



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Desenvolvimento de Uma Linha de Fabrico de Módulos Parede Para Casas CoolHaven**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e  
Gestão Industrial

**Autor**

**Vânia Sofia Martins de Oliveira**

**Orientador**

**Professor Doutor Germano Manuel dos Santos Veiga**

**Júri**

**Presidente Professor Doutor Cristóvão Silva**

**Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**

**Vogais Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro**

**Professor Associado c/ Agregação da Universidade de Coimbra**

**Colaboração Institucional**

---



**SARKKIS – Robotics, Lda**

**Coimbra, Julho, 2012**

Talent wins games, but teamwork and intelligence wins championships.

I can accept failure, everyone fails at something. But I can't accept not trying.

Michael Jordan, 1963.

## Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento,

Ao professor Germano Veiga,  
Pela orientação e apoio dedicado neste trabalho.

Ao professor Cristóvão Silva,  
Pela motivação e auxílio prestado durante o meu percurso académico.

À SARKKIS,  
Pela oportunidade de vivenciar experiências reais, e por todo o apoio ao longo do trabalho.

À CoolHaven,  
Por facultar e disponibilizar informação fundamental necessária ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus Amigos,  
Que, de várias maneiras, contribuíram para alcançar mais um objectivo da minha vida e pelos bons momentos vividos em sua companhia.

À minha Mãe, Pai, Irmã, Cunhado e Gonçalo,  
Por todo o incentivo, motivação, força, generosidade e orgulho demonstrado ao longo do meu percurso académico. Por todo o amor oferecido.

A ti, Daniel Pais,  
Um especial agradecimento. Muito Obrigado pela ajuda, motivação, compreensão, paciência, disposição, cooperação, encorajamento, força, amizade, ...

## Resumo

Uma casa CoolHaven é constituída por módulos *standard*, também designados por paredes, que permitem a formação de qualquer tipologia, podendo adaptar-se a um projecto já existente ou a um novo ao gosto do próprio cliente. Estes módulos possuem dimensões optimizadas e podem ter três tipologias: cantos, pilares e paredes. Um módulo parede é constituído por 4 componentes diferentes: uma estrutura metálica que é revestida com lâ de rocha e placas OSB, *Oriented Strand Board*, em ambos os lados e ainda uma estrutura auxiliar, em madeira, para o espaçamento (“ripado”). A montagem das paredes inclui as tarefas: rebitagem e fresagem. É ainda necessário o contributo de um operador para efectuar trabalhos manuais, nomeadamente para a passagem de fios e cabos no interior do módulo.

O objectivo desta dissertação passa por projectar um *layout* optimizado e com elevada flexibilidade para o fabrico de módulos parede. Com estas características procura-se fabricar paredes modulares em tempos reduzidos, com elevada qualidade e produtividade. Ao longo deste trabalho desenvolveram-se duas propostas de células robóticas que satisfazem as condições exigidas. O *RobotStudio*, para além de ferramenta de desenho, auxiliou na concepção do *layout*. Permitted simular e, conseqüentemente, obter a duração das várias tarefas executadas no fabrico de um módulo parede. Esses tempos foram analisados com recurso a diagramas de *Gantt*, facultando a visualização das vantagens e inconvenientes de ambos os *layouts*.

Foram comparadas diferentes soluções para diferentes níveis de produção. Para produções até 111 casas/ano foi desenhada uma solução que oferece baixo custo de implementação, utilizando apenas dois equipamentos robotizados. Requer um reabastecimento periódico, que implica a imobilização da célula. Caso se pretenda maior nível de produção terá de recorrer-se a uma segunda opção que consiste numa distribuição em “U”, com recurso a duas passadeiras, e necessita de 5 robôs. O tempo de paragem para reabastecimento é, neste caso, menor. Apesar do investimento inicial ser maior, permite taxas de produção mais elevadas.

**Palavras-chave:** *Layout*, Optimização, Tempos, Casas Modulares

## Abstract

A CoolHaven house consists of standard modules, also designated by walls that allow any type of construction and can be adapted to an existing project or a new one according to the customer's needs and requirements. These modules have optimal dimensions and can have three types: corners, pillars and walls. A wall module consists of four different components: a steel frame that is covered with rockwool and OSB plates on both sides and also an auxiliary wooden structure for the spacing ("slatted"). The assemblage of the walls includes following tasks: riveting and milling. It is still necessary the contribution of an operator to carry out the manual work, in particular fitting the wires and cables inside the module.

The purpose of this study is to design an optimized layout and with high flexibility in the manufacture of wall modules. With these features it is intended to manufacture modular walls in a very short time, with high quality and productivity. Throughout this work were developed two proposals for robotic cells that meet the required conditions. The RobotStudio helped not only as a drawing tool but also in the design of the layout. It allowed the simulation and how to figure out the duration of the various tasks performed in the manufacture of a wall module. The duration was analysed using Gantt diagrams providing a preview of the advantages and disadvantages of both layouts.

Different solutions for different production levels were compared. It was designed a solution that offers low cost of implementation just by using two robotics equipments, in order to production 111 houses per year. It requires a periodic refuelling, which implies the immobilization of the cell. For a higher level of production it will have to be applied a second option. It consists of a "U" distribution using two conveyors and five robots. The replenishment time for this case is smaller. Although the initial investment is bigger it allows higher production rates.

**Keywords** Layout, Optimization, Time, Modular Houses

## Índice

Índice de Figuras .....	v
Índice de Tabelas .....	vi
1. INTRODUÇÃO .....	7
2. SARKKIS .....	9
3. CASO DE ESTUDO .....	11
3.1. Empresa CoolHaven .....	11
3.2. Produto .....	12
3.3. Parede Modular .....	14
3.4. Processo de Fabrico .....	15
4. ENQUADRAMENTO TEÓRICO .....	18
4.1. Simulação .....	18
4.1.1. RobotStudio .....	22
4.2. Layout .....	25
5. PROPOSTAS DE LAYOUT .....	26
5.1. Pressupostos .....	26
5.2. Descrição da Célula Estrela .....	28
5.3. Descrição da Célula U .....	34
6. ANÁLISE DE TEMPOS POR SIMULAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	40
6.1. Célula Estrela .....	40
6.1.1. Com operador .....	40
6.1.2. Sem operador .....	42
6.1.3. Discussão de resultados .....	44
6.2. Célula U .....	45
6.2.1. Célula U com 6 postos e operador .....	45
6.2.2. Célula U com 6 postos e sem operador .....	48
6.2.3. Célula U com 8 postos e operador .....	50
6.2.4. Célula U com 8 postos e sem operador .....	52
6.2.5. Discussão de resultados .....	53
7. CONCLUSÕES .....	55
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	58
9. ANEXOS .....	59
9.1. Anexo A .....	59
9.2. Anexo B .....	60
9.3. Anexo C .....	61
9.4. Anexo D .....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração dos diferentes módulos.....	13
Figura 2. Esquema de montagem do módulo de uma casa CoolHaven .....	16
Figura 3. a) Esboço da casa modular; b) Projecto da casa CoolHaven; c) Construção da casa modular; d) Casa modular .....	17
Figura 4. Etapas de um estudo de simulação.....	20
Figura 5. Células robóticas inicialmente propostas (a,b,c,d).....	27
Figura 6. Esquema ilustrativo da célula robótica proposta – Layout 1 .....	28
Figura 7. Ilustração da célula robótica proposta – Célula Estrela .....	29
Figura 8. Ilustração da célula robótica proposta – Célula U .....	35
Figura 9. Diagrama de <i>Gantt</i> referente à Célula Estrela- Com operador .....	41
Figura 10. Diagrama de <i>Gantt</i> referente à Célula Estrela - Sem operador.....	43
Figura 11. Diagrama de <i>Gantt</i> referente à hipótese U6 com operador.....	47
Figura 12. Diagrama de <i>Gantt</i> referente à hipótese U6 sem operador .....	49
Figura 13. Ilustração da célula robótica proposta – Célula U com 8 Postos (U8).....	50
Figura 14. Diagrama de <i>Gantt</i> referente à hipótese U8.....	51
Figura 15. Gráfico comparativo das duas células robóticas propostas.....	57
Figura 16. Esquema de montagem de um módulo parede.....	59
Figura 17. Planta digitalizada do pavilhão CoolHaven .....	60
Figura 18. Diagrama de <i>Gantt</i> referente à Célula U – Sincronizado com operador.....	61
Figura 19. Diagrama de <i>Gantt</i> referente à Célula U – Sincronizado sem operador .....	62

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Dimensões dos 3 tipos de módulos.....	13
Tabela 2. Dimensões dos componentes de um módulo parede .....	15
Tabela 3. Tarefas praticadas pelo robô 1 .....	31
Tabela 4. Tarefas praticadas pelo robô 2 .....	31
Tabela 5. Duração das tarefas executadas pelo robô 1 .....	32
Tabela 6. Duração das tarefas executadas pelo robô 2 .....	33
Tabela 7. Tarefas executadas pelo robô 1.....	37
Tabela 8. Tarefas executadas pelo robô 2.....	37
Tabela 9. Tarefas executadas pelo robô 3.....	37
Tabela 10. Tarefas executadas pelo robô 4.....	37
Tabela 11. Duração das tarefas realizadas pelo robô 1.....	38
Tabela 12. Duração das tarefas realizadas pelo robô 2.....	38
Tabela 13. Duração das tarefas realizadas pelo robô 3.....	38
Tabela 14. Duração das tarefas realizadas pelo robô 4.....	39
Tabela 15. Número de módulos fabricados e sua duração – Célula Estrela.....	44
Tabela 16. Tempos de espera dos equipamentos com passadeiras assíncronas .....	53
Tabela 17. Número de módulos fabricados e sua duração – Célula U.....	54
Tabela 18. Resultados obtidos da Célula Estrela.....	55
Tabela 19. Resultados obtidos da Célula U.....	56



## 1. INTRODUÇÃO

No passado, a análise da viabilidade económica da automatização apenas tinha em consideração a redução do custo directo da mão-de-obra. Actualmente sabe-se que ponderam múltiplos factores, incluindo também os custos indirectos, como qualidade e custos com garantia, considerações de mercado, reduções de inventário e segurança de operadores. Uma tarefa difícil e muito importante é tentar entender onde e quando os robôs podem ser vantajosos para a indústria. Os processos automáticos tendem a ser muito práticos e consistentes, proporcionando a geração de informação em tempo real sobre a estabilidade do processo, permitindo rápidas tomadas de decisão. A automação permite ainda a simplificação da estrutura organizacional e da gestão de pessoas. O índice de automação de uma empresa é visto, na avaliação feita pelos clientes, como um indicador importante quanto ao seu real compromisso com a qualidade.

A SARKKIS oferece aos seus clientes os melhores produtos, com elevada qualidade, garantindo satisfazer da melhor maneira as suas necessidades. Centra-se na área de aplicações de *software* para a programação de robôs, devido ao seu grande conhecimento e elevada capacidade na interface humano-robô. Os utilizadores finais que introduzem robôs nos seus processos de produção, têm observado uma alteração considerável na sua produtividade e eficiência. A actual instabilidade da economia global força as organizações, que querem ser competitivas e ganhar vantagem competitiva da concorrência, a serem bastante flexíveis e responderem prontamente às exigências do mercado.

Actualmente, na maioria dos países desenvolvidos, o mercado construtivo vigente encontra-se saturado, provavelmente pela dificuldade de convergência dos edifícios usados para as necessidades contemporâneas. A construção comum origina resíduos, desperdícios, emissões de gases e baixa eficiência energética, sob o ponto de vista sustentável. A empresa CoolHaven desenvolve soluções com um novo método construtivo, criando soluções avançadas e tecnologicamente evoluídas de habitações eco-sustentáveis. Teve a capacidade de perceber a alteração dos requisitos do mercado antes

dos seus concorrentes, possuindo estratégias que lhe permitem agir atempadamente e da melhor forma possível de modo a terem na diferenciação uma forte fonte de competitividade. Distingue-se pelo método construtivo, pois assemelha-se ao processo de construção infantil da Lego<sup>1</sup>, na medida em que são usadas peças pré-fabricadas para erguer uma casa.

A presente dissertação dedica-se à elaboração de células robotizadas (*layouts*) que atendam às necessidades da CoolHaven, na construção de módulos parede, garantindo uma elevada flexibilidade e produtividade. Esta encontra-se organizada em 7 capítulos, resumidos de seguida para melhor orientação do leitor.

O capítulo 1, “Introdução”, onde se expõe o contexto em que se insere a investigação sobressaindo a sua pertinência e importância na actualidade.

O capítulo 2, “SARKKIS”, apresenta a empresa, descrevendo os seus objectivos e a sua missão.

O capítulo 3, “Caso de estudo”, aborda a empresa CoolHaven, descreve o seu produto, a casa modular, e os módulos que a constituem. Elucida pormenorizadamente o módulo parede e o respectivo processo de fabrico.

O capítulo 4, “Enquadramento teórico” expõe temas de simulação, incluindo a ferramenta *RobotStudio*, e de *layouts*.

O capítulo 5, “Propostas de *layout*”, apresenta o trajecto percorrido até alcançar um *layout* optimizado e as propostas finais das células robóticas que a empresa pode implementar.

O capítulo 6, “Análise de tempos por simulação e discussão de resultados”, recorrendo a diagramas de *Gantt*, analisa os tempos e as tarefas em cada posto de trabalho de cada robô. Finaliza-se com a discussão dessa análise.

O capítulo 7, “Conclusões” onde se elabora uma síntese do trabalho realizado, apresentando conclusões com base nos resultados obtidos.

---

<sup>1</sup> O sistema LEGO é um brinquedo cujo conceito se baseia em partes que se encaixam permitindo inúmeras combinações.

## 2. SARKKIS

A SARKKIS ROBOTICS, LDA é uma empresa que nasceu a partir da Universidade de Coimbra e encontra-se incubada no Instituto Pedro Nunes (IPN), desde 2007. É uma equipa formada por 4 sócios: Germano Veiga (Eng.º Mecânico), Francisco Caramelo (Eng.º Físico), Pedro Brito (Médico Dentista) e José Oliveira (Eng.º Civil). Através da incubação a empresa continua ligada à Universidade, alcançando o perfil desejado, ter uma boa reputação com empresas de alto nível tecnológico e ainda conquistar uma forte e crescente presença na área da saúde (Health Cluster Portugal).<sup>2</sup>

A sua missão é fornecer produtos e serviços de alta qualidade que respondam a necessidades específicas em diferentes áreas, como odontologia ou robótica avançada.

