais importantes parâmetros e suas faixas de valores, aplicados em processos de LASER *cladding*.

Tabela 2.3 – Parâmetros importantes no processo de *cladding* (Adaptado de [1])

Parâmetro	Valores típicos	Unidades
Potência LASER	200 – 4000	W
Diâmetro do feixe LASER	0,6 – 8	mm
Velocidade	200 - 2000	mm/min
Taxa de alimentação do pó	0,5 - 30	g/min
Tipo de gás	He e Ar	-
Vazão do gás	2 – 15	l/min

As principais aplicações do LASER *cladding* tem como objetivo a proteção contra corrosão e desgastes de peças utilizadas em condições severas e a reparação de componentes de alto valor agregado que sofreram algum tipo de desgaste [1], [20], [21]. A restauração de pás de turbinas por LASER *cladding* é uma das aplicações que mais se destaca [23]. Também é utilizado na recuperação de grandes eixos que sofreram desgaste e na readequação geométrica de moldes de injeção. A geometria final pode ser obtida, posteriormente, por processos de usinagem [1].

### 2.1.2.3 Tratamento Térmico com LASER

O LASER tem se mostrado uma boa fonte de calor na obtenção de tratamentos térmicos, como a têmpera localizada. No processo de têmpera a LASER, a região de interesse é aquecida acima da temperatura de austenitização e, devido ao rápido autorresfriamento por condução de calor para as regiões vizinhas, a região aquecida endurece, obtendo-se características de resistência ao desgaste em superfícies de peças e ferramentas feitas, em geral, de aço e ferro fundido. A principal vantagem do processo de têmpera utilizando o LASER em relação aos demais métodos de tratamento térmico é a possibilidade de tratar regiões com áreas muito reduzidas em peças pequenas, grandes e/ou de geometrias complexas, sem causar grandes distorções geométricas, o que é uma limitação dos outros métodos. [1].

O tratamento térmico a LASER não precisa, na maioria das vezes, de um meio externo de resfriamento. Devido à condutividade térmica dos metais e ao curto tempo que o feixe incide sobre a peça, apenas uma pequena região é aquecida. Após o aquecimento, o calor se dissipa por condução térmica ao restante da massa da peça, com velocidade de resfriamento acima da velocidade crítica. Como a quantidade total de energia no processo é muito pequena, o aquecimento do componente pela distribuição do calor não é significativo. As principais vantagens da têmpera a LASER são [1]:

- a) mínima distorção nas peças processadas;
- b) possibilidade de trabalhar de forma localizada;
- c) geralmente, não necessita de resfriamento externo;
- d) facilmente integrável em um processo de manufatura automatizado;
- e) permite um controle e monitoramento do processo.

A parte superior da Figura 2.10 ilustra o princípio do processo de têmpera a LASER e as características das principais zonas formadas na superfície da peça processada. A parte inferior da figura mostra o gráfico contendo informações sobre o Tempo – Temperatura – Transformação (TTT) envolvidos no processo. A peça se movimenta com velocidade  $V_H$ . Na região 1, devido ao aumento da temperatura, ocorre a formação de austenita. Esta região permanece acima da temperatura de austenitização  $A_{c3}$  por um tempo, garantindo a transformação da microestrutura. O resfriamento ocorre unicamente por condução térmica. Durante o resfriamento, quando a temperatura atinge o valor  $M_s$ , é iniciada a formação de martensita, até que a temperatura  $M_f$  seja atingida (região 2). Finalmente, é na região 3 onde o material se apresenta de forma temperada. Regiões com menor gradiente de temperatura, não sofrem transformação martensítica, mas podem sofrer outros tipos de alterações microestruturais, dependendo das temperaturas atingidas e dos tempos de resfriamento.



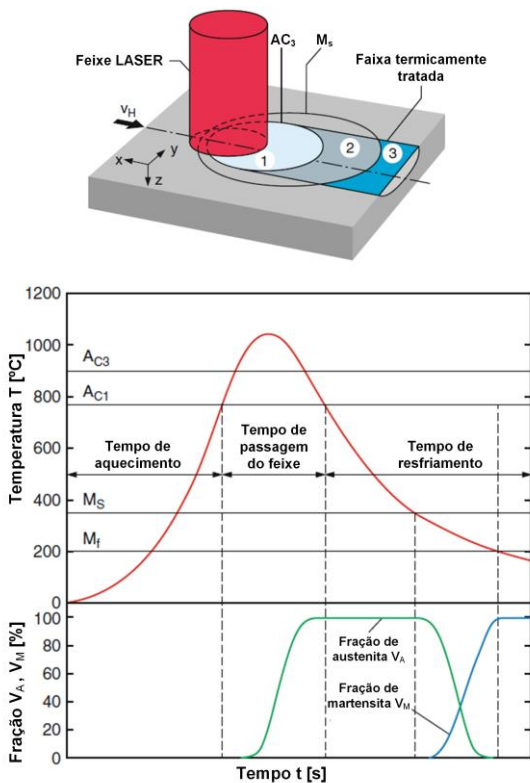


Figura 2.10 – Princípio do processo de têmpera a LASER e ciclos térmicos de alteração microestrutural (Adaptado de [1])

A Tabela 2.4 apresenta alguns valores referentes ao processo de têmpera a LASER.

Tabela 2.4 – Principais parâmetros e valores no processo de têmpera a LASER (Adaptado de [1])

Parâmetros	Valores	Unidades
Potência do LASER	100 - 5000	W
Seção do feixe	1 (1 x 1) – 500 (100 x 5)	mm <sup>2</sup>
Densidade de Energia	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^4$	W/cm <sup>2</sup>
Penetração da têmpera	0,1 - 2	mm
Largura da têmpera	$l \geq L \geq 100$	mm
Velocidade do Processo	0,1 - 4	m/min

### 2.1.3 Segurança em sistemas LASER

Um aspecto que deve ser considerado no projeto e implementação de sistemas que utilizem LASER é a segurança, tanto dos operadores e pessoas no entorno do equipamento, quanto do próprio sistema e de seu local de instalação. Operações com LASER, especialmente quando de elevada potência, podem oferecer riscos aos operadores ou pessoas próximas, podendo gerar sequelas irreversíveis.

Embora ainda não haja normas específicas da ABNT para a implementação de sistemas LASER de elevada potência, já se encontram recomendações e normas internacionais sobre aspectos de segurança em salas que possuam equipamentos LASER. Altos níveis de radiação, assim como a liberação de gases tóxicos oriundos do processo são comuns nos processos LASER relacionados a manufatura. Os riscos gerados por tais fatores podem ser consideravelmente minimizados, caso sejam tomadas as devidas medidas preventivas, com objetivo principal de garantir a integridade, especialmente, do operador.

O Brasil ainda não possui normas específicas relacionadas a ambientes que operem LASERs de alta potência para processos de manufatura. Apenas se encontram normas que regulamentam a operação de LASERs relacionados a procedimentos médicos e estéticos. Com base nisto, esta Seção se baseou em normas internacionais, especialmente a americana ANSI Z136.

#### 2.1.3.1 Classificação dos LASERs.

O primeiro fator que deve ser observado, relacionado à segurança destes sistemas, são os riscos específicos que o feixe LASER pode oferecer, especialmente ao operador e pessoas próximas ao processo. No entanto, estes riscos variam, de acordo com as características da luz LASER, como o comprimento de onda e a potência. De acordo com a norma ANSI Z136, os LASERs são classificados de acordo com a potência e os riscos oferecidos a pele e aos olhos, totalizando 5 classes. São elas [24]:

- a) classe 1 e 1M: LASERs que possam produzir radiação visível ou invisível. Sob todas as condições normais de operação, são considerados incapazes de causar lesão por contato direto com o feixe [24];
- b) classe 2 e 2M: LASERs que produzem radiação visível de baixa potência, não podendo exceder  $1 \times 10^{-3}$  W. A proteção dos olhos normalmente é feita naturalmente pelo piscar de olhos. Porém, a incidência direta nos olhos é proibida por esta norma [24];

- c) classe 3: LASERs que emitem moderado nível de radiação visível ou invisível e requerem um controle mais rigoroso que as Classes 1 e 2. A Classe 3 abrange feixes com potência entre  $1 \times 10^{-3}$  e  $5 \times 10^{-3}$  W. Não é recomendado que operações sejam feitas a olho nu e nem com auxiliares ópticos, como binóculos, podendo causar lesões na retina. LASERs desta classe abrangem todo o espectro de radiação, desde o ultravioleta ao infravermelho, no qual os extremos não são percebidos a olho nu [24];
- d) classe 3B: LASERs que produzem radiação visível e invisível, com potência entre  $5 \times 10^{-3}$  e  $500 \times 10^{-3}$  W, considerados de potência média, e capazes de produzir lesões quando dirigidos diretamente aos olhos. LASERs desta Classe podem produzir reflexões perigosas, mas normalmente não produzem reflexões difusas críticas e não oferecem risco de incêndio [24];
- e) classe 4: LASERs que emitem radiação visível e invisível, capazes de causar lesões aos olhos e à pele. Produzem reflexão direta e difusa e oferecem risco de incêndio. Pertencem a Classe 4 LASERs com potência média maior que 0,5 W [24].

#### 2.1.3.2 Critérios de Segurança

Dependendo do processo realizado, da natureza do feixe LASER e sua respectiva potência, podem haver diferentes riscos relacionados às operações de equipamentos LASER. Desta forma, deve-se avaliar todos os riscos associados ao processo para que seja possível tomar as corretas medidas de controle necessárias, de forma que a integridade, tanto das pessoas (operador e pessoas do entorno do equipamento) como do próprio equipamento e seu ambiente de operação, sejam mantidas. Devem ser considerados aspectos como [25], [26]:

- a) a capacidade do LASER ou sistema causarem lesão cutânea e/ou ocular [25], [26];
- b) efeitos gerados durante o processo, causadas pela interação entre o feixe LASER e o material (oxidação rápida, radiação ionizada, geração de gás contaminado) [25], [26];
- c) a característica de acesso de pessoas ao local de realização do processo (irrestrito, restrito, controlado ou inacessível) [25], [26];
- d) possibilidade de exposição de pessoas à radiação da luz LASER [25] [26].

Um dos aspectos considerados pela norma ANSI Z136 para avaliação dos riscos associados a operação de um LASER é a localização do sistema, relacionado ao nível de acesso oferecido às pessoas. O tipo de restrição ao ambiente de execução do processo (ou operação com LASER) pode ser considerada uma medida adicional, que deve ser observada com atenção quando o sistema é projetado. A norma apresenta os seguintes tipos de acesso ao ambiente de operação [26];

- a) Irrestrita: o acesso não é limitado e o uso de EPIs - Equipamentos de Proteção Individual - não é obrigatório [26];
- b) Restrita: o acesso é limitado, há riscos de radiação e o uso de EPIs apropriados é obrigatório. É preciso haver sinais de aviso e procedimentos de segurança para operações. Itens de controle de acesso a área do processo, tais como portas bloqueáveis, barreiras e cortinas, são adotados, com intuito de minimizar a exposição à radiação. Geralmente aplicado à Classe 3B ou superior [26];
- c) Controlada: o acesso, a permanência e a realização de atividades na área do processo ficam estritamente sujeitos ao controle e supervisão. Os itens de controle citados na alínea b) também se aplicam neste caso. Geralmente aplicado à Classe 4 [26];
- d) Excluída: a entrada no ambiente de realização do processo é permitida, mas é absolutamente negada a permanência neste durante a emissão do feixe LASER [26];
- e) Inacessível: não é possível acessar o local do processo devido às pequenas dimensões [26];

O enclausuramento do equipamento LASER, assim como a remoção de janelas de visualização e o extremo cuidado na realização de operações, como controle de acesso, são métodos de controle que têm por objetivo minimizar os riscos oferecidos ao operador. Se estes métodos de controle forem impraticáveis ou inadequados, controles administrativos e processuais devem ser aplicados, assim como o uso EPIs [26].

Um dos riscos mais severos oferecidos às pessoas durante a execução de processos LASER está associado à incidência do feixe, ou de suas reflexões, nos olhos. Neste sentido, o EPI mais utilizado são os óculos de proteção específicos para o comprimento de onda do LASER. Os danos causados pela incidência de um feixe LASER aos olhos podem ser irreversíveis e dependem das características do feixe, especialmente do comprimento de onda. A Figura 2.11 ilustra as diferentes regiões do olho humano que podem ser afetadas, de acordo com o comprimento de onda da luz LASER [27].

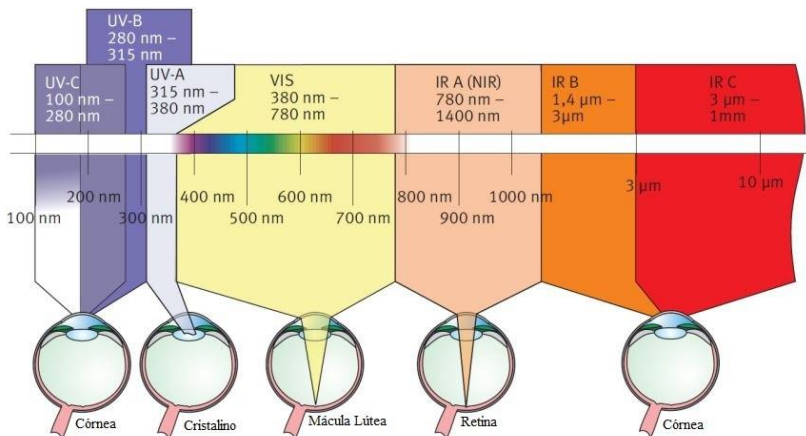


Figura 2.11 – Áreas do olho afetadas pelos diferentes comprimentos de onda (Adaptado de [27])

Os óculos de proteção para operações com LASER são desenvolvidos, especificamente, para as Classes 3B e 4. Os óculos possuem forma de proteção específica, de acordo com o comprimento de onda do feixe, de sua respectiva potência e do tempo de exposição, com objetivo de eliminar o potencial excesso de exposição à radiação, respeitando a Exposição Máxima Permitida (MPE - *Maximum Permissible Exposure*). Para LASERs pertencentes às Classes 1M, 2, 2M e 3, não é obrigatório o uso de óculos de proteção, salvo em operações especiais [26][27].

Os efeitos da radiação sobre a pele ficaram, por muito tempo, em segundo plano, quando tratava-se segurança em operações com LASERs. No entanto, com o aumento da utilização de LASERs UV (espectro de onda ultravioleta) e de LASERs de elevada potência, os efeitos destas radiações sobre a pele começaram a ganhar maior importância [28].

Devido a significativa capacidade de dispersão da radiação UV (até por moléculas de ar), a exposição a este tipo de radiação não se restringe a incidência de feixes diretos ou radiações difusas, mas a todo o ambiente de aplicação. Nestes casos, caso haja a permanência no ambiente de operação, é recomendado o uso de proteções adequadas, tais como luvas, fabricadas em tecidos herméticos e opacos. Câncer de pele e envelhecimento acelerado da pele são possíveis consequências para exposições a radiações nos espectros de 280nm a 400nm (UV). Radiações com comprimentos de onda entre 700nm e 10.000nm, podem causar queimaduras e ressecamento da pele, em casos em que haja exposição excessiva ou a potência seja demasiadamente elevada [27].

Informações e placas de segurança, como avisos de possível exposição à radiação, orientando a utilização de óculos de proteção, devem ser fixadas em locais visíveis, determinando as áreas de risco. Estas placas informativas devem seguir a normal ANSI Z136.7, seção 5 [25]. Outros equipamentos como, respiradores, exaustores industriais (para extração de fumos do processo) e extintores de incêndio, podem ser utilizados para minimização de riscos[25].

## 2.2 Tecnologia de Comando Numérico Computadorizado

O Comando Numérico Computadorizado (CNC) pode ser considerado um dos grandes avanços tecnológicos que alavancaram e revolucionaram o cenário industrial no século XX e XXI. Esta seção tem por objetivo trazer uma breve revisão da bibliografia técnica, com o intuito de introduzir o conceito de CNC.

### 2.2.1 Caracterização de um CNC

O conceito de CNC pode ser definido como: sistema baseado em eletrônica e em *software*, responsável por receber um “programa” formado por letras, números e caracteres especiais, decodificá-lo, transformando as informações em sinais elétricos capazes de comandar um sistema eletroeletrônico de acionamento com objetivo de transmitir movimento para um sistema mecânico de uma máquina, resultando em posições, velocidades e acelerações controladas em diversos eixos, simultaneamente ou não. Além disto, é responsável pelo acionamento de dispositivos periféricos concernentes à máquina comandada [29], [30], [31], [32]. A Figura 2.12 ilustra de forma esquemática os sistemas envolvidos em um comando CNC e o respectivo fluxo de informações e sinais.

Um programa é inserido ou feito na própria máquina por meio de uma Interface Humano-Máquina – IHM, que também possui botões de comando que permitem gerar ações específicas no sistema comandado. Este programa é interpretado pelo decodificador de código G, o interpretador, responsável por interpretar os códigos relacionados à movimentação e transmiti-los diretamente ao interpolador. No interpolador, as informações são transformadas em grandezas de movimento, sendo convertidas em sinais elétricos que informarão ao sistema de controle a posição e a velocidade dos eixos que compõem a máquina, os quais podem ser movimentados individual ou simultaneamente (interpolados). Os dados não relacionados à movimentação que o programa contém são decodificados e transmitidos ao processador do Controlador Lógico Programável – CLP

que, utilizando a lógica do programa nele contido (*firmware*), gerará as devidas saídas para comandar os dispositivos periféricos da máquina. O sistema de controle fornece os sinais para o sistema eletroeletrônico de acionamento, além de receber a realimentação do sistema de posicionamento, fazendo as devidas correções desta grandeza. A velocidade é controlada no próprio sistema de acionamento (*drive*). Sinais referentes aos sensores (ou chaves) de fim de curso e *home* podem ser enviados ao CLP para tomadas de decisão, baseadas na lógica do seu *firmware* [30], [29], [33].

Esta não é uma configuração rígida, em que variações não são permitidas. Por exemplo, a malha de controle de velocidade que, na Figura 2.12, está inserida no *drive* do sistema de acionamento, poderia estar localizada no controlador do CNC, assim como a posição poderia ser controlada diretamente pelo *drive* de acionamento dos motores, sem descaracterizá-lo como comando numérico. Poderia ainda haver uma terceira malha de controle, responsável por controlar a corrente dos motores (comumente relacionada ao torque), localizada tanto no *drive* como no próprio CNC.

Observa-se que alguns componentes são essenciais a um comando numérico. Para um melhor entendimento de cada um destes elementos, explicá-los de forma mais detalhada é essencial. Para isto, uma breve explanação das principais funções e processos internos de cada um destes elementos “chave” serão dadas a seguir [29].

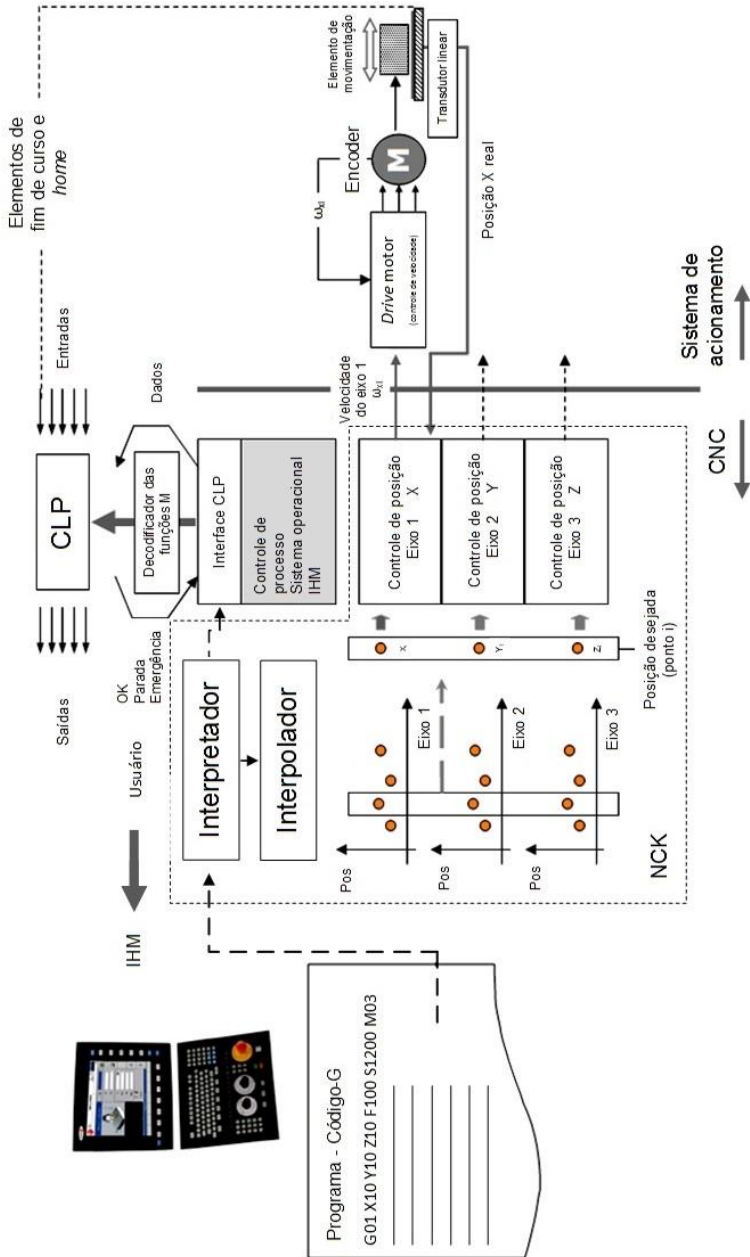


Figura 2.12 – Sistemas e fluxo de informações de um CNC (adaptado de [30])



### 2.2.1.2 IHM – Interface Humano-Máquina

A interface Humano-Máquina, popularmente denominada de IHM, tem algumas funções e características que a tornam essencial a um sistema de comando numérico. O próprio nome já deixa explícita a principal função atribuída a este componente: *interfacear* a interação entre usuário-máquina e máquina-usuário. Geralmente, é composta por uma tela, botões diversos para comando da máquina e teclado alfanumérico para digitação das linhas de programa.

Na tela de uma IHM, é possível verificar o *status* atual da máquina durante a execução do processo, como por exemplo: velocidade e posição atual dos eixos, rotação do eixo árvore, o bloco do programa que está em execução no momento, dentre outras informações, dependendo do processo que está em execução e das configurações atribuídas pelo fabricante da máquina ou pelo usuário desta. Também importantes são os alarmes que são exibidos na tela. Estes alarmes, podem ou não, serem responsáveis pela execução de alguma tarefa e são gerenciados pelo CLP, de acordo com a lógica definida em seu *firmware*. Estas são denominadas Funções de Monitoramento e Alarme. Na maior parte das vezes a IHM pode ser adaptada de acordo com o processo que é executado na máquina e conforme as necessidades e preferências do usuário [30]. A configuração destas telas de trabalho, em geral, está sobre o domínio do fabricante da máquina.

Alguns comandos principais em máquinas CNC, tais como MDI, JOG, OVERRIDE, FEEDRATE, dentre outros, são acessados pela IHM. É também função da IHM permitir a administração de ferramentas (em máquinas com trocador automático de ferramentas, como centros de usinagem CNC) e a administração de programas de peças. Estas funções citadas podem ser consideradas como Funções Operacionais da IHM [29].

A configuração de um CNC é realizada em janelas específicas, visualizadas e configuradas pela IHM, disponibilizadas pelo fabricante do comando para parametrização do equipamento. Há ainda comandos CNC absolutamente genéricos, que podem ser utilizados nos mais diversos processos, nos quais o fabricante da máquina tem uma grande liberdade de configurações. Em contrapartida, a complexidade de *Start-up* de um comando destes é consideravelmente maior que a de comandos dedicados a um processo específico. Esta função da IHM é denominada de Configuração de Parâmetros de Máquina [29].

Também é função da IHM possibilitar a inserção e a alteração de programas de peça, os quais serão explicados com mais detalhes em outra

seção deste capítulo. As IHMs, em geral, possuem um teclado alfanumérico contendo todos os caracteres necessários para inserir e/ou alterar um programa do CNC. Esta função é denominada de Programação e Edição.

A Figura 2.13 ilustra 3 exemplos de IHMs, de diferentes fabricantes, sendo estes: Fagor modelo 8070 (a) [34], Siemens modelo SINUMERIK 840D (b) [35] e Fanuc modelo 30i (c) [36]. Cada fabricante pode possuir uma diversidade de modelos de IHM. As ilustradas na Figura 2.13 estão, atualmente, entre as mais avançadas de cada fabricante.



Figura 2.13 – Modelos de IHM em diferentes fabricantes (Adaptado de [34], [35], [36])

### 2.2.1.3 NCK – *Numerical Control Kernel*

O NCK – *Numerical Control Kernel* (Núcleo de Comando Numérico) é, sem dúvida, o elemento mais importante em um CNC. Ele é responsável por interpretar os dados de entrada a partir de um programa inserido na IHM, fazer os cálculos matemáticos necessários para a interpolação dos eixos, gerando assim os sinais de comando para o sistema de acionamento [29].

O programa de peça que a máquina recebe é composto por letras, algarismos e caracteres especiais. Para que o sistema de acionamento seja comandado, é necessário que este programa seja interpretado, fornecendo ao interpolador informações inteligíveis. Estas funções são atribuídas a um elemento denominado Interpretador. As informações interpretadas são armazenadas durante o processo, em uma memória interna da NCK para a posterior leitura pelo interpolador. Um *Buffer* de dados é usado neste sistema com intuito de manter abastecido o interpolador com infor-

mações interpretadas, impedindo que o interpolador fique ocioso em casos em que o tempo de interpretação seja maior que o tempo de interpolação [29].

Um comando CNC instalado em uma máquina tem como um dos seus principais objetivos promover a movimentação dos eixos (lineares e rotativos) de forma individual ou conjunta. Estes dados de movimentação são oriundos do Interpretador. Por exemplo, para fazer o perfil de um círculo com raio  $R$ , é necessário que dois eixos se movimentem simultaneamente de forma controlada para que não haja desvios na geometria programada. Ou seja, os dois eixos são interpolados, de forma que, ao movimentarem-se, formem um perfil circular. Esta função é cumprida pelo componente da NCK denominado Interpolador. É um dos grandes responsáveis pela exatidão de um sistema CNC. O interpolador possui um funcionamento bastante complexo e não é objetivo deste texto aprofundar a abordagem nas características internas do componente, mas sim apresentar e explicar quais suas funções em um comando numérico.

#### 2.2.1.4 CLP – Controlador Lógico Programável

O CLP – Controlador Lógico Programável (termo originado do inglês: *Programmable Logic Controller* – PLC) é um componente de automação amplamente utilizado nos meios industriais. Seu uso não se restringe à tecnologia CNC. É utilizado na automação de sistemas, especialmente no controle e comando de sequências lógicas relacionadas à operação de máquinas e linhas de produção. É um dispositivo composto por componentes eletrônicos, dentre os quais, destacam-se o microprocessador e a memória, capaz de realizar funções de lógica, temporizar, contar e realizar operações matemáticas, a partir do acionamento de suas entradas (*I – Inputs*), fazendo com que as suas saídas (*O – Outputs*) mudem o seu estado em níveis lógicos (digital) ou de forma analógica [29].

No passado, todas as lógicas necessárias em equipamentos eram somente supridas pela composição de sistemas contendo uma série de relés, temporizadores, contadores, todos ligados fisicamente por cabecamentos, complicados para realização de manutenções e eventuais modificações de lógica de funcionamento. O CLP possui a grande vantagem de ser um controlador lógico baseado em *software*, ou seja, o acionamento das saídas é baseado no estado das entradas e do processamento do *firmware* interno no CLP, o qual é inserido pelo programador em uma linguagem específica para o dispositivo. São 4 as linguagens estabelecidas pela IEC61131-3: Texto Estruturado (ST), Diagrama Função Bloco (FBD),

Diagrama Ladder (LD) e Lista de Instrução (IL). A decisão pela linguagem pode ser feita pelo fabricante do CLP ou pelo programador (quando o dispositivo oferece flexibilidade na escolha da linguagem). A mais difundida atualmente é o Ladder [29].

Em um sistema CNC, o CLP é o responsável por comandar todos os itens periféricos da máquina. Os comandos podem ser oriundos da IHM, de componentes periféricos da máquina e até mesmo do próprio código de operação inserido no comando numérico, como será abordado na seção 2.2.2. Um CLP usado em um sistema CNC tem algumas peculiaridades em relação aos CLPs comerciais, disponíveis no mercado. Há uma necessidade de comunicação dedicada com a NCK do comando numérico, devido ao rápido fluxo de informações que são transmitidas entre estes dois componentes [29]. Por isto, é comum que o processador do CLP esteja interno fisicamente, na unidade de comando numérico, onde o usuário não a visualiza e, para utilização de suas entradas e saídas, necessita de módulos de expansão dotados com os componentes de interface e isolamento geralmente presentes em I/Os de CLPs.

A presença do CLP em um CNC é o que o torna versátil, reconfigurável e modular, permitindo que um mesmo comando seja aplicável a diferentes tipos de máquinas para os mais diversos processos de fabricação, além de possibilitar o comando de itens periféricos da máquina antes, durante e depois da movimentação dos eixos.

### 2.2.2 Programas em sistemas CNC

Conforme o que foi caracterizado na seção 2.2.1, um sistema CNC funciona através do recebimento de um programa. Este programa possui uma linguagem codificada, que pode ser diversa de acordo com o desenvolvedor do sistema CNC. Um padrão, mundialmente conhecido e normatizado, denominado Código-G, padronizado pela norma ISO 1056. Com isto, é possível gerar um programa em Código-G que contenha todas as ações que a máquina deve realizar na execução de um processo, tais como posições dos eixos, velocidades de avanço dos eixos, velocidade de rotação da árvore (no caso de máquinas ferramenta de usinagem), momento em que um dispositivo periférico, como bomba de fluido de corte, deve ser ligada ou desligada, dentre outras características que, possibilitarão obter a execução de um processo de fabricação diverso na máquina em questão [29] [31].

Um programa<sup>7</sup> consiste em uma sequência de blocos, em que cada bloco é composto por uma série de *words*, que são compostas por um endereço e por um valor. Uma *word* é a menor unidade de comando capaz de realizar alguma ação na máquina. A Figura 2.14 ilustra uma *word* e seus respectivos componentes. O endereço é constituído por um carácter alfabético (A-Z) ou a combinação destes, enquanto o valor é um número, que é a informação requerida para definir qual será o comportamento do endereço relacionado [29].

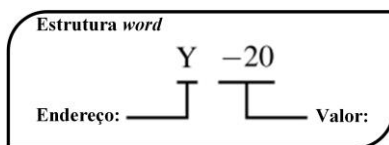


Figura 2.14 - Estrutura de uma *word* em Código-G (Adaptado de [29])

Os endereços “G” são relacionados à movimentação das coordenadas da máquina, tanto dos eixos lineares como dos rotativos e têm, em grande parte, relação com o sistema de coordenadas do equipamento. Os endereços “M” são relacionados às funções denominadas miscelâneas, que se caracterizam por serem funções que auxiliam a execução do processo. As Funções-M são essenciais para o funcionamento da máquina e são as principais responsáveis por permitir que um comando CNC seja genérico e aplicável a qualquer processo que necessite de movimentações relativas e interpoladas entre eixos [30], [29], [31].

O Interpretador, conforme citado na Subseção 2.2.1.3, tem a função de interpretar o programa inserido na máquina. Isto significa que ele deve interpretar e reconhecer os vários endereços e algarismos presentes no programa, de forma que estes sejam traduzidos em uma linguagem legível aos módulos posteriores ao Interpretador. As Funções-G, responsáveis pelas movimentações dos eixos, são relacionadas ao Interpolador, para que este execute os cálculos relacionados à cinemática da máquina e forneça os dados necessários para controle de posição, aceleração, desaceleração e velocidade dos sistemas de movimentação. No entanto, as Funções-M são relacionadas ao CLP do CNC. Este fluxo de dados é mostrado na Figura 2.12 [30], [29].

<sup>7</sup> É comum encontrar na literatura a denominação em inglês *part program*, que seria traduzido como “programa de peça”, pois em geral um programa se refere à fabricação de uma peça. No entanto, neste texto, será padronizada o termo “programa” para se referir ao programa que é inserido no comando CNC.

Uma máquina, para executar um processo, necessita de uma série de componentes periféricos essenciais a sua concepção, que precisam ser comandados/controlados. Este comando/controle deve ser realizado pelo próprio sistema CNC, caso contrário não há uma verdadeira integração no equipamento. Portanto, esta é a principal finalidade das Funções-M, permitir que o comando numérico, a partir do aparecimento destas funções, possa comandar componentes que não estejam diretamente relacionados à movimentação dos eixos da máquina.

Um exemplo de Função-M em máquinas-ferramenta é alimentação de fluido de corte, geralmente comandado pelas funções M07 (Liga) e M08 (Desliga) [31]. O fluido de corte é fornecido por uma bomba elétrica e o comando desta bomba é considerado um tipo *on/off*, ou seja, ela precisa de um sinal para ligar e de outro (ou da falta do sinal de *on*) para desligar. Quando o Interpretador localiza uma função M8, por exemplo, uma informação é enviada ao CLP, que identifica, a partir da lógica do *firmware* nele inserido, que a bomba precisa ser ligada, fazendo com que uma saída do *hardware* do CLP mude de estado (nível lógico alto, por exemplo), de forma que a bomba identifique esta mudança de estado como comando para que seja ligada.

### 2.2.3 CNC aplicado a máquinas LASER

Para compor uma máquina CNC, tratando-se de qualquer processo de fabricação, é necessário que haja um sistema mecânico de movimentação (de “n” eixos), acionado por motores, rotativos ou lineares, permitindo a movimentação relativa entre o efetuator final do processo e a peça a ser trabalhada. No entanto, para que de fato se tenha um comando e controle do processo como um todo, é necessário que os efetutores finais, ou os dispositivos que os acionam, também sejam comandados e/ou controlados [1].

Em máquinas LASER numericamente comandadas, independentemente do processo (corte, soldagem, revestimento, gravação, usinagem), haverá a fonte LASER que deverá ser devidamente comandada e até mesmo controlada pelo sistema CNC. Nestes equipamentos, o programa contém informações relacionadas à óptica, exaustão, alimentação de gases de processo, *crossjet* (soldagem), alimentação de material, além, é claro, das coordenadas de movimentação relativa entre o feixe LASER e a peça trabalhada. Ou seja, o comando numérico é a maior instância de comando/controle da máquina, fornecendo a todos os dispositivos que a compõem, informações de controle baseadas nos parâmetros de programa

e, por vezes, nos dados recebidos dos sistemas de realimentação, formando, quando necessário, sistemas em malha-fechada com os equipamentos periféricos [1].

Quando relacionado especificamente à fonte LASER, a quantidade de parâmetros pode ser bastante variada, dependendo da natureza desta fonte. Em fontes pulsadas, podem ser determinados os parâmetros de potência, frequência dos pulsos, forma como o pulso se comporta no tempo (formato da onda, disponível em alguns LASERs), o modo de operação, dentre outros. Em fontes que operam apenas no modo CW, ao menos a potência deve ser parametrizada. Em todos os casos, comandos como ligar feixe, ligar *tracer* (*pointer*), habilitar fonte, seleção de canal de saída, além de todos os sinais de segurança, necessários para habilitação da potência da fonte LASER, devem ser comandadas pelo CNC. Este comando pode ser feito utilizando-se de Funções-M inseridas no programa em Código-G ou por meio de botões ou outros dispositivos de acionamento manuais, disponíveis nas interfaces do CNC (IHM), que permitam enviar sinais elétricos de comando para a fonte LASER a partir do CLP do sistema [1], [14], [37].

Além dos sinais de entrada da fonte LASER (*inputs*), responsáveis pelo seu comando, deve-se ter uma estrutura capaz de receber os seus sinais de saída (*outputs*), responsáveis por informar o atual estado da fonte ao sistema de comando e controle. Para isso, são usadas as portas de entrada das *I/Os* do CLP. Desta forma, o CNC tem capacidade de, com base nos sinais de saída da fonte LASER, tomar ações durante o tempo do processo ou até mesmo, impedir que este seja iniciado, caso alguns requisitos necessários à operação não sejam atendidos pela fonte LASER, isto tendo em vista, tanto o controle do processo, como os procedimentos de segurança para operação do sistema. Toda essa lógica é inserida no *firmware* do CLP do CNC.

Um parâmetro muito importante em máquinas a LASER é a distância focal, definida pelo sistema óptico instalado. Para que o foco esteja posicionado de forma coincidente com a superfície da peça a ser trabalhada, ou para que este seja mantido em um *offset*<sup>8</sup> constante em relação a esta, é preciso compensar a distância focal no eixo de movimentação relacionado ao deslocamento do sistema óptico em relação à peça, de

---

<sup>8</sup> Em alguns processos, como o de soldagem híbrida LASER-MIG em chapas de grandes espessuras, o ponto focal pode ser deslocado para o interior da peça, para obtenção de melhores características de formação do *keyhole* [8]. Isso também é observado nos processos de corte a LASER em altas velocidades [1], [61]. Portanto, não é regra que o ponto focal esteja sempre localizado na superfície da peça trabalhada.

forma que o ponto focal se desloque para a região de interesse, de acordo com as especificidades e otimizações do processo.

A manutenção da posição do foco em relação a peça é um fator essencial que influencia diretamente a qualidade do processo. No entanto, as peças podem ter variações naturais de altura, causadas por diversos fatores, como defeitos de fabricação, empenamento da chapa, dentre outros. Portanto, é preciso manter, com adequada exatidão, a distância requerida pelo sistema óptico para que a posição do foco permaneça constante. Para isto, é comum a utilização de transdutores analógicos que indiquem qual a distância do sistema óptico em relação à peça. Estes transdutores podem ser indutivos, capacitivos ou ópticos e fornecem um valor analógico (tensão ou corrente) proporcional à distância entre um determinado ponto do sistema óptico e a peça de trabalho. Este sinal deve ser lido pelo sistema CNC por meio de uma entrada analógica do CLP e, com base na lógica inserida no respectivo *firmware*, a distância relativa deve ser mantida constante (em tempo real) através da movimentação do sistema óptico no sentido de afastá-lo ou aproximá-lo da peça. Este é um exemplo muito comum de componente periférico que, assim como a fonte LASER, deve ser controlado pelo comando numérico [1].

A potência de um LASER de fibra pode ser variada, de um valor mínimo até o valor da potência nominal, ambos restritivos de cada equipamento. Neste caso, um sinal digital não é o suficiente para informar ao equipamento qual a potência que o LASER deve operar em determinado instante do programa, conforme o exemplo da bomba de fluido de corte, supracitado. Para isto, existem endereços específicos que possibilitam inserir um valor que representa uma variável analógica. Um exemplo bastante conhecido de endereço com valor variável é o “F”, relacionado a informação de *feed rate* (taxa de alimentação – velocidade de avanço) dos eixos da máquina. Outro valor variável inserido a partir do programa em Código-G comum a sistemas CNC é a velocidade de rotação do eixo-árvore (para máquinas ferramenta), sendo “S” o endereço responsável por esta variável de processo [29].

