



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA

RAFAEL BEZERRA FONTES

**PLANEJAMENTO E PROJETO DE UMA LINHA DE MONTAGEM COM O USO
DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA BINÁRIA: UM ESTUDO DE CASO EM
UMA EMPRESA FABRICANTE DE ELETRODOMÉSTICOS**

FORTALEZA

2013

RAFAEL BEZERRA FONTES

PLANEJAMENTO E PROJETO DE UMA LINHA DE MONTAGEM COM O USO DE
PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA BINÁRIA: UM ESTUDO DE CASO EM UMA
EMPRESA FABRICANTE DE ELETRODOMÉSTICOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção Mecânica.

Orientador: Me. Anselmo Ramalho Pitombeira Neto.

FORTALEZA

2013

RAFAEL BEZERRA FONTES

PLANEJAMENTO E PROJETO DE UMA LINHA DE MONTAGEM COM O USO DE
PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA BINÁRIA: UM ESTUDO DE CASO EM UMA
EMPRESA FABRICANTE DE ELETRODOMÉSTICOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção Mecânica.

Aprovada em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Anselmo Ramalho Pitombeira Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Sérgio José Barbosa Elias
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Ney Robson Fontenele Tahim
Universidade de Fortaleza (Unifor)

AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu forças para continuar o meu caminho mesmo quando este não se apresentava de forma clara.

A minha família que me forneceu base e me apoiou durante todos esses anos de faculdade e de vida, principalmente, a minha avó Maria Santos Plácido a quem devo toda minha criação e educação.

A todos meus amigos, sem o suporte deles muitas coisas não seriam possíveis.

Aos meus colegas de trabalho Ney Robson Fontenele Tahim, AntonioDjacy de Oliveira Rabelo, Daniel Marques e Paulo Rossano, sem eles não seria possível terminar a faculdade no tempo hábil e concluir o Estudo de Caso.

Ao Prof. Me. Anselmo Ramalho Pitombeira Neto pela disponibilidade e orientação durante a realização desta monografia.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma proposta de planejamento e projeto de uma nova linha de montagem por meio de um modelo matemático para o balanceamento ótimo da mesma, levando em consideração o volume de vendas previsto para o horizonte de planejamento. A empresa selecionada para o estudo de caso pertence ao ramo de fabricação de eletrodomésticos. Desenvolveu-se um modelo de Programação Linear Inteira Binária para o problema de balanceamento. O modelo foi implementado em uma planilha eletrônica, e a solução ótima obtida por meio do Software OpenSolver, o qual utiliza o algoritmo Branch and Bound. Uma vez que o modelo não inclui todas as restrições operacionais, desenvolveram-se balanceamentos implementáveis com base nas soluções ótimas do modelo. Os resultados mostram que ocorreu aumento da produtividade, pois houve uma diminuição no número de estações de trabalho necessário à execução das operações em comparação à linha existente, e, conseqüentemente, melhor uso da capacidade da nova linha de montagem.

Palavras-chave: Projeto de linha de montagem. Balanceamento de linha de montagem. Programação Linear Inteira Binária.

ABSTRACT

This paper aims to present a proposal for planning and design of a new assembly line by means of a mathematical model for the great balancing, considering the volume of sales planned for the planning horizon. The company selected for the case study is in the business of manufacturing home appliances. We developed a model of Binary Integer Linear Programming to the problem of balancing. The model was implemented in a spreadsheet, and the optimal solution obtained through the Software OpenSolver, which uses the Branch and Bound algorithm. Since the model does not include all operating constraints, developed balancing implementable optimal solutions on the basis of the model. The results show that increasing productivity occurred because there was a decrease in the number of workstations required to perform the operations compared to the existing line, and therefore optimal use of the capacity of the new line.

Keywords: Project assembly line. Balancing assembly line. Binary Integer Linear Programming.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Contexto e motivação para o estudo	8
1.2 Objetivo	9
1.2.1 Objetivo geral	9
1.2.2 Objetivos específicos	9
1.3 Importância do trabalho	9
1.4 Metodologia da pesquisa	10
1.5 Estrutura do trabalho	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 Planejamento da Capacidade	12
2.1.1 Medição da demanda e da capacidade	13
2.2 Projeto de arranjo físico	16
2.2.1 Definições	16
2.2.2 Classificação dos arranjos físicos	17
2.2.3 Linhas de montagem	18
2.2.4 Balanceamento de linha de montagem	20
2.3 Programação Linear	22
2.3.1 Programação Linear Inteira Binária	23
2.3.2 Algoritmo Branch and Bound	24
2.4 Solução de problema de balanceamento de linha de montagem por programação linear inteira binária	25
3 ESTUDO DE CASO	29
3.1 Metodologia do Trabalho	29
3.1.1 Etapa 1 – Caracterização da Empresa	29
3.1.2 Etapa 2 – Descrição atual do processo	29
3.1.3 Etapa 3 – Coleta de dados	29
3.1.4 Etapa 4 – Identificação das relações de precedências	30
3.1.5 Etapa 5 – Calcular o balanceamento ótimo	30
3.1.6 Etapa 6 – Desenvolver o balanceamento implementável	30
3.1.7 Etapa 7 – Projetar o arranjo físico	30
3.1.8 Etapa 8 – Estruturar o plano de investimentos	31

3.2 Desenvolvimento do estudo de caso	31
3.2.1 Etapa 1 – Caracterização da Empresa	31
3.2.2 Etapa 2 – Descrição atual do processo	32
3.2.3 Etapa 3 – Coleta de dados	36
3.2.4 Etapa 4 – Identificação das relações de precedências	37
3.2.5 Etapa 5 – Cálculo do balanceamento ótimo	38
3.2.6 Etapa 6 – Desenvolvimento do balanceamento implementável	43
3.2.7 Etapa 7 – Projeto do arranjo físico	47
3.2.8 Etapa 8 – Estruturação do plano de investimentos	48
3.3 Considerações finais do estudo de caso	49
4 CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS	52
APÊNDICES	54

1 INTRODUÇÃO

O primeiro capítulo desse trabalho tem como finalidade apresentar os parâmetros iniciais necessários ao entendimento desta pesquisa. Aqui são abordados o contexto geral do projeto, bem como os objetivos deste trabalho e sua importância.

1.1 Contexto e motivação para o estudo

Este trabalho foi originado a partir da necessidade de aumento da capacidade da linha de montagem de um produto em uma indústria de eletrodomésticos. Isso porque, o aumento acelerado de participação no mercado em relação ao produto considerado, fomentado pelo crescimento do consumo nacional e a facilidade de acesso ao crédito revelaram uma demanda prevista para o produto acima da atual capacidade da linha em atendê-la.

Para atender ao crescimento elevado previsto para os próximos anos, a empresa se prepara para uma expansão de seu sistema produtivo, o que faz do planejamento e projeto do mesmo uma atividade crucial para o sucesso da empresa. O desafio originado consiste em preparar esse sistema produtivo para atender ao volume de produção demandado pelo mercado ao longo dos próximos três anos.

Esta pesquisa teve como motivação, portanto, a seguinte pergunta: como adequar a linha de montagem desse produto, utilizando a menor quantidade de recursos necessários entre máquinas, mão de obra e estrutura física para atender ao volume de vendas previsto para os próximos três anos?

O trabalho discorre, portanto, sobre uma proposta de um planejamento e projeto detalhado da linha de montagem em questão e um plano estruturado de investimentos ao longo dos próximos três anos, utilizando de forma complementar os conceitos oriundos da administração da produção.

1.2 Objetivo

No presente item serão apresentados de forma resumida os objetivos que se espera com o desenvolvimento do trabalho, como também os objetivos de âmbito geral de caráter parcial, que proporcionam subsídios que auxiliem a concretização dos objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Planejar e projetar uma linha de montagem eficiente e eficaz de forma que seja capaz de atender aos volumes de vendas previstos para os próximos três anos (2013, 2014 e 2015) utilizando a menor quantidade de recursos necessários.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram definidos conforme se observa a seguir:

- a) Dimensionar a linha de produção pelo cálculo do balanceamento de cada ano em estudo;
- b) Projetar e desenhar o arranjo físico das ampliações necessárias para cada ano em estudo;
- c) Estruturar o plano de investimentos necessários entre os anos.