O principal objectivo da SARKKIS é atender às necessidades dos clientes, acreditando que o desenvolvimento de ideias focadas em problemas reais torna-se num factor de motivação para a equipa. O primeiro passo, e também o mais importante, é a escolha da ferramenta para executar determinado trabalho na criação e desenvolvimento de qualquer produto. A empresa garante a escolha certa para oferecer o melhor produto aos seus clientes, convertendo as suas ideias em produtos.

O seu principal foco é na área de aplicações de *software* para a programação de robôs, mas também se estende a produtos que possam ajudar as empresas nas suas necessidades. Neste momento, a empresa possui *software* disponível para operações de corte de metais com uma aplicabilidade diferente (MetroID).<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Pólo de Competitividade da Saúde (HCP), tem como objecto principal a promoção e o exercício de iniciativas e actividades tendentes à consolidação de um pólo nacional de competitividade, inovação e tecnologia de vocação internacional. Promover e incentivar a cooperação entre as empresas, organizações, universidades e entidades públicas, com vista ao aumento do respectivo volume de negócios e do emprego qualificado, nas áreas económicas associadas à área da saúde.

<sup>3</sup> É um módulo, que pode ser estendido conforme as necessidades. Oferece a possibilidade de construir um *software* para necessidades específicas.

A empresa aposta no progresso da inovação em mecatrónica e saúde. Esta é conseguida através de técnicas multidisciplinares como a fotoelasticidade, a robótica, a visão de máquinas microelectrónicas, entre outras.

A SARKKIS MECHATRONICS possui conhecimento e capacidade para fornecer *software* de elevada qualidade no que respeita à interface humano-robô, assim como a facilidade de manuseamento. Esta elevada qualidade de serviços deve-se ao uso de linguagens de programação específicas, que se ajustam sempre às necessidades dos clientes.

Uma tarefa crucial nos dias de hoje é perceber onde e quando os robôs podem ser úteis para a indústria. A capacidade de executar tarefas pesadas e repetitivas num curto espaço de tempo e de um modo regular podem levar a um crescimento considerável na produtividade. Assim, as células robóticas podem ser uma mais-valia num curto prazo para a indústria em geral. A SARKKIS tem feito trabalhos nesta área onde demonstra a aplicabilidade de robôs em determinadas tarefas. A recolha de pneus num ambiente desorganizado (*bin-picking*) e a montagem de componentes de plástico para a indústria automóvel são alguns exemplos dos trabalhos realizados.

Neste momento um dos projectos que a empresa detém é a elaboração de um *layout* automatizado e optimizado, com grande flexibilidade e produtividade para a produção de componentes para a construção civil. Este projecto foi proposto pela empresa CoolHaven – Habitações Modelares Eco-Sustentáveis, S.A., que necessita de fabricar módulos parede de uma casa sustentável. O trabalho desta dissertação centra-se neste projecto, elaborando uma célula robótica que responda às necessidades do cliente.

### 3. CASO DE ESTUDO

#### 3.1. Empresa CoolHaven

A CoolHaven é uma empresa portuguesa, fundada em 2009, que incide essencialmente na investigação e desenvolvimento de diversas áreas da Engenharia e Arquitectura, implementando um novo conceito na construção. Nesse ano candidatou-se ao QREN<sup>4</sup> (Quadro de Referência Estratégico Nacional) com o projecto de casas modulares e eco-sustentáveis, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.

Se se considerar o ciclo de vida de um edifício para 50, ou mesmo 100 anos, é fácil compreender que com a quantidade de mudanças da vida contemporânea os edifícios tornam-se disfuncionais antes de atingirem o final da sua vida útil. Sob o ponto de vista sustentável a construção comum responde cada vez menos aos princípios da sustentabilidade ambiental, como a produção de resíduos e desperdícios, ineficiência energética, emissões globais de CO<sub>2</sub>, que se traduz numa pegada ecológica elevada, (CoolHaven, 2012).

A CoolHaven não pretende ser mais um fabricante de casas, mas sim uma empresa que desenvolve soluções com um novo método construtivo, de forma a oferecer uma solução industrializada e eco-sustentável. O projecto tem vindo a ser desenvolvido pela empresa e conta como entidade subcontratada a FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Esta parceria é de extrema importância dado o carácter de inovação e desenvolvimento que impulsionou o projecto.

---

<sup>4</sup> Assume como grande desígnio estratégico a qualificação dos portugueses e das portuguesas, valorizando o conhecimento, a ciência, a tecnologia e a inovação, bem como a promoção de níveis elevados e sustentados de desenvolvimento económico e sócio-cultural e de qualificação territorial, num quadro de valorização da igualdade de oportunidades e, bem assim, do aumento da eficiência e qualidade das instituições públicas.

A empresa desfruta dos seguintes valores:

- Simplicidade: cria soluções avançadas e tecnologicamente evoluídas de habitação
- Foco no cliente: elevada personalização do produto final
- Sustentabilidade: desenvolvimento e construção de habitações eco-sustentáveis.
- Inovação: pesquisa e desenvolvimento de novas soluções avançadas de habitação

A sua grande inovação é o método construtivo, onde os várias componentes se interligam quase como um jogo de legos, (CoolHaven, 2012).

O objectivo do processo construtivo é a flexibilidade e redução dos tempos de construção. Os elementos que compõem cada módulo são produzidos em fábrica e facilmente transportáveis para o local de construção, reduzindo os tempos de produção e construção. A industrialização de todas as componentes do módulo permite uma padronização, um controlo de qualidade e dos custos associados e consequente eficiência do processo de montagem.

### **3.2. Produto**

O novo conceito de habitação apresenta uma estrutura modular perfeitamente flexível e resistente, capaz de responder às necessidades de mobilidade e à necessidade natural de adaptação das famílias face ao aumento ou redução do agregado familiar. Simultaneamente, a sustentabilidade da construção foi determinante no desenvolvimento deste novo conceito. Desta forma, este tipo de habitação tira partido das energias renováveis locais (energia solar e inércia térmica do solo), da ventilação natural, do tratamento das águas residuais e do aproveitamento da água da chuva.

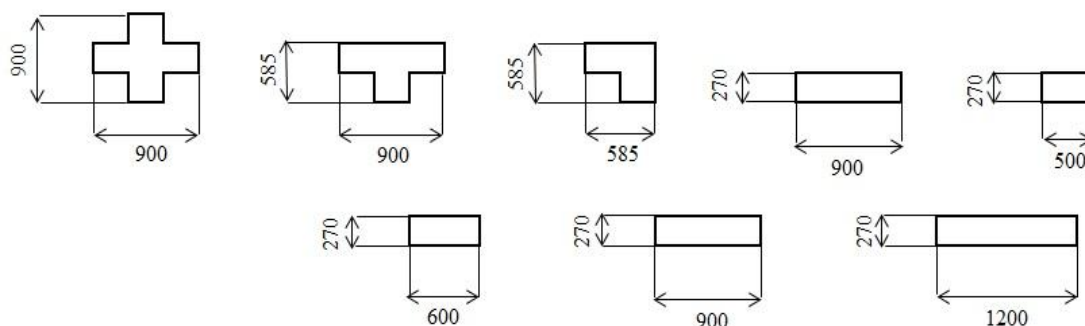
A CoolHaven harmonizou um conjunto de tecnologias de forma a gerar uma solução térmica com baixas necessidades de sistemas activos de aquecimento e arrefecimento.

Quanto ao produto que a empresa oferece, trata-se de uma casa modular, ou seja, constituída por módulos e eco sustentável, como já foi referido. Adapta-se às exigências modernas de conforto, de economia e de sustentabilidade, e é baseado na necessidade urgente de habitações sustentáveis. Junta a modularidade à eco sustentabilidade e à incorporação de sistemas de automação e domótica, com a finalidade de minimizar os custos de vida através das características de reutilização e de eficiência energética.

A casa modular é um produto inovador na área das soluções habitacionais unifamiliares, de construção fácil, rápida, segura e sustentável do ponto de vista económico, ambiental e social. A sua arquitectura e respectivas especialidades serão desenvolvidas de acordo com as necessidades de cada cliente, durante a sua construção e ao longo de toda a vida útil de habitação. É constituída por módulos *standard* que podem ser de 3 tipologias diferentes: paredes, pilares ou cantos. São apresentadas e ilustradas, Tabela 1 e Figura 1 respectivamente, as dimensões dos diferentes módulos.

	<i>Largura (mm)</i>	<i>Altura (mm)</i>	<i>Espessura (mm)</i>
<b>Paredes</b>	600; 900; 1200	2400 a 3000	270
<b>Pilares</b>	500; 900	2400 a 3000	270
<b>Canto “cruz”</b>	900	2400 a 3000	900
<b>Canto “T”</b>	900	2400 a 3000	585
<b>Canto “L”</b>	585	2400 a 3000	585

**Tabela 1.** Dimensões dos 3 tipos de módulos



**Figura 1.** Ilustração dos diferentes módulos

No presente trabalho apenas se abordará a montagem de elementos modulares parede.

### 3.3. Parede Modular

O módulo parede é constituído por quatro componentes diferentes: OSB (*Oriented Strand Board*), “ripado”, lã de rocha e estrutura metálica. É necessário acrescentar a este último utensílios extra tais como batentes, fixadores e afastadores. Estes componentes são recicláveis e com baixas emissões de carbono na sua produção (1/3 face à construção convencional), (CoolHaven, 2012).

As placas OSB servem para revestir a estrutura e são compostas por lâminas de madeira longas e orientadas. As suas excelentes características resultam directamente da especificidade do seu processo de fabrico. São fáceis de cortar e fixar, através de parafusos e são leves, facilitando o seu transporte. Apesar de serem basicamente um revestimento estrutural, as placas de OSB contribuem para excelentes níveis de isolamento térmico numa habitação. Com todos os derivados de madeira, as placas OSB respeitam os conceitos de sustentabilidade e eco-eficiência: contribuem para a minimização das alterações climáticas, são alternativas muito económicas e estáveis, exigem menos energia no fabrico e são completamente recicláveis, (Futureng, 2003). Cada módulo parede necessita de 2 placas deste componente, uma na frente e outra no verso.

A lã de rocha devido às suas características termo-acústicas centra-se nos mercados da construção civil, industrial, automotivo e electrodoméstico entre outros. Garante conforto ambiental, segurança e aumento no rendimento de equipamentos industriais, além da economia de energia e aumento de produtividade. Possui incomcombustibilidade, resistência ao fogo, segurança e protecção pessoal (não sendo cancerígena). Possui um custo-benefício favorável, grande absorção acústica, uma boa facilidade de manuseio e boa resiliência, (Nivelson).

Para o fabrico de um módulo parede são necessárias 4 placas de lã de rocha, 2 na frente e as restantes no verso. Quando se procede à montagem do painel, colocam-se 2 placas de lã de rocha em simultâneo, paralelas, de modo a encaixarem no “ripado”. Para facilitar a leitura da dissertação, o combinado de lã de rocha composto por 2 placas paralelas é designado por conjunto de lã de rocha.

O “ripado” é uma estrutura em madeira (ripas) que suporta placas de lã de rocha. A parede modular necessita apenas de um único ripado.



A estrutura metálica é o suporte da parede e o seu peso ronda os 200 kg. Esta pode ser montada paralelamente a outra, obtendo-se maior protecção acústica. Cada módulo usufrui de uma estrutura metálica.

As dimensões destes componentes são expostas na Tabela 2:

	<i>Largura (mm)</i>	<i>Altura (mm)</i>	<i>Espessura (mm)</i>
<b>Conjunto de lã de rocha</b>	600 a 960	2400 a 3000	30
<b>“Ripado”</b>	600 a 1110	2400 a 3000	30
<b>OSB</b>	600 a 1200	2400 a 3000	12
<b>Estrutura metálica + Utensílios extra</b>	600 a 1200	2400 a 3000	210

**Tabela 2.** Dimensões dos componentes de um módulo parede

### 3.4. Processo de Fabrico

Para se proceder ao fabrico deste tipo de paredes é necessário percorrer um conjunto de tarefas principais, que se passam a citar:

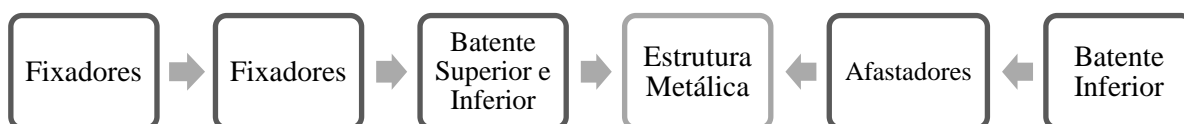
- 1- Segurar os afastadores à estrutura metálica
- 2- Colocar o batente inferior
- 3- Fixar o conjunto de lã de rocha ao OSB
- 4- Rebitar a placa OSB ao conjunto descrito
- 5- Colocar batente superior e inferior no verso da estrutura metálica
- 6- Aparafusar os fixadores à estrutura
- 7- Fixar o “ripado” à placa OSB
- 8- Juntar o conjunto lã de rocha a este conjunto
- 9- Colocar os fixadores no conjunto
- 10- Juntar os dois conjuntos descritos através dos fixadores de ambos os lados.

Encontra-se em anexo uma imagem disponibilizada pela empresa CoolHaven que identifica de uma forma ilustrativa todos os passos anteriormente descritos referentes à montagem (Anexo A).

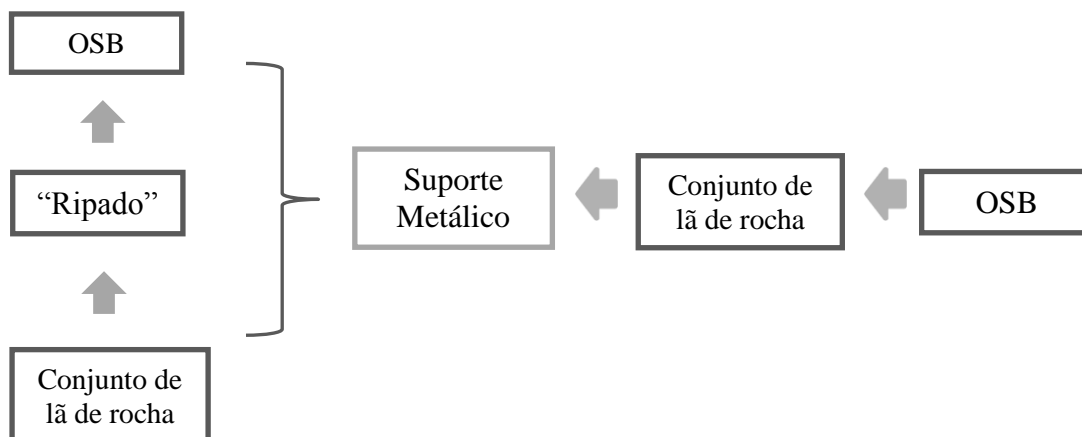
O conjunto da estrutura metálica com os utensílios extra será designado por suporte metálico, para facilitar a leitura, não a tornando demasiado exaustiva.

