



**João Miguel Grácio
Nicolau**

**ESTUDO DO AUMENTO DA CAPACIDADE DE UMA
LINHA DE PRODUÇÃO DE PAINÉIS SOLARES**

Relatório de Projecto apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, realizado sob a orientação científica da Professora Doutora Helena Maria Pereira Pinto Dourado e Alvelos, Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da Universidade de Aveiro e co-orientação da Licenciada Ana Raquel Reis Couto Xambre, Assistente Convidada do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho a toda a minha família pelo apoio prestado ao longo de todo o percurso académico.

o júri

presidente

Professor Doutor António Ernesto da Silva Carvalho Brito
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Professora Doutora Helena Maria Pereira Pinto Dourado e Alvelos
Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da
Universidade de Aveiro

Licenciada Ana Raquel Reis Couto Xambre
Assistente Convidada do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da
Universidade de Aveiro

agradecimentos

Queria agradecer, em primeiro lugar, à direcção da Solar Plus por me ter concedido a oportunidade de realizar este estudo, nomeadamente à Eng^a Ana Bicho e ao Eng^o Paulo Rebelo, actual Directora e ex-Director de Operações, respectivamente. Agradeço também a todos os departamentos que directamente ou indirectamente me auxiliaram neste projecto.

Aos Gestores das equipas de produção com os quais tive uma estreita colaboração na busca de pormenores que pudessem enriquecer este trabalho.

Aos Operadores que colaboraram sempre que solicitados.

Um agradecimento também à minha orientadora no DEGEI, Professora Doutora Helena Alvelos, e à co-orientadora, Eng^a Ana Raquel Xambre, que foi o meu principal contacto com a Universidade de Aveiro durante este período.

Um agradecimento sentido a todos os meus amigos.

Para finalizar, quero agradecer aos meus pais, por me terem dado a oportunidade de seguir a vida académica, investindo assim económica e emocionalmente neste objectivo.

palavras-chave

Simulação industrial, linha de produção, linha de montagem, painéis solares fotovoltaicos

resumo

O presente trabalho propõe-se a fazer uma análise sobre os tipos de layouts mais conhecidos actualmente em ambiente industrial, e sobre a simulação industrial. É feita a análise de um caso em particular, uma linha de produção de painéis solares fotovoltaicos. Seguidamente é estudado um cenário alternativo à solução existente actualmente, com o objectivo de ampliar a capacidade produtiva. O relatório é composto por uma apresentação dos layouts mais utilizados (suas principais características). No caso de estudo, são seguidos os passos mais importantes de um estudo de simulação, e no final é feita a análise e comparação dos dois cenários.

keywords

Industrial simulation, production line, assembly line, photovoltaic panels

abstract

The present work analyses the most well known types of layouts, and industrial simulation in general. A particular case is studied, a photovoltaic solar panel production line. Besides the actual situation an alternative scenario is also studied, with the purpose of improving the total output of the line. The report comprises the company presentation and a general overview of the existing layouts. In the case study, the most important steps of an industrial simulation study are considered and, in the end, the results are analyzed and the scenarios are compared.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento do trabalho.....	3
1.2	Apresentação da empresa	4
2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	9
2.1.	Enquadramento teórico do problema	11
2.1.1.	Tipos de Layout	11
2.1.2.	Obtenção de Soluções de <i>Layout</i>	18
2.1.3.	Algoritmos:	18
2.1.4.	Heurísticas:	23
3.	PROBLEMA EM ESTUDO.....	27
3.1.1.	Formulação do problema e planeamento do estudo	31
3.1.2.	Recolha de dados e definição do modelo conceptual	32
3.1.3.	Validação do modelo conceptual	49
3.1.4.	Construção do modelo operacional e verificação	49
3.1.5.	Testes piloto	51
3.1.6.	Validação do modelo operacional	51
3.1.7.	Desenho de experiências (Experimental Design)	52
3.1.8.	Execução do modelo e análise dos resultados (<i>output data</i>)	53
4.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO.....	61
5.	Bibliografia	65

LISTA DE TABELAS E DIAGRAMAS

Tabelas

Tabela 1 - Distribuição de Operadores pelos postos de trabalho	48
Tabela 2 - Taxas de ocupação dos recursos no cenário actual.....	54
Tabela 3 - Taxas de ocupação dos recursos no cenário alternativo criado.....	56
Tabela 5 - Comparação dos valores de taxas de ocupação.....	59

LISTA DE FOTOGRAFIAS E ESQUEMAS

Fotografias

Fotografia 1 - Fotografia do exterior	5
Fotografia 2 - Entrada da empresa.....	5
Fotografia 3 - Interior da nave fabril - Acabamentos.....	6
Fotografia 4 - Interior da nave fabril - Teste de painel e deposição	6
Fotografia 5 - Pequena central fotovoltaica em testes no recinto da empresa.....	7
Fotografia 6 - Frente e traseira dos módulos Solar Plus	29
Fotografia 7 - Preparação.....	35
Fotografia 8 - Caixa ou Box de deposição onde são carregados os vidros.....	36
Fotografia 9 - Câmaras de deposição	38
Fotografia 10 - Sputtering de Zinco.....	39
Fotografia 11 - Sputtering de alumínio	39
Fotografia 12 - Máquina de Isolamento periférico	40
Fotografia 13 - Aplicação de fita de alumínio	42
Fotografia 14 - Zona de aplicação de fita de alumínio e EVA.....	43
Fotografia 15 - Teste de Módulos	43
Fotografia 16 - Estação eléctrica e mecânica.....	44
Fotografia 17 - Zona de acabamentos.....	44

Esquemas

Esquema 1 - Layout fixo (in Pasa Giovana (2009))	12
Esquema 2 - Layout Funcional (in Pasa Giovana (2009))	13
Esquema 3 - <i>Layout</i> Celular (in Lopes, Marcelo 2006)	14

Esquema 4 - Exemplos de layout celular (in Lopes, Marcelo 2006).....	15
Esquema 5 - Exemplo de aplicação de algoritmo ALDEP com largura de varrimento 5 (in http://www.me.utexas.edu/~jensen/ORMM/omie/design/unit/layout/craft.html).....	20
Esquema 6 - Exemplo de aplicação de algoritmo ALDEP com largura de varrimento 4 (in http://www.me.utexas.edu/~jensen/ORMM/omie/design/unit/layout/craft.html).....	21
Esquema 7 - Exemplo da aplicação do algoritmo CORELAP ao desenho de uma casa. (in http://dailyindustry.wordpress.com/2009/05/22/) parte 1.....	22
Esquema 8 - Exemplo da aplicação de uma algoritmo CORELAP ao desenho de uma casa. (in http://dailyindustry.wordpress.com/2009/05/22/) parte 2.....	22
Esquema 9 - Constituição das células fotovoltaicas.....	30
Esquema 10 - Planta da nave fabril.....	33
Esquema 11 - Diagrama do processo produtivo	34
Esquema 12 - Diagrama de blocos da preparação.....	35
Esquema 13 – Movimentação de vidro TCO na preparação.....	36
Esquema 14 - Diagrama de blocos para o vidro de fecho na preparação	37
Esquema 15 - Movimentação de vidro de fecho na preparação	37
Esquema 16 - Diagrama de blocos na deposição.....	38
Esquema 17 - Movimentação na deposição	38
Esquema 18 - Diagrama de blocos na zona de sputterings e lasers 2 e 3.....	40
Esquema 19 - Movimentação nos sputterings e lasers 2 e 3.....	41
Esquema 20 - Diagrama de blocos dos acabamentos.....	45
Esquema 21 - Movimentação na zona de acabamentos	45

ABREVIATURAS

Runs: Lote de painéis produzido na deposição.

Box: Caixa utilizada para fazer a deposição.

Painel: Nome dado internamente ao painel fotovoltaico desde a preparação até ao encapsulamento.

Módulo: Painel a partir do momento em que foi laminado.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do trabalho

Este trabalho enquadra-se no âmbito do desenvolvimento de um projecto de mestrado, que pretende estudar várias alternativas para a expansão da capacidade do sistema produtivo de painéis fotovoltaicos de segunda geração da empresa Solar Plus – Produção de Painéis Solares S.A. Esta unidade industrial atingiu, em Novembro de 2008, a laboração em contínuo em sete dias por semana o que levanta, como forte possibilidade, a necessidade da potencial ampliação da capacidade da linha de produção.

Nos últimos anos temos assistido a um enorme aumento do custo energético. Se por um lado muita energia é baseada em recursos não renováveis (petróleo, carvão, etc), por outro estes são bastante poluentes, potenciando o aquecimento global do planeta. Na ampla gama de energias renováveis existente hoje em dia, destaca-se a energia solar que pode ser dividida em dois grandes grupos: Solar térmica e Solar fotovoltaica.

Apesar de o princípio de funcionamento ser o mesmo (transformação de energia solar), o fim a que se destinam é um pouco diferente. No primeiro caso o objectivo é obter calor, e desta forma aquecer água ou outro fluído. Já a energia solar fotovoltaica, tem por objectivo a produção de electricidade a partir da luz do Sol.

Paralelamente a esta questão também é relevante a pressão para a redução de custos de produção que é, hoje em dia, bastante grande, numa indústria competitiva e com uma perspectiva de crescimento na ordem dos 2 dígitos na próxima década.

Neste trabalho pretende-se estudar a ampliação de uma linha de produção de painéis solares fotovoltaicos, de tecnologia de “filme fino”, nesta PME sediada em Oliveira do Bairro. Será feito o estudo da actual linha, das suas limitações, bem como da capacidade instalada, mais tarde será estudada uma possível alternativa e as suas implicações, a nível de capacidade produtiva e recursos humanos.

Com o presente trabalho pretende-se então abordar alguns temas no âmbito da gestão de operações e da simulação industrial.

Este trabalho centrar-se-á no tema dos *Layouts* Industriais, e as possíveis aplicações a este caso real.

Neste estudo será ainda utilizada uma ferramenta informática, o software de Simulação Industrial (Arena®), que permite simular as actividades e processos de fabrico das empresas para, de uma forma rápida e sem custos elevados, experimentar diversas alternativas, e obter resultados aproximados aos reais.

Será feita, ao longo deste trabalho, a tradução de alguns termos associados ao tema e ao próprio software, no entanto, outros permanecerão no seu estado original devido à não/falta de correspondência de algumas expressões de origem estrangeira na língua portuguesa.

1.2 Apresentação da empresa

A Solar Plus está situada na Zona Industrial de Vila Verde, no concelho de Oliveira do Bairro, distrito de Aveiro, e dedica-se à produção de painéis fotovoltaicos.

A sua construção foi iniciada em 2006, tendo começado com os primeiros testes no início de 2008 e iniciando a laboração em Março do mesmo ano, nessa fase ainda com uma equipa pequena, passando para o pleno funcionamento em Novembro de 2008

A capacidade instalada é de 7.4 MW, com laboração em contínuo, correspondendo a 12 lotes diários, 353 dias por ano, com perdas e rejeições na ordem dos 5%. Cada lote compreende 48 painéis de 44 W, o que significa cerca de 490 módulos embalados por dia.

A nível do espaço físico conta com uma nave industrial com 3825 m² e um edifício sede com dois pisos que perfaz cerca de 960 m².

Conta já com cerca de 150 colaboradores, 120 dos quais na laboração em turnos, garantindo o funcionamento durante 24 horas por dia e 7 dias por semana.

Em seguida são apresentadas algumas fotografias da empresa.



Fotografia 1 - Fotografia do exterior



Fotografia 2 - Entrada da empresa



Fotografia 3 - Interior da nave fabril - Acabamentos



Fotografia 4 - Interior da nave fabril - Teste de painel e deposição



Fotografia 5 - Pequena central fotovoltaica em testes no recinto da empresa

1.3 Estrutura do Relatório

O presente relatório é composto por uma revisão da literatura existente, onde é feita uma abordagem ao tema dos *layouts* e suas implicações numa linha de produção. Faz-se também uma breve análise a alguns dos tipos de algoritmos existentes, assim como das heurísticas mais utilizadas.

No capítulo seguinte é feita a análise do problema em estudo. É nesta secção que é feito todo o estudo de simulação, seguindo e apresentado todos os principais passos que devem ser seguidos num estudo de simulação, bem como dos seus resultados.

Por fim é feita a análise conclusiva da aplicação da simulação a este caso em particular, das vantagens que trouxe bem como das dificuldades encontradas. São ainda apresentadas algumas perspectivas de desenvolvimento futuro do trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Enquadramento teórico do problema

Nesta secção serão abordados alguns dos tipos de layouts mais utilizados, bem como algumas das suas vantagens e desvantagens.

Um *layout*:

- Define onde colocar as instalações, máquinas e pessoal.
- Define a forma e a aparência da produção.
- Determina a maneira segundo a qual o objecto de produção flui.
- Define os fluxos dos sujeitos da produção.

2.1.1. Tipos de Layout

Existem cinco tipos de *layout* bastante conhecidos¹:

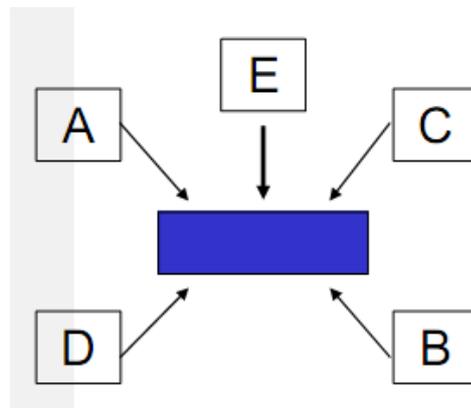
- a) Fixo ou posicional;
- b) Funcional, por processo ou *job-shop*;
- c) Celular;
- d) Linha, por produto, ou *flow-shop*;

¹ Pasa Giovana (2009)

A) Fixo ou posicional

Os recursos organizam-se em torno do objecto a ser fabricado ou, no caso dos serviços, em torno da pessoa que está a ser atendida.

Este tipo de *layout* é bastante utilizado na construção ou fabrico de objectos de grandes dimensões, como barcos ou na construção civil.



Esquema 1 - Layout fixo (in Pasa Giovana (2009))

Vantagens:

- Pequena movimentação de materiais;
- Permite enriquecimento de tarefas;
- Favorece trabalho em equipas;
- Alta flexibilidade de processo e produto;
- Centros de trabalho quase autónomos.

Desvantagens:

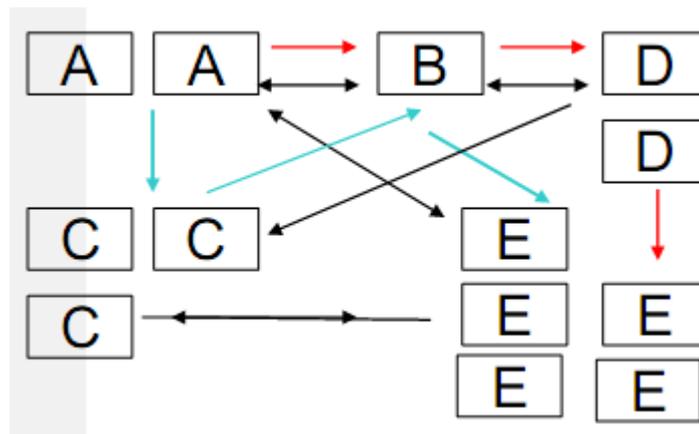
- Grande movimentação de pessoas e equipamentos;
- Grande necessidade de supervisão;

Posicionamento de equipamento e pessoas pode ser pouco seguro, não ergonómico ou pouco prático, sendo que está direccionado para o objecto do trabalho e não para o trabalho em si;

Baixa utilização do equipamento, devido à grande variedade de equipamentos muitas vezes necessária, e à necessidade de poder movimentá-los.

B) Funcional

Também chamado *layout por processo*, consiste na formação de departamentos/sectores especializados em determinadas tarefas.



Esquema 2 - Layout Funcional (in Pasa Giovana (2009))

As secções recebem os nomes das funções ou processos que executam (ou das máquinas e equipamentos que fazem estas funções e processos).

Cada artigo move-se entre as secções de acordo com a sua própria sequência de produção

Este tipo de sistema está, normalmente, relacionado aos processos de produção *job-shop* ou por lotes, em que a variedade de produtos a fabricar elevada e o volume a produzir é reduzido.

Vantagens:

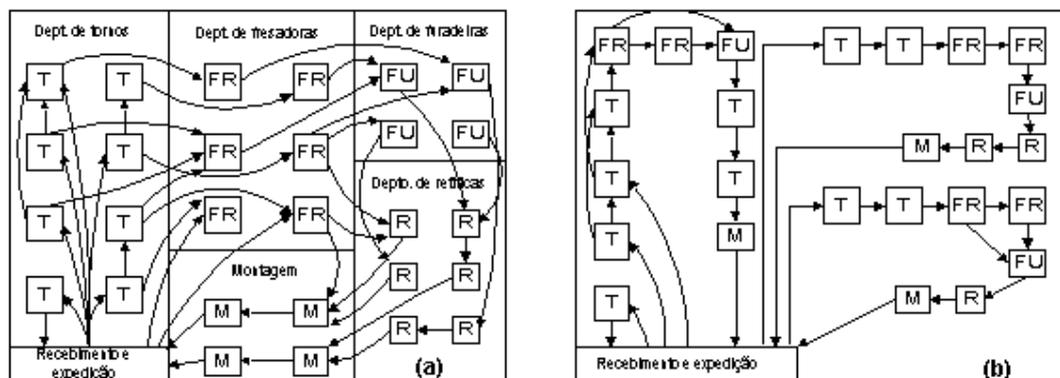
- Flexibilidade;
- Ajuste rápido a diferentes *mix* de produção;
- Maior utilização dos equipamentos;
- Permite especialização dos recursos em determinada tarefa, potenciando a rapidez e/ou qualidade da mesma.

