

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ESTUFA AGRÍCOLA ROBOTIZADA COM TECNOLOGIA DE CONTROLE NUMÉRICO

Lucas Bernardon Machado, lucas.bernardon@posgrad.ufsc.br¹
Ruben Solarte Bolaños, ruben.solarte@posgrad.ufsc.br¹
Pedro dos Santos Guerreiro, pguerreiro04@gmail.com¹
João Gabriel Dias Camilo, jgdiascamilo13@gmail.com¹
Tarik El Hayek Rocha Pitta de Araujo, tarik.pitta@grad.ufsc.br¹
Antonio Carlos Valdiero, antonio.valdiero@ufsc.br¹
Henrique Simas, henrique.simas@ufsc.br¹
Daniel Martins, daniel.martins@ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário Reitor João David Lima, Florianópolis – SC, Trindade, Caixa Postal 476, CEP 88040-900

Resumo: Com a recente adesão e avanços de novas técnicas na agricultura, a robótica assumiu um papel de grande importância quando se trata do processo de automatização de estufas agrícolas, visando o aumento da eficiência e produtividade nas mais diversas atividades e culturas. O trabalho em questão tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um protótipo em escala reduzida de uma estufa robotizada, propondo um modelo de baixo custo que concilie as operações realizadas dentro do cultivo protegido, abordando todas as etapas de produção desde o preparo, o manejo, o plantio e semeadura, a irrigação, a inspeção e controle, até a colheita. Pesquisas recentes nas áreas da robótica possibilitam a utilização de robôs móveis e autônomos em tarefas diversas, fato que resulta na redução do desgaste físico e da carga de trabalho do agricultor, motivando e evidenciando diversas oportunidades para o desenvolvimento de sistemas automatizados robóticos para as mais variadas atividades agrícolas. Neste trabalho, é proposto um robô cartesiano do tipo Gantry autoalinhante para efetuar as operações essenciais, sendo que este se deslocará por juntas lineares suspensas nas bancadas de cultivo agrícola. O robô é composto por três juntas prismáticas, resultando em um movimento de três translações espaciais nos eixos de coordenadas cartesianas. O robô Gantry possui como atuador final uma ferramenta multifuncional, capaz de realizar atividades de irrigação, aplicação localizada de pesticidas e insumos e até mesmo remoção de ervas daninhas. Contudo, o emprego da robótica agrícola se faz necessária, uma vez que oportuniza uma cadeia de benefícios para os produtores, operando de forma mais eficaz e segura, sendo que essas atividades se tornam perigosas e exaustivas ao manejo humano. Por fim, com a modelagem do protótipo, pode-se estabelecer novas frentes de pesquisas na busca de soluções para a automatização em estufas agrícolas, visando um aumento no controle de requisitos de produtividade em um espaço de trabalho controlado e limitado.

Palavras-chave: agricultura de precisão, auto-alinhamento, estufas agrícolas, robótica agrícola, robô cartesiano.

1. INTRODUÇÃO

É indiscutível o fato de que a população mundial tem alcançado números expressivos quando se trata de crescimento numa escala de bilhões de habitantes. Cálculos e pressupostos indicam que a população mundial totalizara até o ano de 2050, mais de 9 bilhões de habitantes (FAO, 2011). A constante expansão demográfica altera e intensifica a produção e demanda de alimentos, e atrelado a isso, um significativo aumento na produtividade e eficiência agrícola, para sanar as diretrizes e necessidades do aumento populacional citado.

De acordo com Hackenhaar (2015), uma das principais formas de estimular a produção de alimentos é aplicação da robótica. Dessa forma, inúmeras frentes de pesquisa exploraram um possível auxílio nas atividades em ambientes protegido (estufas agrícolas), com tentativas de melhorias nos processos de plantio, colheita, controle de parâmetros e aplicação localizada de insumos e fertilizantes, caracterizando assim, a agricultura de precisão. Inúmeros avanços envolvendo a robótica agrícola, foram realizados em tal setor, sendo que a velocidade de manipulação nas operações agrícolas de robôs ultrapassou as habilidades humanas, uma vez que é realizada de forma precisa, sem interrupções e com um mapeamento de manutenção programado (Tanke, 2011).

Todos esses avanços e tecnologias auxiliam no aumento dos índices de produtividade e eficiência tanto na produção, quanto no uso de insumos, além de uma significativa redução nos custos com mão-de-obra e uma melhoria na qualidade de trabalho e segurança dos operadores, reduzindo substancialmente, os impactos ambientais (Santos, 2019).

A maioria das estatísticas apontam que as mudanças climáticas reduzirão a produtividade agrícola, a estabilidade da produção e a renda em algumas áreas que já apresentam altos níveis de insegurança e instabilidade alimentar (FAO, 2021).

A agricultura mundial tem o revés de garantir a segurança do fornecimento e abastecimentos de alimentos saudáveis, fibras e energia de forma sustentável (energia limpa). Automação e robótica estão sendo utilizadas para atender e suprir as necessidades da demanda nos mais variados setores da economia, principalmente em sistemas de cultivo protegido, as conhecidas estufas agrícolas.

De acordo com Valdiero (2015), tem-se uma carência e ausência de sistemas de baixo custo robotizado destinados para a agricultura familiar. Sendo assim, torna-se cada vez mais distante um aumento de produtividade aliado com uma redução de custos, que garanta, a manutenção de recursos naturais e o resguardo da saúde humana.

Conforme Russel e Norving (2004), dá-se o nome de robô para os agentes capazes de realizar tarefas que alteram o espaço físico com a utilização de atuadores, sendo esses, equipados com sensores que permitem um mapeamento do ambiente. A robótica móvel carece de um amplo campo de conhecimento para chegar a um nível adequado de eficiência e perfeição, tornando essa área multidisciplinar. Para a solução de inúmeros problemas que envolvem deslocamento, deve-se aplicar o conhecimento de cinemática, dinâmica e o controle de um sistema que efetue o sensoriamento de forma robusta, introduzindo sistemas de visão computacional e uso de inteligência artificial, desempenhando assim as atividades de localização e mapeamento (Siegwart e Nourbakhsh, 2004). Nesse sentido, a utilização da robótica na agricultura apresenta um grande potencial como uma ferramenta para o desenvolvimento da agricultura de precisão, ocasionando a vantagem do uso de diversas teorias de controle robótico já fundamentadas e consolidadas (Grift et al., 2008).