1.3 Importância do trabalho

A empresa apresenta ambiente cultural já relativamente desenvolvido quanto à utilização de técnicas de balanceamento de linhas de montagem. Isso favoreceu bastante no desenvolvimento dos balanceamentos aqui propostos, muito embora tal cultura se resuma ao uso de testes empíricos. Assim, o trabalho tornou-se ainda uma oportunidade de ampliação

das técnicas utilizadas para realizar o balanceamento dos outros sistemas produtivos da empresa.

O projeto tem impacto significativo na organização por apresentar um projeto e planejamento bem estruturado que define quais recursos, a quantidade e o momento em que cada um deverá ser implementado da maneira menos onerosa encontrada. Dessa forma, este trabalho apresenta sua importância ao abordar uma solução para a adequação do sistema produtivo sem a necessidade de realizar grandes investimentos.

1.4 Metodologia da pesquisa

Para atender aos objetivos propostos, dimensionou-se a capacidade futura da linha de montagem pelo balanceamento das suas operações utilizando como referência o balanceamento ótimo da mesma. Foi possível calcular o balanceamento ótimo por meio de um modelo matemático de programação linear inteira binária que se utiliza do algoritmo Branch and Bound para determinar a solução ótima da função objetivo.

O roteiro das operações e os tempos padrão das mesmas foram fornecidos pelo setor de engenharia industrial e utilizados como base para os cálculos da quantidade de estações de trabalho e tempo de ciclo de cada estação. Para calcular o Takt Time, foram utilizadas as previsões de demanda projetadas pelo setor de marketing da empresa.

Por fim, foi proposto um plano de investimentos detalhado definindo quais recursos, a quantidade e o momento em que cada um dos mesmos deve ser ampliado para atender a demanda de forma eficiente e eficaz.

1.5 Estrutura do trabalho

No decorrer do desenvolvimento do trabalho buscou-se dispor os assuntos e informações com a preocupação em seguir uma sequência lógica de formação do conhecimento ao longo dos capítulos, do nível geral para o específico.

O trabalho está dividido basicamente em quatro capítulos, sendo eles: introdução, fundamentação teórica, estudo de caso e conclusão. Cada um dos capítulos é subdividido em

itens e subitens com a finalidade de promover a organização da temática abordada no trabalho de forma sequencial.

A seguir será apresentada uma pequena consideração para cada um dos capítulos citados anteriormente.

O capítulo um faz uma introdução do trabalho, apresentando sua origem, importância, e objetivos gerais e específicos. O capítulo apresenta ainda a forma como está organizado o mesmo.

O capítulo dois aborda o referencial teórico utilizado no desenvolvimento do trabalho. Nele se discute a fundamentação teórica da monografia, definindo-se: planejamento da capacidade, projeto de arranjo físico e programação linear. O capítulo apresenta ainda os conceitos e as características da programação linear inteira binária, utilizado na fase de desenvolvimento da solução ótima para o balanceamento da linha de montagem.

O terceiro capítulo relata a realização do estudo de caso. O capítulo se inicia relatando a abordagem metodológica deste trabalho apresentando a estrutura e a sistemática do modelo abordado. A partir daí, o capítulo relata a sequência das ações realizadas durante todo o projeto.

O capítulo quatro apresenta as considerações finais sobre o trabalho realizado, discorrendo sobre os resultados e os ganhos obtidos para a realidade da empresa. Ao final do trabalho são apresentadas as referências da pesquisa realizada, onde consta a listagem das publicações citadas na elaboração do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O capítulo dois aborda a seguir os conceitos e definições a respeito das principais áreas abordadas nesse trabalho: planejamento da capacidade, projeto de arranjo físico e Programação Linear Inteira Binária.

2.1 Planejamento da Capacidade

Segundo Slack (2002), planejamento da capacidade é o ato de determinar a capacidade efetiva de uma unidade produtiva, de forma que ela possa atender à demanda.

Ou seja, o planejamento da capacidade de uma unidade produtiva depende da visão que a empresa tem sobre a demanda atual e futura, e como a unidade deve reagir às variações da mesma.

Quando uma unidade produtiva necessita lidar com um crescimento de demanda, por exemplo, devem-se tomar algumas decisões sobre a capacidade como: balancear os níveis de capacidade das diversas operações e programar a introdução dos incrementos na capacidade física ao longo do período de variação da demanda.

Existem várias definições sobre capacidade de produção. Contudo todas apresentam pontos em comum. A seguir, são apresentadas algumas definições adotadas por alguns autores.

Slack (2002) define capacidade de produção como sendo o máximo nível de atividade de valor adicionado em determinado período de tempo que o processo pode realizar sob condições normais de operação.

Moreira (1998) chama de capacidade a quantidade máxima de produtos e serviços que podem ser produzidos numa unidade produtiva, num dado intervalo de tempo.

Stevenson (2001) considera que a capacidade se refere a um limite superior ou teto de carga que uma unidade operacional pode suportar. A unidade operacional pode ser uma fábrica, um departamento, uma loja ou um funcionário.

Pode-se observar, então, que as definições apresentadas convergem em um ponto: capacidade é a quantidade máxima que pode ser produzida por unidade produtiva em um

intervalo de tempo fixo. Outro ponto de convergência fica evidente quando se afirma que: uma unidade produtiva pode ser a empresa como um todo ou um único funcionário.

O planejamento da capacidade de longo prazo pode ser expresso em um horizonte de dois a cinco anos, podendo variar de acordo com o porte e/ou a complexidade da produção de acordo com Slack (2002). Esse planejamento é de nível estratégico e oferece uma orientação quanto ao futuro de uma empresa.

As decisões referentes a esse planejamento incluem a intenção de ampliação da planta atual, a construção de novas plantas industriais, a aquisição de máquinas e um estudo de previsão de demanda de longo prazo.

Essas decisões, normalmente, seguem uma sequência lógica: inicialmente, deve-se prever a demanda e a capacidade em determinado período de planejamento, e, em seguida, identificar e selecionar a política de capacidade mais adequada que possa ser adotada para atender de forma eficaz e eficiente as variações na demanda.

2.1.1 Medição da demanda e da capacidade

Muitas empresas estão voltando a sua atenção para a utilização de métodos de previsão de demanda como auxílio na tomada de decisões em torno do planejamento da capacidade.

Segundo Ritzman e Krajewski (2004), métodos de previsão de demanda são utilizados para elaborar estimativas da quantidade de produtos demandados em um intervalo de tempo específico. Portanto, quanto maior a acuracidade da previsão maior será a facilidade em tomar decisões quanto ao planejamento da capacidade necessária.

Em termos de classificação, os métodos de previsão podem ser divididos em dois grupos diferentes que consideram o tipo de abordagem utilizada: qualitativos e quantitativos.

Segundo Moreira (1998), os métodos quantitativos de previsão assumem geralmente que as causas que caracterizam a demanda continuarão presentes no futuro. Dessa forma, o comportamento passado da demanda serve de base para os cálculos da previsão futura.

Sobre os métodos qualitativos, Moreira (1998) afirma que são baseados no julgamento e na experiência de especialistas e são utilizadas, principalmente, quando não existem dados disponíveis.

Normalmente, os departamentos de vendas, marketing e de produção são os responsáveis diretos pela previsão da demanda. Quando não estimada corretamente corre-se o risco de apenas reagir a eventos futuros sem se preparar efetivamente para eles.

Slack (2002), afirma que para que as previsões de demanda possam ser úteis, três requisitos são essenciais: as previsões devem ser expressas nas mesmas unidades de capacidade; devem ser tão exatas quanto possível; devem indicar a incerteza relativa.

Quando se percebe um aumento na demanda, é preciso ajustar a capacidade produtiva de maneira adequada. A partir de então, faz-se necessário um estudo sobre medições da capacidade de produção.

Corrêa e Corrêa (2005) afirmam que decisões relacionadas a capacidade produtiva têm influência estratégica por envolver grandes somas de capital investido e precisam ser tomadas com antecedência, pois se for equivocada poderá afetar diretamente no desempenho operacional da unidade produtiva. A seguir, a Tabela1 apresenta algumas formas de medir capacidade de produção para diferentes exemplos de operação.