Desvantagens:

- Taxas de produção inferiores;
- Maior incidência de *setups* (perda de tempo produtivo);
- Planeamento e controle da produção torna-se mais complexo;
- Maior movimentação de produtos pela fábrica.

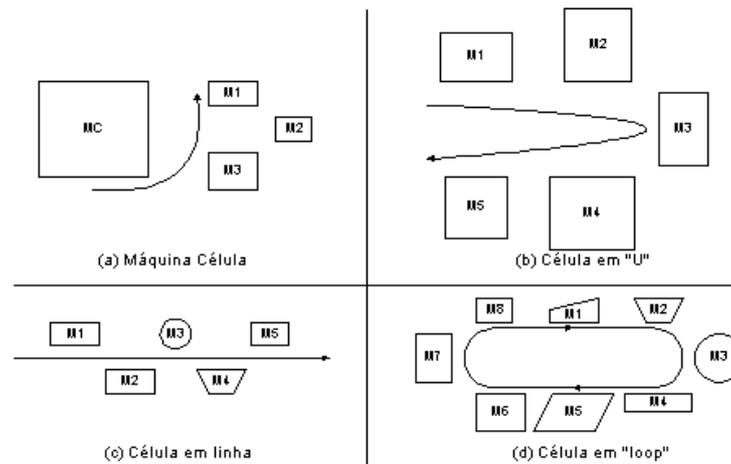
C) Celular

Também chamado layout por tecnologia de grupo, consiste em dedicar grupos de máquinas, equipamentos e trabalhadores a famílias de componentes ou produtos.



Esquema 3 - *Layout Celular* (in Lopes, Marcelo 2006)

Dentro do **layout** celular há também vários tipos de organizações possíveis:



Esquema 4 - Exemplos de layout celular (in Lopes, Marcelo 2006)

Vantagens:

- Grande utilização do equipamento/poucos tempos mortos;
- Favorece grupos, multi-tarefas e 'visão' do produto;
- Maior controlo do sistema e fiabilidade de entregas;
- Melhor fluxo e uso do espaço do que *layout* funcional;
- Boa combinação de flexibilidade e integração.

Desvantagens:

- Alto custo com treino;
- Balanceamento do fluxo de materiais na célula deve ser razoável para não gerar ociosidade;
- Pode requerer duplicação de máquinas e de processos.

D) Por Produto, em linha ou *flow shop*

O problema central em arranjos *flow-shop* é obter o equilíbrio na utilização de trabalhadores e equipamentos em todas as operações.

Ou seja, devem-se agrupar operações em conjuntos que demorem aproximadamente o mesmo tempo, que será o tempo de ciclo.

As linhas de produção podem ter ritmo ditado externamente (ex.: automóveis) ou internamente (ex.: electrónica de tamanho pequeno). Ou seja, quando se necessita de uma determinada cadência, e ajusta-se toda a linha a esta cadência, tentando aproximar o tempo de ciclo a essa cadência abordamos a marcação externa do ritmo. Por outro lado, se o processo produtivo está dependente de determinado tipo de operações de tempo de execução bem definido a cadência é ditada internamente.

Características:

Equipamento de movimentação podem ser tapetes, correias, carrinhos, manual, esteiras.

O ritmo de trabalho pode ser determinado ou indeterminado, dependendo da situação, ou do produto a ser feito.

Tem um número e tipo de estações de trabalho definido, bem como o posicionamento dos trabalhadores, dando pouca flexibilidade.

Pode ser uma linha completamente autónoma, auxiliada ou manual.

Ideal quando todas as tarefas são de curta duração, permitindo agrupá-las ajustando um melhor tempo de ciclo.

Vantagens:

- Baixo custo unitário (elevados volumes de output);
- Ciclos de produção reduzidos;
- Baixo custo de transporte de materiais, são movimentados directamente de uns postos para os outros;
- Níveis baixos de existências em curso de fabrico (WIP – *work in process*);
- Taxas elevadas de utilização dos recursos;
- Sistema de planeamento e controlo de produção simples.

Desvantagens:

- Pouca flexibilidade do sistema;
- Pouca motivação dos recursos humanos, porque as tarefas normalmente são pouco cativantes;
- Potenciais paragens devido a avarias ou absentismo, a paragem num equipamento ou sector afecta toda a linha.

E) Híbrido

Este *layout* é utilizado quando não é possível ter apenas um tipo de *layout*, que é o que acontece em muitas indústrias, por escassez ou excesso de um determinado tipo de recurso o que acontece, muitas vezes, devido à alteração do leque de produtos fabricados ao longo dos anos.

Podemos ter, por exemplo, para o mesmo tipo de operação tanto um layout celular como por processo.

2.1.2. Obtenção de Soluções de *Layout*²

Nos anos 50 começou-se a projectar modelos matemáticos quadráticos em que se pretendia afectar as secções e as localizações, que pretendiam utilizar o mínimo de recursos. Contudo, esta aproximação só é possível em problemas de média dimensão devido ao seu peso computacional. Na década seguinte, e para poder acondicionar um maior número de variáveis desenvolveram-se modelos utilizados ainda hoje.

O objectivo de qualquer *layout* é maximizar lucros ou minimizar custos, são para isso criadas funções objectivo, com as diversas restrições associadas, definindo assim o modelo matemático. Este modelo é depois tratado utilizando várias técnicas de programação matemática.

Ao longo dos anos, vários autores elaboraram diferentes métodos e abordagens, alguns com mais frequência que outros. Estes métodos, segundo a maioria dos autores, podem ser classificados em dois grupos gerais: de optimização e heurísticos.

2.1.3. Algoritmos:

“Um algoritmo é uma sequência finita de instruções bem definidas e não ambíguas, cada uma das quais pode ser executada mecanicamente num período de tempo finito e com uma quantidade de esforço finita.” (wikipedia, 2009)

Esta sequência de instruções não é mais do que o repetir de passos anteriormente definidos, com base em regras, que permitirão a quem recebe as instruções ir tomando decisões.

Os algoritmos podem ser classificados de diversas formas³:

² Adaptado – *Meireles, Sara 2008*

³ wikipedia 2009

* Recursivo ou iterativo - Quando repete a mesma instrução iterativamente até que algo aconteça, como ser atingido determinado valor. O tempo da iteração torna-se contudo incontrolável.

* Lógico - Um algoritmo é deduzido de forma lógica, isto é, a forma como o algoritmo se desenrola determina a forma de continuar do mesmo.

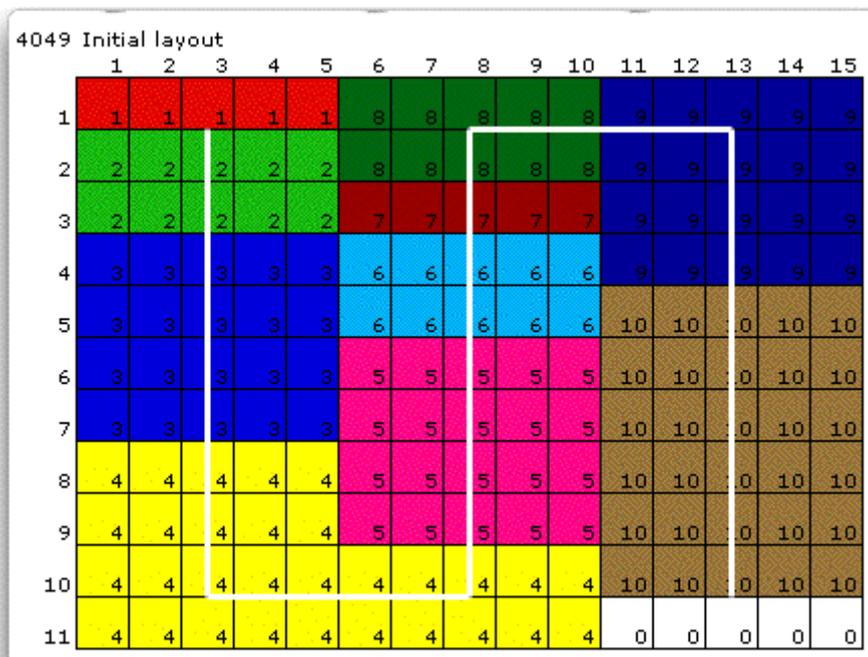
*Em série ou paralelo - São utilizados para funcionamento em paralelo, ou simultâneo, utilizando diversos processadores, ou procedimentos paralelos.

* Exacto ou aproximado – Ou trabalham de forma a encontrar a solução exacta, o que se pode tornar demasiado dispendioso a nível de recursos computacionais, ou de forma aproximada, o que, na maioria dos casos, é suficiente e prático para o problema em questão.

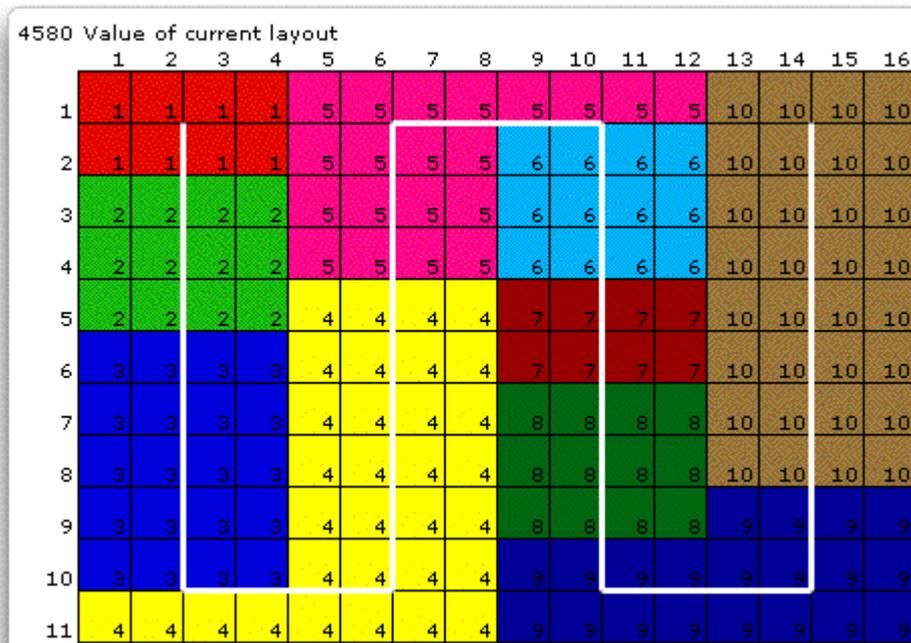
Alguns autores desenvolveram algoritmos para a computorização de formas de encontrar layouts.

ALDEP

Originalmente apresentado por Seehof e Evans (1967), como explica Nahmias (2005) é um algoritmo construtivo que apenas considera instalações rectangulares e que define para alocação das mesmas, uma curva de varrimento segundo uma área fabril definida previamente. A curva de varrimento dá-nos a direcção e sentido da afectação dos diversos departamentos e tem normalmente associada uma largura de varrimento que nos indica o número de espaços a afectar no mesmo sentido. Desta largura de varrimento depende o resultado final.



Esquema 5 - Exemplo de aplicação de algoritmo ALDEP com largura de varrimento 5 (in <http://www.me.utexas.edu/~jensen/ORMM/omie/design/unit/layout/craft.html>)



Esquema 6 - Exemplo de aplicação de algoritmo ALDEP com largura de varrimento 4 (in <http://www.me.utexas.edu/~jensen/ORMM/omie/design/unit/layout/craft.html>)

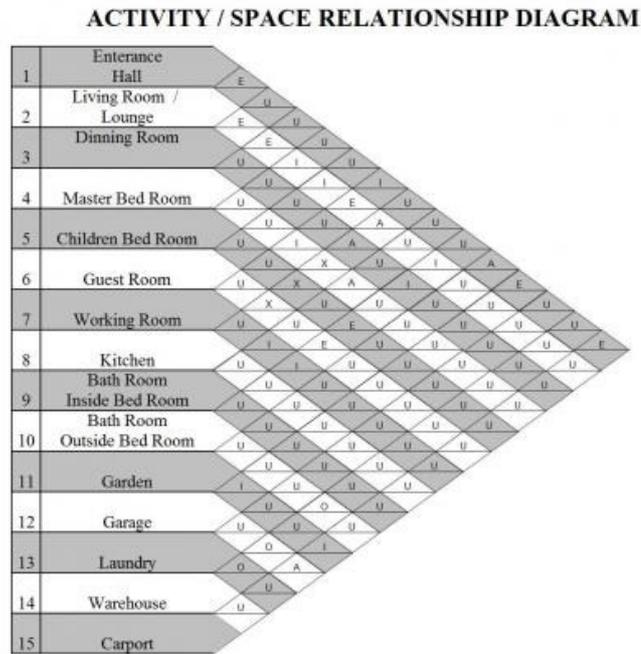
CORELAP

Dos autores Lee e Moore (1967), é o método construtivo mais antigo e também o mais eficiente deste tipo de algoritmos. Segundo Nahmias (2005), para cada departamento calcula-se o peso posicional, isto é, o somatório de todas as pontuações relativas às relações de adjacência que cada departamento tem.

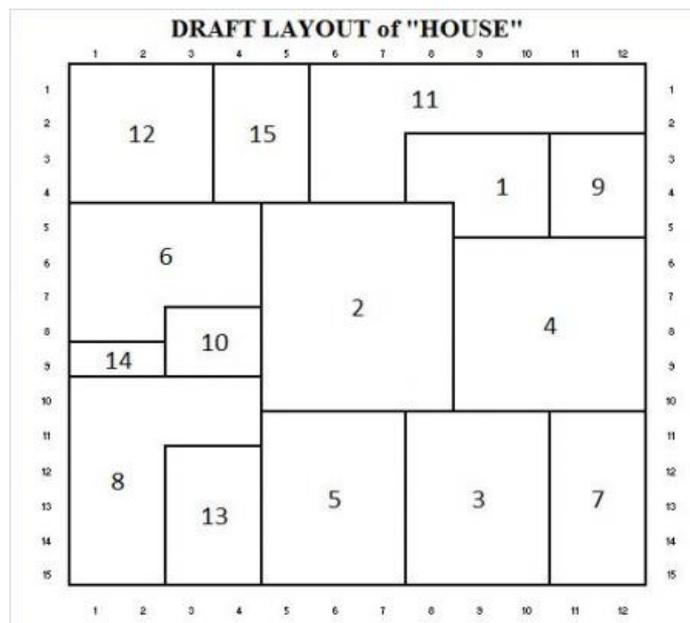
Os departamentos vão sendo afectados consoante o maior grau de adjacência face aos departamentos anteriormente afectados. Após a entrada do primeiro departamento, o segundo a ser afectado terá o maior grau de adjacência com o anterior. Depois será alocado o departamento 3 com melhor proximidade com o primeiro e o segundo departamento que foram afectados.

No método CORELAP não existe uma curva de varrimento que lhe limita a direcção de afectação, por isso não existe uma direcção e sentido predefinidos e podem-se alocar os

departamentos consoante a melhor proximidade total. Pelo mesmo motivo pode também originar uma forma irregular de *layout*, o que exige um ajuste manual final



Esquema 7 - Exemplo da aplicação do algoritmo CORELAP ao desenho de uma casa. (in <http://dailyindustry.wordpress.com/2009/05/22/>) parte 1



Esquema 8 - Exemplo da aplicação de uma algoritmo CORELAP ao desenho de uma casa. (in <http://dailyindustry.wordpress.com/2009/05/22/>) parte 2

2.1.4. Heurísticas:

As heurísticas, ou algoritmos heurísticos, procuram originar soluções muito mais rapidamente, não pretendendo dar a melhor solução, mas uma exequível em tempo útil.

Foram desenvolvidas para serem aplicadas em problemas que se apresentam muito complexos, seja pelo número de variáveis a ter em conta seja pela complexidade dos seus cálculos. As heurísticas normalmente têm curtos tempos de execução, são fáceis de aplicar (baseadas em regras muito simples e muitas vezes intuitivas), são flexíveis porque facilmente se adaptam a cada situação, e são geralmente também bastante simples.

Tipos de heurísticas

- Construtivas – constroem uma solução, passo a passo, segundo um conjunto de regras pré-estabelecido. Procuram assim, em cada passo, encontrar o melhor passo seguinte, partindo de uma solução em branco. Este tipo de heurísticas não tem qualquer tipo de retorno, tomando muitas vezes um caminho mais longo. Um exemplo disso é no caso de o segundo passo ser muito longo este só é detectado apenas quando o primeiro já foi dado, quando possivelmente uma alternativa faria com que a soma do primeiro passo mais o segundo fosse uma melhor solução.

Neste tipo de heurísticas enquadram-se a do “algoritmo aleatório” que procura aleatoriamente o ponto seguinte, até percorrer todas as soluções possíveis.

- De melhoramento – partem de uma solução admissível qualquer e procuram melhorá-la através de sucessivas pequenas alterações.

- Compostas – têm primeiro uma fase construtiva e depois uma fase de melhoramentos.

Foi feita uma pesquisa acerca dos *layouts* mais utilizados para tentar perceber melhor aquele que está hoje em vigor na empresa.

