Fatecnológica Jahu

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

PRODUÇÃO DE MAPA TÁTIL DE TECNOLOGIA ASSISTIVA EM ESCALA INDUSTRIAL: ESTIMATIVAS PARA PRODUÇÃO DISCRETA

PRODUCTION OF A TACTILE ASSISTIVE TECHNOLOGY MAP ON AN INDUSTRIAL SCALE: ESTIMATED OF DISCRETE MANUFACTURING

Luiz Felipe Camargo Rodrigues
Fatec Jahu, luiz.rodrigues5@aluno.cps.sp.gov.br

Guilherme Martins de Andrade
Fatec Jahu, guilherme.andrade7@aluno.cps.sp.gov.br

Alessandro Lameiro Brancão
Especialista, Fatec Jahu, alessandro.brancao@cps.sp.gov.br

DOI: https://doi.org/10.54628/issn2763-5600.v20.1.2026.386

RESUMO

O acesso a tecnologias assistivas no Brasil é frequentemente limitado pelo elevado custo e pela baixa escala dos processos de fabricação artesanais. Este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta o projeto de transição da manufatura por projeto artesanal para um modelo de produção industrial seriado de um Mapa Tátil Sensorial, desenvolvido na Faculdade de Tecnologia de Jahu (FATEC) para atender ao Centro de Inclusão e Convivência (CISC). A pesquisa, de natureza aplicada relata a processo de fabricação e propõem intervenções de melhoria. Com base nos preceitos do *Lean Manufacturing*, *Design for Manufacturing and Assembly* (DFM/DFA) e do Sistema Toyota de Produção. As intervenções de engenharia focaram no redesenho do produto substituindo a soldagem ponto a ponto do microcontrolador ESP32 por uma Placa de Circuito Impresso (PCB) customizada e padronizando o chassi em perfis de *metalon* e Alumínio Composto (ACM) e no reordenamento do arranjo físico em uma Célula de Manufatura. A incorporação de conexões mecânicas *Poka-Yoke* e de um dispositivo de teste automatizado (*Jidoka*) eliminou gargalos operacionais e erros de montagem elétrica. Os resultados estimados com uma otimização no Tempo de Ciclo de 400 minutos (6 horas e 40 minutos) no modelo artesanal para 80 minutos (1 hora e 20 minutos) no arranjo celular, representariam um ganho de produtividade de 80%. Conclui-se que a reorganização do processo industrial e a eliminação do trabalho manual intensivo reduzem drasticamente o custo de Mão de Obra Direta, estabelecendo os alicerces técnicos e operacionais para a reprodução em escala de dispositivos de acessibilidade viáveis e de alto impacto social.

Palavras-chave: Tecnologia Assistiva. *Lean Manufacturing*. DFM/DFA. Célula de Manufatura. Mapa Tátil.

ABSTRACT

Access to assistive technologies in Brazil is often limited by the high cost and small scale of artesanal manufacturing processes. This Final Course Project presents a transition project from artisanal design manufacturing to a mass-production industrial model for a Sensory Tactile Map, developed at the Faculty of Technology of Jahu (FATEC) to serve the Inclusion and Coexistence Center (CISC). The applied research reports on the manufacturing process and proposes improvement interventions. Based on the principles of Lean Manufacturing, Design for Manufacturing and Assembly (DFM/DFA), and

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

the Toyota Production System, the engineering interventions focused on redesigning the product, replacing the point-to-point soldering of the ESP32 microcontroller with a customized Printed Circuit Board (PCB), standardizing the chassis with metal profiles and Aluminum Composite Material (ACM), and rearranging the physical layout in a Manufacturing Cell. The incorporation of Poka-Yoke mechanical connections and an automated testing device (Jidoka) eliminated operational bottlenecks and electrical assembly errors. The estimated results, with an optimization of the Cycle Time from 400 minutes (6 hours and 40 minutes) in the artisanal model to 80 minutes (1 hour and 20 minutes) in the cellular arrangement, would represent an 80% productivity gain. It is concluded that the reorganization of the industrial process and the elimination of intensive manual labor drastically reduce the cost of Direct Labor, establishing the technical and operational foundations for the large-scale reproduction of viable accessibility devices with high social impact.

Keywords: *Assistive Technology. Lean Manufacturing. DFM/DFA. Manufacturing Cell. Tactile Map.*

1 INTRODUÇÃO

A garantia da acessibilidade e da inclusão para Pessoas com Deficiência é um direito fundamental garantido por legislações nacionais e diretrizes globais. No entanto, a disseminação de tecnologias assistivas como os mapas táteis sensoriais utilizados em ambientes de uso público enfrenta um gargalo crítico no Brasil: a inviabilidade financeira decorrente da dependência de processos de fabricação artesanais.

Na Faculdade de Tecnologia de Jahu (FATEC), foi desenvolvida uma Prova de Conceito de um Mapa Tátil Sensorial concebido para atender às demandas de orientação espacial do Centro de Inclusão e Convivência (CISC). Embora tenha cumprido com êxito sua função funcional e ergonômica, o diagnóstico de seu fluxo de fabricação revelou sérias limitações de manufatura: a estrutura era montada de forma unitária, dependia de soldagem manual ponto a ponto sobre um microcontrolador comercial ESP32 e exigia adaptações improvisadas de chassi.