Tabela1 – Medidas de capacidade para diferentes operações

Operação	Medida de capacidade de insumos	Medida de capacidade de volume de produção
Fábrica de ar-condicionado	Horas de máquinas disponíveis	Número de unidades por semana
Hospital	Leitos disponíveis	Número de pacientes tratados por semana
Teatro	Números de assentos	Número de clientes entretidos por semana
Universidade	Número de estudantes	Estudantes graduados por ano
Loja de venda do varejo	Área de venda	Número de itens vendidos por dia
Companhia aérea	Número de assentos disponíveis no setor	Número de passageiros transportados por semana
Companhia de eletricidade	Tamanho do gerador	Megawatts-hora de eletricidade gerada
Cervejaria	Volume dos tanques de fermentação	Litros por semana

Fonte: Slack (2002)

Segundo Slack (2002), a capacidade de produção pode ser classificada em capacidade de projeto e capacidade efetiva. A seguir, a Figura 1 ilustra essa classificação.

Figura 1 – Classificação da capacidade de produção



Fonte: Slack (2002)

A capacidade de projeto refere-se à capacidade máxima de um sistema produtivo numa jornada de trabalho sem considerar as perdas envolvidas, sejam elas planejadas ou não.

Slack (2002) define que capacidade efetiva é a resultante da subtração das perdas planejadas da capacidade de projeto. As perdas planejadas são, entre outras, tempo de preparação, manutenções preventivas, auditorias da qualidade, trocas de turnos e intervalos de operações. Ao subtrair as perdas não planejadas da capacidade efetiva resulta o volume de produção realizado. As perdas não planejadas podem ser: a ausência de matéria-prima, assiduidade de funcionários, queda de energia, quebra de máquinas e deficiências de qualidade.

Ainda, segundo Slack (2002), pode-se medir a capacidade por meio de alguns índices como: índice de eficiência e índice de utilização. O índice de eficiência indica o desempenho percentual do sistema produtivo na realização das operações programadas. Pode-se calcular a eficiência de um sistema produtivo pela divisão do volume de produção real pela capacidade efetiva.

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{Volume de produção real}}{\text{Capacidade efetiva}}$$

A utilização demonstra a percentagem de uso da capacidade disponível e pode ser calculada pela divisão do volume real de produção pela capacidade projetada.

$$\text{Utilização} = \frac{\text{Volume de produção real}}{\text{Capacidade do projeto}}$$

A medição da capacidade possui objetivos definidos sobre diferentes indicadores de desempenho. Um deles é a redução de custos pela busca do equilíbrio entre a capacidade e a demanda evitando utilização excessiva ou subutilização da capacidade. Outro objetivo é assegurar que toda demanda seja atendida sem perdas de receita.

2.2 Projeto de arranjo físico

2.2.1 Definições

Slack (2002) define arranjo físico de uma operação produtiva como a preocupação com a localização física dos recursos de transformação. De forma simples, definir o arranjo físico é decidir onde colocar todas as instalações, máquinas, equipamentos e operadores.

Gaither e Frazier (2002) dizem que definir o arranjo físico significa planejar a localização de todas as máquinas, utilidades, estações de trabalho, áreas de atendimento ao cliente, áreas de armazenamento de materiais, corredores, banheiros, refeitórios, bebedouros, divisórias internas, escritórios e salas de computador, e ainda os padrões de fluxo de materiais e de pessoas que circulam o prédio.

Ritzman e Krajewski (2004) consideram, como os outros autores, que o planejamento do arranjo físico envolve decisões sobre a disposição dos centros de atividade econômica em uma unidade e definem centro de atividade econômica como qualquer coisa que utilize espaço: uma pessoa, um grupo de pessoas, o balcão de um caixa, uma máquina, uma banca de trabalho e assim por diante.

O tempo despendido no planejamento e projeto do arranjo físico antes de sua implantação evita perdas e permite que todas as modificações interajam entre si, estabelecendo uma sequência lógica para as mudanças, além de facilitá-las (MUTHER, 1978).

Em todo o planejamento do arranjo físico existe sempre uma preocupação básica: tornar mais fácil e uniforme o movimento do trabalho através do sistema, quer esse movimento se refira ao fluxo de pessoas ou materiais. Segundo Moreira (1998), pode-se citar, em princípio, três motivos que tornam importantes as decisões sobre o planejamento do arranjo físico:

- a) Podem afetar a capacidade da instalação e a produtividade das operações, ou seja, uma mudança adequada no arranjo físico pode, muitas vezes, aumentar a produção que se processa dentro da instalação usando os mesmos recursos;
- b) Algumas mudanças no arranjo físico podem implicar no dispêndio de consideráveis somas de dinheiro;
- c) As mudanças podem gerar dificuldades para futuras revisões e ainda causar interrupções indesejáveis no trabalho.

Segundo Ritzman e Krajewski (2004), o planejamento do arranjo físico tem como objetivo permitir que trabalhadores e equipamentos operem da maneira mais eficiente possível.

Conforme Muther (1978), os problemas de arranjo físico são gerados por dois elementos básicos: o produto e a quantidade. Esses dois elementos representam a chave da solução dos problemas, pois uma unidade produtiva deve atender à produção em determinadas quantidades demandadas.

2.2.2 Classificação dos arranjos físicos

A maioria dos arranjos físicos deriva de apenas quatro tipos clássicos: arranjo físico posicional ou posição fixa, por processo ou funcional, celular e por produto ou em linha (SLACK, 2002).

Segundo Slack (2002), a relação entre tipos de arranjos físicos e de processos em manufatura não é totalmente direta, ou seja, um tipo de processo não necessariamente implica em um arranjo físico em particular. Cada tipo de processo pode adotar diferentes arranjos físicos.

Para garantir uma escolha adequada do tipo de processo a ser adotado em uma unidade produtiva, devem-se obter informações sobre as características técnicas e físicas dos equipamentos, da quantidade de espaço físico disponível e conhecimentos técnicos sobre o produto.

Slack (2002), afirma que diversos fatores podem influenciar a adoção de um ou de outro tipo de arranjo físico, entretanto, o tipo de processo empregado na transformação é um dos fatores mais importantes. A relação entre os processo e os arranjos físicos pode ser vista na Figura2.

Figura2 – Relação entre processo e arranjo físico

Tipos de processo de manufatura	Tipos básicos de arranjo físico	Tipos de processo de serviço
Processo por projeto	Posicional	Serviços profissionais
Processo tipo iobbing	Funcional	
Processo em lote		Celular
Processo em massa	Por Produto	Serviços de massa
Processo contínuo		

Fonte: Slack (2002)

A Figura2 mostra que um processo tipo lote, por exemplo, pode utilizar um arranjo físico funcional ou um arranjo celular como forma de organização dos recursos produtivos. Já o tipo de processo de serviços denominado serviços profissionais pode ser organizado na forma de um arranjo físico posicional ou de um arranjo funcional.

Ao analisar a figura acima, percebe-se a importância de considerar os produtos e os tipos de arranjos físicos que mais se adaptam a cada situação em uma empresa, pois uma unidade produtiva poderá não ter apenas um arranjo físico ideal, mas a combinação de dois ou mais tipos de arranjos físicos.

Para o desenvolvimento deste trabalho, identificou-se que o tipo de arranjo físico a ser considerado deve ser o por produto pelo fato de se tratar de uma unidade produtiva com alta demanda, ou seja, necessidade de alto volume de produção e baixa variedade entre os modelos a serem produzidos.

2.2.3 Linhas de montagem

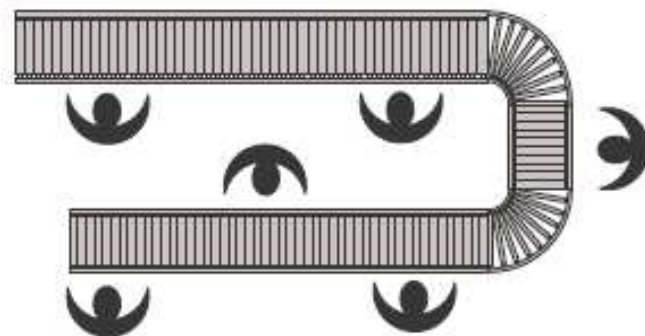
A primeira linha de montagem de que se tem notícia foi idealizada por Henry Ford, em 1939 (CORREA e CORREA, 2005). É um arranjo muito utilizado até hoje pela indústria e também por algumas organizações prestadoras de serviço, como: montadoras, frigoríficos e restaurantes por quilo.