O *layout* hoje utilizado foi definido é do tipo em “U”, neste caso em particular é devido ao mesmo armazém ser utilizado como armazém de matérias-primas, bem como armazém

de produto acabado, apesar de estar dividido. As cargas e descargas de material são feitas na mesma zona. Nota-se também um bom aproveitamento da mobilidade dos recursos humanos, bem como da sequência de operações para a produção do módulo, tentando reduzir o número de deslocações tanto de pessoas como de carros de transporte.

O Software Arena®⁴

O Arena® é um software desenvolvido pela RockWell Automation Inc. para Microsoft Windows® que permite a modelação de sistemas de filas de espera.

A utilização deste software combina o uso de um elevado grau de simulação com uma flexibilidade da linguagem de modelação o que facilita a sua aplicação a um vasto ramo de situações e sistemas, podendo ser utilizada com vários tipos de linguagem computacional mais elaborados como linguagem em C, ou até mais simples como *Visual Basic*.

Para além disso o Arena® contém uma aplicação de animação dinâmica no mesmo ambiente de trabalho em que podemos estar a modelar o sistema. Fornece ainda outros utensílios de apoio à visualização e avaliação, como gráficos permitindo assim uma maior facilidade em lidar com maior quantidade de resultados, permitindo também ver o aspecto visual da situação que se pretende simular, como por exemplo um fluxo de pessoas num centro comercial, filas de espera de equipamentos, bem como a sua distribuição pelo espaço.

Relacionado com os processos e transportes descritos num modelo de simulação e às suas durações temporais, o Arena® admite várias distribuições temporais articuladas com a melhor descrição de cada sistema particular e é possível também testar o mesmo modelo diversas vezes até se estabelecer um número específico de replicações que garanta que os valores finais obtidos são resultado de uma média de resultados que aborda todas as hipóteses de desempenho, cobrindo assim alguma aleatoriedade que possa ter influenciado determinada replicação.

⁴ Adaptado de Kelton et al.(2004)

Para uma simulação se aproximar da realidade, o número de replicações terá um valor ideal adequado a cada modelo, o que permitirá diminuir a amplitude do intervalo de confiança, garantindo assim que os resultados se aproximarão muito mais da realidade.

Normalmente este valor de replicações pode ser determinado a partir do método tentativa erro, quando o modelo é rápido de correr, e onde se assumem normalmente 10 replicações de início e após visualização dos intervalos obtidos se vão acrescentando replicações até obter a amplitude desejada. Para modelos mais demorados pode-se determinar, através da definição inicial dos intervalos de confiança a utilizar, qual o número ideal de replicações a implementar.

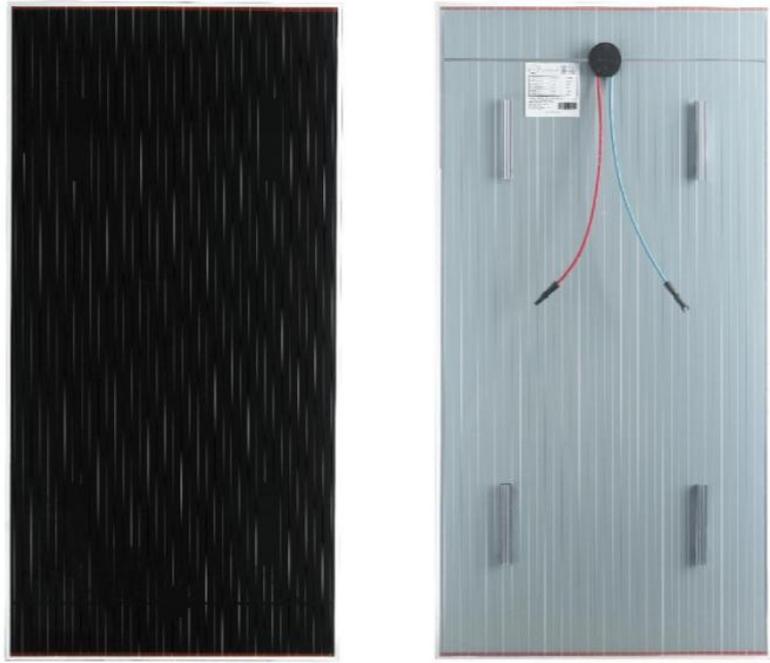
Com grande aplicação no estudo de sistemas produtivos e de acessível compreensão por parte do seu utilizador, esta ferramenta irá ser aplicada ao caso em estudo neste trabalho como forma de avaliação de duas configurações alternativas em termos da organização da produção e obtenção de algumas medidas de desempenho que poderão apoiar uma decisão futura relativa a novas afectações de recursos e fluxos de materiais que poderão ter que ser implementadas, como consequência do crescimento da empresa.

3. PROBLEMA EM ESTUDO

Neste capítulo será analisado o caso em estudo, começando pela descrição do sistema real a simular, bem como da importância da simulação para este caso em particular. De seguida são apresentados os passos que foram sendo desenvolvidos na elaboração do estudo sendo, simultaneamente, descrita a forma como foram sendo concretizados neste caso em concreto. Por fim, é feita uma análise dos resultados obtidos na simulação.

O painel produzido enquadra-se em três gamas de potência, 40w 42w e 44w.

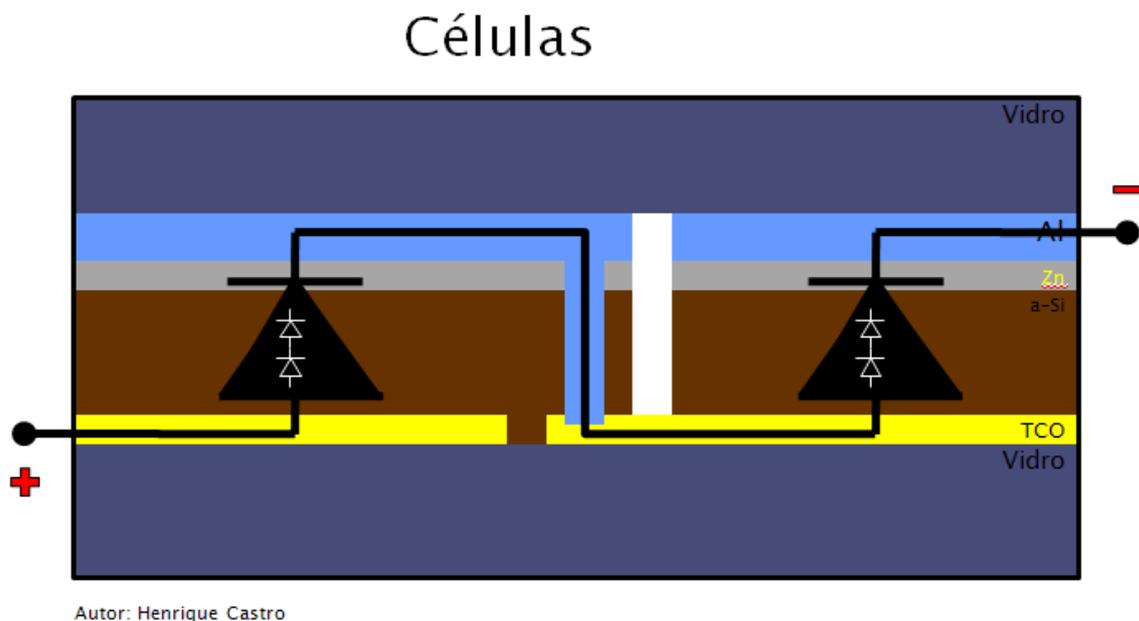
SP40 | SP42 | **SP 44**



Fotografia 6 - Frente e traseira dos módulos Solar Plus

A constituição de um módulo Solar Plus é a seguinte:

- Vidro
- Material semicondutor
- Alumínio
- Polímero
- Caixa eléctrica
- Perfis de alumínio



Esquema 9 - Constituição das células fotovoltaicas

No próximo ponto inicia-se a descrição do estudo de simulação seguindo depois para as diferentes etapas de um estudo simulação definidas por Law e Kelton (2000). Nesta fase inicial é também explicado o processo de fabrico dos painéis para melhor enquadrar o problema.

3.1.1. Formulação do problema e planeamento do estudo

Nesta fase é formulado o problema. São definidos os objectivos do projecto, bem como o nível de detalhe que se pretende.

Define-se o conjunto de aspectos que deverão ser respondidos pelo estudo.

É nesta fase que são também definidas as medidas de desempenho relevantes para a análise do sistema, e para os objectivos do estudo, que permitirão comparar as diferentes possibilidades.

É feito ainda o planeamento do estudo em termos de recursos necessários.

Este projecto tinha como objectivo o estudo da capacidade de produção da linha de produção da Solar Plus, bem como das alterações que estão em curso com vista ao aumento da capacidade produtiva.

O nível de detalhe pretendido limita-se à simulação de todos os postos de trabalho, suas filas de espera, quantidade de recursos associados (máquinas, pessoas, meios de transporte de materiais, utilização de recursos humanos, etc).

Este estudo pretende mostrar a capacidade de processamento da linha de produção actual, bem como das alterações previstas.

As medidas de desempenho utilizadas serão:

- Número médio de painéis embalados por dia;
- A taxa de ocupação dos diversos equipamentos;
- O número de runs completados por dia, em média;
- Os recursos gargalo que estão a limitar a capacidade total do sistema.

Acredita-se que, com estes indicadores, poderão ser tiradas conclusões úteis acerca dos cenários estudados, bem como da situação actual.

Os recursos necessários para este projecto são:

- O acesso às instalações bem como aos dados do sistema, que servirão de input no modelo.
- O acesso a uma versão sem limitações do software Arena®.

Depois da formulação do problema segue-se a recolha de dados e a definição do modelo conceptual.

3.1.2. Recolha de dados e definição do modelo conceptual

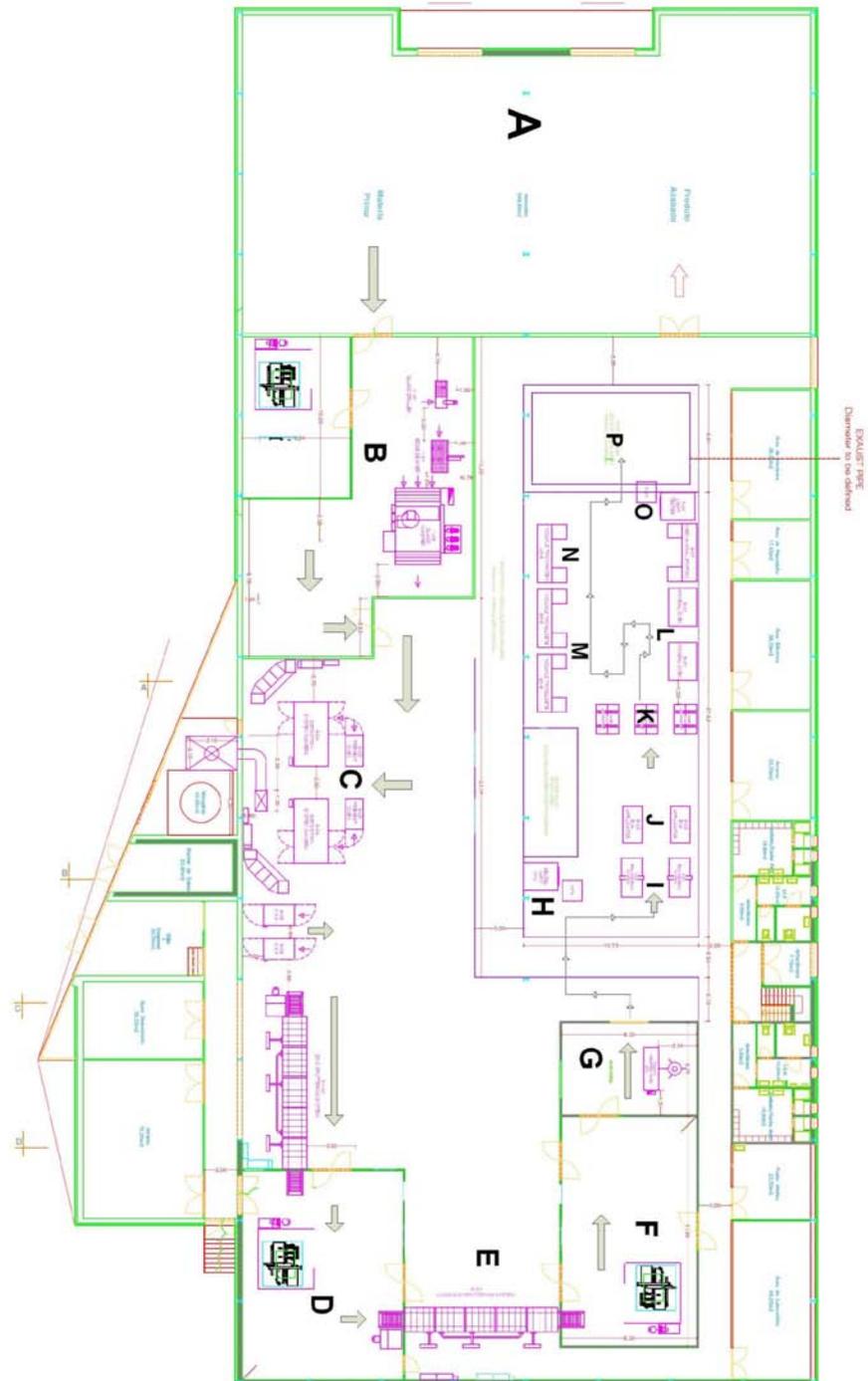
Na altura da recolha de dados, é feita também a definição do modelo conceptual.

Os dados de interesse a recolher nesta altura são:

- *Layout* do sistema;
- Procedimentos operacionais (que muitas vezes não estão formalizados);
- Pressupostos.

Nesta fase foram recolhidos todos os dados do processo.

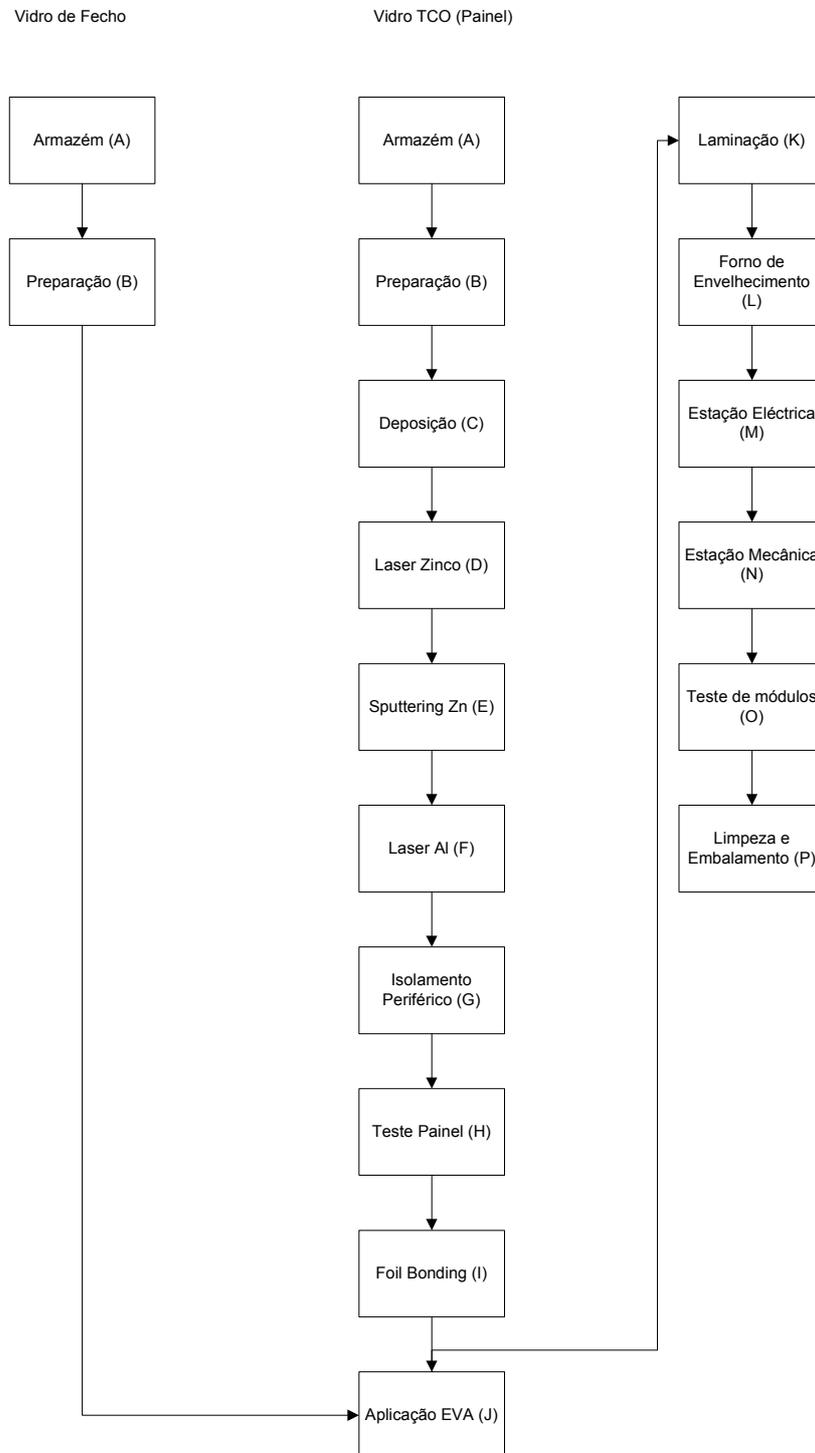
Layout global da empresa:



Esquema 10 - Planta da nave fabril

Processo produtivo:

Em seguida é apresentado um diagrama do processo produtivo.