Esse modelo por projeto resultou em um Tempo de Ciclo de 400 minutos (6 horas e 40 minutos) por unidade e um custo direto de prototipagem de aproximadamente R$ 1.200,00. Sob a ótica da Gestão da Produção Industrial, a alocação intensiva de mão de obra técnica especializada em operações repetitivas e a ausência de padronização tornam o produto comercialmente e socialmente inviável para reprodução em larga escala.

Diante desse cenário, surge a seguinte reflexão central: como a aplicação dos princípios do *Lean Manufacturing*, do *Design for Manufacturing and Assembly* (DFM/DFA) e do arranjo celular pode reestruturar o processo produtivo do Mapa Tátil Sensorial, reduzindo o tempo de ciclo e viabilizando sua manufatura em escala de forma sustentável?

Com o objetivo geral de projetar a reengenharia do produto e a reestruturação do processo de manufatura do Mapa Tátil Sensorial, aplicando diretrizes de *Lean Manufacturing*,

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

para otimizar o tempo de ciclo de produção e viabilizar o fornecimento em escala para entidades de apoio assistencial.

Como objetivos específicos, podemos citar:

1. Mapear o processo artesanal de montagem da Prova de Conceito realizada na Fatec Jahu, identificando desperdícios, gargalos operacionais e falhas de qualidade.
2. Propor alterações com base nos preceitos de DFM e DFA na reengenharia do produto, promovendo a substituição do microcontrolador avulso e da soldagem manual por uma Placa de Circuito Impresso (PCB) customizada e padronizando o chassi com perfis de *metalon* e painéis de Alumínio Composto (ACM).
3. Projetar melhorias de arranjo físico integrando mecanismos de prevenção de erros (*Poka-Yoke*) e estações de teste automatizado (*Jidoka*).

A justificativa deste trabalho fundamenta-se em três pilares centrais: Relevância Social, Importância Técnica e de Engenharia e a Contribuição Acadêmica:

A disponibilidade de mapas táteis em espaços públicos e instituições assistenciais, indicam a relevância social deste trabalho. Reduzir as barreiras de custo desses equipamentos contribui diretamente para a democratização da tecnologia assistiva.

O estudo demonstra como as ferramentas de Gestão da Produção Industrial (Lean, DFM/DFA, Arranjo Celular) mostrando sua importância Técnica e de Engenharia que podem transformar protótipos acadêmicos ou artesanais em produtos industriais padronizados, reprodutíveis e ergonomicamente adequados.

Já a contribuição Acadêmica deste estudo está na Integração de conceitos teóricos do Sistema Toyota de Produção à engenharia de hardware e eletrônica aplicada, preenchendo a lacuna entre o desenvolvimento de provas de conceito na universidade e a sua efetiva transferência tecnológica para o mercado ou comunidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

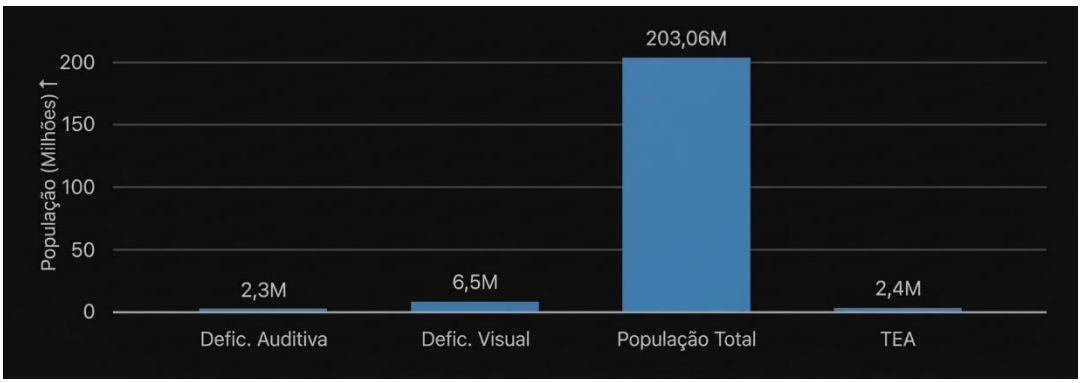
2.1 Manufatura de Tecnologias Assistivas no Brasil (IBGE)

A relevância da industrialização de tecnologias assistivas no Brasil é evidenciada pelo volume de sua demanda potencial. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022) aponta que o Brasil possui cerca de 6,5 milhões de pessoas com deficiência visual severa e 2,3 milhões de pessoas com deficiência auditiva. Além disso, de acordo com as estatísticas mais recentes, há cerca de 2,4 milhões de brasileiros com Transtorno do Espectro Autista (TEA) (IBGE, 2022).

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

Apesar dessa demanda significativa por espaços urbanos inclusivos e previsíveis, o fornecimento de equipamentos de acessibilidade, como mapas táteis sonoros, ainda é predominantemente caracterizado por processos de manufatura artesanal ou de baixa escala. Essa desconexão entre a elevada demanda populacional e a limitada capacidade produtiva da indústria contribui para a elevação dos custos unitários, dificultando a adoção em larga escala dessas soluções por municípios de pequeno e médio porte (IBGE, 2022).

Figura 1: Gráfico Percentual deficientes Brasil 2022



Fonte: Base de dados IBGE (2022).