Este trabalho visa o desenvolvimento de um modelo reduzido que sirva como referência e auxilie na prova de conceito para novos projetos envolvendo melhorias que compõem as estufas agrícolas robotizadas e automatizadas (estufas inteligentes). O objetivo principal é demonstrar um protótipo em escala reduzida de uma estufa, utilizando-se de um mecanismo *Gantry* autoalinhado de baixo custo com a tecnologia de controle numérico para uma futura automação. Por fim, pretende-se contribuir para novas linhas de pesquisa que englobem tanto a robótica agrícola quanto um projeto acessível aos mais diversos consumidores, oferecendo uma operação segura e uma redução dos riscos à saúde dentro do cultivo protegido.

Este artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta uma contextualização da agricultura e sobre as estufas agrícolas e seus principais requisitos de projeto para a modelagem em escala. A seção 3 descreve os resultados da pesquisa, levando em consideração um mecanismo cartesiano do tipo *Gantry*, técnicas de autoalinhamento e prototipagem para o desenvolvimento do mecanismo robotizado. A seção 4 traz as principais conclusões sobre o trabalho, seguida dos agradecimentos aos apoiadores da pesquisa e finalizando com as referências bibliográficas utilizadas na estruturação do artigo apresentado.

2. AGRICULTURA COM CULTIVO PROTEGIDO

Com o passar dos anos, o Brasil assumiu a condição de grande fornecedor de alimentos para todo o mundo, alcançando aumentos expressivos na produtividade agrícola, modernizando os processos, porém ainda existem muitos desafios. Os avanços tecnológicos foram responsáveis por mais de 58% do aumento do valor bruto da produção entre os anos de 1975 e 2015 (EMBRAPA, 2019).

Segundo o IBGE (2019), a área de plantio ocupada pela atividade agrícola totalizou mais de 81 milhões de hectares, representando um aumento de 3%. A trajetória da agricultura brasileira é resultado de uma combinação de diversos fatores. O cenário brasileiro é propício para um crescimento acelerado, com extensas áreas disponíveis para plantio (EMBRAPA, 2019).

2.1. Agricultura Familiar e Agricultura de Precisão

A agricultura familiar pode ser definida como toda forma de cultivo administrada por uma família, na qual a mão de obra é executada pelos próprios membros, onde a produção de alimentos ocorre em pequenas propriedades de terra e se destina à subsistência do agricultor e ao mercado interno do país. Conforme IBGE (2017), esse modelo se diferencia das demais produções de grande escala do agronegócio, justamente por produzirem apenas um único gênero alimentar, como por exemplo, morangos no cultivo protegido (estufas agrícolas).

No Brasil, a agricultura familiar é responsável por grande parte da produção nacional de alimentos. Em conformidade com o censo agropecuário de 2017, mais de 77% dos agricultores são caracterizados como sendo de agricultura familiar. Tal censo mostra também, que a agricultura familiar é responsável por empregar mais de 10 milhões de pessoas (IBGE, 2017).

De acordo com Valdeiro (2015), a agricultura de precisão pode ser definida com uma das maneiras de gerenciamento agrícola das etapas de produção de diversas culturas, que possibilita a aplicação e a integração modular de tecnologias inovadoras para o tratamento das culturas, desde que se tenha o conhecimento da variabilidade espacial dos fatores determinantes de produtividade.

Conforme a Sociedade Internacional da Agricultura de Precisão (ISPA), pode-se definir tal conceito como “uma estratégia de gestão que coleta, processa e analisa dados temporais, espaciais e individuais e os combina com outras informações para apoiar decisões de gerenciamento de acordo com a variabilidade estimada para melhorar a eficiência no uso de recursos, produtividade, qualidade, rentabilidade e sustentabilidade da produção agropecuária” (Stafford e Lowenberg, 2020).

2.2. Cultivo Protegido

Para Tangerino et al. (2011), o cultivo protegido consiste em uma técnica que proporciona um certo controle de variáveis climáticas como: temperatura, radiação solar, umidade do ar e vento. Esse controle se transforma em ganho na eficiência produtiva reduzindo o efeito da sazonalidade, favorecendo a oferta mais equilibrada no decorrer dos meses.

Esse benefício é mais evidente em regiões de clima frio, sendo que o calor acumulado dentro das estufas possibilita a produção de certas culturas fora de época, encurtando assim o ciclo de produção.

Altas temperaturas, excesso de chuvas ou secas, geadas e granizos, são variabilidades que causam preocupações constantes dos produtores. As intempéries climáticas afetam tanto a qualidade do produto quanto o rendimento da produção, sendo capaz de diminuir radicalmente a rentabilidade do negócio. Assim, uma das maneiras a ser considerada para diminuir tais fatores negativos à produção é o cultivo em ambiente protegido (Hackenhar, 2015).

Ainda para Hackenhar (2015), outro fator de extrema relevância é que o controle de pragas e doenças reduz drasticamente com a utilização do cultivo protegido. Isso fica claro especialmente na produção de mudas.

As plantas concebidas em estufas, por exemplo, têm menor incidência de agentes danificadores, o que torna o produto “mais limpo” ao ser plantado comercialmente em campo aberto ou fechado.

O cultivo protegido mais conhecido é aquele realizado em estufas agrícolas, conforme mostra a Figura 1:



Figura 1. Estufas agrícolas hidropônicas.

As estimativas apontavam, em 1990, uma área total que ultrapassava os 716 mil hectares com estufas, porém no ano de 2010, esse número havia superado mais de 3 milhões de hectares, representando assim um aumento de 400% de crescimento (Silva, 2014). Em resumo, as principais vantagens de utilizar o cultivo protegido são: aumento da produtividade, controle do ambiente (que permite a produção de inúmeras culturas, em diferentes regiões e épocas do ano), atenuação do ciclo de vida da planta, diminuição no consumo de água (uma vez que o sistema fechado reduz a evapotranspiração das plantas), proteção contra chuva e granizo, contra geadas e pragas, controle da incidência do vento e radiação solar (luminosidade), controle de temperatura e umidade do ar e uma significativa redução de insumos e agrotóxicos, uma vez que se pode realizar uma aplicação localizada e controlada.

