

PROJETO INFORMACIONAL, CONCEITUAL E PRELIMINAR DE UM FORNO DE INDUÇÃO PARA USO EM CUTELARIA ARTESANAL

Gilvan Menosso¹, Mauro Tavares Peraça²

Resumo: Este artigo aborda o projeto de produto de um forno de indução para Cutelaria desde o projeto informacional, conceitual e preliminar. Inicialmente, descreve de forma conceitual a Cutelaria; suas aplicações e técnicas, bem como as possibilidades de inclusão da eletrônica no processo; é dada a introdução sobre aquecimento indutivo, com conceito, aplicação e técnicas utilizadas, para que, a partir disso, seja definido o produto eletrônico que atenderá a demanda. Na sequência, serão identificadas e analisadas as necessidades do consumidor, a ideia do produto e determinado os requisitos e as especificações. Na etapa seguinte, será determinado os princípios de solução viáveis para o produto.

Palavras-chave: Projeto de produto. Aquecimento Indutivo. Forno de Indução e Cutelaria Artesanal.

Abstract: *This article discusses the product design of an induction furnace for Cutlery since the product planning, conceptual and preliminary design. Initially, it describes in a conceptual way the Cutlery; their applications and techniques, as well as the possibilities of including electronics in the process; it is given the introduction on inductive heating, with concept, application and techniques used, so that, from this, the electronic product that will meet the demand is defined. Next, the consumer needs, the idea of the product and the requirements and specifications will be identified and analyzed. In the next step, the viable solution principles for the product will be determined.*

Keywords: *Product design. Inductive Heating. Induction Furnace and Handcrafted Cutlery*

¹ Especialista em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos, IFSC/Florianópolis <gilvanm@celesc.com.br>

² Professor do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN), IFSC/Florianópolis <peraca@ifsc.edu.br>

1. INTRODUÇÃO

O objetivo do trabalho é definir as características de produto de um forno de indução dedicado à cutelaria artesanal.

A cutelaria é o nome dado à fabricação de instrumentos de corte (porém talheres em geral entram nesse grupo) através do processamento do aço.

Atualmente ela pode ser dividida em duas linhas: a cutelaria industrial e a cutelaria artesanal.

Na cutelaria industrial, são produzidos os talheres em geral que atende a demanda em escala mundial, com produção automatizada, auxílio de robôs e energia elétrica. Nesse ramo da cutelaria, busca-se a eficiência e agilidade no processo (FACASCOQUEIRO LTDA, 2016).

A cutelaria artesanal é mais focada na arte e na satisfação de trabalhar o aço da forma medieval. O produto é voltado para um público com uso mais

restrito, como sendo um item decorativo, de colecionismo ou para eventos tradicionalistas como no nordeste e sul do Brasil. Atualmente, percebe-se também um interesse desenvolvido em função de filmes e sagas baseados em ambientes medievais, a exemplo de “O Senhor dos Anéis” (R. PAULO, 2002).



Figura 1 – Faca Artesanal. Fonte: br.pinterest.com

A cutelaria artesanal faz uso de técnicas antigas para trabalhar o aço aquecido com o auxílio de bigornas e martelo. O aquecimento é uma das etapas mais demoradas do processo e é feito através de fornos a Carvão Vegetal ou Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), como mostrado na Figura 2.



Figura 2 – Forja a Gás. Fonte: br.pinterest.com

O uso da eletricidade no aquecimento do aço poderá trazer mais conforto e agilidade, bem como propiciar um ambiente de trabalho mais limpo e organizado e contribuir para a qualidade do produto, possibilitando mais controle ao processo (HONGAN, 2014). A Figura 3 mostra uma barra de aço sendo aquecida por indução.

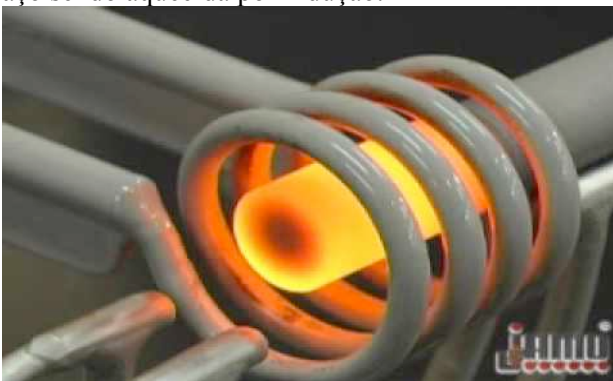


Figura 3 – Aquecimento por indução. Fonte: br.pinterest.com

Atualmente, muitos cuteleiros artesanais usam a eletricidade em parte do processo de aquecimento, chamado revenimento, através de resistências elétricas (SENAI, 1997). No entanto, para se atingir temperaturas maiores, como a de Curie, requeridas no processo de têmpera ainda não se faz uso da eletricidade, devido às altas temperaturas requeridas não serem atingidas facilmente com resistências.

O processo de aquecimento por indução magnética é amplamente aplicado na indústria do aço (HONGAN, 2014, p. 21). Com a aplicação desse princípio na cutelaria artesanal, todo o processo de aquecimento do aço poderá ser feito através da energia elétrica, dispensando o carvão ou o gás. O uso da eletricidade não implica em perder a característica medieval da arte, pois, se a

eletricidade existisse na idade média, o homem a usaria na cutelaria (R. PAULO, 2002).

Com o projeto corretamente adaptado de um indutor de fluxo longitudinal que recebe o sinal de um inversor e com um sistema de controle que permita o usuário manter uma temperatura requerida sobre a peça, através da variação da potência por modulação da frequência de chaveamento dos componentes ativos do circuito (HONGAN, 2014, p. 32 e 70), pode-se dizer que um produto eletrônico trará facilidades para os trabalhos de cutelaria, mantendo-se a essência que é o conceito histórico envolvido.

2 TRATAMENTOS TÉRMICOS APLICADOS A CUTELARIA – CONCEITOS BÁSICOS.

Tratamento térmico consiste em alterar as propriedades mecânicas de um metal, nesse caso o aço, através da temperatura. A tempera e o revenimento são dois processos de tratamento mais comumente usados na cutelaria e juntos englobam as faixas de temperatura e requisitos específicos aplicados nas demais técnicas dessa arte. Os processos de recozimento e normalização do aço para tratamento térmico, bem como o processo de forjamento para modelagem da peça são realizados dentro das faixas de temperatura requeridas no processo de tempera.

A Têmpera é o primeiro passo para o tratamento térmico completo de uma lâmina e consiste em aquecer, acima de uma temperatura mínima (esta é temperatura de Curie e varia de acordo com o tipo de aço), e manter por alguns minutos para que toda peça atinja a mesma temperatura (homogeneização), finalmente a lâmina é resfriada bruscamente em ar, óleo ou água, de acordo com o tipo de aço. A temperatura requerida nesse processo varia entre 800 e 1300°C (CHIAVERINI, 1982, p. 15) (SENAI, 1997, p. 5). Esse processo aumenta muito a dureza do aço, porém a lâmina fica muito quebradiça, sendo necessária a aplicação de outro tratamento, o revenimento.