A análise percentual detalhada na Figura 1 permite visualizar o impacto relativo de cada grupo em relação ao contingente populacional total medido pelo Censo de 2022. Observa-se que a deficiência visual severa constitui a maior parcela dentre as variáveis analisadas, correspondendo a aproximadamente 3,89% da população nacional. Em termos de engenharia de produto e mapeamento de demandas, esse índice sugere uma demanda relevante por recursos de sinalização tátil em espaços públicos e privados. Além de facilitar a orientação, esses recursos podem contribuir diretamente para ampliar a autonomia e a mobilidade das pessoas com deficiência visual.

De forma complementar, os dados indicam que a deficiência auditiva severa e o contingente estimado de indivíduos com Transtorno do Espectro Autista (TEA) apresentam proporções próximas, representando 1,13% e 1,18% da população, respectivamente. Embora esses valores percentuais pareçam discretos isoladamente, a soma dessas demandas específicas totaliza cerca de 6,2% da população brasileira exposta a algum nível de barreira de comunicação urbana ou sensorial.

Sob a perspectiva da Gestão da Produção Industrial, esses dados ajudam a reforçar a necessidade de repensar um modelo baseado exclusivamente na produção sob encomenda. Quando existe um público com potencial expressivo e uma demanda que permanece pouco

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

atendida, a produção em maior escala passa a ser uma alternativa relevante. Nesse sentido, os dispositivos assistivos integrados, capazes de reunir recursos táteis, sonoros e visuais, podem ser entendidos como parte de um segmento que apresenta demanda pouco atendida. Assim, o desenvolvimento de uma linha de montagem com fluxo linear contínuo surge como uma possibilidade para ampliar o acesso a essas tecnologias, principalmente por meio da redução dos custos unitários e da padronização do processo produtivo.

Esse cenário também traz um desafio para a engenharia de processos: encontrar formas de superar as limitações da fabricação artesanal quando o objetivo é alcançar uma escala maior de produção. Durante as etapas de desenvolvimento e validação de tecnologias assistivas, é comum recorrer a plataformas de desenvolvimento genéricas, microcontroladores e conexões temporárias, recursos que são úteis para a prototipagem. Mas à medida que o produto se aproxima de uma aplicação em maior escala, torna-se necessário pensar não apenas em seu funcionamento, mas também em como ele será fabricado. É nesse ponto que o conceito de Design for Manufacturing (DFM) ganha importância, ao direcionar o projeto para uma fabricação mais simples, padronizada e adequada à produção em escala.

Segundo Chiavenato (2010), a passagem da produção artesanal para a produção industrial representou uma profunda transformação, contribuindo para o surgimento da própria Ciência da Administração e alterando significativamente as condições de trabalho e a organização da sociedade. No caso dos mapas táteis sonoros, essa mudança pode ser observada na substituição de um conjunto de componentes montados de forma mais individualizada, como microcontroladores e extensas conexões manuais, por uma placa de circuito impresso (PCB) desenvolvida especificamente para o produto.

Essa integração eletrônica permite reduzir componentes periféricos, organizar melhor as conexões e tornar o produto mais padronizado. Desse modo, o processo de fabricação também tende a ficar mais simples de estruturar. Ao reduzir o número de operações manuais complexas e a unificação dos módulos eletrônicos, torna-se viável o desenho de um fluxo de montagem sequencial e repetível, permitindo a transição de uma lógica de oficina de customização para um regime de linha de produção industrial moderna (Zanzoti, 2019).

2.2 Modelo de Manufatura Discreta (Produção por Projeto)

A estruturação dos sistemas produtivos é categorizada de acordo com o fluxo de materiais e de padronização das operações ao longo da transformação fabril. Williams (1989), em suas formulações focadas na arquitetura e sistemas de controle na manufatura, consolida a

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

distinção essencial técnica entre os processos contínuos (como o processamento de fluidos ou insumos químicos) e os sistemas que operam dentro dos limites da manufatura discreta.

A manufatura discreta é definida pela elaboração de bens tangíveis, individualizados e contáveis, caracterizados por uma arquitetura em que partes distintas podem ser integradas, rastreadas e, frequentemente, desmontadas ou substituídas. É justamente nesse contexto que se enquadra a fabricação de interfaces e hardwares assistivos compostos por microcontroladores, placas de circuito impresso (PCBs), módulos de acionamento eletromecânico, cabeamento estruturado e chassi polimérico. Cada componente precisa cumprir a sua função e se conectar adequadamente aos demais dispositivos, uma vez que dão forma ao conjunto final. Por isso, a estabilidade do produto depende diretamente da execução correta das etapas de montagem e conexão (Williams,1989).

Segundo Tompkins (2010), as estruturas produtivas são definidas principalmente pelo volume de demanda estabelecido no mercado consumidor e pelo grau de padronização do produto. Nas fases iniciais de desenvolvimento de engenharia, em validações ergonômicas e processos de prototipagem, ou quando a manufatura exige um grau intenso de adequações customizadas, a literatura aconselha o uso da Produção por Projeto.