A Figura 2 apresenta o esquema de montagem de uma parede CoolHaven:

**Suporte Metálico:**



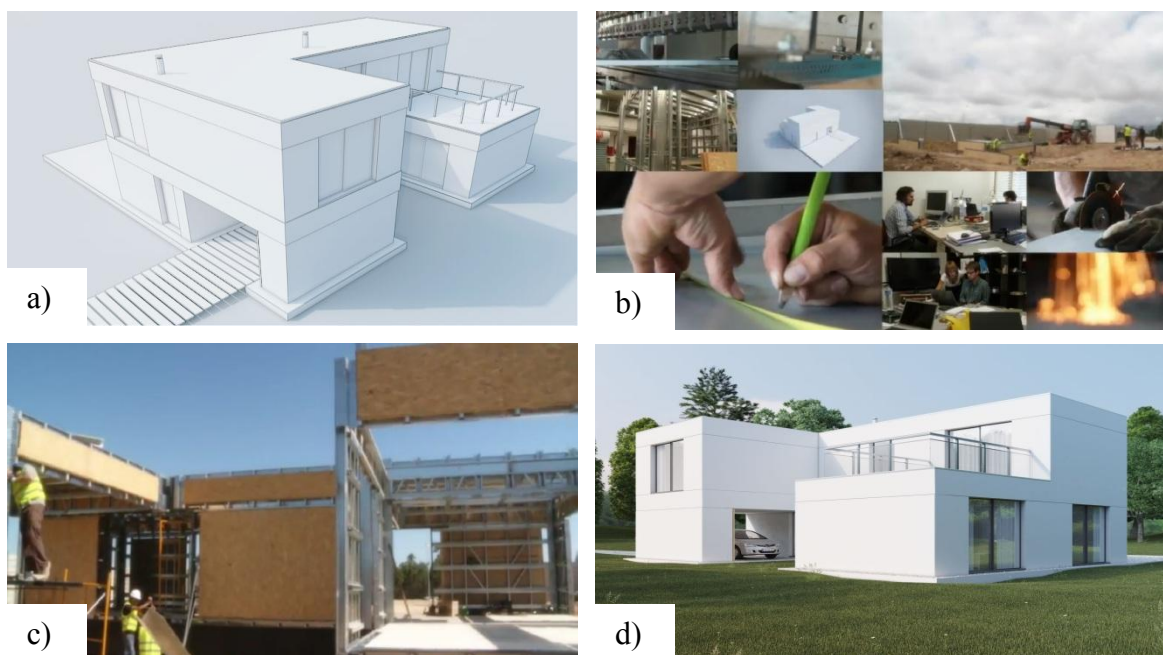
**Parede Modular:**



**Figura 2.** Esquema de montagem do módulo de uma casa CoolHaven

A CoolHaven optou por subcontratar alguns trabalhos, tais como o corte de placas OSB, de “ripado” e de lã de rocha, recebendo toda a matéria-prima com as dimensões correctas para se realizar a montagem de painéis. O suporte metálico também é recebido com todos os utensílios extra já incorporados.

A Figura 3 ilustra os passos percorridos desde a concepção do projecto até à fase final, onde a casa modular se encontra terminada.



**Figura 3.** a) Esboço da casa modular; b) Projecto da casa CoolHaven; c) Construção da casa modular; d) Casa modular

## 4. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

### 4.1. Simulação

Optimizar e organizar um *layout* fabril é de extrema importância numa empresa, sendo uma mais-valia para esta, pois consegue progredir a todos os níveis. Para que isto seja possível pode-se utilizar uma ferramenta que é capaz de analisar detalhadamente o processo actual, eliminar desperdícios e melhorar processos já existentes. Esta avaliação do comportamento do sistema pode ser feita recorrendo à simulação de operações.

Conforme Shannon (1975) a simulação consiste num processo de elaboração de um modelo de um sistema real ou hipotético e a condução de experiências com a finalidade de entender o comportamento de um sistema ou avaliar a sua operação, (Brooks, Robinson, & Lewis, 2001).

A simulação é definida por Stevenson (2002) como “*uma técnica descritiva na qual um modelo de um sistema é construído e sobre o qual são executadas experiências para avaliar o comportamento do sistema sob diversas condições*”, (Lemos, 2009).

É uma das ferramentas mais aplicadas no estudo e planeamento eficaz de *layouts*, pois pode focar muitos dos requisitos e atributos dos problemas da vida real, que são difíceis de observar com os modelos analíticos na optimização de *layouts*. Esta ferramenta é também utilizada para identificar possíveis problemas em *layouts* propostos, assim como potenciais estrangulamentos, antecipadamente à sua implementação e para sugerir aperfeiçoamentos com base nos resultados da simulação, (Joshi, Tsai, Lam, Srihari, & McGonigal, 2008).

As principais vantagens da simulação são:

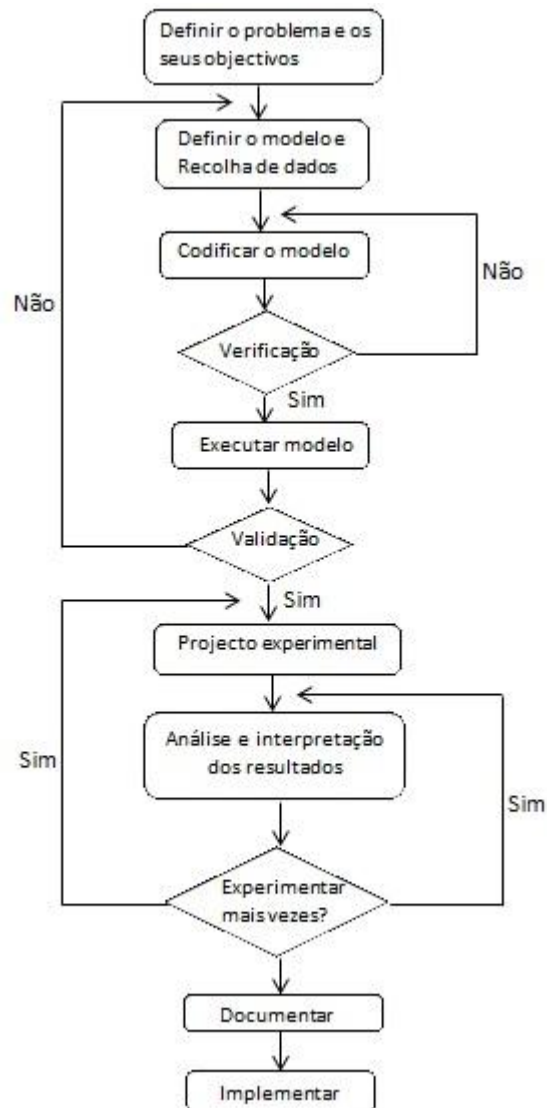
- Testar alternativas diferentes para o sistema, através da replicação do modelo experimental;
- Melhor controlo das condições experimentais do que seria possível no sistema real;
- Permite simular longos períodos num tempo reduzido;
- É, geralmente, mais económico que testar o sistema real, e evita gastos inúteis na compra de equipamentos desnecessários;
- A simulação é, geralmente, mais fácil de aplicar do que os métodos analíticos;
- O tempo pode ser controlado (expandido ou comprimido);
- Pode-se compreender melhor quais são as variáveis mais importantes em relação à *performance* e como as mesmas interagem entre si e com os outros elementos do sistema;
- Identificação de estrangulamentos com ajuda visual;

Mesmo apresentando muitas vantagens na sua utilização, a simulação apresenta limitações que é fundamental ter-se sempre em consideração:

- Os modelos de simulação devem ser executados várias vezes para se poder prever a *performance* do sistema;
- A simulação é dependente da validade do modelo desenvolvido, ou seja, não vale de muito fazer um estudo detalhado dos dados de saída encontrando uma solução para o sistema, se o modelo criado não representa exactamente o sistema ou se os dados de entrada não são os correctos;
- Os resultados da simulação podem ser de difícil interpretação, exigindo que se conheça bem o sistema programado;
- A modelação e a experimentação do modelo de simulação consomem muitos recursos, principalmente tempo. Ao simplificar um destes, na tentativa de economia, pode originar resultados insatisfatórios.

Desenvolver um modelo simulado implica um trabalho planeado e estruturado.

Na Figura 4 apresenta-se um fluxograma das principais etapas necessárias na realização de uma simulação.



**Figura 4.** Etapas de um estudo de simulação

A definição do problema e os seus objectivos é uma etapa crucial para que todo o restante estudo faça sentido e tenha coerência e rigor nos resultados obtidos. Posteriormente aos objectivos é necessário a recolha de dados, ou seja, a especificação das tarefas descritas nos objectivos. É necessário passar de uma visão geral para uma visão mais pormenorizada. A codificação refere-se à tradução da linguagem conceitual do modelo para uma linguagem computacional. Na verificação identificam-se erros de sintaxe, codificações, erros lógicos e corrigem-se caso necessário. A validação é a confirmação de que o modelo construído corresponde ao sistema real, isto é, se os resultados estimados pela simulação representam a realidade. Esta tarefa é da responsabilidade de quem elabora o sistema modelado. Uma maneira de validar os resultados é a variação dos parâmetros do modelo e analisar a sua mudança a essas alterações. No projecto experimental podem-se simular diferentes parâmetros de entrada e para cada configuração o modelo de simulação é executado e os resultados são avaliados. Na análise e interpretação dos resultados da simulação, estes são analisados e efectuam-se as medidas do desempenho dos vários cenários. Finaliza-se com a documentação e implementação do sistema modelado, (Filho, 1998).

#### **4.1.1. RobotStudio**

A automatização de processos tem sido comprovada para oferecer uma série de benefícios numa ampla variedade de aplicações. Os utilizadores finais que introduzem robôs nos seus processos de produção, têm especialmente observado uma transformação significativa na sua produtividade e eficiência, com níveis mais altos de produção, qualidade do produto e flexibilidade.

A empresa ABB é líder no fornecimento de robôs industriais, sistemas de produção modular e serviços de assistência técnica. Fortemente focada em soluções, a ABB ajuda os seus clientes a melhorar a produtividade, a qualidade dos produtos e a segurança dos trabalhadores. Conta com uma base instalada de mais de 190 mil robôs pelo mundo inteiro.

A ABB Robotics dá a conhecer as 10 boas razões para investir em robôs, (ABB, 2008):

1. Reduzir custos de operação – sejam eles directos ou indirectos, fazendo uma enorme diferença na competitividade.
2. Melhorar a qualidade e a consistência do produto – os acabamentos terão elevada qualidade, pois os robôs não sofrem de cansaço, distração ou consequências de tarefas repetitivas.
3. Melhorar a qualidade de trabalho para os operadores – estes já não necessitam de trabalhar em ambientes com poeira, quentes ou perigosos.
4. Aumentar a produtividade (aumentando a taxa de saída) – o robô não necessita de muita supervisão, podendo estar a funcionar durante a noite ou aos fins-de-semana.
5. Aumentar a flexibilidade de fabrico do produto – como apenas é necessário programar no controlador do robô, pode-se mudar as tarefas de um robô para outro, maximizando o investimento, ou seja, o mesmo equipamento serve para uma grande variedade de produtos.



6. Reduzir o desperdício de material e aumentar o rendimento – aumenta-se consideravelmente a qualidade de produção com a utilização de robôs, reduzindo a quantidade de rupturas e o acabamento de má qualidade.
7. Cumprir as normas de segurança e melhorar a segurança e saúde no trabalho – os robôs podem assumir tarefas desagradáveis ou com risco para o operador, diminuindo assim o risco de acidentes.
8. Reduzir a rotatividade de trabalho e a dificuldade de recrutamento de trabalhadores – os robôs podem assumir tarefas que requerem habilidade e treino, sem necessitarem de formação contínua.
9. Reduzir os custos de capital (inventário, trabalhos em curso) – as empresas conseguem prever melhor a taxa de produção, garantindo que um serviço é rápido, eficiente e entregue.
10. Economizar espaço nas áreas de produção de elevado valor – os robôs podem trabalhar em espaços reduzidos, de forma a não se perder espaço valioso.

O *RobotStudio* da ABB Robotics é uma ferramenta de simulação que permite que o robô seja programado *offline*, isto é, não é necessário que haja uma fase de tradução para o robô real, considerando-se apenas uma fase final para afinação. Foi lançado em 1998, e, segundo a ABB, está adiantado 5 ou 10 anos em relação aos seus concorrentes de *software* de simulação de robôs. É bastante utilizado em universidades para educar os estudantes sobre as capacidades e aplicações dos robôs, assim como nas indústrias de automação, (Connolly, 2009).

Esta ferramenta permite que os robôs se adaptem a diferentes situações sempre que os requisitos sejam modificados, tornando-se numa vantagem para as indústrias. Estas não precisam de interromper a produção para permitirem a reprogramação dos robôs, caso contrário estariam a acabar com esta vantagem. Isto reduz bastante o tempo de inactividade de produção.

A simulação permite verificar o alcance, a acessibilidade e o tempo de ciclo do robô, podendo ser preparados os caminhos exactos que este percorrerá na sua operação,

assim como colocar todo o sistema em funcionamento. Esta ferramenta permite ainda verificar se existem colisões ao longo do caminho percorrido pelo robô.

Se não existissem equipamentos de teste e ferramentas de simulação, os custos associados ao desenvolvimento de soluções de engenharia sob medida para aplicações de automação, bem como o desempenho imprevisível de qualquer parte do sistema, poderiam ser elevados, pois pode envolver um grande número de resoluções de problemas extra, ou até fazer uma solução inexecutável. A exactidão e o realismo do *RobotStudio* são muito importantes neste tipo de situação, podendo esta ferramenta ser utilizada como uma forma de gerir o risco.

Para programar *offline* com o *RobotStudio* é utilizada a tecnologia *VirtualRobot*. O código que é elaborado e posteriormente executado no computador é exactamente o mesmo que será praticado no controlador do robô. Assim, quando o código estiver totalmente desenvolvido *offline*, é feito o download directo para o controlador, reduzindo o tempo de colocação no mercado.