O revenimento é um processo recomendado para todos os tipos de aço, pois aumenta a elasticidade após a têmpera, além disso, é através do revenimento, e não da têmpera, que se define a dureza final do aço. O processo consiste no aquecimento gradativo a uma temperatura bem abaixo da temperatura de têmpera, mantendo-a por pelo menos uma hora, depois resfriando a peça naturalmente até atingir temperatura ambiente (para alguns aços dois revenimentos são recomendáveis). A temperatura requerida no revenimento varia entre 150 e 350°C dependendo da dureza requerida na lâmina (CHIAVERINI, 1982, p. 15) (SENAI, 1997, p. 5).

Na Figura 4 é mostrado o Mapa do Processo da cutelaria artesanal de forma a auxiliar na identificação dos pontos críticos do processo. Onde o fluxograma são as etapas do processo, os “y’n”

são os objetivos de cada etapa, os “X’n” são as variáveis de cada etapa do processo e o “Y” é o objetivo do processo.

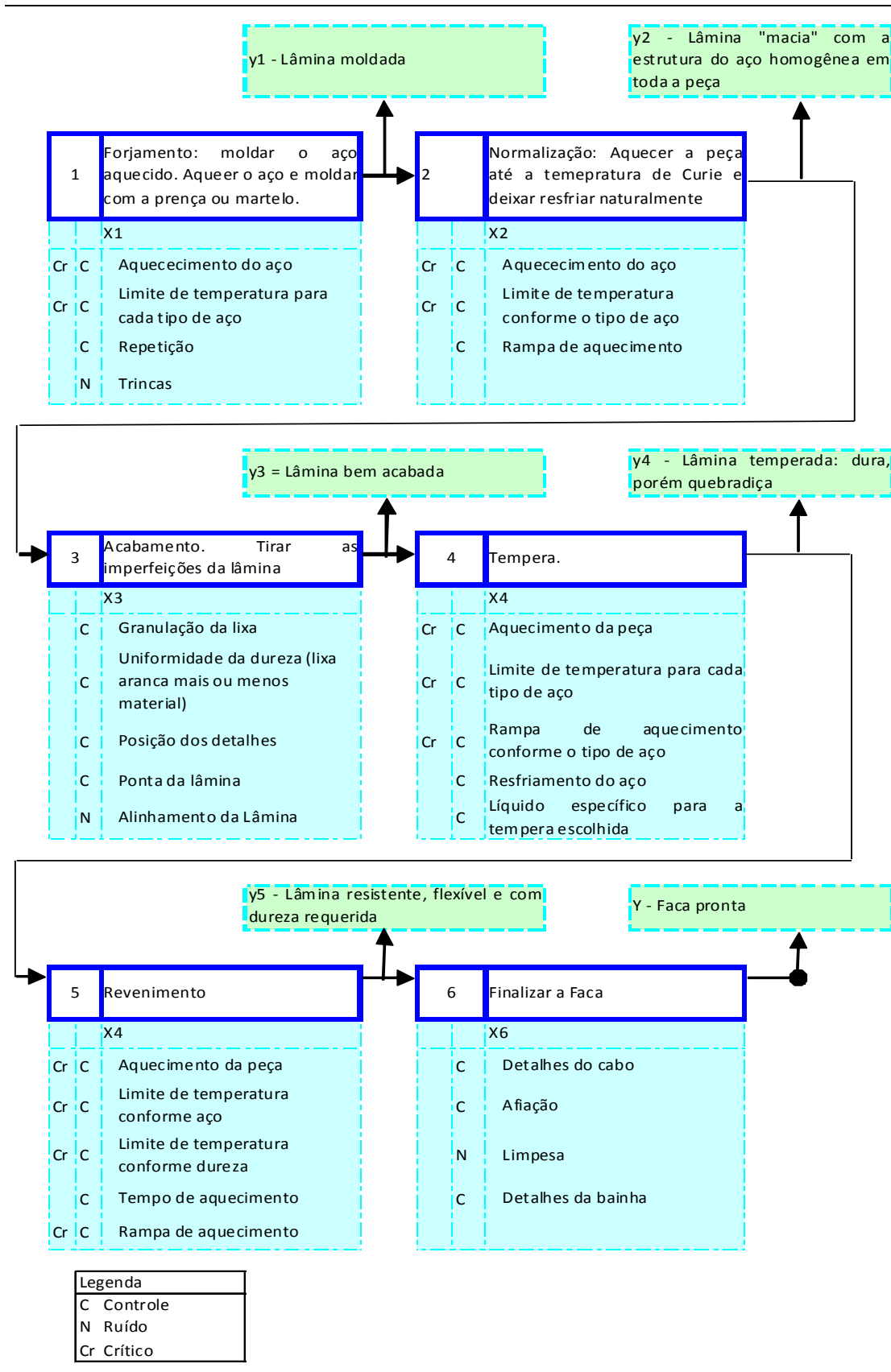


Figura 4 – Mapa do processo de cutelaria

3 PROJETO DO FORNO

3.1 Projeto Informacional

Segundo Carpes Jr (2014), o projeto informacional é a primeira fase do desenvolvimento do produto, quando são definidas as características. Essa fase estuda a descrição da ideia do produto, a lista de requisitos e a transformação dos requisitos em especificação.

Ideia do produto.

O **produto** é eletrônico, basicamente constituído de três módulos macros, sendo eles a fonte, o inversor controlado e o elemento indutivo. Esse forno deve ser desenvolvido especificamente para a cutelaria artesanal, de forma a atender as necessidades específicas. Um painel servirá de interface homem-máquina (IHM) de forma que o operador escolha a temperatura requerida e o tempo que deve permanecer nessa temperatura. O forno (indutor) pode ter engate rápido no módulo de potência que possibilite a troca rápida para diferentes formas físicas do indutor para aquecimento localizado ou total da peça.

O **nome dado** é Forno de Indução para Cutelaria. O mesmo suprirá uma **necessidade existente** na cutelaria artesanal de prover agilidade, controle e limpeza no aquecimento do aço para forjamento e tempera. Os clientes já começam desenvolver interesse por oficinas com **selo verde**. Com o passar dos anos, imagina-se que isso se tornará indispensável aos artesãos dessa área. Para se obter esse diferencial é inevitável o **abandono do uso de fontes de energia agressivas ao meio ambiente**.

Ainda em relação aos clientes, percebe-se, cada vez mais, ansiedade e **pressa** em receber as encomendas, além da exigência cada vez maior na questão dos **detalhes** das peças e **qualidade** da mesma.

Esses fatores levam a necessidade de se desenvolver ferramentas mais sofisticadas, que propiciem **rapidez, controle e maleabilidade do processo** e a utilização de forno de indução no aquecimento do aço fornece esses benefícios.