Esse modelo está associado ao layout de posição fixa, no qual o produto permanece estacionário enquanto os recursos materiais e humanos se deslocam até ele. Equipamentos, instrumentos de medição elétrica, ferramentas e equipes técnicas precisam se movimentar de maneira coordenada até o local em que ocorre a montagem do componente principal. Com esse ajuste, o produto permanece no centro das operações, enquanto os demais recursos se organizam ao seu redor. (Tompkins *et al.* 2010)

Os autores ressaltam que o modelo de arranjo por projeto apresenta como principal vantagem a máxima flexibilidade de adaptação operacional diante de eventuais alterações no projeto e no escopo da montagem. Contudo, os autores também indicam que esse modelo apresenta restrições relacionadas à capacidade produtiva e à escalabilidade técnica. A permanência em estruturas do tipo posição fixa requer o emprego de operadores com elevado nível de qualificação e aptidão polivalente, além de contribuir para a ocorrência de longos tempos de ciclo, incertezas quanto à padronização técnica e aumento do custo unitário, especialmente em razão da alocação intensiva de recursos para a fabricação em pequena escala.

Na perspectiva de um gestor de produção que tem como objetivo o abastecimento comercial de tecnologias focadas na acessibilidade, manter as operações da produção apenas em base artesanal compromete a viabilidade de suprir as necessidades de uma demanda em

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

escala populacional. O referencial teórico de planejamento fabril indica que a superação das vulnerabilidades do processo estático passa por migrar as estruturas de montagem para um formato orientado a processos seriados. Em síntese, busca-se transformar a consolidação fragmentária e estática do projeto em uma plataforma de montagens contínuas (Williams, 1989; Tompkins et al., 2010).

Na produção por projeto (prototipagem do mapa), o operador precisa saber ler um diagrama esquemático, soldar terminais, fixar parafusos e configurar o microcontrolador. Ou seja, ele é um artesão altamente qualificado.

Como Tompkins *et al* (2010) alerta, depender de mão de obra polivalente encarece o processo e dificulta a contratação rápida de novos operadores para aumentar a produção.

2.3 Transição do Processo Artesanal para a Série: Design for Manufacturing (DFM)

O *Lean Manufacturing*, derivado do Sistema Toyota de Produção (TPS), não se resume a um conjunto isolado de ferramentas, mas consiste em uma filosofia de gestão estruturada para a maximização do valor agregado e a eliminação sistemática de desperdícios (*Muda*) (OHNO, SHINGO).

Na manufatura de tecnologias assistivas, o processo em bancada artesanal apresenta ineficiências inerentes, como o excesso de movimentação de materiais, os tempos de espera entre as etapas de solda e o processamento inadequado decorrente de conexões manuais complexas.

Sob a visão da engenharia de processos, a mudança para um modelo de escala exige, primeiramente, o mapeamento das operações da montagem elétrica, como a fixação de botões e a integração de microcontroladores, a fim de identificar quais delas efetivamente agregam valor ao produto.

O modelo de manufatura artesanal, amplamente utilizado nas fases iniciais de validação de protótipos, caracteriza-se pela alta customização, pela dependência da habilidade técnica do operador e pelos elevados tempos de ciclo. Em projetos eletrônicos iniciais, a utilização de placas de desenvolvimento genéricas acopladas a emaranhados de fios soldados manualmente resulta em alta variabilidade e inviabiliza o ganho de escala. Para superar essa barreira e ingressar na produção em série, a engenharia de processos recorre ao *Design for Manufacturing* (DFM) (OHNO, SHINGO).

2.4 Arquitetura do Produto e Diretrizes do *Design for Assembly* (DFA)

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

Enquanto o DFM foca na otimização da fabricação de cada componente individual, a viabilização de um fluxo contínuo de produção exige a aplicação complementar do *Design for Assembly* (DFA). Conforme apontam Boothroyd, Dewhurst e Knight (2010), o DFA é uma metodologia de engenharia direcionada ao projeto do produto para simplificar as operações de montagem, visando à redução do tempo de ciclo e dos custos de manufatura.

No contexto da montagem de mapas táteis sonoros, o DFA atua diretamente na eliminação da complexidade do trabalho manual. A transição da montagem artesanal, que envolve soldagem ponto a ponto de dezenas de fios e fixação improvisada de componentes, para a montagem industrial exige a simplificação das interfaces do produto.

Além disso, a literatura de desenvolvimento de produtos recomenda a estratégia de montagem unidirecional (*top-down*) (Boothroyd, 2010).

2.5 Impressão 3D e produção avançada

A transição de um modelo de produção artesanal para operações industriais em serie exige a adoção de tecnologias de manufatura avançada que garantam agilidade, padronização e viabilidade econômica. No contexto de desenvolvimento das interfaces físicas de acessibilidade, utilizando métodos de fabricação digital e sistemas de automação microcontrolada que compõem um modelo ideal para viabilizar tanto a prototipagem rápida quanto os fluxos contínuos de montagem (GROOVER, 2011).

A Manufatura Aditiva, também conhecida como impressão 3D, constitui uma das tecnologias centrais dessa transformação. Diferente dos processos tradicionais de usinagem, a impressão 3D se baseia na deposição sucessiva de camadas de material, como polímeros termoplásticos PLA ou ABS, a partir de um modelo tridimensional digital (GIBSON et al., 2015).

Na linha de produção de mapas táteis, essa tecnologia desempenha uma dupla função estratégica: permite a fabricação sob medida de componentes de alta complexidade geométrica, como as matrizes de relevo e símbolos em braille, e fundamentalmente, viabiliza a criação rápida de dispositivos de fixação (jigs), marcadores de locais para a parte visual e gabaritos Poka-Yoke para as próprias bancadas de montagem, otimizando o setup das estações de trabalho a um baixo custo.