Assim, pode-se atribuir um determinado endereço, como por exemplo “H”, para determinar os valores variáveis de potência do feixe LASER. Esta variável é lida pelo CLP e, de acordo com as operações matemáticas e lógicas escritas em seu *firmware*, altera o valor de uma saída analógica de seu *hardware*, que por sua vez é eletricamente conectada a uma entrada analógica do equipamento LASER que, dentro de uma escala definida pelo fabricante, representa qual a potência que o LASER deve operar em dado instante no programa que está sendo executado no CNC.



### 3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Não há uma estimativa de em qual momento no decorrer da história iniciaram-se os estudos específicos sobre metodologias e métodos sistemáticos para o desenvolvimento de projetos. A partir de 1953, na antiga Alemanha Oriental, estão registrados textos específicos sobre esta área de conhecimento. Pode-se dizer que a partir da década de 1970, houve um aumento nos estudos e nos desenvolvimentos de metodologias de projetos de produtos; é possível destacar o trabalho de Pahl & Beitz (*Konstruktionslehre*, 1977)<sup>9</sup> [38], até hoje utilizado e referenciado em materiais acerca do assunto [5], [38].

As decisões tomadas durante o processo de desenvolvimento do projeto têm grande influência quanto ao custo percentual do bem desenvolvido, chegando a patamares superiores a 70%. Apesar disso, o custo do projeto, em si, quando comparado com objetos físicos, como matéria prima, componentes e instalações para produção, é muito pequeno, sendo cerca de 5%. Ou seja, apesar desta atividade representar um custo pequeno, a influência de suas decisões é altíssima, podendo comprometer, de forma bastante significativa, o sucesso do projeto. A Figura 3.1 representa, em forma de gráfico, a influência percentual sobre o custo de um bem (produto), relacionada a 4 itens presentes no seu desenvolvimento: Projeto, Material, Mão-de-Obra e Instalações. [5].

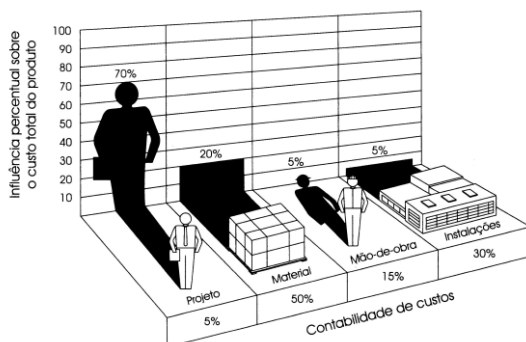


Figura 3.1 – Influências percentuais sobre o custo do produto [5]

<sup>9</sup> O livro *Konstruktionslehre*, escrito em 1977 por Pahl & Beitz já foi traduzido para diversas línguas, dentre elas para a língua portuguesa (Brasil). Atualmente, está na sua 5ª edição em língua alemã e 3ª edição em língua inglesa, a qual será referenciada neste texto. Apesar do texto original não ser atual, é de grande valia para esta área de conhecimento; inspirou e continua inspirando a criação de novas metodologias.

Mesmo que projetos acadêmicos não levem ao desenvolvimento de produtos, pois não é este o seu foco (pode haver exceções), deve-se observar praticamente as mesmas características do desenvolvimento de produtos durante a sua execução, principalmente com relação aos custos e ao tempo de projeto que, por vezes, podem ser muito mais restritivos que os presentes nos meios industriais.

É imprescindível definir, desde o início do desenvolvimento de um projeto, qual modelo de referência será utilizado para direcionar o processo de projeto, auxiliando a sistematizá-lo e sequenciá-lo, servindo como diretriz na definição das fases, atividades e tarefas que deverão ser seguidas e cumpridas. Aqui, usa-se o termo “modelo de referência” pois, em alguns casos uma metodologia se adequa em grande parte, mas não em sua totalidade, fazendo com que essa não seja seguida integralmente, mas que seja um modelo para o desenvolvimento do projeto. Por vezes, não uma, mas várias metodologias, cada uma com sua especificidade, podem ser úteis quando usadas parcialmente, para guiar os passos do desenvolvimento.

No desenvolvimento deste projeto, o PRODIP [5] – Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos – desenvolvido pelo NeDIP – Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos – da UFSC, foi utilizado como metodologia de referência, principalmente no que diz respeito às duas fases iniciais do desenvolvimento (Projeto Informacional e Conceitual). No entanto, outros textos de aplicações e proposições de modelos de metodologias foram essenciais e auxiliaram de forma substancial a resolução e organização dos problemas de projeto.

As metodologias, em geral, têm seu foco voltado ao desenvolvimento de produtos, diferentemente deste trabalho. Portanto, algumas adaptações devem ser feitas, relacionadas ao modelo de metodologia, para que esta se adequa ao desenvolvimento de um projeto acadêmico em um escopo de dissertação de mestrado.

Com base nisto, o objetivo do Capítulo “Metodologia de Desenvolvimento do Projeto” está em abordar as etapas iniciais da metodologia utilizada, compreendendo as fases de Projeto Informacional e Conceitual. Apenas as iniciais pois, considera-se que estas sejam de fundamental importância para o leitor, dando melhor sentido e entendimento aos demais capítulos que compõem o texto.

### 3.1 Projeto Informacional

De acordo com o modelo de referência PRODIP, a fase denominada “Projeto Informacional” é a primeira, do total de 4 fases que compõem a macrofase “Elaboração do Projeto do Produto”, conforme o quadro apresentado no Anexo B. No entanto, esta nomenclatura também é utilizada em outros modelos de referência. O resultado (ou saída) do projeto informacional é de extrema importância para o restante do desenvolvimento do projeto e é denominada “Especificações de Projeto” [5].

Anteriormente à definição das especificações de projeto, é necessário definir o objeto de desenvolvimento, estabelecer e compreender o ciclo de vida do projeto, bem como seus usuários no decorrer deste ciclo de vida, além de estabelecer e identificar quais as restrições presentes no desenvolvimento.

#### 3.1.1 O Objeto de Desenvolvimento

Para atingir, de forma satisfatória os objetivos geral e específicos apresentados nos Subcapítulos 1.2 e 1.3, o objeto de desenvolvimento se trata de um sistema LASER, comandado numericamente por um CNC de modelo industrial, que possua características de modularidade e reconfigurabilidade, capaz de comandar um LASER de elevada potência para processamento de materiais a LASER, especialmente na realização dos processos de soldagem a LASER, LASER *cladding* e tratamento térmico localizado. Além disto, insere-se no desenvolvimento toda a infraestrutura necessária para que tal equipamento seja, de forma segura, instalado e operado no ambiente de desenvolvimento do projeto.

Como aqui inicia a descrição do processo de projeto do equipamento desenvolvido, é importante fazer uma observação a respeito da nomenclatura utilizada. O termo máquina LASER é muito utilizado para descrever equipamentos únicos, contendo uma fonte LASER, que tenha por objetivo realizar um processo específico, como por exemplo “máquina de corte a LASER”, “máquina de gravação a LASER”, “máquina de soldagem a LASER”. No entanto, para este projeto, este termo não é totalmente adequado, tendo em vista que trata de uma composição de diversos módulos e sistemas periféricos, associados a uma fonte LASER, que formam um “Sistema LASER”, capaz de efetuar diversas atividades relacionadas a processos de fabricação com tal tecnologia. Portanto, durante o texto, será utilizado o termo sistema LASER fazendo referência ao objeto de desenvolvimento descrito nesta dissertação.

### 3.1.2 Ciclo de Vida e Usuários do Projeto

As especificações de projeto levam em conta dois fatores importantes para o projeto: definição dos usuários e do ciclo de vida do produto ou equipamento a ser desenvolvido. Cada produto desenvolvido, seja ele de qualquer natureza, possui um ciclo de vida. Este ciclo é iniciado a partir da identificação do problema de projeto e segue, em todas as etapas da vida do produto, até que este seja descartado. A Figura 3.2 apresenta em forma gráfica de uma espiral, algumas etapas do ciclo de vida, comuns a boa parte dos equipamentos industriais comercializados.

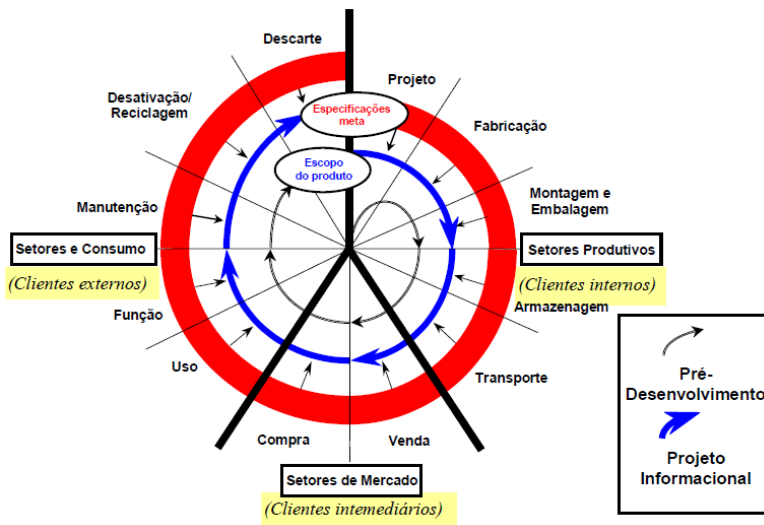


Figura 3.2 – Etapas do ciclo de vida de um produto (Adaptado de [39])

Dependendo da natureza do produto ou projeto desenvolvido, existem variações nas etapas do ciclo de vida. Por exemplo, não faz muito sentido pensar na reciclagem de um *software*, assim como não há lógica em considerar a etapa de manutenção em um componente plástico extremamente barato, feito para ser descartado assim que apresentar falha. Portanto, deve-se ser sensível às peculiaridades de cada projeto com relação ao seu ciclo de vida [5], [39], [40]. Neste projeto, tratando-se de um desenvolvimento de fim acadêmico, não há sentido pensar em “Clientes Intermediários”, tendo em vista que não são presentes as etapas de venda e de compra do equipamento produzido.

O termo “usuário”, que pode ser substituído por “cliente” ou “consumidor”, é utilizado para denominar todas as pessoas e organizações que estão contidas nas diversas etapas do ciclo de vida do equipamento, sendo estas, de alguma forma, afetadas por ele e que possuem influência sobre os atributos que serão dados ao projeto. Portanto, um fator muito importante no projeto informacional é a pergunta: “quem são os principais clientes do projeto?”; não só do ponto de vista dos consumidores finais, como é o senso comum do termo, mas levando em conta as demais etapas relacionadas ao ciclo de vida do produto [5].

Como principais usuários, relacionados ao ciclo de vida do equipamento em desenvolvimento, consideraram-se: projetista (mestrando que conduziu o desenvolvimento do projeto), professor orientador e professor coorientador do trabalho, além de usuários que irão utilizar o equipamento para o desenvolvimento de pesquisas nas áreas de processos LASER. Com relação ao ciclo de vida, o equipamento foi desenvolvido para uso no próprio lugar de sua concepção. Desta forma, entende-se que os usuários influenciados e influenciadores durante o ciclo de vida do sistema LASER permanecem, praticamente os mesmos, em todas as etapas do ciclo de vida.

### 3.1.3 Restrições de Projeto

As restrições de projeto são definidas como características e componentes que não podem sofrer alterações e, por sua vez, restringem o processo de busca das especificações e de definição das concepções.

Tratando-se de projeto de máquinas, é comum que o projetista ou a equipe de projeto envolvida sejam os responsáveis por, de acordo com as especificações de projeto definidas na fase de Projeto Informacional, selecionar os componentes adequados para que as especificações sejam de fato alcançadas. No entanto, no desenvolvimento deste trabalho, alguns elementos foram previamente adquiridos, e tinham que, restritivamente, ser utilizados. Isto serviu como diretriz para todo o desenvolvimento do projeto, pois trata-se de elementos essenciais, tais como: Fonte LASER, Cabeçote Óptico, Ambiente de instalação do sistema, comando CNC. Portanto, estes componentes não podem sofrer alterações e, por sua vez, restringem o processo de busca das especificações do projeto e de definição das concepções.

### 3.1.3.1 Fonte LASER

Conforme especificado no Objetivo Geral e no Subcapítulo 3.1.1, o equipamento deve ser capaz de efetuar processos utilizando a energia luminosa oriunda de uma fonte LASER. Portanto, a fonte LASER possui grande importância nos resultados e nas especificações que poderão ser obtidas com o equipamento. O tipo de fonte e suas características definem, de forma bastante direta, quais processos podem ser efetuados no equipamento. As principais propriedades que devem ser observadas estão listadas abaixo:

- a) potência de saída do feixe [W];
- b) comprimento de onda ( $\lambda$ ) [nm];
- c) tipo de geração do feixe (CO<sub>2</sub>, Nd:YAG, Fibra, Diodo);
- d) tipo de feixe (pulsado ou contínuo);
- e) tipo de condução do feixe (fibra, espelhos).

Com base nestas características, é possível determinar, do ponto de vista da fonte LASER, quais processos poderão ser efetuados e qual o potencial do equipamento.

A fonte LASER, disponibilizada para integração no projeto em questão, é de elevada potência. Trata-se de um LASER de fibra (Yb-Itérbio) do fabricante IPG Photonics®, com 10 kW de potência com geração do feixe de saída por múltiplos módulos (18 módulos), habilitado apenas para operação em onda contínua (CW). É adequada para trabalhos de soldagem, soldagem híbrida, corte, *cladding*, dentre outros. A Figura 3.3 apresenta duas imagens do painel da fonte LASER descrita. O Anexo A apresenta as principais especificações deste equipamento.



Figura 3.3 – Fonte LASER IPG® YLS – 10000 (Autor)

Esta fonte LASER disponibiliza dois canais de saída para emissão do feixe, sendo possível utilizar duas fibras para diferentes processos. No entanto, não é possível emitir luz LASER simultaneamente por ambas as fibras, sendo necessário primeiramente fazer a seleção do canal de emissão através da interface de comunicação de sinais disponibilizada pela fonte (*Beam Switch Channel*). Esta característica permite realizar processos distintos no mesmo equipamento ou utilizar a mesma fonte para dois sistemas distintos. Para este projeto, são disponibilizadas duas fibras iguais, com diâmetro de 400  $\mu\text{m}$  e comprimento de 10 m.

A fonte LASER é fornecida com um trocador de calor, *chiller*, o qual tem por objetivo manter os sistemas ópticos internos à fonte (*Beam Switch Channel*) e a fonte de alimentação elétrica dos módulos de geração do feixe LASER em temperatura adequada (aproximadamente 23°C). No painel da fonte LASER são disponibilizadas conexões hidráulicas para circuito de água deionizada, oriundo do *chiller*, que tem por objetivo formar um circuito único de resfriamento para os sistemas ópticos, do próprio LASER e do(s) cabeçote(s) óptico(s).

### 3.1.3.2 Cabeçote Óptico

Assim como a fonte LASER, a configuração do cabeçote óptico influencia diretamente na potencialidade do sistema LASER, definindo quais processos são possíveis de serem efetuados e suas limitações. O cabeçote disponibilizado para o projeto é do fabricante Precitec, modelo YW52, específico para o processo de soldagem LASER.

A fibra óptica de saída da fonte LASER é acoplada na parte superior do cabeçote óptico. O feixe de luz LASER passa inicialmente por dois módulos: um diafragma e uma lente colimadora, ambos refrigerados a água. Em seguida passa pelo módulo de partição do feixe, também refrigerado a água, no qual é instalado, lateralmente, o módulo de captação de imagens coaxiais. Neste módulo, é acoplada uma câmera do fabricante Kappa Optronics, modelo CF 8/5 MX. Trata-se de uma câmera CCD de 12bits, para processos industriais, com um módulo de controle MXC 200, que permite alterar configurações de imagem e a geração de linhas de posicionamento (LG – *Line Generator*). Esta câmera é muito útil para o posicionamento do centro do feixe LASER em relação à peça de trabalho (na atividade de *zeramento*, pré-processo) e no acompanhamento do processo em tempo real [41].

O último módulo óptico deste cabeçote é responsável pelo foco do feixe, contendo a lente de focagem, a partir do qual é definida a distância focal de trabalho. Este módulo também é refrigerado a água.

O sistema óptico do cabeçote de soldagem é um conjunto custo elevado e não pode ser exposto ao processo. A contaminação das superfícies dos elementos ópticos, pela condensação de vapores metálicos, partículas de poeira e gotas de metal fundido, inutiliza o componente afetado. Para evitar a contaminação, o sistema óptico, principalmente a lente de focagem, é isolada do ambiente externo por um vidro de sacrifício. Trata-se de um vidro especial, com transparência de 99,99999 % para o comprimento de onda do LASER de Itérbio (aproximadamente 1064nm), possuindo espessura de múltiplo de meio comprimento de onda (princípio do Interferômetro de Fabry-Perot [6]). Este vidro de proteção necessita ser trocado sempre que apresentar alguma contaminação.

Com objetivo de retardar a troca do vidro de sacrifício, é insuflado um fluxo transversal de ar comprimido seco com alta velocidade de escoamento, fazendo com que as partículas que se movem no sentido axial do feixe, em direção ao sistema óptico, sejam empurradas para fora, impedindo que o vidro de proteção seja atingido. Este fluxo de ar é denominado *crossjet*.

A lente colimadora possui distância focal de 150 mm e a lente de foco de 300 mm. Desta forma, a relação do diâmetro do ponto focal (*spot size*) possui uma relação 2:1 [42]. A fibra de processo disponibilizada pela fonte LASER possui 400  $\mu\text{m}$ . Assim, o menor *spot size* possível de ser obtido com a configuração óptica disponível é de aproximadamente 800  $\mu\text{m}$ , ou 0,8 mm. A característica modular com que o cabeçote é concebido permite realizar facilmente alterações de seus módulos, dentre eles as lentes, para variar os parâmetros do processo (para isto, deve-se possuir uma sala adequada ao trabalho com sistemas ópticos). A Figura 3.4 ilustra o modelo do cabeçote utilizado com a indicação dos módulos que o compõe [42].

Para a realização de soldagem híbrida LASER-Arco com este mesmo cabeçote, é necessário projetar e construir uma interface física para a adaptação de uma, ou mais, tochas MIG/MAG ou TIG, com os respectivos sistemas de ajuste de posicionamento (ângulo e distância) em relação ao feixe LASER e à peça.



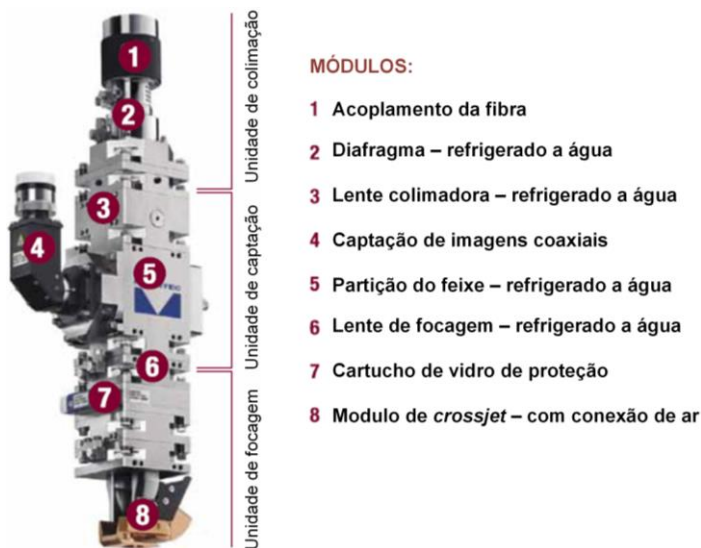


Figura 3.4 – Configuração do cabeçote óptico Precitec (Adaptado de [42])

### 3.1.3.3 Ambiente de Instalação e Operação do Sistema LASER

Uma característica que restringe muito as possíveis concepções deste projeto está no ambiente em que o equipamento será instalado e operado. Com base nos conceitos abordados na Seção 2.1.3, relacionados à segurança para operações com LASER, e nas características da fonte LASER utilizada para este projeto, detalhada na Seção 3.1.3.1, pode-se afirmar que o sistema LASER desenvolvido é de elevada potência, Classe 4 de segurança, segundo a norma ANSI Z136 [24], [43]. Assim, é necessário isolar o ambiente de realização do processo, impedindo a permanência e circulação de pessoas, devido aos riscos oferecidos pela radiação à pele e aos olhos.

Tendo em vista esta característica, duas soluções podem ser adotadas: utilização de uma célula de processo especialmente desenvolvida para o sistema LASER, fazendo com que o acesso seja, de acordo com a norma, denominado Inacessível, devido às restrições de tamanho da célula; isolar e controlar todo o ambiente de processo para que a operação do equipamento seja feita de forma remota, caracterizando o tipo de acesso Excluído.

O local disponibilizado para instalação e operação do sistema LASER possui uma área de 72 m<sup>2</sup> (Seção LASER do Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP), dividido em 3 ambientes. O maior destes, a Sala de Processos<sup>10</sup> é reservado para a instalação dos equipamentos LASER e para a efetiva realização dos processos de fabricação. Esta sala conta com duas portas de entrada e uma janela que dá acesso ao ambiente externo.

Esta sala foi concebida para possuir princípios de máxima segurança para casos de incidência do feixe LASER. Para isto, deve possuir um sistema segurança para verificação de fechamento de todas as aberturas (portas e janelas) e da ausência de pessoas no ambiente durante a realização do processo, de forma automática (transdutores) e visual (por câmera).

Anexo à Sala de Processos, um segundo ambiente foi previsto, denominado Sala de Comando. A partir desta sala, todos os equipamentos devem ser comandados e a segurança da sala supervisionada. Na construção destes ambientes, foram tomadas precauções específicas na escolha do material de construção, de forma que pudesse ser garantida a resistência das paredes contra uma eventual exposição prolongada do feixe LASER sobre estas. As paredes originais do prédio, construídas de tijolos maciços, foram revestidas com piso cerâmico de boa refletividade. As paredes divisórias complementares foram construídas com blocos de concreto ocos, devidamente preenchidos com areia seca.

Tendo em vista que esta infraestrutura estava pronta<sup>10</sup>, configura-se uma restrição no desenvolvimento do projeto. O módulo operacional do sistema LASER deve ser instalado na Sala de Processos, e seu comando deverá ser efetuado pela Sala de Comando, gerando assim uma necessidade de maior modularização do sistema LASER. A Figura 3.5 apresenta, de forma esquemática, a planta baixa e a estrutura desenvolvida para instalação dos sistemas LASER, para auxílio no entendimento nas tomadas de decisão que serão posteriormente apresentadas.

---

<sup>10</sup> Neste ponto, infraestrutura pronta se refere à estrutura física do laboratório. No entanto, no que diz respeito a sistemas de segurança ou a sistemas de supervisão, não havia nada implementado antes do início do desenvolvimento deste projeto.

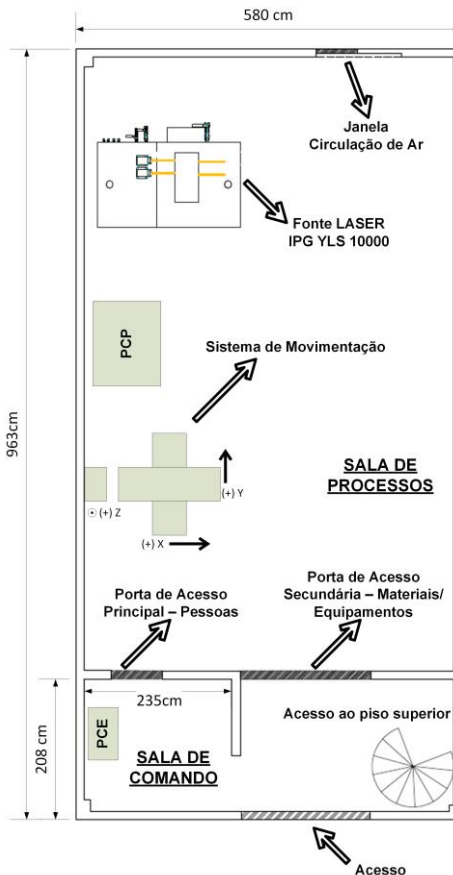


Figura 3.5 – Representação – Vista superior do ambiente de instalação do sistema LASER de elevada potência (Autor)

### 3.1.3.4 Sistema de Comando Numérico

O sistema CNC é um fator de elevada importância para o desenvolvimento deste projeto. É o CNC que determina os possíveis níveis de modularidade e reconfigurabilidade que podem ser alcançados com o equipamento, além de impactar de forma bastante significativa o custo e a potencialidade deste.

Uma das restrições, desde o início estabelecida e apresentada no objetivo geral do trabalho (Seção 1.2) é a utilização de um CNC de modelo industrial. Ou seja, deve ser um sistema robusto, com características de uso industrial.

Alguns exemplos de comandos numéricos industriais utilizados no Brasil são: FANUC, Fagor e SINUMERIK (Siemens AG). Cada fabricante produz uma diversidade de modelos de comandos, cada um geralmente aplicado para um tipo específico de máquina. Tendo em vista que este projeto visa a produção de uma máquina para operações com LASER, podendo ainda ser considerada uma aplicação não convencional para o mercado, deve-se utilizar um comando específico para este fim (não muito comum) ou que permita uma configuração de forma que atenda aos requisitos específicos do processo.

Assim, devido a prévia disponibilidade, foi restringida a utilização do comando da marca Siemens, modelo SINUMERIK 840D SL, sendo este um dos sistemas com maior capacidade de controle e interpolação de eixos disponível no mercado.

O SINUMERIK 840D SL possibilita o comando e interpolação simultânea de até 32 eixos/*spindles*. Tem característica de permitir configurações avançadas do comando, o que é muito interessante do ponto de vista de projeto de máquinas para realização de pesquisas, podendo ser configurado para comandar uma fonte LASER e os diversos periféricos necessários para realização dos processos de fabricação que foram propostos. É utilizado para este propósito por fabricantes de máquinas de corte a LASER, como a fabricante alemã TRUMPF.

#### 3.1.4 Determinação das Especificações de Projeto

O PRODIP traz, dentro da fase de projeto informacional, uma série de transformações de dados e informações que culminam nas especificações de projeto. Primeiramente, são obtidas as necessidades dos usuários. Posteriormente, as necessidades são transformadas em requisitos dos usuários. Estes requisitos, já traduzidos e entendidos pela equipe de projeto são convertidos em requisitos de projeto, os quais, posteriormente são priorizados e transformados em especificações de projeto [5].

A Seção 2.1.2 traz ao final de cada uma das Subseções que fundamentam os processos (2.1.2.1, 2.1.2.2, 2.1.2.3), valores típicos relacionados à realização dos processos de soldagem a LASER, LASER *cladding* e tratamento térmico. Ou seja, estes valores dão ao projeto especificações bem definidas, sem as quais o sistema LASER não seria apto para a realização destes processos na realização de pesquisas, que é seu objetivo

final. Além disto, outras características são intrínsecas e restritivas ao projeto, como por exemplo o uso de um CNC de modelo industrial e as características de modularidade e de reconfigurabilidade.

Com base nisto, entendeu-se que desenvolver o procedimento de Projeto Informacional, descrito pelo PRODIP, realizando todas as transformações descritas no modelo (necessidades dos usuários, requisitos de usuários e requisitos de projeto) para então obter as especificações de projeto, seria desnecessário, já que a literatura abordada na revisão bibliográfica ofereceu informações técnicas suficientes para caracterizar as especificações do projeto

Assim, baseando-se nas informações da literatura, nas restrições do projeto, e assim como pela verificação das necessidades intrínsecas a sistemas LASER e às necessidades de equipamentos para operação em laboratórios de pesquisa, foram definidas as especificações de projeto. A Tabela 3.1 apresenta as especificações de projeto, utilizadas como diretrizes para as demais tomadas de decisão durante o processo de desenvolvimento

Tabela 3.1 – Especificações de projeto (Autor)

Item	Especificação	Valores	Uni.
1	Potência do LASER	1,5 a 10	kW
2	Velocidade de avanço	$\leq 10000$	mm/min
3	Resolução	$\leq 0,05$	mm
4	Tensão de Alimentação	380 - Trifásico	Vca
5	Eixos de posicionamento	$\geq 3$	-
6	Gases de processo	He, Ar, N, CO <sub>2</sub> , Misturas	-
7	Vazão dos gases	2 - 20	l/min
8	Volume de trabalho	300 x 300 x 300	mm <sup>3</sup>
9	Taxa de alimentação de pó	0,5 - 30	g/min
10	Diâmetro das fibras	300, 400 ou 600	$\mu\text{m}$
11	Modelo CNC	Industrial	-
12	Processos possíveis	Soldagem, <i>cladding</i> e tratamento térmico localizado.	-
13	Segurança	Integração dos sistemas de segurança	-
14	Isolamento do Operador	Excluída (ANSI Z136)	-
15	Modularidade	Sim	-
16	Reconfigurabilidade	Sim	-

### 3.2 Projeto Conceitual

As especificações de projeto são a saída da fase de Projeto Informativo, como citado na Seção anterior. Naturalmente, elas são a entrada da fase posterior, no caso o Projeto Conceitual. O principal objetivo desta fase é desenvolver uma concepção, sendo esta a mais adequada em uma série de possíveis concepções verificadas, de forma que as especificações e os objetivos do projeto sejam satisfatoriamente atendidos. Nesta fase, são definidas as tecnologias e os conceitos que deverão ser utilizados para execução do projeto. Para isso, são empregadas ferramentas, já estabelecidas na literatura, para subdivisão do problema de projeto e para a busca das melhores concepções que atendam o problema proposto.

Uma ferramenta, há muito estabelecida, que visa a divisão do problema de projeto é a denominada “Síntese Funcional” ou “Síntese de Funções”. Consiste em definir uma “Função Global”, a qual exprime, de forma simplificada, qual o objetivo principal do projeto. Esta, por sua vez, é dividida em funções menores que expressem, de forma mais focada, operações ou atividades que o equipamento ou produto projetado deve desempenhar para que o objetivo da função global seja alcançado. Se estas funções ainda não forem suficientes, devem ainda ser subdivididas em funções elementares [5], [38]. Este procedimento auxilia a dividir o problema de projeto, até um nível em que seja possível determinar os princípios de solução, permitindo assim desenvolver concepções alternativas que supram a função global. Neste sentido, para montagem da síntese de funções, são utilizadas diversas abordagens.

No início deste Capítulo, foram apresentadas quatro grandes restrições presentes no desenvolvimento do projeto: fonte LASER, cabeçote óptico, ambiente de operação do sistema LASER e modelo do CNC. Estes componentes são os mais importantes para o sistema desenvolvido. Em consequência disto, além de serem restrições ao projeto como um todo, oferecem restrições muito fortes ao desenvolvimento de concepções alternativas de projeto. Foram estudadas diversas soluções e conceitos para resolver os problemas de projeto adequadamente, tendo em vista as restrições e as especificações de projeto, chegando então ao conceito que se considera o mais adequado. Neste texto não serão apresentadas todas as fases e atividades relativas à seleção da concepção adotada.

### 3.2.1 Função Global do Sistema

Na definição da função global, foram determinados os principais fluxos de energia, material e informação presentes no Sistema LASER, entre o usuário, equipamentos externos (periféricos) e o ambiente de operação. O diagrama de blocos da Figura 3.6 ilustra a função global do projeto.

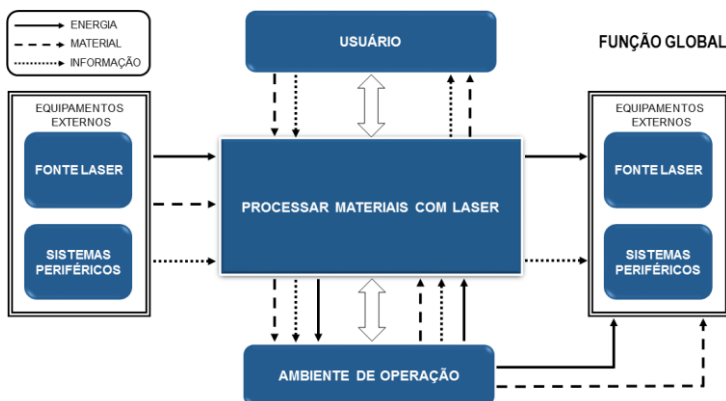


Figura 3.6 – Função global do sistema LASER (Autor)

A caixa central representa a principal função do sistema que, em suma, deve processar materiais utilizando a energia luminosa proveniente de uma fonte LASER, em conjunto com os demais sistemas (periféricos), formando assim um sistema LASER. O usuário interage diretamente com o sistema, inserindo informações e fornecendo o material a ser processado. Em contrapartida, recebe por parte do equipamento informações referentes ao processo que está sendo realizado assim como, ao fim deste, o material já processado.

Os equipamentos externos têm comunicação direta com o sistema, fornecendo sinais (informações), materiais e energia. A fonte LASER foi destacada devido sua importância na concepção do sistema LASER. Poderia não haver nenhum outro sistema periférico, no entanto, sem o LASER, não haveria processo algum e os objetivos não seriam alcançados. Como exemplo de energia, pode-se considerar a energia luminosa fornecida pelo feixe LASER. O feixe de pó no processo de *cladding* pode ser lembrado como um fluxo de material no sentido do sistema. Os sinais, que caracterizam o fluxo de informações, são encontrados em ambos os

sentidos, mostrando que há influência tanto do sistema sobre os periféricos como também o contrário, quando necessário. Há um fluxo de energia no sentido sistema-periféricos para representar uma possível alimentação de algum dos periféricos a partir do sistema LASER.

Com relação ao ambiente de operação, um fluxo de informações, nos dois sentidos, tem como objetivo representar os sinais provenientes dos circuitos de segurança do sistema e do ambiente (circuito de *intertravamento* da Sala de Processos). O ambiente fornece insumos de processo, como gases de blindagem na região de trabalho assim como ar comprimido para função de *crossjet* do cabeçote, caracterizados como fluxo de material. Em contrapartida, ao processar material inserido pelo usuário, o sistema produz materiais em forma de pó disperso (*cladding*), em forma de gotas de metal fundido (soldagem) e gases metálicos. Este material disperso no ambiente pode ter um fluxo no sentido do sistema periférico, causado por um equipamento de aspiração instalado na região do processo, por exemplo. O ambiente fornece a energia elétrica para alimentação de todos os itens que compõem o sistema. O feixe LASER aquece as peças durante a realização do processo. A dissipação deste calor caracteriza um fluxo de energia do sistema LASER para o ambiente.

### 3.2.2 Determinação dos Subsistemas (Módulos)

Bertrán (2009) [33] apresenta uma sistematização do processo de projeto de máquinas automáticas, em que o sistema é dividido em 4 subsistemas: Comando/Controle, Acionamento, Mecânico e de Medição; a ênfase de seu trabalho é relacionada a posicionadores. Esta técnica é de grande utilidade para o projeto de máquinas automatizadas em geral, sem necessariamente dividir o sistema exatamente nos subsistemas citados.

Stoterau (1999) [44] apresenta o projeto conceitual a partir da definição primária da Função Total (Função Global) do sistema, seguida da definição da cinemática do processo (no caso de usinagem de ultraprecisão – torneamento) e, posteriormente, definindo diversos elementos funcionais da máquina, semelhantes a módulos do sistema, em diferentes configurações de relações entre os mesmos, denominadas pelo autor de “Estruturas de Funções”, sendo que cada uma destas leva a uma concepção diferente de máquina-ferramenta.

Nas duas abordagens citadas, o sistema total é subdividido, permitindo ao projetista desenvolver, de forma separada e mais focada, cada problema de projeto referente aos subsistemas que, após unidos conforme a configuração proposta no projeto, irão desempenhar corretamente a função global. Isto é de sobremodo útil, tratando-se de projetos de máquinas



automatizadas, em que uma grande diversidade de subáreas, como: mecânica, acionamentos, comando/controle, metrologia, programação, dentre outras; estão presentes no desenvolvimento, fazendo com que o volume de informações seja elevado. Nestes casos, dividir o problema de projeto em subsistemas menores pode ser útil. Além disto, caso o projeto tenha a premissa da modularidade, pode-se subdividir o projeto entre os módulos que o compõem, e caso estes ainda sejam demasiadamente grandes, pode-se dividir em subsistemas que compõem os módulos, facilitando o desenvolvimento do projeto, especialmente quando este é efetuado por uma equipe multidisciplinar.

Mendes (2001) [45], quando trata do desenvolvimento de um reator a plasma para processamento de materiais, apresenta uma síntese funcional interessante do ponto de vista de desenvolvimento de máquinas. Neste exemplo, a função global é desdobrada em funções que expressam as grandes áreas necessárias para a realização do processo, formando assim uma Síntese Funcional. Estas funções, por sua vez, são divididas em subfunções, as quais, quando necessário, são ainda divididas em funções mais básicas, as funções elementares. Desta forma, tem-se em forma gráfica uma visualização de todos os principais procedimentos que a máquina deve executar para que o processo seja corretamente executado.

Após desenvolvida a Síntese Funcional, o autor busca um princípio de solução que atenda a cada uma das funções e subfunções, individualmente, visando suprir o proposto pela Função Global do sistema. Este procedimento permite que um problema de projeto complexo seja desdobrado na solução de problemas muito mais elementares, facilitando na tomada de decisão e dando a possibilidade da busca de concepções alternativas que cumpram, de forma satisfatória, as atividades exigidas na função global do projeto [45].

O principal fator que influenciou, de forma severa a escolha da concepção, foi a restrição apresentada na Seção 3.1.3.3, em que é apresentado o ambiente de operação onde o sistema LASER está instalado e é operado. Conforme abordado nesta seção, a operação do sistema deverá ser realizada na Sala de Comando, especialmente construída para a operação de todas as máquinas do laboratório que trabalhem com a tecnologia LASER, fazendo com que todo o controle dos equipamentos seja feito de forma externa ao ambiente em que o equipamento executa o processo, a Sala de Processos. A Sala de Comando é pequena e não possibilita que todo o painel de comando do sistema LASER, contendo os *drivers*, circuito de *intertravamento*, CLP e demais componentes, seja nela alocado.

Com base na premissa da modularidade, conforme o proposto nos objetivos (geral e específicos) e nas especificações de projeto, optou-se

por dividir o desenvolvimento conceitual entre os módulos que compõe o sistema. Tendo em vista a necessidade de comandar o sistema LASER em um local diferente do local em que o processo é realizado, foi necessário subdividir o subsistema de comando/controle em dois módulos. Um faz a interface entre o usuário e o sistema LASER, o qual deve ser alocado na Sala de Comando. O outro é o responsável por toda a parte de comando, potência e lógica do sistema, alocado na Sala de Processos. Como ambos os módulos tratam de sistemas eletroeletrônicos que necessitam de um painel para montagem dos componentes, utilizou-se a seguinte nomenclatura: **Painel de Comando Externo (PCE)** e **Painel de Comando Principal (PCP)**, respectivamente. A Figura 3.5 ilustra a posição destes módulos em relação à infraestrutura física de instalação do sistema LASER.