No arranjo físico por produto, as máquinas, os equipamentos e as estações de trabalho são colocadas de acordo com a sequência de montagem, sem caminhos alternativos para o fluxo de produção, ou seja, o material percorre um caminho pré-determinado.

Este arranjo favorece à fabricação de produtos padronizados ou com pouca variação de modelos em altos volumes e fluxo rápido. Outra característica importante é que o custo variável por produto, geralmente, é baixo (CORREA e CORREA, 2005).

Para evitar que a linha de montagem fique muito longa, é comum que sejam projetadas em forma de “U”, “S”, ou outro circuito que possa ser exequível em função de características específicas das instalações prediais disponíveis (PEINADO e GRAEML, 2007). A figura a seguir (Figura 3) uma linha em forma de “U”, que requer menor caminho a ser percorrido para abastecimento de matéria-prima.

Figura 3 – Linha de montagem em forma de “U”



Fonte: Peinado e Graeml (2007)

Dentre as vantagens do arranjo físico por produto, pode-se destacar a possibilidade de obter, com maior facilidade, uma condição de balanceamento da produção, uma vez que o mesmo modelo de produto está sendo fabricado, as tarefas são altamente repetitivas, de baixa complexidade e, em muitos casos, automatizadas.

Por outro lado, o alto grau de divisão do trabalho resultante da utilização de um arranjo físico por produto, quase sempre gera monotonia pela realização de operações de montagens pobres e repetitivas. Por conta disso, o índice de absenteísmo geralmente é elevado e ocorrem muitos afastamentos por ordem médica decorrente de lesões por esforço repetitivo.

Outra característica é que a operação mais lenta da linha, denominada gargalo produtivo, determina a velocidade de produção de toda a linha (PEINADO e GRAEML, 2007).

2.2.4 Balanceamento de linha de montagem

Pode-se definir o balanceamento de linha como a atribuição de tarefas a estações de trabalho em uma linha de produção, de modo a maximizar a produtividade ou minimizar a quantidade de estações de trabalho. O balanceamento da linha é necessário durante sua instalação, ou quando é preciso alterar seu índice de produtividade ou, também, quando ocorre modificação do produto ou processo (RITZMAN e KRAJEWSKI, 2004).

O conhecimento de alguns termos relativos ao processo de balanceamento de linha, apresentados na sequência, se torna relevante para o entendimento do conteúdo do trabalho.

Uma linha de montagem pode ser definida como um sistema em que os produtos são montados em certa sequência entre estações de trabalho. O produto final transforma-se progressivamente até o final da linha. Segundo Oliveira (2011), uma linha de montagem é caracterizada em função do tipo de produto e pode ser classificado quanto aos aspectos físicos, formato, ordem de fabricação de modelos e tempo de processamento das tarefas.

Uma estação de trabalho é definida por Gaither e Frazier (2002), como uma localização física onde um conjunto particular de tarefas é executado. Ainda para Gaither e Frazier (2002), a precedência entre tarefas é descrita como sendo a sequência ou ordem em que as tarefas devem ser executadas.

Oliveira (2011), afirma que para obter sucesso ao realizar o balanceamento de uma linha de montagem deve-se encontrar uma solução em que as tarefas respeitem as restrições de precedência.

Ritzman e Krajewski (2004), afirmam que para melhor visualizar as relações de precedência entre as tarefas, deve-se construir um diagrama de precedência indicando as tarefas por círculos e criando setas entre estes círculos, conduzindo dos predecessores ao próximo elemento do trabalho.

O termo tempo de ciclo é o nome dado ao tempo entre as saídas de cada produto ao fim de uma linha de produção ou estação de trabalho (GAITHER e FRAZIER, 2002).

Ao longo dos últimos anos foram propostas muitas metodologias para resolver o problema de balanceamento de linhas de montagem. Os principais métodos pertencem a um dos seguintes grupos: exatos (programação matemática); heurísticos; e método de simulação. Os mais usados na prática são os métodos de simulação, porém, só os exatos podem garantir a solução ótima (MEZZENA, 2000).

O método de simulação consiste numa forma prática de alocar as tarefas aos operadores por meio de observação visual. Peinado e Graeml (2007) sugerem um procedimento para a realização de um balanceamento de linha de montagem seguindo esse método:

1. Dividir as operações de trabalho em elementos de trabalho que possam ser executados de modo independente.
2. Levantar o tempo padrão para cada um dos elementos de trabalho, por meio de criteriosa cronoanálise.
3. Definir a sequência de tarefas e suas predecessoras.
4. Desenhar o diagrama de precedências.
5. Calcular o tempo de duração do ciclo demandado (*Takt Time*) e determinar o número mínimo de estações de trabalho.
6. Atribuir as tarefas às estações de trabalho seguindo a ordem natural de montagem. A seguinte regra deve ser seguida para determinar as tarefas que podem ser atribuídas a cada estação:
 - todas as tarefas precedentes já devem ter sido alocadas;
 - o tempo da tarefa a ser alocada não deve ser superior ao tempo que resta para a estação de trabalho;
 - quando houver mais de uma tarefa que pode ser alocada, dar preferência à tarefa que tenha maior duração, ou à que esteja mais no início da montagem, ou seja, que tenha mais tarefas subsequentes;
 - se ainda houver empate, escolher uma tarefa arbitrariamente.

Quando não houver nenhuma tarefa que possa ser alocada para a estação de trabalho, passar para a estação de trabalho seguinte, até completar toda a linha de produção.

7. Verificar se não existe uma forma melhor de balanceamento, buscando deixar a mesma quantidade de tempos ociosos em cada estação de trabalho;
8. Calcular o percentual de tempo ocioso e o índice de eficiência para a linha de produção;
9. Se todos os passos anteriores tiverem sido seguidos, uma forma de balancear melhor a linha será pela utilização de estações em paralelo para realizar operações elementares demoradas, que não podem ser subdivididas. Duas estações de trabalho paralelas, realizando a mesma operação, são capazes de dobrar a velocidade de produção daquele “elo” do processo produtivo.

Um estudo de caso da aplicação desse procedimento de balanceamento de linhas de montagem é descrito no artigo de Aguiar, Peinado e Graeml: “Simulações de arranjos físicos por produto e balanceamento de linha de produção: o estudo de um caso real no ensino para estudantes de engenharia”, XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2007.

A empresa em estudo encontrava-se com necessidade de instalar uma nova linha de montagem para atender a demanda de um novo produto. A demanda estimada aproximava-se de 200 und./dia e o tempo disponível de oito horas de trabalho por dia ou 480 minutos de trabalho diário.

A montagem do produto foi dividida em 15 operações e descrita em uma tabela com seus respectivos tempos de execução padrão e as operações predecessoras. Para melhor visualizar a precedência entre as operações, foi desenhado um diagrama conforme aconselhado pelo procedimento.

O *Takt Time* calculado foi de 144 segundos por unidade; a partir do *Takt Time*, foi calculada a necessidade de 3 estações de trabalho. Assim, foi possível distribuir as 15 operações entre as estações de forma que o tempo de ciclo não ultrapassasse o *Takt Time* e as relações de precedência respeitadas.

O tratamento e balanceamento da linha de montagem em estudo geraram um reduzido índice de ociosidade (1,27%) e, por consequência, um elevado grau de utilização (98,73%). Segundo os autores do artigo, a utilização do procedimento exposto permitiu que os indicadores fossem submetidos a várias simulações pelo fato de envolver cálculos simples e de fácil entendimento.

2.3 Programação Linear

Uma das ferramentas que podem ser utilizadas para se resolver o problema de balanceamento de linha de montagem é a Programação Linear, que é uma das técnicas da área da Pesquisa Operacional.

Segundo Taha (2008), os modelos matemáticos são constituídos, basicamente, por três elementos:

- a) Função-objetivo: é uma função que leva em consideração o objetivo estabelecido e o objetivo de cada atividade envolvida no processo em estudo;

- b) Variáveis de decisão: são os valores aos quais se procuram determinar;
- c) Restrições: Equações e inequações que definem as condições que a solução deve obedecer para viabilizar a solução obtida.