O *software*, além de simular, também ajuda na elaboração de layouts, assim como na sua concepção. Um dos objectivos da utilização desta ferramenta neste trabalho é registar o tempo que cada robô demora a executar as tarefas que lhes estão atribuídas. Através da simulação realizada consegue-se detectar possíveis estrangulamentos, limitações, tarefas não optimizadas e quais as variáveis realmente importantes neste sistema. A duração de cada tarefa será analisada e comparada com as restantes, através do diagrama de *Gantt*.

O método de *Gantt* consiste em determinar a melhor maneira de posicionar as diferentes tarefas num projecto a executar, ao longo de um período, em função: da duração de cada uma das tarefas, da relação de precedência entre as diversas tarefas, dos prazos a cumprir e das capacidades de tratamento. Inicialmente é necessário definir o projecto a realizar, as diferentes operações a executar, a duração de cada uma das operações e as ligações entre elas. O diagrama resume-se em barras verticais e paralelas que indicam actividades executadas, ou a executar, dispostas em série numa escala de tempo vertical, ou dispostas umas sobre as outras, indicando simultaneidade de prazos.

## 4.2. Layout

A criação de um *layout* adequado pode contribuir para a eficiência de indústrias que requerem uma utilização cada vez mais eficaz dos seus recursos perante um mercado global excessivamente competitivo. O equilíbrio entre a alta capacidade de resposta e a procura dos mercados, tentando manter os custos de produção reduzidos, é um dos grandes problemas com que as empresas se deparam.

O melhor *layout* pode otimizar o rendimento, reduzindo tempos de ciclo, trabalhos em curso, utilização de recursos, tempos mortos e o número de estrangulamentos, influenciando na produtividade da empresa. No entanto a simulação também tem sido sugerida para ajudar na variabilidade de entradas e na incerteza incorporada no processo, para posteriormente se alcançar um *design* mais realista, (Joshi, Tsai, Lam, Srihari, & McGonigal, 2008).

A simulação colabora bastante na elaboração de *layouts* diferentes num curto espaço de tempo e ajuda a ter uma visão mais detalhada e mais exacta da realidade. Através dela os engenheiros conseguem trabalhar numa situação real, apresentando resultados visíveis, com conclusões fundamentadas, para posteriormente aplicarem à realidade.

## 5. PROPOSTAS DE LAYOUT

### 5.1. Pressupostos

O local onde poderá ser implementada uma das possíveis propostas da célula robotizada é no pavilhão que está a ser construído junto das instalações da CoolHaven. Este possui como dimensões: 25000mm x 10000mm x 14630mm (largura x altura x espessura). Em anexo encontra-se a planta do pavilhão em 2D (Anexo B).

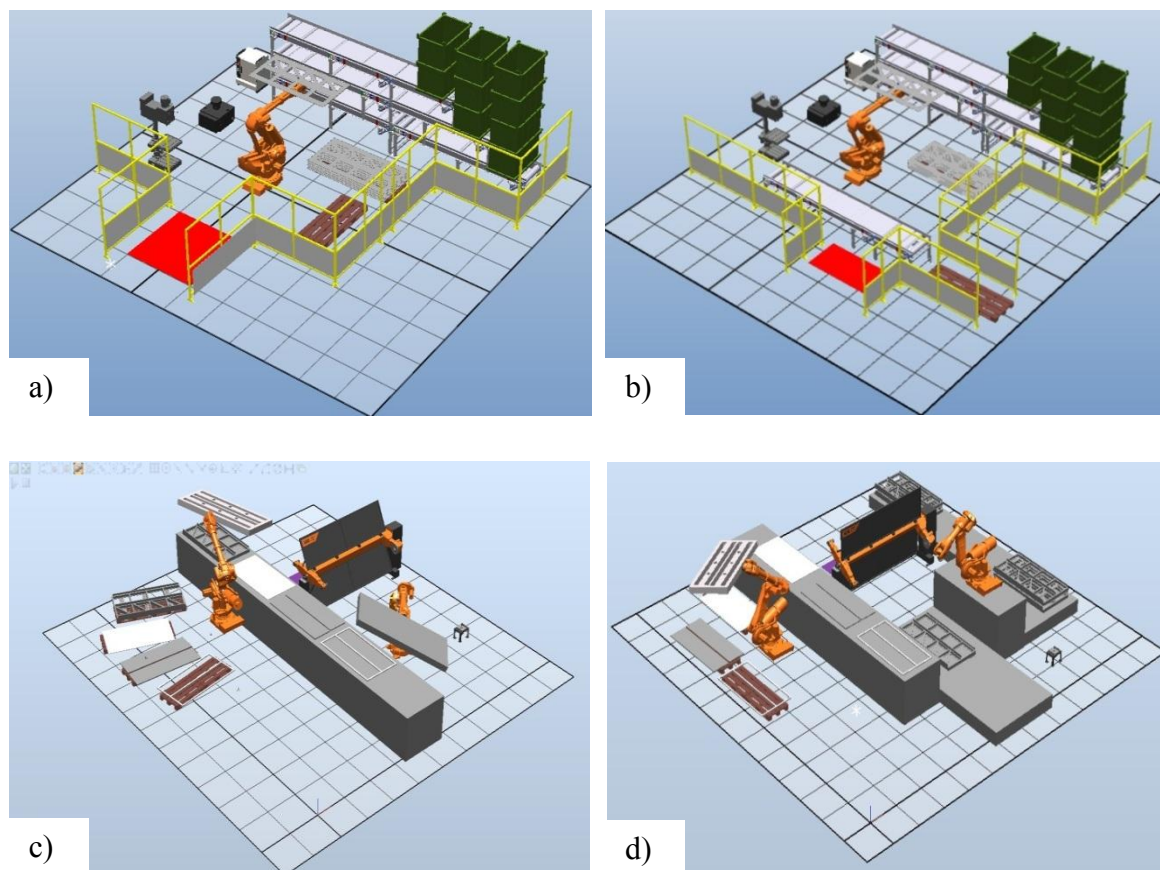
No pavilhão ocorrerão as tarefas de acoplar as placas de OSB, “ripado” e conjunto de lã de rocha a um lado do suporte metálico e posteriormente acoplar as restantes, OSB e conjunto de lã de rocha, ao outro lado. A montagem de paredes inclui desta forma as tarefas de:

- Rebitagem
- Fresagem

É ainda necessário o contributo de um operador para efectuar trabalhos manuais, nomeadamente na passagem de fios e cabos pelo interior do módulo.

O trabalho desenvolvido para alcançar um *layout* mais optimizado e flexível efectuou-se por tentativa e erro, pois não existem teorias nem soluções estudadas que possam servir de guia neste tipo de projecto.

O estudo dos *layouts* foi um processo iterativo. As imagens seguintes ilustram algumas das células robóticas experimentadas, Figura 5.



**Figura 5.** Células robóticas inicialmente propostas (a,b,c,d)

As células robóticas da Figura 5 (a e b) foram dispensadas do portfólio de *layouts* devido à complexidade da passadeira, por transportar materiais como a lã de rocha. A probabilidade de estas células serem inexequíveis é elevada. Na Figura 5 (c e d) apresentam-se *layouts* com menos consistência, pois circulam diferentes materiais na mesma passadeira, o que pode tornar inviável a montagem.

Todas estas células foram descartadas pelo custo e complexidades acrescidas, especialmente no que diz respeito a transportadores, quando comparadas com as sugeridas nos subcapítulos seguintes.

## 5.2. Descrição da Célula Estrela

A concepção da unidade de produção CoolHaven para a montagem de painéis, que são a chave do conceito de construção modular, foi acompanhada pela necessidade de flexibilidade e produtividade. Estes são os requisitos necessários para a linha de montagem de um portfólio de painéis CoolHaven, incluindo módulos com:

- Furo para tomadas e interruptores com diferentes tamanhos e posições
- Simplicidade de carga
- Escalabilidade
- Modularidade
- Integração vertical completa com *software* ERP (*Enterprise Resource Planning*)

As operações a que uma parede modular está sujeita são: manipulação/montagem, rebitem e fresagem. A primeira diz respeito aos movimentos a que um módulo está sujeito para que se realize a montagem. A segunda operação refere-se ao processo de união dos componentes já mencionados, através da colocação de rebites. Por último a fresa serve para maquinar o material, e desta forma abrir os orifícios para tomadas e interruptores.

Nem todos os painéis da casa modular necessitam de operações manuais, portanto, existem módulos simples que não necessitam de furos para tomadas ou interruptores. A Figura 6 esquematiza as duas hipóteses possíveis:

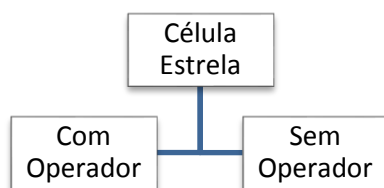


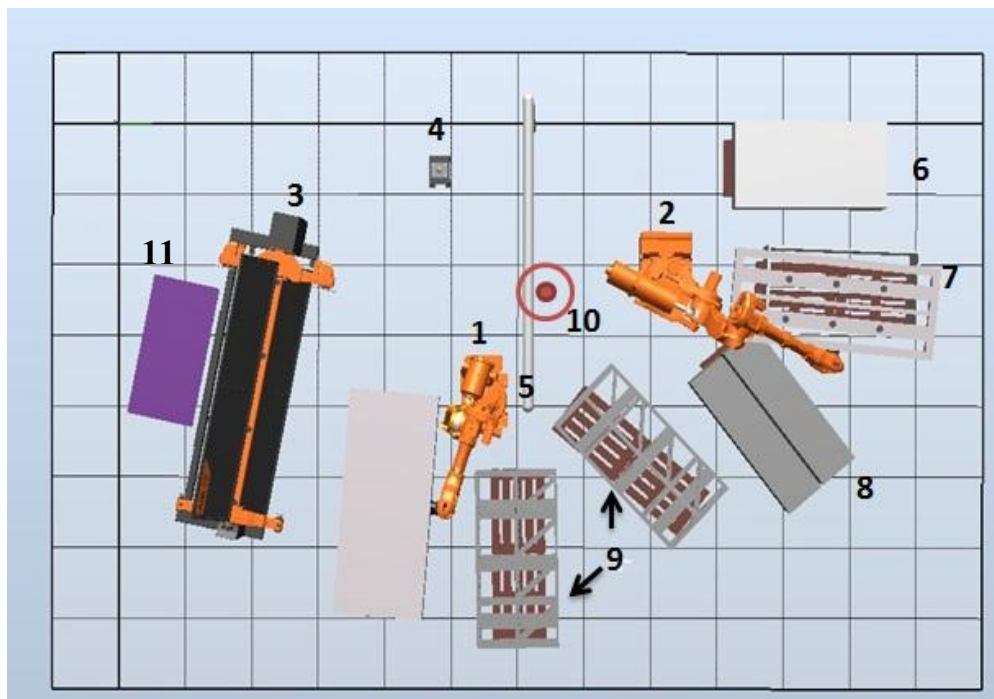
Figura 6. Esquema ilustrativo da célula robótica proposta – Célula Estrela

Realizou-se a simulação da célula robótica proposta que efectua todos os movimentos que um robô detém ao executar as tarefas necessárias ao fabrico de um módulo parede. A simulação feita, através do *RobotStudio*, foi elaborada para paredes modulares que exijam operações manuais.

Os principais equipamentos na célula proposta são:

- Robô 1 - IRB6640 – com capacidade de carga de 200 kg (1)
- Robô 2 - IRB6650S – com capacidade de carga de 125 kg (2)
- Nória (3)
- Fresa (4)
- Rebitadora (5)
- Pilhas de OSB (6), “ripado” (7), lã de rocha (8) e suporte metálico (9)
- Posto do operador (11)

As referências assinaladas encontram-se identificadas na figura seguinte, Figura 7.



**Figura 7.** Ilustração da célula robótica proposta – Célula Estrela

Os robôs possuem ferramentas adequadas, também designadas por *grippers*, sendo um deles de dupla face (robô 2). A nória apresenta uma solução de estação dupla onde o robô funciona de um lado e o operador trabalha do outro, possibilitando a circulação de duas paredes em simultâneo na célula robótica. A rebitadora e a fresa são máquinas fixas, sendo o robô a dirigir-se até elas para garantir que se executam tais funções.

As pilhas contêm 60 placas de OSB, 30 de “ripado”, 30 de conjunto de lã de rocha e 10 de suportes metálicos, tendo que ser abastecidas periodicamente.

O reabastecimento de placas OSB e “ripado” tem que ser feito de 4 em 4 horas, ou seja, quando estiverem finalizadas 30 paredes modulares. O conjunto de lã de rocha, tem que ser reabastecido em períodos mais curtos, a cada 2 horas e 30 minutos, portanto, a cada 15 módulos fabricados. O abastecimento dos suportes metálicos não implica interrupção, pois existem duas pilhas que contêm 5 suportes cada. Quando o robô estiver a utilizar uma pilha, o empilhador poderá abastecer a outra. Para garantir a segurança existe uma divisória entre as pilhas que impossibilitará o robô de alcançar a que está a ser abastecida (não está visível na Figura 7). Perante estas interrupções considerou-se que a célula permanecia inactiva num total de 20 minutos a cada 8 horas.



As tarefas que o robô 1 pratica são:

T1	Transporte do suporte metálico até à posição centro (10) como se de uma bandeja se tratasse.
T2	Rebitagem
T3	Fresagem
T4	Transporte da parede (suporte metálico + placa de OSB, “ripado” e conjunto de lã de rocha) até à nória
T5	O braço do robô que está na nória dirige-se até à pilha de suporte metálico
T6	Aguardar a viragem da nória
T7	Retirar parede da nória
T8	Transporte da parede até à posição centro (10)
T9	Descarregar a parede no produto acabado
T10	O braço do robô que está no produto acabado dirige-se até à pilha de suporte metálico

**Tabela 3.** Tarefas praticadas pelo robô 1

No que respeita ao robô 2, este executa as seguintes tarefas:

T11	Carregar uma placa de “ripado”
T12	Colocar o conjunto de lã de rocha dentro da placa de “ripado”, executado sobre a pilha de lã de rocha
T13	Carregar uma placa de OSB
T14	Carregar um conjunto de lã de rocha
T15	Descarregar o conjunto de lã de rocha e “ripado” sobre o suporte metálico na posição centro
T16	Descarregar placa de OSB no suporte metálico
T17	Descarregar o conjunto de lã de rocha sobre o suporte metálico na posição centro

**Tabela 4.** Tarefas praticadas pelo robô 2

Os robôs 1 e 2 iniciam em simultâneo as suas actividades. O primeiro é responsável por transportar o suporte metálico e movimentá-lo até às posições definidas. O robô 2 terá que colocar as placas de OSB, “ripado” e conjunto de lâ de rocha sobre o suporte metálico, com o propósito de montar a parede modular. Esta será rebitada, fresada e colocada na nória, para que o operador inicie a sua tarefa manual. O robô 1 volta a transportar mais um suporte metálico para lhe acoplarem placas, rebitar e fresar. Este ao colocar a segunda parede na nória já pode recolher a primeira que lá colocou, pois o operador terminou a sua tarefa. Para concluir a montagem do primeiro módulo basta fechar o lado que falta, colocando-se placas de OSB e conjunto de lâ de rocha. Esta parede é novamente rebitada e colocada no produto acabado. A circulação do primeiro painel tem uma duração de 13 minutos, sendo que os restantes demoram sensivelmente 14 minutos.