O produto tem a **função** de elevar a temperatura do aço desde a ambiente até temperaturas maiores, com a de Curei. Para detalhar melhor a função produto, a mesma pode ser descrita em duas subfunções.

A primeira é possibilitar a tempera do aço: nesse processo será posto uma lâmina no interior do forno (indutor) e será parametrizada uma temperatura requerida nessa lâmina. Um sensor fará a medição e informará a temperatura num display e o sinal servirá de base para aumentar ou diminuir a

frequência de operação, controlando a potência do forno e conseqüentemente a temperatura da lâmina.

A segunda subfunção é parecida com a primeira, no entanto possibilitará a temperatura para o processo de revenimento do metal e deverá manter esse metal numa faixa de temperatura menor por maior tempo. É bom comentar que um forno que atenda a essas duas etapas do processo, está apto para atender todo o processo de cutelaria, pois com já dito, os demais aquecimentos requeridos são atendidas por esses requisitos.

A peça de metal nunca estará em contato com o forno e dessa forma, o mesmo não estará sujeito a tais temperaturas descritas anteriormente.

O **produto será utilizado** dentro de uma oficina onde estará sujeito a poeira, e deverá possibilitar a mudança de local sempre que necessário e isso exige que seja leve ou que possibilite o deslocamento em partes que se desconectem entre si.

O **perfil dos usuários** do produto é predominantemente do sexo masculino, adultos e com meia idade ou mais, de classe média e com estilo mais conservador. São pessoas com profissão definida, seja na área de aplicação do produto ou em busca de um *hobby* que gere, ao mesmo tempo, uma renda extra.

O **mercado** de atuação, num primeiro momento, será o mercado nacional que está em expansão e possui demanda reprimida.

A **concorrência direta** é pouco conhecida por esse mercado, embora o aquecimento indutivo seja amplamente aplicado na indústria do aço (RUDNEV, 2002. p. 11). Por isso o produto deverá ser divulgado. Os locais mais apropriados são feiras de cutelaria, de máquinas, feiras agrícolas e similares, além da internet. Os locais de venda serão os mesmos de ferramentas em geral.

Através de pesquisa realizada foi encontrado um concorrente que fabrica forno de indução para cutelaria. O produto não é o principal de seu portfólio, é pouco divulgado e há pouca informação a respeito. Foi possível observar que não possui sistema de controle temperatura do processo, trazendo pouca vantagem em relação aos fornos tradicionais. Não possui a potência otimizada, observado na ausência de material refratário e no rápido aquecimento demonstrado em vídeo, o que encarece o conjunto. As próprias dimensões do conjunto denotam elevada potência do inversor e da fonte. A potência anunciada é de 25 a 120 kW (JAMO, 2017).

Outro concorrente encontrado foi um fabricante de forno a resistência. Esse possui controle de temperatura tanto para tempera quanto para o revenimento. Foi possível observar que a

temperatura máxima é em torno de 850°C e não pode ser usado para forjamento e isso implica em manter a forja a gás na oficina. A IHM é um painel com botões onde o operador faz a regulação da temperatura e o sistema de controle mantém conforme parametrizado. Possui revestimento refratário o que indica otimização da potência (GUAJUVIRA, 2017).

Indiretamente, a concorrência serão basicamente os fornos a Gás ou Carvão utilizados mais comumente nas oficinas atualmente. Esses produtos são encontrados muito facilmente no mercado e muitos cuteleiros fabricam sua própria forja. Eles têm a característica de ter um preço de aquisição baixo e um custo de manutenção alto.

As vantagens propostas pelo forno de indução como controle, agilidade, simplificação do processo, baixo custo de manutenção e ambiente limpo, será contraposta com o preço de venda maior. Por isso, nesse produto, a busca pelo preço de venda baixo será uma das principais metas.

As principais **evidências de consumo** do produto se observa ao consultar os cuteleiros e pela própria existência de um mercado que oferece ferramentas específicas para cutelaria, como lixadeira fixa, prensas, fornos a gás ou carvão, marteletes, etc.

Requisitos de projeto.

Segundo Carpes Jr (2014), os requisitos de projeto correspondem às exigências que se faz em relação ao produto, que, para esse caso, tem origem nas necessidades do consumidor, nos requisitos técnicos e operacionais do produto e decorrentes do uso.

A lista de requisitos constitui um limitador do projeto a ser desenvolvido, retratando as necessidades do consumidor, com objetividade.

A principal fonte para elaboração da lista de requisitos foram a percepção do mercado e a aplicação de questionário aos consumidores. O questionário aplicado foi composto de doze perguntas, direcionadas ao o produto específico, encaminhadas diretamente a alguns cuteleiros experientes, que se destacam na área e formam opinião a respeito da cutelaria. As perguntas abordaram temas como a necessidade do produto, as vantagens de se ter controle eletrônico de temperatura, uso de energia renovável, dimensões adequadas, entre outras questões envolvendo o produto.

Os **requisitos de segurança** são essencialmente a necessidade de barreira que impeça o contato direto com o indutor, caso o valor de projeto da tensão ultrapasse o limite de toque e os avisos de proibição de uso de adornos, como anéis, por conta da indução magnética.

Como **requisitos estéticos**, destaca-se que o produto deverá ser portátil de forma a permitir o deslocamento de acordo com as modificações de layout da oficina e o transporte no caso de necessidade de uso como ferramenta de apoio em trabalhos em que o produto possa ser utilizado.

Além disso, as dimensões do forno devem permitir a produção de lâminas de dimensões máximas de aproximadamente 6 x 60 x 400 milímetros de espessura, largura e comprimento respectivamente.

Os **requisitos de funcionalidade** do produto são a frequência mínima e máxima de acordo com a espessura e permeabilidade do material e a aplicação de técnicas que aumentem a eficiência do forno, reduzindo assim a potência do conjunto (que serão mais bem abordados no projeto preliminar); o controle de temperatura da peça de aço e o controle do tempo de aquecimento.

O forno será um indutor longitudinal confeccionado de tubos de cobre comercial, com dimensões tais que permitam um fluxo adequado de água para seu resfriamento através de um sistema de refrigeração (CHIAVERINI, 1982).

Para atendimento dos **requisitos de ergonomia** o forno deve ficar numa altura que permita uma pessoa operar em pé, atendo a Norma Regulamentadora (NR) 17.

Quanto aos **requisitos de economia**, a referência de preço de venda são os equipamentos mais relevantes de uma oficina de cutelaria artesanal, que, segundo os clientes, são a prensa hidráulica, o forno elétrico, as lixadeiras, martelete e a fresadora. Atualmente, o preço desses equipamentos pode chegar até R\$ 40.000,00.

Os principais **requisitos de operacionalidade** são a resistência a poeira, pois estará exposto num ambiente com uso de lixadeiras, esmerilhadeira de bancada e fresas. O indutor (forno) deve permitir a conexão fácil ao sistema de potência, de forma que seja usado diferentes formas geométricas, trocando o mesmo sempre que necessário. Um painel simples deve possibilitar que o usuário defina temperatura e tempo e um display, mostrando esses valores durante a operação.