Em geral, existem inúmeras maneiras de se utilizarem os recursos de modo a gerar uma solução viável para o problema abordado. Porém o objetivo da Programação Linear é encontrar a utilização dos recursos que gera o melhor resultado.

Hiller e Lieberman (2010) afirmam que uma solução ótima consiste em uma solução viável que possui o valor mais favorável a função objetivo, por meio da determinação das variáveis de decisão, obedecendo-se as restrições estabelecidas.

O formato padrão de um problema de programação linear com restrições e n variáveis é dado por (TAHA, 2008):

Maximizar (ou minimizar):

$$Z = c_1 \times x_1 + c_2 \times x_2 + \dots + c_n \times x_n$$

Sujeito a:

$$a_{11} \times x_1 + a_{12} \times x_2 + \dots + a_{1n} \times x_n = b_1$$

$$a_{21} \times x_1 + a_{22} \times x_2 + \dots + a_{2n} \times x_n = b_2$$

$$a_{m1} \times x_1 + a_{m2} \times x_2 + \dots + a_{mn} \times x_n = b_m$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$$

$$b_1 \geq 0, b_2 \geq 0, \dots, b_m \geq 0$$

2.3.1 Programação Linear Inteira Binária

A Programação Linear Inteira é considerada um caso especial da Programação Linear. Segundo Hiller e Lieberman (2010), um problema de Programação Linear Inteira está sujeita a uma restrição adicional, em que as variáveis de decisão devem possuir valores inteiros.

No caso da Programação Linear Inteira Binária, as variáveis assumem os valores zero ou um. Isto pode representar uma aceitação ou uma rejeição, um sim ou não, verdade ou falsidade.

Os problemas de Programação Linear Inteira Binária podem ser resolvidos por algoritmo de Corte e pelo algoritmo Branch and Bound. Segundo Taha (2008), o algoritmo

Branch and Bound possui comprovada superioridade em complexidade computacional em relação ao Método de Planos de Corte. O presente trabalho utiliza o algoritmo Branch and Bound para a solução do problema de balanceamento da linha de montagem em estudo.

2.3.2 Algoritmo Branch and Bound

Kawamura (2006) define o algoritmo como um método de enumeração implícita que garante a otimalidade da solução obtida mesmo sem testar explicitamente todas as soluções possíveis.

Taha (2008) afirma que o algoritmo Branch and Bound é uma técnica de otimização baseada em uma árvore de enumeração para resolver um problema. Cada nó da árvore representa um subproblema do problema principal e cada ramo representa uma nova restrição a ser considerada. As folhas de cada ramificação representam soluções potenciais ao ótimo, quando atendem às restrições do problema, portanto a solução ótima está dentre as folhas dessa árvore criada.

Para Hiller e Lieberman (2010), o princípio básico desse algoritmo é o uso de estimativas no valor da solução ótima de um subproblema, para evitar a inspeção de partes de seu conjunto de soluções. O mesmo autor explica que o método realiza duas operações principais:

- a) Dividir (Branching): Consiste em dividir o problema principal em subproblemas menores, de modo a facilitar a análise, eliminando soluções inviáveis, sem comprometer a integridade da solução desejada;
- b) Conquistar (Bounding): Consiste em eliminar soluções de baixa qualidade por meio de comparações com limitantes, normalmente conhecidos por limites inferior e superior. De acordo com o tipo de problema, seja minimização ou maximização, estes limites representam valores diferentes.

Oliveira (2011), afirma que o algoritmo Branch and Bound realiza o crescimento da árvore pela seleção apenas dos nós mais promissores em cada estágio. O nó promissor é determinado por uma estimativa do limite sobre o melhor valor da função objetivo.

Hiller e Lieberman (2010) apresentam uma explanação sobre o método afirmando que a estrutura geral do algoritmo Branch and Bound possui três etapas principais: ramificação, limitação e avaliação.

Na etapa de ramificação, deve-se selecionar o subproblema criado mais recentemente dentre os subproblemas remanescentes (ainda não avaliados). Os desempates devem ser realizados obedecendo ao critério que elege o subproblema com maior limite. Para dar origem a dois novos subproblemas, a ramificação deve ser iniciada a partir do nó. A variável ramificada deve ser fixada em 0 ou 1.

Na etapa de limitação, deve-se aplicar o método simples para obter o limite de cada novo subproblema e arredondar para baixo o valor da função objetivo para a solução ótima resultante.

Na avaliação, os subproblemas devem passar por testes de avaliação para determinar quais são os promissores e quais deverão ser rejeitados. Quando não houver mais nenhum subproblema remanescente, o titular atual será o ótimo. Caso contrário, deve-se retornar e realizar mais uma iteração.

2.4 Solução de problema de balanceamento de linha de montagem por programação linear inteira binária

Donnini e Magatão (2010), afirmam que o uso de técnicas da Pesquisa Operacional na modelagem das estratégias de planejamento e programação da produção tem se mostrado um fator decisivo para o desenvolvimento de políticas otimizadas de operação industrial. A razão para o interesse é que os modelos obtidos evidenciam procedimentos que levam à diminuição dos custos produtivos.

Para tornar mais fácil a compreensão da solução do problema de balanceamento de linhas por programação inteira binária, foram estabelecidas algumas classificações ao longo dos anos. Oliveira (2011) demonstra um resumo dos principais trabalhos publicados nos últimos 50 anos, a Tabela 2 representa esse resumo.

Tabela 2 – Classificações de balanceamento de linha de montagem

1950	Salvenson	Primeiro problema de balanceamento de linha tratado com algoritmo.
1970	Thomopoulos	Tratamento de problemas em ambientes mix de modelos de produtos – primeiras pesquisas.
1986	Baybars	Divide os problemas de balanceamento de linha em: Simples (<i>Simple Assembly Line Balancing – SALB</i>) e Genérico (<i>General Assembly Line Balancing – GALB</i>).
1989	Ghosh e Gagnon	Divide os problemas baseado nos tempos das tarefas: <i>Single-Model Deterministic – SMD</i> e <i>Single-Model Stochastic – SMS</i> ; <i>Multi-Model Deterministic – MMD</i> e <i>Multi-Model Stochastic – MMS</i> .
1999	Scholl e Becker	Incluem outras duas classificações para problemas simples, além do SALBP-1 e SALBP-2: SALBP-E e SALBP-F.
2007	Boysen, Fliedner e Scholl	Notação tri-upla para designar a classificação baseada em características e problemas de montagem. Aplicado para todas as situações conhecidas.

Fonte: Oliveira (2011)

Segundo Oliveira (2011), os sistemas modernos de produção, normalmente, apresentam um ou mais modelos de produtos dividindo a mesma linha de montagem. Nas linhas em que é fabricado apenas um tipo de produto, o tema é conhecido por Balanceamento de Linha de Montagem Simples, ou SALBP (*Simple Assembly Line Balancing Problem*). Oliveira (2011) descreve as hipóteses que são assumidas por alguns autores para problemas de balanceamento desse tipo:

- a) Todos os parâmetros de entrada são conhecidos com certeza;
- b) Uma tarefa não pode ser dividida entre duas ou mais estações;
- c) A alocação de tarefas a estações deve respeitar as restrições tecnológicas de precedência;
- d) Todas as tarefas devem ser alocadas e, portanto processadas;
- e) Qualquer estação possui capacidade para processar qualquer tarefa;
- f) O tempo de processamento de qualquer tarefa é independente de qual estação executará e independente da sequência de processamento da estação;
- g) Qualquer tarefa pode ser processada em qualquer estação;
- h) A linha toda é considerada serial e não existem estações em paralelo, sublinhas alimentadoras ou estações de duplo lado;
- i) A linha só montará um único modelo de produto;

- j) Os principais critérios de otimização são: minimizar o tempo ocioso total para um dado tempo de ciclo fixo e minimizar o tempo de ciclo para um dado número fixo de estações de trabalho. Caso o SALBP tenha o primeiro critério como o critério de otimização então ele é conhecido como SALBP-1. Caso o SALBP tenha como critério de otimização o segundo critério então o SALBP é conhecido como SALBP-2. Caso o objetivo seja a otimização de ambos os critérios, o problema é dito SALBP-E.