Nas tabelas seguintes, Tabela 5 e Tabela 6, encontra-se a duração das tarefas executadas por cada robô no fabrico de painéis.

<b>Robô 1</b>	
<b>Trajecto</b>	<b>Duração (seg)</b>
Suporte metálico -> Centro	40 (1º suporte metálico) 23 (restantes suportes)
Rebitagem	50
Fresagem	40
Colocar módulo na nória	27
Aguardar viragem da nória	10
Retirar módulo da nória	20
Nória -> Centro	37
Nória -> Suporte metálico	45
Centro -> Produto acabado	34
Produto acabado -> Suporte metálico	35
<b>Total</b>	<b>5 Minutos e 21 segundos</b>

**Tabela 5.** Duração das tarefas executadas pelo robô 1

<b>Robô 2</b>	
<b>Trajecto</b>	<b>Duração (seg)</b>
OSB	45
OSB -> “Ripado”	51
“Ripado” -> Lã de rocha	23
OSB -> Lã de rocha	62
Centro (coloca placas no suporte metálico) -> Viragem	38
Viragem -> Centro (coloca placas no suporte metálico)	38
<b>Total</b>	<b>4 min e 17 seg</b>

**Tabela 6.** Duração das tarefas executadas pelo robô 2

### 5.3. Descrição da Célula U

A constituição de uma parede e as operações a que esta está sujeita são as mesmas que no *layout* anterior e por isso não serão novamente descritas nesta secção.

Os principais equipamentos na célula proposta são:

- Robô 1 - IRB6650S – com capacidade de carga de 200 kg (1)
- Robô 2 – IRB6650 – com capacidade de 125kg (2)
- Robô 3 – IRB2400L – com capacidade de 7kg (3)
- Robô 4 – IRB6650 – com capacidade de 125kg (4)
- Nória (5)
- Pilhas de OSB (6) (7), “ripado” (8), conjunto de lã de rocha (9) (10) e suporte metálico (11)
- Passadeira 1 (12)
- Passadeira 2 (13)

As referências assinaladas encontram-se identificadas na Figura 8.

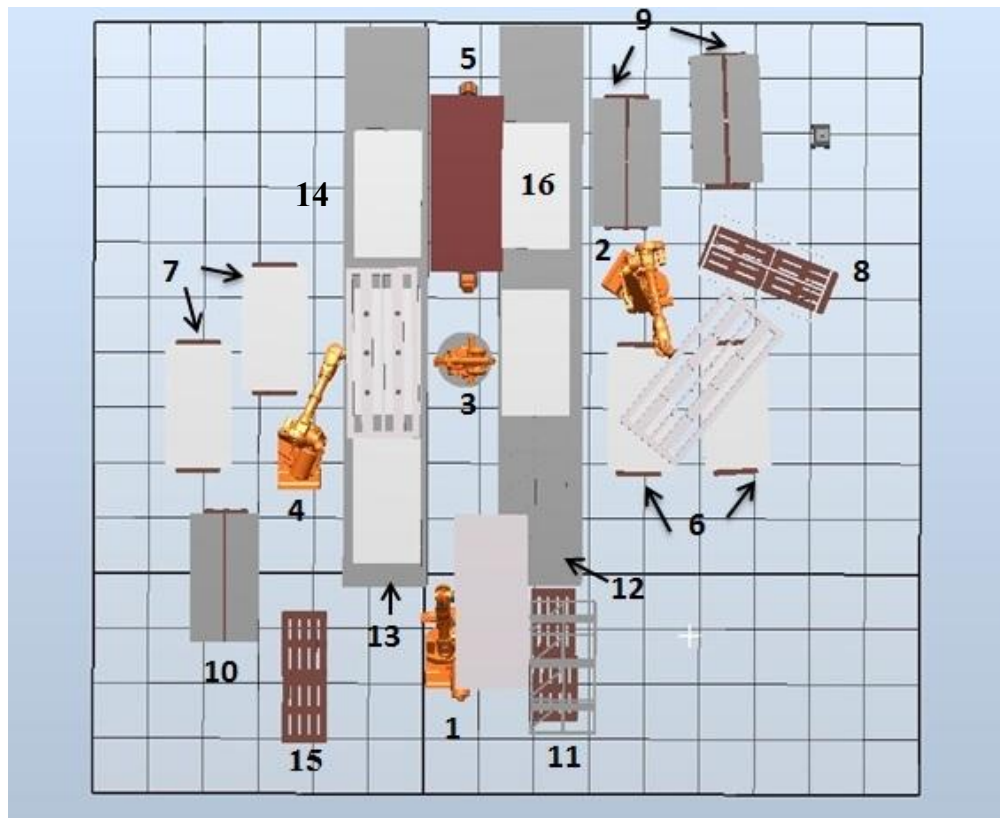


Figura 8. Ilustração da célula robótica proposta – Célula U

Nesta célula robótica os módulos mantêm-se imobilizados sobre uma passadeira, sendo esta a transportá-los, circulando em “U”, até aos restantes robôs para poderem executar as suas tarefas. Trata-se de uma montagem contínua, preparada para circular 5 paredes em simultâneo. Em cada posto ocorrem tarefas distintas que se vão complementando. O desenho da linha de montagem do painel modular foi concebido focado na flexibilidade. O projecto do *layout* em “U” permite um fluxo otimizado de materiais.

Quantidade de material que cada posto de abastecimento admite:

- Pilhas de OSB (6) (7): 180 e 250, respectivamente;
- Pilhas de lã de rocha (9) (10): 90 e 80, respectivamente;
- Pilhas de “ripado” (8): 92
- Suporte metálico (11): 12
- Produto acabado (15): 11

O reabastecimento de placas OSB não é necessário enquanto não estiverem concluídos cerca de 215 módulos, pois as placas que a célula possui suportam o fabrico deste número de paredes modulares. O “ripado” e o conjunto de lã de rocha têm que ser reabastecidos quando se fabricarem 85 módulos. O abastecimento de suportes metálicos e a recolha de painéis completos são feitos a cada 12 paredes. Ao final de 8 horas laborais considerou-se um total de 25 minutos de inactividade da célula, devido à paralisação de tarefas provocado pelo reabastecimento.

Tal como no *layout* anterior, nem todos os módulos parede exigem trabalhos manuais, tratando-se de painéis simples. Posto isto, existe a possibilidade de o fabrico do módulo necessitar ou não de operador (Figura 6, Secção 5.2).

Apenas se simulou em *RobotStudio* o fabrico do módulo parede que obriga a existência de operador.

Na simulação feita pode observar-se que o robô 1 tem o encargo de agarrar o suporte metálico e colocá-lo sobre a passadeira 1, devendo também retirar as paredes concluídas da passadeira 2. Posteriormente as passadeiras avançam, em simultâneo, e o robô 2 irá buscar placas de OSB, “ripado” e conjunto de lã de rocha para serem colocadas sobre o suporte. O robô seguinte (3) rebita e fresa a parede com a ajuda de ferramentas adequadas. Quando estas tarefas estiverem concluídas as passadeiras voltam a avançar novamente. A nória auxilia na viragem da parede, para que o operador possa executar as suas tarefas manuais. Quando este terminar, o módulo é transportado até à posição seguinte e o robô 4 apanha placas de OSB e conjunto de lã de rocha para colocar sobre ele, para posteriormente ser rebitado. O elemento modular encontra-se finalizado e pronto a ser transportado até ao produto acabado, após ter avançado outra posição.

Tarefas executadas pelo robô 1:

T1	O braço do robô dirige-se até à pilha de suporte metálico e coloca um sobre a passadeira
T6	Agarra a parede completa e coloca-a na pilha de produto acabado

**Tabela 7.** Tarefas executadas pelo robô 1

O robô 2 detém as seguintes tarefas:

T2	Agarra uma placa de OSB, “ripado” e conjunto de lâ de rocha
T3	Coloca as placas sobre o suporte metálico que se encontra na passadeira

**Tabela 8.** Tarefas executadas pelo robô 2

O robô 3 deve efectuar as seguintes tarefas:

T4	Rebitagem
T7	Fresagem

**Tabela 9.** Tarefas executadas pelo robô 3

As tarefas que o robô 4 pratica são:

T5	Agarra uma placa de OSB e um conjunto de lâ de rocha
T3	Coloca as placas sobre o suporte metálico que se encontra na passadeira

**Tabela 10.** Tarefas executadas pelo robô 4

Nas tabelas seguintes, Tabela 11, Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14, encontram-se descritas as tarefas, e respectivas durações, que cada robô executa.

<b>Robô 200 kg (Robô 1)</b>	
<b>Trajecto</b>	<b>Duração (seg.)</b>
Centro -> Pilha de suportes metálicos	21
Passadeira 1	27
Centro	19
Passadeira 2	10
Produto acabado	30
<b>Total</b>	<b>1 Minuto e 47 segundos</b>

**Tabela 11.** Duração das tarefas realizadas pelo robô 1

<b>Robô 125 kg (Robô 2)</b>	
<b>Trajecto</b>	<b>Duração (seg.)</b>
OSB -> “Ripado” -> Lã de rocha	90
Passadeira 1 -> Vira -> Passadeira 1	80
<b>Total</b>	<b>2 Minutos e 50 segundos</b>

**Tabela 12.** Duração das tarefas realizadas pelo robô 2

<b>Robô 7 kg (Robô 3)</b>	
<b>Trajecto</b>	<b>Duração (seg.)</b>
Rebitar	45
Mudar de ferramenta	25
Fresar	54
<b>Total</b>	<b>2 Minutos e 4 segundos</b>

**Tabela 13.** Duração das tarefas realizadas pelo robô 3



---

<b>Robô 125_1 kg (Robô 4)</b>	
<b>Trajecto</b>	<b>Duração (seg.)</b>
OSB -> Lã de rocha	54
Passadeira 2 -> Vira -> Passadeira 2	81
<b>Total</b>	<b>2 Minutos e 15 segundos</b>

**Tabela 14.** Duração das tarefas realizadas pelo robô 4

A simulação descrita e abordada nesta secção considerou que as passadeiras 1 e 2 se encontravam sincronizadas, ou seja, avançavam em simultâneo.

Uma possibilidade de otimizar o processo de fabrico é ter passadeiras assíncronas. O módulo avança para o posto seguinte quando a tarefa estiver concluída, sem necessitar de esperar que terminem as tarefas executadas na outra passadeira. A passadeira 1 possui um espaço vazio, junto à nória (Posto 16 da Figura 8), que poderá servir de acomodação a um módulo, o que possibilita a circulação de 6 painéis em simultâneo.

## 6. ANÁLISE DE TEMPOS POR SIMULAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 6.1. Célula Estrela

Para analisar as tarefas realizadas pelos robôs recorre-se ao diagrama de *Gantt*.

Nas subsecções seguintes são analisados os tempos das tarefas necessárias ao fabrico de módulos parede que exijam ou não operações manuais ( 6.1.1 e 6.1.2, respectivamente). Finaliza-se com a discussão dos resultados desta célula proposta (6.1.3).

#### 6.1.1. Com operador

Pode ser observado no diagrama da Figura 9 que as tarefas realizadas pelo robô 1 estão identificadas pela cor laranja, as do robô 2 pela cor azul e o trabalho manual executado na nória pela cor amarela. É de extrema importância analisar os tempos de fabrico nos vários movimentos que o robô executa, para se poder optimizá-los e conseguir detectar onde existam períodos de espera e possíveis estrangulamentos.

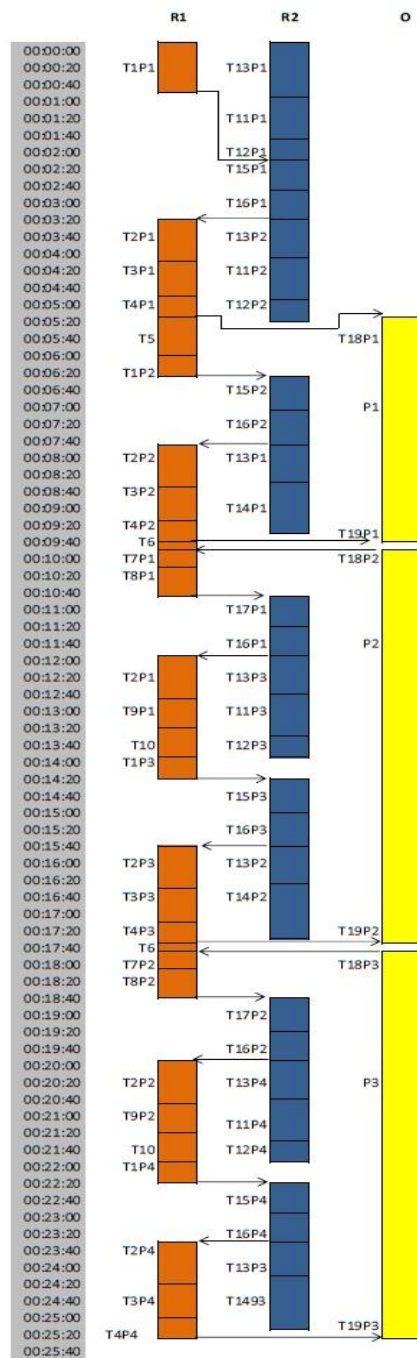


Figura 9. Diagrama de Gantt referente à Célula Estrela- Com operador

Como circulam 2 paredes em simultâneo na célula proposta, a cada 8 minutos estará uma parede completa, como se pode verificar no diagrama. A primeira parede é colocada na pilha de produto acabado ao fim de 13 minutos e 10 segundos e a segunda aos 21 minutos e 10 segundos. O operador tem cerca de 8 minutos para executar o trabalho manual necessário. Caso seja necessário aumentar a duração da tarefa manual implica que

todos os tempos referidos até agora sejam modificados, aumentando o tempo entre cada parede concluída.