Complementando à tecnologia aditiva, os sistemas de corte a laser por Comando Numérico Computadorizado (CNC) oferecem uma elevada agilidade na etapa de fabricação do chassi e dos painéis estruturais. Operando através da sublimação ou fusão do material sob um

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

feixe de luz altamente concentrado, o corte a laser garante uma elevada precisão dimensional. Essa precisão é fundamental para assegurar o encaixe adequado dos componentes durante a montagem física indicada pelo Design for Assembly (DFA), reduzindo a necessidade de retrabalhos ou ajustes manuais nas bordas do chassi que compõe o mapa.

No escopo da lógica de controle e da integração do produto, a adoção de plataformas modulares de automação representa um salto tecnológico em relação à eletrônica artesanal.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Classificação e Delineamento da Pesquisa

Baseando-se nos conceitos de Lakatos e Marconi (2003) sobre pesquisa aplicada, este trabalho se orienta à resolução de problemas práticos da sociedade contemporânea. A pesquisa utiliza dados demográficos e análises de cenários reais para justificar o desenvolvimento de um Mapa Tátil Sensorial destinado a indivíduos com deficiência visual e pessoas com autismo. O diferencial deste projeto consiste em sua materialização prática, uma vez que o objetivo foi ultrapassar a fase de prototipagem artesanal e estabelecer uma análise profunda sobre a viabilidade do produto. Ao projetar a arquitetura dos sistemas de controle e analisar a eficiência do processo produtivo, o estudo busca garantir que a tecnologia proposta seja viável para produção, assegurando sua chegada ao usuário final com qualidade e impacto transformador.

A pesquisa foi materializada por meio de um Estudo de Caso focado na construção de uma Prova de Conceito (do inglês, Proof of Concept - PoC). Essa abordagem pratica permitiu a intervenção direta no objeto de estudo, unindo o referencial teórico à prática de manufatura.

3.2 Ambiente de Estudo e Construção da Prova de Conceito

O desenvolvimento prático foi conduzido nas instalações da Faculdade de Tecnologia (Fatec) de Jahu, sob a supervisão técnica do Professor Flavio Cardoso Ventura, em resposta a uma demanda do Centro de Inclusão e Convivência (CISC), entidade assistencial voltada à promoção da autonomia, do bem-estar e do suporte a jovens e adultos com deficiências diversas. Para assegurar a assertividade da solução, o projeto adotou as premissas do Design Centrado no Usuário. A validação das funcionalidades contou com a participação ativa de uma pessoa com deficiência visual, cujos feedbacks ajudaram na avaliação e aprimoramento dos requisitos de interface, promovendo melhorias ergonômicas e sensoriais aplicadas diretamente sobre a arquitetura do projeto.

Importante destacar que esse modelo inicial não corresponde à versão comercial ou definitiva do produto. Sua fabricação foi realizada de forma inteiramente artesanal,

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

caracterizando-se como uma Produção por Projeto e utilizando componentes comerciais disponíveis no mercado, como o microcontrolador ESP32 para o processamento lógico, além de botões, módulos sonoros e fiação convencional utilizados na consolidação da arquitetura elétrica.

3.3 Diagnóstico Operacional e Aplicação de Engenharia

Foi a execução empírica desta montagem artesanal que permitiu o diagnóstico prático do sistema produtivo. A soldagem manual, o roteamento complexo dos chicotes elétricos e a customização das fixações evidenciaram gargalos operacionais e um elevado tempo de ciclo. Constatou-se que a dependência de mão de obra altamente especializada tornava o processo insustentável em altos volumes.

Esse diagnóstico foi determinante para justificar e impulsionar a concepção de uma linha de montagem industrial seriada no presente trabalho. A análise realizada evidenciou a necessidade de aplicação conjunta das diretrizes de Design for Manufacturing (DFM), Design for Assembly (DFA) e dos princípios do Lean Manufacturing, com o objetivo de garantir maior viabilidade, escalabilidade e reprodutibilidade do equipamento.

3.4 Estruturação Cronológica e Fases de Desenvolvimento

O desenvolvimento e a execução da pesquisa foram organizados ao longo de um semestre letivo, abrangendo o período entre os meses de agosto e novembro de 2025. Para lidar com a complexidade do hardware e com a formulação teórica do trabalho, a pesquisa foi dividida em etapas sequenciais de desenvolvimento: Revisão Bibliográfica, Produção, Revisão Crítica e Apresentação.

A etapa inicial consistiu na ideação e na revisão bibliográfica, período em que foram consolidados os referenciais teóricos relacionados à engenharia de métodos, às tecnologias assistivas e à filosofia Lean. Na sequência, a fase de produção foi desenvolvida em um regime híbrido de dedicação. As atividades de montagem complexa e de validação técnica do microcontrolador foram realizadas durante a carga horária de laboratório assistido, sob a orientação do corpo docente. Já as etapas de dimensionamento, planejamento de engenharia e estruturação lógica exigiram um período significativo de desenvolvimento autônomo em atividades extraclasse.