Nestes três casos o problema de balanceamento de linha é orientado ao tempo. Neste trabalho, o objetivo tratado está relacionado ao tempo e a minimização do tempo ocioso total a fim de minimizar o número de estações de trabalho, portanto, SALBP-1.

Fernandes, Godinho Filho, Cutigi e Guiguet (2008) mostram no artigo “O uso da programação inteira 0-1 para o balanceamento de linhas de montagem: estudos de caso e avaliação” que, em muitos casos práticos, é possível, mesmo em problemas relativamente grandes, a aplicação de procedimentos de solução exatos.

A seguir será apresentado um dos dois estudos de caso relatado no artigo. O mesmo apresenta uma aplicação real de solução exata para o SALBP-1 em uma indústria do segmento de linha branca.

A linha de montagem possui características de arranjo físico por produto, é dividida em seis sublinhas num total de 41 estações de trabalho e todas as tarefas são manuais. Atualmente, a taxa de produção é de: 150 produtos por hora.

O tempo ocioso total da linha é a somatória dos tempos ociosos das estações de trabalho que compõem a linha. Para avaliar o grau de melhoria que esse método oferece em relação ao método atual, será utilizada a medida de desempenho: desbalanceamento de linha. O desbalanceamento de linha (D) é a relação entre o tempo ocioso total da linha e o tempo total gasto pelo produto para atravessar a linha do início ao fim.

Para a sublinha 1, o resultado do balanceamento de linha gerado por meio da utilização do método exato proposto é o seguinte:

$$D_{atual} = \frac{(8 \times 24 - 155)}{192} = 19,3\%$$

$$D_{proposto} = \frac{(7 \times 24 - 155)}{168} = 7,7\%$$

Para a sublinha 2 não há possibilidade de redução de posto de trabalho e portanto o desbalanceamento permanece o mesmo, ou seja:

$$D_{atual} = D_{proposto} = \frac{(9 \times 24 - 169)}{216} = 21,76\%$$

Com relação à sublinha 3, tem-se a possibilidade de reduzir um posto de trabalho e, portanto, uma redução no desbalanceamento:

$$D_{antes} = \frac{(12 \times 24 - 247)}{12'24} = 14,2\%$$

$$D_{depois} = \frac{(11 \times 24 - 247)}{11'24} = 6,4\%$$

As sublinhas 4 e 5 não foram consideradas devido à impossibilidade de realocação das operações.

Para a sublinha 6 há a possibilidade de redução de 3 postos de trabalho e, portanto, uma redução no desbalanceamento:

$$D_{antes} = \frac{(12 \times 24 - 200)}{12 \times 24} = 30,6\%$$

$$D_{depois} = \frac{(9 \times 24 - 200)}{9 \times 24} = 7,4\%$$

A redução no número total de estações utilizadas se deve ao fato de que o modelo matemático analisa, de forma implícita, um número de alternativas muito maiores que o analista de processos da empresa.

3 ESTUDO DE CASO

Este capítulo descreve as etapas da pesquisa apresentando uma sequência do método e, após isso, o desenvolvimento do modelo aplicado, os resultados obtidos, e as considerações finais do estudo de caso.

3.1 Metodologia do Trabalho

3.1.1 Etapa 1 – Caracterização da Empresa

Nesta Etapa, ocorre a descrição das características atuais da empresa, como o histórico do setor, estruturas organizacionais, principais produtos, dentre outras informações necessárias para a caracterização da mesma.

3.1.2 Etapa 2 – Descrição atual do processo

Uma vez caracterizada a empresa na etapa anterior, faz-se necessário caracterizar o processo em estudo. Neste item, apresentam-se dados e informações relacionados ao arranjo físico, à capacidade atual, às restrições e às oportunidades de melhoria encontradas durante o estudo.

3.1.3 Etapa 3 – Coleta de dados

Nesta etapa, são coletados os dados necessários ao desenvolvimento do estudo de caso tais como tempos padrão das operações, volume de vendas previsto, formulários de procedimentos operacionais padrão, características do arranjo físico atual e distribuição das

tarefas praticadas atualmente. São obtidas através de consultas aos documentos da empresa e utilizadas nas etapas a seguir.

3.1.4 Etapa 4 – Identificação das relações de precedências

Com o resultado da etapa anterior, as informações sobre o roteiro das operações executadas na linha de montagem são utilizadas para identificar as precedências tecnológicas entre as mesmas visando desenvolver, corretamente, o balanceamento ótimo dos três anos em estudo. Sem essa etapa, a solução encontrada para a função objetivo será incoerente.

3.1.5 Etapa 5 – Calcular o balanceamento ótimo

Nesta etapa, desenvolve-se o modelo de Programação Linear Inteira Binária, o qual é implementado na planilha eletrônica *Microsoft Excel*. A solução do modelo, a qual corresponde ao balanceamento ótimo, é obtida por meio do Software *OpenSolver*, o qual é um complemento para o *Excel* e contém uma implementação do algoritmo Branch and Bound.

3.1.6 Etapa 6 – Desenvolver o balanceamento implementável

Nesta etapa, é necessário adequar o balanceamento ótimo, obtido na etapa anterior, de forma que seja possível implementá-lo na prática, pois, no balanceamento ótimo, não se considera restrições relacionadas ao fluxo dos materiais dentro da linha de montagem. Isso ocorre pela complexidade de expressar matematicamente restrições desse tipo. Apesar de a solução ótima não influenciar na correta montagem do produto, essa adequação deve ser realizada para não prejudicar a movimentação de materiais na linha.

3.1.7 Etapa 7 – Projetar o arranjo físico

Baseado no resultado do balanceamento implementável é possível, nessa etapa, desenhar o arranjo físico mais adequado para cada um dos três anos em estudo, posicionando e dimensionando as estações de trabalho dentro da linha de montagem. Para isso, utiliza-se o Software *AutoCAD*.

3.1.8 Etapa 8 – Estruturar o plano de investimentos

Após a etapa anterior ser concluída, é possível identificar a quantidade de postos de trabalho necessários para atender ao volume de produção demandado em cada ano, portanto, nesta etapa, devem-se calcular os investimentos necessários para cada um dos anos em estudo da forma menos onerosa possível. Nessa etapa, deve-se considerar, basicamente, os investimentos necessários em mão de obra direta, máquinas e equipamentos.

3.2 Desenvolvimento do estudo de caso

3.2.1 Etapa 1 – Caracterização da Empresa

O presente estudo foi realizado em uma indústria fabricante de eletrodomésticos do seguimento de linha branca localizada no Estado do Ceará. A empresa foi fundada no ano de 1984, e pertence a um grupo de atuação nacional, um dos maiores do Norte-Nordeste do Brasil. A empresa possui atuação no mercado das cinco regiões do Brasil e, alguns de seus produtos, chegam a mais de 50 países.

Atualmente, possui, aproximadamente, 3.600 funcionários e uma área de 360.000m², sendo 65.000m² construídos caracterizando-se, assim, como uma empresa de grande porte. É líder em vendas de fogões no país, com aproximadamente, 24% do mercado de fogões que é composto por grandes marcas e concorrentes de peso internacional.

No cenário atual, a empresa visa aumentar sua participação no mercado de novos produtos. Este processo é de vital importância para a sobrevivência da empresa, uma vez que o ciclo de vida dos produtos do setor de linha branca está cada vez menor. Uma introdução ágil e eficaz no mercado deste novo modelo implica em oportunidades de ampliar o

marketshare, atender os anseios dos consumidores cada vez mais exigentes e diminuir o risco de lançar um produto obsoleto.

Por fim, a empresa escolhida está prevendo grandes saltos no volume de vendas demandado de certo produto ao longo dos próximos três anos (2013, 2014 e 2015). Portanto, justifica-se o objetivo deste trabalho, proporcionar capacidade suficiente de atender a crescente demanda desse produto através de um planejamento e projeto a ser desenvolvido nas próximas etapas do Estudo de caso.