Por outro lado, as desvantagens estão relacionadas com o alto custo de implantação, dificuldade na rotatividade de áreas por conta da estrutura (prática usual que ameniza a ocorrência de doenças no solo). Além disso, o plástico da cobertura tem uma durabilidade média de 3 anos, e após o seu uso, precisa ter um destino adequado para não contaminar o meio ambiente e recursos naturais e por fim, falta de mão de obra adequada e qualificada para realização das operações dentro das estufas.

2.3. Estufas Agrícolas e seus Aspectos Construtivos

As estufas agrícolas são estruturas construídas para proteger as culturas de plantio de qualquer variação climática expressivas (chuvas, ventos, temperatura, luminosidade) além de doenças, pragas e de animais invasores, permitindo ao produtor rural uma produção mais segura e eficiente.

De acordo com Souza (2014), as estufas agrícolas são “estruturas onde inúmeras culturas de produção são cultivadas em um ambiente confinado e protegido das intempéries, cujo o principal objetivo é oferecer e proporcionar as plantas e frutos, as condições mais próximas o possível das ideais para o seu desenvolvimento”.

Para Reis (2005) a escolha de um determinado modelo de estufa é função de uma série de parâmetros e aspectos técnicos, como por exemplo: exigências agroclimáticas da espécie de planta a ser cultivada, das características da área a ser implementada, da disponibilidade de mão-de-obra e de mercado.

As estufas podem ser classificadas e ordenadas de acordo com o controle de parâmetros meteorológicos, sendo estas divididas em climatizadas, semi-climatizadas e não-climatizadas.

Existem inúmeros modelos de estufas agrícolas utilizadas em todo o mundo. Todas diferem entre si em algum aspecto construtivo, seja no valor, tamanho, variação da incidência de raio solar entre outros. Portanto, tem-se diversos fatores para a escolha da estufa e isso depende principalmente do cultivo desejado (Reis, 2005). As diferenças entre cada modelo estão basicamente relacionadas à estrutura dos arcos de sustentação e suas diversas formas.

Portanto, após uma análise de mercado constatou-se que o modelo de estufas mais comumente utilizado e vendido comercialmente é descrito pela figura a seguir:

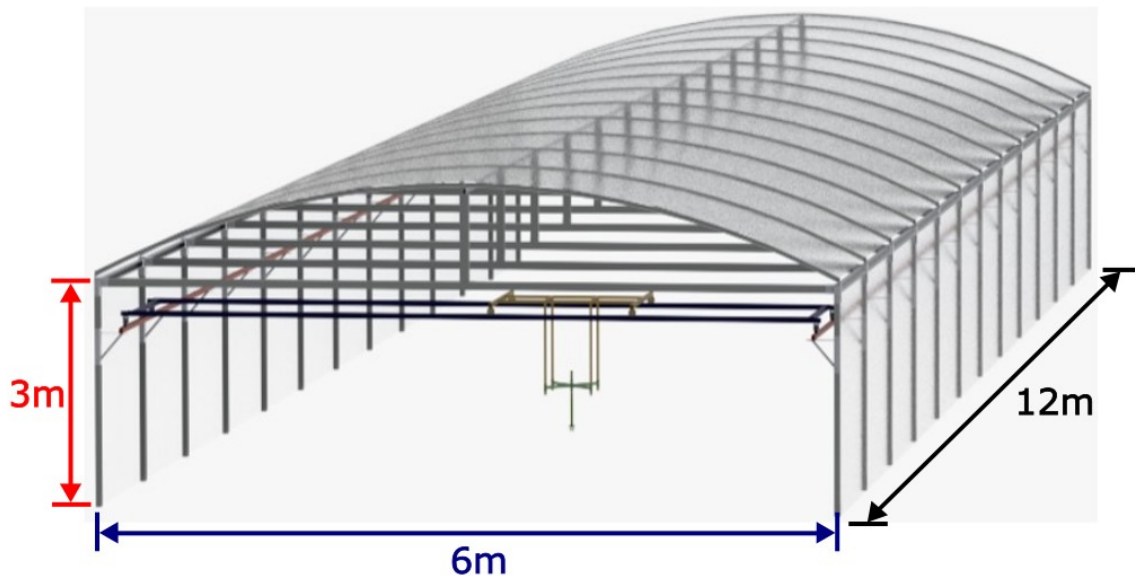


Figura 2. Principais dimensões da estufa agrícola.

De maneira análoga, se faz necessário definir as dimensões das bancadas de cultivo, para assim, estabelecer o espaço de trabalho do robô *Gantry* autoalinhante e consequentemente as dimensões em escala para o protótipo.

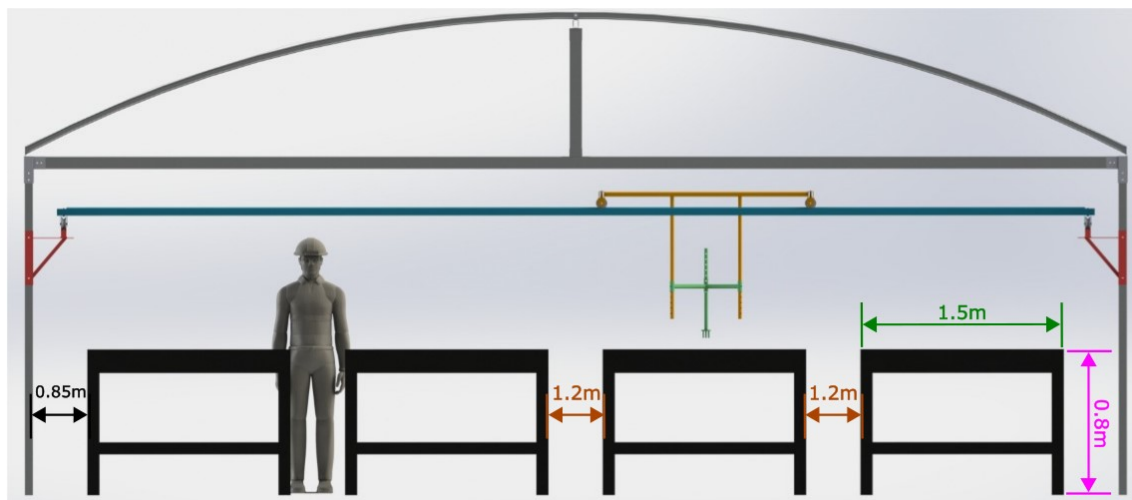


Figura 3. Principais dimensões das bancadas agrícolas.