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

Esse cronograma permitiu não apenas a construção do protótipo artesanal dentro do prazo estipulado, mas também garantiu o tempo suficiente para a fase de revisão crítica. Durante o processo de fabricação do Mapa Tátil, as operações foram cronometradas computando exclusivamente tempos efetivos de fabricação, excluindo paradas e interrupções do processo. Foi ao final desse ciclo que os dados de montagem puderam ser analisados, fundamentando a transição do modelo atual para o arranjo de produção em massa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Engenharia de Produto: *Design for Manufacturing* e Customização em Massa

O principal desafio identificado na transição da Prova de Conceito (PoC) para a produção industrial foi conciliar a necessidade de personalização de cada mapa, que pode variar conforme a arquitetura do local, como bancos ou praças, com a velocidade e o baixo custo da manufatura em serie. Para solucionar esse gargalo, o projeto adotou a estratégia de Customização em Massa, suportada pelas diretrizes de Design for Manufacturing (DFM).

A primeira intervenção ocorreu na etapa que antecede a manufatura, na etapa de engenharia de aplicação. Nessa etapa, foi estabelecido que o fluxo se inicia com a atuação de um projetista especializado, responsável por mapear o ambiente físico do cliente e transformar a planta arquitetônica em modelos tridimensionais (CAD). Essa etapa prévia garante que os dados sejam utilizados pelas impressoras 3D com precisão, separando a engenharia customizada do chão de fábrica padronizado.

No design eletrônico, o DFM foi aplicado de forma sistemática com o objetivo de reduzir a variabilidade do processo. A placa de desenvolvimento comercial ESP32, utilizada no protótipo artesanal com fiação pontual, foi integralmente substituída por uma Placa de Circuito Impresso (PCB) customizada e dedicada exclusivamente ao projeto. Essa PCB própria integra os microcontroladores, as portas lógicas e os circuitos de potência de forma nativa, eliminando a necessidade de soldagem manual de emaranhados de fios e contribuindo para uma maior estabilidade ao hardware.

4.2 Produtividade e Fluxo: A Nova Rota Operacional em Célula

Com a parte eletrônica estabilizada, a estrutura física do produto foi redesenhada sob a visão do Design for Assembly (DFA) com o objetivo de viabilizar um arranjo físico mais adequado ao fluxo de produção. O layout de posição fixa utilizado na fase de prototipagem

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

mostrou-se ineficiente para a escalabilidade, sendo substituído por um arranjo celular, estruturado para favorecer o fluxo contínuo.

O mapa tátil passou a apresentar uma estrutura modular, composta por uma base padronizada e um topo customizável. A rota de fabricação em célula foi padronizada seguindo uma sequência de postos de trabalho interligados:

1. **Montagem Estrutural:** O fluxo produtivo inicia-se pela montagem da carcaça base, utilizando perfis tubulares metálicos (*metalon*), que conferem rigidez mecânica ao chassi com baixo peso e facilidade de esquadrejamento.
2. **Aplicação da Base Plana:** Na sequência, realiza-se a fixação do painel de Alumínio Composto (ACM) sobre a estrutura de *metalon*. O painel de ACM atua como a base plana, rígida e durável, sobre a qual o mapa ganhará forma.
3. **Integração Topográfica (Customização):** Com o chassi base finalizado, ocorre a colagem técnica dos elementos em 3D, previamente impressos de acordo com o desenho elaborado pelo projetista. É nessa etapa que o produto adquire sua identidade final, reproduzindo a geometria tátil do ambiente encomendado.
4. **Integração Eletroeletrônica:** Nessa etapa, realiza-se a fixação da PCB customizada e o acoplamento do chicote elétrico aos botões interativos e aos módulos sonoros, seguindo o roteamento estruturado.
5. **Inspeção, Embalagem e Expedição:** Após a montagem, o produto passa pelas etapas de validação da qualidade e, em seguida, é embalado e encaminhado para a área de expedição, evitando o acúmulo de estoque de produtos acabados.

Organizando essa sequência em uma célula, podendo assumir formato em "U" ou zigue-zague, aproxima fisicamente as estações, minimizando a movimentação de materiais e permitindo um nivelamento adequado do tempo de ciclo (Takt Time).

Imagem 1: Protótipo Mapa Tátil (2026)

Fatecnológica Jahu
ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)



Fonte: Acervo dos autores (2026).

4.3 Qualidade na Origem: *Poka-Yoke* e *Jidoka*

Para garantir que a alta produtividade não comprometa a confiabilidade operacional do dispositivo, foram implementados mecanismos de segurança alinhados à filosofia Lean. A montagem da rede elétrica no posto de integração, mesmo com a utilização de PCB dedicada, conta com conectores com dispositivos Poka-Yoke. O perfil geométrico assimétrico desses encaixes reduz significativamente a possibilidade de inversão de polaridade, protegendo o processo contra erros de montagem.

Complementarmente, a célula de produção utiliza o princípio do Jidoka (automação com toque humano). Entre a etapa de conexão elétrica e a expedição, o produto é submetido a testes padronizados. Esses gabaritos de ensaio permitem verificar, de forma imediata, a comunicação da PCB e a responsividade de cada botão tátil fixado na superfície de ACM. A identificação imediata de possíveis falhas evita que equipamentos com anomalias avancem para a etapa de embalagem, contribuindo para a qualidade na fonte e aumentando a segurança de que apenas dispositivos em pleno funcionamento sejam encaminhados à entidade assistencial ou ao usuário final.