Conforme proposto nas especificações de projeto, o sistema LASER deve possuir 3 ou mais eixos de movimentação. Desta forma, o sistema mecânico poderia caracterizar mais um módulo. No entanto, optou-se por criar um módulo para cada um dos 3 eixos de movimentação do sistema. Considerando a cinemática necessária para realização dos processos propostos, foi definida uma configuração cartesiana, composta pelos eixos X, Y e Z, denominando os módulos de **Sistema de Movimentação X, Y e Z (SMX SMY e SMZ)**.

O ambiente de operação do LASER, em princípio, não pode ser considerado um módulo do sistema. No entanto, as adequações e desenvolvimentos em sua infraestrutura são importantes para sucesso deste trabalho e são considerados como parte do projeto. Da mesma forma, os equipamentos periféricos que não fazem parte obrigatória do sistema LASER, mas que possuem um papel importante para o atendimento dos objetivos e especificações do projeto, são considerados parte integrante do desenvolvimento, mesmo que só em forma de seleção e adequação. Há também um destaque para a fonte LASER e o sistema óptico que, apesar de serem considerados restrições de projeto, possuem funções importantes que devem ser evidenciadas na formulação da concepção final do sistema LASER.

### 3.2.3 Síntese de Funções do Sistema

Seguindo a sequência de desenvolvimento do projeto conceitual, o problema de projeto foi desdobrado em funções e subfunções que, de forma adequada, cumpram o proposto pela função global. Baseado no diagrama proposto por Mendes (2001) [45], a Figura 3.7 apresenta o diagrama da Síntese Funcional do sistema LASER desenvolvido.

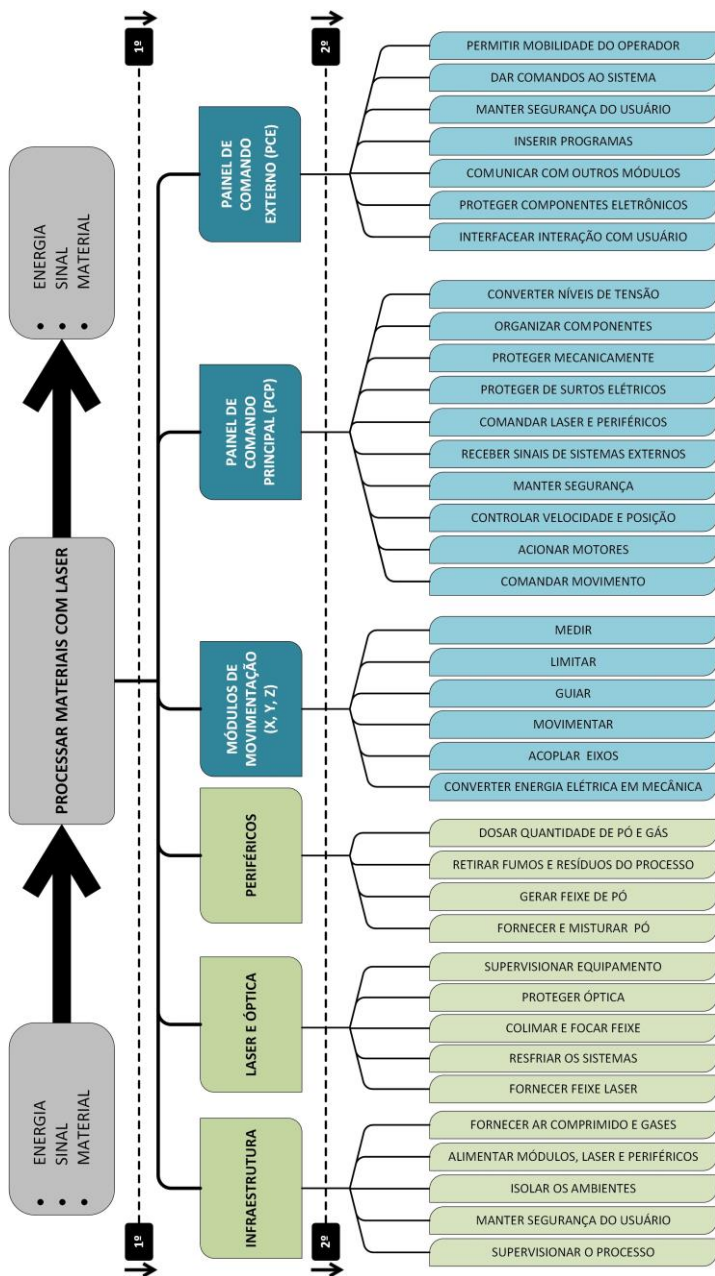


Figura 3.7 – Síntese funcional do sistema LASER (Autor)

A função global na síntese funcional foi contraída, em relação à proposta na Figura 3.6, apenas para a simplificação do diagrama. No entanto, continua sendo válida para a concepção do projeto.

O primeiro nível de divisão traz, diferentemente do proposto na bibliografia apresentada, os módulos e os subsistemas que fazem parte do projeto, e não as funções, como é usual. A intenção desta divisão em primeiro nível é modularizar o projeto desde seu processo de concepção, para que os princípios de solução sejam selecionados para as necessidades de cada módulo individualmente. Conforme mencionado anteriormente, a infraestrutura, o LASER e óptica, assim como os equipamentos periféricos, não são módulos, mas serão tratados como sistemas paralelos que devem ser adequadamente desenvolvidos e considerados para que os objetivos do projeto sejam plenamente satisfeitos e que o sistema LASER seja completamente concebido.

Este primeiro nível foi, individualmente, dividido em subfunções, que representam características que os módulos e os sistemas devem possuir. Não se verificou necessidade de dividir estas subfunções em funções elementares pois foi possível identificar, já no segundo nível, princípios de solução adequados para cumprir seus requisitos. Os blocos preenchidos com cores em tons de verde representam os sistemas paralelos, enquanto os azuis representam os módulos, especificamente, do sistema LASER.

### 3.2.4 Princípios de solução

Findada a subdivisão dos módulos, sistemas paralelos e subfunções do sistema LASER, iniciou-se o processo de seleção de soluções para os problemas propostos pela síntese funcional. Algumas destas soluções já estavam previamente determinadas e foram apresentadas (Restrições de Projeto, Subcapítulo 3.1.3). Nas Subseções seguintes, são apresentados os princípios de solução adotados no desenvolvimento do projeto, sendo cada subseção dedicada a um bloco do Nível 1 da síntese funcional. Em cada uma destas, são explicados quais os princípios adotados para cada uma das subfunções, sem apresentar as concepções alternativas.

#### 3.2.4.1 Painel de Comando Principal (PCP)

O painel de comando principal é o principal responsável pelo comando e controle de todo o sistema. Neste módulo, estão contidos grande parte dos componentes eletroeletrônicos, sendo ele responsável por garantir a proteção, elétrica e mecânica aos mesmos.

As subfunções “**proteger mecanicamente**” e “**organizar componentes**” são cumpridas utilizando um painel metálico comercial que permite, de forma organizada, dispor todos os componentes eletroeletrônicos necessários ao correto funcionamento do sistema, dando robustez ao equipamento e fornecendo condições de operação em ambientes de condições mais severas, com presença de poeira, pó metálico disperso e fornecendo fluxo de ar adequado para resfriamento dos componentes que sofrem aquecimento durante o funcionamento.

O sistema CNC SINUMERIK 840D SL, da empresa Siemens AG, é uma das restrições do desenvolvimento do projeto (Seção 3.1.3), mas que atende as especificações de projeto. Este sistema CNC é um dos componentes que mais influencia nas soluções adotadas no projeto do PCP. A subfunção “**comandar movimento**” é cumprida por este componente. Em consequência de seu uso, como será explicado no próximo capítulo com mais detalhes, é restritivo o uso do sistema de acionamento (*driver*) do mesmo fabricante, devido ao protocolo de comunicação disponibilizado e pelas vantagens que tal interação oferece ao funcionamento do equipamento. Consequentemente, são utilizados *drives* da linha SINAMICS S120 para suprir a subfunção “**acionar motores**”. A subfunção “**controlar velocidade e posição**” é suprida, em conjunto, pelo comando numérico e pelos *drivers*.

No módulo de comando numérico SINUMERIK 840D SL, encontra-se um CLP com alta capacidade de processamento e com comunicação direta com o CNC, o que é essencial para utilização de funções miscelâneas de Código-G. No entanto, não são disponibilizadas entradas e saídas (*I/Os*) físicas, que permitam conectar os dispositivos periféricos que devem enviar e/ou receber sinais do CLP. É necessário utilizar blocos de *I/O* que possuam o protocolo de comunicação disponibilizado pelo CNC, suprimindo as subfunções “**receber sinais de sistemas externos**” e “**comandar LASER e periféricos**”, em conjunto com o CLP e o CNC.

A subfunção “**manter segurança**” é desempenhada por um circuito de *intertravamento*<sup>11</sup>, adequadamente projetado, utilizando botões, transdutores, relés comuns, relés de segurança e do próprio CLP, considerando os componentes periféricos ligados ao sistema, especialmente o LASER, respeitando os procedimentos de segurança por ele impostos

---

<sup>11</sup> A palavra *intertravamento* é um neologismo da língua portuguesa. No entanto, é uma tradução do termo *interlock* da língua inglesa. Este termo tem sido largamente utilizado em literatura técnicas e acadêmicas [40], [54], [55], [62], especialmente tratando-se do projeto de máquinas, em que tal circuito é tão necessário. É utilizado com frequência durante o texto, utilizando-se do recurso gráfico itálico para salientar o caso especial de neologismo.

para emissão do feixe. Esta função tem tanto o caráter de manter a segurança do sistema como também do usuário e do ambiente de operação.

A função “**converter níveis de tensão**” é efetuada por fontes que adequem os níveis de tensão trifásica 380 Vca para a tensão de alimentação do sistema de sinais do painel (24 Vcc) e para a tensão necessária para alimentação dos *drivers* de acionamento dos motores (aproximadamente 500 Vcc), caracterizados como sistema de potência. Em ambos os casos, as fontes utilizadas são do fabricante Siemens. No que diz respeito a fonte de tensão para o sistema de potência, é quase restritiva a utilização da fonte Siemens devido à utilização dos *drivers* e motores do mesmo fabricante. Isto será detalhado no capítulo seguinte.

Ainda no PCP, um circuito que proteja os componentes contra surtos de tensão e de corrente é desenvolvido com objetivo de cumprir o proposto pela subfunção “**proteger de surtos elétricos**”. Este circuito é composto por disjuntores, fusíveis, sistemas de verificação da rede (sub e sobre tensão, falta de fase, sequência de fase), entre outros que se façam necessários para que os componentes do PCP, especialmente do subsistema de potência, não sejam afetados por eventuais surtos de natureza elétrica, independente da qualidade da rede de onde o sistema venha a ser instalado.

#### 3.2.4.2 Painel de Comando Externo (PCE)

O Painel de Comando Externo foi concebido com objetivo de permitir, por motivos de segurança, que o operador comande o sistema LASER em um ambiente distinto do ambiente onde é efetuado o processo. É por este módulo que o operador tem o controle sobre o equipamento, inserindo programas para execução, enviando comandos e visualizando o *status* do sistema. Neste sentido, as subfunções “**interfacear interação com usuário**” e “**inserir programas**” são desempenhadas por uma IHM – Interface Humano Máquina – que possui interação direta com o sistema CNC, sendo esta do mesmo fabricante do comando.

As subfunções “**proteger componentes eletrônicos**” e “**permitir mobilidade do operador**” são desempenhadas por um gabinete que fornece uma estrutura mecânica para montagem dos componentes. Este gabinete é composto de perfis modulares de alumínio, para dar estrutura, e chapas metálicas, devidamente cortadas e dobradas, para fornecer os locais de montagem dos componentes, bem como servir de carenagem. Além disto, este painel oferece mobilidade ao operador.

Para que a subfunção “**manter segurança do usuário**” seja cumprida, este painel contém botões que permitem habilitar o LASER apenas

no momento em que o processo é efetuado. Para atender exigências de normas de segurança, o PCE possui uma torre luminosa que indica o *status* da fonte LASER entre os modos: Desligado, Energizado e Emitindo. Outro componente utilizado para cumprir a função de segurança é o botão de emergência, para casos em que seja necessário, emergencialmente, desabilitar a emissão de feixe LASER, assim como a movimentação do sistema. Todos os componentes de segurança devem ter comunicação direta com o circuito de *intertravamento*, inserido no PCP (subfunção “**manter segurança**”). Para isto, o PCE possui uma interface que permite, por meio de comunicação cabeada, trocar sinais com o PCP (*I/Os*), cumprindo assim a subfunção “**comunicar com outros módulos**” e “**dar comandos ao sistema**”.

### 3.2.4.3 Módulos de Movimentação

Para que o sistema LASER execute os processos propostos, é necessário que haja uma movimentação relativa entre o feixe LASER e a peça trabalhada. Portanto, é necessário um sistema de movimentação de 3 eixos dispostos em uma configuração cartesiana. Tendo em vista a premissa da modularidade, cada eixo (X, Y e Z) deve ser um sistema de movimentação independente e modular. Desta forma, em caso de necessidade, o sistema de movimentação pode ser reconfigurado para outro tipo de cinemática e até mesmo para que estes módulos, individualmente, possam ser utilizados em outras aplicações, quando necessário.

Com base nisto, há três possibilidades: adquirir um sistema comercial; desenvolver e fabricar completamente os sistemas ou aproveitar algum sistema disponível que tenha características adequadas para os processos. Foi escolhida a terceira opção.

Assim, é empregado um sistema de movimentação linear, composto por três módulos, modelo ATS416 da empresa Aerotech<sup>®</sup>. Este sistema de movimentação, moderno na época de sua aquisição, apresentava um acionamento e comando desatualizado e inadequados tecnologicamente, impossibilitando processo de recondicionamento destes subsistemas. A característica inerente de independência entre os módulos mecânicos deste sistema mostra-se muito atrativa para o desenvolvimento do projeto.

O módulo de movimentação linear ATS416 da Aerotech<sup>®</sup> tem seu princípio de movimentação baseado em guias de rolos cruzados, sendo acionados por fusos de esferas recirculantes com mancalização tipo FIXO-SUPPORTADO, que suprem as subfunções “**guiar**” e “**movimen-**

**tar.** Para que o fuso transforme o movimento de rotação em linear, é necessário acoplar seu eixo ao eixo de um motor, conforme o proposto na subfunção “**acoplar sistemas**”. Para isso, são utilizados acoplamentos flexíveis com objetivo de compensar desalinhamentos entre os eixos, oriundos de erros de fabricação e montagem. O motor desempenha a subfunção “**converter energia elétrica em mecânica**”, tendo seu comando e controle a partir do PCP. Como atuadores, são utilizados motores síncronos de corrente contínua (CC) do fabricante Siemens, com total integração com os *drivers* selecionados.

A subfunção “**limitar**” é desempenhada por um comutador elétrico com acionamento instantâneo causado por uma força física de colisão, comumente denominado de chave “fim de curso”. Cada eixo possui 3 chaves de fim de curso: uma em cada extremidade, para impedir colisões mecânicas entre as partes fixas e móveis dos sistemas; outra em uma das extremidades, com posição um pouco anterior ao fim de curso (extremo), para definir a posição de *home* (zero-máquina). Todas as conexões destes comutadores são disponibilizadas ao PCP para composição do circuito de *intertravamento* e para permitir realização de *zeramento* do sistema LASER (procedimento de *home*).

Em quase todos os sistemas de movimentação controlados numericamente, é necessário que haja uma realimentação do sistema de controle com informações de posição e velocidade dos eixos. Há diversos métodos de efetuar tais medições. Para suprimento da necessidade proposta na subfunção “**medir**”, são utilizados *encoders* absolutos, com 2048 pulsos por rotação, diretamente acoplados aos servo-motores, sendo estes responsáveis, tanto pela realimentação de velocidade como pela realimentação de posição.

#### 3.2.4.4 Infraestrutura

A infraestrutura física do laboratório LASER possui grande importância para este projeto e deve ser adequada para operação de um LASER de elevada potência. A segurança do operador do sistema e dos entornos deste, são os motivos primários para esta necessidade de adequação da infraestrutura.

Conforme o exposto na Subseção 3.1.3.3, a estrutura física do local de instalação do sistema LASER de elevada potência é uma restrição do projeto. Portanto, o sistema deve ser concebido para adaptar-se à infraestrutura física existente e disponível. Por este motivo, foram concebidos os módulos PCP e o PCE, permitindo a operação do LASER a partir da “Sala de Comando”, enquanto o processo é efetuado na “Sala de Processos”.



Para que isto seja eficaz e seguro, é necessário tomar algumas precauções e fazer adaptações nestes ambientes, que são propostas nas subfunções da síntese funcional.

Para manter a segurança do operador do sistema, deve haver um isolamento dos dois ambientes. As paredes que cercam a Sala de Comando são construídas com blocos de concreto, devidamente preenchidos com areia seca. O preenchimento dos blocos com areia seca objetiva retardar a perfuração da parede em caso de uma incidência direta do feixe LASER sobre ela. A energia do LASER funde a areia, esta aglutina ao fundir e, por gravidade, o vazio formado é preenchido pelo volume de areia solta acima da região fundida, retardando a passagem do feixe. Desta forma, o operador terá um tempo maior para detectar uma anomalia do posicionamento do feixe LASER e tempo hábil para acionamento de um botão de emergência para interrupção do sistema. Três portas e uma janela metálicas e corrediças que dão acesso aos diferentes ambientes, foram concebidas, sendo também ocas e preenchidas com areia seca. Esta concepção de paredes e portas tem por objetivo o cumprimento da subfunção “**isolar ambientes**”.

Devido ao isolamento físico dos ambientes, não é possível observar o processo sendo efetuado na Sala de Processos a partir da Sala de Comando. Para que a subfunção “**supervisionar o processo**” seja satisfeita, é utilizada uma câmera IP, de alta resolução (HD) com capacidade de giro de 360°, na região central do teto da Sala de Processos, cujas imagens são transmitidas para um televisor de quarenta e duas polegadas com acesso à internet. A partir do navegador do televisor é possível acessar a câmera, tornando desnecessária a instalação de mais um computador dedicado a esta função.

Outra característica relacionada à segurança do usuário, é garantir que o sistema LASER se comunique com o circuito de segurança da sala<sup>12</sup>, que é responsável por verificar a situação de abertura das portas e janela, a circulação de pessoas no ambiente de operação e etc. Isto supre a subfunção “**manter segurança do usuário**”, em conjunto com as soluções adotadas para as duas subfunções anteriormente citadas. Esta comunicação tem por objetivo incluir o circuito de segurança do laboratório no circuito de *intertravamento* do sistema (PCP), interligando todos os circuitos de segurança e, assim, impedindo - ou ao menos diminuindo as

---

<sup>12</sup> É importante salientar que não é objetivo do trabalho desenvolver este sistema de segurança. Apenas citou-se esta característica para afirmar que a máquina deverá ter a possibilidade de comunicar com este sistema, quando for adequadamente desenvolvido.

consequências - que ocorram problemas aos usuários e aos entornos do ambiente em caso de surtos inesperados.

A subfunção “**alimentar módulos, LASER e Periféricos**” está relacionada com o fornecimento de energia elétrica aos equipamentos, para que possam operar. O laboratório dispõe de um barramento trifásico 380 Vca com Neutro. No entanto, não havia disponível um sistema de aterramento adequado para ligação dos equipamentos. Para suprir completamente a subfunção relacionada à alimentação, é necessária a instalação de um circuito de aterramento que oferecesse uma resistência elétrica abaixo de  $30 \Omega$ , para proteção dos equipamentos eletroeletrônicos, sobretudo o CNC e o LASER.

Outra preocupação relacionada ao aspecto da alimentação elétrica dos equipamentos está na instabilidade e má qualidade da rede trifásica que é disponibilizada no laboratório. Com relação ao sistema desenvolvido, estes aspectos são levados em conta no projeto elétrico, colocando todas as proteções que se verificarem necessárias (PCP). No entanto, há ainda uma preocupação quanto a alimentação da fonte LASER e do *chiller* que o acompanha. Estes equipamentos, fabricados na Alemanha, possuem tensão de alimentação trifásica 460 Vca. Assim, é necessária a instalação de um transformador (aumentador) para mudar o nível de tensão de 380 Vca para 460 Vca, trifásico. Para a segurança destes equipamentos, tendo em vista o alto custo que eles representam no projeto, foi concebido um circuito que permite protegê-los nos principais aspectos relacionados à alimentação, em caso de eventuais problemas na rede elétrica do ambiente de instalação.

Para que os processos de fabricação propostos neste trabalho sejam adequadamente efetuados, é necessário que haja a disponibilidade de gases de processo usados, em geral, para criação de uma atmosfera que faça uma blindagem entre a região de processo (poça de fusão, por exemplo) e o ar do ambiente. Em equipamentos de soldagem convencional, é comum instalar os cilindros de gases próximos às máquinas. No entanto, tendo em vista o risco oferecido pelo LASER, em casos de uma incidência direta causada por um erro do sistema de comando/controle (como pode acontecer no caso de utilização de robôs dentro da Sala de Processos), entende-se ser perigoso instalar os cilindros no ambiente em que os processos LASER são executados, optando-se pela instalação de uma central de gases externa ao ambiente LASER. Os cilindros são ligados às unidades de redução e controle de pressão. Na pressão reduzida, os gases são distribuídos para a Sala de Processos através de tubulações individuais até

dois pontos de tomada, para cada gás. Nos pontos de tomada, anemômetros e reguladores de pressão permitem adequar a vazão de gases para cada aplicação específica.

No ambiente de instalação do processo, são disponibilizados tomadas de ar comprimido, oriundas de um compressor central. Há um sistema secador de ar por frio, para retirar a umidade do ar fornecido para a rede. Para evitar que haja a condução de água condensada na rede (que porventura não é retirada pelo secador), a tomada que fornece ar comprimido ao sistema LASER é instalada acima da altura da rede que o conduz, impedindo que a água desça por gravidade. Parcelas remanescentes de água são retiradas no filtro do regulador de pressão, instalado no sistema LASER para fornecer o ar comprimido tratado e na pressão adequada para as especificações de cada processo proposto. Desta forma, tendo em vista a disponibilidade de gases e de ar comprimido, é suprida a subfunção “**fornecer ar comprimido e gases**”.

#### 3.2.4.5 LASER e Óptica

A subfunção “**Fornecer Feixe LASER**”, é suprida pela fonte LASER IPG® de 10 kW. O feixe LASER, disponibilizado pela fibra óptica, necessita de um sistema óptico (lentes) para se tornar adequado para a execução de processos de fabricação. Para a subfunção “**colimar e focar feixe**”, é utilizado um cabeçote de soldagem a LASER Precitec, o qual, assim como o LASER, foi descrito como restrição no início deste Capítulo.

A fonte LASER de elevada potência aquece durante sua utilização, tanto em componentes elétricos como nos sistemas ópticos, sendo necessário o arrefecimento por um sistema externo. Para isto, é empregado um *chiller*, fornecido com o LASER, que resfria a água para uma temperatura próxima de 22°C e força a circulação desta em tubulações ligadas aos componentes que necessitam de resfriamento. A água resfriada proveniente do *chiller* é, inicialmente, alimentada no gabinete da fonte LASER. A partir de conexões hidráulicas da fonte LASER, a água resfriada é fornecida para o cabeçote óptico, permitindo assim que este também tenha seus espelhos e lentes adequadamente resfriados. Desta forma, a subfunção “**resfriar os sistemas**” é completamente suprida.

O fabricante da fonte LASER disponibiliza um sistema supervisorio, denominado LASERNET, que permite o monitoramento das variáveis de funcionamento do sistema, como fluxo de água de resfriamento, potência do feixe gerado, corrente de alimentação de cada um dos 18 módulos de geração de feixe, temperatura do sistema óptico, dentre outras.

Além disto, permite verificar a presença de falhas e alarmes durante o funcionamento. Para suprir a subfunção “**supervisionar equipamento**”, é utilizado um PC na Sala de Comando, dedicado à execução do *software* LASERNET para o monitoramento da fonte LASER durante a execução dos processos.

A subfunção “**proteger óptica**” é suprida pelo vidro de sacrifício e pelo módulo de *crossjet*, disponibilizados no próprio cabeçote óptico Precitec. O fluxo de ar comprimido para o *crossjet* deve ser seco, na temperatura do líquido de arrefecimento (com umidade relativa abaixo do ponto de orvalho), para impedir a condensação de gotículas de água sobre os componentes resfriados do cabeçote. Este fluxo também pode ser feito com nitrogênio seco, fornecido pela central de gases. Este fornecimento de ar comprimido e gases está relacionado com a subfunção “**fornecer ar comprimido e gases**” da infraestrutura.

#### 3.2.4.6 Periféricos

Para efetuar outros processos, como o LASER *cladding*, é necessário suprir subfunções complementares, como “**fornecer e misturar pó**” e “**dosar quantidade de pó e gás**”. Para suprir estas subfunções, é utilizado um equipamento comercial de alimentação de pó, denominado *powder feeder*.

O fluxo de pó disponibilizado pelo *powder feeder* é fornecido para um dispositivo acoplado ao cabeçote óptico, que alimenta este fluxo de pó de forma coaxial ao feixe LASER, com uma posição relativa definida entre o foco do fluxo de pó e o foco do feixe LASER, suprimindo assim a subfunção “**gerar feixe de pó**”. O cabeçote com o bocal ejetor de pó coaxial possibilita executar operações de *cladding* sobre superfícies planas (2D), bem como a construção de geometrias tridimensionais com paredes de até 0,5 mm de espessura (LASER *Metal Deposition* 3D). Quando acoplado a um sistema de movimentação em 5 eixos, permite o trabalho em superfícies livres em 3D.

Durante a execução de processos LASER ocorre a liberação de fumos (gases), decorrentes da evaporação de contaminantes dos componentes, bem como a emissão de pós, decorrentes da condensação de vapores metálicos (partículas sólidas muito pequenas) dispersas na região do processo, sendo necessária a instalação de um aspirador com filtros para evitar a contaminação de todo o ambiente. Para isto, é utilizado um sistema filtro-aspirador industrial, instalado próximo à região de trabalho, cumprindo assim a subfunção “**retirar fumos e resíduos do processo**”.

## 4 PROJETO E EXECUÇÃO

Baseado na concepção e da definição dos princípios de solução, apresentados no Capítulo anterior, foi desenvolvido o projeto (técnico) dos módulos que compõem o sistema LASER, com objetivo de, posteriormente, executar a fabricação e montagem dos mesmos e validar o sistema nos processos de fabricação propostos.

Este Capítulo tem por finalidade principal descrever o projeto do sistema LASER, dividindo os Subcapítulos de acordo com os módulos desenvolvidos, adequação da infraestrutura, equipamentos periféricos e configuração do CNC, apresentando as decisões técnicas que foram tomadas durante o projeto e execução, baseando-se na revisão bibliográfica e exibindo os resultados alcançados em cada etapa.

Optou-se por elaborar o projeto assistido por computador dos módulos ou de parte destes, sempre precedendo as atividades de fabricação e de montagem, evitando retrabalhos, economizando tempo e recursos. Foram utilizados dois *softwares*. Para os projetos mecânicos, nas atividades de modelagem dos sistemas em 3D, criação de imagens renderizadas e confecção de desenhos detalhados de fabricação, foi utilizado o *software* CAD 3D SolidWorks (Versão 2014). Para o projeto dos circuitos elétricos e eletrônicos, foi utilizado o *software* SEE Elétrical (V7.2), na atividade de confecção dos circuitos esquemáticos, sem função de simulação.

Neste capítulo serão apresentados esquemáticos elétricos, esquemas mecânicos, renderizações em 3D, além de uma documentação fotográfica com imagens feitas durante as etapas de execução do projeto, com o objetivo de ilustrar e tornar compreensível as fases deste desenvolvimento.

### 4.1 Painel de Comando Principal

O Painel de Comando Principal do sistema LASER é o módulo mais complexo devido à quantidade de funções atribuídas a ele. Este módulo contém a maior quantidade de componentes. Esta unidade reúne conhecimentos de diversas áreas da engenharia, destacam-se: elétrica, eletrônica, eletrônica de potência, CNC, CLP, mecânica e integração mecatrônica.

O PCP é o módulo de controle do sistema LASER, por onde, em algum momento, todas as informações passarão. É dele que partem os comandos para os sistemas mecânicos de movimentação, assim como todos os comandos para os sistemas paralelos do sistema LASER. Também é o responsável por receber a energia elétrica da rede, transformá-la,

quando necessário, e proteger os componentes que o compõe, tanto elétrica, quanto mecanicamente. Este Subcapítulo está dividido em Seções, que trazem as subáreas que compõem o PCP. São estas: desenvolvimento mecânico, composição do sistema CNC, desenvolvimento elétrico de potência, desenvolvimento da lógica e de sinais e interfaces de comunicação.

#### 4.1.1 Desenvolvimento Mecânico

O desenvolvimento mecânico do PCP é colocado como primeiro tópico, tendo em vista que é nesta fase que os componentes eletroeletrônicos são devidamente distribuídos dentro da estrutura do PCP. Essa é uma informação importante para os tópicos seguintes

O gabinete do PCP é um painel comercial de grande porte, produzido pela empresa Rittal, composto de chapas metálicas de aço com acabamento pintado, com dimensões externas de (800x600x1800) mm. Uma placa (laranja) removível, disposta no interior do gabinete, com a dimensão (800x1800) mm, permite a fixação e agrupamento dos componentes que compõem o painel. Para a montagem dos componentes sobre esta placa, foram utilizados dispositivos padrões, como trilhos (DIN) e calhas para passagem de cabos.

Após finalizado o projeto dos diagramas esquemáticos elétricos, foi possível definir quais componentes e suas devidas quantidades, necessários para a montagem do PCP. Foi modelada e otimizada a distribuição destes componentes eletroeletrônicos, assim como as interfaces de ligação com os demais módulos do sistema, utilizando o *software* CAD 3D. O nível de detalhamento da modelagem computacional realizada permitiu que todas as decisões fossem tomadas na fase de projeto, reduzindo as necessidades de retrabalho na montagem do PCP. A Figura 4.1 apresenta a imagem renderizada da placa de montagem de componentes do PCP.

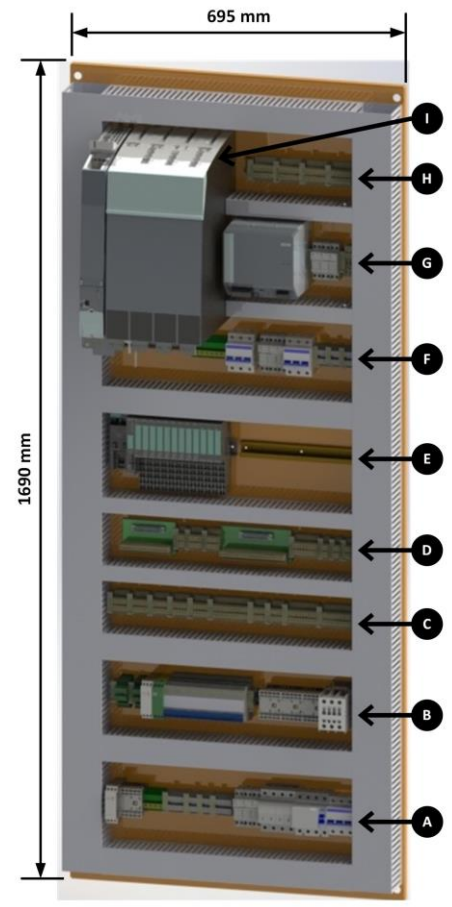


Figura 4.1 – Representação renderizada do PCP – Setores do Painel (Autor)

O PCP agrupa uma grande diversidade de componentes, de diversas naturezas. Portanto, é preciso tomar cuidados com relação à disposição destes componentes na concepção do painel. Os circuitos de potência, responsáveis pela alimentação do módulo, assim como os circuitos de acionamento dos motores, conduzem correntes elevadas quando comparadas com as correntes dos circuitos de sinais. Quanto maior a corrente conduzida por um fio condutor, maior é o campo eletromagnético criado ao redor deste, induzindo correntes elétricas em outros condutores nas adjacências.

Como os circuitos elétricos de sinais conduzem correntes muito pequenas, na ordem de  $10^{-3}$  Ampères, correntes induzidas causadas por interferências eletromagnéticas geradas por circuitos de potência nas proximidades podem provocar o acionamento de circuitos eletrônicos sensíveis, tais como entradas digitais de micro controladores e CLPs o que, em consequência, pode gerar um comando que não foi, de fato, dado. Para evitar este tipo de problema, o painel foi dividido de acordo com a natureza dos circuitos evitando, principalmente, que cabos condutores de altas correntes estejam localizados próximos aos condutores de sinais.

Optou-se por dividir o painel em 9 seções, denominadas sequencialmente de A – I, separadas horizontalmente por calhas de 50x80mm e 30x80mm, dependendo da quantidade e dos diâmetros das seções dos cabos que estavam previstos para serem conduzidos em cada uma. A nona seção (I), devido ao tamanho dos componentes, não seguiu esta lógica de posicionamento. Nas laterais da placa de montagem, devido a grande quantidade de condutores previstos, foram instaladas calhas de 80x80 (verticais). A calha à direita é exclusiva para passagem de cabos relacionados aos circuitos de alimentação e potência. Na calha à esquerda, são conduzidos exclusivamente os cabos referentes aos circuitos de sinais do PCP.

Os elementos da seção (A) e o primeiro elemento à direita da seção (B), são responsáveis pelas proteções iniciais do painel, contendo disjuntores, fusíveis, bornes, relés e contadoras. À direita da seção (B) 3 contadoras são relacionadas ao circuito de *intertravamento*, mas responsáveis pelo acionamento do circuito de potência. A outra parte (à esquerda) da seção (B) é relacionada apenas ao circuito de sinais, sendo boa parte desta composta por relés que configuram o circuito de *intertravamento*. A seção (B) é a subdivisão do painel na qual, devido ao espaço limitado do gabinete, apresenta o menor espaçamento entre componentes das duas naturezas de circuito (potência e sinais). Para evitar problemas nesta seção, procurou-se deixar o maior espaçamento possível entre os componentes das duas naturezas.

As seções (C) e (D) são compostas por bornes, responsáveis por distribuir sinais em todo o painel elétrico. Para organizar a montagem e distribuição de sinais e energia do painel, no intuito de facilitar uma manutenção futura do equipamento, foram instalados conjuntos de bornes, objetivando distribuir de forma sistemática os sinais pelos circuitos. Os dois conjuntos de bornes, à direita da seção (C), e toda a seção (H), são responsáveis pela distribuição da tensão de 24 Vcc no painel, oriundos da fonte de 24 Vcc (+24 Vcc e 0 Vcc).



Todo conector do painel (interface de conexão entre o PCP e os demais módulos) possui um conjunto de bornes específico. Assim, os cabos ligados aos conectores (parte interna) são primeiramente conectados em um dos lados do borne enquanto a outra extremidade deste distribui o sinal para os circuitos do gabinete. Entre os conjuntos de bornes foram instalados identificadores de grupo, garantindo que os diferentes conjuntos fossem devidamente separados e identificados, de acordo com suas funções e naturezas de circuitos.

A seção (E) comporta as portas de entradas e saídas (*I/Os*) analógicas e digitais do Controlador Lógico Programável – CLP, que tem seu processador instalado internamente ao módulo do CNC. À direita desta seção foi previsto um espaço livre, permitindo uma expansão de funções do painel, como por exemplo adição de conectores, relés e etc.

As seções (F) e (G), relacionadas a circuitos de potência, contêm os componentes de proteção para os conversores de tensão (fontes), dimensionados de acordo com as necessidades de cada conversor, individualmente. As proteções instaladas na seção (A) não são capazes de proteger estes componentes de forma individual, conforme será detalhado na Seção 4.1.3.

A seção (I) contém os componentes essenciais do comando CNC, do fabricante Siemens. Da esquerda para direita encontram-se: NCU SINUMERIK 840D SL, fonte conversora para circuito de potência, um *driver* de dois eixos (duplo), um *driver* de um eixo (simples) e outro *driver* de dois eixos (duplo), totalizando 5 eixos controlados. Estes componentes serão detalhados na Seção 4.1.2.

Como os componentes eletrônicos instalados no PCP aquecem durante o tempo de funcionamento, é necessário o arrefecimento destes pela circulação de ar do ambiente no interior do gabinete. Para isso, foram instalados dois ventiladores (*fans*), um na parte inferior esquerda, forçando o ar do ambiente a entrar, e outro na parte superior direita, forçando o ar aquecido a sair do gabinete. Ambos os *fans* foram instalados em grades plásticas, fixas nas chapas laterais do painel, dando acabamento e servindo de suporte para filtros de ar (na grade inferior). A Figura 4.2 apresenta o PCP montado.



Figura 4.2 – Estrutura externa, interfaces de comunicação e componentes internos do PCP montado (Autor)

#### 4.1.2 Composição do Sistema CNC

Uma das características mais importantes do sistema desenvolvido, está relacionada ao subsistema de comando e controle. É uma restrição, baseada no objetivo geral do trabalho, que o sistema seja comandado numericamente por um controlador de modelo industrial. Também é restrição que seja usado o comando CNC da empresa Siemens, modelo SINUMERIK 840D SL, conforme tratado na Seção 3.1.3.4. Esta restrição influenciou todo o desenvolvimento do projeto do sistema LASER.

O principal componente relacionado ao comando é o NCU (*Numerical Control Unit* – Unidade de Comando Numérico). Este componente é o responsável por interpretar o programa e interpolar o movimento dos eixos. É o componente que, de fato, leva o nome de SINUMERIK 840D SL. No entanto, é preciso uma cooperação entre uma série de componentes que permitam inserir o programa na máquina, acionar motores, gerar

movimento, dentre outras funções, intrínsecas ao funcionamento de equipamentos comandados numericamente.

O NCU SINUMERIK 840D SL é um componente com grande capacidade de processamento. Pode comandar e interpolar 32 eixos/*spindles* simultaneamente em 10 diferentes canais. É, atualmente, o mais completo comando da empresa Siemens e um dos mais avançados disponíveis no mercado mundial. É utilizado em máquinas ferramentas comuns (torneamento, fresamento), porém também é muito utilizado em máquinas e sistemas mais complexos, em que há necessidade de maior flexibilidade de configuração do comando, como retificadoras, máquinas de corte jato d'água, máquinas de corte a LASER, punctionadeiras CNC e, até mesmo, em sistemas robóticos para, por exemplo, alinhamento da fuselagem de aeronaves. Isto mostra sua grande flexibilidade e adequação para o sistema LASER proposto.