Em resumo a estufa agrícola analisada possui as seguintes dimensões: 3 metros de altura, 6 metros de largura e 12 metros de comprimento. As bancadas agrícolas escolhidas são as frequentemente utilizadas para o cultivo em estufas agrícolas para os mais diversos frutos, vegetais e hortaliças, e suas medidas são: 0.8 metros de altura, 1.5 metros de largura e um espaçamento entre elas de 1.2 metros.

Consequentemente, com as dimensões definidas (largura, altura, comprimento e espaçamento), tanto da estufa quanto das bancadas para plantio, é factível a prototipagem em um modelo reduzido do sistema mecânico como um todo, discutido na seção a seguir, a partir do modelo real da estrutura para o cultivo protegido.

3. RESULTADOS

Nesta seção será apresentado os resultados do desenvolvimento do modelo em escala reduzida de um manipulador robótico, onde utilizou-se de uma estrutura cartesiana do tipo *Gantry* e um mecanismo de autoalinhamento, tendo como

base para a análise, um levantamento do estado da arte para estufas automatizadas (Machado et al., 2021a; Machado et al., 2021b; Machado et al., 2021c).

3.1. Estrutura Robótica Cartesiana do Tipo *Gantry*

Foram desenvolvidos inúmeros projetos referentes a utilização de robôs dentro das estufas agrícolas, como por exemplo os citados anteriormente para a colheita. Atualmente, sistemas automatizados destinados para irrigação, manipulação e aplicação controlada de insumos estão sendo pesquisados. Muitos modelos robóticos foram desenvolvidos para atuarem no cultivo protegido, porém não utilizam da própria estrutura da estufa para seu acoplamento. Sendo assim, se faz necessário um sistema de sustentação externo ao da estufa, fato que torna o custo do projeto extremamente elevado, não sendo acessível aos produtores que compõem o grupo de agricultores familiares.

Pode-se citar o robô destinado para irrigação desenvolvido por Batista et al. (2017) denominado de RIRRIG, o robô manipulador de Tanke (2011) com a função de manipular mudas e hortalças nas bancadas agrícolas e por fim, o sistema mecânico atuado pneumaticamente (Farmbot, 2018) conhecido como Farmbot, que realiza diversas atividades nas bancadas de cultivo, justamente por contar com bicos multifuncionais (bico aspersor, garra para capina, sensor de qualidade e umidade do solo e ferramenta para revolução do solo).

Conforme Romano (2002), os robôs podem ser classificados quanto à sua estrutura mecânica, levando em consideração diversas combinações de seus elementos (elos – elementos rígidos e juntas – articulações) para se obter a configuração desejada. Para Sciavicco e Siciliano (1996), uma das configurações básicas de um robô é denominada de “robô de coordenadas cartesianas ou robô *Gantry*”. Desse modo, o sistema possui três juntas prismáticas (PPP) o que resulta em um movimento composto apenas de translações em relação aos eixos de coordenadas cartesianas, cuja principal vantagem é a capacidade de precisão da posição do efetuador final, conforme a Figura 1.

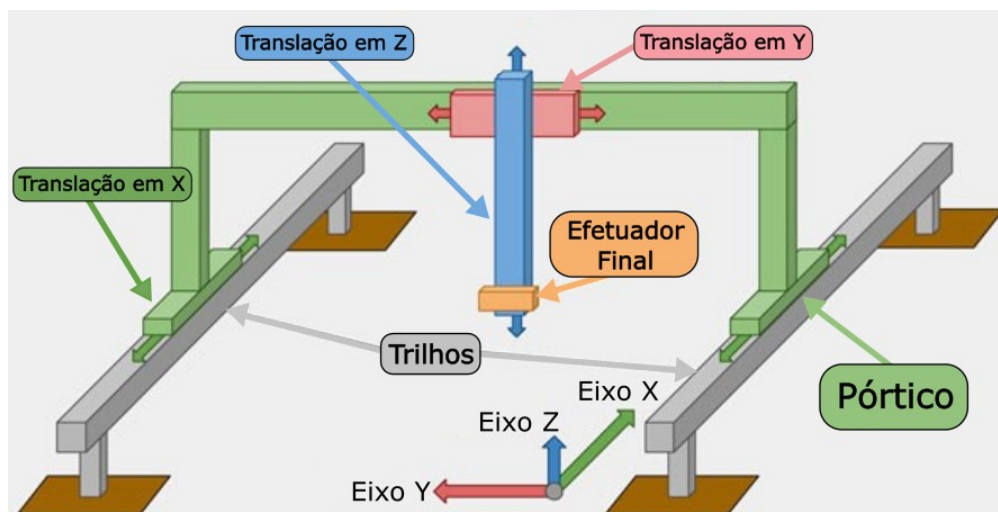


Figura 4. Robô do tipo *Gantry* de coordenadas cartesianas (adaptado de Venturus, 2021).

Portanto, uma automação de baixo custo pode auxiliar e contribuir para o aumento do potencial de tecnologias com aplicação destinada para a agricultura de precisão, a partir de uma metodologia integrada no projeto de pesquisa e desenvolvimento de sistemas robóticos agrícolas voltadas à agricultura familiar (Porsch et al., 2016). Como as estruturas de estufas agrícolas podem ter comprimentos longos (em torno de 30 metros), isto pode acarretar problemas de alinhamento, os quais serão tratados na seção seguinte.

3.2. Mecanismo Autoalinhante

De acordo com a Federação Internacional para a Promoção do Mecanismo e da Ciência da Máquina (IFTToMM), um mecanismo é definido como um “sistema de corpos projetado para transformar movimentos em forças para um ou mais corpos a serem movidos” (Ionescu, 2003). A cinemática pode ser definida como o ramo da dinâmica que lida com o movimento por conta própria, isolada das forças associadas ao movimento (Hunt, 1978; Tsai, 2000).

Devido a erros de fabricação e montagem, os trilhos muitas vezes não proporcionam um deslocamento linear (regular) ao mecanismo, causando problemas de desalinhamento que causam travamento nas roldanas, afetando todo o funcionamento do robô (Machado et al., 2021a).

Assim, uma análise baseada no método proposto por Reshetov, cujo objetivo é eliminar as restrições redundantes aumentando os GDL (Graus de Liberdade) do robô cartesiano, melhorando assim seu funcionamento, justamente por extinguir restrições excessivas de movimento (Reshetov, 1979). Todo o desenvolvimento do passo a passo utilizando os

métodos de análise de mecanismos para o sistema autoalinhante descrito na Fig.5, está detalhado no artigo de Machado et al. (2021a).