3.2.2 Etapa 2 – Descrição atual do processo

O processo produtivo da linha de montagem em estudo caracteriza-se por possuir alto volume de produção e baixa variação de modelos. Em média, produz-se a um tempo de ciclo de 317 segundos por produto e a única variação ocorre na voltagem do compressor, ou seja, existe um mix que varia entre modelos com 127V e 220V, porém essa variação não interfere em nem um dos processos de montagem do mesmo. Além disso, os processos são repetitivos e amplamente previsíveis, portanto pode-se classificar essa como uma linha de produção em massa.

O tipo de arranjo físico atual caracteriza-se como um arranjo físico por produto, pois os postos de trabalho estão posicionados de acordo com a sequência de montagem do produto. Cada produto segue um roteiro predefinido no qual a sequência de atividades requeridas coincide com a sequência que os processos foram arranjados fisicamente.

O fluxo dos materiais nessa linha de montagem obedece a restrições bastante específicas. Essas restrições estão relacionadas a características inerentes ao produto, pois o mesmo deve ser tratado com rigorosa higiene para evitar contaminações que possam ser transmitidas ao consumidor. Portanto, destaca-se das demais linhas de montagem da fábrica uma vez que está localizada no interior de uma sala fechada e climatizada adequadamente conforme exigências sanitárias. Por esse motivo, a maior parte do estoque intermediário é armazenada do lado de fora assim como as operações que envolvem soldagem.

Atualmente, existem onze estações de trabalho divididas em quatro grupos, essas estações são distribuídas da seguinte forma: duas estações na pré-montagem da base do compressor, duas estações na pré-montagem da cuba, uma estação na pré-montagem da lateral direita, uma estação na pré-montagem do conjunto frontal, quatro estações na montagem do

produto e uma estação dedicado às atividades de retrabalho. A Tabela 3 ilustra a distribuição atual das estações de trabalho entre os grupos da linha.

Tabela3 – Distribuição das estações de trabalho da linha

Grupos	Estações de Trabalho	Tempos (seg.)
Pré-montagem da Base do Compressor	EST. 01	230,04
	EST. 02	202,29
Pré-montagem da Cuba	EST. 01	182,06
	EST. 02	168,09
Pré-montagem do Conjunto Frontal	EST. 01	198,70
Pré-montagem da Lateral Direita	EST. 01	201,58
Montagem do Produto	EST. 01	251,20
	EST. 02	196,24
	EST. 03	192,86
	EST. 04	279,81

Fonte: Engenharia Industrial da Empresa

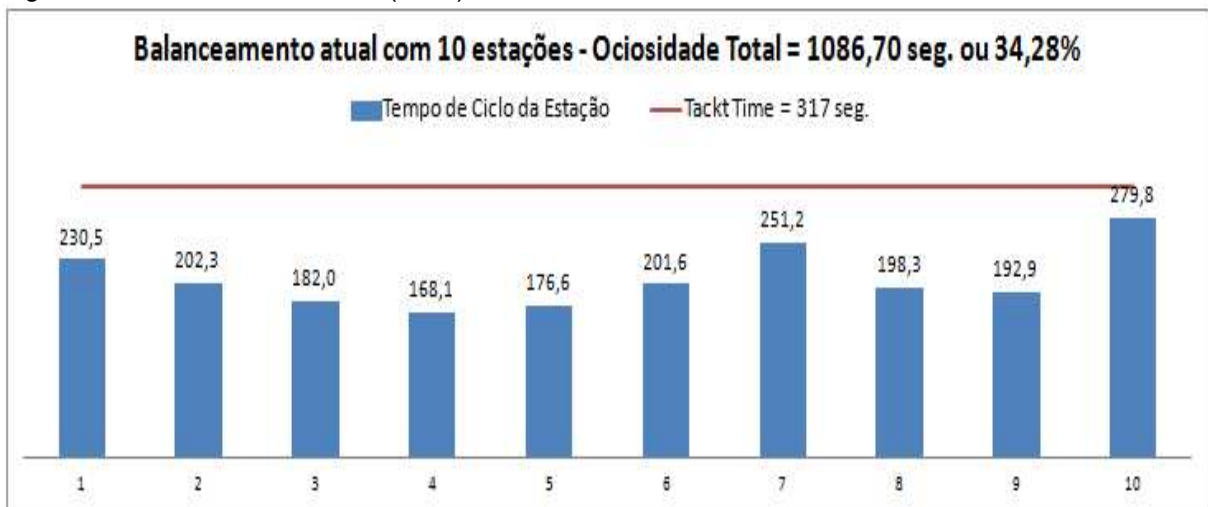
O fluxo dos materiais inicia-se na pré-montagem da cuba e, ao fim das operações desse grupo, são enviados para a pré-montagem da base do compressor onde ocorrem operações de soldagem e fixação da fiação elétrica.

A pré-montagem da lateral direita e a pré-montagem do conjunto frontal iniciam-se independentemente da finalização das pré-montagens citadas anteriormente, porém as operações da primeira estação de trabalho do grupo “montagem do produto” dependem da finalização da pré-montagem da base do compressor. Portanto, o grupo de estações de trabalho do grupo de pré-montagem da cuba pode iniciar suas operações em paralelo às operações das estações de trabalho dos grupos “pré-montagem do conjunto frontal” e “pré-montagem da lateral direita”

O produto dos grupos “pré-montagem da lateral direita” e do grupo “pré-montagem do conjunto frontal” alimenta a terceira estação de trabalho do grupo “montagem do produto” e, por fim, a quarta estação de trabalho do grupo “montagem do produto” realiza as últimas operações de acabamento até a expedição do produto acabado.

Pode-se perceber pela Tabela 3, que os tempos em segundos ao lado de cada estação de trabalho representam o tempo de ciclo da mesma. Esses tempos são compostos pela soma dos tempos das operações alocadas a cada uma dessas estações de trabalho. A Figura 4 representa um gráfico do balanceamento atual com as estações de trabalho no eixo ‘x’ e o tempo de ciclo no eixo ‘y’.

Figura 4 – Balanceamento atual (2012)



Fonte: Autoria própria

Vale ressaltar que, cada estação de trabalho corresponde a somente um operador e que ao longo do grupo “montagem do produto” ocorre operações importantes como a criação de vácuo no sistema termodinâmico, injeção de gás refrigerante, testes de vazamento de gás e fuga de corrente elétrica, teste funcional, teste de estanqueidade, acabamento e embalagem. A Figura 5 ilustra a forma que essas estações de trabalho estão dispostas dentro da linha de montagem atual.

tratar de operações manuais. Essa estação de trabalho é classificada, atualmente, como o gargalo produtivo do sistema.

Para o cálculo da capacidade, considerou-se uma quantidade de horas úteis de 8,8 horas por dia com horário de funcionamento comercial entre 7:15 às 11:20 e 12:20 às 17:03. A linha de montagem funciona, apenas, em um turno durante 5 dias por semana, 21 dias por mês e 11,2 meses por ano o que corresponde a, aproximadamente, 31.680 segundos disponíveis por dia.

$$\textit{Capacidade} = \frac{\textit{Tempo disponível por dia}}{\textit{Tempo de ciclo da estação de trabalho gargalo}}$$

A soma dos tempos padrão de todas as operações listadas no roteiro de operações dos processos da linha de montagem desse produto determina um tempo total de processamento de 2.102,92 segundos. O roteiro das operações e seus respectivos tempos padrão foram fornecidos pela analista de cronometragem responsável pela área. A quantidade de produtos demandados para os próximos anos foi calculada pelo setor de marketing e essa previsão foi utilizada como base para a taxa de ocupação e eficiência da linha de montagem. Taxa de ocupação: 64,08%; Ociosidade: 35,92%; Eficiência: 88%.

$$\textit{Taxa de ocupação} = \frac{\textit{Tempo total de proces.} \times \textit{Quantidade} \times \textit{Demanda}}{\textit{Quantidade de mão de obra} \times \textit{Tempo disponível por dia}}$$

$$\textit{Ociosidade} = 100\% - \textit{Taxa de ocupação}$$

$$\textit{Eficiência} = \frac{\textit{Capacidade de produção diária}}{\textit{Quantidade de produtos demandados}}$$

3.2.3 Etapa 3 – Coleta de dados

As informações necessárias foram coletadas em forma de documentos, visualizações do ambiente e conversas informais com colaboradores envolvidos com os processos da linha de montagem em estudo.