4.4 Análise Quantitativa: Tempos de Processo e Custos envolvidos

A validação das alterações de engenharia (DFM/DFA) e do arranjo celular requer a mensuração do impacto dessas melhorias sobre o tempo e o custo final do produto. Para evidenciar a viabilidade técnica e a possibilidade de sustentabilidade financeira da nova rota

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

operacional, foi realizado um estudo comparativo entre o modelo artesanal e o modelo industrial projetado.

Imagem 2 - Estudo Comparativo de Tempos de Montagem (Artesanal vs. Industrial)

Etapas do Processo Produtivo	Modelo Artesanal (Prototipagem)	Modelo Industrial (Célula e PCB)
1. Montagem Estrutural	Corte e adaptação manual de base genérica: **120 min**	Fixação de perfis de *metalon* e painel de ACM pré-cortado: **35 min**
2. Topografia e Customização	Posicionamento e colagem manual sem gabaritos: **55 min**	Colagem de peças 3D utilizando gabaritos de alinhamento: **20 min**
3. Integração Eletroeletrônica	Soldagem ponto a ponto e roteamento de fios soltos: **180 min**	Encaixe da PCB customizada e conexão de chicotes: **15 min**
4. Testes e Inspeção de Qualidade	Teste manual com multímetro e *upload* de código unitário: **45 min**	Acoplamento rápido no *Jig* de teste automatizado: **10 min**
Tempo Total de Ciclo	400 minutos (6h 40m)	80 minutos (1h 20m)

Fonte: elaborada pelos Autores (2026).

Os dados referentes ao modelo artesanal foram obtidos empiricamente durante a construção da Prova de Conceito na Fatec Jahu. Em contrapartida, os tempos e os custos do modelo industrial foram estimados considerando a produção em lote, com escala de 50 a 100 unidades, a substituição da fiação por PCB customizada, a aquisição de metalon e ACM pré-cortados em escala industrial, e a eliminação de soldagens manuais.

A construção da Prova de Conceito artesanal apresentou um custo direto de fabricação de aproximadamente R$ 1.200,00 por unidade. Esse valor foi influenciado principalmente pela aquisição de componentes eletrônicos no varejo, pelo uso de insumos de impressão 3D em pequena escala e, principalmente, pelo custo da Mão de Obra Direta.

Entretanto, do ponto de vista da Gestão da Produção Industrial, a nova rota operacional estabelece as bases para uma redução significativa dos custos de fabricação. A redução do tempo de montagem de 400 para 80 minutos reduz diretamente o custo de Mão de Obra Direta por equipamento, enquanto a padronização dos insumos permite que o projeto aproveite os benefícios da economia de escala.

Tabela 1 – Resumo das otimizações realizada no projeto (diferenças entre o processo artesal para o processo industrial).

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

FABRICAÇÃO TRADICIONAL	OTIMIZAÇÕES APLICADAS NO PROCESSO EXECUTADO
ESTRUTURA MECÂNICA: CORTE E ADAPTAÇÃO MANUAL DE BASE GENÉRICA (*METALON*) SEM PADRONIZAÇÃO DIMENSIONAL.	PADRONIZAÇÃO DO CHASSI: UTILIZAÇÃO DE PERFIS DE *METALON* E PAINEL DE ACM PRÉ-CORTADOS COM MONTAGEM POR ENCAIXE.
INTEGRAÇÃO ELETRÔNICA: SOLDA MANUAL PONTO A PONTO NO MICROCONTROLADOR ESP32 COM CABOS E FIOS SOLTOS.	PCB CUSTOMIZADA E *POKA-YOKE*: SUBSTITUIÇÃO DO CABEAMENTO SOLTO POR PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DEDICADA E CONECTORES POLARIZADOS DE ENCAIXE ÚNICO.
FIXAÇÃO 3D: POSICIONAMENTO E COLAGEM MANUAL DAS PEÇAS IMPRESSAS EM 3D SEM GUIAS DE PRECISÃO.	GABARITOS DE ALINHAMENTO: APLICAÇÃO DE GABARITOS FÍSICOS DE FIXAÇÃO PARA RÁPIDO POSICIONAMENTO E COLAGEM DO RELEVO TOPOGRÁFICO.
INSPEÇÃO E TESTES: VERIFICAÇÃO MANUAL PONTO A PONTO DAS LIGAÇÕES ELÉTRICAS COM MULTÍMETRO NA BANCADA.	TESTE AUTOMATIZADO (*JIDOKA*): ACOPLAMENTO A UM *JIG* DE TESTE AUTOMATIZADO PARA VALIDAÇÃO IMEDIATA DOS CIRCUITOS E FIRMWARE.
ARRANJO FÍSICO E FLUXO: PRODUÇÃO POR PROJETO EM BANCADA DE POSIÇÃO FIXA, COM TRANSPORTE E MOVIMENTAÇÃO EXCESSIVA DE MATERIAIS.	CÉLULA DE MANUFATURA: REORGANIZAÇÃO DO FLUXO PRODUTIVO EM CÉLULA ENXUTA, PROMOVENDO O FLUXO CONTÍNUO E A ERGONOMIA DO OPERADOR.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Portanto, embora o preço final dependa das negociações com os fornecedores, a transição do modelo artesanal de R$ 1.200,00 por unidade para o arranjo celular industrializado reduz os principais gargalos produtivos que foram identificados, tornando o dispositivo assistivo potencialmente mais viável e acessível para entidades como o CISC.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação partiu de um problema real identificado durante o desenvolvimento da Prova de Conceito (PoC), idealizada para atender às demandas do Centro de Inclusão e Convivência (CISC). A fabricação inicial, caracterizada pela produção por projeto (artesanal), evidenciou que a dependência de processos manuais, a soldagem ponto a ponto de microcontroladores comerciais (ESP32) e a ausência de padronização contribuíram para um custo elevado, de aproximadamente R$ 1.200,00 por unidade, e um Tempo de Ciclo proibitivo de 6 horas e 40 minutos (400 minutos). O detalhamento dos custos envolvidos foi levantado considerando preços de todos os insumos e acessórios, materiais e horas de processos em máquinas. Seu detalhamento foi considerado dispensável uma vez que a proposta não trata de economia financeira.