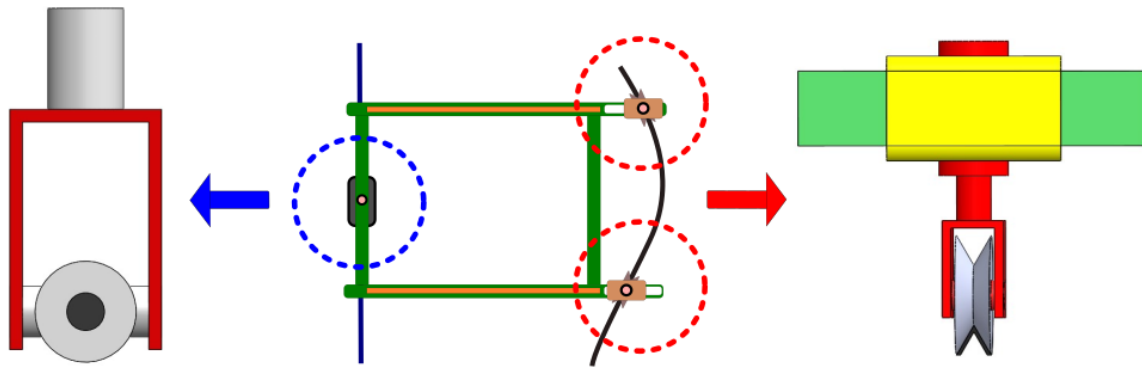


Figura 5. Modelagem 2D do mecanismo autoalinhante.

O mecanismo em questão é composto por duas roldanas em contato com o trilho (em vermelho) e uma bucha deslizante em contato com o eixo (em azul). Dessa forma, o sistema apresenta mobilidades suficientes para um funcionamento adequado, uma vez que se move por guias (trilhos) irregulares que não proporcionam um paralelismo adequado justamente pelo fato de possuírem dimensões expressivas, podendo ultrapassar 30 metros de comprimento (Machado et al., 2021a; Machado et al., 2021b).

A partir da modelagem 2D citada anteriormente, foi possível definir uma modelagem real do mecanismo autoalinhante. Tal sistema será acoplado no protótipo em escala da estufa, por esse motivo se fez necessário uma análise dos seus movimentos para se ter um funcionamento adequado da prototipagem.

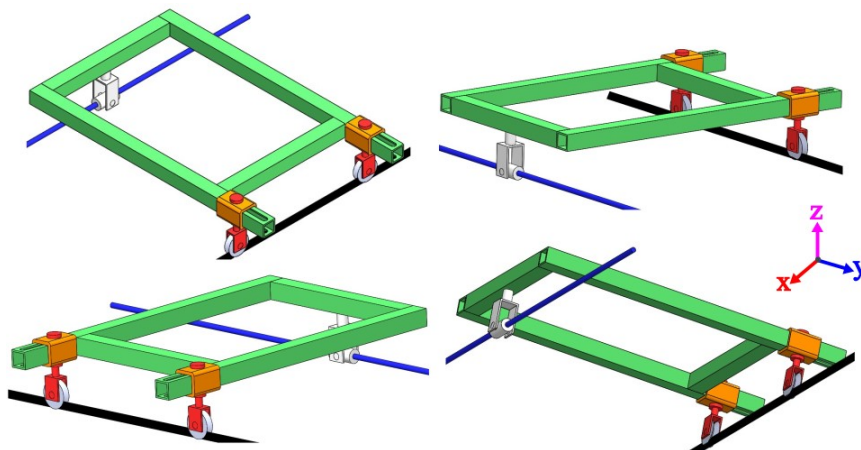


Figura 5. Modelagem 3D do mecanismo autoalinhante.

Com base na modelagem geométrica, pode-se determinar os parâmetros dimensionais para o protótipo e estudar as faixas de incertezas. Na seção seguinte são apresentados os requisitos para o desenvolvimento do protótipo em escala e suas principais características.

3.3. Descrição do Protótipo em Desenvolvimento

O recurso à prototipagem pode ser tanto real como virtual (*CAD e outros softwares*), podendo ser realizada de forma manual ou passando até pela prototipagem rápida, compondo assim, as etapas de desenvolvimento de um determinado produto. Os protótipos são fundamentalmente utilizados nas fases de aprovação da modelagem e do design trabalhado, originando-se do projeto conceitual. Estudos apontam que cerca de 70% relacionado aos custos envolvidos no ciclo de vida de um produto estão ligados diretamente a tomadas de decisões da equipe envolvida com o desenvolvimento na fase de elaboração do design conceitual (Palhais, 2015).

De acordo com Penna (2022), os protótipos desenvolvidos e analisados em escala reduzida são representações tridimensionais de produtos ou objetos em fase de desenvolvimento ou semiacabados, permitindo simular propriedades e requisitos de projeto e operação além de futuras mudanças e correções de possíveis defeitos do produto durante seu funcionamento.

Os modelos preliminares são pré-modelados para uma análise volumétrica. Portanto, não se leva em consideração os detalhes construtivos das peças. Normalmente são usados como estudos preliminares e construídos com material de baixo custo e de fácil acesso, permitindo rápidas alterações quando necessário (Ashby e Johnson, 2011).

Portanto, os modelos em escala reduzida ou maquete, são aqueles confeccionados com dimensões reduzidas do protótipo real (Ferroli e Librelotto, 2012). Dessa forma, realizou-se a modelagem 3D do protótipo em escala reduzida 1:10 (1/10), ou seja, cada 1 parte do protótipo corresponde a 10 partes do projeto original. Todavia, as dimensões dos projetos analisados são relacionadas a seguir, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Dimensões da estufa e das bancadas em escala reduzida.

Estufa Agrícola			
Escala:	Largura (m):	Altura (m):	Comprimento (m):
Escala Original	6	3	12
Escala Reduzida (1:10)	0.6	0.3	1.2
Bancadas Agrícolas			
Escala:	Largura (m):	Altura (m):	Espaçamento (m):
Escala Original	1.5	0.8	1.2
Escala Reduzida (1:10)	0.15	0.08	0.12

De acordo com Blackmore et al. (2007), é possível desenvolver um fluxograma modular com as principais necessidade de projeto para um protótipo em escala reduzida. Contudo, realizou-se a análise dos principais requisitos do protótipo, relacionados na Fig. 6.