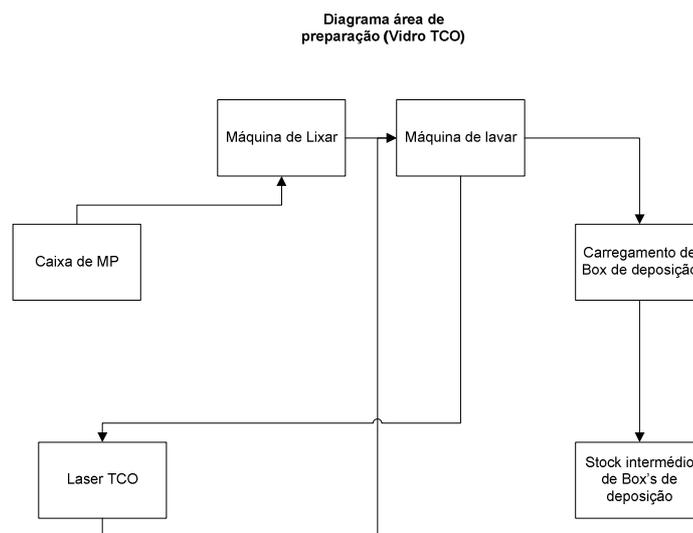
Esquema 11 - Diagrama do processo produtivo

Preparação

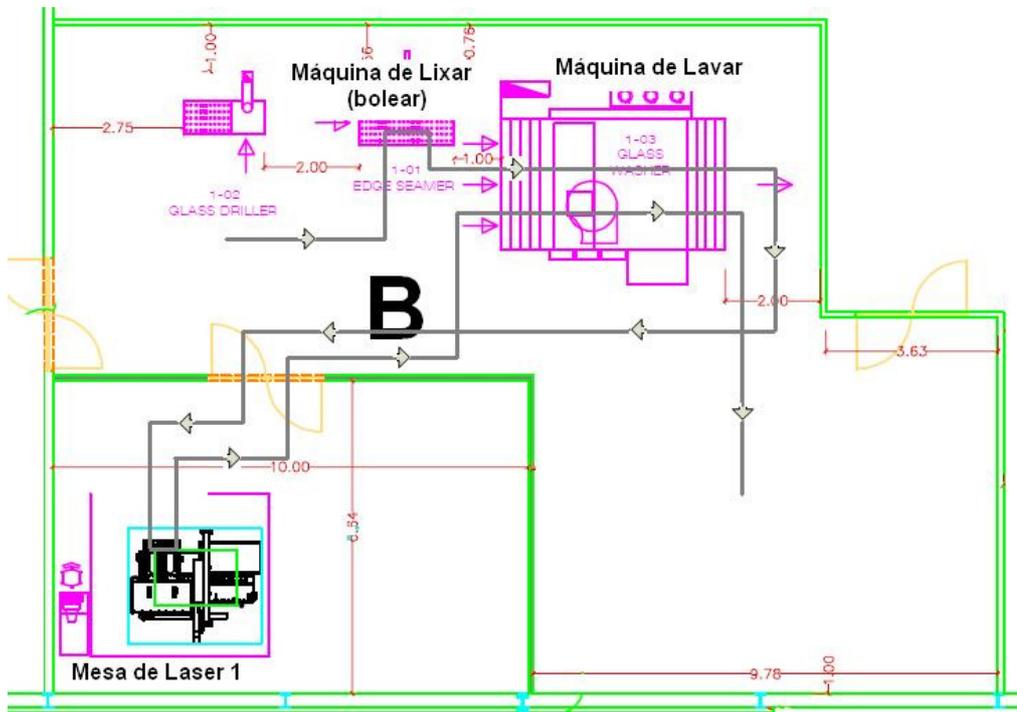
Nesta área são preparados todos os vidros que são utilizados no processo, em operações como boleamento das arestas no vidro com TCO, para poder ser manuseado sem risco de corte para os operadores, lavagem do mesmo, corte a laser da camada condutora e carregamento das caixas de deposição. O vidro de fecho é apenas lavado e carregado em carros.



Fotografia 7 - Preparação



Esquema 12 - Diagrama de blocos da preparação

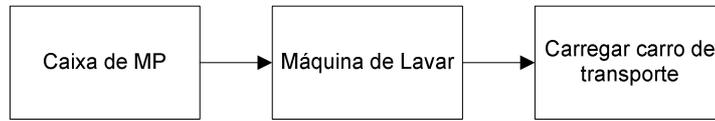


Esquema 13 – Movimentação de vidro TCO na preparação

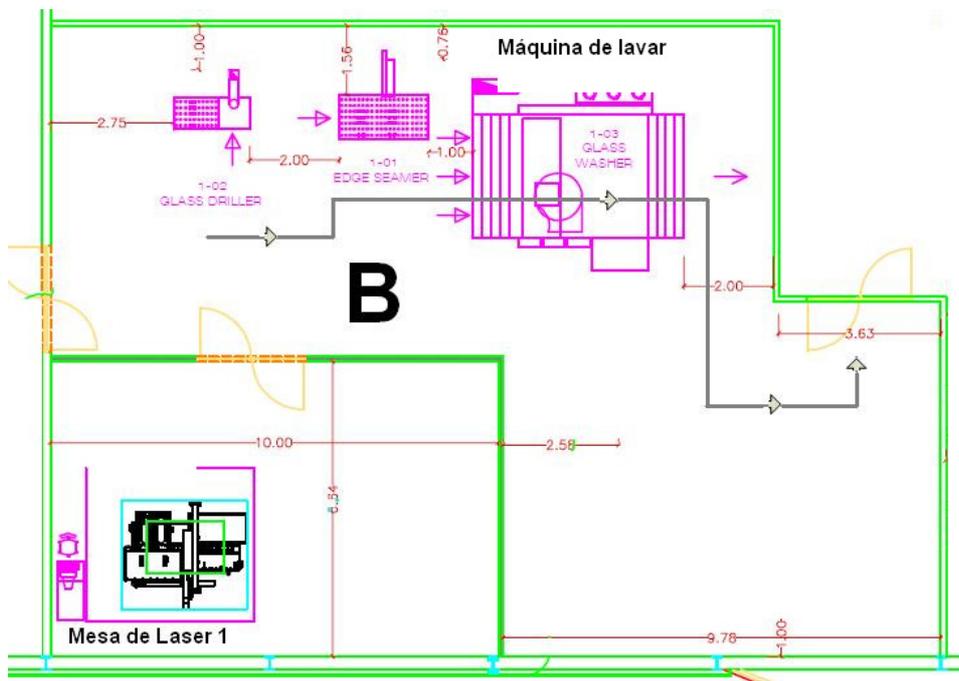


Fotografia 8 - Caixa ou Box de deposição onde são carregados os vidros

**Diagrama área de
preparação (Vidro de Fecho)**



Esquema 14 - Diagrama de blocos para o vidro de fecho na preparação

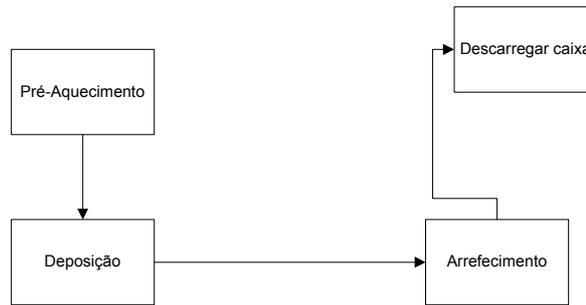


Esquema 15 - Movimentação de vidro de fecho na preparação

Deposição

Nesta área é feita a deposição do material semi-condutor sobre o vidro com TCO. É constituída por três operações: pré-aquecimento, deposição, arrefecimento e descarregar caixa. Como se trata do conjunto das operações mais demoradas tem o equipamento em duplicado.

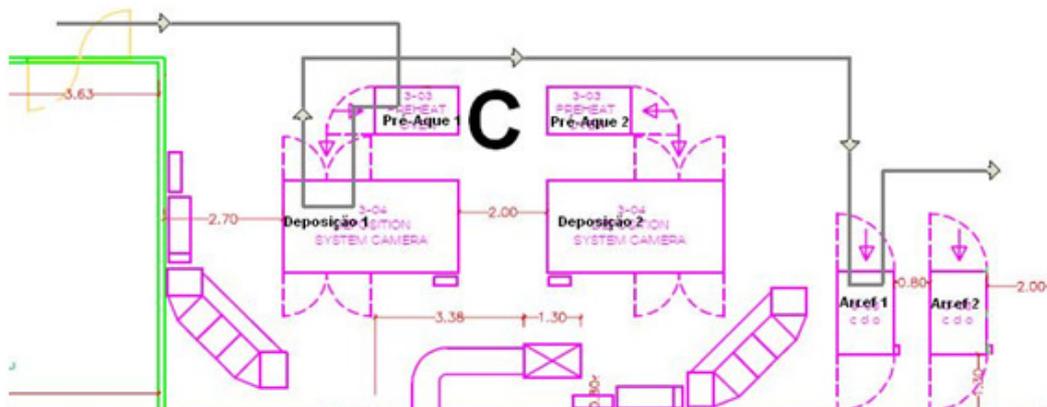
Deposição



Esquema 16 - Diagrama de blocos na deposição



Fotografia 9 - Câmaras de deposição



Esquema 17 - Movimentação na deposição

Sputtering de Zn, Laser 2, Sputtering de Al, Laser3 e Isolamento Periférico

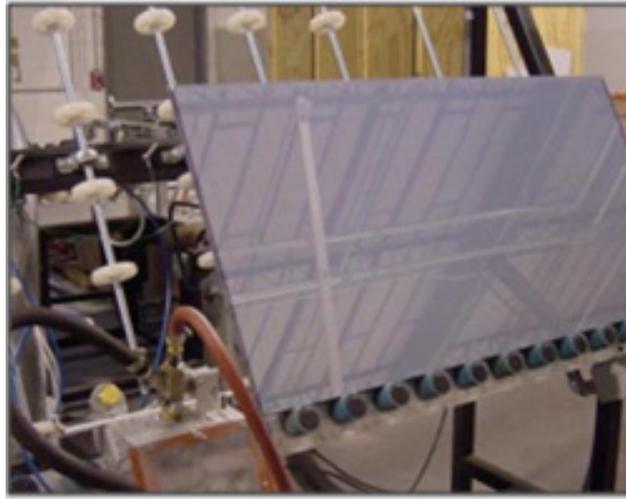
No Sputtering de Zn é depositada uma camada de Zinco. No Laser 2 é feito o segundo corte de laser imediatamente ao lado do anterior e até à primeira camada de óxido condutor. No Sputtering de AL é depositada a última camada, de alumínio, que será cortada logo depois no laser 3. O isolamento periférico serve para isolar o material semi-condutor na periferia do painel.



Fotografia 10 - Sputtering de Zinco

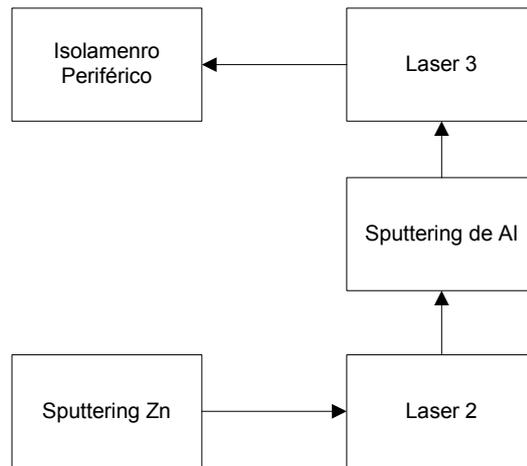


Fotografia 11 - Sputtering de alumínio

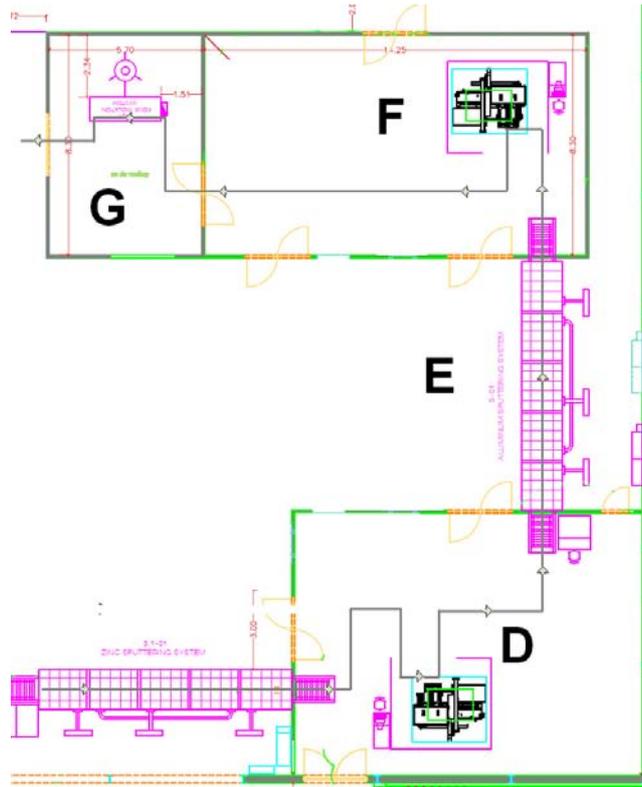


Fotografia 12 - Máquina de Isolamento periférico

Laser 2; Sputt de Al; Laser 3;
Isolamento Periférico



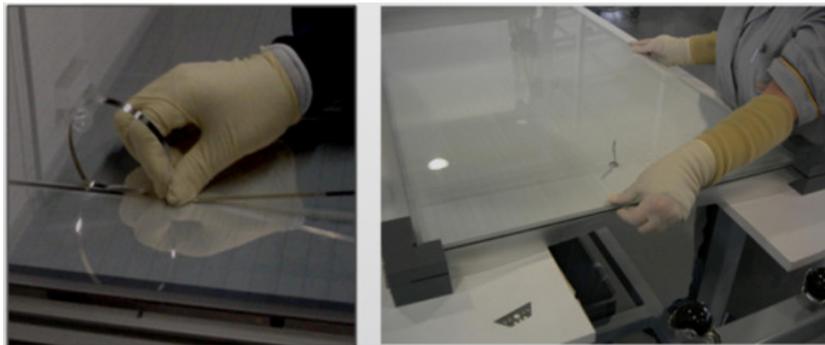
Esquema 18 - Diagrama de blocos na zona de sputterings e lasers 2 e 3



Esquema 19 - Movimentação nos sputterings e lasers 2 e 3

Acabamentos

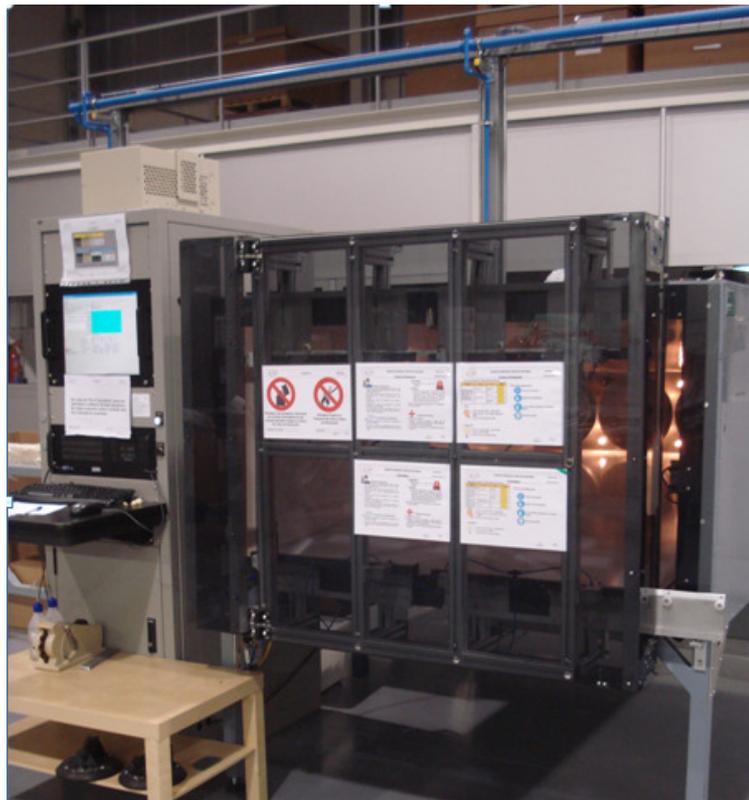
Os acabamentos são constituídos pelo teste de painel, que é o que define se o mesmo segue o processo até final, sendo certo que obterá a potência pretendida caso tenha obtido aprovação nesta estação. É também feita a aplicação de fita de alumínio, que é o que fará os contactos eléctricos do painel, e a aplicação do EVA que é o polímero que fica entre o painel e o vidro de fecho que fará o isolamento. De seguida vem a laminação dos dois vidros, com esse polímero. O forno de envelhecimento, que faz a recombinação do material semi-condutor, estabilizando-o e dando mais potência ao painel. Nas ligações eléctricas é montada a caixa eléctrica, e são cravados os seus terminais. Na estação mecânica a caixa eléctrica é cheia com uma mistura de silicone que também é utilizada para a colagem dos perfis de alumínio, que serão os apoios de fixação do módulo.