Especificações do projeto.

Especificar significa transformar os requisitos em linguagem menos moldada a interpretação subjetivas, reduzindo a possibilidade de erro de projeto (CARPES JR, 2014).

A Tabela 1 mostra as especificações do produto, bom como os principais concorrentes.

Tabela 1 – Especificações de projeto

Produto: Forno de Indução Para Cutelaria							
Requisito	Especificação	Unidade	Concorrente A	Concorrente B	Concorrente C	Valor Proposto	Observações
Não poluir	Alimentação		Elétrico	Elétrico	Gases	Elétrico	Elétrico = Energia renovável
	Forma de Aquecimento		Indução magnética	Resistências	Fogo	Indução magnética	
Funcionalidade	Potência	kW	25 a 120	4	-	6	Menos potência = menor custo
	Frequência de operação	KHz	-	-	N/A	1 - 100	Otimizada
	Tensão de operação	V	-	220	N/A	80	
	Controle de temperatura		Não tem	PID	Não tem	ON-OFF	Controle = facilidade, qualidade, durabilidade da lâmina
Seguro	Barreiras anti-contato com a tensão ou calor		Não	Sim	Sim	Sim	
Portátil	Forma de movimentação		Sobre Rodas	Sem rodas	Sem rodas	Sobre Rodas	
	Dimensão do conjunto máx. (L x C x A)	mm	-	350 x 550 x 250	Variável	300 x 200 x 1500	Menor é melhor
Dimensão adequada	Diâmetro do forno (interno)	mm	-	140	100 a 200	80	
	Comprimento do forno	mm	-	550	Variável	500	
Técnicas de redução da potência	Material refratário		Não	Sim	Sim	Sim	Com refratário = menos potência
	Freq. específica p/ espessura da lâmina	(kHz) mm	Não	N/A	N/A	(1 a 100) 6	Otimizada = menos potência
	Tempo mínimo de aquecimento	min.	0,16 a 0,33	60	2 a 10	2	Mais tempo = menos potência
Hergonômico	Altura de posicionam. do forno	m	1,2 a 1,5	Conf. Suporte	Conf. Suporte	1,4	
Conexão fácil	Tipo de conexão ao módulo de potência		Engate rápido	N/A	N/A	Engate rápido	
Suportar a poeira	Grau de proteção	IP	-	IP66	IP66	IP52	
Simple de usar	Interface		Painel LCD e Botões	Painel LCD e Botões	N/A	LCD 64x128 pontos e teclado membrana	
Versátil	Cobre todo o processo		Sim	Não - Não faz forjamento	Sim	Sim	Não = precisa da forja a gás para forjamento
	Faixa de temperatura		Até 1500°C	Até 850°C	Até 1500 °C	Até 1500°C	
Barato	Faixa de preço	R\$	-	4.000,00	2.000,00	15.000,00 a 30.000,00	

Legenda N/A = Não aplicável
 - = Inf. não encontrada

3.2 Projeto Conceitual

Nesta etapa, segundo Carpes Jr (2014), é gerado um conjunto de princípios de solução que são avaliados de acordo com critérios técnicos e econômicos e têm como entrada a lista de especificações do produto.

Desenvolvimento dos conceitos do produto ou do projeto conceitual

Para desenvolver o conceito do produto será aplicada a metodologia usada por projetistas que seguem a escola sintática, conforme Carpes Jr (2014). Essa metodologia consiste em identificar os problemas essenciais, dividir o produto em partes ou subsistemas, buscar soluções alternativas e selecioná-las, usando os critérios técnicos e econômicos.

Estruturação do produto em parâmetros

De forma a atender os conceitos descritos no item anterior, podemos dividir o produto em 8

subsistemas necessários para que o produto cumpra a função global: Fonte, Inversor, Forno (indutor), Refrigeração, Controle, Sensores, a IHM e a Estrutura Mecânica.

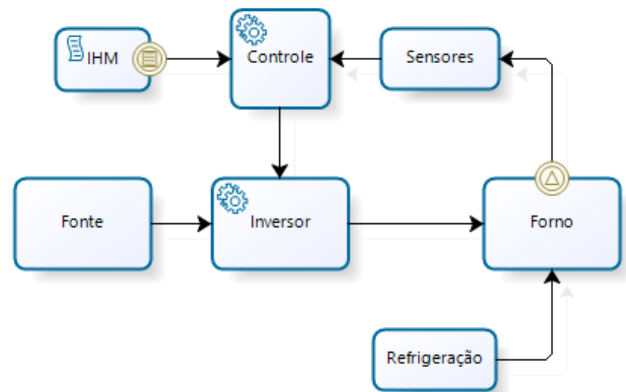


Figura 5 – Diagrama de blocos dos subsistemas.

Busca de alternativas para cada subsistema do produto e seleção das alternativas.

Na busca de alternativas para cada parte do produto foi feito o uso da matriz morfológica

conforme exemplo das tabelas 2 e 3 abaixo (CARPES JR, 2014) onde foi escolhido o sensor de carga como um de efeito Hall.

Tabela 2 – Exemplo de matriz morfológica para busca de alternativa

Subsistema	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Sensor Carga	TC	Resistor Série	Efeito Hall

Tabela 3 – Exemplo de matriz para avaliação dos parâmetros

Avaliação dos parâmetros de projeto - SENSOR DE CARGA						
Alternativas	Economia	Viabilidade Tecn.	Confiabilidade	Fabricabilidade	Segurança	Resultado
TC	6	8	10	10	10	44
Resistor Série	4	5	10	10	10	39
Efeito Hall	9	9	8	10	10	46

Neste tópico será descrito a solução escolhida para cada subsistema. As alternativas são selecionadas de acordo com os seguintes critérios: economia, viabilidade técnica, confiabilidade, fabricabilidade e segurança. O critério de economia e viabilidade técnica tem um peso importante na escolha, pois, como já descrito nos requisitos do produto, o preço tem um teto a ser obedecido de forma a torná-lo viável.

A **Fonte** poderá contar com projeto e fabricação dedicado ao produto.

Através da pesquisa de mercado, com alguns orçamentos, verificou-se que o valor das fontes ofertadas no mercado é relativamente alto. No entanto, pode-se, também, buscar fornecedores com produtos mais simples que possam oferecer fontes mais acessíveis.

O **Inversor** também deverá contar com projeto e fabricação dedicado ao forno de forma a atender as especificações, que são fundamentais para a eficiência do produto.

O Sistema de **Refrigeração** será com circulação forçada de água por dentro do condutor tubular do indutor.

O Sistema de **Controle** é projetado e fabricado para o produto de forma a atender as especificações e eficiência requerida no processo.

Os **Sensores** são basicamente o de carga e de temperatura.