No *layout* proposto pode-se concluir que a cada 8 horas laborais estarão 57 painéis fabricados. Uma casa que usufrua de 160 módulos necessita de 22 horas e 20 minutos, ou seja, cerca de 3 dias em horário laboral para concluir o seu fabrico.

### **6.1.2. Sem operador**

Nem todos os elementos modulares necessitam de operações manuais, o que torna desnecessário a existência de um operador. Em paredes simples apenas se colocam placas sobre o suporte metálico, procedendo-se à rebitagem. Recorre-se à nória exclusivamente para virar a parede, ou seja, para que o robô consiga segurar na parede com o verso desta voltado para cima. Prossegue-se com o fecho da parede. Inicia-se um novo ciclo, ou seja, há o transporte de um novo suporte metálico.

A duração e relação das tarefas podem ser analisadas no diagrama de *Gantt* da Figura 10.

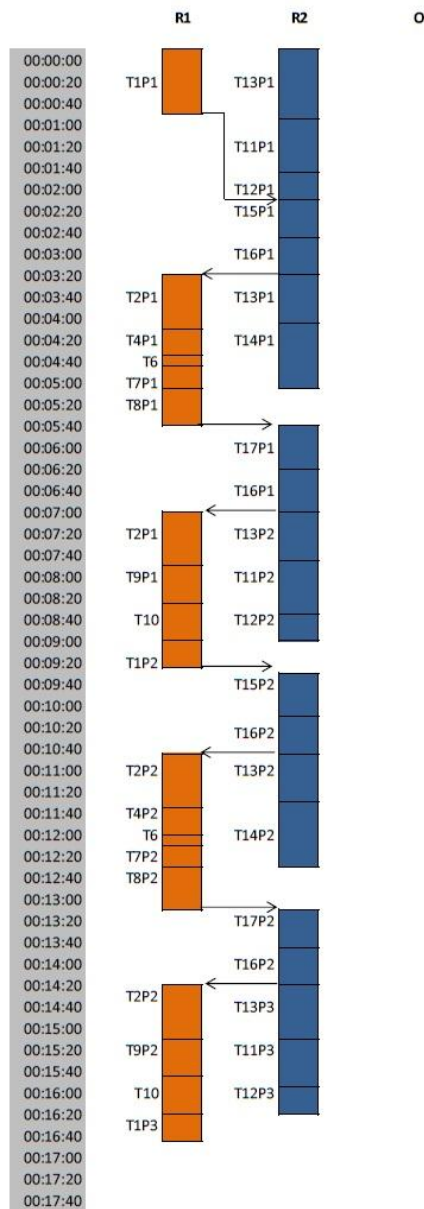


Figura 10. Diagrama de Gantt referente à Célula Estrela - Sem operador

O fabrico do primeiro painel demora sensivelmente 8 minutos e 15 segundos e os restantes cerca de 6 minutos e 30 segundos. O robô 1 tem 1 minuto e 20 segundos de tempo morto e o robô 2 de 40 segundos.

Fabrica-se um módulo parede a cada 6 minutos e 30 segundos.

### 6.1.3. Discussão de resultados

A Tabela 15 exhibe o número de módulos fabricados ao longo do tempo, nas duas hipóteses descritas, considerando a imobilização da célula para reabastecimento.

Célula Estrela			
Com Operador		Sem Operador	
Número de Paredes Modulares	Duração (min)	Número de Paredes Modulares	Duração (min)
1	8	1	6,5
57	480 (8 Horas)	70	480 (8 Horas)
160	1340 (22 Horas e 20 min)	160	1080 (18 Horas)

**Tabela 15.** Número de módulos fabricados e sua duração – Célula Estrela

Numa parede modular normal, em que é exigido operador, circulam 2 módulos em simultâneo no mesmo *layout*.

Quando o módulo não necessita de furos para tomadas, significa que o operador é desnecessário. Nesta situação apenas circula na célula um módulo de cada vez, o que faz reduzir o tempo entre cada painel fabricado, pois o tempo da fresa é dispensado.

## 6.2. Célula U

Para modelar a planificação das tarefas necessárias para a realização da montagem de paredes, recorreu-se a um diagrama de *Gantt*, no qual é possível visualizar o avanço das diferentes etapas da montagem. Não foi considerado o tempo de passagem da passadeira entre postos de trabalho.

Na análise inicial da célula consideram-se dois cenários, um com passadeiras síncronas e outro com assíncronas. No caso das passadeiras sincronizadas, ou seja, quando avança uma a outra avança juntamente, existe a possibilidade de reduzir as necessidades de actuação mecânica, utilizando apenas um motor para as duas passadeiras. Nesta situação os robôs teriam que aguardar que as tarefas de ambas as passadeiras estejam concluídas para que o módulo avance mais um posto. Consequentemente, os tempos de espera são maiores, caso as passadeiras avançassem logo que a tarefa esteja finalizada. Podem ser analisados os diagramas de *Gantt* que constam em anexo, (Anexo C e Anexo D), que auxiliam na recolha destas conclusões.

Dados os tempos de espera verificados no caso de passadeiras síncronas, no restante trabalho considera-se apenas a situação das passadeiras assíncronas.

### 6.2.1. Célula U com 6 postos e operador

Nesta situação, quando os robôs 2 e 3 tiverem concluído as suas tarefas de colocar placas, rebitar e fresar, respectivamente, a passadeira pode avançar uma posição, posto 16 (Figura 8 do Capítulo 5), não aguardando pela finalização das tarefas executadas na outra passadeira. O período em que o módulo se acomoda nesse posto, até ser transportado pela nória para o operador, é sinalizado no diagrama, diferenciando a cor (azul), na coluna do operador.

Esta célula proposta nas condições referidas possibilita a circulação de 6 módulos em simultâneo.

O diagrama seguinte, Figura 11, mostra a análise de tempos nessa situação (hipótese 2).



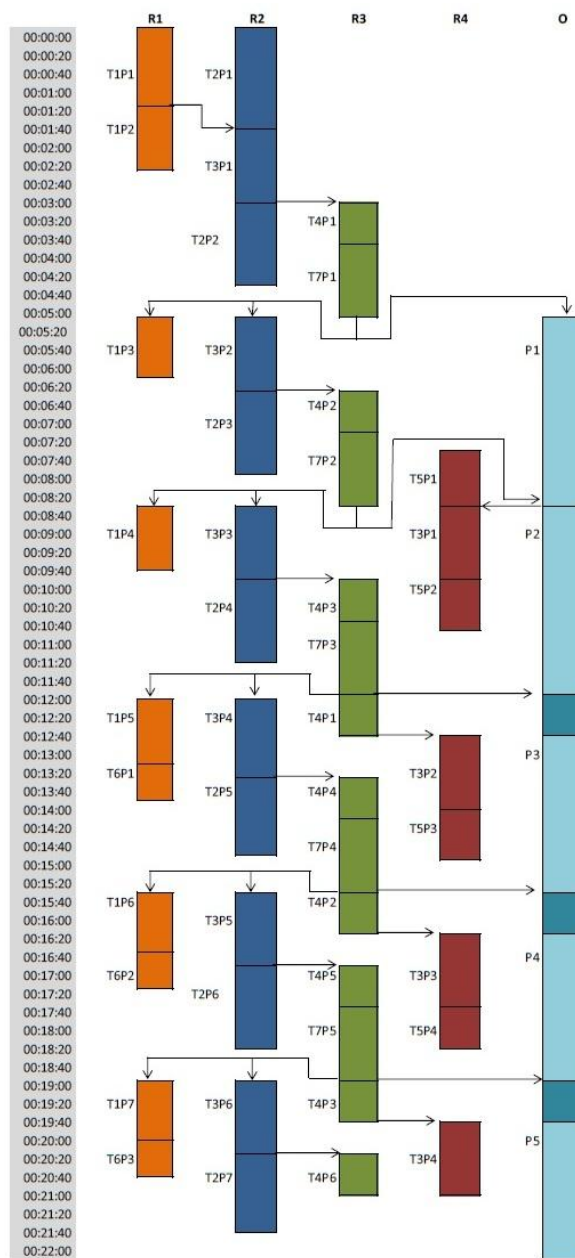


Figura 11. Diagrama de Gantt referente à hipótese U6 com operador

Ao analisar o diagrama pode verificar-se que entre cada módulo concluído decorre cerca de 3 minutos e 25 segundos, portanto, este é o tempo que o operador terá para efectuar os trabalhos manuais.

É de destacar que as tarefas mais demoradas ocorrem na passadeira 1, ou seja, é nela que são colocadas placas de OSB, “ripado” e conjunto de lã de rocha e ainda a parede é rebitada e fresada. Comparando com a outra, apenas se colocam placas de OSB e conjunto de lã de rocha e a parede é rebitada.

É visível no diagrama que existe tempo de inatividade nos robôs. Este período pode ser reduzido, se se “desdobrarem” as tarefas mais demoradas, ou seja, que limitam a optimização do processo de fabrico. Analisando o diagrama, conclui-se que o robô 3 executa tarefas (rebitagem e fresagem) que impossibilitam a redução de tempos de espera. Para contornar esta limitação e otimizar os tempos de espera, propõe-se uma “actualização” da célula proposta, recorrendo à aquisição de mais um robô e um operador. O aperfeiçoamento do *layout* é analisado posteriormente, nas subsecções 6.2.3 e 6.2.4.

### **6.2.2. Célula U com 6 postos e sem operador**

Como já foi referido, nem todas as paredes modulares necessitam de operações manuais. Sendo assim, o operador é desnecessário neste posto de trabalho e qualquer módulo que passe no posto do operador, posição 14 (Figura 8 do Capítulo 5) continuará até à seguinte, ou seja, até ao robô 4. A tarefa de fresar também é excluída, pois o módulo não necessita de furos para tomadas ou interruptores, tratando-se de painéis simples.

O tempo que o robô 1 terá que esperar para voltar a transportar um suporte metálico para a passadeira é de 1 minuto e 20 segundos. O robô 2 não tem tempo inactivo, ou seja, a sua taxa de utilização é de 100%. No que respeita ao robô 3 terá que esperar 1 minuto e 30 segundos para voltar a rebitar as paredes de ambas as passadeiras. Por último, o robô 4 para colocar as placas sobre a parede terá que ficar imobilizado durante 50 segundos, como pode ser observado na Figura 12.

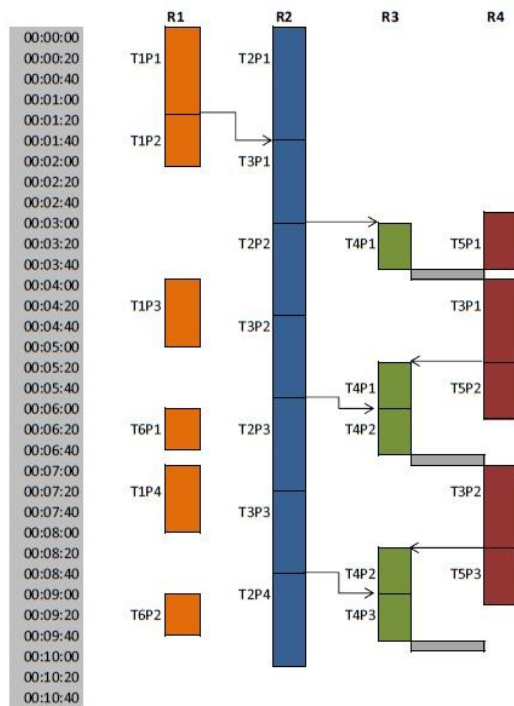


Figura 12. Diagrama de Gantt referente à hipótese U6 sem operador

O robô 2 demora mais tempo que o robô 4 a ir buscar as placas necessárias á montagem do módulo. Como o R4 vai buscar OSB e conjunto de lâ de rocha mais rapidamente que o R2, pois este irá acoplar placas de OSB, “ripado” e conjunto de lâ de rocha ao seu *grripper*, o R3 irá rebitar primeiro na passadeira 2 e só depois na 1. Portanto, o posto 16 não é vantajoso nesta hipótese, pois não acomoda o módulo parede.

Sem operador e com passadeiras assíncronas, o suporte metálico depois de revestido com placas é rebitado e dirigido até á posição seguinte, onde a nória ajuda na viragem, para posteriormente lhe colocarem as restantes placas e ser rebitado, colocando-o no produto acabado.

O modulo parede circula na célula sensivelmente cerca de 7 minutos e 40 segundos e estará fabricado a cada 3 minutos.

### 6.2.3. Célula U com 8 postos e operador

Como se trata de um *layout* expansível, há a possibilidade de acrescentar mais um posto em cada passadeira, aumentando o seu comprimento (12 metros). Deste modo, a passadeira 1 terá lugar para mais um robô (R5) e a passadeira 2 proporciona a existência de dois operadores. A Figura 13, ilustra o *layout* proposto com o aumento da passadeira.