Uma característica relacionada à restrição do uso do comando Siemens é a obrigatoriedade da utilização de diversos outros componentes do mesmo fabricante, especialmente os relacionados ao comando e controle de movimento. É possível a utilização de componentes de outros fabricantes, no entanto, o tempo de desenvolvimento necessário para adequar as interfaces de comunicação entre os sistemas de diferentes origens é demasiadamente longo. Um exemplo são os *drivers* para acionamento dos motores. O NCU SINUMERIK 840D SL disponibiliza algumas portas com um protocolo de comunicação desenvolvido e exclusivo da própria Siemens, denominado DriveCLIQ. Isto dificulta, ou até impossibilita, a instalação de *drivers* de outros fabricantes. Por outro lado, torna a configuração do sistema muito mais simples, quando utilizados componentes compatíveis.

Foram utilizados *drivers* Siemens, da linha SINAMICS S120, os quais são integrados com o NCU por meio da interface de comunicação DriveCLIQ. O fabricante disponibiliza uma série de modelos de *drivers*, os quais se diferenciam quanto a potência de acionamento disponibilizada e quanto a quantidade de motores que podem ser acionados. Existem os modelos *Single Motor Module*, com correntes de saída entre 3 e 200A, e os *Double Motor Module*, que podem acionar até dois motores com correntes entre 3 e 18A [46]. Independente da magnitude dos acionamentos, o comando CNC e o protocolo de comunicação permanecem os mesmos.

Tendo em vista a capacidade do NCU utilizado e da relação de seu custo, quando comparada ao custo dos *drivers* e motores (o NCU é o componente eletroeletrônico de maior valor utilizado no projeto), optou-se por desenvolver o PCP para comandar e interpolar, simultaneamente, 5 eixos

de movimentação (X, Y, Z, A e B), embora o sistema mecânico de movimentação esteja, atualmente, configurado para movimentações em 3 eixos.

Foram utilizados 2 *drivers double motor module*, com capacidade de corrente de 3A para cada motor e um *single motor module*, com capacidade de corrente de 3A. Para que os *drivers* sejam devidamente alimentados, é necessário que seja utilizada uma fonte que forneça os níveis de tensão e corrente adequados aos *drivers*. Para isto, foi utilizada uma fonte Siemens, modelo *Smart Line*. Esta fonte será detalhada na Seção 4.1.3, em que é abordado o desenvolvimento do circuito de potência.

Todos os componentes citados (NCU, *drivers* e fonte), são fornecidos no formato denominado *booksize format* (formato de tamanho de livro). Esta concepção permite uma montagem bastante compacta. Outros fabricantes de sistemas de comando numérico industriais têm procurado desenvolver seus módulos de controle em *designs* semelhantes, permitindo que todos os componentes relacionados ao CNC e ao acionamento sejam montados em conjunto, facilitando a interconexão entre eles. No PCP, estes componentes foram montados na seção I do painel. A Figura 4.3 mostra a montagem dos componentes *booksize* no painel.

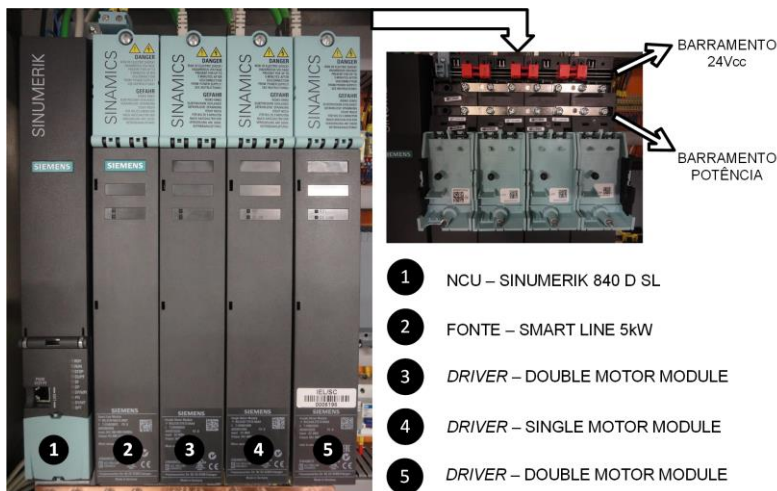


Figura 4.3 – Componentes *Booksize* – NCU, *drivers* e fonte - PCP (Autor)

A alimentação dos *drivers*, feita pela fonte, é efetuada por um barramento interno, que passa por cada componente da linha de alimentação.

Este barramento fica devidamente isolado para diminuição de riscos relacionados a choques elétricos durante a manutenção, e até mesmo de curtos circuitos acidentais. Também possui um segundo barramento, referente à alimentação do circuito lógico da fonte, que também é distribuído para os *drivers*, tornando desnecessária a alimentação individual dos respectivos circuitos de sinais (24 Vcc). Estes barramentos são muito interessantes do ponto de vista de organização do painel e de mantabilidade, tendo em vista a ausência de cabos que podem ser esmagados e seccionados acidentalmente no interior do painel.

Os conectores utilizados para o protocolo de comunicação DriveCLIQ são do tipo RJ-45, sendo este protocolo semelhante ao padrão Ethernet, mas com alterações em algumas das camadas que formam o protocolo. Nos módulos utilizados, as conexões DriveCLIQ ficam localizadas na parte superior da estrutura física, permitindo assim uma conexão com cabos curtos, de forma organizada, sem necessidade de utilização de calhas de passagem para as conexões entre módulos. Há uma topologia específica, desenvolvida pela empresa Siemens, a qual permite uma configuração do sistema de forma fácil e ágil, em que a NCU reconhece automaticamente os componentes ligados a ela. A Figura 4.4 ilustra, de forma esquemática, a conexão de rede utilizada entre os módulos do CNC, as conexões dos *encoders*, que também utilizam o protocolo DriveCLIQ e as conexões de acionamento dos *drivers* para os motores.

Os *encoders* são utilizados para realimentar tanto o sistema de controle de posição, como o de controle de velocidade. Apesar de todos os *encoders* serem conectados aos *drivers*, o processamento da malha de controle de posição e de velocidade é realizado no NCU. Assim, os dados de realimentação dos *encoders* são enviados via protocolo DriveCLIQ para o NCU, onde é realizado o controle de posição e velocidade, de acordo com os ganhos ajustados nos respectivos controladores. As informações de controle são enviadas do NCU para os *drivers*, também pelo protocolo DriveCLIQ (pelo mesmo cabo de comunicação), os quais acionam os motores já com os ganhos e compensações, oriundas dos controladores, aplicadas.

Assim, é possível verificar uma diferença em relação ao modelo esquemático apresentado na Figura 2.12, em que o controle de posição é realizado no NCK enquanto o de velocidade é realizado nos próprios *drivers*. Também existem sistemas em que, tanto o controle de velocidade como o de posição, são realizados no *driver* de acionamento, de forma que o CNC apenas envia os comandos de posição de acordo com seu gerador de trajetórias e não é realimentado pelos transdutores de velocidade e de posição (comum em CNCs baseados em PC). São variações possíveis

em sistemas CNC e dependentes, unicamente, da concepção proposta pelo fabricante do comando.

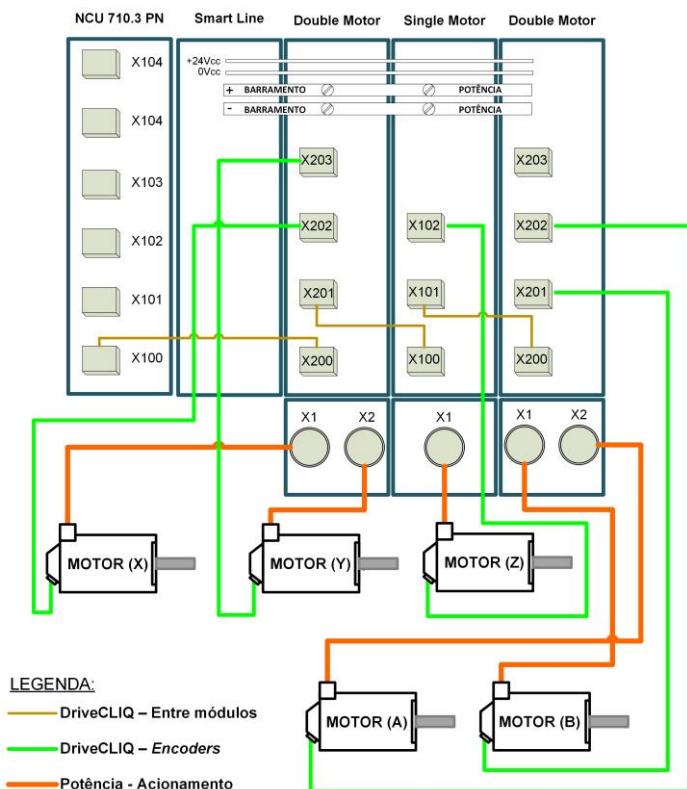


Figura 4.4 – Topologia da rede DriveCLIQ do PCP (Autor)

A topologia ilustrada na figura 4.4 foi adequada para o acionamento de 5 eixos de movimentação. O NCU tem capacidade de processamento para interpolar até 32 eixos simultaneamente.

Caso, no futuro, seja necessário fazer uma expansão do sistema LASER, inserindo mais eixos de interpolação, podem ser feitas duas diferentes ações: continuar a comunicação DriveCLIQ dos módulos a partir da porta X201 do segundo *Double Motor Module*, sendo necessário colocar os cabos dos *encoders* de A e B nas portas X202 e X203, respectivamente ou iniciar uma nova distribuição a partir da X101 da NCU. Ambas opções necessitam de nova configuração do CNC para identificação e ajuste dos novos eixos.

Os motores utilizados portam um *encoder* absoluto. A interface de comunicação deste *encoder* também é do tipo DriveCLIQ, conforme a ligação proposta na Figura 4.4. Caso seja necessário utilizar um *encoder* de outro fabricante (ou do mesmo fabricante, mas sem este protocolo de comunicação), é necessário utilizar um componente complementar, denominado SME, que permite adequar, qualquer tipo de transdutor de posição (*encoder*, *resolver*, régua óptica) ao padrão de comunicação Siemens.

É possível utilizar dois transdutores de posição distintos para o mesmo eixo. Por exemplo um *encoder* e uma régua óptica, ambos fazendo parte da topologia DriveCLIQ. Este é um procedimento comum em máquinas com exigências de exatidão e repetibilidade de posicionamento elevadas, em que o *encoder* é o responsável pela realimentação da velocidade e a régua óptica pela realimentação da posição. Desta forma, o sistema de realimentação de posição fica livre das interferências causadas por folgas mecânicas dos acoplamentos, de efeitos de *backlash* e de histerese no par fuso-castanha, além de erros relacionados ao passo do fuso (exemplo para sistemas mecânicos acionados por fuso), dando a “posição real” do sistema de movimentação, dentro das tolerâncias metrológicas fornecidas pelo transdutor.

No módulo NCU está integrado o processador de um controlador lógico programável (CLP), que possui total integração com o comando numérico do sistema. Nas NCU's modelo 710.3 PN, modelo utilizado no projeto do PCP, o modelo do processador do CLP é o 317-3 PN/DP. Como foi citado no Subcapítulo 2.2, o CLP é um item indispensável em máquinas CNC. Quando o interpretador detecta a presença de Funções-M, por exemplo, não há comandos de movimento, apenas comandos gerais, realizados de acordo com a lógica programada no *firmware* do controlador. Assim, são acionados os sistemas periféricos durante a execução dos processos.

Apesar da presença do CLP na NCU, este não disponibiliza nenhuma *I/O* (fisicamente) para comunicação com os componentes externos. Para isto, é preciso utilizar módulos de *I/O* digitais e analógicas, que permitam enviar/receber comandos ao/do CLP. Foram usados os seguintes módulos de *I/O*: 4 módulos de entrada digital, cada um com 8 entradas, 4 módulos de saída digital, cada um com 8 saídas, 1 módulo de entrada analógica (0-10V) com duas entradas e 2 módulos de saída analógica (0-10V), cada um com duas saídas. As *I/O*s disponibilizadas no PCP somam: 32 entradas digitais (DI), 32 saídas digitais (DO), 2 entradas analógicas (AI) e 4 saídas analógicas (AO).

Todos estes módulos são conectados em uma base que permite a interconexão entre os módulos até uma “central” denominada ET200S,

que comunica o estado das entradas ao NCU utilizando o protocolo de comunicação PROFINET. Esta é uma vantagem de utilização dos componentes relacionados ao CNC do mesmo fabricante. Todos os componentes possuem um protocolo de comunicação pronto e instalado nos módulos, sendo necessário apenas efetuar a conexão física entre os componentes e, posteriormente, fazer as configurações em *software*, facilitando assim o *Start-up* do CNC do sistema.

O número de entradas e saídas digitais disponibilizadas no PCP excede o necessário para completo funcionamento do sistema LASER na configuração atual proposta. A disponibilidade de *I/Os* livres permite, no futuro, adequações e reconfigurações do sistema, tendo em vista as necessidades em pesquisa. Basta haver uma alteração no programa do CLP e pequenas montagens em *hardware* para adequar o sistema LASER à uma nova necessidade. Caso, ainda assim, seja necessária a adição de mais entradas e saídas, digitais ou analógicas, basta adicionar os módulos que forem necessários e configurar devidamente o CLP, via *software*. Isto é possível devido ao carácter modular em que os conjuntos de *I/Os* foram concebidos.

O CLP é programado com o *software* comercial STEP 7 e permite utilizar algumas linguagens de programação, dentre as quais se destacam a linguagem STL e LADDER, sendo a segunda mais simples para confecção do *firmware* do CLP.

No sistema LASER desenvolvido, não seria possível obter uma total integração entre o CNC e o LASER sem a presença um CLP totalmente integrado ao CNC. Esta integração permitiu a criação de Funções-M, baseadas em Código-G, que permitem comandar o LASER e demais componentes periféricos para a realização de processos LASER.

Todas as configurações do sistema LASER (relacionadas ao CNC), assim como o programa do CLP, são gravadas em um cartão de memória *Compact Flash Card* (CF-Card) necessário para a inicialização da NCU. Neste cartão, deve estar gravado um *System Software*, que possui uma licença de utilização específica, fornecida pelo fabricante. Existem várias versões de *System Software*, variando com o modelo de NCU, com a atualização do sistema e com o número de eixos que serão numericamente comandados, sendo a versão padrão habilitada para o comando e interpolação de 3 eixos. O cartão CF-Card integrado ao sistema LASER desenvolvido, possui um *System Software* para interpolação simultânea de 5 eixos.

No Brasil, um *System Software* para interpolação simultânea de 4 eixos ou mais e sua respectiva licença é tratado com restrições que impedem seu livre comércio. Para a liberação dos 5 eixos, é necessário atender



às exigências impostas pelo fabricante. A instalação do 4º e 5º eixo (A e B) não fazem parte do escopo deste trabalho.

#### 4.1.3 Desenvolvimento Elétrico e de Potência

O desenvolvimento elétrico e de potência do PCP inclui os circuitos responsáveis por dar proteção elétrica aos diversos componentes do painel. Além disto, é relacionado aos componentes responsáveis por fornecer energia (potência) ao sistema de acionamento, sendo de fundamental importância para o funcionamento e a manutenibilidade do sistema LASER.

Como citado anteriormente, as seções (A) e (B) do painel contêm componentes relacionados à proteção inicial do PCP. Todo fornecimento de energia do painel passa primeiramente por estes componentes, assim que este é alimentado. A definição dos componentes de proteção foi baseada nas características da rede de fornecimento de energia elétrica no ambiente onde o sistema é instalado, a qual apresenta considerável instabilidade, especialmente relacionada a flutuações dos níveis de tensão trifásica 380 Vca.

A análise do sistema de potência e alimentação do PCP mostra que apenas dois componentes são alimentados com tensão trifásica 380 Vca. Tratam-se de fontes do sistema, uma relacionada ao acionamento dos motores e outra relacionada aos circuitos lógicos. Todos os demais componentes são alimentados a partir destas duas fontes. Portanto, estas devem ser protegidas eletricamente contra surtos decorrentes das instalações elétricas do local de operação. O dimensionamento dos componentes de proteção é baseado no consumo específico destes conversores, a partir dos dados de potência por eles fornecido.

A fonte de alimentação dos *drivers* para acionamento dos motores, Siemens, modelo *Smart Line*, é alimentada por 380 Vca trifásico e fornece 5 kW de potência. Esta fonte retifica a tensão de entrada CA, sendo sua saída em tensão CC, onde o valor da tensão de saída é dado pelo valor da tensão de alimentação de entrada multiplicado pelo fator 1,35 [46]. Portanto, sendo a entrada 380 Vca, a saída desta será 513 Vcc. Baseado nos valores de potência, conclui-se que, quando em sua saída estiverem sendo consumidos 5 kW de potência, a corrente de entrada da fonte é aproximadamente 13,2 A (considerando uma eficiência de 100 %).

A *Smart Line* é uma fonte específica para operar em conjunto com os *drivers* SINAMICS S120. Esta fonte é muito compacta e permite montagem junto aos outros componentes *Booksized* Siemens (CNC, *drivers*),

minimizando a necessidade de espaço no gabinete e facilitando a interconexão entre os módulos.

O circuito lógico, com tensão de 24 Vcc, é alimentado a partir de uma fonte chaveada, Siemens, modelo SITOP. Esta fonte converte a tensão trifásica 380 Vca em tensão 24 Vcc, fornecendo até 40A em sua saída. Tomando como base os valores de saída da fonte, chega-se ao valor de potência, sendo este de 960 W. Desta forma, considerando um rendimento de 100% da fonte, sem perdas em seu circuito interno, tem-se o valor aproximado da corrente de entrada, em condição de consumo máximo, sendo este 2,5 A. A corrente é baixa, devido à magnitude da tensão de entrada (380 Vca).

Somando as correntes das duas fontes, é possível inferir sobre a corrente máxima de entrada do PCP e, em consequência, sobre o valor da potência consumida. A corrente máxima, em regime, na entrada do PCP é de 15,7 A e a potência máxima consumida é aproximadamente 6 kW. Com base nestes valores, foram dimensionados os componentes iniciais do painel, que se referem ao suprimento de alimentação para todo o PCP e os demais módulos do sistema (tomadas, cabos, por exemplo) e os componentes de proteção contra surtos elétricos. A Figura 4.5 apresenta a primeira seção do painel, responsável pela alimentação e proteção.

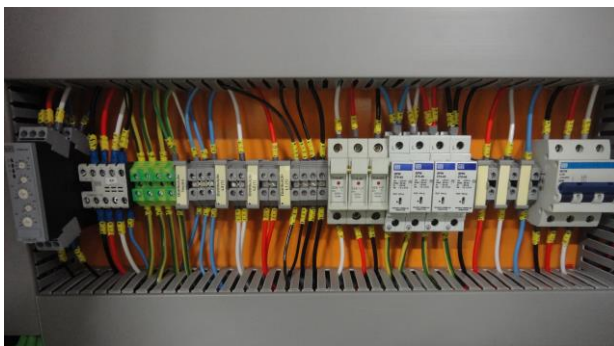


Figura 4.5 – Seção (A) do PCP montada – alimentação e proteção (Autor)

O PCP é alimentado a partir de uma tomada industrial, com capacidade de condução de 32 A, dotada de um pino para cada Fase, um pino para o Neutro e outro para o Terra (3P+T+N). Um cabo isolado (5 x 6mm<sup>2</sup>), ligado à tomada geral, conduz a energia elétrica para o interior do PCP. Na chapa lateral direita do painel foi instalado um “prensa cabo”, onde passa o cabo de alimentação. Este dispositivo visa travar o

cabo numa posição fixa, pressionando-o, impossibilitando a movimentação deste quando o cabo na parte externa do painel for tracionado, protegendo assim as conexões internas do painel. O primeiro componente conectado pelo cabo de alimentação é a seccionadora geral (chave geral), que liga e desliga o PCP. As três Fases e o Neutro passam pela seccionadora, enquanto o Terra é diretamente distribuído para o painel. O circuito de terra é formado por Bornes na cor mesclada verde-amarelo, específico para esta função, de acordo com norma NR-10, visando a identificação desta natureza de circuito.

O componente seguinte na linha de distribuição é o disjuntor de entrada do PCP. É uma prática comum em painéis elétricos instalar um disjuntor logo no início do circuito, para oferecer uma redundância de proteção para quem for efetuar uma manutenção no painel, garantindo que este esteja, de fato desenergizado, caso alguém externo ligue inadvertidamente a chave geral. A proteção oferecida por este disjuntor não é suficiente para evitar a queima dos componentes eletrônicos. Por isto, para cada uma das fontes, foi colocada uma proteção individual, como será mostrado a seguir.

A intenção inicial era que, logo após o disjuntor de entrada, fosse instalado uma seccionadora DR (diferencial residual). O objetivo deste componente é detectar, de forma rápida, fugas de corrente. Para isto, ele compara a corrente que passa por ele nas Fases e a que retorna pelo Neutro. Caso haja uma diferença maior que a estabelecida (no caso, 300 mA), ele deve seccionar, imediatamente, o fornecimento de energia para o sistema, protegendo assim os usuários contra choques elétricos e o sistema contra curtos circuitos que gerassem uma fuga de corrente. No entanto, ao instalar o componente, foi verificado que, quando o circuito de potência era energizado, havia uma queda repentina desta seccionadora. Foi verificado que isso era causado devido à característica de funcionamento dos filtros instalados no circuito de alimentação da fonte *Smart Line*, conforme requisito expresso pelo fabricante. Estes filtros, um de natureza capacitiva e outro indutiva, geravam um atraso na corrente do circuito, o que era detectado pelo DR como sendo uma fuga, inviabilizando o uso deste componente<sup>13</sup>.

Para proteger o painel contra eventuais descargas atmosféricas (raios) na rede de alimentação externa, foram instalados dispositivos denominados Supressor de Surto, um em cada Fase e para o Neutro. No caso

---

<sup>13</sup> Como foi verificado este problema após todo o painel ter sido montado, para não causar problemas relativos à identificação das conexões (anilhas), foram colocados 4 bornes, servindo apenas como conectores, para dar continuidade ao fluxo de alimentação, conforme pode ser visto na Figura 4.5.

de uma descarga elétrica com o sistema energizado, o dispositivo de proteção gera um curto circuito para o aterramento, impedindo que a alta corrente, proveniente da descarga, continue para os demais componentes do circuito. Logo após os supressores, foram instalados fusíveis, com característica de rompimento ultrarrápida, com objetivo de, caso haja alguma corrente remanescente, acima da estabelecida pelo fusível (no caso, 32 A), este rompa, impedindo a queima dos componentes seguintes, dando assim uma redundância à proteção.

O último componente de proteção é um relé, que tem por função detectar três diferentes problemas relacionados à alimentação: sub e sobre tensão, falta de Fase e troca na sequência de Fases. Para o PCP, a situação mais crítica é a variação dos níveis de tensão. As funções de detecção de falta de Fase e sequência de Fases oferecem uma proteção adicional. Este relé recebe as três Fases mais o Neutro e, constantemente, monitora o *status* da tensão trifásica. Ao detectar alguma irregularidade, baseado nos parâmetros nele inseridos, o contato do relé troca de estado (chave com contato reversível), sinalizando que uma falha ocorreu. Este componente foi instalado no fim da seção A do PCP, sendo o último componente das proteções iniciais do painel.

Este relé não tem função de seccionar o circuito trifásico e sim de detecção dos surtos da rede elétrica, funcionando como um sensor do estado da rede. Para seccionar o circuito, no caso de falha, foi utilizada uma contatora, com bobina acionada em 220 Vca (primeiro componente da extremidade direita da seção B do PCP). Desta forma, quando o painel é ligado, o relé faz a verificação da tensão. Caso não haja nenhuma divergência dos parâmetros, seu contato NA (normalmente aberto) será fechado. Este contato conduz uma das Fases até a bobina da contatora. O outro polo da bobina da contatora é constantemente conectado ao Neutro. Desta forma, se o contato do relé está fechado na posição NA, a bobina é energizada em 220 Vca, fazendo com que a contatora feche seus contatos, permitindo que o restante do sistema seja alimentado. Em contrapartida, ao identificar um problema na rede, o relé, dentro de um tempo programado em sua interface, irá mudar de estado, fazendo com que a tensão trifásica seja seccionada pela contatora, impedindo que as fontes sejam alimentadas.

Este relé, caso identifique uma falha, irá desenergizar a bobina da contatora que libera a tensão trifásica para as fontes. Caso ocorra, posteriormente, a ausência da falha, o relé não retorna ao modo de operação normal automaticamente. É necessário que seja feito um *reset* do componente, desconectando, temporariamente, as fases da tensão trifásica. Para

isto, foi instalada uma contatora antes deste relé, que tem sua bobina energizada (220 Vca) quando o botão, denominado “RESET TRIFÁSICO”, localizado no PCP, for acionado. Enquanto o botão permanece apertado, os contatos NF da contatora, onde estão ligadas as fases, trocam de estado, desenergizando temporariamente o relé de proteção, realizando a função de *reset* deste componente.

As proteções iniciais têm como objetivo proteger, de forma geral o PCP, mas não são eficazes para eventuais problemas na alimentação das fontes, individualmente. Para isto, antes da alimentação de cada fonte, foram instalados disjuntores e fusíveis, dimensionados de acordo com o consumo individual de cada uma.

Componentes de circuitos eletrônicos são muito sensíveis a elevações de corrente, acima de suas faixas de operação. A queima destes componentes é extremamente rápida e, para que sejam protegidos, precisam de um sistema seccionador também muito rápido. As fontes utilizadas, tanto a SITOP, quanto a *Smart Line*, são compostas por uma série de circuitos eletrônicos e, portanto, precisam de uma proteção adequada. Os disjuntores instalados não têm capacidade de protegê-las em caso de uma elevação súbita de corrente, devido ao tempo necessário para secção. Servem apenas como seccionadores dos circuitos, permitindo, por exemplo, que em caso de uma manutenção, seja desligado apenas parte do circuito para realização de testes e etc. Fusíveis normais também não são capazes de, em tempo hábil, seccionar um circuito eletrônico, impedindo sua queima.

Para dar uma proteção efetiva aos componentes, foram utilizados fusíveis ultrarrápidos, um para cada fase, instalados em seccionadoras porta-fusível especiais, com montagem baseada em trilho DIN, dando assim uma proteção eficaz aos componentes em casos de surtos de corrente. Os problemas relacionados a flutuações de níveis de tensão são protegidos no início da transmissão da alimentação ao painel, como foi explicado nos parágrafos anteriores.

Para a proteção dos *fans*, responsáveis por forçar a circulação de ar no interior do painel, foram utilizados fusíveis normais, apenas em uma fase, já que estes possuem alimentação 220 Vca. A Figura 4.6 mostra as seções F e G do PCP, em que estão instalados os componentes de proteção individual das fontes, com as devidas identificações.

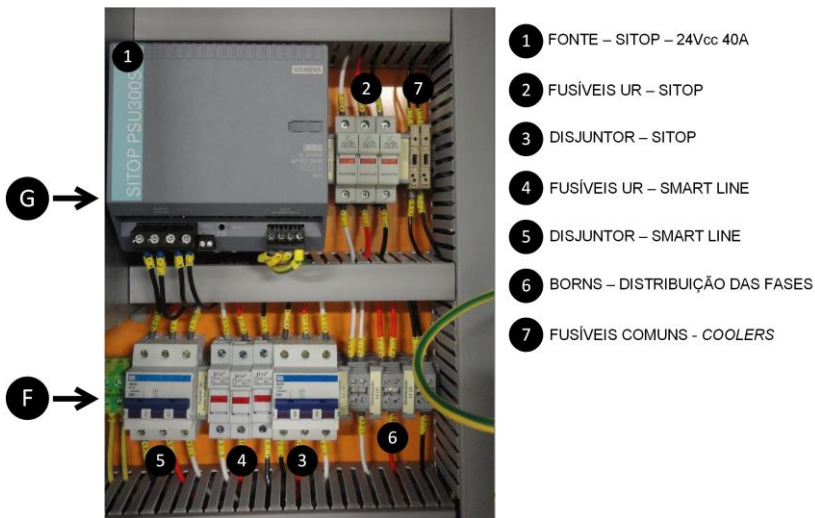


Figura 4.6 – Seções F e G do PCP (Autor)

#### 4.1.4 Desenvolvimento da Lógica e de Sinais

Uma das principais funções do PCP é reger a lógica de funcionamento do sistema LASER. Esta lógica tem a ver com o fluxo de sinais e com a devida sequência de acionamentos do sistema. Ainda tem função de estabelecer, de forma adequada, a comunicação com os sistemas periféricos.

Uma parte do circuito lógico muito importante em um painel elétrico de uma máquina ou sistema, talvez até a mais importante, é relacionada com a segurança. Tem como objetivo garantir que, em casos de emergência, o equipamento tenha um comportamento que garanta, da melhor forma possível, a proteção da própria máquina e, primariamente, a segurança do operador e de pessoas em seu entorno. Esta lógica está associada ao circuito de *intertravamento*. Este circuito considera todas as chaves fim de curso, por exemplo, relacionados à parada dos sistemas de movimentação, botões de emergência, botões diversos para ligar/desligar sistemas de potência, sistemas periféricos relacionados a possíveis situações de emergência, dentre outros componentes que se façam necessários.

No sistema desenvolvido, há um elemento que torna a segurança ainda mais necessária: o LASER. Uma série de restrições relacionadas ao uso de LASERS de alta potência devem ser observadas, todas relacionadas com a segurança, principalmente do usuário do sistema LASER, ou

de pessoas próximas. Portanto, o LASER deve estar devidamente integrado ao sistema do PCP, no que diz respeito a sua operação e segurança. Isto significa que, caso haja uma situação de emergência na fonte LASER, o PCP deve ser “informado” desta emergência e tomar as devidas providências. O contrário também é verdadeiro. Caso haja uma situação inesperada no sistema de movimentação, o PCP receberá os devidos comandos que deverão, de forma automática e segura, avisar ao sistema LASER a ocorrência de falha.

Caso não houvesse uma adequada comunicação entre os circuitos de emergência, o sistema mecânico poderia, por alguma situação de emergência, como acionamento dos sensores de fim de curso, parar, impedindo que este sistema seja prejudicado, no entanto, se o LASER não for informado desta situação, durante a emissão de um feixe, haveria uma continuidade da emissão do feixe LASER sobre uma região delimitada, o que resultaria numa situação ainda mais prejudicial e até mesmo perigosa para o sistema.

Foi elaborada uma lógica para o circuito de *intertravamento*, que associa todos os componentes relacionados à segurança do sistema LASER. No caso específico, este circuito tem a função final de liberar ou não a alimentação do sistema de potência (Fonte *Smart Line*) e de habilitar ou não o funcionamento do sistema LASER.

Os motores instalados nos sistemas de movimentação são dotados de um *Encoder Absoluto*. Este componente tem como objetivo realimentar o sistema de controle com informação de posição e velocidade dos módulos de movimentação. Pelo fato de ser absoluto, o controlador sabe, desde o momento em que o sistema é ligado, qual a posição real dos módulos, ao longo de todo o seu percurso. Isso habilita o uso de uma função do controlador denominada *software limits*, ou seja, determinar por *software* os pontos de parada dos eixos, sem necessidade de nenhum sensoramento adicional. No entanto, como os sistemas mecânicos utilizados foram desenvolvidos com característica de modularidade, com intuito de serem, caso necessário, instalados com outros motores e outros sistemas de controle, que porventura, não tenham este transdutor com característica absoluta, optou-se por instalar, em todos os três eixos de movimentação, chaves fim de curso mecânicas. Além de garantirem uma melhor modularidade dos sistemas, estas chaves fim de curso dão uma característica de redundância à segurança ao sistema LASER, no sentido de proteção contra colisões mecânicas.

O circuito de *intertravamento* é composto pela associação de componentes em uma lógica combinatória que, da melhor forma, oferece as características de segurança do sistema, do seu usuário e dos entornos. As

chaves fim de curso utilizadas são comutadores mecânicos, compostos por um contato comum, um normalmente aberto (NA) e outro normalmente fechado (NF). A Figura 4.7 ilustra a primeira parte do circuito de *intertravamento* projetado, que contempla todas as chaves fim de curso dos sistemas de movimentação do sistema.

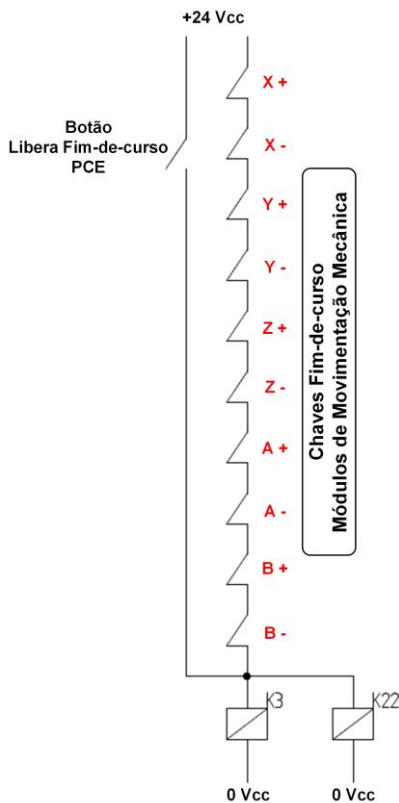


Figura 4.7 – Circuito de *intertravamento* – Parte I (Autor)

Conforme o diagrama esquemático da Figura 4.7, as bobinas dos relés K3 e K22 são energizadas apenas se todas as chaves de fim de curso estiverem em seu estado NF, ou seja, não estiverem acionados. É uma associação em série, formando uma lógica “E”. As chaves relacionadas aos relés K3 e K22 irão compor outras partes do circuito de *intertravamento*, indicando que a primeira parte foi plenamente satisfeita.



Em caso de acionamento de qualquer fim de curso de um dos 5 eixos, haverá o corte imediato da alimentação da fonte de potência do sistema, o que, em consequência, causará a parada dos eixos de movimentação. Não é possível movimentar estes eixos manualmente, devido à presença de freios magnéticos em cada motor, que ao ser retirada a alimentação travam instantaneamente o eixo do motor. Para possibilitar a movimentação dos eixos, com intuito de sair da situação emergencial de parada do sistema de movimentação, foi previsto um botão, denominado “Libera Fim de Curso”, que oferece um *by-pass* para o acionamento das bobinas K3 e K22 para, provisoriamente, possibilitar a movimentação do eixo que atingiu a chave de fim de curso. Este botão é instalado no Painel de Comando Externo (PCE), onde o operador tem a possibilidade de atuar sobre os sistemas de movimentação.

Outro componente essencial para a composição de um circuito de *intertravamento*, são os botões de emergência. Eles são acionados pelo operador ou pessoas que estejam nas imediações do sistema em situações de emergência que necessitem de uma parada imediata da operação. Aqui, entra um componente não tão convencional, relacionado especialmente a paradas de emergência: o relé de emergência.

A norma NR-12 aponta a obrigatoriedade de utilização de relés ou contadoras de emergência na administração dos sinais oriundos de botões de emergência. O relé de emergência possui um funcionamento diferenciado dos convencionais, principalmente pela característica de redundância do seu circuito. Isto tem como objetivo afastar a possibilidade de o comando de emergência não ser, em um curto espaço de tempo, atendido, tirando ao máximo a possibilidade do componente de emergência (relé) falhar. Neste projeto, foi utilizado um relé de emergência da fabricante WEG, modelo CP-D, conforme o ilustrado na Figura 4.8.

Conforme mostrado no diagrama de blocos da Figura 4.8, dois contatos separados de um botão de emergência são conectados na entrada, os quais são separadamente processados pelo circuito de controle. O comando é dado por dois relés de segurança internos, redundantes, que acionam, cada um, três chaves NA e uma NF, internamente, conectadas em série. Estas chaves são as saídas do relé e, portanto, são as utilizadas para compor o circuito de *intertravamento* [47].

O principal botão de emergência do sistema LASER foi instalado no PCE, já que é, em princípio, onde o operador estará ao identificar a situação emergencial. No entanto, outros dois botões foram instalados. Um deles foi alocado no PCP, com objetivo de assegurar a parada de emergência de dentro da Sala de Processos, caso alguém esteja em seu interior durante a execução de um processo (o que não deve acontecer).

Outro botão faz parte do componente de operação móvel da máquina (BHG), utilizado apenas para movimentações do equipamento em função JOG, especialmente para situações de referenciamento da posição da peça (*zeramento*) (este componente será, posteriormente devidamente explicado).

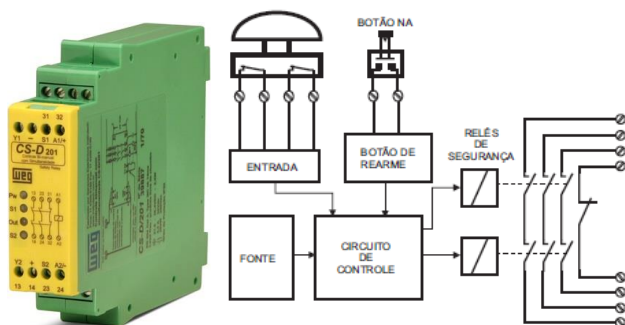


Figura 4.8 – Relé de Emergência e esquema de funcionamento [47]

Os três botões de emergência, o relé de emergência e os contatos do relé K3 e K22 formam a segunda parte do circuito de *intertravamento*. Esta parte do circuito é ilustrada na representação esquemática da Figura 4.9.

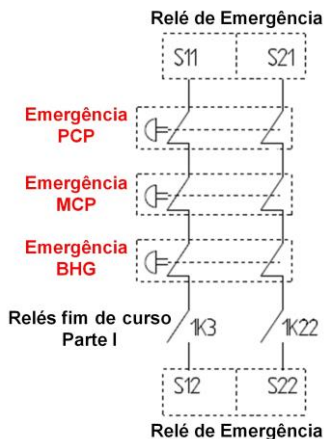


Figura 4.9 – Circuito de *Intertravamento* – Parte II (Autor)

Cada botão de emergência utilizado é composto por dois blocos de contato NF. Assim, são formados dois circuitos em série, cada um composto pela associação dos blocos de contato de cada um dos três botões. Os contatos dos relés K3 e K22 foram associados a estes circuitos em série com objetivo de inserir no processamento redundante do relé de emergência, os sinais referentes à detecção de fim de curso.

A terceira parte do circuito de *intertravamento* engloba os aspectos de segurança da associação do PCP com a fonte LASER. O primeiro aspecto importante que deve ser destacado nesta fase do projeto diz respeito à característica de modularidade e reconfigurabilidade do sistema. O principal objetivo do sistema de movimentação, no escopo deste projeto, é que este opere utilizando como efetuator final a energia luminosa de um feixe LASER, com o intuito de processar materiais. Para isto, o sistema de comando e controle, associado ao PCP, deve possuir total integração com a fonte LASER, principalmente em seus aspectos relacionados à segurança.

Tratando-se do projeto de um equipamento com fins de pesquisa, em que as demandas sofrem constantes alterações, é interessante que o sistema permita a inserção de outros efetutores finais para realização de outros processos. Por exemplo, acoplar uma tocha MIG ao eixo Z do sistema de movimentação, com objetivo de realizar ensaios de soldagem a arco.