Fotografia 13 - Aplicação de fita de alumínio



Fotografia 14 - Zona de aplicação de fita de alumínio e EVA



Fotografia 15 - Teste de Módulos

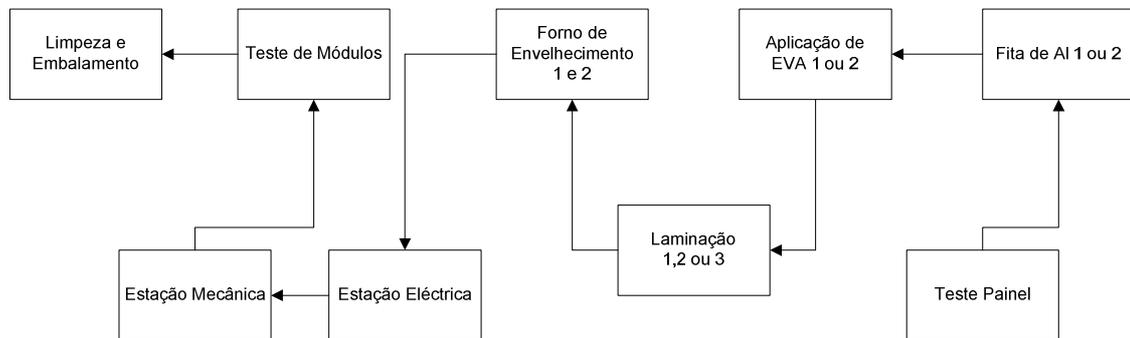


Fotografia 16 - Estação eléctrica e mecânica

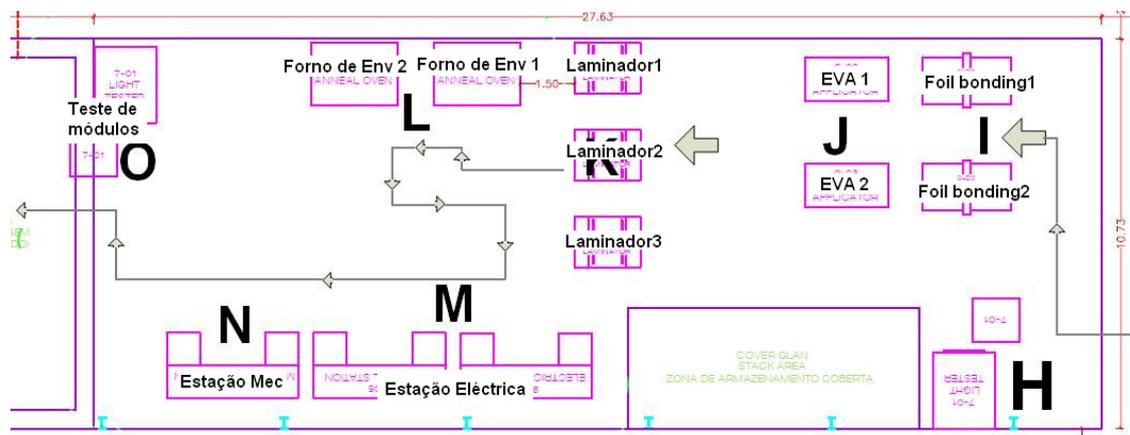


Fotografia 17 - Zona de acabamentos

Acabamentos



Esquema 20 - Diagrama de blocos dos acabamentos



Esquema 21 - Movimentação na zona de acabamentos

Para além da informação obtida acerca do layout, foram também recolhidas muitas informações acerca de procedimentos operacionais, parte deles informais. Alguns foram traduzidos no modelo criado, outros devido ao seu pouco ou nulo impacto, não foram considerados.

Foram recolhidas as seguintes informações:

- Apesar de haver um número de carros de transporte de painéis na ordem das 25 unidades, 8 estão destinados ao uso apenas na área da preparação, isto para evitar que os stocks intermédios a montante da deposição impeçam o correcto abastecimento da mesma por parte da área anterior.

- Há 4 carros destinados ao transporte de vidro de fecho, devidamente assinalados. Esta informação não foi considerada, porque este transporte não influencia directamente a produção do painel.
- Na operação Laminação e estação mecânica, os carros de transporte de módulos deverão ser totalmente cheios, para maximizar a utilização do forno, bem como para diminuir o número de movimentações de carros de transporte.
- O stock intermédio anterior ao laser TCO não deverá ter mais que 4 lotes, para permitir a operação na área da preparação.
- Não deverá haver mais que 10 lotes em espera na operação de colocação de fita de alumínio e EVA.
- Depois da aplicação do EVA e antes da laminação não deverá haver mais que 10 módulos em espera, por questões de segurança, e devido ao excesso de capacidade desde posto de trabalho.

Foram também utilizados alguns pressupostos, que permitiram, por um lado, simplificar o modelo em alguns pontos que não seriam relevantes para o estudo em causa e, por outro, permitir uma eficaz modelação da realidade. Foram então tidos em conta os seguintes pressupostos:

- O número de boxes de deposição existentes é 9, é o que existe fisicamente.
- O número de carros de painéis disponíveis para a produção é de 15. Número abaixo da realidade devido a algumas operações utilizarem dois carros no processo (um para carregar e outro para descarregar), e haver algumas dificuldades em modelar esta situação.
- O número de carros de transporte de módulos é 15 unidades.
- As operações Sputtering de Zinco, Laser 2, Sputtering de Alumínio, e Laser 3 processam-se em contínuo entre si.
- As operações Lixar e Lavar e Carregar Carro processam-se em contínuo entre si.

- As operações Fita de Alumínio, Aplicação de EVA e Laminação processam-se em contínuo entre si.
- As operações Estação Eléctrica e Estação Mecânica processam-se em contínuo entre si.
- As operações Teste de Módulos e Limpeza e Embalamento processam-se em contínuo entre si.
- Os operadores são considerados ocupados enquanto está a ser processado um painel no seu posto de trabalho e existem 23 operadores.
- Não há rejeição de módulos ao longo da linha. Esta aproximação foi feita para facilitar a programação do modelo, porque a taxa de rejeição hoje em dia situa-se na casa dos 5% (da deposição até ao embalamento), que simplificou amplamente o modelo permitindo aproximá-lo mais à realidade noutros pontos.
- Não foram considerados tempos de paragem para manutenção de equipamentos, quer por avarias quer por intervenções preventivas.
- Não foi considerado o trabalho em turnos, nem com horários pré-definidos, apenas o trabalho em contínuo 24h, 7 dias por semana.
- Não foram considerados consumos de matérias-primas.
- Os recursos humanos são libertados quando acabam o trabalho no seu posto.
- Todos os carrinhos tiveram uma velocidade média de transporte de 0,7 m/s

A necessidade de recursos humanos em cada operação foi feita de acordo com a seguinte tabela:

Tabela 1 - Distribuição de Operadores pelos postos de trabalho

Operação	nº
Lixar	1
Lavar / Carreg. Carro	2
Laser TCO	1
Lavar / Carreg. Caixa	2
Forno Pré-Aquecimento	0
Deposição (A-Si)	2
Arrefecimento / Desc. Caixa	1
Sputtering (Zinc)	1
Laser (Zinc)	1
Sputtering (Al)	1
Laser (Al)	1
Isolamento Periférico	1
Teste Painel	1
Colocação Fita Alumínio	1
Aplicação EVA	2
Laminação	2
Forno Envelhecimento	0
Ligações Eléctricas	2
Enchimento com Silicone	1
Teste Módulos	1
Limpeza/Embalamento	3

Ainda dentro da recolha dos dados, a determinação dos tempos foi feita da seguinte forma:

Para operações não contínuas

A linha de produção dispõe de um software de apoio à produção “Solar” que gere toda a produção, ou seja, sempre que há uma movimentação física de um lote de painéis, o mesmo é feito nesse sistema. O “Solar” faz assim o registo de todos os tempos de

produção em todos os sectores, bem como matérias-primas utilizadas, matérias-primas disponíveis em cada sector da linha e operadores associados a cada operação. Foram recolhidos os tempos de 50 lotes ao longo de todo o processo. Alguns desses tempos foram excluídos por corresponderem a situações fora do normal, tais como: avarias nos equipamentos, lançamentos incorrectos em sistema, erro humano no lançamento dos lotes. Nas operações contínuas o tempo registado de produção depende sempre do tempo de produção do sector a jusante.

Nas operações contínuas

Para estes casos os tempos foram recolhidos manualmente em amostras de dimensão nunca inferior a 20.

Todos os tempos válidos foram então inseridos no módulo *Input Analyzer* do software Arena®, tendo sido escolhidas e utilizadas as distribuições que ofereciam melhor qualidade de ajuste (ver Anexos I e II).

Depois da definição dos pressupostos, foi feita a validação do modelo conceptual

3.1.3. Validação do modelo conceptual

Neste ponto avalia-se a validade do modelo conceptual.

A validade deste modelo conceptual foi feita por recurso a opiniões de especialistas no sistema produtivo, nomeadamente trabalhadores da Solar Plus, capazes de perceber se o modelo desenvolvido conceptualmente representa adequadamente a realidade.

Depois da validação do modelo prossegue-se com a construção do modelo operacional.

3.1.4. Construção do modelo operacional e verificação

Nesta fase é programado o modelo conceptual numa linguagem de programação.

São também detectados e corrigidos muitos erros não intencionais, relacionados geralmente com a lógica do modelo.

Esta fase consumiu uma parte importante do tempo disponível para a tarefa, devido à complexidade do modelo.

Vários blocos de modelação foram utilizados para este caso específico nomeadamente os incluídos nos módulos: “*Basic Process*”, “*Advanced Process*” e “*Advanced Transfer*” (ver Anexo 1).

Basic Process

Módulo utilizado para grande parte das simulações, permite criar e eliminar entidades, criar os seus atributos. Este módulo permite também agrupar e separar entidades com base nas suas características ou programação. Aqui também se criam processos que simulam tarefas específicas, que pretendem modelar a realidade. Permite por último gravar (*record*) determinados dados que mais tarde poderão dar origem a contadores e também a dados estatísticos.

Advanced Process

Neste módulo podemos encontrar alguns blocos já mais complexos que permitem implementar funções lógicas como “parar enquanto máquina A está em funcionamento”, permite agrupar mais que um tipo de entidade em simultâneo, que é o que acontece muitas vezes na realidade em que a mesma operação realiza diversas tarefas. Permite organizar recursos e tarefas.

Advanced Transfer

Permite a modelação de diversos tipos de transporte de materiais como recursos, permitindo também, na animação, deslocar entidades de um lado para o outro do ecrã de maneira a não sobrecarregar a ecrã com informação desnecessária. Permite também simular características que dependem do controlo humano como pontes rolantes, camiões, empilhadores, bem como meios automáticos como tapetes rolantes ou circuitos auto-controlados.

O modelo criado tem 31 blocos de processos, 19 pontos de partida/chegada de carros de transporte, 75 distâncias entre sectores, 26 recursos diferentes e 16 contadores.

Muitas das operações são precedidas de *holds* que asseguram os stocks intermédios nas operações seguintes e fornecem dados para os blocos anteriores. Este tipo de blocos permite uma grande aproximação da realidade e mostra qual o real output da linha.

Todos os transportes de materiais são recriados, os seus recursos associados, bem como todas as combinações de distâncias entre si, assim como a velocidade de transporte(ver ANEXO II).

A criação do modelo conceptual permitiu acelerar o processo de programação.

Para a geração de números aleatórios do software foram utilizadas as distribuições geradas pelo módulo *Input Analyzer*, que podem ser consultadas na tabela do Anexo III.

3.1.5. Testes piloto

Nesta fase são efectuados testes piloto, para avaliar o modelo.

Para facilitar esta fase foram criados diversos indicadores como contadores, gráficos, recursos em utilização, como pode ser consultado no ANEXO I que permitiam identificar alguns problemas, ou resolvê-los de uma forma expedita.

Quando concluído o modelo, foram efectuados diversos testes piloto. Estes testes piloto permitiram, em diversas ocasiões, perceber que algumas condições tinham sido erradamente introduzidas, ou não produziam o efeito desejado, tendo sido corrigidas. Tais como erros de código, situações que existem na realidade mas que não tinham sido transpostas para qualquer dos modelos (conceptual e operacional).

3.1.6. Validação do modelo operacional

Nesta fase pretende-se avaliar se o modelo conceptual definido e implementado reflecte o sistema em análise.

Aqui pode avaliar-se também se as abstracções e simplificações utilizadas têm ou não impacto nos resultados

Uma forma de verificar esta validade é comparar as medidas de desempenho fornecidas pelo sistema com as reais, se houver.

O modelo foi então validado, comparando o output gerado, com o que acontece na realidade, cerca de 480 módulos por dia, assim como os recursos que se revelaram estranguladores da capacidade da linha (com uma taxa de ocupação acima dos 90%), e também as filas máximas de espera nos diversos sectores. Comparando os resultados concluiu-se que o modelo representava a realidade com um grau de aproximação interessante.

3.1.7. Desenho de experiências (Experimental Design)

No desenho das experiências, são definidos os cenários e as condições de teste.

Define-se entre outros:

- A duração do período de simulação;
- O número de execuções;
- As condições iniciais para cada replicação;
- A duração do período de aquecimento.

A duração escolhida para a simulação foi de 7 dias de 24h de produção.

O número de replicações execuções escolhido foi de 20.

As condições iniciais de cada replicação foram o arranque com a linha completamente vazia. Já o período de aquecimento definido foi 3 dias, que é o tempo suficiente para carregar toda a linha, e a execução começar com todos os postos com material.

Cenário Actual

Actualmente toda a produção é feita em lotes, entre postos, e de forma unitária em cada posto de trabalho. Ou seja, cada lote lançado na deposição é constituído por 48 painéis que, ao longo do processo, devido a diversas falhas vai perdendo algumas unidades, hoje em dia cerca de 5%.

Normalmente as falhas são devido ao manuseamento (lascas, fissuras), equipamentos (Sputtering, cortes cruzados), entre outros.

Estes 48 painéis lançados em produção correspondem à capacidade da Box de deposição (que entra dentro das câmaras). Com uma capacidade instalada de 12 *runs* por dia, ou seja a produção de 12 lotes de 48 unidades cada.

Cenário Alternativo

Aumento da capacidade das caixas de 48 para 64 painéis, que representa o lançamento de mais 33% de produção. Implica o aumento da capacidade de processamento dos dois sistemas de sputtering por via de alteração dos sistemas de bombagem. E também a troca dos equipamentos de laminação por um automático com um output de 6 módulos a cada 12 minutos.

Este foi o cenário escolhido para a simulação de um cenário alternativo, porque era pretendido saber qual o impacto dos investimentos já em curso, e se eram ou não justificados perante o cenário actual.

Não foram testados outros cenários alternativos pela limitação de tempo, e disponibilidade de equipamento, e também porque nesta fase a empresa ainda não necessitar de testar outras alternativas.

Seguidamente passou-se à execução dos modelos (actual e alternativo) e à análise dos respectivos resultados.

3.1.8. Execução do modelo e análise dos resultados (*output data*)

Na execução, o modelo revelou-se algo pesado para correr em modo de animação sendo que cada run demorava cerca de 20 minutos a correr à velocidade máxima. Optou-se

assim por correr o modelo no modo “Batch run” sem animação, levando desta forma cerca de 10 segundos.

Seguidamente foram recolhidos os outputs e iniciou-se a análise dos resultados, que poderá dar origem à avaliação de cenários adicionais.

Os resultados obtidos na execução do modelo que representa o estado actual foram os seguintes:

Tabela 2 - Taxas de ocupação dos recursos no cenário actual

Scheduled Utilization	Average	Minimum Average	Maximum Average
aplicacao eva posto 1	0.4731	0.4709	0.4755
aplicacao eva posto2	0.00	0.00	0.00
arrefecimento maquina	0.9319	0.8866	0.9689
deposicao1 maquina	0.9543	0.9240	0.9858
deposicao2 maquina	0.9238	0.8457	0.9760
estacao electrica posto	0.3947	0.3907	0.3997
estacao mecanica maquina	0.5035	0.4988	0.5118
fita al1 posto	0.5010	0.4963	0.5048
fita al2 posto	0.00	0.00	0.00
forno envelhecimento 1 maquina	0.6540	0.5888	0.6974
forno envelhecimento 2 maquina	0.3968	0.3343	0.4716
forno pre aq1	0.9203	0.8847	0.9656
forno pre aq2	0.8829	0.7839	0.9483
isolamento maquina	0.6823	0.6761	0.6865
laminador	0.9991	0.9981	0.9997
laser 2	0.4771	0.4748	0.4794
laser 3	0.4771	0.4743	0.4800
laser1 maquina	0.8124	0.7733	0.8386
limpeza e embalagem posto	0.2505	0.2482	0.2534
maquina lavar	0.3556	0.3417	0.3670
maquina lixar	0.3437	0.3259	0.3564
Operador	0.7499	0.7410	0.7603
sputtering al maquina	0.9985	0.9941	1.0000
sputtering zn maquina	0.9979	0.9942	1.0000
teste modulos maquina	0.4947	0.4889	0.5006
teste painel maquina	0.5067	0.5015	0.5153

Pela tabela 2 podemos concluir os recursos que estão a limitar o sistema são o conjunto de laminadores com uma taxa de utilização 99,91%, bem como ambos os sputterings de

alumínio e de zinco, com taxas de utilização de 99,85% e

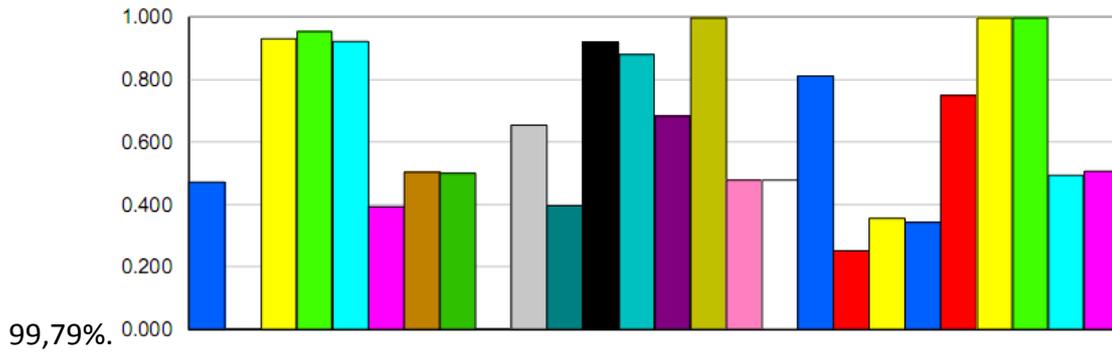


Gráfico 1 - Taxas de ocupação dos recursos no modelo actual



Estes são portanto os recursos gargalo do nosso sistema.