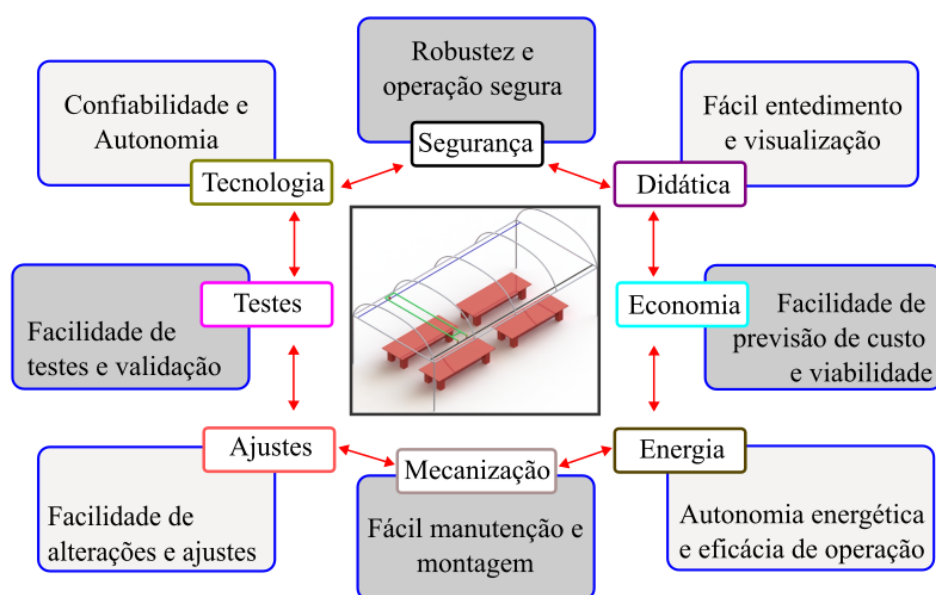


Figura 6. Mapa sistêmico da construção de um protótipo em escala reduzida.

Assim, uma análise das necessidades e requisitos para a construção do protótipo vincula a construção de um sistema que supra as necessidades do aumento de produtividade, da eficiência da produção e da qualidade de alimentos, partindo de um estudo em uma estufa confeccionada na escala reduzida, como tratado nas seções seguintes.

A prototipagem é a fase de desenvolvimento das primeiras concepções e testes, que tem como princípio o envolvimento com trabalho manual, prevendo-se mudanças e melhorias durante sua montagem e fases de validação (Palhais, 2005). O protótipo de validação do conceito é um processo evolutivo, gradual e modular, onde o protótipo inicial é desenvolvido, avaliado e aprimorado continuamente até se chegar em uma concepção final.

3.4. Protótipo de Estufa Agrícola Robotizada

A presente seção descreve o desenvolvimento do mecanismo automatizado para o cultivo protegido. Na Tabela 1 forma apresentadas as dimensões do protótipo em escala reduzida da estufa agrícola robotizada com tecnologia de controle numérico (Figura 7). O protótipo pode ser confeccionado com o auxílio de uma impressão em 3D.

Realizou-se a modelagem do mecanismo na estrutura da estufa, de acordo com a Figura 7.

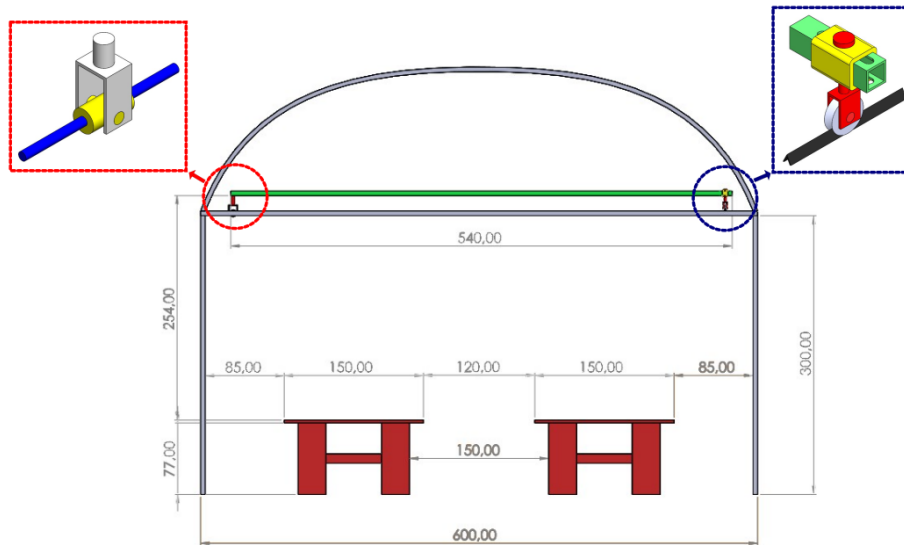


Figura 7. Modelagem 3D do protótipo em escala reduzida da estufa agrícola.

Uma vista isométrica com as cotas do protótipo e do robô *Gantry* é apresentada na Figura 8.