Para que isto seja possível, a lógica de *intertravamento* do PCP não pode ser absolutamente dependente, em todas as circunstâncias, do circuito de segurança da fonte LASER. Deve ser possível desacoplar os sistemas, permitindo a realização de reconfiguração do sistema quanto ao efetuator final e, ainda assim, manter a segurança do processo. Com este intuito, foi inserida uma chave no PCE (conforme será detalhado na próxima seção deste capítulo), para acoplar/desacoplar a fonte LASER ao sistema de segurança.

Apesar do sistema LASER ter sido projetado para ter possibilidades de reconfiguração, o PCP apenas terá integração garantida com a fonte LASER descrita nas restrições de projeto, apresentadas no Subcapítulo 3.1.3, ou de fontes desenvolvidas pelo mesmo fabricante e que possuam as mesmas interfaces de sinais que o LASER utilizado. Esta definição tem uma importância significativa nesta fase de projeto, tendo em vista que a interface relativa ao *intertravamento* do LASER foi considerada para o projeto da terceira parte do circuito de *intertravamento* do PCP.

A Figura 4.10 apresenta o diagrama esquemático elétrico da terceira parte do circuito de *intertravamento* do PCP. As três partes do *intertravamento* estão totalmente interligadas. Elas foram separadas na forma apresentada apenas para simplificação do projeto e separação das áreas de segurança do sistema, sendo a primeira responsável pela segurança relacionada às chaves fim de curso, a segunda aos botões de emergência e a terceira relacionada a segurança de operação do equipamento.

A primeira chave (superior esquerda) do circuito, denominada POTÊNCIA ON, está relacionada ao comando do operador para habilitação do circuito de potência. Ou seja, mesmo que todas as condições relacionadas à segurança estejam plenamente satisfeitas, caso este botão não seja pressionado, não haverá a habilitação do circuito de potência do PCP. As duas chaves paralelas ao botão são contatos dos relés K4 e K14, sendo estes os responsáveis pela retenção do circuito. Este botão não pode ter retenção própria, com objetivo de obrigar o operador a, propositalmente, pressioná-lo todas as vezes que desejar habilitar a potência do sistema, evitando assim seu acionamento acidental. Para isto, foi utilizado um botão do tipo *push button*, que não fica constantemente acionado ao ser pressionado.

Assim, é necessário um artifício lógico que permita, ao pressionar o botão, acionar um relé, fazendo com que o seu contato sirva como retenção para a função relacionada ao botão. Quando houver alguma interrupção do circuito de segurança, este relé muda automaticamente de estado. Desta forma, quando o circuito estiver novamente habilitado para funcionar, é necessário acionar novamente o botão para habilitar o circuito de potência. Outra função atribuída a este botão (contato duplo) é a de acionar o relé de emergência, denominado no diagrama de blocos da Figura 4.8 como “Botão de Rearme”, necessário para todas as vezes em que o relé precise ser rearmado, ou seja, todas as vezes em que houver o acionamento de um dos botões de emergência instalado no equipamento.

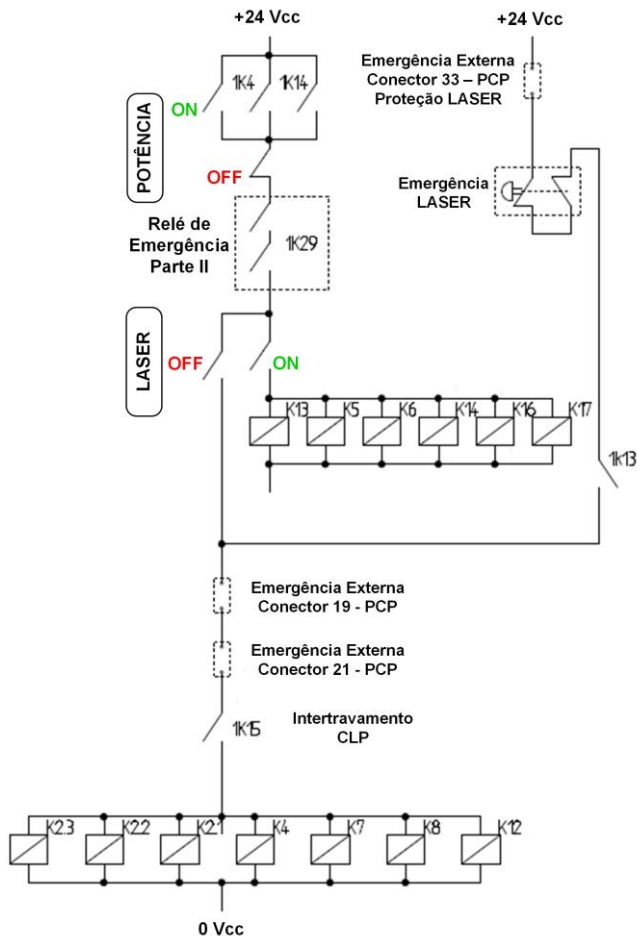


Figura 4.10 – Circuito de *Intertravamento* – Parte III (Autor)

Logo abaixo do botão POTÊNCIA ON, há o botão POTÊNCIA OFF, que desabilita a potência do sistema, sem o acionamento de nenhum botão de emergência. Abaixo deste, foi colocada um dos contatos duplos do relé de emergência, fazendo assim a comunicação entre a segunda e a terceira parte do circuito.

Abaixo dos contatos do relé de emergência, seguindo a sequência do circuito, foi colocada a chave de seleção que acopla, ou não, o circuito de *intertravamento* da fonte LASER para a segurança (citada anterior-

mente). Esta chave leva, naturalmente, a uma divisão do circuito, formando 2 “braços” distintos. Caso a opção selecionada seja LASER OFF, ou seja, desacoplamento da fonte LASER, o circuito segue pelo “braço” esquerdo, sendo a lógica abaixo dele comum ao restante do PCP. Caso seja selecionada a opção LASER ON, o circuito será ligado ao “braço” direito, levando a outra lógica, que conecta o circuito de *intertravamento* da fonte LASER ao PCP. Nesta opção, o “braço” esquerdo do circuito também é acionado, por se tratar de uma lógica comum ao funcionamento do PCP. Primeiramente, será abordado o circuito relacionado à opção LASER OFF.

Com o objetivo de dar mais flexibilidade nas atividades de reconfiguração do sistema LASER, foram previstos dois contatos abertos, sem nenhuma chave associada. Estes contatos são entradas para conexão de sinais de emergências externas, disponibilizados por meio de conectores na lateral do PCP (conectores 19 e 21). Estes conectores permitem a conexão de equipamentos periféricos ao sistema LASER que, porventura, possuam circuitos de *intertravamento* próprios, permitindo assim a interligação entre os sistemas de segurança.

Pode haver necessidade de estabelecer alguma lógica, relacionada a *intertravamento*, baseada completamente em *software*, ou seja, elaborada no *firmware* do CLP. Até mesmo uma lógica paralela ao circuito físico que foi desenvolvido pode ser feita em *software*, dando ao sistema maior redundância, procurando impedir tanto quanto for possível, a ocorrência de falhas. Com este objetivo, uma saída do CLP foi designada ao acionamento do relé K15 e seu respectivo contato foi posicionado logo abaixo das emergências externas. Desta forma, é possível incrementar o circuito de *intertravamento* sem a necessidade de realizar nenhuma alteração nos fios do circuito físico, apenas fazendo alterações em seu *firmware*. Isto permite uma característica de reconfigurabilidade ainda melhor, possibilitando que além das emergências externas, outros equipamentos possam ser devidamente ligados ao PCP, garantindo a segurança de operação de todo o sistema.

Caso todas as condições descritas forem satisfeitas, as bobinas K2.3, K2.2, K2.1, K4, K7, K8 e K12 serão acionadas. Isto é o suficiente para habilitar o PCP para comandar e fornecer potência na realização de movimentações, sem a presença do LASER.

As bobinas K2.3, 2.2 e 2.1 são relacionadas a contadoras, responsáveis por seccionar, de acordo com o estado do *intertravamento*, a energia para a fonte *Smart Line*. Cada contadora conecta uma das fases. O circuito foi desenvolvido desta forma para que houvesse a divisão da corrente total em 3 chaves distintas, já que não houve disponibilidade de ser

usada uma contatora única, com capacidade de corrente suficiente e acionamento em 24 Vcc. O relé K4 é referente à retenção do botão POTÊNCIA ON, conforme explicado anteriormente.

Nos mesmos conectores em que foram previstas entradas para conexões de emergências externas ao PCP (*inputs* conectores 19 e 21), foram disponibilizadas duas *outputs* (uma para cada emergência externa), sendo estas formadas por contatos livres de potencial, que visam sinalizar aos sistemas externos a ausência de situação de emergência no PCP. Estes contatos estão relacionados aos relés K7 e K8. Desta forma, é possível *intertravar* o PCP por meio de uma emergência externa qualquer (*inputs*), assim como é possível *intertravar* um equipamento periférico através de uma situação de emergência do PCP (*outputs*).

O Relé K12 foi alocado nesta posição para possibilitar a sinalização da situação do *intertravamento*. Em seu contato comum, foi aplicada uma tensão de 24 Vcc. Quando o relé está em seu estado normal, sem alimentação da bobina, a corrente circula pelo contato NF ligado a um LED amarelo instalado no PCE, para visualização constante pelo operador, com a inscrição “INTERTRAVAMENTO”, indicando assim que há algum componente relacionado à emergência do sistema impedindo a habilitação do circuito de potência. Quando a bobina deste relé é alimentada, os contatos trocam de estado, fazendo com que o LED amarelo apague e que a corrente circule pelo contato NA, conectado a um LED verde, também instalado no PCE, com a inscrição “POTÊNCIA”, indicando que o circuito de potência do PCP está habilitado e que, em consequência, o sistema pode operar normalmente.

Uma vez satisfeitas as condições deste “braço” da terceira parte do *intertravamento*, o sistema pode operar normalmente, com emergências externas, mas sem a conexão com a fonte LASER. A seguir, será detalhado o funcionamento desta parte do circuito de *intertravamento*, quando selecionada a opção LASER ON.

O relé K14 serve como uma retenção ao botão POTÊNCIA ON, tendo em vista que, ao trocar a chave para a posição LASER ON, o relé K4 terá, temporariamente, seu estado alterado, sendo necessário pressionar novamente o botão. Ele também é necessário, tendo em vista que o relé K4, que também serve de retenção para o botão, está associado a outra parte do circuito e não servirá para dar continuidade ao *intertravamento* na seleção LASER ON. O relé K13 tem como objetivo habilitar o “braço” direito do circuito, que permitirá o acionamento das bobinas gerais do sistema (“braço” esquerdo), as quais foram anteriormente detalhadas.

A fonte LASER disponibiliza uma interface de comunicação relacionada a sua segurança (conector XP2). Trata-se de um conector com 16

pinos, sendo cada um uma *I/O* com função determinada, conforme o manual do fabricante [37]. A interface de comunicação entre o PCP e a fonte LASER será detalhada posteriormente. A fonte LASER necessita, para seu circuito de emergência, de dois contatos, livres de potencial (contatos secos), que devem ser conectados em 4 pinos específicos desta porta XP2 (C1-C4 e C2-C3). Quando estes contatos estão fechados, o LASER reconhece que o equipamento ligado a ele está livre de situações de emergência. Os relés K5 e K6 suprem esta função, disponibilizando 2 contatos quando o sistema de *intertravamento* está sem nenhuma emergência habilitada. Desta forma, o PCP funciona como uma emergência externa da fonte LASER.

A fonte LASER ainda disponibiliza outra interface de comunicação denominada XP1, que fornece 48 pinos relacionados a *I/Os* que permitem receber sinais para comandar o LASER a partir de um sistema externo (*inputs*), no caso o PCP, assim como enviar sinais referentes às condições gerais de funcionamento da fonte (*outputs*). Esta interface é habilitada apenas quando a fonte LASER está configurada na função *ROBOT* (seletor manual na parte frontal do painel da fonte LASER), designada para habilitar o comando externo da fonte a partir de robôs ou máquinas em geral. Para efetivar o comando externo, a fonte LASER necessita de dois sinais, um denominado *LASER REQUEST* e outro denominado *ANALOGUE CONTROL ON*, ambos ativos com nível lógico alto (*high active*). Para que estes pinos sejam alimentados, são utilizados os relés K15 e K17, respectivamente.

Na parte superior direita do circuito, foi posicionada uma espera para um contato livre de potencial, disponibilizado por um conector instalado no PCP (*input* - conector 33). Funciona como uma emergência externa de um sistema periférico, mas reservada para uma função específica. Como tratado na Subseção 3.2.4.4, há uma preocupação com relação à proteção do LASER e do *chiller*, no que diz respeito à alimentação destes, principalmente tendo em vista a instabilidade da rede. Em vistas disto, o objetivo dessa espera é permitir que possa haver uma comunicação entre o sistema de monitoramento do estado da rede elétrica, instalado no painel de alimentação do LASER e o *chiller* (será abordado no Subcapítulo 4.4). Desta forma, caso sejam detectados problemas na rede, é possível desabilitar o sistema de potência da fonte LASER em um regime de emergência, utilizando a interrupção do circuito de *intertravamento* do PCP.

Abaixo, seguindo o circuito, há mais um botão de emergência. Este pertence à fonte LASER (instalado na parte frontal do painel da fonte LASER). Seus contatos são disponibilizados pela interface XP2, com objetivo de informar ao equipamento que o controla, no caso o PCP, que o



botão de emergência do LASER foi pressionado. No circuito interno da fonte LASER, este botão está devidamente ligado a um relé de emergência. Portanto, assim como os botões de emergência instalados no PCP, este também possui monitoramento redundante.

A Figura 4.11 ilustra parte da seção B do PCP, especificamente dos relés utilizados, em boa parte, para compor o circuito de *intertravamento*. À esquerda está o relé de emergência (verde e amarelo) e à direita estão 26 relés 24 Vcc com contato reversível NA-NF, todos do modelo *slim*, para economia de espaço no interior do painel. Estes relés também possuem a vantagem de permitir a substituição apenas do módulo do relé, sendo desnecessário retirar toda a base, em que os cabos estão conectados.

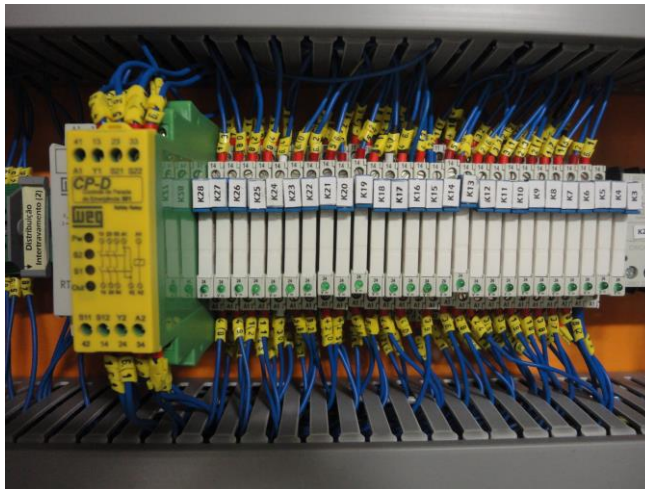


Figura 4.11 – Seção B do PCP – Relés da lógica e de *intertravamento* (Autor)

#### 4.1.5 Interfaces de Comunicação do PCP

O painel de comando principal, PCP, é o módulo que gerencia todo o funcionamento do sistema LASER. Todos os módulos do sistema, assim como a fonte LASER, sistemas periféricos, emergências externas e sistemas de movimentação precisam ser conectados ao PCP para que possa haver um efetivo comando/controle de todo o sistema. Tendo em vista essa característica, necessita de uma interface de comunicação adequada que permita realizar as devidas conexões com os elementos que compõem

o sistema LASER. Para isto, foi projetada uma placa metálica para montagem sobre uma abertura na lateral do PCP, tem por objetivo agrupar, de forma organizada, todos os conectores do PCP, necessários para as comunicações com os elementos do sistema. A Figura 4.12 mostra esta placa, cortada e gravada por LASER, montada no PCP com os conectores e as devidas identificações.

Esta placa, assim como todo projeto, foi primeiramente desenvolvida computacionalmente utilizando *software* CAD 3D, o que possibilitou sua fabricação pelo processo de corte a LASER. Do ponto de vista de fabricação e montagem, a utilização de uma placa postíça no gabinete é uma solução que facilita muito a construção do painel, especialmente quando comparado ao método tradicionalmente utilizado na montagem de painéis elétricos (furação e instalação dos conectores diretamente nas chapas da estrutura do próprio painel). Este método necessita de uma série de procedimentos manuais, demandando um tempo para a demarcação dos locais de furação/corte, além de ser muito mais suscetível a existência de falhas.



Figura 4.12 – Placa de Interface com conectores (Autor)

A placa de conectores contém 32 furos e rasgos para instalação dos conectores de interface do PCP, chave geral (seccionadora principal), 1 botão de emergência e 1 botão de reset (“RESET TRIFÁSICO, seção 4.1.3).

Para a identificação dos conectores, foi elaborada uma numeração das conexões entre os módulos, de forma que todos os conectores do PCP foram identificados utilizando número ímpares. Os números pares, foram associados aos demais módulos do sistema. A partir de um diagrama simples, é possível orientar um usuário habilitado a realizar a desmontagem e posterior remontagem do sistema LASER, sem a necessidade deste ser um especialista especificamente treinado para esta operação. Esta solução reforça a característica de modularidade do sistema e garante a qualidade do processo de remontagem.

A placa de conectores, assim como outras placas de montagem que se fizeram necessárias no sistema, foi fabricada em Aço Inoxidável (AISI 304), tornando desnecessária a realização de tratamentos de acabamento, como pintura. Para a confecção da “arte” da placa, com objetivo de identificar devidamente cada conector e separar, na medida do possível, os conjuntos de conexão, foi utilizado o processo de marcação a LASER, processo possível devido ao projeto computacional do PCP.

Cada conector fixado na placa possui “n” pinos de conexão. Cada um destes pinos está associado a um sinal, seja este de entrada ou saída, e, em consequência, necessita de um cabo que faça a interconexão do pino do conector até devido local, interno ao PCP.

Assim, cada conector foi associado a um conjunto de bornes, localizados nas seções C e D do PCP. Estes conjuntos de bornes são identificados pelos componentes denominados “identificadores de grupo”, instalados em Trilho DIN e permitem identificar com etiquetas, a função de cada grupo de bornes. Cada pino dos conectores, está associado a uma conexão de um borne. Desta forma, quando este sinal precisa ser utilizado, não é feita uma conexão direta do conector, mas a partir da conexão do borne, relativa ao sinal desejado. Além disto, estas conexões, assim como todas feitas no painel, são identificadas por anilhas, contendo caracteres alfanuméricos, todas devidamente especificadas em todos os esquemáticos elétricos.

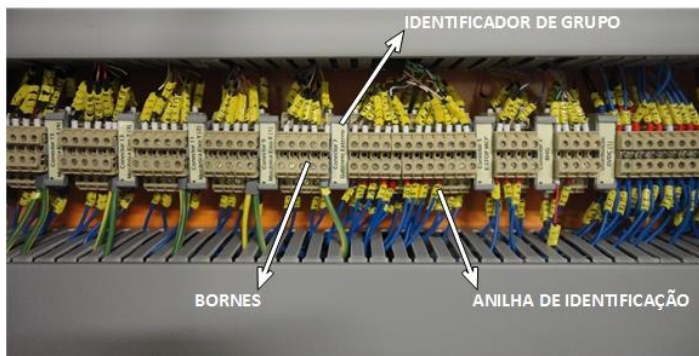


Figura 4.13 – Organização do circuito de sinais – PCP (Autor)

Cada conexão feita no painel possui um “código” próprio, identificadas por um conjunto de anilhas. Com relação aos conectores, especificamente, foi utilizada a seguinte codificação: cada conexão entre um conector e um borne possui o código X-C-Y, onde X é o número do conector (numeração gravada na placa de conectores e identificada nos esquemáticos elétricos), C é o caractere que identifica a conexão entre conectores e Y o número do pino do referido conector. O “Conector 3”, por exemplo, possui 8 pinos. Portanto, suas identificações são, em ordem crescente: 3C1, 3C2, 3C3 até 3C8.

Esta codificação ordenada, utilizada para todas as naturezas de conexão do sistema LASER, tem por objetivo facilitar futuras manutenções, além de permitir um melhor entendimento dos circuitos em futuras adequações que venham ser necessárias. Neste texto, não serão tratadas as demais codificações.

Todos os cabos para conexão entre os módulos e entre os sistemas periféricos foram montados utilizando cabos blindados, com malha de aço, conectando a malha sempre no conector ímpar, ligado ao PCP. Desta forma, todas as correntes induzidas nas malhas têm um só sentido de fluxo, sendo este o sentido módulo-PCP. Como os conectores são metálicos, há uma conexão direta com a estrutura mecânica do painel, que está devidamente conectada ao circuito de aterramento, exclusivo para o sistema LASER. Para conexão interna do painel, entre conector e conjunto de bornes, também foram utilizados cabos blindados, aterrados na placa de conectores. Isto tem por objetivo evitar que hajam interferências eletromagnéticas nos circuitos de sinais do sistema, causadas pelos circuitos de potência do PCP ou por sistemas externos e próximos aos módulos.

## 4.2 Painel de Comando Externo

A principal função do painel de comando externo – PCE – é propiciar uma interface entre o usuário e o sistema LASER. De forma distinta ao PCP, em que as escolhas e decisões foram feitas, observando, principalmente, as necessidades do sistema LASER como um todo, o PCE foi projetado e construído considerando, principalmente, o operador do equipamento.

A partir do PCE, o usuário comanda todo o sistema, escrevendo ou inserindo os programas de peça em linguagem Código-G, ou utilizando botões específicos disponibilizados no painel para algumas funções de movimentação e comando de periféricos. Neste painel, o usuário tem a possibilidade de supervisionar o *status* do sistema LASER, antes, durante e posterior à execução de um processo.

Comparado ao PCP, o PCE possui uma pequena quantidade de componentes, especialmente eletrônicos. O projeto do gabinete do PCE foi desenvolvido especificamente para o sistema LASER. Para melhor organização do Subcapítulo, este será dividido nas seguintes Seções: Projeto Mecânico; Composição do Sistema CNC; Operação e Comunicação do PCE.

### 4.2.1 Desenvolvimento Mecânico

Na concepção mecânica do gabinete foram consideradas questões relacionadas a ergonomia e operacionalidade do sistema. Foram previstas sinalizações e identificações muito claras sobre os *status* e comandos do sistema, especialmente motivado pelo fato de os tempos de operação nos ensaios dos processos propostos serem curtos<sup>14</sup> (soldagem, por exemplo, alguns segundos), sendo necessário que o operador seja alertado por sinais luminosos e sonoros que identifiquem, de forma clara, o estágio no qual o processo se encontra.

Concepções alternativas do PCE foram avaliadas, variando características de movimentação (fixo ou móvel), características estéticas e os materiais utilizados para fabricá-lo. Tendo em vista o aspecto modular do sistema, projetou-se um painel móvel, conectado ao PCP por cabos ligados a sua interface de conexão. Empregou-se perfis modulares de alumínio sobre os quais é fixada a carenagem de aço ABNT 1020, cortada a

---

<sup>14</sup> Em boa parte dos processos realizados, o procedimento de *zeramento* da peça e de configuração prévia do sistema é demasiadamente maior que o próprio tempo de execução do processo. Isto é especialmente verdade tratando-se do processo de soldagem. No entanto, no processo de LASER *cladding*, o tempo de processo pode ser bastante elevado, dependendo da quantidade de camadas sobrepostas e da área processada.

LASER e dobrada, para servir de suporte aos diversos componentes que formam o painel, oferecendo ainda proteção aos componentes eletrônicos alocados em seu interior, especialmente contra impactos.

O projeto do PCE foi desenvolvido computacionalmente, utilizando *software* CAD 3D. No projeto deste gabinete isso foi ainda mais importante, tendo em vista que os perfis deveriam ser comprados e cortados nas dimensões especificadas e que as chapas deveriam ter seus arquivos de corte (LASER) e dimensões de dobra, geradas pelo *software* CAD. A Figura 4.14 ilustra uma imagem renderizada deste modelo.



Figura 4.14– Renderização PCE.

O PCE é composto por 3 partes principais. A base da estrutura é formada por uma chapa de Aço ABNT 1020 com espessura de 25mm, com objetivo de dar estabilidade ao PCE. Sobre a base, a coluna composta por dois perfis modulares de alumínio (90x90 mm), espaçados entre si, sustenta o gabinete. O espaço entre os perfis é coberto por chapas metálicas, conduzindo em seu interior os cabos que ligam o PCE ao PCP. Na parte superior, é instalado o painel elétrico com os componentes, tanto internos como externos. Na base, foram instalados 4 rodízios, 2 fixos e dois móveis com freio, com intuito de proporcionar certa mobilidade ao painel.

O acesso aos circuitos é realizado pela porta posterior do PCE. Esta porta abrange praticamente toda a parte superior traseira do gabinete, facilitando o acesso para montagem e para realização de manutenções. Para alocar os componentes eletrônicos de pequeno porte, foi instalada uma placa de montagem, seguindo a mesma lógica do proposto no PCP, para fins de padronização.

O componente que mais aquece no interior do PCE é o PC Industrial, alojado na parte superior do gabinete do PCE. O PC possui um resfriador (*cooler*) próprio, que força a circulação pelo interior do PC, empurrando o ar quente para fora de sua estrutura. Na parte superior da carenagem lateral direita, foi montado um *fan* externo, com objetivo de forçar a retirada de ar quente do interior do painel. Na carenagem lateral esquerda, foi instalada uma grade com filtro, permitindo a entrada de ar filtrado no painel. A posição do PC e do resfriador do gabinete foram definidos de tal forma que o fluxo de ar logo da saída do PC acompanhe o fluxo do ar no interior do gabinete, evitando que os demais componentes sofram aquecimento pelo ar que sai do PC. Os demais componentes do painel sofrem pouco aquecimento, não necessitando de uma circulação de ar forçada para resfriamento. Assim, é assegurada uma circulação de ar adequada no interior do PCE.

A Figura 4.15 apresenta a parte interna do PCE, apontando os principais itens internos do painel, inclusive os componentes do sistema CNC, os quais serão abordados na próxima Seção, e destacando o fluxo principal de ar no interior do gabinete (setas em azul: entrada de ar filtrado, saída de ar quente do PCU, saída de ar quente do PCE, da direita para a esquerda).

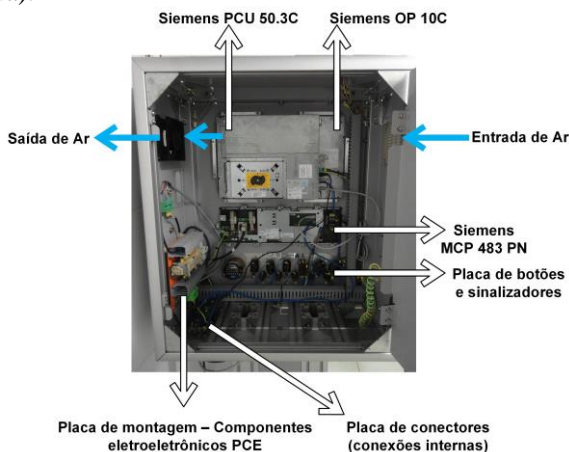


Figura 4.15 – Alocação de componentes no interior do PCE (Autor)

#### 4.2.2 Composição do Sistema CNC

O PCP contém toda a parte de controle do sistema LASER, sendo o responsável por controlar os sistemas de movimentação, comandar os periféricos, dar segurança por *intertravamento*, *interfacear* e comunicar com fonte LASER, dentre outras funções. No entanto, apesar de todas estas atribuições, não dispõe de nenhum componente de interface com o usuário, relacionado ao comando do sistema. Conforme o proposto no Projeto Conceitual, Subcapítulo 3.2, a atribuição de proporcionar uma interface adequada entre usuário e o sistema LASER é dada ao PCE.

Como o sistema LASER é baseado em um comando numérico, é necessário que os componentes de interface com o usuário, dispostos no PCE, tenham total integração com o CNC utilizado, o SINUMERIK 840D SL. Neste caso, verifica-se mais uma situação em que é restritiva a utilização de componentes do mesmo fabricante. Foram utilizados 3 componentes: OP10C (*Operator Panel*), PCU 50.3C (*Personal Computer Unit*) e MCP 483PN (*Machine Control Panel*), todos Siemens. Estes componentes estão apontados na Figura 4.15.

O componente OP10C é a IHM, instalado na parte frontal do PCE. É dotado de uma tela plana de 10", um teclado alfanumérico, para inserção de programas diretamente no CNC e de teclas especiais para navegação no *software* do CNC. No interior do gabinete, atrás do OP10C, é instalado o PCU50.3C. O PCU é um computador de arquitetura industrial, robusto para situações severas de utilização<sup>15</sup>, ligado ao OP10C apenas por 2 cabos *flat*, disponíveis no próprio OP e com espera no PCU.

Para que o usuário possa utilizar o CNC, é necessário que um *software* gere uma interface gráfica adequada para interação usuário-máquina, que permita a inserção de comandos e programas e que expresse visualmente as informações de controle e monitoramento do equipamento. Neste caso, o *software* é denominado "SINUMERIK Operate", instalado no PCU e baseado no sistema operacional Windows® XP.

Ao iniciar o PCU, o *software* é automaticamente aberto. As funções relativas ao Windows® são vetadas ao usuário. Neste caso específico, a função do PCU se restringe ao funcionamento deste *software*, habilitando a interação do usuário, além de fornecer interface de comunicação para envio de comandos realizados, do PC para a NCU (PCE - PCP), e de

---

<sup>15</sup> Neste caso, utilizou-se o termo "situações severas de utilização" relacionando as situações de ambiente de operação, tais como alta temperatura ambiente, vibrações no solo, horas de operação ininterrupta, dentre outras. A Robustez está relacionada à confiabilidade do processamento e da comunicação deste componente, mesmo quando submetido a situações extremas como as citadas, muito comuns em ambientes industriais.



recebimento de dados de monitoramento fornecidos pela NCU (PCP – PCE). A Figura 4.16 ilustra o *Operator Panel* utilizado, indicando seus principais elementos. A Figura 4.17 mostra uma imagem de navegação do *software* SINUMERIK Operate.

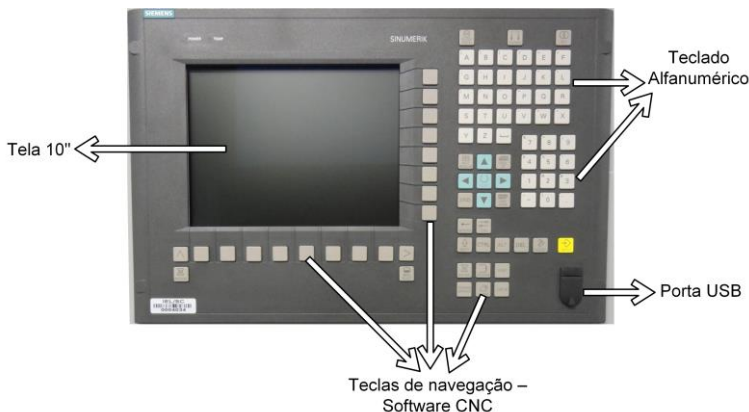


Figura 4.16 – Operator Panel OP10C (Autor)

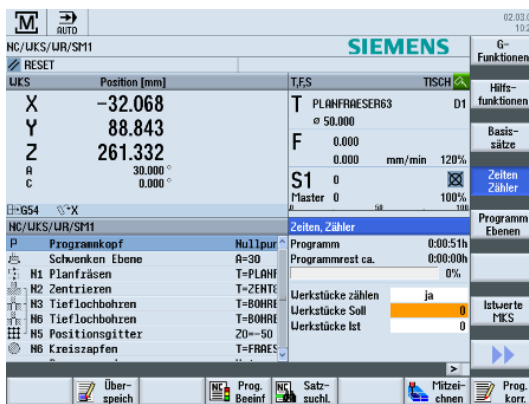


Figura 4.17 –Interface do *software* SINUMERIK Operate [35]

O MCP 483-PN é um módulo adicional que contém botões e selecionadores, que permitem inserir comandos específicos no *software* do CNC, servindo como um anexo ao teclado disponível no OP. Este componente tem uma interação direta com o CLP do CNC, com comunicação baseada no protocolo de comunicação PROFINET. Como o PCU também

utiliza o protocolo PROFINET e, tendo em vista que o NCU possui apenas um canal de comunicação com tal protocolo, é formada uma rede PROFINET, que consiste na conexão do PCU-MCP e do MCP-NCU. Desta forma, há apenas um cabo padrão PROFINET conectando o PCE ao PCP, responsável pela comunicação dos componentes responsáveis pelo comando numérico.

O MCP apresenta teclas com funções pré-determinadas, definidas no *firmware* do CLP. Para estas funções, é utilizado um bloco de programa padrão, disponibilizado na *Toolbox* do fabricante. Exemplo destes comandos são JOG, MDA, AUTO, FEED STOP, FEED START, RESET, CYCLE START, CYCLE STOP, comuns a boa parte dos sistemas CNC industriais. Também contém teclas relacionadas aos incrementos de posição (1, 10, 100, 1000, 10000 unidades de medida) e à seleção dos eixos de movimentação (X, Y, Z, A, B, C, ...), utilizados na função JOG. No entanto, além destas teclas, com funções previamente determinadas, são disponibilizadas teclas livres, para atribuição de funções específicas do sistema desenvolvido.

Estas teclas foram utilizadas para atribuição de funções relativas à operação do sistema LASER, especialmente o acionamento de itens periféricos, como válvulas pneumáticas para liberação de gases de processo e ar comprimido para o *crossjet*, habilitação do sistema de exaustão, dentre outros. Estas funções são identificadas por símbolos gravados a LASER, sendo estas teclas especialmente desenvolvidas para aplicação neste sistema LASER. A Figura 4.18 ilustra o MCP, destacando a região com funções personalizadas.

O comando numérico é, na grande maioria das vezes, relacionado a máquinas de usinagem, que possuem uma árvore (*Spindle*) que efetua a rotação da ferramenta (ex. fresamento) ou da peça (ex. torneamento). Para atender este mercado, o fabricante do MCP disponibiliza dois botões (verde e vermelho) em sua interface, que têm o objetivo de habilitar, ou não, a rotação da árvore. O MCP também possui uma chave de seleção que permite variar, em porcentagem, a rotação do eixo árvore em relação ao valor de rotação atribuído no programa inserido em Código-G. No entanto, neste desenvolvimento, o efetuator final é um feixe LASER. Para atender as necessidades específicas do sistema LASER, estas duas teclas e o selecionador de porcentagem foram configurados para, habilitar, ou não, a emissão de feixe LASER e para alterar em porcentagem, o valor de potência informada no programa.

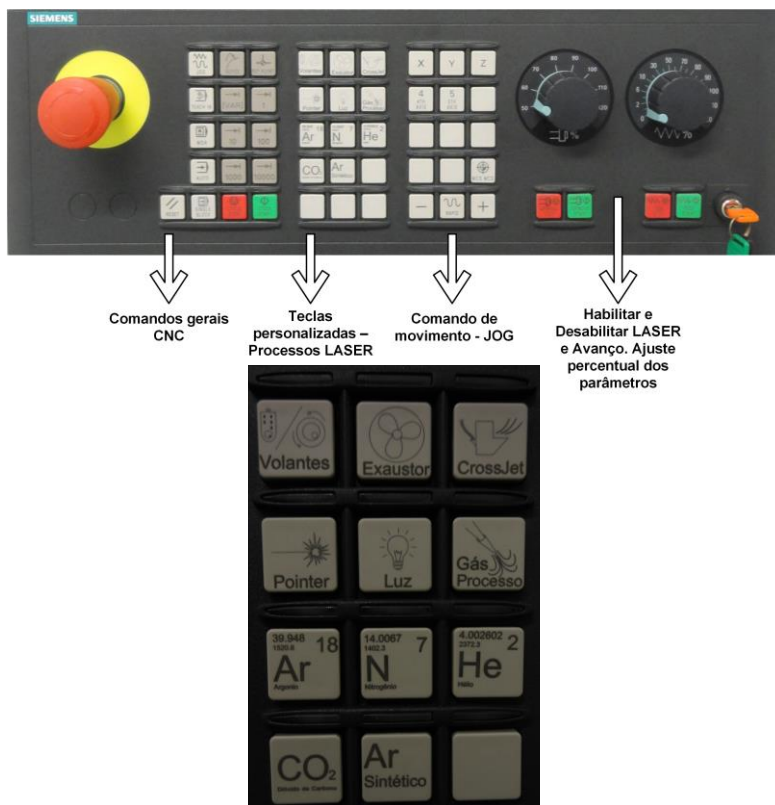


Figura 4.18 – MCP 483 PN e teclas personalizadas (Autor)

#### 4.2.3 Operação e Comunicação do PCE

A operação do sistema LASER não se resume, exclusivamente, ao CNC. Alguns comandos podem ser dados a parte do CNC. Além de comandos, há ainda sinalizações que precisam ser observadas pelo usuário, no intuito de monitorar o equipamento. Na parte frontal do PCE uma placa metálica suporta os botões, chaves e sinalizadores necessários para a operação do equipamento, devidamente identificada com marcações a LASER. A Figura 4.19 ilustra detalhadamente esta região do PCE, com as respectivas identificações de cada elemento.



Figura 4.19 – Placa de botões e sinalizadores – PCE (Autor)

O componente (A) é uma chave alavanca, com função de LIGAR e DESLIGAR o PCE, independente do estado de energização do PCP, desacoplando os módulos. O PCE é alimentado em 24 Vcc, a partir da fonte SITOP que está instalada no PCP, não havendo necessidade de instalação de uma fonte adicional ao sistema, tendo em vista que a SITOP utilizada fornece até 40A de corrente de saída, suficiente para alimentar todos os módulos concebidos.

O componente (B) é outra chave alavanca, relacionada ao acoplamento e desacoplamento da fonte LASER ao sistema *de intertravamento*. A função desta chave foi detalhada na Seção 4.1.4, e tem por objetivo habilitar o sistema para operar independentemente do estado de energização da fonte LASER, caso seja necessário (Chave na opção OFF).

O (C) é uma composição de 3 botões. Este componente está relacionado à habilitação do circuito de potência, abordado na Seção 4.1.4. O botão verde (POTÊNCIA ON) é o comando do operador para habilitar o circuito de potência. O botão vermelho (POTÊNCIA OFF) permite desabilitar o circuito de potência, sem a ocorrência de nenhuma situação de emergência. Este procedimento permite habilitar alarmes diferentes na tela da IHM quando há uma situação de emergência e quando o circuito de potência está apenas desligado. O Botão RESET, localizado no meio deste conjunto, fornece um sinal de *reset* para a fonte Smart Line.