O outro ponto de análise e comparação é o output total da linha que, na situação actual, teve um valor de 3224 módulos em 7 dias, dando uma média de 461 módulos por dia.

De realçar também o número de runs completados que, nesta situação, corresponde a 10,7 runs diários de média.

Estes resultados podem servir também como reforço da importância dos investimentos já em curso, sendo assim criado o seguinte cenário alternativo:

- Substituição das boxes existentes por outras de capacidade para 64 painéis, ao invés dos actuais 48.

- Melhoria do sistema de bombagem das câmaras de entrada e saída dos sputterings, reduzindo assim em cerca de 30% o tempo de processamento dos painéis nestes postos de trabalho
- Substituição do actual sistema de laminação por um com a capacidade de processar 6 módulos a cada 12 minutos.

Com estas alterações foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 3 - Taxas de ocupação dos recursos no cenário alternativo criado

Scheduled Utilization	Average	Minimum Average	Maximum Average
aplicacao eva posto1	0.6374	0.6181	0.6555
aplicacao eva posto2	0.00	0.00	0.00
arrefecimento maquina	0.8443	0.8090	0.8838
deposicao1 maquina	0.8174	0.7757	0.8648
deposicao2 maquina	0.8688	0.8275	0.8946
estacao electrica posto	0.5310	0.5083	0.5508
estacao mecanica maquina	0.6771	0.6489	0.7065
fita al1 posto	0.6418	0.6217	0.6616
fita al2 posto	0.00	0.00	0.00
forno envelhecimento 1 maquina	0.7390	0.7122	0.7829
forno envelhecimento 2 maquina	0.6843	0.6466	0.7339
forno pre aq1	0.6975	0.6530	0.7315
forno pre aq2	0.7569	0.7146	0.8089
isolamento maquina	0.8715	0.8437	0.8984
laminador	0.8608	0.8344	0.8850
laser 2	0.6101	0.5857	0.6293
laser 3	0.6099	0.5848	0.6305
laser1 maquina	0.9732	0.9327	1.0000
limpeza e embalamento posto maquina lavar	0.3371	0.3204	0.3509
maquina lavar	0.4048	0.3906	0.4162
maquina lixar	0.4097	0.3924	0.4209
Operador	0.8501	0.8283	0.8646
sputtering al maquina	0.8927	0.8583	0.9212
sputtering zn maquina	0.8928	0.8544	0.9231
teste modulos maquina	0.6653	0.6325	0.6878
teste painel maquina	0.6510	0.6264	0.6719

Podemos observar que os anteriores recursos “gargalo” deixaram de o ser apesar de manterem elevadas taxas de utilização. Com esta solução o posto que limitaria o sistema seria o Laser 1.

Observa-se também que o posto Isolamento Periférico passa a ser utilizado a 87,15%, o que é indicador de que é um posto potencialmente limitador de futuros aumentos de cadência.

A taxa de ocupação dos operadores, passa também para os 85% que é já algo elevado se tivermos em conta que não estão a ser contabilizados os tempos utilizados nas movimentações de carros de painéis e módulos.

O output total atingido com esta solução cifra-se numa média de 620 módulos embalados no fim da linha, tendo assim um aumento de 34,5%.

O número médio de deposições passou para 9,7 deposições em média por dia, o que é normal uma vez que estamos a lançar um maior número de painéis em linha por cada deposição feita.

Nota-se também, no gráfico 2, um maior preenchimento de todos os recursos.

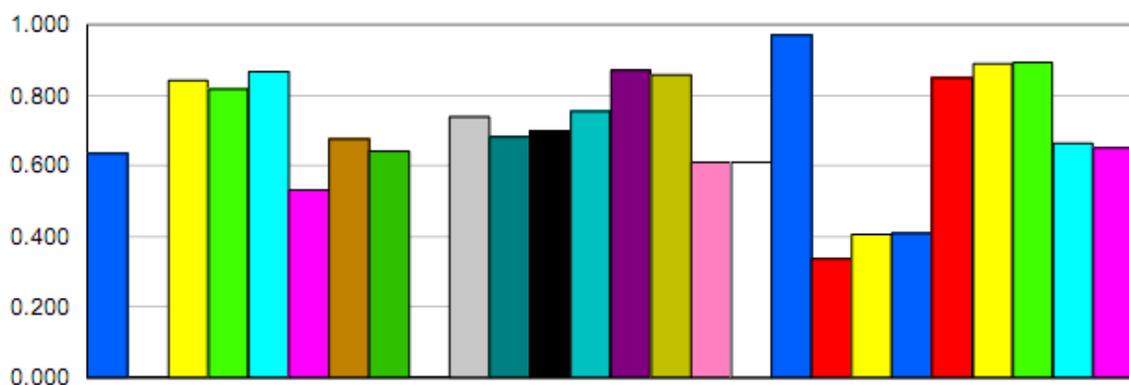


Gráfico 2 - Taxas de ocupação dos recursos no cenário alternativo criado

■ aplicacao eva posto1	■ aplicacao eva posto2
■ arrefecimento maquina	■ deposicao1 maquina
■ deposicao2 maquina	■ estacao electrica posto
■ estacao mecanica maquina	■ fita al1 posto
■ fita al2 posto	■ forno envelhecimento 1 maquina
■ forno envelhecimento 2 maquina	■ forno pre aq1
■ forno pre aq2	■ isolamento maquina
■ laminador	■ laser 2
□ laser 3	■ laser1 maquina
■ limpeza e embalamento posto	■ maquina lavar
■ maquina lixar	■ Operador
■ sputtering al maquina	■ sputtering zn maquina
■ teste modulos maquina	■ teste painel maquina

Seguidamente podemos observar na Tabela 5 a comparação dos valores das taxas de ocupação.

Tabela 4 - Comparação dos valores de taxas de ocupação

Recurso	Normal	Alternativo	Diferença
Aplicação EVA posto1	47,31%	63,74%	16,43%
Aplicação EVA posto2	0,00%	0,00%	0,00%
Arrefecimento maquina	93,19%	84,43%	-8,76%
Deposicao1 maquina	94,30%	81,74%	-12,56%
Deposicao2 maquina	92,38%	86,88%	-5,50%
Estação eléctrica posto	39,47%	53,10%	13,63%
Estação mecânica maquina	50,35%	67,71%	17,36%
Fita al1 posto	50,10%	64,18%	14,08%
Fita al2 posto	0,00%	0,00%	0,00%
Forno envelhecimento 1 maquina	65,40%	73,90%	8,50%
Forno envelhecimento 2 maquina	39,68%	68,43%	28,75%
Forno pre aq1	92,03%	69,75%	-22,28%
Forno pre aq2	88,29%	75,69%	-12,60%
Isolamento maquina	68,23%	87,15%	18,92%
Laminador	99,91%	86,08%	-13,83%
Laser 2	47,71%	61,01%	13,30%
Laser 3	47,71%	60,99%	13,28%
Laser1 maquina	81,24%	97,32%	16,08%
Limpeza e embalagem posto	25,05%	33,71%	8,66%
Máquina lavar	35,56%	40,48%	4,92%
Máquina lixar	34,37%	40,97%	6,60%
Operador	74,99%	85,01%	10,02%
Sputtering al maquina	99,85%	89,27%	-10,58%
Sputtering zn maquina	99,79%	89,28%	-10,51%
Teste módulos maquina	49,47%	66,53%	17,06%
Teste painel maquina	50,67%	65,10%	14,43%

Podemos desta forma observar, tal como era esperado, uma melhoria das taxas de ocupação dos equipamentos. Os postos assinalados são aqueles onde houve uma alteração directa nos dados devido às alterações de pressupostos.

De realçar também a baixa taxa de aproveitamento de alguns postos de trabalho como a colocação de fita de alumínio, e aplicação de EVA que são dois postos que trabalham em contínuo, dependem sempre da capacidade produtiva do posto imediatamente a seguir, têm um tempo de processamento acelerado, e que neste caso existem em duplicado.

4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

O desenvolvimento deste projecto nesta empresa do ramo das energias renováveis, revelou-se muito positivo, permitindo analisar o local de trabalho de um ponto de vista que, de outra forma, seria difícil.

O projecto realizado, atingiu os objectivos iniciais, permitindo a análise da situação actual, bem como dos projectos em curso. Os resultados obtidos poderão desta forma ser utilizados para fazer pequenos ajustes aos investimentos previstos, porque assim ficou-se com uma noção mais exacta do impacto global na produção.

O próximo passo deste projecto seria a correcção e/ou actualização de tempos das diversas tarefas, porque num sistema dinâmico e dependente de pessoas como este, há sempre uma evolução. Seguidamente, poder-se ia estudar a redução ou eliminação dos novos “recursos gargalo”, de maneira a ter a linha toda equilibrada para o máximo de output gerado pelo aproveitamento máximo dos recursos (humanos e materiais).

Deveriam ter sido testadas todas as alterações individualmente, e só depois a consequência destas no global, mas não foi assim executado devido à limitação de tempo, e porque algumas das alterações testadas estão em curso.

O modelo desenvolvido, poderá vir a ser actualizado, de maneira a estudar outras alternativas, tanto em termos de *layout* como de quantidade de equipamentos. Outros cenários que poderiam ser estudados seriam, o aumento da capacidade do Laser 1, o que permitiria um abastecimento da linha de uma maior quantidade de painéis. Seria também interessante perceber quais as consequências do aumento de capacidade daquele que pode ser chamado o “coração” da unidade fabril, o sistema de deposições passando tanto pelo aumento da velocidade dos actuais equipamentos (possível com algumas alterações de hardware) bem como a duplicação de alguns deles.

As principais dificuldades encontradas prendem-se com a necessidade do modelo só poder ser programado e executado num conjunto limitado de computadores (onde se encontra instalada a versão funcional do Arena®) o que condicionou a velocidade de desenvolvimento e análise do modelo de simulação.

O projecto realizado foi um constante desafio, e foi possível perceber que é necessário um entendimento do sistema como um todo, assim como de muitas pequenas regras operacionais que não estão escritas e são passadas apenas de forma informal e com base no bom senso.

Concluiu-se, também, que a Simulação Industrial é uma ferramenta bastante poderosa na análise de cenários, porque permite, num curto espaço de tempo, simular o comportamento de uma linha de produção em parâmetros bastante importantes a nível operacional, como a simulação de filas de espera, taxas de ocupação, entre outros. Muitas vezes este tipo de simulações seriam muito complicadas de concretizar, quer a nível operacional, pelo ponto de vista da introdução de novos equipamentos na linha e paragens de produção para proceder a estes testes, que nunca poderiam ser feitos na linha como um sistema completo. Também a nível financeiro implicaria um elevado investimento em meios e recursos humanos para testar várias alternativas.

Por fim, é de realçar que o investimento feito num estudo de simulação pode, a médio ou longo prazo, revelar-se bastante proveitoso, evitando investimentos desnecessários, ou mesmo facilitando o estabelecimento de um conjunto de prioridades para investir, ou ainda promovendo um maior aproveitamento dos recursos já existentes.

5. Bibliografia

- Meyers , Fred; Stephens, Matthew “Manufacturing Facilities Design and Material Handling” 2004
- Askin, Ronald; Standridge, Charles, “Modeling and Analysis of Manufacturing Systems” 1993;
- Buffa, Elwood; Rakesh, Sarin, “Modern Production/Operations Management” Eighth Edition, 1987
- Nahmias, Steven, “Production and Operation Analysis” Fifth Edition 2005
- Ramos, Ana, “Concepção e Desenvolvimento de uma Biblioteca de Simulação para Avaliação Dinâmica de Sistemas de Produção Celulares” 2001.
- Law, Averill; Kelton, W. David, “Simulation Modeling and Analysis”, 3ª edição, 2000.
- Ramos, Ana, “Simulação Industrial”, Universidade de Aveiro, 2005.
- Kelton, W. David; Sadowski, Randall P.; Sadowski, Deborah A., “Simulation with Arena”, 3ª edição, 2004.

Internet

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Algoritmo>

http://www-usr.inf.ufsm.br/~andrezc/ia/heuristicas_construtivas.pdf

http://www.producao.ufrgs.br/disciplinas.asp?cod_turma=393

http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/390_set2009_arranjo_fisico_e_localizacao.ppt

http://www.producao.ufrgs.br/disciplinas.asp?cod_turma=86

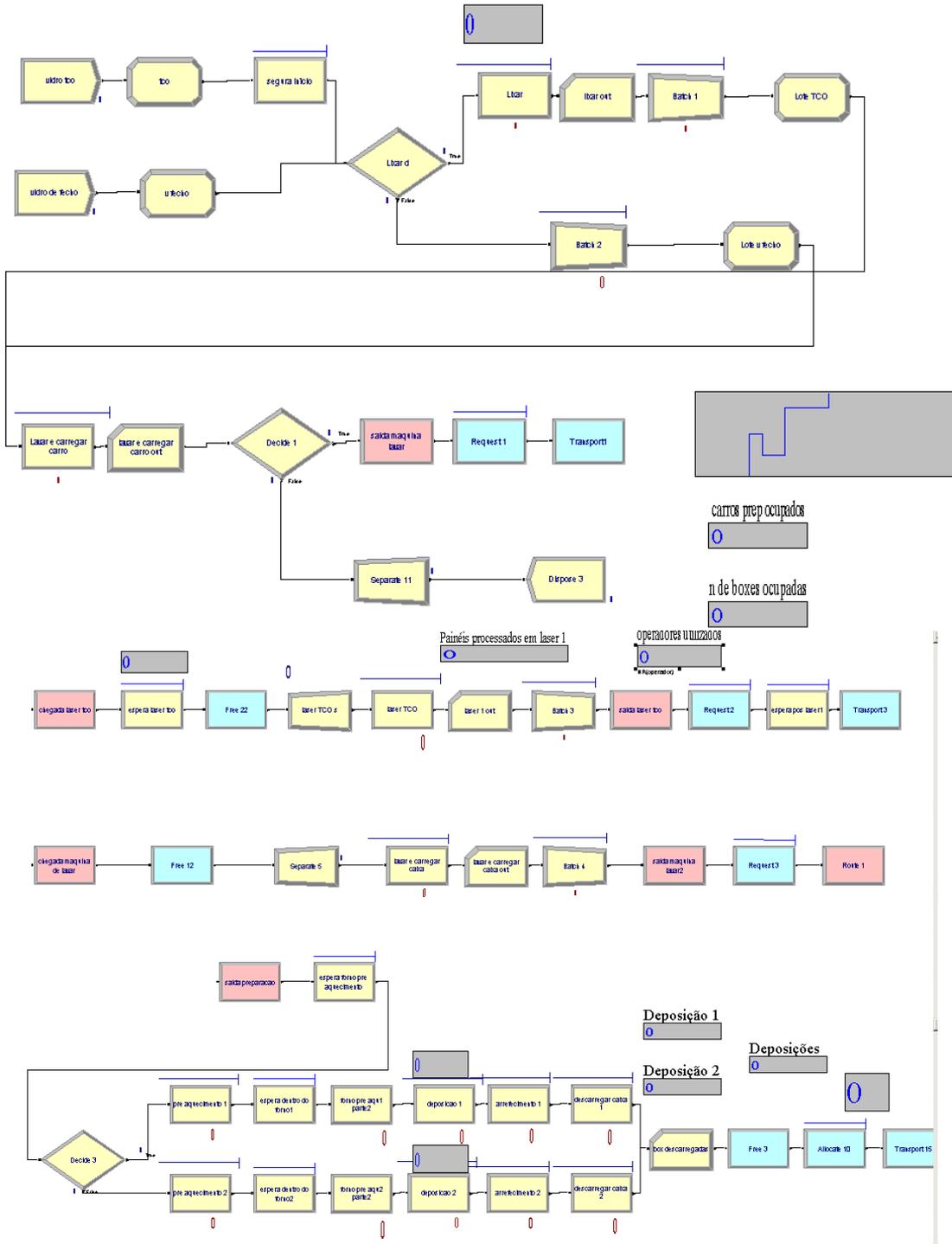
<http://www.me.utexas.edu/~jensen/ORMM/omie/design/unit/layout/craft.html>