Para sensor de carga será utilizado um de efeito Hall do tipo relacionométrico (muda a tensão de saída conforme a intensidade do campo). Por exemplo, o MLX91205, que trabalha até 100kHz e tensão disponível na saída de 0,25 a 4,75V (MELEXIS).

O sensor de temperatura é utilizado um pirômetro com variação de 0 a 1500 °C e sinal de saída de 4 a 20mA, como por ex, o modelo IN 5/9 da LumaSense (LUMASENSE).

O **forno** é um indutor propriamente e será enrolado em condutor tubular de cobre. Após ser enrolado, o indutor será isolado termicamente com manta cerâmica para isolamento térmico.

A **estrutura mecânica** é um gabinete fabricado com chapa de aço carbono SAE 1020, com pintura interna e externa anti-corrosão. Provido de rodas e com alças que permitam puxar ou empurrar o conjunto.

3.3 Projeto Preliminar

Segundo Carpes Jr. (2014), nesse tópico é determinada a configuração do produto. Serão calculados os parâmetros elétricos; escolhido os princípios de soluções, configurando-os de forma a permitir a produção e o funcionamento, em conformidade com as especificações, originando um produto simples e claro em sua essência.

3.3.1 Painel do produto

A Figura 6 mostra o painel do produto. Conforme Carpes Jr. (2014), o painel facilita a análise dos fatores condicionantes do estilo do produto, por meio da colagem de figuras, fotografias, palavras e expressões escritas que denotem os elementos estéticos.

Em linhas gerais, observam-se as seguintes tendências dos produtos concorrentes e acessórios para cutelaria:

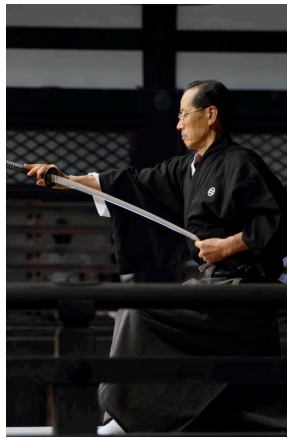
- Equipamentos rústicos e duráveis;
- Simplicidade de operação;
- Variedade de ferramentas para aplicações semelhantes;
- Preservação da essência da arte,
- Viés histórico;
- Pouca inovação.



Técnica Primitiva



Métodos Medievais



Cultura Milenar



Arte



Colecionismo



Tecnologia



Combustão



Figura 6 – Painel do produto. Fonte: br.pinterest.com

3.3.2 Definição das variáveis do projeto

Os dados elétricos definidos a seguir são parte importante deste artigo, pois é com base na pesquisa desta teoria que é estudada a viabilidade técnica do produto. Com isso, alguns tópicos serão mostrados na forma mais explicativa de forma a dar base ao resultado encontrado.

Frequência de operação

A escolha da frequência ótima de operação, em função da espessura da lâmina, otimiza a

potência necessária para realizar o aquecimento do aço.

A frequência de operação será na faixa entre 1kHz para o aço a frio e 100 kHz para o aço na temperatura acima de 815°C. Essa faixa fica acima da frequência crítica estabelecida para uma relação de 4 para 1 entre a espessura do aço e a profundidade de penetração da corrente induzida no aço, a *eddy current*. A profundidade de penetração da corrente de *eddy* é dada pela Equação 1 e demonstrada na Figura 7 para vários diâmetros/espessuras de barras de aço (RUDNEV, 2002) (SEMIATIN, 1988).

$$d = 5000 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu * f}} \quad [1]$$

Onde:

- d profundidade de penetração
- ρ resistividade do material - ohm-centímetro
- μ permeabilidade do meio
- f Frequência

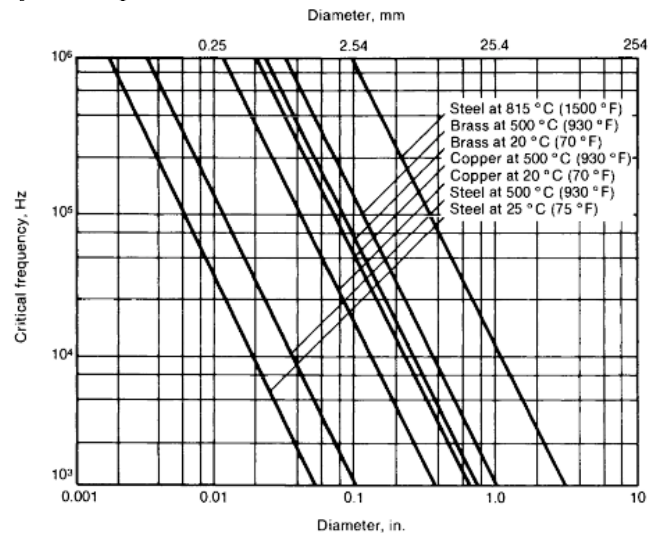


Figura 7 – Frequência crítica para um eficiente aquecimento por indução em função do diâmetro da barra de aço (RUDNEV, 2002) (SEMIATIN, 1988).

Conforme Figura 7, observando a linha que representa o aço a 500°C, para um diâmetro ou espessura mínima de 0,1 polegadas ou 2,54 milímetros, a frequência mínima deve ser de 1kHz aproximadamente. Isso significa que em uma frequência abaixo dessa, o aquecimento começa a perder eficiência. A mesma análise vale para as linhas que representam as temperaturas de 25 e 815°C.

Potência necessária

O tamanho da carga do forno, que é a lâmina de aço ou barra de aço a ser aquecida, será considerada com as seguintes dimensões: largura de máxima de 60 mm e espessura de 6 mm (mínima de 4 mm), com secção transversal máxima de 360 mm² e comprimento de 400 mm.

A maioria das ligas de aço atinge a temperatura de Curie abaixo dos 1000°C. Essa será considerada para fins de cálculos de potência necessária, conforme a seguir (CHIAVERINI, 1982).

Tendo definidas as dimensões da barra de aço e a temperatura máxima requerida, já se pode determinar a potência necessária. Primeiramente será determinada a potência requerida na barra P_w , através na Equação 2 a seguir (RUDNEV, 2002):

$$P_w = m * c * \frac{T_F - T_I}{t} \quad [2]$$

Sendo:

- m massa do aço (kg)
- c calor específico (J/(kg°C))
- T_I temperatura inicial
- T_F temperatura final

Como a massa do corpo, conforme dimensões máximas definidas, é de 0,75 kg, o calor específico do aço é de 480J/(kg°C), a temperatura inicial de 20°C, temperatura final de 1000°C e tempo de aquecimento de 120s, chega-se a uma potência mínima requerida no aço de 2954W.