O botão (D), denominado START LASER, tem função de dar um comando à fonte LASER no intuito de habilitá-la para energização dos módulos relacionados à geração do feixe. Este sinal está associado à comunicação disponibilizada na porta XP2 da fonte, referente aos sistemas de segurança do LASER. O elemento (E), ao lado, denominado RESET

LASER, tem como objetivo dar um comando de “reiniciar” à fonte LASER, em casos de ocorrência de alarmes que necessitem de tal operação.

O botão (F), denominado LIBERA FIM DE CURSO (abordado na Seção 4.1.4), fornece um *by-pass* à primeira parte do circuito de *intertravamento*, onde estão dispostas as chaves de fim de curso do sistema de movimentação. Este botão é necessário nos casos de acionamento de uma das chaves fim de curso, para que seja possível reabilitar o fornecimento de energia temporariamente, permitindo que o eixo possa ser movimentado para fora de sua situação de emergência e o sistema retorne a sua situação normal de operação.

Na segunda linha de componentes desta placa, estão todos os sinalizadores, com luzes de LED, acionadas por tensão de 24 Vcc. O primeiro (G), está relacionado à sinalização da situação de energização ou não do PCE. Ao posicionar a chave de LIGA/DESLIGA do painel na função ON, este LED é energizado e informará ao operador que o PCE está ligado.

Os sinalizadores (H) e (I), denominados POTÊNCIA e INTERTRAVAMENTO, respectivamente, estão relacionados ao *status* do circuito de *intertravamento*. Se o circuito de potência estiver habilitado, o LED POTÊNCIA (H) ligará. A partir do momento que o circuito de potência tiver qualquer interrupção, causada por situações de emergência ou pelo desligamento intencional, o LED POTÊNCIA desliga e o LED INTERTRAVAMENTO (I) é automaticamente acionado. Desta forma, não há ocorrência lógica em que os dois LEDs possam ser, ao mesmo tempo, energizados. Esta informação de *status* do circuito de potência é muito importante para o efetivo monitoramento do sistema LASER. As situações de emergência e de desligamento também são constantemente monitoradas pelo NCU e, em casos de ocorrência, são gerados alarmes visuais no *software* do CNC.

Conforme foi descrito na Seção 3.1.3.1, o LASER IPG® possui dois canais de saída que podem ser alternados para a emissão do feixe LASER em dois equipamentos distintos, ou para uso de dois cabeçotes no mesmo equipamento. Os sinalizadores (J) e (K) estão relacionados à indicação de qual canal de emissão da fonte LASER está habilitado (conforme seleção realizada via Código-G).

O componente (L), na extremidade direita desta placa, é um volante (*handwheel*) para auxílio nas operações de movimentação em JOG. Este componente contém um sistema óptico que, a partir do giro do volante, gera sinais elétricos pulsados. É ligado em uma porta especificamente designada para esta função no MCP. Quando o sistema reconhece um pulso, é dado um incremento de posição especificado nos botões do MCP, podendo ser de 1, 10, 100, 1000 e 10000  $\mu\text{m}$ .

Todos os usuários do sistema LASER devem, obrigatoriamente, ser informados de forma clara, visual e sonoramente, sobre o estado de operação da fonte LASER, especialmente no que diz respeito à emissão do feixe. Para prover esta informação ao usuário do sistema LASER, foi instalada uma Torre Sinalizadora no PCE.

Quando o sistema está operando com o LASER desligado (desacoplado pela chave ON/OFF LASER) ou em casos em que o sistema LASER esteja em situação de emergência, a luz verde é acionada, indicando que o ambiente de operação (Sala de Processos) está seguro para circulação de pessoas, pois não há risco iminente de emissão de feixe. Quando o sistema de segurança do LASER está acoplado, havendo ausência de emergências, e o botão START LASER for pressionado, os módulos de geração do feixe LASER são energizados. A partir deste momento, basta ser dado um sinal ao LASER para que haja emissão de feixe e, portanto, não é segura a circulação de pessoas na Sala de Processos. Nesta condição, as portas que dão acesso à Sala de Processos, assim como a janela, devem ser fechadas e deve ser impedida a circulação de pessoas em seu interior (configuração de isolamento “excluída” - ANSI Z136), para que se assegure a integridade física do operador do sistema LASER (que deve estar na Sala de Comando). Nesta situação, a luz amarela é acionada, indicando iminência de emissão do feixe LASER.

Quando o comando de emissão do feixe LASER é dado, a luz amarela é apagada, ligando imediatamente a luz vermelha, indicando que, a partir deste momento está havendo emissão do feixe LASER. Para salientar o aviso, tendo em vista a segurança não apenas do operador, mas também de terceiros presentes no laboratório, é acionado um alarme sonoro, de duração de 3 segundos, utilizando um *Buzzer*, ligado junto ao acionamento da luz vermelha. Para regular o tempo de acionamento deste alarme sonoro, foi utilizado um relé temporizador de 3-30 segundos, instalado no circuito do PCP.

Todos os componentes de comando e sinalização do PCE precisam ser conectados ao PCP. Para isso, na parte inferior do PCE, foi instalada uma placa, onde todos os conectores deste painel estão dispostos e identificados com marcações a LASER. Esta é a interface de comunicação deste módulo do sistema, para devida interconexão com o PCP. A Figura 4.20 ilustra esta placa.

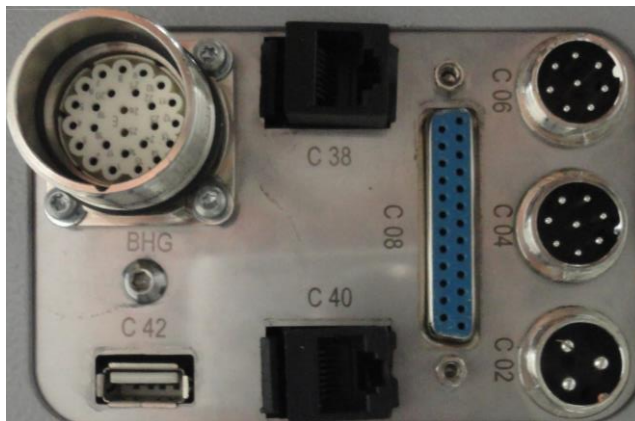


Figura 4.20 – Placa de conectores – PCE (Autor)

Para melhor divisão dos circuitos do PCE que se comunicam com o PCP, os conectores foram divididos em subáreas. Conectores separados foram colocados para transmissão do sinal de emergência (um para o botão de emergência do MCP e outro para o botão de emergência do BHG, que será posteriormente abordado). Para estas conexões, foram utilizados conectores circulares metálicos (Conector MIKE), que garantem, mecanicamente, a conexão dos elementos “macho” e “fêmea”. Todos os sinais dos botões, LEDs e torre luminosa, foram agrupados em um conector DB25.

Como já citado, a comunicação entre os componentes do CNC do PCE e do PCP é feita utilizando o protocolo de comunicação PROFINET, necessitando apenas de um cabo com conectores RJ-45 para esta conexão, sendo assim instalado um conector RJ-45 fêmea na placa de interface. Para permitir uma comunicação em rede com o computador (PCU) instalado no PCE, é disponibilizado um conector RJ-45 (“fêmea”), ligado à placa de rede do PCU, permitindo conexões ETHERNET com o mesmo (inserir o PCU em uma rede corporativa, por exemplo). Ainda nesta placa, foi disponibilizada uma conexão USB, que é apenas a extensão de uma porta USB do PCU, permitindo que sejam inseridos dispositivos tais como *Pendrive* ou HD externo, para efetuar a cópia de programas, realização de *backups*, dentre outras necessidades de transferência de arquivos ao PCU.

Para permitir, temporariamente, o comando do sistema de movimentação com maior proximidade do operador ao sistema mecânico, es-

pecialmente em operações de ajustagem da distância focal e de determinação da origem de trabalho em peças, por exemplo, foi utilizado um BHG, fornecido pelo fabricante do CNC, para a operação remota do PCE, instalado na lateral esquerda do painel. O BHG possui um cabo de extensão que permite utilizá-lo em até 4 metros de distância do PCE. O BHG possui recursos que permitem comandar, em função JOG, o sistema de movimentação. A Figura 4.21 ilustra este componente.



Figura 4.21– BHG Siemens (Autor)

O BHG possui uma chave que permite selecionar o eixo que se deseja movimentar. Possui também os botões “+” e “-”, relacionados ao sentido de movimentação do eixo. Ao lado esquerdo destes, está o botão que ativa a função RAPID, que permite fazer movimentações em velocidade elevada, conforme configuração no sistema CNC. Os demais botões são livres para atribuição de funções específicas, feitas a partir de definições no *firmware* do CLP. Também possui um botão de emergência, disponibilizando seus contatos para que seja inserido no circuito de *intertravamento*, conforme tratado na Seção 4.1.4.

O BHG é dotado de um volante (*handwheel*), que permite fazer movimentações nos eixos de forma ágil e controlada. O BHG só funciona



(com exceção do botão de emergência, que é constantemente monitorado) quando o botão da lateral esquerda deste é pressionado continuamente. Uma tecla do MCP foi configurada para permitir alternar a utilização do *handwheel* do PCE ou do BHG. A Figura 4.22 apresenta o PCE.



Figura 4.22 – Painel de Comando Externo – PCE (Autor)

### 4.3 Módulos de Movimentação

Conforme descrito na Subseção 3.2.4.3, optou-se pela utilização de um sistema de movimentação modular, fabricado pela empresa Aero-tech®, composto por 3 módulos lineares iguais e independentes, características que satisfazem os objetivos de modularidade e reconfigurabilidade do projeto. Estas unidades de movimento necessitaram de readequações, no sentido de torná-los apropriados ao uso no sistema LASER, observando-se as especificações de projeto.

O objetivo deste Subcapítulo é apresentar as tomadas de decisão e os procedimentos realizados no sentido de adequar os 3 módulos de movimentação para o propósito de movimentar o feixe LASER em relação ao componente de trabalho.

#### 4.3.1 Avaliação das necessidades de readequação

Os módulos lineares Aerotech® disponíveis datam de mais de 20 anos de sua fabricação, tendo sido intensamente utilizados na aplicação anterior, tornando necessária uma avaliação, mesmo que qualitativa, dos componentes que os compõem.

Cada módulo de movimentação é composto por uma estrutura de alumínio fundido, usinada nos locais de montagem de componentes com características de precisão geométrica e dimensional. Nesta estrutura principal, estão montados o motor de acionamento, os mancais, o fuso de esferas, as guias lineares de rolos cruzados e o carro móvel. Esta estrutura é parcialmente coberta por uma carenagem de proteção.

A estrutura fundida se mostrou íntegra, sem nenhum dano visível que impedisse sua utilização para o proposto. Foram realizadas algumas adequações, como furos com roscas para suporte das chaves fim de curso e para a fixação dos conectores elétricos. As peças da carenagem foram jateadas e repintadas, com o objetivo de oferecer um melhor acabamento estético ao conjunto.

A avaliação dos componentes responsáveis pela movimentação, como as guias de rolos cruzados e os fusos de esferas recirculantes, mancalizados em ambas as pontas de eixo na configuração FIXO-SUPORTADO, mostrou que os fusos de esferas recirculantes e os rolamentos dos mancais apresentavam imperfeição de movimento, sendo necessária a substituição destes componentes em todos os três módulos. As guias de rolos cruzados, apesar do uso prolongado, não mostraram um desgaste ou imperfeições que obrigassem as suas substituições.

A configuração de montagem das guias de rolos cruzados permite a ajustagem da pré-carga de montagem, minimizando eventuais folgas oriundas do desgaste. A troca destas guias se mostrou inviável, visto que não se obteve informações sobre o modelo e fabricante das guias originais dos módulos. Esta configuração não é mais empregada em sistemas de movimentação de precisão, hoje são utilizadas guias lineares de esferas recirculantes. A substituição das guias de rolos cruzados por guias lineares de esferas recirculantes exigiria a reusinagem dos componentes estruturais (fixo e móvel) do módulo, para adequação às dimensões, o que se mostrou ser impraticável por falta de material na estrutura dos módulos.

A Figura 4.23 apresenta, de forma esquemática, o princípio de montagem de guias de rolos cruzados, destacando os elementos de pré-carga [48].

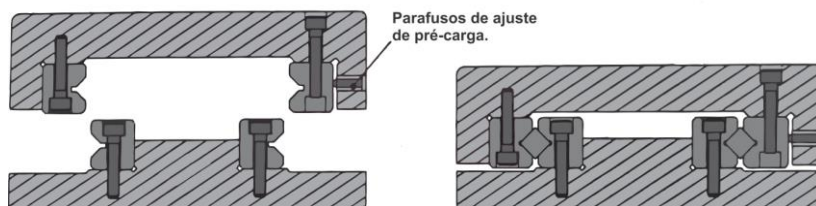


Figura 4.23 – Configuração de montagem – Guias lineares de rolos cruzados (Adaptado de [48])

A Figura 4.24 ilustra um dos módulos do sistema mecânico de movimento, antes da realização de qualquer modificação (sem os elementos de carenagem), acima montado e abaixo desmontado, com as devidas indicações dos principais elementos que o compõe.

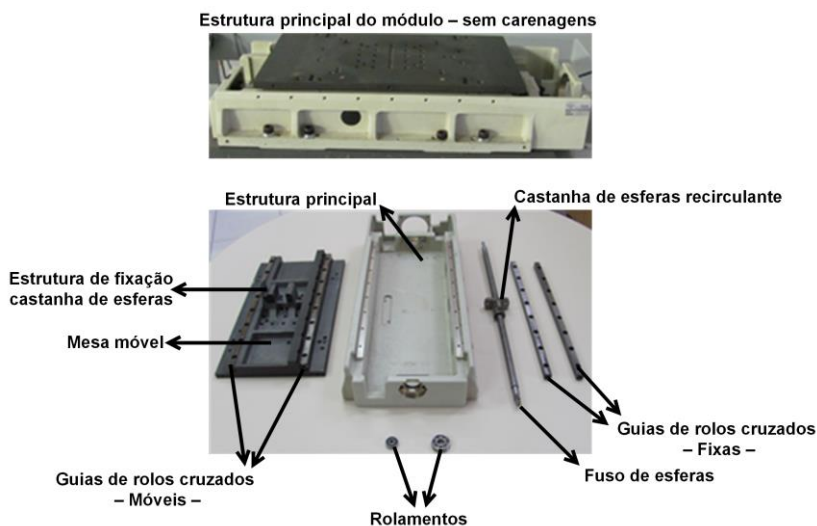


Figura 4.24 – Módulo de movimentação linear Aerotech® ATS416 (Autor)

### 4.3.2 Modelagem computacional

Como não havia disponível nenhuma documentação técnica relacionada aos módulos de movimentação Aerotech® (não sendo também disponibilizada pelo fabricante), a seleção de componentes de substituição, bem como o projeto de interfaces para a integração dos novos componentes, tornou-se bastante complicada. Isso pode ser observado principalmente no detalhamento dimensional do fuso de esferas recirculantes, no projeto da interface de ligação entre motor e a flange da estrutura do sistema, assim como na determinação do posicionamento adequado de montagem das chaves de fim de curso e *Home*.

Os módulos de movimentação foram completamente modelados, utilizando o *software* CAD 3D SolidWorks. Assim se tornou possível que todas as ações práticas de seleção, construção e montagem fossem precedidas de um processo de projeto computacional.

Para a realização do modelamento, foi necessário a verificação das dimensões de um dos módulos, tendo em vista que todos os três são iguais. Foram observadas as dimensões principais externas das superfícies usinadas, dos reforços e nervuras internas da estrutura principal, empregando um traçador vertical montado sobre um despenho, posicionando o componente em suas superfícies de referência (faces usinadas, como a base inferior e flange de montagem do motor). Para demais medições, como assentos dos rolamentos, rasgos na estrutura, furos e etc, foram usados paquímetro e micrômetro.

A Figura 4.25 apresenta imagens da modelagem do sistema. Na imagem superior, na qual foi atribuída uma transparência à estrutura, é possível ver a interação entre os componentes relacionados à movimentação linear na região de acoplamento do motor. A imagem inferior apresenta uma renderização, ocultando a mesa móvel de movimentação, para permitir visualizar os demais elementos.

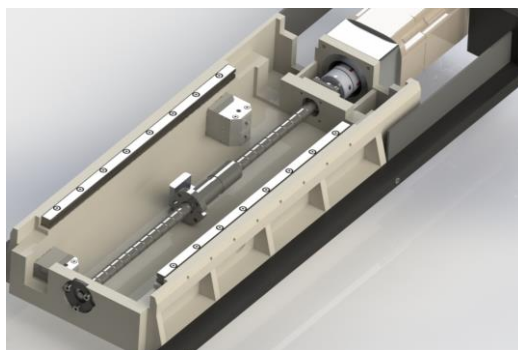
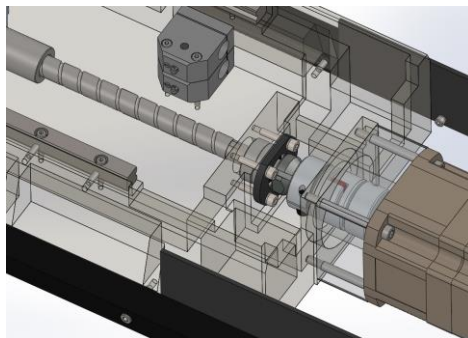


Figura 4.25 – Módulos de movimentação – Modelo computacional (Autor)

#### 4.3.3 Seleção dos componentes de movimentação

Baseado no conjunto dos componentes do sistema de movimentação modelado, buscou-se a seleção dos componentes que seriam substituídos ou integrados. Este processo foi feito à luz das especificações de projeto, Subcapítulo 3.1. Com relação a estas, os itens descritos na Tabela 3.1, que possuem influência sobre os módulos de movimentação são: velocidade de avanço, resolução, quantidade de eixos e volume de trabalho. As seleções levam em conta estas especificações.

Os itens “quantidade de eixos” e “volume de trabalho” são definidos pelos próprios módulos. São 3 módulos de movimentação, iguais e modulares, satisfazendo assim a especificação de quantidade de eixos. Com relação ao volume de trabalho, o curso útil de movimentação de cada eixo é fixo e não pode sofrer alteração, em consequência, o volume de

trabalho também é determinado. Portanto, deve-se ter cuidado especial com os itens “velocidade de avanço” e “resolução”

A primeira seleção, que influencia diretamente em todas as demais e tem papel fundamental no atendimento ou não das especificações, é o motor. Como os sistemas utilizados são baseados no princípio de movimentação por fusos de esferas, é necessário que haja um componente eletromecânico que converta a energia elétrica, recebida dos *drivers* de acionamento contidos no PCP, em energia mecânica, em forma de rotação do seu eixo. Desta forma, acoplando o eixo do motor, ao eixo do fuso, este converte movimento rotacional em linear e, acontece enfim, a movimentação mecânica do sistema.

Conforme observado em todas as fases do desenvolvimento descritas até o presente momento, há uma restrição, por parte do fabricante Siemens, na utilização de seus componentes para composição do sistema CNC, com os motores ocorre o mesmo. Os módulos de acionamento presentes no PCP (2 x *Double Motor Module* e 1 x *Single Motor Module*) fornecem um valor de saída, em corrente e tensão, fixos, sem possibilidades de ajuste. A utilização de um motor de outro fabricante poderia ser feita, no entanto, este deveria estar adequado às características de alimentação e de tipo de acionamento dos *drivers* Siemens utilizados. É uma prática muito comum em fabricantes de conjuntos *driver* e motor fornecer estes elementos de conjunta.

Além da característica de acionamento, deve-se ter em mente os componentes de realimentação, de velocidade e de posição. Conforme já foi citado na Seção 4.1.2, os transdutores *encoder*, *resolver* ou Régua óptica, utilizados para estas funções precisam possuir o protocolo de comunicação DriveCLIQ embarcado ou utilizar um componente anexo (SME) que adequa o transdutor ao protocolo.

Com a aquisição do sistema de comando numérico Siemens, a empresa forneceu 3 servo-motores adequados para serem acionados pelos *drivers* instalados no PCP. Tratam-se de motores síncronos de corrente contínua (CC), da linha 1FK7. Suas principais características são: velocidade nominal de 3000 RPM e torque nominal de 3 Nm. Os motores são dotados de freios magnéticos, automaticamente liberados pelo sistema de comando numérico quando o sistema de potência está habilitado. O freio magnético é especialmente adequado para o módulo de movimentação do eixo Z, em que deve ser evitado que haja uma movimentação não comandada, causada pela massa acoplada ao sistema (cabecote LASER).

Os motores fornecidos possuem *encoders* absolutos, acoplados junto ao eixo do motor, fornecendo 2048 pulsos por rotação. Desta forma, é desnecessário realizar operações de *Home* toda vez em que o sistema

LASER for ligado, tendo em vista que o comando numérico tem capacidade de reconhecer, assim que energizado, qual sua posição real em relação ao “zero máquina”. Também nesta configuração, as chaves fim de curso servem apenas como redundância elétrica, tendo em vista que podem ser configurados, a partir do sistema de comando numérico, limites de fim de curso baseados em *software* (*software limits*). Estes *encoders* integram o protocolo de comunicação DiveCLIQ para comunicação direta com os *drivers*.

Todos os motores e *encoders* são ligados por cabos ao PCP, sendo estes de 10 metros de comprimento. Optou-se por fazer uma conexão direta destes componentes aos *drivers*, internos ao PCP. Para isso, diferentemente da solução adotada para as demais interfaces entre componentes externos ao PCP, detalhada na Seção 4.1.5, os cabos adentram o painel sem um conector intermediário. Isso tem a vantagem de evitar “mau contato” relacionado a adição de conexões, o que é especialmente adequado para os cabos dos *encoders*, associados ao sistema de realimentação, tendo em vista tráfego de sinais elétricos, com baixas correntes e frequências na ordem de 6 MHz (máxima). A Figura 4.26 ilustra a placa de passagem para os cabos<sup>16</sup>. Em todos os furos foram instaladas proteções plásticas, com objetivo de impedir que os cabos fossem danificados nos cantos vivos dos recortes feitos a LASER.



Figura 4.26 – Placa de passagem de cabos – PCP (Autor)

Com relação a substituição do fuso de esferas, procurou-se inicialmente o fabricante do fuso original, TSUBAKI, do Japão. É um fabricante que fornece fusos de alta qualidade, mas muito pouco comercializado no

<sup>16</sup> O mais adequado para passagem de cabos do painel é a utilização de elementos “prensa cabos”. No entanto, como os cabos de conexão dos *encoders* e dos motores foram fornecidos montados, com ambos os conectores, foi inviabilizado o uso de prensa cabos. A solução adotada se mostrou a mais adequada.

Brasil. A busca por modelos semelhantes ao original foi muito extensa. Alguns fornecedores ofereciam o desenvolvimento de todos os componentes sob medida, inclusive das castanhas (porcas), no entanto, com custos e prazos de fornecimento elevados e impraticáveis.

A maior dificuldade residia na exigência de o fuso possuir uma castanha com flange compatível com o sistema de fixação disponível na estrutura da mesa móvel do módulo de movimentação Aerotech® sem que fosse necessário realizar nenhuma usinagem em regiões de referência para o sistema. Foi selecionado um conjunto de fuso de esferas e castanha da marca Kalatec, diâmetro 16 mm e passo 5 mm que, apesar de algumas diferenças em relação ao fuso original, mostrou-se adequado, tendo em vista a relação custo X benefício.

Com o objetivo de evitar erros oriundos de efeito de *backlash*, possibilitando ainda a manutenibilidade da exatidão do sistema por mais tempo, foi selecionado um modelo de castanha dupla, que permite aplicar uma pré-carga entre as castanhas, determinada pela pressão de aperto dada entre estas.

Com as características do fuso, associadas às características do motor e do transdutor de posição, apresentadas nesta Seção, chega-se aos valores de velocidade máxima e de resolução teórica<sup>17</sup> de movimentação dos sistemas após a readequação, sendo estes 15 000 mm/min e  $2 \times 10^{-3}$  mm (ou 2  $\mu$ m), respectivamente. Os dois valores atendem as especificações de projeto (itens 2 e 3, Tabela 3.1).

As extremidades do fuso de esferas são suportadas por rolamentos. Os alojamentos destes rolamentos foram usinados na estrutura principal dos módulos pelo fabricante, não permitindo alterações sem a intervenção de processos de usinagem na estrutura de alumínio fundido. No lado do motor, há espaço disponível para a montagem de 2 rolamentos, com objetivo de configurar uma macalização tipo FIXA (fuso na estrutura). Na outra extremidade, há uma flexibilidade axial, onde é instalado um rolamento, configurando uma mancalização tipo SUPORTADO (com flutuação axial).

Na mancalização de fusos de esferas recirculantes, quando utilizados para movimentações em máquinas, é recomendada a configuração FIXO-SUPPORTADO ou FIXO-FIXO (quando há melhores controles do ambiente de operação, especialmente relacionado a temperatura do ambiente e dos próprios componentes de movimentação da máquina)[48].

---

<sup>17</sup> A resolução está sujeita a uma série de outras características do sistema, sendo este valor apresentado apenas uma estimativa teórica da resolução que pode ser alcançada com os elementos de movimentação selecionados.



Também é recomendado, no uso da configuração FIXO DUPLEX (dois rolamentos), o emprego de rolamentos de esferas com contato angular, geralmente de  $60^\circ$ , na configuração de montagem FACE-FACE.

Tendo em vista que não haverá um controle com relação às condições de operação dos sistemas de movimentação e que a resolução exigida nas especificações de projeto não é elevada, foi mantida a configuração FIXO-SUPPORTADO dos mancais. Foi realizada a troca de todos os rolamentos, sendo que na parte FIXA, foram utilizados rolamentos de contato angular de  $40^\circ$ , tendo em vista que não foram encontrados no mercado rolamentos de contato angular de  $60^\circ$  que atendessem as exigências dimensionais (diâmetro externo e largura) dos alojamentos usinados na estrutura principal dos módulos. Como o principal objetivo da composição de rolamentos de contato angular é oferecer determinada capacidade de carga no sentido radial e axial, em que quanto maior a inclinação, maior é a capacidade de carga axial, verificou-se não haver problema no uso de rolamentos com ângulo de  $40^\circ$ , tendo em vista, principalmente, que a carga axial exigida em todos os sistemas é demasiadamente baixa, sendo todos os componentes sobre dimensionados.

Para aplicação da pré-carga entre os rolamentos, como parte da composição da mancalização tipo FIXO, foi utilizado uma “Porca de ajuste” ou “Porca de precisão”. Trata-se de uma porca M12x1, que comprime os dois rolamentos um ao outro, e estes ao encosto localizado no eixo do fuso, permitindo ajustar o nível de pré-carga. Esta porca é dotada de um sistema de travamento que impede que ocorra seu afrouxamento, garantindo com que a pré-carga se mantenha praticamente inalterada no decorrer do tempo.

Para o acoplamento entre o eixo do fuso e o eixo do motor, foi utilizado um Acoplamento Flexível, modelo Routex GS19 da fabricante KTR, com intuito de compensar desalinhamentos entre os centros dos eixos, causados por erros oriundos dos processos de fabricação das interfaces. Para este acoplamento, há a possibilidade de seleção do material e da dureza do elastômero. Quanto maior a dureza do material, menor a flexibilidade, mas em consequência, menor o ângulo de torção e maior a capacidade de transmissão do torque. Foi selecionado o elastômero de Poliuretano com dureza de 98 Shore-A, com capacidade de transmissão de altos valores de torque e característica médias de amortecimento, relacionado a vibrações [49].

A Figura 4.27 apresenta um corte de seção do módulo de movimentação, indicando os principais componentes relacionados à geração de movimento e de estrutura deste sistema.

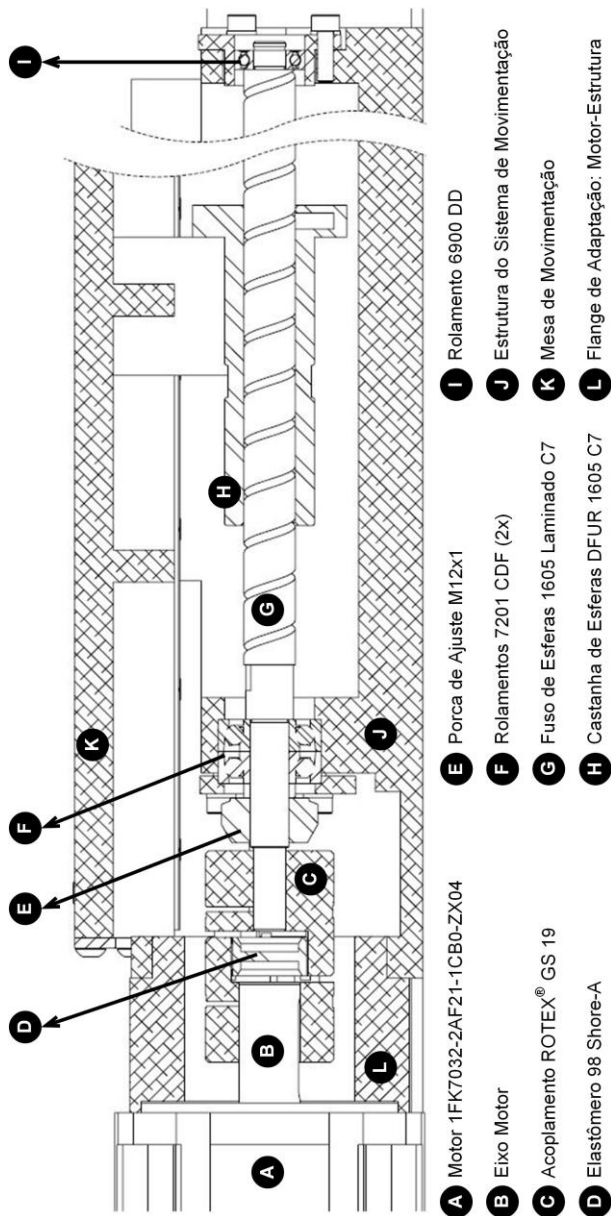


Figura 4.27– Representação esquemática dos componentes do sistema mecânico de acionamento dos módulos de movimentação – Mancal Fixo (Autor)

Os três módulos de movimentação foram montados formando uma configuração cartesiana (X, Y e Z), necessária e suficiente para realização dos processos LASER propostos neste trabalho.

Com intuito de dar uma boa estabilidade ao sistema, os módulos dos eixos X e Y foram montados ortogonalmente sobre uma mesa de ferro fundido acoplada a uma base de concreto, com uma massa total de aproximadamente 1200kg. O eixo Z foi fixado na vertical, em suportes presos à parede do laboratório LASER, no interior da Sala de Processos.

Durante os ensaios, as peças submetidas aos processos LASER propostos sofrem um considerável aquecimento. Com o objetivo de oferecer um isolamento térmico ao módulo de movimentação Y, foi montada uma chapa de alumínio (25 mm), com ranhuras “T” que permitem a instalação de sistemas de sujeição de peças, espaçada a 12mm da superfície superior deste módulo. A Figura 4.28 apresenta os módulos de movimentação, responsáveis por promover os movimentos relativos entre a peça e o feixe no sistema LASER, montados.



Figura 4.28– Sistema de movimentação mecânica do sistema LASER (Autor)

#### 4.4 Adequações na Infraestrutura

Para que sistema LASER fosse instalado e operado, foi necessária uma série de adequações na infraestrutura do local de instalação, principalmente com o objetivo de tornar sua operação segura, tendo em vista os riscos de incidência do feixe LASER de elevada potência na pele e nos olhos, oferecidos ao operador e as pessoas do entorno.

Para o isolamento dos ambientes (Sala de Comando e Sala de Processos), de forma que seja possível, quando necessário, transitar entre um e outro, foram implementadas duas portas confeccionadas de chapas metálicas (Aço ABNT 1020) de 1,2mm de espessura, soldadas, com estrutura oca, preenchidas com areia seca. Esta concepção também foi adotada nas paredes de alvenaria, feitas de blocos de concreto (Seção 3.1.3.3 e Subseção 3.2.4.4). O preenchimento das cavidades com areia tem como objetivo retardar a passagem do feixe LASER em casos de incidência direta.

Uma das portas liga a Sala de Comando à Sala de Processos, sendo esta a porta de acesso principal, pela qual há um trânsito frequente de pessoas de um ambiente ao outro (com LASER desenergizado). A outra porta, de maior dimensão, foi prevista apenas para a passagem de equipamentos e materiais, sendo a porta de acesso secundária. Esta segunda porta, por princípio, permanece constantemente fechada, independentemente se o processo está ou não ocorrendo no momento, sendo sua abertura possibilitada apenas pelo lado interno da Sala de Processos. Este mesmo procedimento foi utilizado para isolamento da janela, instalada na Sala de Processos. A Figura 4.29 ilustra as duas portas – a) porta de acesso principal, com 800mm de largura; b) porta de acesso secundária, com 2030mm de largura.



Figura 4.29– Portas de acesso à Sala de Processos LASER (Autor)

Como a Sala de Comando fica absolutamente isolada da Sala de Processos durante a realização de qualquer operação com LASER ligado, é necessário que haja maneiras de monitorar em tempo real o que está acontecendo no interior da Sala de Processos. Além disto, é interessante que as operações e monitoramentos sejam realizadas, não só durante como também antes do processo, sem que seja necessário acessar a Sala de Processos.

Com objetivo de monitorar o comportamento do sistema durante o processo e todo o ambiente de processo, foi instalado um televisor de 42”, com acesso à internet, que permite pelo seu navegador, acessar uma câmera IP localizada no teto do interior da Sala de Processos. Esta câmera é capaz de monitorar o ambiente por um giro de 360° em alta resolução (HD). Para monitorar o processo, foi instalado um monitor conectado à câmera coaxial do cabeçote LASER (conforme citado na Seção 3.1.3.2), permitindo visualizar a imagem da região de incidência do feixe LASER sobre a peça de trabalho, antes, durante e depois da execução do processo. É uma ferramenta necessária para o *zeramento* do sistema de movimentação, podendo verificar, antes do início do processo, o ponto de incidência do feixe LASER na peça a ser processada, permitindo determinar a coordenada inicial (zero peça).

Outro item que deve ser constantemente monitorado, é a fonte LASER. O fabricante IPG® disponibiliza um sistema supervisor, denominado LASERNET, que permite monitorar o *status* de temperatura dos módulos, potência emitida, tempo de emissão, estado das *I/Os*, ocorrência

de alarmes, ocorrência de emergências, dentre muitos outros aspectos. É um *software* bastante completo que necessita de um computador para ser executado. Para isto, foi utilizado um PC na Sala de Comando específico para a execução do *software* supervisor, habilitando assim o operador a monitorar constantemente o *status* LASER, antes, durante e depois da execução dos processos.

A Figura 4.30 apresenta os componentes instalados na Sala de Comando – a) Televisor, b) Computador de monitoramento do LASER e c) Câmera coaxial.

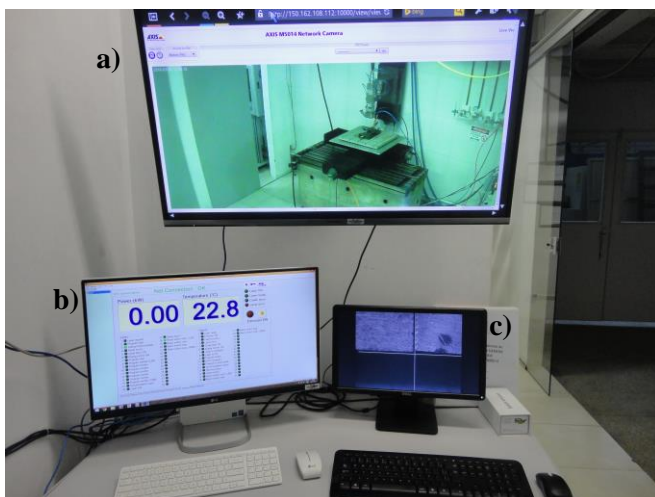


Figura 4.30– Equipamentos de monitoramento da Sala de Comando (Autor)

Para que os gases fossem fornecidos para o interior da sala, foi instalada uma rede tubulada em cobre, que transporta o gás da central até tomadas de gás, posicionadas próximas aos equipamentos que realizarão os processos. Foram instaladas 4 centrais, cada linha é alimentada por dois cilindros, permitindo fazer a troca de um cilindro, sem que a rede seja despressurizada (comando de abertura e fechamento independentes). Os gases selecionados para estas centrais foram: Ar, N, CO<sub>2</sub>, He e Ar Sintético (Ar seco). Como os dois últimos não são frequentemente utilizados e tendo em vista que apenas 4 centrais foram instaladas, uma das centrais alterna entre a utilização de He e de Ar Sintético, de acordo com a demanda de uso. A Figura 4.31 ilustra (a) a central de gases instalada externa ao ambiente de instalação e operação do sistema LASER; (b) uma das tomadas de gás disponibilizadas na Sala de Processos.



Figura 4.31 – Central e ponto de alimentação – Gases de processo (Autor)

Uma preocupação constante no desenvolvimento deste trabalho, no contexto da infraestrutura para instalação e operação dos equipamentos, foi a qualidade da rede de alimentação. Isto gerou a necessidade de prever, em todos os sistemas desenvolvidos, proteções adequadas para os casos em que houvesse alterações repentinas na rede que pudessem prejudicar o desempenho do sistema LASER ou até mesmo levar a queima de componentes. A queima de um componente é uma situação absolutamente indesejada, tendo em vista o alto valor agregado destes. No PCP, foram tomadas diversas providências, com intuito de protegê-lo contra alterações bruscas relacionadas ao sistema trifásico de alimentação. No PCE, apesar de estar sendo alimentado por uma fonte de 24 Vcc estabilizada, instalada no interior do PCP, foram instalados fusíveis ultrarrápidos, com intuito de proteger os equipamentos neles dispostos, em caso de falha da fonte SITOP.

No entanto, deve-se ter um cuidado especial com a fonte LASER, fornecendo externamente uma proteção complementar a da proteção interna já disponibilizada pelo fabricante. A fonte LASER é acompanhada por um *chiller*, que tem como objetivo resfriar os sistemas ópticos e de fornecimento de energia elétrica para os módulos de geração de LASER. Os dois equipamentos possuem um padrão de alimentação diferente do

disponibilizado pelo operador do sistema elétrico brasileiro, sendo esta de 460 Vca trifásico. Para isso, foi necessário instalar um transformador com característica de aumentador, o qual recebe no primário uma tensão de 380 Vca e fornece no secundário 460 Vca, ambas trifásicas, com capacidade de potência máxima de 150 kVA.

Portanto, para fornecer uma proteção adicional ao LASER e ao *chiller*, foi projetado<sup>18</sup> um painel elétrico adicional, para as respectivas alimentações. A alimentação é dada a partir do barramento trifásico 380 Vca, disponível no local de instalação do sistema. No interior do painel, esta tensão é monitorada por um relé igual ao utilizado no PCP (Seção 4.1.3), que visa identificar as seguintes alterações na rede: falta de fase, inversão da sequência de fases e ocorrência de sub e sobre tensão. Quando o relé não identifica nenhuma ocorrência das falhas citadas, o estado de seu contato permanece inalterado. Seus contatos (NA e NF) são disponibilizados por um conector circular, que por meio de um cabo, é conectado à placa de conectores do PCP, na área de emergências externas (conector 33). O contato NF deste relé é parte integrante do circuito de *intertravamento* do sistema LASER (terceira parte do circuito, Seção 4.1.4).