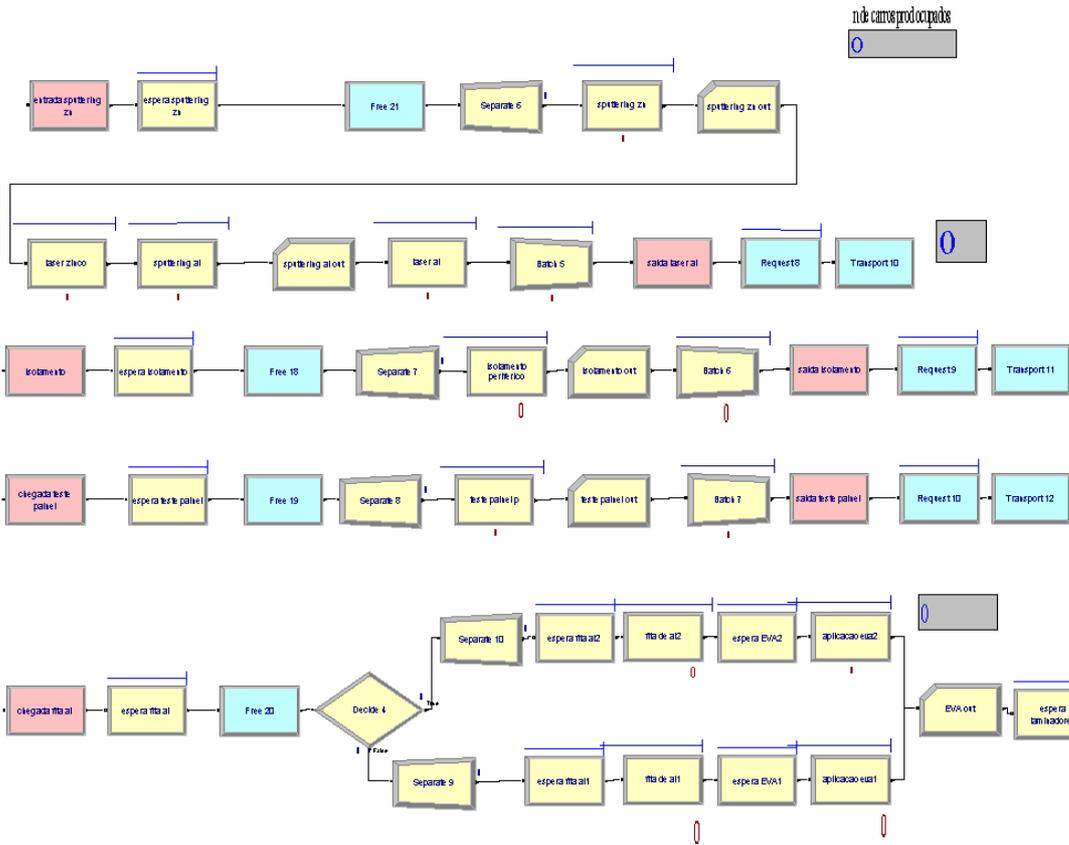
<http://dailyindustry.wordpress.com/2009/05/22/>

Anexos

ANEXO I

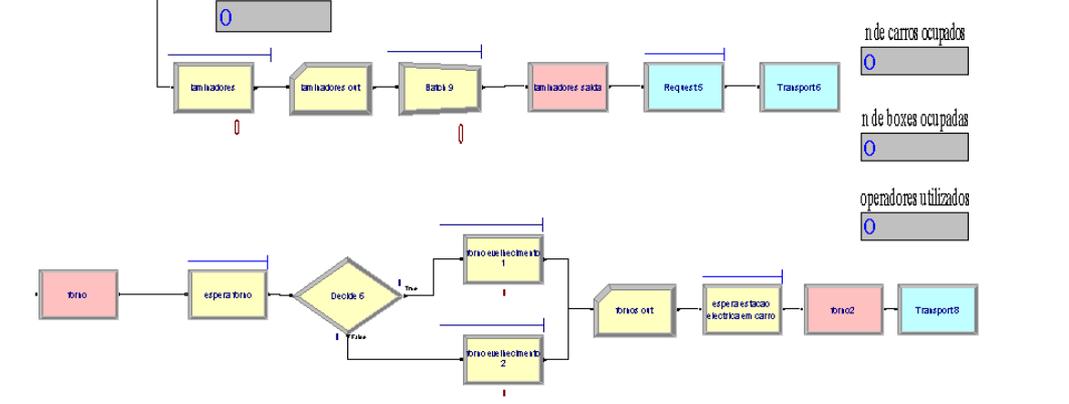
Modelo gerado





n. de carros producidos
0

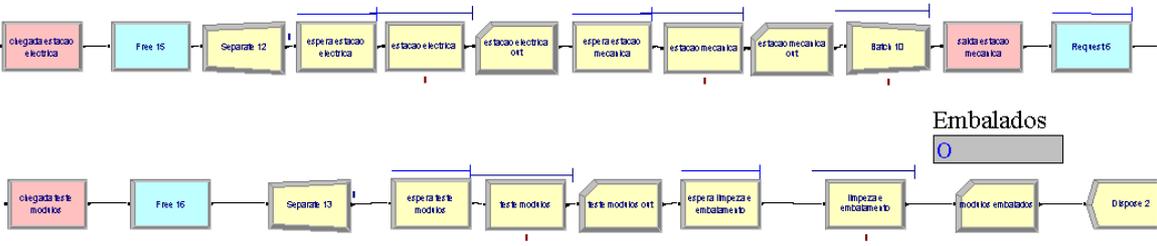
Laminadores



n. de carros ocupados
0

n. de boxes ocupadas
0

operadores utilizados
0



Embalados
0

Antes da execução do modelo

Estatísticas **00:00:00**

Output

Lixar
0

Lavar e carregar carro
0

Laser TCO
0

lavar e carregar caixa
0

Deposições
0

sputtering al
0

Isolamento
0

EVA
0

Laminadores:
0

Fornos
0

estacao electrica
0

Estacao mecanica
0

teste modulos
0

Impressão e embalagem
0

WIP

Laser TCO
0

Lavar e carregar caixa
0

forno pre aquecimento
0

sputtering zn
0

Isolamento
0

Teste painel
0

fita de al
0

Laminadores:
0

Fornos
0

Estacao electrica
0

Estacao mecanica
0

teste modulos
0

Impressão e embalagem
0

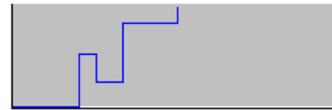
Recursos

carros prep ocupados
0

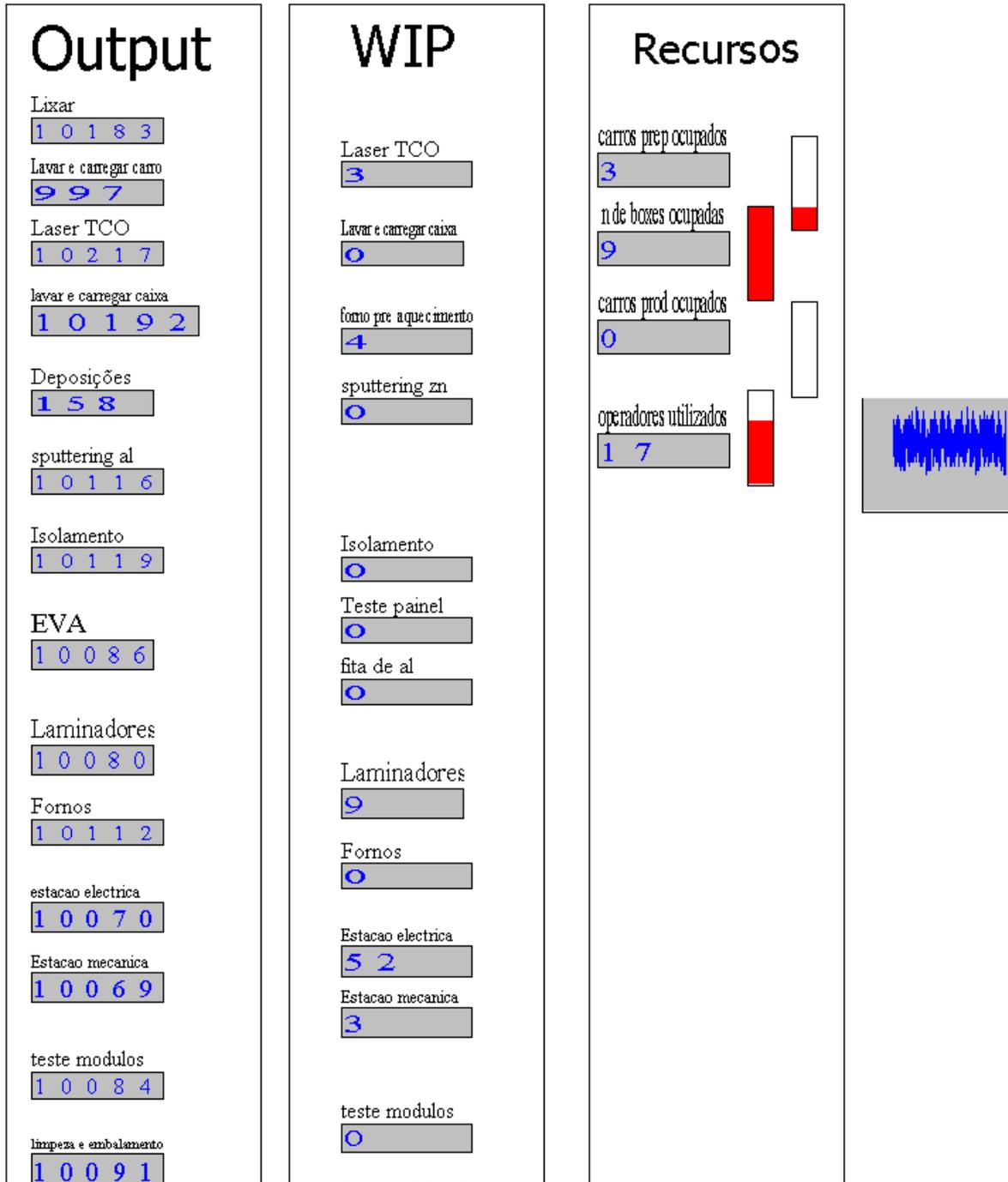
1 de boxes ocupadas
0

carros prod ocupados
0

operadores utilizados
0



No último instante da execução do modelo



ANEXO II

Stations			
	Beginning Station	Ending Station	Distance
1	arrefecimento	entrada sputtering zn	4
2	arrefecimento	saida laser al	30
3	arrefecimento	isolamento	25
4	arrefecimento	saida isolamento	25
5	arrefecimento	chegada teste painel	20
6	arrefecimento	saida teste painel	20
7	arrefecimento	chegada fita al	22
8	arrefecimento	laminadores	25
9	entrada sputtering zn	saida laser al	25
10	entrada sputtering zn	isolamento	25
11	entrada sputtering zn	saida isolamento	25
12	entrada sputtering zn	chegada teste painel	20
13	entrada sputtering zn	saida teste painel	20
14	entrada sputtering zn	chegada fita al	22
15	entrada sputtering zn	laminadores	25
16	saida laser al	isolamento	15
17	saida laser al	saida isolamento	15
18	saida laser al	chegada teste painel	25
19	saida laser al	saida teste painel	25
20	saida laser al	chegada fita al	25
21	saida laser al	laminadores	30
22	isolamento	saida isolamento	0
23	isolamento	chegada teste painel	10
24	isolamento	saida teste painel	10
25	isolamento	chegada fita al	8
26	isolamento	laminadores	13
27	saida isolamento	chegada teste painel	10
28	saida isolamento	saida teste painel	10
29	saida isolamento	chegada fita al	8
30	saida isolamento	laminadores	13
31	chegada teste painel	saida teste painel	0
32	chegada teste painel	chegada fita al	2
33	chegada teste painel	laminadores	5
34	saida teste painel	chegada fita al	2
35	saida teste painel	laminadores	5
36	chegada fita al	laminadores	5
37	entrada sputtering zn	arrefecimento	1
38	entrada sputtering zn	entrada sputtering zn	1
39	entrada sputtering zn	saida laser al	1
40	entrada sputtering zn	isolamento	1
41	entrada sputtering zn	saida isolamento	1
42	entrada sputtering zn	chegada teste painel	1
43	entrada sputtering zn	saida teste painel	1
44	entrada sputtering zn	chegada fita al	1
45	entrada sputtering zn	laminadores	1

Double click here to add a new row

ANEXO III

Tabela de expressões de tempos de processamento utilizados

LIXAR	
Distribution:	Normal
Expression:	NORM(0.956, 0.219)
LAVAR E CARREGAR CARRO	
Distribution:	Normal
Expression:	NORM(1.02, 0.3)
Laser TCO	
Distribution:	Normal
Expression:	NORM(2.26, 0.157)
Lavar / Carreg. Caixa	
Distribution:	Lognormal
Expression:	0.43 + LOGN(0.421, 0.256)
Deposição	
Distribution:	Normal
Expression:	NORM(250, 16.9)
Arrefecimento / Desc. Caixa	
Distribution:	Beta
Expression:	132 + 323 * BETA(1.62, 2.86)
Sputt ZN	
Distribution:	Beta
Expression:	2.08 + 2.7 * BETA(1.33, 1.68)
Lser2	
Distribution:	Beta
Expression:	1.11 + 0.65 * BETA(1.79, 1.96)
Sput al	
Distribution:	Triangular
Expression:	TRIA(2.18, 2.73, 4)
laser al	
Distribution:	Beta
Expression:	1.11 + 0.65 * BETA(1.79, 1.96)
Isolamento	
Distribution:	Beta
Expression:	1.43 + 1.38 * BETA(1.78, 2.32)
Teste Painel	
Distribution:	Lognormal
Expression:	0.77 + LOGN(0.74, 0.531)
Fita Al	
Distribution:	Beta
Expression:	1.03 + 0.82 * BETA(1.78, 1.41)
EVA	
Distribution:	Beta
Expression:	1.04 + 0.89 * BETA(2.44, 2.47)
Laminadores	
Distribution:	Normal
Expression:	NORM(3.13, 0.113)
Fornos	
Distribution:	Beta
Expression:	181 + 64 * BETA(0.541, 0.606)
Estacao electrica	
Distribution:	Beta
Expression:	1 + 0.66 * BETA(0.779, 1.46)
Estacao mecanica	
Distribution:	Lognormal
Expression:	1.16 + LOGN(0.412, 0.267)
Teste Módulos	
Distribution:	Beta
Expression:	1 + 1 * BETA(1.19, 0.972)
limpeza	
Distribution:	Lognormal
Expression:	0.67 + LOGN(0.113, 0.0672)

Introdução dos tempos do modelo normal

Process - Basic Process											
	Name	Type	Action	Priority	Resources	Delay Type	Units	Allocation	Value	Expression	Report St
1	Lixar	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	0.5	NORM(0.956, 0.219)	✓
2	Lavar e carregar carro	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	0.5	NORM(1.02, 0.3)	✓
3	laser TCO	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.75	NORM(2.26, 0.157)	✓
4	lavar e carregar caixa	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	0.5	0.43 + LOGN(0.421, 0.256)	✓
5	pre aquecimento 1	Standard	Seize Delay	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	210	0	✓
6	pre aquecimento 2	Standard	Seize Delay	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	210	0	✓
7	deposicao 1	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	255	NORM(250, 16.9)	✓
8	deposicao 2	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	255	NORM(250, 16.9)	✓
9	arrefecimento 1	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Expression	Minutes	Value Added	205	132 + 323 * BETA(1.62, 2.86)	✓
10	arrefecimento 2	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Expression	Minutes	Value Added	205	132 + 323 * BETA(1.62, 2.86)	✓
11	laser zinco	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.25	1.11 + 0.65 * BETA(1.79, 1.96)	✓
12	sputtering al	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	2.75	TRIA(2.18, 2.73, 4)	✓
13	laser al	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.25	1.11 + 0.65 * BETA(1.79, 1.96)	✓
14	isolamento periferico	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.5	1.43 + 1.38 * BETA(1.78, 2.32)	✓
15	teste painel p	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1	0.77 + LOGN(0.74, 0.531)	✓
16	fita de al1	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.5	1.03 + 0.82 * BETA(1.78, 1.41)	✓
17	forno envelhecimento 1	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Expression	Minutes	Value Added	240	181 + 64 * BETA(0.541, 0.606)	✓
18	forno envelhecimento 2	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Expression	Minutes	Value Added	240	181 + 64 * BETA(0.541, 0.606)	✓
19	estacao electrica	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1	1 + 0.66 * BETA(0.779, 1.46)	✓
20	estacao mecanica	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.5	1.16 + LOGN(0.412, 0.267)	✓
21	teste modulos	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1	1 + 1 * BETA(1.19, 0.972)	✓
22	aplicacao eva1	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1	1.04 + 0.89 * BETA(2.44, 2.47)	✓
23	fita de al2	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.5	1.03 + 0.82 * BETA(1.78, 1.41)	✓
24	aplicacao eva2	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	2	1.04 + 0.89 * BETA(2.44, 2.47)	✓
25	limpeza e embalamento	Standard	Seize Delay Release	High(1)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.25	0.67 + LOGN(0.113, 0.0672)	✓
26	forno pre aqu1 parte2	Standard	Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	0	0	✓
27	forno pre aqu2 parte2	Standard	Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	0	0	✓
28	sputtering zn	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	2.75	TRIA(2.18, 2.73, 4)	✓
29	descarregar caixa 1	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Expression	Minutes	Value Added	30	108 + WEIB(231, 1.31)	✓
30	descarregar caixa 2	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Expression	Minutes	Value Added	30	108 + WEIB(231, 1.31)	✓
31	laminadores	Standard	Seize Delay Release	High(1)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1	NORM(3.13, 0.113)	✓