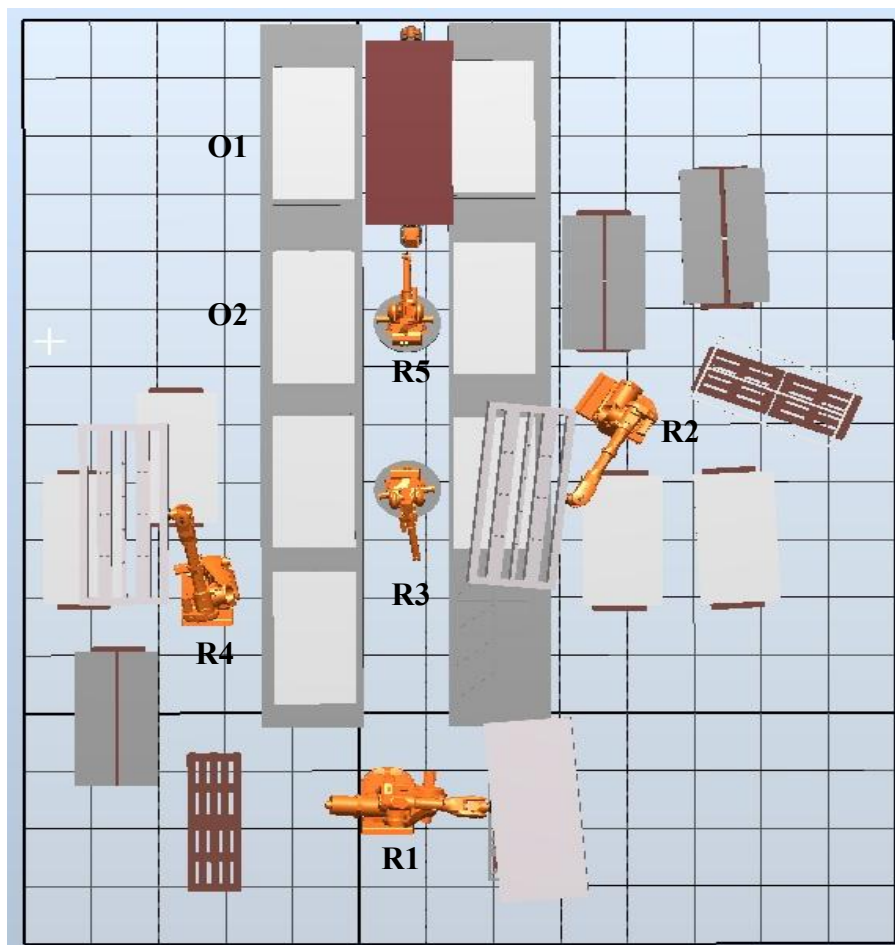


Figura 13. Ilustração da célula robótica proposta – Célula U com 8 Postos (U8)

O suporte metálico é colocado na passadeira 1, avança uma posição e são acopladas placas de OSB, “ripado” e conjunto de lã de rocha pelo robô 2. Prossegue-se com a tarefa de rebitagem, feita pelo robô 3, no mesmo posto. O suporte avança mais uma posição e o robô 5 inicia a maquinagem do material. Depois de terminado, o suporte segue até ao próximo posto, servindo-se da nória para aceder à passadeira 2. Iniciam-se as tarefas manuais executadas pelos operadores. Estes possuem tarefas complementares, em que o módulo terá que passar e sofrer acções por ambos. Posteriormente são acopladas placas de OSB e conjunto de lã de rocha ao módulo para se prosseguir com a rebitagem. A parede modular pode ser colocada na pilha de produto acabado.

O diagrama da Figura 14 analisa a duração das tarefas e a relação das mesmas, nos vários robôs.

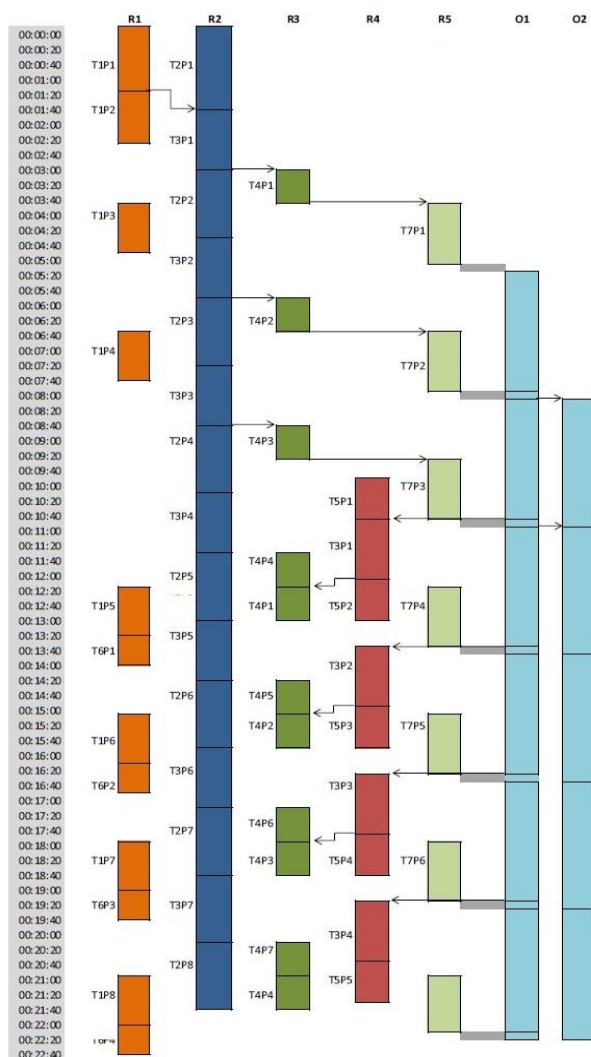


Figura 14. Diagrama de Gantt referente à hipótese U8

Como se pode verificar, os tempos de inactividade dos robôs são menores, comparado com a hipótese de 6 Postos (U6). O robô 1 possui 1 minuto de inactividade, o robô 2 tem uma taxa de utilização de 100%, limitando assim uma nova optimização do processo. Os robôs 3 e 5 contêm maior tempo morto devido ao “desdobramento” de tarefas. O robô 4 permanece inactivo durante 35 segundos.

Esta proposta, U8, proporciona a existência de 2 operadores, o que implica o aumento da duração das tarefas manuais. Cada operador terá 2 minutos e 30 segundos para executar as suas operações sobre o módulo.

Possibilita a circulação de 7 módulos em simultâneo, estando um módulo parede fabricado a cada 3 minutos.

Comparando com a hipótese U6, que necessitava de 3 minutos e 25 segundos para fabricar uma parede modular, esta produz mais 8 módulos a cada 100 fabricados. Tem a consequência de ter um acréscimo de 40.000 € na expansão da passadeira e aquisição de um novo robô, não considerando o valor do operador.

#### **6.2.4. Célula U com 8 postos e sem operador**

A inexistência de operadores não implica aumento da taxa de produção de módulos parede. Todo o processo de fabrico está limitado pelo robô 2, que possui uma taxa de utilização de 100%. Portanto, a cada 3 minutos estará uma parede modular fabricada.

### 6.2.5. Discussão de resultados

Através da análise feita com passadeiras sincronizadas, observa-se que os tempos de espera são maiores, comparado com passadeiras assíncronas. Assim como o tempo entre cada módulo finalizado também é maior. Optou-se por se apresentar apenas os resultados quando as passadeiras são assíncronas.

A Tabela 16 exhibe os tempos de espera do operador, dos robôs 2, 3 e 4 e ainda o tempo que demora um módulo a estar concluído.

	Com Operador		Sem Operador	
	6 Postos (U6)	8 Postos (U8)	U6	U8
Tempo Operador	3 min e 25 seg	2 min e 35 seg (Total: 5 min e 10 seg)	0 seg	0 seg
Tempo Parede Concluída	3 min e 25 seg	3 min	3 min	3 min
Tempo Espera R2	40 seg	0 seg	0 seg	0 seg
Tempo Espera R3	40 seg	1 min e 30 seg	1 min e 30 seg	1 min e 30 seg
Tempo Espera R4	1 min e 25 seg	35 seg	50 seg	35 seg

**Tabela 16.** Tempos de espera dos equipamentos com passadeiras assíncronas

Ao analisar os resultados pode-se verificar que o robô 2 não tem tempo de espera, o que limita todo o processo de fabrico.

A hipótese U8 possibilita que o operador tenha mais tempo para efectuar as suas tarefas. Estas devem ter uma duração total de 5 minutos e 10 segundos, o que de acordo com os dados disponibilizados pela empresa CoolHaven é suficiente.

Na Tabela 17 é feita uma comparação que visa mostrar o número de módulos fabricados por cada proposta, U6 e U8, considerando a existência de um operador.

<i>Layout 2</i>			
<b>Passadeiras Assíncronas</b>			
<b>6 Postos (U6)</b>		<b>8 Postos (U8)</b>	
Número de Módulos	Duração (min)	Número de Módulos	Duração (min)
1	3,4	1	3
133	480 (8Horas)	151	480 (8Horas)
160	571 (9Horas e 30min)	160	505 (8Horas e 25min)

**Tabela 17.** Número de módulos fabricados e sua duração – Célula U

Sem operador, em ambas as opções, o tempo de fabrico de um módulo é o mesmo (3 minutos), logo fabrica-se o mesmo número de módulos no mesmo período.

Observando as tabelas anteriores, a melhor solução é a célula robótica com 8 postos, pois tem menor tempo de espera e fabrica maior número módulos.



## 7. CONCLUSÕES

Inicialmente existia pouca informação estruturada e fundamentada, ou seja, não havia muita informação sobre o tipo de montagem, o tipo de materiais, o que montar, não estando nada delineado. Como o objectivo passa por projectar uma célula robotizada, e a CoolHaven nunca havia montado elementos modulares em ambiente industrial, tornou-se difícil para a empresa facultar informações de como e o que queria montar e quais as operações de montagem. Inicialmente, esta falta de informação tornou-se num grande obstáculo em prosseguir com trabalho fundamentado e coerente. Ao longo dos meses a informação definitiva e fundamentada começou a ser recebida e tratada. Foram propostas duas células robóticas que respondem aos requisitos da montagem de paredes modulares.

A primeira proposta assenta num conceito simples, em que as tarefas de montagem são executadas enquanto o robô segura o suporte metálico. Possibilita a circulação de duas paredes modulares em simultâneo, oferecendo grande produtividade. Possui como inconveniente o reabastecimento periódico, o que implica a imobilização da célula. A parede modular pode necessitar de operações manuais ou apenas ser painéis simples. No primeiro caso, em que é necessário a existência de um operador, estará um módulo parede concluído a cada 8 minutos. No segundo, fabrica-se um módulo a cada 6 minutos e 30 segundos.

	Com Operador	Sem Operador
Número de Casas Modulares Fabricadas Por Ano	111	136

**Tabela 18.** Resultados obtidos da Célula Estrela

A segunda proposta desfruta de uma distribuição em “U”, que possibilita um maior fluxo de materiais, com recurso a passadeiras. Estas movimentam os materiais até à tarefa seguinte, possibilitando a circulação até 7 paredes em simultâneo. Possui 5 equipamentos robotizados. O tempo de paralisação da célula para reabastecimento é menor, comparado com primeira opção. No caso de os módulos necessitarem de operações manuais, estes são fabricados a cada 3 minutos, considerando passadeiras assíncronas e que actuam 2 operadores. Caso a parede modular seja um painel simples, demora também 3 minutos a ficar concluída. A assincronização das passadeiras diminui o tempo morto dos robôs. O inconveniente deste *layout* é existir a possibilidade de o estrangulamento não estar nos robôs, mas sim nas operações manuais, ou seja, o operador não ter tempo para executar as suas tarefas.

	Com Operador		Sem Operador	
	U6	U8	U6	U8
Número de Casas Modulares Fabricadas Por Ano	259	294	294	294
Diferença	35		0	

Tabela 19. Resultados obtidos da Célula U

Ao final de um ano fabricam-se mais 35 casas modulares se a célula proposta usufruir de 8 postos (U8), caso exijam operações manuais. Se se tratar de painéis simples, o número de módulos fabricados não difere consoante o número postos na passadeira.

Comparando directamente as duas células propostas (*layout* 1 e 2), observando o número de módulos parede fabricados por ano, o *layout* 2 é mais vantajoso, como pode ser observado no gráfico seguinte.

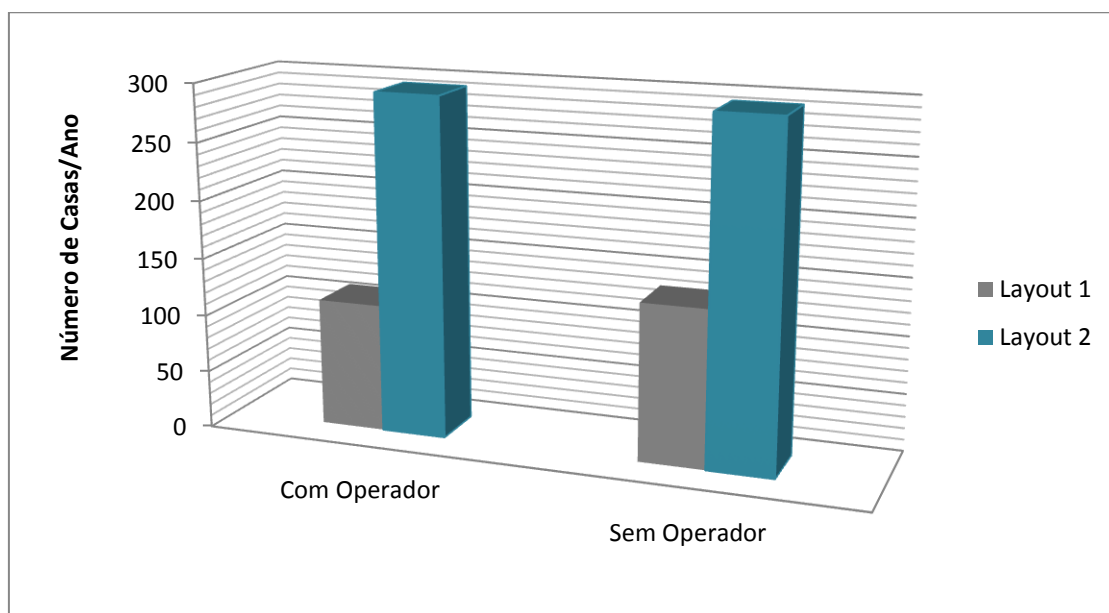


Figura 15. Gráfico comparativo das duas células robóticas propostas

A primeira célula proposta tem uma cadência mais baixa em relação à segunda proposta, como pode ser visualizado na Figura 15, ajustando-se a baixos níveis de produção; 111 casas/ano. A célula em U, apesar de possuir maior investimento, torna-se mais flexível e produtiva.

Uma estimativa, pouco precisa e estudada, do custo da célula Estrela, da U6 e da U8 é: 450.000, 750.000 e 800.000€, respectivamente.

Devido à falta de tempo, os movimentos que os equipamentos robóticos executam na simulação feita não estão otimizados. Portanto, os tempos analisados poderiam ainda ser mais reduzidos com a melhoria da simulação feita nas duas células propostas. Não é feita uma análise de custo/benefício mais aprofundada devido à inexistência de dados necessários disponíveis.