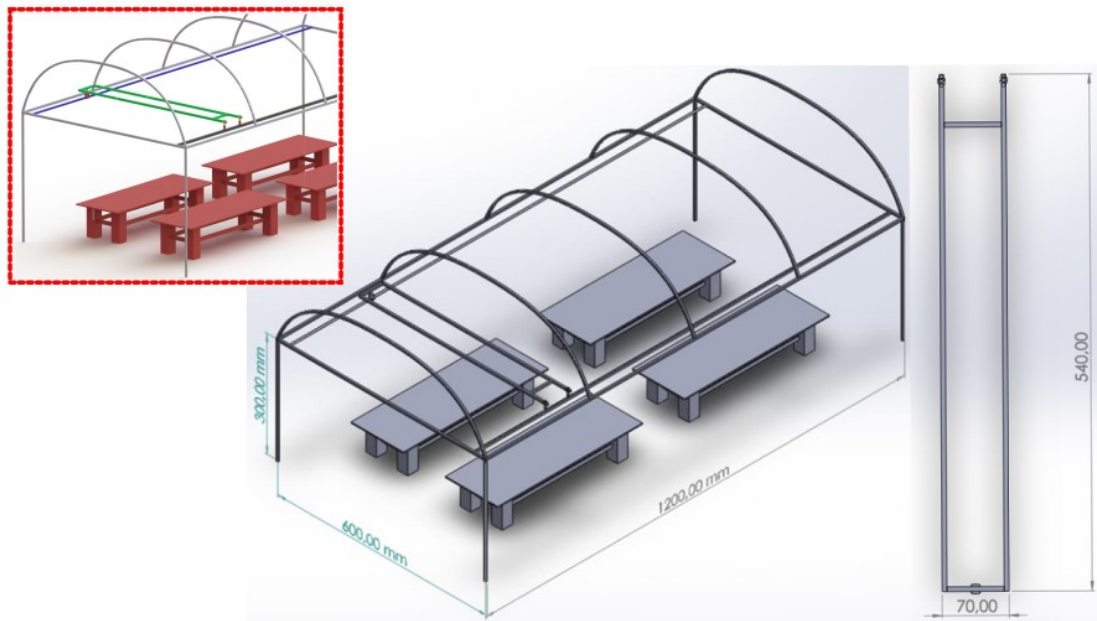


Figura 8. Vista isométrica da estufa agrícola robotizada.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi realizada a pesquisa e o desenvolvimento de um protótipo em escala reduzida de uma estufa agrícola com tecnologia de controle numérico. A utilização de técnicas para o progresso e a evolução do protótipo permitiu chegar em um modelo o mais próximo possível do real, tendo como requisitos as características contrutivas para o funcionamento, possibilitando uma simulação das práticas realizadas dentro do cultivo protegido (plantio e colheita).

Como resultados de destaque, as técnicas de autoalinhamento permitiram a concepção de um sistema robotizado com baixo custo, uso de materiais de fácil disponibilidade (comerciais), com maiores tolerâncias de montagem e fabricação dos componentes do mecanismo, e atendendo o nível de desempenho funcional necessário durante as operações. O sistema *Gantry* permite um maior aproveitamento de espaço de trabalho dentro das estufas, pois opera de maneira suspensa, liberando o espaço entre as fileiras de plantio.

Por fim, a análise do mecanismo de autoalinhamento proporciona uma alternativa de solução para estufas agrícolas robotizadas de baixo custo acessível aos produtores que compõem o grupo da agricultura familiar. Como perspectiva para continuação do trabalho de pesquisa, preve-se a construção do protótipo desenvolvido em escala real para testes em

campo. Outro ponto de extrema valia a ser analisado são estudos de “estufas verticais”, possibilitando novas frentes de pesquisa envolvendo a prototipagem e técnicas de controle numérico para o cultivo protegido.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) pelo apoio ao projeto de pesquisa “Desenvolvimento de Estufa Agrícola Robotizada de Baixo Custo” (SIGPEX: 202203044, CNPq: 306229/2021-8), e também a outros projetos relacionados (SIGPEX: 202002173 e 202002437), por meio de bolsas de iniciação científica, mestrado e doutorado.

6. REFERÊNCIAS

- Ashby, M.F., Johnson, K., 2011. Materiais e Design. Ciência da seleção de materiais no design de produto. *Elsevier*. Rio de Janeiro.
- Batista, A.V.A., Albiero D., Viana, T.V.A., Monteiro L.A., Chideroli, C.A., 2017. Multifunctional Robot at Low Cost for Small Farms. *Rural Engineering*. Vol. 47, No. 7, Pp. 51-61. <https://www.scielo.br/j/cr/a/bDpSL9kZKsyhSDyHkBTYhTs/?lang=en>. Santa Maria. Acessado em 03 de janeiro de 2022.
- Blackmore, S., Griepetrong, H.W., Fountas, S., Gemtos, T.A., 2007. A Specification for na Autonomous Crop Production Mechanization System. *Agricultural Engineering International*. Vol. 7, No. 9, Pp. 6-32.
- EMBRAPA, 2019. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*. “Trajetória da Agricultura brasileira.”. <https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira>. Acessado em 23 de janeiro de 2022.
- FAO, 2011. Food and Agriculture Organization of The United Nations. “Representante da FAO Brasil apresenta o cenário da demanda de alimentos”. <http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/en/c/90116>. Acessado em 14 de fevereiro de 2022.
- FARMBOT, 2018. *Farmbot Genesis*. <https://farm.bot>. Acessado em 20 de janeiro de 2022.
- Ferrolí, P.C.M., Librelotto, L.I., 2012, Aplicação das Ferramentas FEAP-SUS, FEM e ESA em Modelo Funcional em Escala Reduzida. *Design e Tecnologia*. No. 4, Pp. 24-34. Porto Alegre.
- Grift, T., Zhang, Q., Kondo, N., Ting, K., 2008. A review of Automation and Robotic for the Bioindustry. *Journal of Biomechatronics*. Vol. 1, Pp. 37-54. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.453.9292&rep=rep1&type=pdf>. Acessado em 24 de fevereiro de 2022.
- Hackenhaar, N.M., 2015. “Robotics in Agriculture”. *Interactions*, Vol. 16, No. 1, pp. 119-129.
- Hunt, K.H., 1978. Kinematic Geometry of Mechanisms. *Engineering Science*. No. 1. Oxford University.
- IBGE, 2017. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. “Censo Agropecuário de 2017”. <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/>. Acessado em 07 de fevereiro de 2022.
- IBGE, 2019. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. “Valor da Produção Agrícola Nacional”. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/habitacao/17270-pnad-continua.html?=&t=o-que-e>. Acessado em 03 de janeiro de 2022.
- Ionescu, T., 2006. Terminology for Mechanisms and Machine Science. *Mechanism and Machine*. Vol. 38, No. 7, Pp. 597-1111. https://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-2204-2_3. Acessado em 22 de março de 2022.
- Machado, L.B., Valdiero, A.C., Simas, H., Martins, H., 2021a. “Analysis of a Proposal for a Self-aligning Mechanism for Greenhouses”. In *MUSME – 7th International Symposium Multibody Systems and Mechatronics*. Vol. 110, Pp. 37-45. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-88751-3_4. Acessado em 11 de janeiro de 2022. Córdoba.
- Machado, L.B., Valdiero, A.C., Simas, H., Martins, H., 2021b. “Challenges and Opportunities of Robotization in Agricultural Greenhouses”. In *COBEM – 26th International Congress of Mechanical Engineering*. <https://abcm.org.br/pb/aceso-livre>. Acessado em 15 de março de 2022.
- Machado, L.B., Camilo, J.G., Valdiero, A.C., Simas, H., Martins, H., 2021c. “Inovação e Robotização em Estufas agrícolas”. In *CONBEA – L Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*. <https://conbea.org.br/anais/publicacoes/conbea-2021/anais-2021/maquinas-e-mecanizacao-agricola-mma-4/3211-inovacao-e-robotizacao-em-estufas-agricolas/file>. Acessado em 09 de janeiro de 2022.
- Palhais, C.B.C., 2015. *Prototipagem, uma Abordagem ao Processo de Desenvolvimento de Produto*. Vol. 1, No. 1, Pp. 26-44. https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/29163/2/ULFBA_TES_942.pdf. Acessado em 19 de março de 2022.
- Penna, E., 2002, Modelagem: *Modelos em Designs*. No. 1, Vol. 4, Pp. 96-106. São Paulo.
- Porsch, M.R.M.H., Rasia, L.A., Thesing, N.J., Pedrali, P.C., Valdiero, A.C., 2016. Modelagem Matemática, Simulação Computacional. *CNMAC: Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*. DOI: 10.5540/03.2017.005.01.0181. Rio Grande do Sul.
- Reis, N.D., 2005. *Construção de estufas para produção de hortaliças nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste*. Vol.1, No. 4, pp. 1-16. Brasília. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/779127/construcao-de-estufas-para-producao-de-hortalicas-nas-regioes-norte-nordeste-e-centro-oeste>. Acessado em 07 de fevereiro de 2022.
- Reshetov, L., 1979. Self-Aligning Mechanism. *MIR*, Moscou.