Introdução dos tempos do modelo alternativo

Process - Basic Process											
	Name	Type	Action	Priority	Resources	Delay Type	Units	Allocation	Value	Expression	Report Statistics
1	Lixar	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	0.5	NORM(0.956, 0.219)	✓
2	Lavar e carregar carro	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	0.5	NORM(1.02, 0.3)	✓
3	laser TCO	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.75	(NORM(2.26, 0.157))	✓
4	lavar e carregar caixa	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	0.5	0.43 + LOGN(0.421, 0.256)	✓
5	pre aquecimento 1	Standard	Seize Delay	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	210	0	✓
6	pre aquecimento 2	Standard	Seize Delay	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	210	0	✓
7	deposicao 1	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	255	(NORM(250, 16.9))	✓
8	deposicao 2	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	255	(NORM(250, 16.9))	✓
9	arrefecimento 1	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Expression	Minutes	Value Added	205	132 + 323 * BETA(1.62, 2.86)	✓
10	arrefecimento 2	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Expression	Minutes	Value Added	205	132 + 323 * BETA(1.62, 2.86)	✓
11	laser zinco	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.25	1.11 + 0.65 * BETA(1.79, 1.96)	✓
12	sputtering al	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	2.75	(TRIA(2.18, 2.73, 4))*0.7	✓
13	laser al	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.25	1.11 + 0.65 * BETA(1.79, 1.96)	✓
14	isolamento periferico	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.5	1.43 + 1.38 * BETA(1.78, 2.32)	✓
15	teste painel p	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1	0.77 + LOGN(0.74, 0.531)	✓
16	fita de al1	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.5	1.03 + 0.82 * BETA(1.78, 1.41)	✓
17	forno envelhecimento 1	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Expression	Minutes	Value Added	240	181 + 64 * BETA(0.541, 0.606)	✓
18	forno envelhecimento 2	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Expression	Minutes	Value Added	240	181 + 64 * BETA(0.541, 0.606)	✓
19	estacao electrica	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1	1 + 0.66 * BETA(0.779, 1.46)	✓
20	estacao mecanica	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.5	1.16 + LOGN(0.412, 0.267)	✓
21	teste modulos	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1	1 + 1 * BETA(1.19, 0.972)	✓
22	aplicacao eva1	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1	1.04 + 0.89 * BETA(2.44, 2.47)	✓
23	fita de al2	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.5	1.03 + 0.82 * BETA(1.78, 1.41)	✓
24	aplicacao eva2	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	2	1.04 + 0.89 * BETA(2.44, 2.47)	✓
25	limpeza e embalamento	Standard	Seize Delay Release	High(1)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	1.25	0.67 + LOGN(0.113, 0.0672)	✓
26	forno pre aqu1 parte2	Standard	Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	0	0	✓
27	forno pre aqu2 parte2	Standard	Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	0	0	✓
28	sputtering zn	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Expression	Minutes	Value Added	2.75	(TRIA(2.18, 2.73, 4))*0.7	✓
29	descarregar caixa 1	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Expression	Minutes	Value Added	30	(108 + WEIB(231, 1.31))*1.5	✓
30	descarregar caixa 2	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Expression	Minutes	Value Added	30	(108 + WEIB(231, 1.31))*1.5	✓
31	laminadores	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	2 rows	Constant	Minutes	Value Added	2	0	✓

ANEXO IV

Resumo dos testes à qualidade de ajuste dos tempos de todas as operações às distribuições utilizadas

<p>LIXAR</p> <p>Distribution Summary</p> <p>Distribution: Normal</p> <p>Expression: NORM(0.956, 0.219)</p> <p>Square Error: 0.062551</p> <p>Chi Square Test</p> <p>Number of intervals 3</p> <p>Degrees of freedom 0</p> <p>Test Statistic = 3.87</p> <p>Corresponding p-value < 0.005</p> <p>Kolmogorov-Smirnov Test</p> <p>Test Statistic = 0.138</p> <p>Corresponding p-value > 0.15</p> <p>Data Summary</p> <p>Number of Data Points 28</p> <p>Min Data Value = 0.53</p> <p>Max Data Value = 1.51</p> <p>Sample Mean = 0.956</p> <p>Sample Std Dev = 0.223</p> <p>Histogram Summary</p> <p>Histogram Range = 0.43 to 1.61</p> <p>Number of Intervals 5</p>	
<p>LAVAR E CARREGAR CARRO</p> <p>Distribution Summary</p> <p>Distribution: Normal</p> <p>Expression: NORM(1.02, 0.3)</p> <p>Square Error: 0.013186</p> <p>Chi Square Test</p> <p>Number of intervals 3</p> <p>Degrees of freedom 0</p> <p>Test Statistic = 1.82</p> <p>Corresponding p-value < 0.005</p> <p>Kolmogorov-Smirnov Test</p> <p>Test Statistic = 0.16</p> <p>Corresponding p-value > 0.15</p>	

<p>Number of Data Points</p> <p>Min Data Value</p> <p>Max Data Value</p> <p>Sample Mean</p> <p>Sample Std Dev</p> <p>Histogram Range</p> <p>Number of Intervals</p>	<p>Data Summary</p> <p>31</p> <p>= 0.47</p> <p>= 1.75</p> <p>= 1.02</p> <p>= 0.305</p> <p>Histogram Summary</p> <p>= 0.34 to 1.88</p> <p>5</p>
<p>Laser TCO</p> <p>Distribution:</p> <p>Expression:</p> <p>Square Error:</p> <p>Chi Square Test</p> <p>Number of intervals</p> <p>Degrees of freedom</p> <p>Test Statistic</p> <p>Corresponding p-value</p> <p>Kolmogorov-Smirnov Test</p> <p>Test Statistic</p> <p>Corresponding p-value</p> <p>Number of Data Points</p> <p>Min Data Value</p> <p>Max Data Value</p> <p>Sample Mean</p> <p>Sample Std Dev</p> <p>Histogram Range</p> <p>Number of Intervals</p>	<p>Distribution Summary</p> <p>Normal</p> <p>NORM(2.26, 0.157)</p> <p>0.006490</p> <p>2</p> <p>-1</p> <p>= 0.0728</p> <p>< 0.005</p> <p>= 0.159</p> <p>> 0.15</p> <p>Data Summary</p> <p>23</p> <p>= 2.05</p> <p>= 2.63</p> <p>= 2.26</p> <p>= 0.16</p> <p>Histogram Summary</p> <p>= 2 to 2.69</p> <p>5</p>
<p>Lavar / Carreg. Caixa</p> <p>Distribution:</p> <p>Expression:</p> <p>Square Error:</p> <p>Kolmogorov-Smirnov Test</p> <p>Test Statistic</p> <p>Corresponding p-value</p> <p>Number of Data Points</p> <p>Min Data Value</p>	<p>Distribution Summary</p> <p>Lognormal</p> <p>0.43 + LOGN(0.421, 0.256)</p> <p>0.006795</p> <p>= 0.122</p> <p>> 0.15</p> <p>Data Summary</p> <p>18</p> <p>= 0.55</p>

Max Data Value	= 1.74
Sample Mean	= 0.855
Sample Std Dev	= 0.286
Histogram Range	Histogram Summary = 0.43 to 1.86
Number of Intervals	5
Forno Pré-Aquecimento (para excluir)	Distribution Summary
Distribution:	Weibull
Expression:	108 + WEIB(231, 1.31)
Square Error:	0.006219
Chi Square Test	
Number of intervals	3
Degrees of freedom	0
Test Statistic	= 0.714
Corresponding p-value	< 0.005
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.236
Corresponding p-value	< 0.01
	Data Summary
Number of Data Points	48
Min Data Value	109
Max Data Value	967
Sample Mean	322
Sample Std Dev	167
Histogram Range	Histogram Summary = 108 to 968
Number of Intervals	6
Deposição	Distribution Summary
Distribution:	Normal
Expression:	NORM(250, 16.9)
Square Error:	0.005729
Chi Square Test	
Number of intervals	3
Degrees of freedom	0
Test Statistic	= 0.424
Corresponding p-value	< 0.005
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.087
Corresponding p-value	> 0.15
	Data Summary

Number of Data Points	32
Min Data Value	218
Max Data Value	291
Sample Mean	250
Sample Std Dev	= 17.2
Histogram Range	Histogram Summary = 218 to 291
Number of Intervals	5
Arrefecimento / Desc. Caixa	Distribution Summary
Distribution:	Beta
Expression:	$132 + 323 * \text{BETA}(1.62, 2.86)$
Square Error:	0.013643
Chi Square Test	
Number of intervals	4
Degrees of freedom	1
Test Statistic	= 2.87
Corresponding p-value	= 0.0928
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0632
Corresponding p-value	> 0.15
	Data Summary
Number of Data Points	48
Min Data Value	132
Max Data Value	454
Sample Mean	249
Sample Std Dev	= 66.3
Histogram Range	Histogram Summary = 132 to 455
Number of Intervals	6
Sputt ZN	Distribution Summary
Distribution:	Beta
Expression:	$2.08 + 2.7 * \text{BETA}(1.33, 1.68)$
Square Error:	0.005771
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.131
Corresponding p-value	> 0.15
	Data Summary
Number of Data Points	15
Min Data Value	= 2.31
Max Data Value	= 4.55

Sample Mean	= 3.24
Sample Std Dev	= 0.717
Histogram Range	Histogram Summary = 2.08 to 4.78
Number of Intervals	5
Laser2	
Distribution:	Distribution Summary Beta
Expression:	$1.11 + 0.65 * \text{BETA}(1.79, 1.96)$
Square Error:	0.001836
Chi Square Test	
Number of intervals	3
Degrees of freedom	0
Test Statistic	= 0.202
Corresponding p-value	< 0.005
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0771
Corresponding p-value	> 0.15
	Data Summary
Number of Data Points	23
Min Data Value	= 1.17
Max Data Value	= 1.7
Sample Mean	= 1.42
Sample Std Dev	= 0.149
Histogram Range	Histogram Summary = 1.11 to 1.76
Number of Intervals	5
Sput al	
Distribution:	Distribution Summary Triangular
Expression:	$\text{TRIA}(2.18, 2.73, 4)$
Square Error:	0.002145
Chi Square Test	
Number of intervals	3
Degrees of freedom	1
Test Statistic	= 0.162
Corresponding p-value	= 0.708
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.126
Corresponding p-value	> 0.15
	Data Summary

Number of Data Points	31
Min Data Value	= 2.34
Max Data Value	= 3.9
Sample Mean	= 2.94
Sample Std Dev	= 0.418
Histogram Range	Histogram Summary = 2.18 to 4
Number of Intervals	5
laser al	
Distribution:	Distribution Summary Beta
Expression:	$1.11 + 0.65 * \text{BETA}(1.79, 1.96)$
Square Error:	0.001836
Chi Square Test	
Number of intervals	3
Degrees of freedom	0
Test Statistic	= 0.202
Corresponding p-value	< 0.005
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0771
Corresponding p-value	> 0.15
Number of Data Points	Data Summary 23
Min Data Value	= 1.17
Max Data Value	= 1.7
Sample Mean	= 1.42
Sample Std Dev	= 0.149
Histogram Range	Histogram Summary = 1.11 to 1.76
Number of Intervals	5
Isolamento	
Distribution:	Distribution Summary Beta
Expression:	$1.43 + 1.38 * \text{BETA}(1.78, 2.32)$
Square Error:	0.001041
Chi Square Test	
Number of intervals	3
Degrees of freedom	0
Test Statistic	= 0.114
Corresponding p-value	< 0.005

Kolmogorov-Smirnov Test Test Statistic Corresponding p-value Number of Data Points Min Data Value Max Data Value Sample Mean Sample Std Dev Histogram Range Number of Intervals	= 0.0847 > 0.15 Data Summary 22 = 1.55 = 2.69 = 2.03 = 0.303 Histogram Summary = 1.43 to 2.81 5
Teste Painel Distribution Summary Distribution: Expression: Square Error: Chi Square Test Number of intervals Degrees of freedom Test Statistic Corresponding p-value Kolmogorov-Smirnov Test Test Statistic Corresponding p-value Number of Data Points Min Data Value Max Data Value Sample Mean Sample Std Dev Histogram Range Number of Intervals	Lognormal $0.77 + \text{LOGN}(0.74, 0.531)$ 0.028663 3 0 = 0.158 < 0.005 = 0.153 > 0.15 Data Summary 22 = 0.97 = 2.88 = 1.53 = 0.589 Histogram Summary = 0.77 to 3 5
Fita AI Distribution: Expression: Square Error: Chi Square Test Number of intervals Degrees of freedom	Distribution Summary Beta $1.03 + 0.82 * \text{BETA}(1.78, 1.41)$ 0.009414 3 0

Test Statistic	= 0.321
Corresponding p-value	< 0.005
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.113
Corresponding p-value	> 0.15
	Data Summary
Number of Data Points	22
Min Data Value	= 1.1
Max Data Value	= 1.78
Sample Mean	= 1.49
Sample Std Dev	= 0.199
	Histogram Summary
Histogram Range	= 1.03 to 1.85
Number of Intervals	5
EVA	
	Distribution Summary
Distribution:	Beta
Expression:	$1.04 + 0.89 * \text{BETA}(2.44, 2.47)$
Square Error:	0.018125
Chi Square Test	
Number of intervals	3
Degrees of freedom	0
Test Statistic	= 1.8
Corresponding p-value	< 0.005
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.118
Corresponding p-value	> 0.15
	Data Summary
Number of Data Points	22
Min Data Value	= 1.12
Max Data Value	= 1.85
Sample Mean	= 1.49
Sample Std Dev	= 0.188
	Histogram Summary
Histogram Range	= 1.04 to 1.93
Number of Intervals	5
Laminadores	
	Distribution Summary
Distribution:	Normal
Expression:	$\text{NORM}(3.13, 0.113)$
Square Error:	0.016384

Chi Square Test	
Number of intervals	2
Degrees of freedom	-1
Test Statistic	= 0.0579
Corresponding p-value	< 0.005
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.113
Corresponding p-value	> 0.15
	Data Summary
Number of Data Points	22
Min Data Value	= 2.82
Max Data Value	= 3.33
Sample Mean	= 3.13
Sample Std Dev	= 0.115
	Histogram Summary
Histogram Range	= 2.76 to 3.39
Number of Intervals	5
Fornos	
	Distribution Summary
Distribution:	Beta
Expression:	$181 + 64 * \text{BETA}(0.541, 0.606)$
Square Error:	0.002556
Chi Square Test	
Number of intervals	3
Degrees of freedom	0
Test Statistic	= 0.398
Corresponding p-value	< 0.005
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0889
Corresponding p-value	> 0.15
	Data Summary
Number of Data Points	29
Min Data Value	181
Max Data Value	245
Sample Mean	211
Sample Std Dev	= 21.8
	Histogram Summary
Histogram Range	= 181 to 245
Number of Intervals	5
Estacao electrica	
	Distribution Summary
Distribution:	Beta

Expression:	$1 + 0.66 * \text{BETA}(0.779, 1.46)$
Square Error:	0.019233
Chi Square Test	
Number of intervals	3
Degrees of freedom	0
Test Statistic	= 1.26
Corresponding p-value	< 0.005
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.127
Corresponding p-value	> 0.15
	Data Summary
Number of Data Points	22
Min Data Value	= 1.01
Max Data Value	= 1.6
Sample Mean	= 1.23
Sample Std Dev	= 0.175
	Histogram Summary
Histogram Range	= 1 to 1.66
Number of Intervals	5
Estacao mecanica	
	Distribution Summary
Distribution:	Lognormal
Expression:	$1.16 + \text{LOGN}(0.412, 0.267)$
Square Error:	0.002223
Chi Square Test	
Number of intervals	3
Degrees of freedom	0
Test Statistic	= 0.159
Corresponding p-value	< 0.005
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.097
Corresponding p-value	> 0.15
	Data Summary
Number of Data Points	22
Min Data Value	= 1.27
Max Data Value	= 2.33
Sample Mean	= 1.57
Sample Std Dev	= 0.255
	Histogram Summary
Histogram Range	= 1.16 to 2.44
Number of Intervals	5
Teste Módulos	

Distribution:	Distribution Summary
Expression:	Beta
Square Error:	$1 + 1 * \text{BETA}(1.19, 0.972)$
Chi Square Test	0.033860
Number of intervals	3
Degrees of freedom	0
Test Statistic	= 1.41
Corresponding p-value	< 0.005
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.116
Corresponding p-value	> 0.15
	Data Summary
Number of Data Points	22
Min Data Value	= 1.04
Max Data Value	= 1.93
Sample Mean	= 1.55
Sample Std Dev	= 0.28
	Histogram Summary
Histogram Range	= 1 to 2
Number of Intervals	5
limpeza	
Distribution Summary	
Distribution:	Lognormal
Expression:	$0.67 + \text{LOGN}(0.113, 0.0672)$
Square Error:	0.004806
Chi Square Test	
Number of intervals	2
Degrees of freedom	-1
Test Statistic	= 0.0969
Corresponding p-value	< 0.005
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0724
Corresponding p-value	> 0.15
	Data Summary
Number of Data Points	22
Min Data Value	= 0.7
Max Data Value	= 0.94
Sample Mean	= 0.783
Sample Std Dev	= 0.0621
	Histogram Summary
Histogram Range	= 0.67 to 0.97
Number of Intervals	5