As propostas otimizam as tarefas dos robôs, mas como trabalho futuro sugere-se que se estude qual a duração do trabalho manual. Desta forma, pode-se evitar ter uma célula dispendiosa e otimizada em que o estrangulamento esteja no operador. As propostas devem ainda ser comparadas com o fabrico totalmente manual de um módulo parede.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Futureng*. (2003). Obtido em Fevereiro de 2012, de <http://www.futureng.pt/osb>
- ABB. (12 de Março de 2008). *10 Good Reasons to Invest in Robots*. Obtido em 24 de Maio de 2012, de [http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/8305539498e287a4c125746000389489/\\$file/guide%20to%20the%2010%20good%20reasons%20to%20invest%20in%20robots.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/8305539498e287a4c125746000389489/$file/guide%20to%20the%2010%20good%20reasons%20to%20invest%20in%20robots.pdf)
- Brooks, R. J., Robinson, S., & Lewis, C. (2001). *Simulation and Inventory Control*. Palgrave MacMillan.
- Connolly, C. (2009). Technology and applications of ABB RobotStudio. *The Industrial Robot, vol36*, pp. 540-545.
- CoolHaven. (2012). *CoolHaven*. Obtido em Fevereiro de 2012, de <http://www.coolhaven.pt/index.php>
- Filho, P. C. (1998). *O Modelo de Simulação do GPCP-1: Jogo do Planejamento e Controle da Produção*. Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Joshi, A., Tsai, P.-F., Lam, S. S., Srihari, K., & McGonigal, J. (2008). A Simulation Approach for New Facility Layout Design. *IIE Annual Conference*, pp. 828-833.
- Lemos, P. (2009). *Um simulador para apoio à decisão em Gestão da Manutenção de infra-estruturas ferroviárias*. Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, Engenharia Mecânica.
- Nivelson, A. (s.d.). Obtido em Fevereiro de 2012, de Acústica NivelSom: <http://www.nivelson.com.br/isolante-acustico-la-de-rocha-s1449.html?s=33>

## 9. ANEXOS

### 9.1. Anexo A

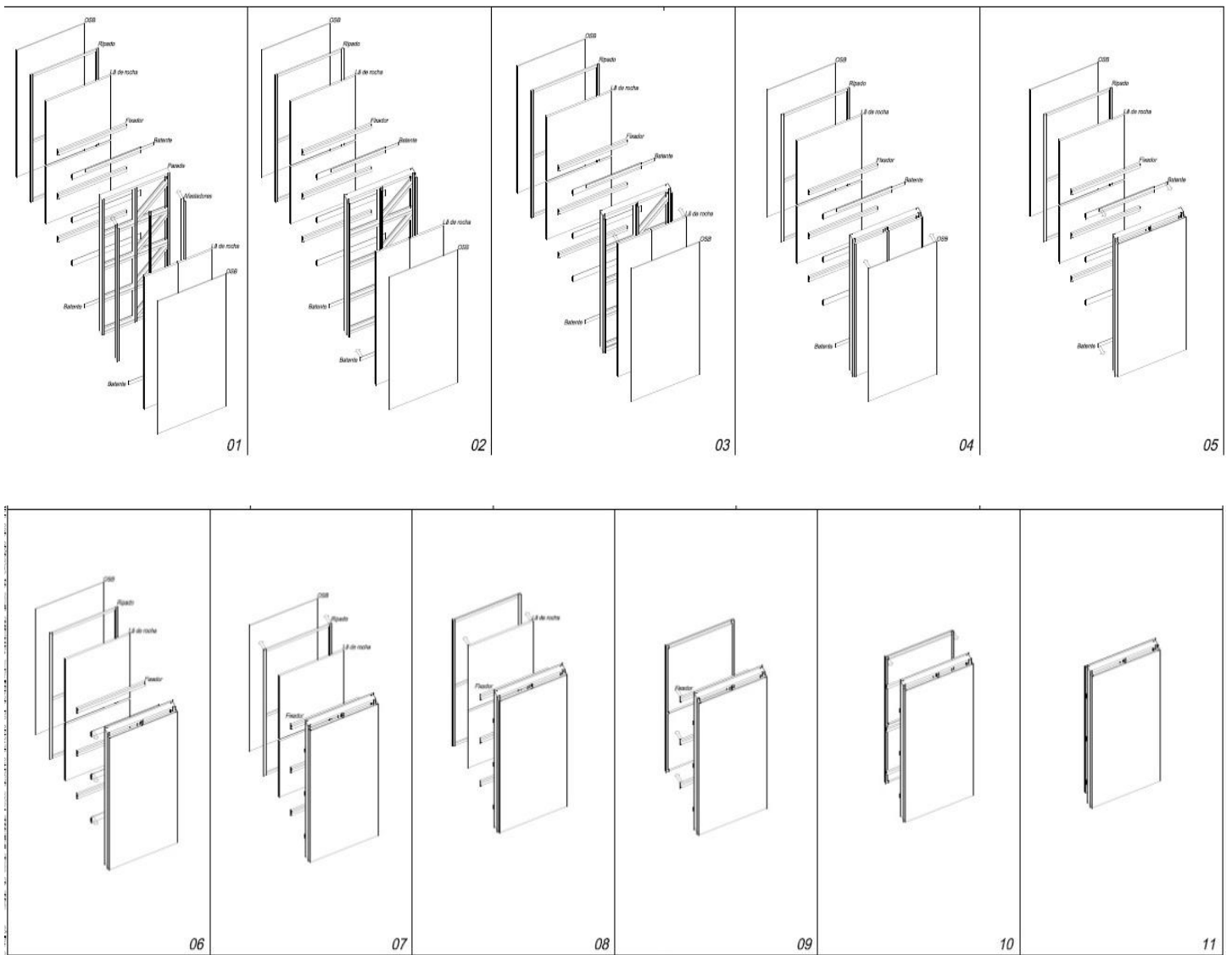


Figura 16. Esquema de montagem de um módulo parede

### 9.2. Anexo B

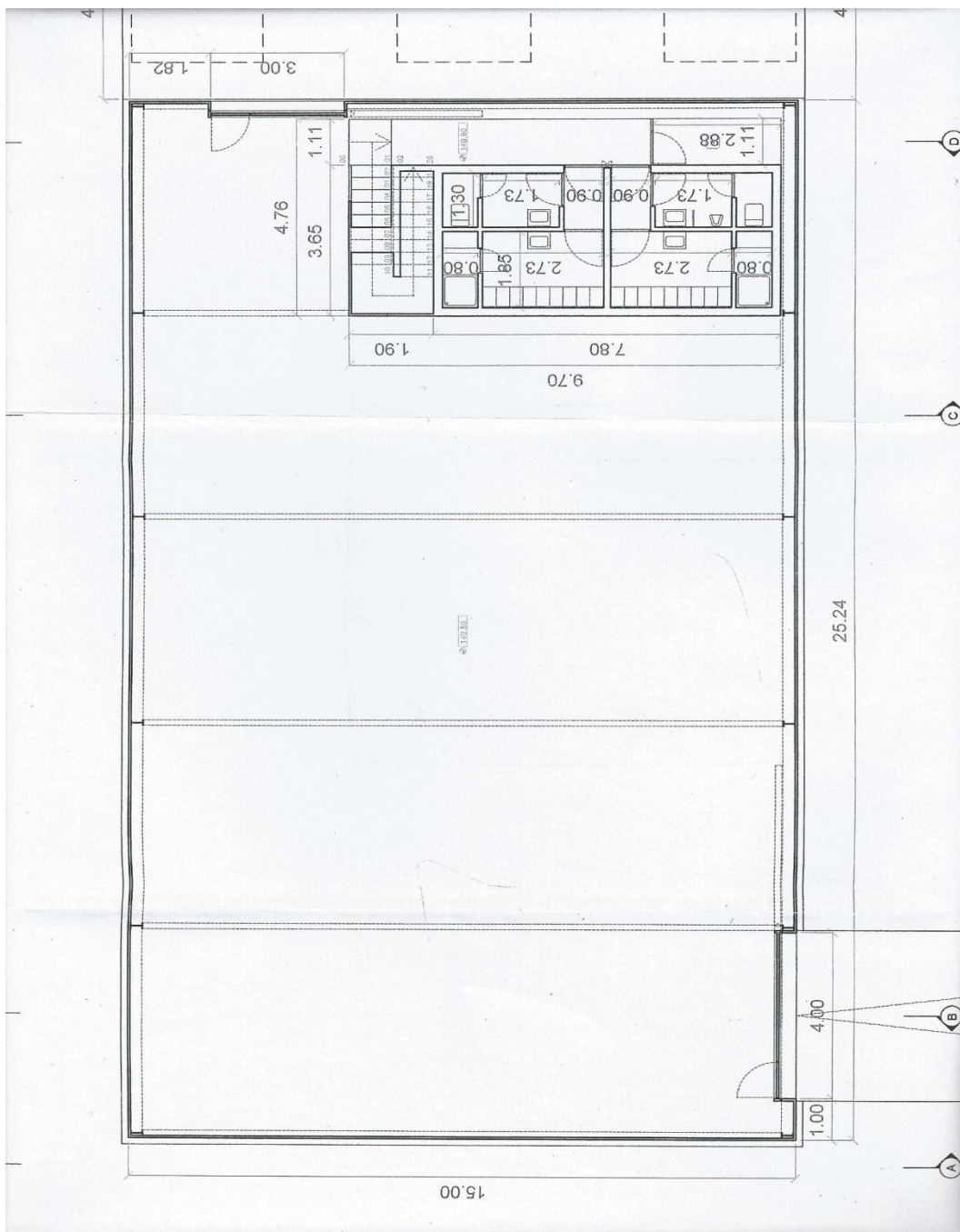


Figura 17. Planta digitalizada do pavilhão CoolHaven

### 9.3. Anexo C

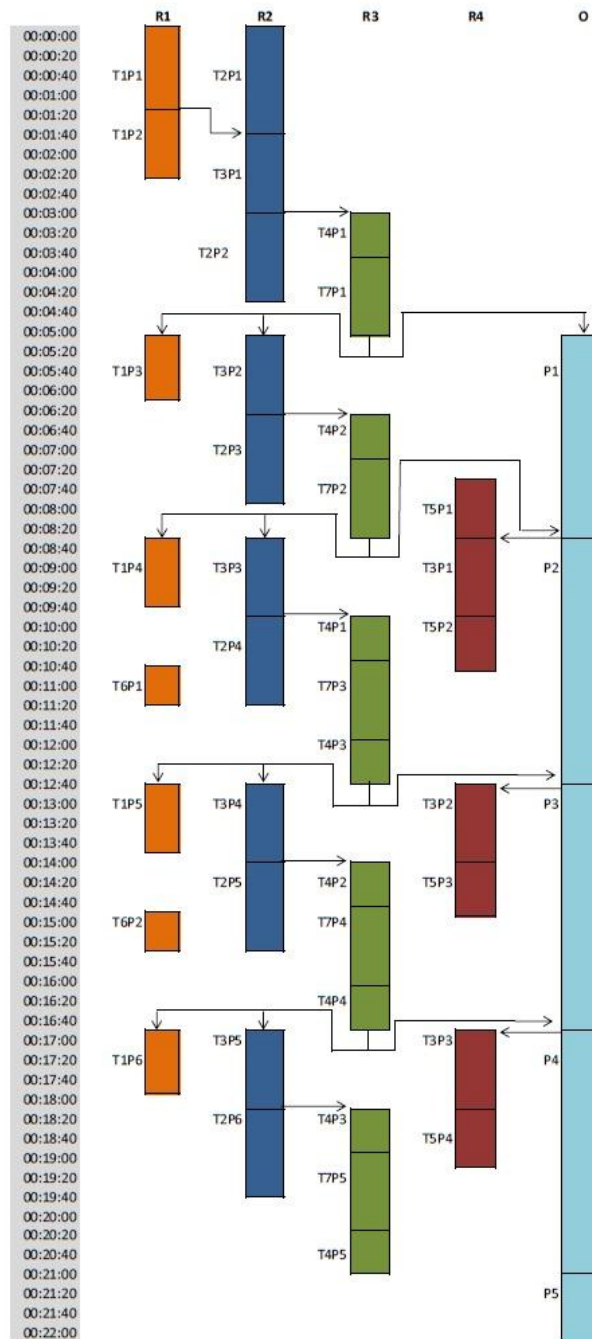


Figura 18. Diagrama de Gantt referente à Célula U – Sincronizado com operador

### 9.4. Anexo D

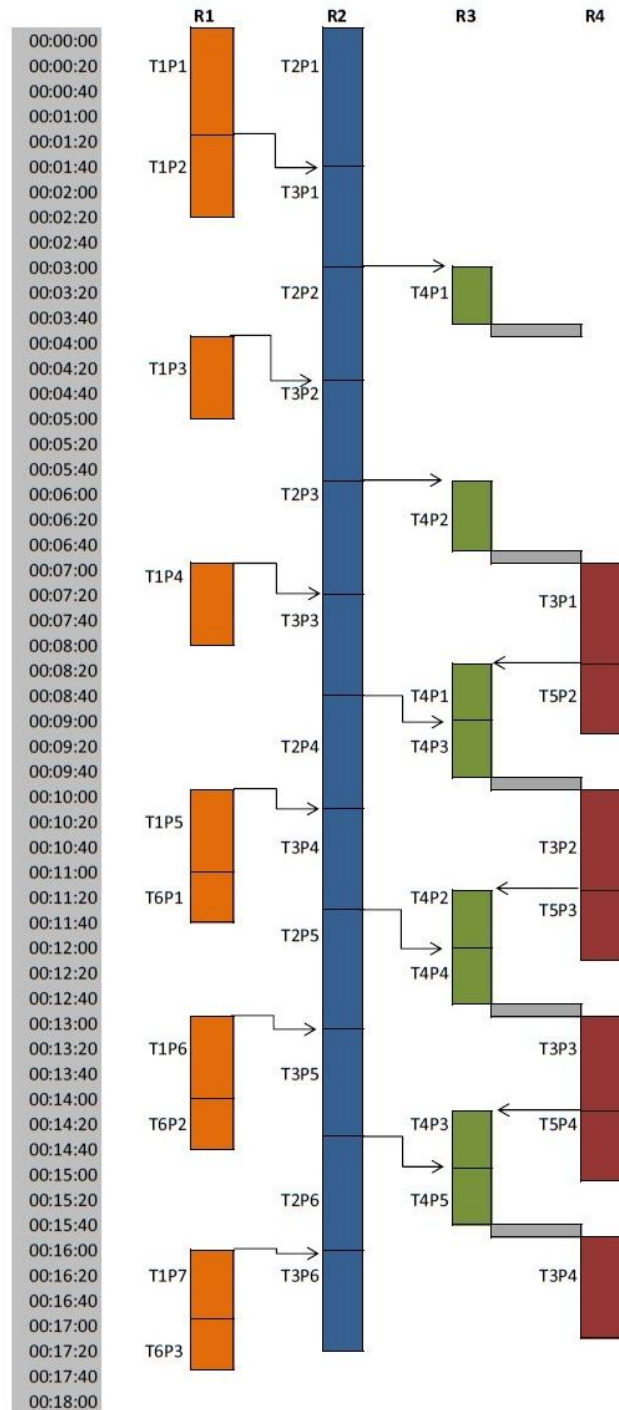


Figura 19. Diagrama de Gantt referente à Célula U – Sincronizado sem operador