A partir da dessa potência pode-se definir a potência elétrica requerida no indutor, com base na Equação 3 a seguir (RUDNEV, 2002):

$$P_C = \frac{P_w}{\eta_{el} * \eta_{th}} \quad [3]$$

Sendo:

- P_c potência elétrica no indutor
- η_{el} eficiência do enrolamento
- η_{th} eficiência térmica do conjunto

De acordo com Rudnev (2002) a eficiência do enrolamento para a frequência definida é de aproximadamente 0,9 e a eficiência térmica é em torno de 0,65 com a utilização de material refratário na bobina. Com esses valores se pode determinar através da Equação 3 a potência elétrica mínima de 5050W na bobina.

Tendo definidas as variáveis anteriores, pode-se trabalhar com uma potência não inferior a 6000 Watts na entrada do sistema, a fim de compensar as perdas no inversor.

Indutor da carga (Forno)

Para uma carga com as dimensões determinadas no item anterior, o indutor escolhido será do tipo fluxo longitudinal (HONGAN, 2014), com diâmetro interno mínimo de 80 milímetros e comprimento mínimo de 500 milímetros. O condutor encontrado comercialmente possui diâmetro externo de 6,35 mm e espessura de parede de 0,79 mm. Essas dimensões fornecem uma área de condução de 15,7mm². Sabendo que a corrente máxima disponibilizada pelo inversor será de 75A, a densidade de corrente no indutor será de

4,75A/mm². Esse valor é aceitável para um condutor de cobre refrigerado a água.

Nesta sessão será definida também a reatância do indutor, obedecendo as dimensões requeridas e a faixa de frequência de operação definidas no item anterior, de forma a limitar o fluxo de potência. A frequência deverá ser variável, a fim de manter estável valor da reatância conforme o aço sofre alteração na permeabilidade específica em função da temperatura. Nesse caso, o aço comporta-se como o núcleo do indutor e a variação da permeabilidade altera o valor a indutância, que deve ser compensada com a variação da frequência de operação, de forma a manter estável o valor da reatância.

A permeabilidade do aço é em torno de 1000 H/m na temperatura ambiente e em torno de 1 H/m na temperatura de Curie (RUDNEV, 2002). Nesse caso, a maior frequência será operada considerando a permeabilidade de 1 H/m e a menor frequência considerando a permeabilidade igual a 1000 H/m, de acordo com as equações a seguir (BASTOS, 2008) de forma a manter a reatância estável:

$$P = \frac{V^2}{XL} \quad [4]$$

$$XL = f * 2\pi L \quad [5]$$

$$L = \frac{n^2 \pi r^2 \mu_0 \mu_r}{l} \quad [6]$$

Onde:

- X_L Reatância
- f frequência de chaveamento
- L Indutância
- n quantidade de espiras
- r raio do indutor em metros
- μ_0 Permeabilidade no vácuo em H/m
- μ_r Permeabilidade relativa do aço em H/m
- l comprimento do indutor em metros
- V tensão sobre o indutor
- P potência máxima no indutor em Watts

A potência máxima no indutor será de 5000 Watts, conforme definida na seção anterior. Após vários cálculos com o auxílio de planilha, definiu-se a tensão fixa sobre o indutor de 80 V (valor eficaz) e o mesmo terá 15 espiras para as dimensões escolhidas.

De acordo com a Equação 4, a reatância “ X_L ” deverá ser de no mínimo 1,22 ohms (para 5000W de potência). Fixando esse valor na Equação 5 e variando o valor de “ L ” para as permeabilidades extremas (equação 06), temos a frequência de 0,9kHz para “ μ_r ” de 1000 H/m e 100kHz para “ μ_r ” de 1 H/m. Essa faixa atende os requisitos de

frequências mínimas destacados no item “Frequência de operação”.

Controle de temperatura, potência e tempo de aquecimento

Os controles podem ser do tipo on-off por serem mais baratos e simples. A precisão oferecida por esse tipo controle atende a necessidade do processo.

No controle da potência, o forno deve buscar a potência máxima ao ser ligado. Um sensor deve monitorar a carga e prover sinal de controle para aumentar ou diminuir a frequência de chaveamento do modulo inversor. A frequência de chaveamento varia a impedância do forno que limitará a potência. Por exemplo, se o forno estiver carregado com o aço frio, este é um núcleo do indutor (impedância alta), então a frequência limite será a mínima (1kHz); já com o forno a vazão ou carregado com aço quente (desmagnetizado), não há presença de núcleo no indutor (baixa impedância), então a frequência será a máxima (100kHz)

A temperatura será monitorada por um sensor que enviará um sinal também para o sistema de controle e este varia o chaveamento do modulo inversor, de forma a liberar a potência necessária para prover uma temperatura requerida pelo usuário através do painel.

No controle do tempo de aquecimento, o usuário informará no painel o tempo requerido para atingir a temperatura desejada e também o tempo que deverá permanecer nessa temperatura. Esse controle é necessário porque os diferentes tipos de liga de aço variam o comportamento em função da rampa de aquecimento em determinadas etapas do processo, como na tempera por exemplo. Esse controle pode fazer uso do sinal disponível pelo sensor de temperatura que servirá de referência para a rampa de aquecimento.

Fonte de Alimentação

A fonte deve ser monofásica e ter, na entrada, a tensão de 220 V e deve disponibilizar a potência mínima de 6000W a 115 Volts de Corrente Continua, que alimentará o inversor do forno. O sinal CC será convertido em CA através do inversor, com isso é aceitável um *ripple* da tensão CC conforme limites do mesmo. O sistema de proteção será provido, pelo menos, por disjuntor termomagnético na entrada.

Inversor de frequência

O inversor de frequência tem a potência mínima de 6000W ligado num barramento CC de 115V. Deve disponibilizar na saída monofásica a tensão fixa de 80V eficaz. A corrente deve variar entre 1 e 75 A de acordo com a frequência de operação, conforme demanda da carga. A

frequência de operação é variável de 1 kHz a 100 kHz. Deve ser provido, minimamente, de proteção contra curto-circuito e proteção térmica. O sistema de controle/comando comanda o chaveamento do inversor e regula a frequência conforme demanda da carga.

Sistema de refrigeração do forno (indutor)

O sistema de refrigeração é responsável por dissipar as perdas do forno (indutor) de no mínimo 150W. As perdas no indutor são causadas por efeito resistivo e a temperatura no condutor tem os limites máximos variáveis para cada material (cobre 240°C e alumínio 200°C).

O sistema deve fazer a circulação forçada d'água através de bomba elétrica e deve bombear a água por dentro do condutor tubular do indutor e retornar para o reservatório.

Os sensores

O sensor de corrente na entrada o forno deve fazer o monitoramento da carga e disponibilizar um sinal de tensão para o sistema de controle. Deve operar em faixa de frequência de 1kHz a 100kHz e corrente de 1 a 75A.

O sensor de temperatura faz a medição da temperatura por radiação devido a dificuldade de monitorar altas temperatura por contato. O mesmo deve operar numa faixa de temperatura de pelo menos 150°C a 1000°C posicionado a uma distância entre 10 a 60 milímetros da peça e fornecer o sinal para o sistema de controle.