Caso ocorra qualquer uma das alterações monitoradas pelo relé, o seu contato irá trocar de estado, fazendo com que a conexão NF abra, cortando assim o circuito de *intertravamento*. Desta forma, o sistema entra em emergência, o que leva, automaticamente, à emergência do LASER, devido a lógica de *intertravamento* projetada. Quando a fonte LASER entra em emergência, há o descarregamento e desenergização dos módulos de geração do feixe, fazendo com que seja seguro permanecer com o equipamento ligado, ou desligá-lo repentinamente. Isso gera uma excelente proteção ao equipamento e, relativamente barata, tendo em vista o seu importante papel.

Por fim, a tensão de 380 Vca, depois de monitorada, é conduzida até o transformador, onde aumenta para o valor de 460 Vca, sendo conduzida novamente para o interior do painel. Lá é seccionada por disjuntores individuais, do LASER e do *chiller*. Na parte inferior deste painel, são disponibilizadas tomadas de 5 pinos (3P+T+N), uma para o LASER, a qual suporta até 125 A de corrente e uma de 32 A, disponibilizada para qualquer outro componente com tensão de 460 Vca, que venha ser necessário. Como o *chiller* está posicionado externamente ao laboratório, ao

---

<sup>18</sup> Este foi o único painel elétrico montado e fornecido por um terceiro. A participação no projeto deste painel se deu no sentido de desenvolvimento dos conceitos de proteção, já que se tinha conhecimento das necessidades específicas do LASER e do *chiller*, e na concepção de ligação destes sistemas. No entanto o projeto elétrico, montagem e instalação foram integralmente realizadas pelo fabricante do painel.



lado do transformador, o cabo deste painel de proteção é encaminhado diretamente para o *chiller*, sem existência de tomada. Na lateral do gabinete, foi instalada uma seccionadora, de forma que o transformador é energizado apenas quando algum processo for realizado. Além disso, o procedimento de ligar o sistema é mais simples, pois, pode-se deixar as seccionadoras gerais do LASER e do *chiller* ligadas para que, quando for ligado o painel de proteção, ambos sejam simultaneamente energizados.

Assim como no PCP, neste painel também foram instalados supressores de surto para proteções contra descargas elétricas atmosféricas (raios), oferecendo maior proteção aos sistemas. Apesar das diversas proteções disponibilizadas no painel, há uma situação que não pôde ser, nem monitorada, nem resolvida. São os casos de falta súbita de tensão. Essa situação não oferece riscos aos sistemas, especialmente ao LASER, quando está apenas ligado, aguardando comando de emissão. No entanto, é uma situação muito prejudicial quando está ocorrendo a emissão do feixe LASER. Em uma situação como esta, pode haver a queima imediata de múltiplos módulos de geração de feixe, os quais possuem um elevado custo para substituição. A única forma de evitar a falta repentina de tensão é utilizando um elemento gerador, que suporte durante alguns segundos o equipamento ligado, possibilitando que a emergência do LASER seja acionada, levando ao procedimento de descarregamento e desenergização corretos dos módulos, evitando assim a queima destes. A Figura 4.32 ilustra este painel de proteção.



Figura 4.32 – Painel de proteção elétrica – LASER e *chiller* (Autor)

Outro sistema essencial relacionado à alimentação dos equipamentos, é o sistema de aterramento. Verificou-se a ausência de um circuito com resistência adequada, que permitisse escoar as correntes de fuga e induzidas dos sistemas, além de possibilitar a descarga de energia dos supressores de surto, no caso de acionamento destes (ocorrência de descargas elétricas atmosféricas na rede). Para isto, foi instalado um circuito de aterramento com 5 hastes de aço (5/8" x 2,40m) revestido com 254  $\mu\text{m}$  de cobre, de acordo com recomendações expressas na norma NBR 5410 [50], com objetivo de proporcionar um circuito com resistência  $\leq 30 \Omega$ . A Figura 4.33 ilustra a) a instalação deste circuito e b) medição da resistência de aterramento utilizando um Terrômetro Digital ICEL TR 5500. Conforme as medições realizadas no circuito, foi obtido um valor de resistência de aproximadamente 20  $\Omega$ . Para distribuição das conexões de terra em todas as tomadas e equipamentos, um cabo de 35  $\text{mm}^2$  foi ligado em uma das hastes até o painel de proteção elétrica descrito anteriormente, no qual foi previsto um barramento específico para todas as conexões de terra.



Figura 4.33 – Aterramento do sistema LASER (Autor)

#### 4.5 Equipamentos Periféricos

Para que o sistema LASER seja capaz de realizar os processos de fabricação propostos nas especificações, fez-se necessário o uso de alguns

equipamentos periféricos, especialmente em relação ao processo de LASER *cladding*. No entanto, outros componentes não essenciais, foram utilizados com objetivo de melhorar a usabilidade do sistema.

Para que seja possível realizar o processo de LASER *cladding*, 2 componentes são essenciais: um *powder feeder* (alimentador de pó) e um sistema óptico e bocal (cabeçote) com características especiais para este processo. A função destes foi detalhadamente explicada na Revisão Bibliográfica, Subseção 2.1.2.2.

Com relação ao alimentador de pó, foi utilizado um *powder feeder* GTV, fabricante alemão, com a função específica de alimentação de pó em processos de LASER *cladding*. Na configuração atual, este sistema dispõe de apenas um reservatório de pó, sendo possível realizar um *upgrade* para a utilização de um segundo reservatório e sistema alimentador. O alimentador necessita que seja inserido um gás de processo, sendo sua vazão ajustada no próprio equipamento. O volume de pó alimentado é ajustado a partir do controle da rotação do disco de alimentação, sendo quanto maior a rotação, maior a quantidade, em g/min, liberadas para o processo. Esta é uma importante variável para a otimização do processo de LASER *Cladding*. No reservatório deste sistema, há um dispositivo misturador, garantindo a manutenção da homogeneidade do pó, especialmente quando são utilizados dois materiais distintos para a formação de uma liga.

Sistemas ópticos utilizados na realização de processos de fabricação com LASER são caros, especialmente tratando-se de feixes de elevadas potências. Com o objetivo de aproveitar o sistema óptico, disponibilizado no cabeçote de soldagem a LASER Precitec (descrito na Seção 3.1.3.2), foi adquirido um bocal de *cladding* adaptável ao sistema óptico disponível. Trata-se de módulo de aplicação de pó, coaxial e contínuo, especialmente projetado e fabricado pelo Instituto Fraunhofer de Tecnologias LASER (Fraunhofer ILT - *Institut für Lasertechnik*) para ser montado no cabeçote Precitec.

Para montagem deste sistema, basta desmontar o módulo de *crossjet* do cabeçote de soldagem e instalar o módulo de aplicação de pó, sendo puramente mecânica a interface de ligação entre os dois módulos (fixação realizada por 4 parafusos). Na configuração deste sistema, o feixe LASER e o fluxo de pó são coaxiais, de forma que o foco do feixe LASER e o foco do fluxo de pó coincidem. Este ponto focal pode ser coincidente à superfície da peça de trabalho ou deslocado em relação a esta (Z+ ou Z-), de acordo com as características específicas de cada processamento.

Esta característica reforça o conceito de reconfigurabilidade do sistema LASER, permitindo que o mesmo sistema óptico seja utilizado para ambos processos. Bastando a troca de um módulo, é possível realizar tanto o processo LASER *cladding* como o processo de soldagem a LASER. Esta solução, além de ser mais barata, devido ao emprego de apenas um sistema óptico, é mais simples do ponto de vista da reconfigurabilidade, pois torna desnecessária a retirada da fibra de um cabeçote para instalação em outro<sup>19</sup>. A Figura 4.34 ilustra, à direita a), o alimentador de pó GTV e, à esquerda b), o bocal de *cladding* desenvolvido e fornecido pelo Instituto Fraunhofer ILT.

Durante a realização dos processos, tanto de soldagem como de *cladding* e de tratamento térmico, são liberados fumos e partículas sólidas que, se não forem devidamente aspiradas, ficarão dispersas no ambiente de operações. Para retirar o excesso de fumaça da região de processo e para diminuição na quantidade de partículas metálicas sólidas e dispersas no ambiente, foi instalado um sistema filtro-aspirador industrial Filter Master, com braço articulável de 3 metros, do fabricante Kemper, Figura 4.35. Este filtro-aspirador é alimentado com a tensão de 440-460V e é dotado de uma série de filtros especialmente dimensionados para retirar pequenas partículas do ambiente. Este sistema circula uma vazão de ar de 1200 m<sup>3</sup>/h e uma pressão estática (máxima) de 1350 Pa. O sistema de exaustão utilizado não elimina gases tóxicos da área de realização do processo.

---

<sup>19</sup> Este procedimento é demorado e requer a limpeza absoluta do terminal da fibra óptica (saída de feixe LASER), com auxílio de um microscópio adequado para retirada de quaisquer partículas de poeira, antes que seja instalada em outro cabeçote ou sistema óptico.



Figura 4.34 – Alimentador de pó e bocal de *cladding* (Autor)



Figura 4.35 – Filtro-aspirador Filter Master, com braço articulado de 3 metros, fabricante Kemper (Autor)

## 4.6 Configuração do CNC

O CNC SINUMERIK 840D SL pode ser considerado um comando genérico, aplicável a qualquer processo que necessite de movimentações relativas entre eixos, desde que este seja devidamente configurado para tal aplicação. Portanto, fez-se necessária a configuração do CNC de forma que este atendesse às necessidades do sistema LASER, tornando-o apto para a realização dos processos propostos. Estas configurações referem-se, principalmente, à comunicação e interface com a fonte LASER, mas também tem relação como os componentes periféricos, que compõem o sistema.

Portanto, no que diz respeito à operação do sistema a partir da IHM, os botões do MCP foram designados e devidamente configurados no *firmware* do CLP do CNC, para efetuar o comando de funções e acionamento de periféricos (conforme Figura 4.18). Além disso, e mais importante, foram criadas Funções-M, relacionadas ao comando da fonte LASER, de forma que, a partir do programa inserido em Código-G, pudessem ser controladas funções como habilitar/desabilitar emissão do feixe, trocar canal de emissão e variar a potência do feixe LASER.

Para a habilitação da emissão do feixe LASER, foi criada a Função M50. Por lógica inserida no *firmware* do CLP, este comando só pode ser dado se o LASER fornecer um sinal de “pronto”, que só é fornecido quando todas as premissas de segurança forem atendidas e o sistema de *intertravamento* estiver sem nenhuma restrição. A Função M51 desabilita a emissão do feixe.

Para comando da potência do LASER, foi atribuída a variável “H” no Código-G, sendo necessário apenas inserir, ao lado da variável, o valor de potência (em Watts) desejado, por exemplo H2000. Quando tal variável é lida, conversões no *firmware* do CLP fazem com que uma das saídas analógicas do controlador forneça um valor entre 0 Vcc e 10 Vcc para a porta XP4 da fonte LASER, responsável por receber os valores de potência de sistemas de comando externos, sendo a potência proporcional ao valor da tensão lida nesta porta (3500W equivalem a 3,5 Vcc). Há uma limitação por parte do LASER, em que apenas valores iguais ou superiores a 1,5 Vcc são lidos, limitando assim a potência mínima de operação do LASER em 1500 W.

Com relação aos dois canais de emissão de feixe, foram criadas 3 Função-M. A primeira, M55, desabilita os dois canais, colocando o sistema *beam switch channel* da fonte LASER na posição de *home*. Quando chamada esta função, mesmo que haja a presença do comando M50, não pode haver emissão do feixe LASER, por rotina redundante, no *software*

do CLP e na lógica de funcionamento do próprio LASER. Desta forma, ao encerrar um programa, antes da inserção do comando M30 (fim de programa), deve ser inserida a função M55, impossibilitando que o feixe LASER seja emitido acidentalmente (por interferências no circuito eletroeletrônico, por exemplo) oferecendo maior segurança para o operador nas atividades pré e pós processo executadas no interior da Sala de Processos.

As funções M56 e M57 são responsáveis por selecionar o Canal 01 e o Canal 02, respectivamente. Esta característica é muito interessante do ponto de vista do processo. Como já foi abordado, não é possível emitir feixe LASER pelos dois canais simultaneamente, no entanto, é possível alternar a emissão entre eles. Desta forma, caso sejam instalados dois cabeçotes diferentes no sistema, para dois processos distintos, por exemplo, é possível, a partir do mesmo programa de peça em Código-G, alternar entre dois processos na mesma peça. Ou seja, sem nenhuma alteração de reconfiguração, é possível efetuar dois processos distintos, dependendo apenas da disponibilidade de dois cabeçotes.

No *software* SINUMERIK Operate, que é utilizado a partir da IHM, foi criada uma janela específica e personalizada para o sistema LASER, que pode ser implementada de acordo com as necessidades futuras de utilização do equipamento.

Atualmente, esta janela possui apenas um campo, no qual pode ser inserido o valor da altura da peça que será processada. Este campo está associado a uma variável do sistema, que pode ser inserida no programa em Código-G. Assim, esta variável pode ser associada a uma movimentação no eixo Z que permite, a partir de uma distância focal previamente ajustada, compensar a altura da peça que será processada, facilitando a programação. Tendo em vista que esta janela já está criada, é possível customizá-la, para que seja possível inserir uma série de outras variáveis. Assim, a partir de um programa modelo criado em Código-G, que associa todas as suas movimentações e parâmetros a variáveis inseridas nesta tela personalizada, é possível realizar um processo sem que se tenha profundos conhecimentos na linguagem de programação em Código-G, tornando a operação do sistema LASER mais acessível.

Para condução do ar comprimido, para suprimento do fluxo de ar para o *crossjet* do cabeçote de soldagem, assim como do gás de processo, para a proteção da zona fundida, foram utilizadas eletroválvulas pneumáticas (5/3 vias e 5/2 vias, respectivamente, ambas com duplo acionamento), acionadas a partir do CLP. O operador do sistema LASER aciona, tanto o *crossjet* como o gás de processo a partir do pressionamento de 2

botões localizados no MCP do PCE. Também no MCP, foram disponibilizados 5 botões contendo os nomes dos gases disponíveis na central de distribuição de gás. Isto tem como objetivo, para um futuro melhoramento, permitir que seja, a partir do PCE, selecionado o gás de processo que se deseja utilizar. Atualmente, o procedimento não é realizado desta forma, sendo necessário antes de efetuar o processo, conectar o gás desejado à válvula pneumática, procedimento simples, tendo em vista que não são alterados com frequência.

O filtro-aspirador, assim como a função “*pointer*” do LASER, também são acionados a partir de botões localizados no MCP do PCE. Foi previsto um botão denominado “Luz”, devidamente associado a uma saída digital do CLP, que tem por objetivo prever a instalação de um sistema de iluminação auxiliar à região de trabalho, objetivando melhor definição das imagens captadas pela câmera coaxial do cabeçote óptico no posicionamento das peças processadas. O botão denominado “volantes” tem por objetivo alternar entre a utilização do *handwheel* fixo do MCP e o móvel do BHG (Figura 4.18).



## 5 VALIDAÇÃO DO SISTEMA LASER

Depois de finalizada a montagem de todos os sistemas e acessórios, iniciou-se a fase de ensaios de validação das instalações, com o objetivo de qualificá-los e de verificar o atendimento, tanto dos objetivos, geral e específicos, como das especificações de projeto.

Em trabalhos acadêmicos que trazem como temática o desenvolvimento de máquinas automatizadas, especialmente quando estas visam a realização de processos de fabricação, podem ser usados diferentes critérios para a avaliação dos resultados obtidos. Pode ser avaliado o processo de desenvolvimento em si, observando a adequação da metodologia utilizada ou desenvolvida, como o proposto nos trabalhos de Bertán (2009) [33] e Pereira (2002) [51]. O foco também pode ser voltado aos resultados referentes às características do sistema de movimentação, realizando ensaios de verificação geométrica e dimensional, na própria máquina ou nas peças por ela fabricadas, como foi proposto pelos trabalhos de Schmitz (2014) [52] e Rachadel Junior (2013) [53]. Ainda, pode-se avaliar qualitativamente resultados de aplicações em corpos de provas fabricados no sistema em questão, como o proposto por Silveira (2015) [40].

A validação do sistema LASER desenvolvido se dará de forma qualitativa, avaliando individualmente os módulos concebidos, e verificando o cumprimento das especificações de projeto, determinadas na fase de Projeto Informacional. Também, com intuito de comprovar o funcionamento do sistema e sua resposta, dados os parâmetros de entrada, foram realizados 2 ensaios, fornecendo análises qualitativas destes processamentos.

O primeiro resultado verificado está relacionado ao funcionamento individual de todos os módulos construídos, conforme proposto no desenvolvimento do Capítulo 4.

Todos os módulos foram arranjados e o equipamento teve seu correto funcionamento verificado. A comunicação com a fonte LASER foi bem-sucedida e, a partir de programas inseridos em Código-G na IHM do PCE, foi possível realizar os comandos de ligar e desligar (emissão do feixe) e alterar potência da fonte LASER.

Com relação à segurança do sistema LASER, foi verificado o correto funcionamento da lógica do circuito de *intertravamento*. As verificações foram feitas, primeiramente, desacoplando o circuito de segurança da fonte LASER. Ao serem acionados, individualmente, os 3 botões de emergência instalados, foi constatado o corte do circuito de potência do PCP.

Com a fonte LASER acoplada ao *intertravamento*, foi verificado o correto funcionamento da interligação entre os circuitos de segurança. Foi constatado que, na ocorrência de qualquer situação relacionada à emergência do LASER, houve resposta por parte do circuito de *intertravamento* do PCP. O contrário também foi testado, sendo o LASER desabilitado em emergência quando acionado qualquer dispositivo de segurança do PCP.

A criação e o correto funcionamento de todas as Funções-M e da variável H, confirma a integração da fonte LASER ao CNC, não havendo necessidade de nenhum sistema de comando adicional (como *software* do LASER, por exemplo) para efetuar comandos no sistema. Da mesma forma, podem ser criadas outras funções para comando, por exemplo, de uma fonte de soldagem a arco, possibilitando a realização de um processo de soldagem híbrida LASER-MIG/MAG. Isto também se reflete no comando das funções do *powder feeder*, em que é necessário o controle de rotação do disco de alimentação e a habilitação do suprimento de gás e de pó. Isto, além de confirmar a possibilidade de integrar diversos sistemas periféricos, com total comando baseado em CNC, reforçando a característica de reconfigurabilidade do equipamento.

As características de modularidade e reconfigurabilidade são avaliadas de um ponto de vista qualitativo, pelo qual, pôde-se verificar o atendimento das especificações. Foram desenvolvidos 3 módulos: um módulo de interface com o usuário, externo a Sala de Processos -PCE-, um módulo de controle de todo o sistema LASER -PCP- e os módulos mecânicos de movimentação, dos eixos X, Y e Z, todos individuais, suprimindo assim a característica de modularidade

O PCE atende sua principal função: prover a interface usuário-sistema LASER; onde foram atribuídos botões no MCP que permitem comandar os sistemas periféricos a partir da Sala de Comando. A criação da tela personalizada no *software* SINUMERIK Operate, auxilia consideravelmente a operação e programação do sistema, onde a partir de valores inseridos em campos específicos pode-se alterar valores relacionados a movimentações, como compensação de altura de peça, percurso de trabalho e etc. Com o intuito de facilitar a operação do sistema LASER, foram gravados, de forma indelével (gravação a LASER), os nomes das funções dos botões do PCE (tanto da placa de botões como no próprio MCP), oferecendo uma estética profissional ao módulo e garantindo a operacionalidade do equipamento de forma intuitiva.

O PCP cumpre a função de ser o principal módulo de comando e controle do sistema LASER, centralizando todo o fluxo de sinais dos módulos desenvolvidos e dos equipamentos periféricos. Sua capacidade de

controle de movimento se limita à interpolação simultânea de 5 eixos, sendo possível sua expansão para até 32 eixos. Com relação ao CLP do PCP, foram disponibilizadas 32 entradas digitais, 32 saídas digitais, 4 saídas analógicas e 2 entradas analógicas, das quais 24 entradas e 12 saídas digitais, assim como 2 saídas e 1 entrada analógica caracterizam I/Os livres do CLP do PCP onde, a partir de mudanças do *firmware* deste controlador e de pequenas montagens de *hardware*, é possível adicionar e/ou retirar Funções-M, atribuir funções aos botões livres do MCP do PCE, acionar equipamentos periféricos e criar rotinas para o funcionamento do sistema LASER, sem modificar configurações do CNC, dando suporte às futuras atividades de reconfiguração do equipamento (o restante já está associado ao funcionamento do sistema).

Nas atividades de reconfiguração do sistema, em que sejam necessárias mudanças nas características de configuração dos eixos de movimentação, é possível, a partir da IHM do PCE, alterar configurações como *software limits*, sentidos de movimento de eixos, velocidades limites (em G0, por exemplo). Além disto, através desta mesma IHM, é possível realizar uma série de ajustes em tarefas de otimização, como alteração dos parâmetros de controle (PI – Proporcional Integral) e ajuste de parâmetros de aceleração, sem precisar acessar o *firmware* do CLP do sistema. Para todas estas atividades, faz-se necessário o conhecimento do sistema de comando SINUMERIK 840D SL.

A característica de reconfigurabilidade do PCP é reforçada pela disponibilidade das 2 conexões para interligação do circuito de *intertravamento* do sistema LASER com circuitos de emergência de equipamentos que sejam por ele comandados. Estas conexões tanto fornecem como recebem um sinal dos sistemas externos (*inputs* e *outputs*), para absoluta integração dos sistemas de segurança externos.

Com relação às interfaces de comunicação entre os diferentes módulos e os sistemas periféricos, é possível comprovar sua adequação, todos os cabos são conectados ao PCP, devidamente identificados em um sistema de codificação que auxilia de forma bastante significativa o processo de interconexão entre os módulos, evitando erros oriundos da montagem. Todos os cabos utilizados para estas interconexões possuem blindagem, devidamente aterrada na extremidade ligada ao PCP, com objetivo de conduzir correntes parasitas do circuito, resultantes de campos eletromagnéticos oriundos de sistemas externos ou do próprio sistema LASER, buscando evitar interferências para o correto funcionamento do sistema.

Uma característica do sistema desenvolvido, é a possibilidade de comandar mais de um sistema de movimentação, utilizando o mesmo comando. Como foi abordado no Capítulo 4, Seção 4.1.2, o SINUMERIK 840D SL pode comandar até 10 canais diferentes, que podem totalizar 32 eixos de movimentação. Cada um destes canais pode comandar um sistema individual, com configurações de controle distintas umas das outras. Para isto, basta haver os devidos módulos de acionamento (*driver* e motor) e a capacidade de suprimento de potência para estes. O comando permanece inalterado, sendo apenas necessário acrescentar as conexões da topologia DriveCLIQ, conforme foi abordado na Figura 4.4. Isto é feito utilizando o mesmo PCE e o mesmo PCP, acrescentando módulos de acionamento adicionais.

Uma importante característica, relacionada a reconfigurabilidade, está na possibilidade de, a partir da troca de um módulo do cabeçote de soldagem, adequá-lo para a realização do processo de LASER *cladding*.

Com o cabeçote de soldagem utilizado, é possível realizar processos de tratamento térmico localizado e refusão, observando os devidos parâmetros de processo e as limitações do sistema de movimentação, como velocidade dos eixos, potência mínima do LASER e características do feixe.

A infraestrutura do local de instalação e operação do sistema LASER permite um isolamento adequado do operador, dando segurança e impedindo que haja algum contato direto do feixe LASER na pele e/ou nos olhos. A partir da Sala de Comando, é possível supervisionar a Sala de Processos, pelas imagens obtidas pela câmera IP. A peça de trabalho pode ser devidamente zerada, sem que seja necessário estar ao lado dos sistemas de movimentação, utilizando as imagens da câmera coaxial instalada no cabeçote LASER. Caso isso seja necessário, o componente Siemens BHG permite que o sistema de movimentação seja movimentado, em função JOG, até 4 metros distante do PCE. O funcionamento da fonte LASER pode ser totalmente supervisionado a partir do *software* instalado no PC da Sala de Comando.

Apesar do CNC SINUMERIK 840D SL ser considerado um comando de “arquitetura fechada”, é dada ao usuário (aqui refere-se ao responsável pela configuração da máquina) bastante flexibilidade e abertura na configuração do sistema, praticamente todas as variáveis disponíveis internamente ao comando são acessíveis para utilização na construção de lógicas de *firmware* do CLP. Isto é algo essencial, do ponto de vista da configuração de um comando para um sistema com características não convencionais, especialmente tratando-se de um ambiente de pesquisa.

É possível refutar Bertrán (2009) [33], que afirma ser praticamente impossível configurar um comando industrial de arquitetura fechada a um sistema não convencional, sem que este tenha sido desenvolvido especificamente para desempenhá-lo. Nem todos os sistemas industriais possuem a mesma característica, no entanto, é possível afirmar que o comando SINUMERIK 840D SL, apesar de ser considerado de arquitetura fechada, é altamente configurável, disponibilizando ao seu usuário uma quantidade significativa de parâmetros utilizáveis para a adaptação deste a diversos processos e operações.

Apesar de todas as vantagens oferecidas pelo sistema CNC utilizado, é preciso avaliar a real necessidade da aplicação, bem como o “custo x benefício” em relação a comandos mais simples e de baixo custo, como os apresentados em outros trabalhos relacionados ao projeto de sistemas numericamente comandados [40], [52], [54], [55].

As configurações iniciais do sistema CNC SINUMERIK 840D SL são complexas e detalhadas, sendo necessário um conhecimento técnico bastante específico e aprofundado do comando na atividade de *Start-up*, exigindo treinamentos especializados e um aprofundamento no estudo dos manuais do fabricante, contendo os procedimentos de *start-up*. É possível fazer as configurações (e reconfigurações) do sistema de comando utilizando o material disponibilizado para conhecimento dos diversos parâmetros abertos para configuração.

Para verificar o atendimento dos parâmetros de velocidade e potência do LASER, foram realizados alguns procedimentos de soldagem, sem compromisso de otimização de parâmetros. Para corpos de prova, foram utilizadas chapas de aço inoxidável AISI 304 com 1mm de espessura.

A Figura 5.1 ilustra o procedimento de alinhamento (*zeramento*) de uma peça, utilizando a câmera coaxial do cabeçote. Esta imagem é visualizada a partir do monitor instalado na Sala de Comando. A cruz de referência deve ser posicionada e ajustada através do módulo de controle da câmera, para coincidir com o posicionamento do feixe LASER (comparação com a posição de incidência do *pointer*).

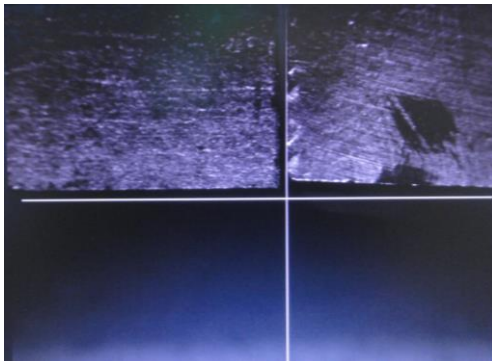


Figura 5.1 – Procedimento de posicionamento da peça em relação ao feixe LASER (Autor)

A Figura 5.2 ilustra uma amostra presa ao dispositivo de sujeição durante o processo alinhamento, com o *pointer* iluminando a linha de soldagem, e após o processo de soldagem. O *pointer* indica o local onde o feixe LASER irá incidir. Muito útil para ciclos de verificação, antes da execução do processo.

A Figura 5.3 mostra 3 amostras de soldagem autógena a LASER realizadas com diferentes parâmetros de potência e velocidade de soldagem. Os valores dos parâmetros foram: a) 1500 W, 1500 mm/min; b) 2500 W, 2500 mm/min; c) 2500 W, 4200 mm/min. Nos 3 ensaios, o ponto focal foi posicionado na superfície da peça (Z0). Como gás de processo, foi utilizado Argônio com vazão de 12 l/min.

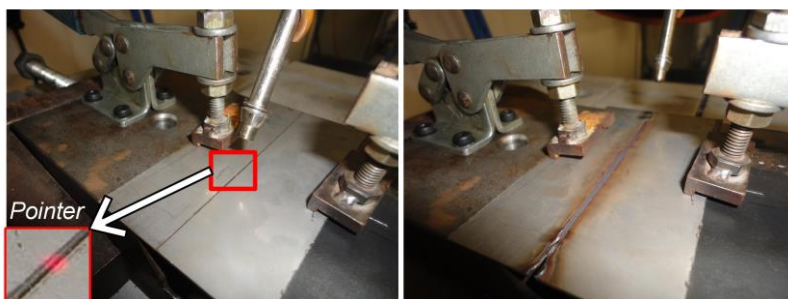


Figura 5.2 – Alinhamento e sujeição da peça durante o processo (Autor)

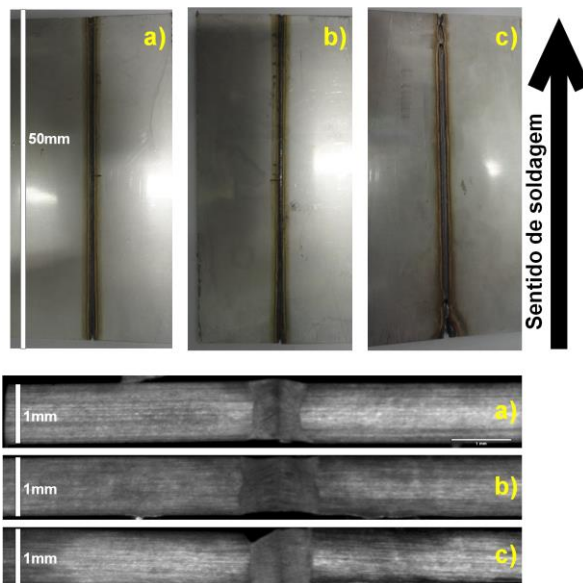


Figura 5.3 – Amostras de soldagem LASER autógena (Autor)

Com objetivo de mostrar a possibilidade de alterar a característica da superfície de uma amostra de aço, foram executados ensaios de refusão em uma amostra de aço ABNT 1045. Para reduzir a densidade de energia, o foco do laser foi afastado da superfície (em Z), aumentando o diâmetro do ponto focal (*spot size*), causando refusão localizada apenas na camada próxima à superfície da amostra. Os deslocamentos em relação à distância focal foram 87,5 mm (Z+) e 47,5 mm (Z+), gerando um diâmetro do ponto focal de aproximadamente 3,5 mm e 2,5 mm.

A determinação da posição do ponto focal e dos respectivos diâmetros do feixe são uma aproximação feita com base em ensaios realizados em planos inclinados onde, por relações trigonométricas e de acordo com o perfil do feixe “desenhado” sobre uma chapa, é possível inferir, de forma aproximada, sobre o diâmetro do feixe em determinada distância focal. É uma medida alternativa e imprecisa, tendo em vista que não se dispõe de equipamentos apropriados para efetiva caracterização do feixe LASER, o que é muito importante para a definição e otimização de parâmetros para os processos. No entanto, apesar de impreciso, o método utilizado atendeu de forma satisfatória as necessidades para os processos realizados, especialmente os de soldagem.

A Figura 5.4 ilustra imagens das superfícies afetadas pelo feixe LASER e das respectivas imagens da seção transversal, observadas por um microscópio digital. Os parâmetros utilizados foram: a) velocidade de avanço 1500 mm/min, potência 1500 W, incremento lateral 2 mm (passes) e distância focal Z+85,6 mm; b) velocidade de avanço 1500 mm/min, potência 1500 W, incremento lateral 1 mm (passes) e distância focal Z+47,5 mm.

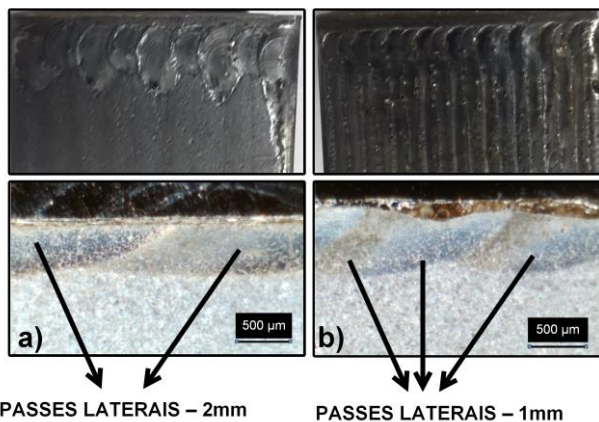


Figura 5.4 – Efeito de passes sucessivos do feixe LASER sobre a superfície em Aço ABNT 1045 (Autor)

As imagens da superfície das amostras mostram a característica resultante da refusão das diversas linhas sobre as quais incidiu o LASER. As macrografias mostram que, além da região refundida próxima a superfície, verifica-se também a existência de uma ZTA.

Estes ensaios não têm um compromisso quanto aos resultados obtidos, no sentido de determinar as transformações de fase, as microestruturas geradas, as espessuras da camada afetada, as regiões termicamente afetadas, etc. São apenas ensaios que visam comprovar a capacidade do equipamento na realização de processos com o LASER, a sua resposta quanto à imposição dos parâmetros de entrada e, por fim, sua adequação para uso nas futuras realizações de pesquisa nas áreas de processos LASER. Isso visa dar ferramentas para comprovação do atendimento dos objetivos do trabalho e das especificações de projeto.

Por fim, com intuito de analisar a situação de atendimento, ou não, das especificações de projeto, é apresentada a Tabela 5.1. Nela estão apresentados os mesmos itens propostos na Tabela 3.1 do Subcapítulo 3.1, no



entanto, contendo os valores alcançados para cada especificação e sua respectiva situação de atendimento.

Tabela 5.1 – Situação de atendimento das especificações de projeto (Autor)

<b>Item</b>	<b>Especificação</b>	<b>Valores alcançados</b>	<b>Situação</b>
1	Potência do LASER	1,5 a 10 kW	Atendida
2	Velocidade de avanço	15 000 mm/min	Superada
3	Resolução	$\geq 0,002$ (Teórica)	Não verificada
4	Tensão de Alimentação	380 - Trifásico	Atendida
5	Eixos de posicionamento	3 - Cartesiano	Atendida
6	Gases de processo	He, Ar, N, CO <sub>2</sub>	Parcialmente atendida
7	Vazão dos gases	25 l/min	Superada
8	Volume de trabalho	350 x 350 x 350 mm	Superada
9	Taxa de alimentação de pó	-	Depende do pó
10	Diâmetro das fibras	400 $\mu\text{m}$	Parcialmente atendida
11	Modelo CNC	Industrial – SINU-MERIK 840D SL	Atendida
12	Processos possíveis	Soldagem, <i>cladding</i> , tratamento térmico e Refusão	Superada
13	Segurança	Total integração com circuito de <i>intertravamento</i>	Atendida
14	Isolamento do Operador	Excluída	Atendida
15	Modularidade	Sim	Atendida
16	Reconfigurabilidade	Sim	Atendida



## 6 CONCLUSÃO

Foram projetados, fabricados e montados diversos módulos para a concepção do sistema LASER. Obteve-se êxito, na verificação do correto funcionamento do equipamento. No entanto, o tamanho do escopo de projeto impossibilitou a realização de otimizações aprofundadas, relacionadas aos parâmetros de controle, por exemplo, assim como a caracterização geométrica e dimensional do equipamento.

Com relação ao objetivo geral do trabalho, pode-se concluir que este foi completamente alcançado, e a operacionalização do LASER de fibra de 10 kW, do fabricante IPG Photonics®, foi efetiva. A sua integração com CNC industrial se mostrou viável, sendo realizada e comprovada. O equipamento desenvolvido, denominado de sistema LASER, mostra ser modular e reconfigurável, com módulos para interface com o usuário, para comando/controle e para movimentação relativa das amostras a serem trabalhadas em relação ao feixe LASER.

Com relação à segurança, a operação remota mostrou ser eficiente, isolando completamente o ambiente de realização do processo e permitindo que o operador realize todos os comandos a partir de um ambiente seguro para operações com o sistema LASER de alta potência, utilizando o PCE e todas as telas de monitoramento disponibilizadas com este propósito. A partir desta sala, é possível realizar todas as configurações do equipamento e acionamento de sistemas periféricos.

As demais adequações da infraestrutura, como instalação de central de gases, instalação do circuito de aterramento e do sistema de proteção da alimentação do LASER e do Chiller foram efetivos e se mostraram adequados para a operacionalização do LASER e do sistema de comando numérico.

Quanto aos objetivos específicos, explicitados na Seção 1.3, pode-se concluir que:

- a) o sistema de movimentação mecânica, recondicionado com novos fusos de esferas recirculantes, mancais e acionamentos, mostrou-se adequado às características necessárias para a efetivação dos processos propostos;
- b) um painel eletroeletrônico contendo circuitos de lógica e de potência foi devidamente projetado, desenvolvido e validado, sendo este denominado PCP, cumprindo as funções para as quais foi concebido;
- c) o comando numérico industrial, modelo SINUMERIK 840D SL do fabricante Siemens, mostrou-se altamente capaz de atender às especificações do projeto, possibilitando o comando de

- todo o sistema LASER (fonte LASER, periféricos e sistemas de movimentação);
- d) a infraestrutura física para a operação da fonte LASER e de todos os demais sistemas periféricos foi desenvolvida e, mostrou-se apropriada para os processos;
  - e) a lógica de segurança e *intertravamento* se mostrou adequada ao sistema, permitindo operá-lo com ou sem o acoplamento da fonte LASER. O sistema de segurança permite comunicações com sistemas de segurança de outros equipamentos periféricos, reforçando a modularidade e reconfigurabilidade do equipamento;
  - f) o sistema LASER é modular, composto por dois módulos de comando e controle, o PCP e o PCE, e por três módulos de movimentação linear (X, Y e Z). Também é possível atestar a capacidade de reconfiguração do sistema, podendo o comando numérico ser altamente configurado para as mais diversas necessidades do equipamento. Além disso, componentes de substituição, como o bocal de LASER *cladding*, pode ser instalado de forma simples, reconfigurando a máquina para um processo completamente distinto, sem necessidades de ajustes adicionais;
  - g) uma interface, localizada no PCP, permite a devida conexão com a fonte LASER assim como com os demais sistemas periféricos e módulos do sistema. Esta interface permite que todos os sinais do sistema sejam emitidos ou recebidos pelo módulo de comando central do sistema, o PCP. Neste mesmo sentido, foram projetados e fabricados todos os cabos, para interconexão entre os diversos módulos e sistemas, todos blindados e com conectores que garantem, por meio de artifícios mecânicos, a efetiva conexão destes à interface;
  - h) o sistema LASER desenvolvido mostrou-se adequado para a realização dos processos de soldagem autógena a LASER, LASER *cladding*, tratamento térmico localizado a LASER e refusão a LASER. No entanto, o sistema se mostra preparado para a adaptação de outros dispositivos, como uma fonte de soldagem a arco, para realização do processo de soldagem híbrida LASER-MIG/MAG.