- Romano, V., F., 2022. *Robótica Industrial: Aplicação na indústria de manufatura*. No. 1, Pp. 23-53. São Paulo.
- Russel, S.; Norving, P., 2004. *Inteligência Artificial*. Pp. 23-38.
- Santos, B., 2019. Agricultura 4.0: Software de gerenciamento e produção. *Revista Pesquisa e Ação*, Vol. 5, No. 4, pp 121-131, dez/2019. <https://revistas.brazcubas.br/index.php/pesquisa/article/view/768/779>. Acessado em 11 de janeiro de 2022.
- Sciavicco, L.; Siciliano, B., 1996, *Modeling and Control of Robot Manipulators*. No. 1, Pp. 113-124.
- Siegiwart, R.; Nourbakhsh, I., 2004. *Introduction to Autonomous Mobile*. Massachusetts. Pp. 118-152.
- Silva, B.A., 2014. Agricultura Protegida - Em busca de mais eficiência produtiva - *Alltech Crop Science*.
- Souza, J.L., 2014. *Manual de Horticultura Orgânica*. Editora Aprenda Fácil, Viçosa. Vol. 1, pp. 42-60.
- Stafford, J.V.; Lowenberg, J.M., 2020. Precision Agriculture. "An international Journal on Advances in Precision Agriculture". *Springer*, Reino Unido. Vol. 1, pp. 15-25.
- Tangerino, G. 2011. Controle de direção de robô agrícola móvel dirigível nas quatro rodas - *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI*, São João Del-Rei, Brasil, 18 a 21 de setembro de 2011. Anais São João Del-Rei.
- Tanke, N.M., 2011, Automação de instalações hidropônicas usando um robô com feedback visual baseado em posição. Pittsburgh: *The Robotics Institute*, Carnegie Mellon University, 2011.
- Tsai, L., W., 2000. *Mechanism Design*. Enumeration of Kinematic Structures According to Function. No. 1, Pp. 134-175. Whashington.
- Valdiero, A.C., 2015. "Tecnologias inovadoras aplicadas em sistemas agrícolas e sanidade animal". Vol. 1, pp. 63-86.
- Venturus, 2021. *Robôs no agronegócio*. <https://venturus.org.br/en/robots-in-agribusiness/>. Acessado em 01 de fevereiro de 2021.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DEVELOPMENT OF A ROBOTIZED AGRICULTURAL GREENHOUSE PROTOTYPE WITH NUMERICAL CONTROL TECHNOLOGY

Lucas Bernardon Machado, lucas.bernardon@posgrad.ufsc.br¹

Ruben Solarte Bolaños, ruben.solarte@posgrad¹

Pedro dos Santos Guerreiro, pguerreiro04@gmail.com¹

João Gabriel Dias Camilo, jgdiascamilo13@gmail.com¹

Tarik El Hayek Rocha Pitta de Araujo, tarik.pitta@grad.ufsc.br¹

Antonio Carlos Valdiero, antonio.valdiero@ufsc.br¹

Henrique Simas, henrique.simas@ufsc.br¹

Daniel Martins, daniel.martins@ufsc.br¹

¹Federal University of Santa Catarina, University Campus João David Lima, Florianópolis -SC, Trindade, Box Post 476, CEP 88040-900

Abstract. With the recent adherence and advances of new techniques in the agriculture, the robotic took on a big importance when the matter is the process of automation of agricultural greenhouses, aiming the increase of productivity and efficiency in the most diverse activities and cultures. The paper in question has as goal to present the development of a prototype on a reduced scale of a robotic greenhouse, proposing a low-cost model that unite the realized operations inside the protected cultivation, approaching all the production steps since the soil preparation, the handling, the planting and sowing, the irrigation, the inspection and control, to the harvest. Recent researchs in the robotic field allow the utilization of mobile and autonomus robots in diverse tasks, fact that result in the reduction of the the physical wear and the load of work in the grower, motivating and highlighting the diverse opportunities for the development of automated robotic systems for the most various agricultural shores. In this article, is proposed a Gantry type, self-alignment, cartesian robot to efetuate the essential operations, being that is going to move trough linear joints, suspended in agricultural grow benches. The robot is compound with three prismatic joints, resulting in a movement of three espaciais translations on the Cartesian coordinate axes. The Gantry robot has as final actuator a multifunctional tool, capable of realizing irrigation activities, local application of pesticides and inputs and even the remotion of weeds. However, the use of robotic agricultural make itself necessary, once it opportunizes a benefict chain to the producers, operating in a more effective and safe way, being these practices become dangerous and exhaustive to the human management. Lastly, with de prototype modeling, it become possible to establish new research fronts in the search of solutions to the automation in agricultural greenhouses, aiming the increase in the control of productivity requirements in a controlled limited work space.

Keywords: precision agriculture, self-alignment, agricultural greenhouses, agricultural robots, cartesian robot.