Grau de proteção

O forno deve ser protegido, pelo menos, de poeira e quedas verticais de gota d'água. Para isso, o grau de proteção deve ser de IP 52 no mínimo.

Estrutura mecânica

É um gabinete com estrutura capaz de suportar o conjunto, resistente a oxidação e provido de rodas e com alças que permitam puxar ou empurrar o conjunto. Deve prover o grau de proteção já especificado.

IHM

Uma IHM é de grande importância na utilização de qualquer sistema, especialmente de eletrônicos, pois permite que o usuário obtenha os recursos desejados do produto.

O projeto de interação é uma técnica utilizada para dar origem ao modelo mental a ser desenvolvido pelo usuário. Pode ser visto como um processo com entradas e saídas. Como entradas para o projeto, podemos ter a árvore de funções e o layout provisório, enquanto que as saídas podem ser

o diagrama de modos, o storyboard e layout revisado (LACERDA, 2015).

A árvore de funções, Figura 8, constitui-se um tipo de entrada que se baseia no desdobramento de funções ou menus, indo das opções de mais alta até as de mais baixa hierarquia

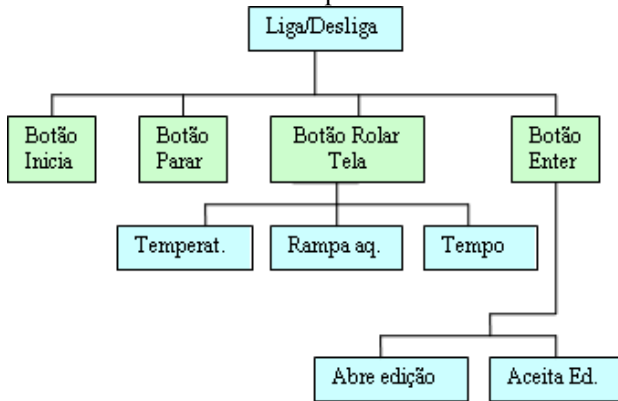


Figura 8 – Árvore de funções

O layout provisório, Figura 9, apresenta os elementos da interface (atuadores e mostradores).

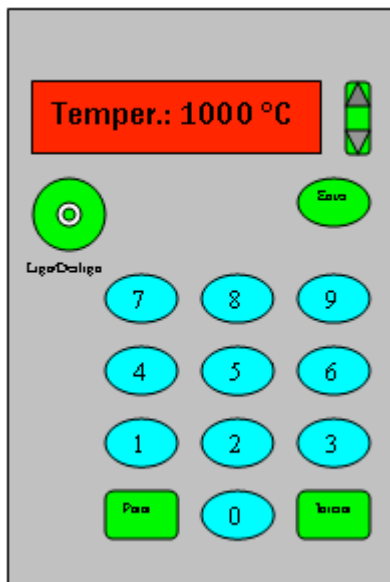


Figura 9 – Layout provisório

O diagrama de modos é uma indicação de como as telas da interface se comunicam e de que maneira podem ser acessadas. Refletem o funcionamento da própria máquina, do ponto de vista do usuário: devem demonstrar como as funções da máquina serão acessadas e monitoradas.



*Após a configuração, clicar no botão "Iniciar" para iniciar o aquecimento e "Parar" para parar o processo e inserir nova configuração.

Figura 10 – Diagrama de modos

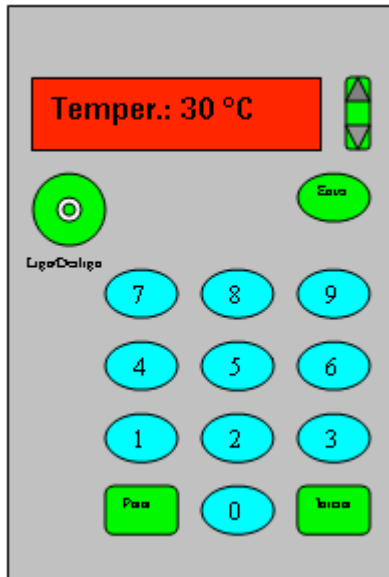
O storyboard, Tabela 4, é uma forma de visualizar os elementos gráficos do projeto. Constitui-se uma

seqüência de imagens das telas da interface, dando uma noção precisa da visão do usuário sobre a IHM.

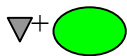
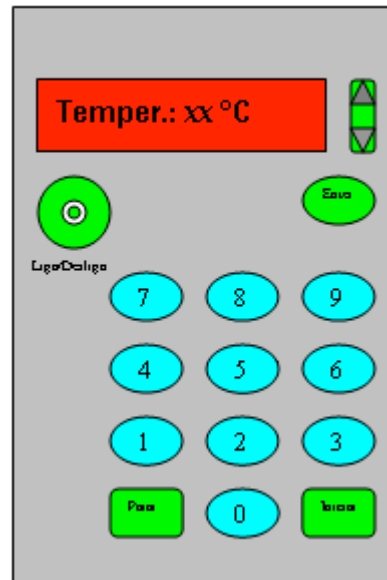
Tabela 4 - Storyboard



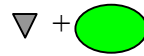
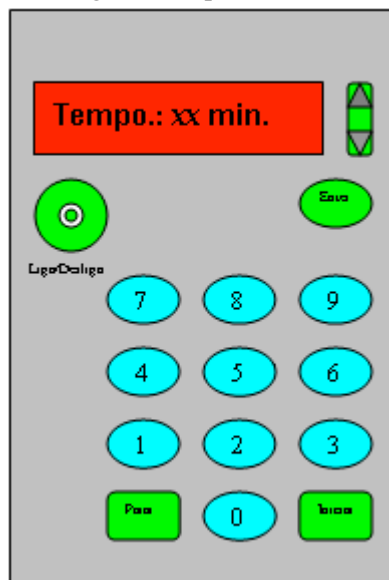
1 - Botão Liga – Tela inicial (mostra temperatura medida)



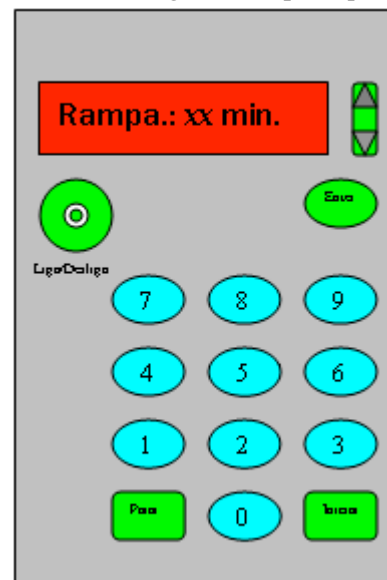
2 - Botão Enter – Tela Digitar Temperatura



3 - Botão Rolar Tela Baixo e Enter Tela Digitar Tempo



4 - Botão Rolar Tela Baixo e Enter Tela Digitar Rampa Aquecimento



3.3.3 Arquitetura e configuração geral do produto

A configuração do produto como um todo será formado por blocos (modular), buscando a economia em escala proporcionada por essa configuração.