Portanto, com base nas conclusões, o sistema LASER desenvolvido é apropriado e seguro para operações, especialmente na realização

de pesquisas na área de processos de fabricação. O objetivo geral e todos os objetivos específicos foram alcançados em suas totalidades.

Com relação ao modelo de referência utilizado como metodologia para o desenvolvimento do projeto, conclui-se que auxiliou de forma significativa a organização das etapas e das tomadas de decisão realizadas durante o processo de projeto. Na fase de projeto conceitual, os modelos observados foram essenciais para auxiliar a divisão do problema e conceber os diversos módulos do sistema, auxiliando consideravelmente na seleção dos princípios de solução.



## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base na experiência adquirida durante a realização deste trabalho, este Capítulo apresenta sugestões, com objetivo de auxiliar na realização de projetos similares ou de continuidade a este desenvolvimento proposto.

O comando SINUMERIK 840D SL dispõe de uma série de ferramentas, baseadas em *software*, relacionadas a compensações de erros do sistema de movimentação, como compensação de *backlash* e compensação de erros de posicionamento, baseado na inserção de matriz de erros deste sistema. Estas duas ferramentas permitem realizar correções de movimentos sem nenhuma intervenção mecânica no sistema de movimentação para corrigir erros. Para aumentar a precisão de movimentos sugere-se verificar e mapear os erros geométricos do sistema de movimentação e corrigi-los com auxílio dos recursos oferecidos pelo comando SINUMERIK 840D SL.

Sugere-se a realização de ensaios no sistema de movimentação, observando princípios de verificação das normas, especialmente a NBR-ISO 230, utilizando técnicas de medição adequadas, como interferometria LASER ou baseado em padrões corporificados, com o objetivo de mensurar os desvios dimensionais e geométricos do sistema de posicionamento, objetivando as devidas compensações em *software*.

O sistema de comando numérico utilizado, de modelo industrial, possui um custo muito elevado quando comparado com outros sistemas mais simples, especialmente os CNCs baseados em PC. Portanto, sugere-se, utilizando o mesmo sistema de movimentação deste projeto, realizar a comparação qualitativa e quantitativa do sistema Siemens SINUMERIK 840D SL com um sistema CNC baseado em PC, como Mach3 (baseado em Windows®) e o LINUX CNC. Uma série de possíveis ensaios poderiam ser realizados para estas comparações, como os geométricos e dimensionais, citados no parágrafo anterior, assim como de medição de circularidade, repetibilidade, exatidão, resistência, confiabilidade, mantenebilidade e etc. O resultado de uma pesquisa neste sentido tem grande importância para a indústria, permitindo argumentar e até propor um método para auxiliar no processo de escolha de determinada tecnologia de comando numérico para uma ou outra aplicação específica.

Sugere-se a instalação de 2 eixos de movimentação adicionais (A, B), para permitir uma movimentação relativa em cinco graus de liberdade, possibilitando trabalhos em superfícies livres. A movimentação em cinco eixos é especialmente interessante o processo de LASER Cladding. O PCP e a configuração do sistema CNC já estão adequados e preparados

para realizar comando e interpolação de 5 eixos simultâneos, sendo apenas necessário desenvolver o sistema mecânico de movimentação adequado para implementação de dois eixos adicionais.

Sugere-se a instalação de um sistema automatizado de seleção e vazão do gás de processo que permita, a partir do PCE ou a partir de Funções-M no código G, selecionar o gás e a vazão de gases para o processo. Ainda neste sentido, pode-se usar uma válvula pneumática proporcional que permita, a partir de uma variável inserida no Código-G, mudar a taxa de alimentação de gás, permitindo variações durante a execução do processo. Neste caso, podem-se estudar sistemas misturadores, que permitam dosar quantidades de diferentes gases, afim de otimizar os processos quanto a proteção gasosa oferecida à região fundida.

Sugere-se a implementação de uma lógica, baseada no *firmware* do CLP, que permita pulsar o sinal de entrada da fonte LASER responsável pela potência do feixe (XP4), conforme o desenvolvido por Shcherbakov, *et al* (2013) [3], utilizando uma variável em Código-G (assim como foi feito com a variável “H” para potência do feixe) para variar a frequência do pulso.

Sugere-se a aquisição de um segundo cabeçote que permita realizar, alternadamente, as operações de soldagem/ tratamento térmico e *cladding*, aproveitando os dois canais do equipamento LASER, tendo em vista que, a partir do Código-G, pode-se selecionar e alternar o respectivo canal para emissão do feixe.

Baseado em resultados de pesquisas publicadas na literatura, sugere-se a instalação de uma segunda fonte LASER, com potência de 100 a 200 W, que permita modulação da potência de saída do feixe LASER em pulsos de nanossegundos. Quando unidos LASERs CW e pulsados têm mostrado bons resultados no processo de soldagem, especialmente tratando-se da soldagem de materiais dissimilares, como aço e alumínio, por exemplo [56].

Sugere-se a instalação de um sistema de alimentação de material, em forma de arame, o qual permita realizar processos LASER não autógenos. Este dispositivo pode ser, facilmente, controlado a partir de Funções-M do CNC. Além disto, a adição de material é geralmente necessária quando realizados processos de soldagem de materiais dissimilares [18], [56] ou com maiores espessuras.

Para aumentar a característica de flexibilidade do sistema LASER quanto aos processos efetuados, sugere-se a instalação e integração de um equipamento de soldagem a arco, especialmente MIG/MAG, o qual possa ter seus parâmetros inseridos via *I/Os*, fazendo com que este possa ser



comandado, assim como o LASER, a partir de comandos inseridos no programa em Código-G.

Uma característica que pôde ser observada, devido às características dinâmicas dos sistemas de movimentação utilizados, é a baixa taxa de aceleração que é possível atingir. Isto é ainda mais prejudicial tendo em vista, principalmente, o pequeno volume de trabalho, onde muitas vezes não se possui curso suficiente para acelerar e desacelerar o sistema dentro do curso disponível para o processo na peça. Assim, sugere-se a instalação de um sistema com melhor dinâmica, como um sistema robótico paralelo ou um cabeçote galvanométrico, que possa realizar pequenas movimentações relativas do feixe sobre a peça, fazendo com que os eixos de movimentação principais sejam responsáveis apenas por movimentações maiores.

Para melhor parametrização e controle dos processos, sugere-se a caracterização quanto ao comportamento do perfil do feixe LASER, variando-se a distância focal e nas diferentes potências de emissão, identificando, se possível, os modos de emissão.



**REFERÊNCIAS**

- [1] POPRAWE, R. Tailored Light 2, 1.ed. Aachen: Springer-Verlag, 2011. 604 p.
- [2] DAVIM, J. P. Lasers in Manufacturing. 1.ed. Hoboken: Wiley, 2012. 306 p.
- [3] SHCHERBAKOV, E. *et al.* Industrial Grade 100 kW Power CW Fiber Laser. Adv. Solid-State Lasers Congr., vol. 5, p. 4, 2013.
- [4] BELTFORE, D. What's new with 100kW Fiber LASERs, 2015. [Online]. Disponível em: <<http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-30/issue-1/departments/update/what-s-new-with-100kw-fiber-lasers.html>>. [Acesso em: 18-Mar-2016].
- [5] BACK, N. *et al.* Projeto Integrado de Produtos - Planejamento, Concepção e Modelagem. 1. ed. Barueri: Manole, 2008. 601 p.
- [6] HITZ, C. B., EWING, J. J., HECHT J. Introduction to Laser Technology. 4. ed. Piscataway: Wiley-IEEE Press, 2012. 312 p.
- [7] INJEYAN, H., GOODNO, G. D. High-Power Laser Handbook. 1.ed. [New York]: Mc Graw-Hill, 2011. 618 p.
- [8] MULIMA, J. B. Hybrid Laser Arc Welding with High Power Diode Laser. 2008. 329 p. PhD Thesis - University of Wollongong.
- [9] WALLACE, J. Materials Processing: 100kW Fiber LASER, Power Meter Serve Industry, 2013. [Online]. Disponível em: <<http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-49/issue-12/world-news/materials-processing-100-kw-fiber-laser-power-meter-serve-industry.html>>. [Acesso: 18-Mar-2016].
- [10] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANST® Z136.5 - Education Institutions. USA, 2009.
- [11] OLSEN, F. O. Hybrid Laser-Arc Welding. 1.ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 328 p.
- [12] KOU, S. Welding Metallurgy. 2. ed. Wisconsin: Wiley-Interscience, 2003. 466 p.
- [13] AHMED, N. New developments in advanced welding. 1.ed. Cambridge: Woodhead, 2005. 303 p.
- [14] GABZDYL, J. Welding with ns Pulsed Fiber Lasers. Apresentação SPI LASER. 19-Novembro-2015.

- [15] REN, W. *et al.* A comparative study on fiber laser and CO<sub>2</sub> laser welding of Inconel 617. *Materials & Design*, vol. 76, p. 207–214, 2015.
- [16] ZOU, J. L. *et al.* A novel method for observing the micro-morphology of keyhole wall during high-power fiber laser welding. *Materials & Design*, vol. 89, p. 785–790, 2016.
- [17] CASALINO, G., MORTELLO, M., CAMPANELLI, S. L. Ytterbium fiber laser welding of Ti6Al4V alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015.
- [18] SUN, J. *et al.* Investigation of laser welding on butt joints of Al/steel dissimilar materials. *Materials & Design*, vol. 83, p. 120–128, 2015.
- [19] ZHANG, L. *et al.* Microstructure and properties of the laser butt welded 1.5-mm thick T2 copper joint achieved at high welding speed. *Materials & Design*, vol. 88, p. 720–736, 2015.
- [20] PAYDAS H. *et al.* Laser cladding as repair technology for Ti–6Al–4V alloy: Influence of building strategy on microstructure and hardness. *Materials & Design*, vol. 85, p. 497–510, 2015.
- [21] YA, W., PATHIRAJ, B., LIU, S. 2D modelling of clad geometry and resulting thermal cycles during laser cladding. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 230, p.217-232, 2015.
- [22] MELO, L. Powder Jet Particle Density Distribution Analysis and Qualification for the LASER Metal Deposition. 2015. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [23] SCHWEITZER, L. G. de S. Laser Cladding for Epitaxial Nickel Base Superalloys Turbine Blades. 2014. 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [24] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI® Z136.1 - Use of LASER. USA, 2009.
- [25] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI® Z136.7 - Protective Equipment. USA, 2009.
- [26] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI® Z136.8 - Research, Development or Testing. USA, 2009.

- [27] L. I. of America, “Guide for the Selection of LASER Eye Protection.” LIA, 2007.
- [28] WEDA, J. Practical LASER Safety, 2011. [ONLINE] Disponível em: <[http://www.laserlab.vu.nl/en/Images/Practical\\_Laser\\_Safety\\_dec2011\\_tcm211-313232.pdf](http://www.laserlab.vu.nl/en/Images/Practical_Laser_Safety_dec2011_tcm211-313232.pdf)>. [Acesso: Fevereiro-2016].
- [29] SUH, S.-H. Theory and Design of CNC Systems. 1. ed. London: Springer-Verlag, 2008.(Springer series in advanced manufacturing)
- [30] LACALLE L. N. L. de, LAMIKINZ, A. Machine Tools for High Performance Machining. 1.ed. London:Springer-Verlag, 2009.456p.
- [31] ALTINTAS, Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2012. 380 p.
- [32] “One Introduction To Computer Numerical Control and Advantages and Its Components.” [Online]. Available: <[http://www.pearsonhighered.com/assets/hip/us/hip\\_us\\_pearsonhighered/samplechapter/0132176033.pdf](http://www.pearsonhighered.com/assets/hip/us/hip_us_pearsonhighered/samplechapter/0132176033.pdf)> [Acesso: 08-Dez-2015].
- [33] BERTRÁN, J. A. R. Sistematização do Processo de Projeto em Automação de Máquinas Cartesianas com Acionamento Eletromecânico-Ênfase no Posicionamento. 2009. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [34] FAGOR AUTOMATION. CNC Fagor 8070. p. 3, 2015. (Catálogo do Fabricante)
- [35] Siemens AG. IHM Sinumerik 840D. 2015. (Catálogo do Fabricante)
- [36] FANUC. Functions, Communication, Software. p. 273, 2015. (Catálogo do Fabricante)
- [37] IPG Photonics, “Operating Manual Ytterbium Laser System S/N 11076750.” Oxford - EUA, 2012. 228 p. (Manual do Fabricante).
- [38] PAHL G., BEITZ, W., FELDHUSEN, J., GROTE, K.-H. Engineering design: a Systematic Approach. 3. ed. Londres: Springer, 2007. 629 p.
- [39] FONSECA, A. J. H. Sistematização do Processo de Obtenção das Especificações de Projeto de Produtos Industriais e Sua Implementação Computacional. 2000. 198 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina,

Florianópolis.

- [40] SILVEIRA, C. A. Integração de Um Sistema de Impressão 3D em Uma Arquitetura Modular de Posicionamento Cartesiano. 2015. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [41] Kappa Optronics GmbH. Kappa Black-and-White Camera CF8/5 MX and Control Unit for Kappa Camera MCX 200. Gleichen: Kappa. 2012. 35 p. (Manual do Fabricante).
- [42] PRECITEC. Welding Head YW52. Gaggenau: Precitec. 2011. 172 p. (Manual do Fabricante)
- [43] READY, J. F. LIA Handbook of Laser Materials Processing. Orlando: Magnolia Publishing. 2001. 740 p.
- [44] STOETERAU, R. L. Desenvolvimento do Protótipo de uma Máquina-Ferramenta Comandada Numericamente para Usinagem de Ultraprecisão com Ferramenta de Geometria Definida. 1999. 243 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [45] MENDES, L. A. Desenvolvimento e Validação de um Reator Piloto para Processamento de Materiais por Plasma. 2001. 310 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [46] Siemens AG. Sinumerik 840D SL - Service and Start-up V2.6.0. São Paulo: Siemens, 2014. 723 p. (Documentação fornecida em curso - Siemens-SP)
- [47] WEG Drives & Controls - Automação. CP-D 301 - Controle de Parada de Emergência. São Bernardo do Campo: WEG. 2 p. (Manual do fabricante).
- [48] SLOCUM, A. H. Precision Machine Design. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992. 750 p.
- [49] KTR Kupplungstechnik GmbH. Cross section of KTR products: Torque Limiters, Clamping Elements, Hydraulic Components, Hydraulic Brakes. Rheine: KTR, 2015. p. 2–37. (Catálogo técnico do fabricante).
- [50] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão. ABNT, Rio de Janeiro, 2004.

- [51] PEREIRA, M. Metodologia de Projeto para Sistemas Mecânicos de Precisão Reconfiguráveis. 2004. 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [52] SCHMITZ, L. Desenvolvimento de Servoacionamentos Paralelos para um Manipulador Cartesiano de Grande Porte para Aplicações LASER. 2014. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [53] RACHADEL Jr, J. R. Avaliação da Exatidão de Posicionamento Angular de um Eixo Servoacionado. 2013. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [54] LUTZ, I. E. Sistema de Comando Reconfigurável para Máquinas CNC de Múltiplos Eixos. 2015. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [55] Gesser, F. J. Proposta de um Sistema de Baixo Custo para o Fresamento em Cinco Eixos. 2012. 90 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Mecatrônica Industrial) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis.
- [56] FRANK, S. Development of a Double Beam Process for Joining Aluminum and Steel. *SPIE*, vol. 8963, 2014.
- [57] ITO, Y. Modular Design for Machine Tools. 1. ed. Tokyo: McGraw-Hill, 2008. 530 p.
- [58] KOREN, Y. The Global Manufacturing Revolution: Product, Process, Business Integration and Reconfigurable Systems. Hoboken: John Wiley, 2010. 422 p.
- [59] ROMANO, L. N. Modelo de Referência para o Processo de Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas. 2003. 321 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [60] NUNES, E. B. *et al.* Efeito da Energia de Soldagem sobre a Microestrutura e Propriedades Mecânicas da Zona Afetada Pelo Calor de Juntas de Aço Inoxidável Duplex. *Soldagem & Inspeção*, vol. 16, no. 3, p. 223–231, 2011.
- [61] FARO, T. M. C. C. de B. e. Estudo e Otimização do Corte LASER de Alta Velocidade em Chapa Metálica Fina. 2006. 155 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- [62] DEZOTTI, A. Diretrizes para o Projeto de Painel Elétrico de Comando e Acionamento de Máquinas CNCs Reconfiguráveis. 2012. 104 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Mecatrônica Industrial) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis.



## APÊNDICE A - SISTEMAS MODULARES

Há uma tendência, atualmente, de busca pela modularidade, tanto na concepção de produtos, como na concepção de linhas produtivas. No projeto de máquinas-ferramenta, isto é uma realidade desde a década de 1930 e é considerado por autores como o precursor do conceito de modularidade [57]. Podemos encontrar conceitos de modularidade na indústria de produção de motores de combustão, motores elétricos, móveis, dispositivos de informática, equipamentos metrológicos, equipamentos industriais, máquinas automáticas dentre muitas outras áreas [57], [51].

O projeto de sistemas modulares, no que diz respeito ao desenvolvimento de máquinas, tem como objetivo criar uma variedade de concepções finais baseada na combinação de módulos, menores e intercambiáveis, funcionalmente independentes [51]. Ou seja, tendo em vista a função global de um equipamento, o projeto modular visa cumpri-la utilizando módulos, cada um desempenhando uma função parcial que, quando combinados de forma adequada e pré-determinada, irão suprir a função global desejada pelo produto. É importante observar que, analisando o contexto de desenvolvimento do módulo individualmente, este possui uma função global que, quando passado para o contexto do produto final (combinação dos módulos), torna-se uma função parcial.

A modularidade de um produto pode ser motivada por diversos fatores. Exemplos destes são: alteração de escala (aumento ou diminuição da área de trabalho, por exemplo), realização de diferentes funções pelo produto final, questões estéticas, adição de funções mais específicas que auxiliem a operação do produto final, dentre outras [51].

O projeto modular é uma ferramenta para a concepção de grandes famílias de produtos. A qualidade da modularidade está diretamente ligada com a qualidade e conceito das interfaces entre os módulos, o que influencia diretamente na capacidade de intercambiabilidade do produto [51].

Tendo em vista que, atualmente, praticamente nenhum fabricante se responsabiliza pela produção de todos os componentes do seu produto, há a necessidade da “terceirização” da produção de componentes. De uma forma mais simplificada, isto também caracteriza uma modularidade, pois deve-se prever e conceber no projeto do produto as interfaces que irão interagir com o sistema produzido pelo terceiro. Um exemplo bastante claro disto é a produção de motores elétricos, em que o fabricante do motor não tem controle de onde e como seu produto será instalado, no entanto disponibiliza, dentro de um padrão com dimensões conhecidas (em

seu catálogo de produto), uma flange que permitirá ao fabricante do produto final instalá-lo de forma adequado, como sendo um módulo do seu equipamento final [51]. Isto também está presente na concepção de painéis elétricos de comando e controle de máquinas. Praticamente todos os componentes que compõem o produto final podem ser produzidos por fabricantes diferentes, no entanto, por meio das interfaces por eles disponibilizadas, é possível fazer a composição que cumpre de forma satisfatória a função global inicialmente definida.

Aqui, uma importante observação é necessária. Quando se trata dos elementos mais básicos de uma máquina, como: motores, guias, fusos, sistema CNC, drive de acionamento, etc; seus respectivos fabricantes não possuem controle, nem mesmo tem intenção de saber todas as possíveis concepções de utilização dos seus componentes nos equipamentos que irão compor. Ou seja, olhando do ponto de vista da modularidade, estes componentes são módulos, com suas próprias funções globais bem definidas, mas que sozinhos não podem desempenhar praticamente nada. No entanto, são pequenos módulos, muito genéricos, com muitas possibilidades de aplicações, independente do cliente que os aplicará. Já para o desenvolvedor de máquinas, mesmo que possuam um conceito de modularidade, isto não é totalmente verdadeiro. Os módulos desenvolvidos por este fabricante terão como objetivo interagir com seus próprios módulos, de forma a gerar uma variedade de produtos finais, cada um com suas peculiaridades formadas pelas funções individuais desempenhadas pelos módulos. No entanto, estes módulos, muito dificilmente, poderão ser aplicados em outro equipamento, de outro fabricante, a não ser que tal interação seja intencional na sua fase de desenvolvimento.

Podem ser consideradas vantagens, associadas ao uso de sistemas modulares: economia na escala de produtos, Facilidade na mudança de produtos, maior variedade de produtos finais, melhor planejamento dos tempos de desenvolvimento, melhor divisão das fases de projeto, maior facilidade da verificação e testes dos componentes e maior facilidade para produzir, instalar, usar, diagnosticar, manter, e reparar o equipamento [51], [58].

Tendo em vista um ambiente acadêmico, a modularidade dos sistemas desenvolvidos ou utilizados para realização de pesquisas é um fator de grande valia, tendo em vista que é necessário, durante o ciclo de vida do equipamento, que este sofra alterações, com certa frequência, de forma que possa suprir os requisitos particulares de cada tipo de experimento executado. Na área de processos de fabricação, há constantemente a demanda de alteração de parâmetros de processo que podem acarretar na necessidade de alterações construtivas na máquina utilizada. Sendo esta

modular, é possível, por exemplo, modificar ou trocar apenas o módulo que necessita sofrer alteração, sem modificar as outras estruturas que compõe a máquina. Até mesmo uma simples troca nas disposições dos módulos do equipamento pode suprir as necessidades específicas do experimento, fazendo com que haja grande economia de recursos financeiros e de tempo, fatores decisivos na realização de pesquisas, em especial na academia.

A Figura A.1 ilustra de forma esquemática o desmembramento, de forma hierárquica em quatro diferentes níveis, de uma máquina-ferramenta. A divisão é feita até que se alcance os módulos mais básicos da máquina, sendo o seguinte apenas os componentes individuais, os quais compõem estes módulos fundamentais. Desta forma, é possível observar que, de acordo com a concepção da máquina, um módulo de um nível mais alto pode ser formado por alguns módulos mais fundamentais e assim consecutivamente, até o desmembramento completo do equipamento [57].

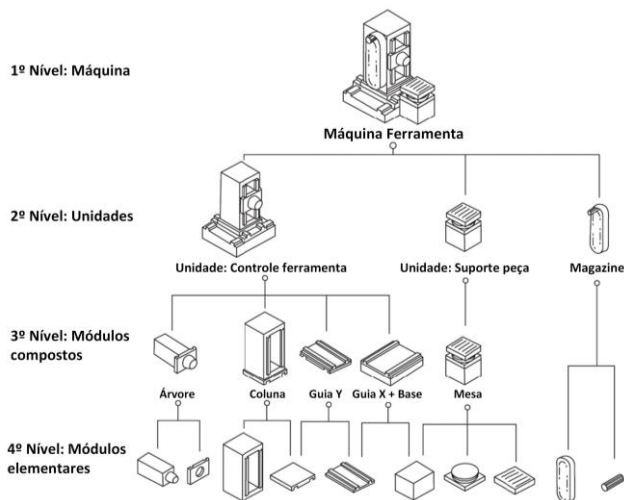


Figura A.1 – Exemplo de estrutura hierárquica de um projeto modular (adaptado de [57])

Do ponto de vista da arquitetura de produtos, ou seja, a forma como os elementos físicos interagem para alcançarem os objetivos relacionados a operação e performance do produto, é possível distinguir duas grandes categorias: arquitetura integral e arquitetura modular. Suas características são [58]:

- a) **arquitetura integral**: as funções do produto são todas supridas por uma estrutura única ou pela interação de um pequeno número de componentes físicos, com conexões rígidas entre eles, de forma que as interfaces entre estas unidades individuais que formam o produto são indistinguíveis, ou seja, a retirada de qualquer componente impossibilita a correta operação e funcionalidade do produto;
- b) **arquitetura modular**: o produto consiste em elementos intercambiáveis, também denominados módulos, que criam ou alteram as funcionalidades do produto final, gerando uma família de produtos, na qual cada módulo possui sua própria função ou pequeno conjunto de funções. As interfaces entre os módulos são bem definidas e simplificadas. Estas interfaces podem ser de natureza: mecânica, hidráulica, elétrica/eletrônica (informação e sinais de controle).

Equipamentos utilizando conceito de modularidade (arquitetura modular) são, normalmente, mais complexos e mais caros de serem desenvolvidos, quando comparados com equipamentos com arquitetura integral. No entanto, estes equipamentos trazem as vantagens de possibilitar a “customização em massa” e produção personalizada, além de facilitar possíveis inovações em produtos finais, por meio do desenvolvimento de novos módulos. Portanto, o fabricante de produtos modulares deve investir no desenvolvimento de módulos versáteis, que possam ser utilizados numa grande quantidade de produtos. A característica distintiva de um sistema com arquitetura modular está nas interações e interfaces bem definidas entre os diversos módulos que compõem o produto final, permitindo uma rápida integração do produto. A esta característica é dado o adjetivo de integrabilidade. A característica de modularidade é um fator importante, porém não essencial, para a concepção de um sistema reconfigurável, assunto que será abordado na seção seguinte [58].

## APÊNDICE B - SISTEMAS RECONFIGURÁVEIS

Desde o início da industrialização dos países, iniciada na Europa e posteriormente, de forma gradativa, espalhada para quase todo o mundo, o cenário industrial passa por diversas situações, relacionadas ao avanço tecnológico, às mudanças de mercado e às flutuações dos níveis produtivos. Enfim, a indústria teve que, em todos os momentos se adequar, encontrando meios para a se manter competitiva, independente do cenário em que estava presente.

Atualmente, pode-se dizer que há uma forte competição global, iniciada no século XX e desde então, crescente. Neste cenário, observa-se mudanças cada vez mais frequentes e imprevisíveis no mercado consumidor de produtos, o que leva a uma necessidade de rápida introdução de novos produtos (ou alteração daqueles que já estavam estabelecidos) e a necessidade de ter capacidade para se adequar as constantes e variáveis demandas produtivas, ocasionadas, por exemplo, por crises econômicas enfrentadas pelos países [51], [58].

É neste ambiente que os sistemas reconfiguráveis foram concebidos e têm ganhado força. Foi uma solução encontrada para trazer agilidade, frente às constantes e repentinas mudanças do mercado, permitindo às empresas se adaptarem e se manterem competitivas e, de certa forma, estáveis, mesmo que o ambiente seja instável e imprevisível [58].

Para que um sistema reconfigurável seja caracterizado, é preciso diferenciá-lo de um sistema dedicado e de um sistema flexível. A Figura B.1 auxilia, de forma bastante ilustrativa, a fazer a diferenciação entre estes 3 conceitos.

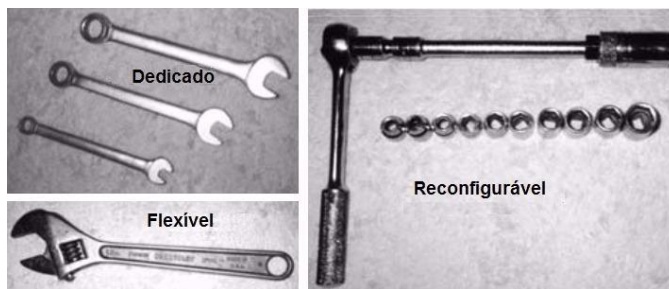


Figura B.1 – Exemplo de produto dedicado, flexível e reconfigurável  
(Adaptado de [58])

No exemplo acima, as chaves dedicadas são capazes de trabalhar com parafusos de tamanhos fixos, sem nenhuma possibilidade de variação. A chave flexível possibilita o trabalho com diversos tamanhos, limitado pelo seu máximo curso de ajuste. No sistema reconfigurável, são utilizados módulos que permitem alterar o tamanho do parafuso que será apertado/solto, no entanto, é necessário que sejam todos da mesma família (parafusos sextavados, por exemplo). Este mesmo conceito pode ser levado para os sistemas de manufatura, mais especificamente às máquinas e linhas de produção [58].

Segundo Koren (2010) [58], uma máquina reconfigurável (RM – *Reconfigurable Machine*), é projetada para ter sua estrutura rapidamente alterada para que esta se ajuste à capacidade de produção e/ou altere suas funcionalidades, para produção de uma família de peças previamente determinada.

A reconfigurabilidade é considerada uma tecnologia inovadora da engenharia que permite, com custo adequado e rapidez, atender às variações de produtos e demandas impostas pelo mercado globalizado. Num contexto mais amplo, considerando um ambiente de manufatura, encontram-se os denominados RMS – *Reconfigurable Manufacturing Systems* (Sistemas de Manufatura Reconfiguráveis), no qual não só as máquinas, individualmente possuem características de reconfigurabilidade, e sim todo o sistema de produção de uma família de componentes, podendo este sistema ser composto não apenas de máquinas que, obrigatoriamente, tenham esta característica [51], [58]. Relacionado aos sistemas flexíveis e dedicados de manufatura, os acrônimos FMS – *Flexible Manufacturing System* (Sistema Flexível de Manufatura) - e DML – *Dedicated Manufacturing Line* (Linhas Dedicadas de Manufatura) – são definidos, respectivamente.

Do ponto de vista das RM e dos RMS, define-se como família de produtos/peças como todos os produtos/peças que tenham similaridade em suas características geométricas e de forma, com o mesmo nível de tolerância exigida, que requeiram os mesmos processos de fabricação e que estejam no mesmo patamar de preços [58].

Para se manterem competitivos, os meios produtivos precisam ter três principais características: produzir com baixo custo; produzir com a qualidade adequada e responder rapidamente às novas demandas impostas. Estas três características podem ser supridas por máquinas e/ou sistemas reconfiguráveis [58].

No Subcapítulo APÊNDICE A, foram abordados os sistemas modulares, onde afirmou-se que a modularidade não é um requisito obriga-

tório para a característica de reconfigurabilidade. Isto é, de fato, verdadeiro. No entanto, na área de projetos de máquinas reconfiguráveis, há o pré-requisito de modularidade. É impossível reconfigurar uma máquina sem que esta seja constituída por módulos, os quais possam ser alterados, retirados ou acrescentados, readequando o equipamento ao processo desejado, ou seja, reconfigurada, de acordo com a nova demanda, seja esta de capacidade produtiva ou de característica do processo [58].

Para que a reconfigurabilidade de um RM ou RMS seja eficiente, há seis características que auxiliam consideravelmente o processo de reconfiguração do sistema ou da máquina, e devem ser observadas durante a fase de projeto [58].

- a) customização: esta característica é uma das principais distinções entre os RMS dos FMS e DML. Esta característica de projeto diz respeito à capacidade do sistema (ou da máquina) em ser customizado a fim de produzir uma família de produtos específica e definida antes da concepção do equipamento;
- b) escalabilidade: é cada vez mais difícil prever quais as verdadeiras demandas de produção de um produto, trazendo a necessidade da escalabilidade do sistema. Diz respeito à capacidade de, rápida e eficientemente, adequar a máquina ou o sistema para que estes produzam o máximo volume possível, quando a demanda exigir tal ação. Isto é feito adicionando ou alterando módulos que constituem o sistema e que previamente haviam sido concebidos para tal característica;
- c) convertibilidade: diz respeito a habilidade de rapidamente alterar a funcionalidade da máquina (ou sistema) para produzir/inspecionar todos os membros da família de produtos, ou seja, redirecionar eficientemente a funcionalidade da máquina e de seus controles para atender os novos requisitos de produção;
- d) modularidade: é uma característica essencial à RMs e RMSs. No nível do sistema de produção, cada máquina que o compõe é um módulo, assim como os equipamentos de manipulação de materiais (esteiras, pontes rolantes, etc.) são construídos com estrutura modular, para possibilitar futuras reconfigurações. No nível de máquina, os principais sistemas que a compõe são modulares (estrutura, eixos de movimentação, controladores, *software*, efetuadores finais, etc.). Na necessidade de reconfiguração, elementos de quaisquer níveis podem ser substituídos, retirados ou aumentados, para que atenda, da melhor forma possível, a nova demanda, seja de capacidade de produção ou de característica de processo;

- e) integrabilidade: a habilidade de integrar os módulos que compõem a máquina, de forma rápida e precisa, nos sistemas mecânicos, de controle e de comunicação (fluxo de informação entre sistemas de controle e gestão). No nível de máquina, a integrabilidade diz respeito aos módulos do sistema de movimentação mecânica, estrutura, efetadores finais, que podem ser de diversas formas acoplados, a fim de formar máquinas com características próprias para o processo que se deseja efetuar. No nível do sistema de manufatura, as máquinas são os módulos que devem ser integradas aos sistemas de transporte e manipulação de material.
- f) diagnosticabilidade: esta característica tem duas funções em RMSs. A primeira diz respeito à detecção de falhas, muitas vezes geradas durante o processo de reconfiguração. A segunda é relacionada com a detecção de peças com parâmetros de qualidade não aceitáveis, fora do nível exigido pelo processo. Este segundo aspecto é bastante crítico em RMs e RMSs, tendo em vista que, a cada reconfiguração efetuada pode haver problemas oriundos deste processo que precisam, o mais breve possível, serem detectados para que não se tenha perda de peças produzidas.

Dentre as características citadas, a modularidade e a integrabilidade podem ser consideradas as mais importantes e essenciais. Sozinhas, estas características podem determinar a reconfigurabilidade de um sistema. No entanto, customização, escalabilidade e convertibilidade são consideradas necessárias para a efetiva reconfiguração [58].

Por outro lado, num sistema flexível, há a vantagem de a máquina não ser desenvolvida visando a produção de uma família de produtos específica. Ou seja, o projeto é feito com principal foco na máquina e não nos elementos produzidos. Um centro de usinagem CNC para fresamento é um típico sistema flexível. Possui uma área de trabalho determinada e um magazine de ferramentas, permitindo que uma grande variedade de peças seja fabricada, desde que respeitem as limitações da máquina. No entanto, este sistema é menos produtivo e não permite ser reconfigurado.

Um sistema dedicado tem alta produtividade, já que é especializado na produção de apenas um tipo de componente. No entanto, a falta de reconfigurabilidade impossibilita que este sistema tenha suas taxas de produção alteradas ou que, no caso de alteração do componente fabricado, haja alguma alteração na característica do processo. Atualmente, isto é muito prejudicial às empresas, tendo em vista que os componentes são



constantemente alterados e que as demandas de produção sofrem constantes flutuações.

A Tabela B.1 apresenta, de forma resumida, as principais diferenças entre os sistemas reconfiguráveis, flexíveis e dedicados, sendo possível identificar as principais vantagens e desvantagens de cada um.

Tabela B.1 – Principais características de sistemas reconfiguráveis, flexíveis e dedicados (Adaptado de [58])

<b>Características</b>	<b>Dedicados</b>	<b>Reconfiguráveis</b>	<b>Flexíveis</b>
Estrutura do sistema	Fixa	Variável	Variável
Estrutura da máquina	Fixa	Variável	Variável
Foco da máquina	Peça	Família de Peças	Máquina
Escalabilidade	Não	Sim	Sim
Flexibilidade	Não	Customizada	Genérica
Operações Simultâneas	Sim	Sim	Não
Produtividade	Alta	Alta	Baixa
Custo X Ciclo de vida	Baixo <sup>20</sup>	Médio <sup>21</sup>	Moderado <sup>22</sup>

<sup>20</sup> Baixo para uma única peça com grande produtividade durante o ciclo de vida da máquina ou sistema de produção.

<sup>21</sup> Para volumes de produção média-alta, com variações do produto produzido durante o ciclo de vida da máquina ou sistema de produção

<sup>22</sup> Para produção simultânea de muitas peças. Caso contrário, o custo é alto.



## ANEXO A – CARACTERÍSTICAS LASER

Especificações LASER IPG® YLS-10000-S2  
Número de série 11076750

Tabela A.1 - Características gerais da fonte LASER

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unid.</b>
Tensão Alimentação	400 – 480	V
Fases	3 Fases + Terra	-
Frequência da Rede	50 - 60	Hz
Potência (nominal)	33.5	kW
Corrente máxima em operação	60	A
Corrente de partida	83	A
Temperatura de operação	10 - 50	°C
Humidade relativa	95	%
Dimensões (C x L x A)	1480 x 806 x 1519	mm
Massa	850	kg

Tabela A.2 - Características do feixe LASER

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unid.</b>
Tipo de operação	Contínua (CW)	-
Potência nominal feixe	10	kW
Variação de potência do feixe	10 – 105 (de 10kW)	%
Comprimento de onda	1070 - 1080	nm
Canais de saída (fibras)	2	-

### ANEXO B - PRODIP

Representação gráfica das macrofases e fases contidas no PRODIP - Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos, evidenciando os setores envolvidos no desenvolvimento de cada fase e as devidas entradas e saídas de cada uma.

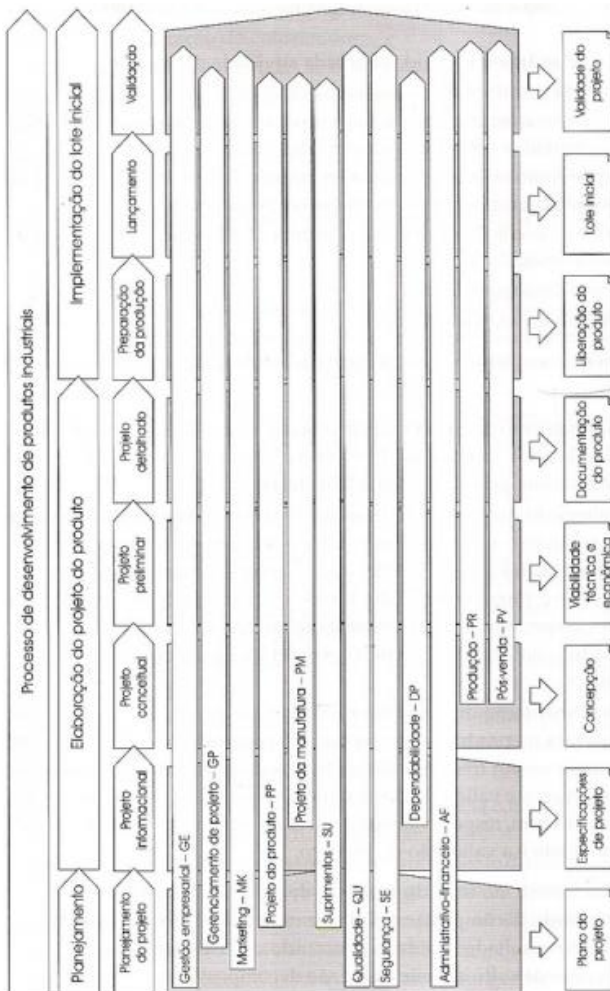


Figura B.1 – Representação gráfica - PRODIP (Back [5] *apud* Romano [59]).