A aplicação sistemática das ferramentas de Engenharia de Produção permitiu reestruturar o produto e o processo sob a ótica da manufatura enxuta (Lean Manufacturing):

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

1. **Reengenharia do Produto (DFM/DFA):** A substituição do microcontrolador comercial por uma Placa de Circuito Impresso customizada e o redesenho do chassi, utilizando perfis de metalon e painel de Alumínio Composto (ACM), reduziram a complexidade de fiação solta. A adoção de montagem e sistemas de encaixe rápido reduziram drasticamente as necessidades de ferramentas e soldagem na bancada.
2. **Otimização do Arranjo Físico:** A reorganização dos postos de trabalho aproximou as estações, reduzindo as movimentações do operador e favorecendo o fluxo contínuo de produção.
3. **Qualidade na Origem:** A incorporação de conectores *Poka-Yoke* permite uma expectativa de reduzir os riscos de inversão de polaridade na montagem elétrica, enquanto a implementação de *Jigs* de teste automatizados asseguraram o princípio do *Jidoka*, evitando que peças com falhas identificadas avancem para as etapas seguintes do processo.

Os resultados quantitativos estimados com a proposta permitem supor que a nova rota operacional reduziria o Tempo de Ciclo para 1 hora e 20 minutos (80 minutos) um ganho de produtividade de **80%**. Essa drástica otimização do tempo de Mão de Obra Direta, aliada ao potencial de compra de insumos em escala, estabelece a base para baratear substancialmente o custo unitário do equipamento, superando a barreira financeira que inviabiliza o acesso de entidades assistenciais a tecnologias de acessibilidade.

Sob o aspecto metodológico, o trabalho retoma os conceitos de Lakatos e Marconi (2003), ao demonstrar como a pesquisa aplicada pode contribuir diretamente para a resolução de problemas práticos da sociedade. O projeto não se limitou ao campo teórico da gestão, mas também resultou em um modelo fabril replicável, ergonomicamente adequado e tecnicamente viável.

5.1 Limitações do Estudo e Sugestões para Trabalhos Futuros

Apesar dos resultados obtidos, este estudo apresenta como limitação o fato de os dados do modelo industrial serem baseados em estimativas e projeções realizadas em bancada, uma vez que a linha seriada não foi instalada em um ambiente fabril definitivo devido às limitações de escala e de escopo acadêmico. Além disso, o preço final do produto pode variar de acordo com as condições de mercado das matérias-primas e com as condições comerciais para a compra de PCBs em lote junto aos fornecedores.

Para dar continuidade e aprofundar esta linha de pesquisa, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

- **Execução de Lote Piloto:** Implementar a célula de produção em um ambiente industrial real, realizando uma cronoanálise com múltiplos operadores para validar o tempo de ciclo projetado em diferentes condições de demanda;
- **Análise Ergonômica Formal:** Aplicar metodologias de avaliação postural nos postos de trabalho da célula, a fim de verificar sua adequação aos requisitos da NR-17;
- **Integração IoT e Atualização Remota:** Ampliar a arquitetura da PCB customizada para permitir a atualização sem fio (Over-The-Air – OTA) dos áudios do mapa tátil, possibilitando a reconfiguração do dispositivo caso a arquitetura do local mapeado seja alterada.

REFERÊNCIAS

BOOTHROYD, Geoffrey; DEWHURST, Peter; KNIGHT, Winston A**. Product Design for Manufacture and Assembly.** 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

BRASIL. Decreto nº 10.645, de 11 de março de 2021. **Regulamenta o Plano Nacional de Tecnologia Assistiva**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ed. 48, p. 7, 12 mar. 2021.

CHIAVENATO, Idalberto. **Iniciação à Administração da Produção**. 3. ed. São Paulo: Manole, 2010.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing**. 2. ed. New York: Springer, 2015.

GROOVER, Mikell P. **Automação industrial e sistemas de manufatura**. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua: Pessoas com Deficiência** 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

OHNO, Taiichi**. O Sistema Toyota de Produção: além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Bookman, 1997.

SHINGO, Shigeo. **O Sistema Toyota de Produção: do ponto de vista da engenharia de produção.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 1996.

TOMPKINS, James A. et al. **Facilities Planning**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

WILLIAMS, Theodore Joseph. A reference model for computer integrated manufacturing (CIM): a description from the viewpoint of industrial automation. **Research Triangle Park**: Instrument Society of America, 1989.

Fatecnológica
Jahu
ISSN 1980-8526 (print)
ISSN 2763-5600 (online)

ZANZOTI, Fernando Henrique Oliveira. Desenvolvimento do protótipo de hardware de um micro PLC. 2019. 68 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.