3.3.4 Configuração modular e divisão dos módulos

O produto será dividido em 8 módulos, conforme listados a seguir:

- A – Módulo de Alimentação;
- B – Módulo Inversor;
- C – Módulo do Forno;
- D – Módulo de refrigeração do forno;

E – Módulo de Controle;

F – Sensores.

G – Modulo de IHM

H – Modulo do Conjunto Mecânico

Onde cada módulo pode ser produzido/adquirido separadamente e integrados no final do processo.

3.3.5 Alocação dos módulos

A forma de alocação escolhida para os módulos do produto será a disposição lateral perpendicular, conforme mostrado na figura 9.

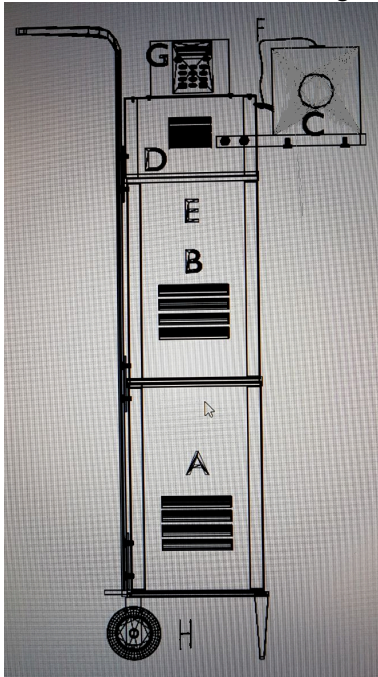


Figura 9 – Alocação dos módulos

A ordem de alocação prioriza a facilidade de conexão entre os módulos (interface) em função do fluxo de energia.

Dessa forma, o relacionamento físico entre os módulos sugere que sejam dispostos na vertical e o primeiro a ser acomodado, mais embaixo, seja o de alimentação, seguido pelo de conversão. Na lateral do módulo de conversão pode ser disposto o forno, facilitando o acesso. O módulo controle fica disposto em outra lateral do modulo de conversão e o módulo de refrigeração alocado sobre o de conversão. O módulo de interface fica disposto sobre o módulo de refrigeração. Essa disposição atende também o relacionamento funcional e dos fluxos entre os módulos.

3.3.6 Esboço do produto

O esboço do produto, Figura 10, da forma física às alternativas escolhidas e possibilita verificar a compatibilidade espacial das diversas partes do produto, considerando os valores escolhido em suas especificações (CARPES JR, 2014).



Figura 10 – Esboço do produto

3.3.7 Otimização do projeto preliminar

Basicamente, são aplicadas as equações e formulações já demonstradas, com o objetivo de prover otimização de potência necessária para realização da **função** do produto.

3.3.8 Ideia de custo do produto

Neste tópico serão analisados itens do projeto mais relevantes em termos de custo e obtido um valor médio através de consulta no mercado, de materiais similares aos especificados. Na Tabela 5 é apresentado o custo por módulo, e o valor serve de referência a fim de testar o requisito econômico do produto.

Tabela 5 – Estimativa de custo médio dos itens mais relevantes.

Módulo	Descrição	Valor Aproximado
Fonte	Fabr. dedic. (Transf + cap)	R\$ 2.500,00
Inversor	Similar p/ 100kHz	R\$ 5.450,00
Sensor	Pirômetro	R\$ 2.710,00
Total		R\$ 10.660,00

Os demais módulos possuem menor relevância em termos de custos, dessa forma, com os dados da Tabela 5, já possível verificar o produto

atende o requisito econômico que deve ser compatível com demais ferramentas de uma oficina de cutelaria.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao realizar o projeto informacional foi constatado a demanda existente para o produto e aceitação do mesmo pelos potenciais clientes. Na etapa do projeto conceitual foi constatado, dentre outros aspectos, a fabricabilidade dos módulos e no projeto preliminar, os estudos realizados a respeito da viabilidade técnica são favoráveis e foi avaliado, de forma macro, a viabilidade econômica. Todos esses aspectos apontam para viabilidade do produto.

7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Como continuação do trabalho, sugere-se a realização do projeto detalhado acompanhado do estudo dos processos de fabricação, e construção de um protótipo, que pode ser em escala reduzida a fim de conferir o funcionamento do conjunto.

Outro item que exige um estudo a parte, é a compatibilidade eletromagnética dos módulos do conjunto e a aplicação de técnica de redução de Interferência Eletromagnética, caso seja necessário.

8 REFERÊNCIAS

BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para engenharia**. 2. Ed. Florianópolis: Editora DA UFSC, 2008. 396 p.

CARPES JR, Widomar P. **Introdução ao Projeto de Produtos**. 1ª Edição. Florianópolis: Editora Bookman, 2014.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, ABM– Associação Brasileira de Metais, 1982.

GUAJUVIRA. **Produtos para cutelaria**. Disponível em: www.guajuvira.com.br. Acesso em: 23 de maio de 2017.

HONGAN, T. C. **Sistema de aquecimento indutivo integrado a um retificador de alto fator de potência**. Dissertação de Mestrado. Prog. De pós

grad. em Eng. Elet. Univ Fed. PR UTFPR, Curitiba, PR, 2014

JAMO. **Aquecimento indutivo**. Disponível em: www.jamo.ind.br. Acesso em: 23 de maio de 2017.

LACERDA, Joel. **Projeto de Interfaces**. IFSC, 10 set 2015, 15 dez 2015. 133 f. Notas de Aula. Apresentação de slides.

LUMASENSE TECHNOLOGIES. **Folha de dados do componente IN 5/9 Plus**. Disponível em: <http://www.lumasenseinc.com/>. Acesso em: 26 julho. 2017.

MELEXIS MICROELETRONIC INTEGRED SISTENS. **Folha de dados do componente MLX91205**. Disponível em: <http://www.melexis.com/>. Acesso em: 26 julho. 2017.

RUDNEV, V. et al. **Handbook of induction heating**. [S.l.]: CRC Press, 2002

SEMIATIN, S. **Elements of induction heating: design, control, and applications**. [S.l.]: ASM International, 1988.

SENAI. **Mecânica – Tratamentos Térmicos**. Programa de certificação do pessoal de manutenção. Ser. Nac. de Aprend. Industr. SENAI-DAE, ES, 1997.

FACASCOQUEIRO LTDA. **História da Cutelaria**. Disponível em: <http://www.facascoqueiro.com.br/>. Acesso em: 20 nov. 2016.

R. PAULO, **Entrevista concedida à ANotícia – Conversa afiada, Joinville, SC, 04 de mar., 2002**. Disponível em: <http://www1.an.com.br/2002/mar/04/0ane.htm>. Acesso em: 25 nov. 2016.

NORMA REGULAMENTADORA. **NR17 – Ergonomia**. MTPS, 1990