Inicialmente, buscou-se coletar informações sobre os volumes de vendas previstos para os anos de 2013, 2014 e 2015 no setor de Marketing, pois é o setor responsável por esses cálculos. O documento foi útil para identificar o limite da taxa de produção necessária (*Takt Time*) para atender a demanda em cada ano em estudo.

Em seguida, necessitou-se adquirir conhecimentos mais aprofundados sobre os componentes do produto e esses conhecimentos foram facilmente localizados em forma de catálogo do produto disponível, eletronicamente, na rede de dados interna. A compreensão referente ao funcionamento dos componentes do produto favoreceu maior entendimento da sequência de operações.

A sequência de operações pôde ser acessada por meio do roteiro de operações disponibilizado e criado pela analista de cronometragem do setor de engenharia industrial. Os documentos de procedimentos operacionais padrão complementaram o entendimento do fluxo dos materiais e precedências entre as operações realizadas na linha de montagem do produto em estudo e puderam ser colhidos junto ao setor de qualidade onde os mesmos são controlados.

Os projetos de ampliação desenhados conforme planejamento dos três anos em estudo foi viabilizado, em grande parte, pela existência do desenho do arranjo físico atual (Figura 5). O mesmo foi desenvolvido por colaboradores do setor de engenharia industrial e fornecido para auxiliar no desenvolvimento dos projetos de ampliação apresentados neste trabalho.

Para estruturar o plano de investimentos, foram coletadas informações sobre salário médio de operadores e soldadores junto ao setor de engenharia industrial e para estimar os valores das máquinas e equipamentos necessários para a ampliação foram utilizados orçamentos solicitados pelo setor de engenharia avançada.

3.2.4 Etapa 4 – Identificação das relações de precedências

A identificação das relações de precedência se faz necessário para o desenvolvimento do balanceamento ótimo, pois sem a correta identificação de todas as relações de precedência existente entre as operações, certamente, encontrar-se-ia uma solução para a função objetivo incoerente quanto à alocação das operações nas estações de trabalho.

Portanto, foi necessário verificar e questionar cada relação de precedência existente entre as 75 operações registradas no roteiro de operações disponibilizado pela analista de cronometragem da empresa para garantir a existência de, apenas, precedências tecnológicas, ou seja, precedências obrigatórias ou inevitáveis para a correta montagem do produto.

A identificação de precedências não obrigatórias pode gerar a oportunidade de postergar operações, ou seja, deixar livre para serem alocadas em qualquer estação de trabalho posterior sem prejuízos ao processo de montagem correto. Portanto, percebe-se que, quanto menor a quantidade de relações de precedência existente, maior será a liberdade de alocação das operações.

No Apêndice A, serão apresentadas as relações de precedência que foram consideradas nesse trabalho. A descrição das operações foi substituída por identificações para facilitar o entendimento.

3.2.5 Etapa 5 – Cálculo do balanceamento ótimo

O planejamento da capacidade dessa linha de montagem foi obtido com o auxílio do balanceamento das operações pela atribuição de tarefas às estações de trabalho de modo que a medida de desempenho (ociosidade total da linha) fosse minimizada ao valor ótimo.

Porém, testar cada possível sequência seria inviável uma vez que na montagem do produto em estudo são requeridas 75 operações, então o número de sequências possíveis seria dado por 75!.

Portanto, para obter a alocação ótima de operações a estações, utilizou-se um modelo de Programação Inteira Binária, resolvido pelo algoritmo Branch and Bound.

O método foi adotado para determinar a solução ótima em três situações diferentes, a primeira considerou-se o volume de produção previsto para 2013, a segunda situação considerou-se o volume de produção previsto para 2014 e a terceira considerou-se o volume de produção previsto para 2015. Além do volume de produção previsto, foram consideradas as quantidades mínimas de estações de trabalho, o tempo total de processamento e o tempo de ciclo demandado, ou *Takt Time*, de cada ano.

$$\text{Quantidade mínima de estações de} = \frac{\text{Tempo total de processamento}}{\text{Takt Time}}$$

$$\text{Takt Time} \left(\frac{\text{seg}}{\text{und}} \right) = \frac{\text{Tempo disponível em segundos por ano}}{\text{Previsão de vendas anual}}$$

$$\begin{aligned} \text{Tempo disponível em segundos por ano} \\ = \left(\frac{11,2 \text{ meses}}{\text{ano}} \right) \times \left(\frac{21 \text{ dias}}{\text{mês}} \right) \times \left(\frac{8,8 \text{ horas}}{\text{dia}} \right) \times (3600 \text{ seg}) \end{aligned}$$

Tempo disponível em segundos por ano = 7.451.136 seg./ano

Tabela 4 – Previsão de vendas e *Takt Time* considerados em cada ano

	2013	2014	2015
Previsão de vendas (und.)	50.000	75.000	93.000
<i>Takt Time</i> (seg./und.)	149	99	80

Fonte: Autoria própria

Para calcular a solução ótima de cada situação, utilizou-se planilha de *Excel* e o Software *OpenSolver*. O *OpenSolver* é um solucionador de Programação Linear Inteira para o *Microsoft Excel*. Ele torna o *Solver* do *Excel* mais poderoso, ou seja, capaz de solucionar problemas com maior número de variáveis de decisão. O mesmo utiliza-se do algoritmo Branch and Bound para obter a solução ótima e foi desenvolvido por Andrew Mason no Departamento de Engenharia da Universidade de Auckland, Nova Zelândia.

O *OpenSolver* foi alimentado com as informações inseridas na planilha do *Excel*. As informações contidas no *Excel* eram restrições, que tornavam a solução viável, em forma de equações e inequações matemáticas. As restrições utilizadas e suas respectivas representações matemáticas serão descritas a seguir:

x_{ij} – Variável de decisão. Assume o valor “1” se a operação j for alocada a estação i , e “0” caso contrário;

n – Número total de operações;

m – Número de estações de trabalho;

t_j – Tempo da operação j ;

T – *Takt Time*. Tempo máximo para qualquer estação

Restrição associada ao tempo de ciclo: garante que o tempo de ciclo de uma estação de trabalho não deve ultrapassar o tempo de ciclo demandado (*Takt Time*).

$$\sum_{j=1}^n t_j x_{ij} \leq T ; i = 1, 2, \dots, m$$

Restrição associada à sequência de operações: as operações devem ter todas as suas operações precedentes previamente realizadas ou realizadas na mesma estação de trabalho para não ocorrer fluxo reverso.

$$x_{iv} \leq \sum_{k=1}^i x_{ku} ; i = 1, 2, \dots, m \quad (u, v) \in P$$

Restrições de localização de operações: são restrições que impedem uma operação de ser alocada a mais de uma estação de trabalho.

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 ; j = 1, 2, \dots, n$$

Função Objetivo: para esse caso, a função objetivo é minimizar a ociosidade total da linha de montagem.

$$Z = T_m - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m t_j x_{ij}$$

Portanto, o modelo matemático foi representado da seguinte forma:

$$\min Z = T_m - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m t_j x_{ij}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n t_j x_{ij} \leq T ; i = 1, 2, \dots, m$$

$$x_{iv} \leq \sum_{k=1}^i x_{ku} ; i = 1, 2, \dots, m \quad (u, v) \in P$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 ; j = 1, 2, \dots, n$$

A função objetivo e as restrições descritas acima foram dispostas em planilha de Excel conforme sugerido nas notas de aula do Professor Me. Anselmo Pitombeira Ramalho Neto. Um exemplo dessa disposição pode ser observado na Figura 6 e Figura 7.

Figura 6 – Exemplo de disposição das restrições do problema

	OP1	OP2	OP3	OP4	OP5	OP6
Tempo	0,12	0,3	0,36	0,25	0,17	
Restrições de tempo de ciclo						
	<u>Util</u>	Relação	Limite			
Estação 1	0,42		0,48			
Estação 2	0,36		0,48			
Estação 3	0,47		0,48			
Estação 4	0,43		0,48			
Restrições de precedência						
1->2						
		Limite				
Estação 1	0	0				
Estação 2	-1	0				
Estação 3	-1	0				
Estação 4	-1	0				
2->3						
		Limite				
Estação 1	-1	0				
Estação 2	0	0				
Estação 3	-1	0				
Estação 4	-1	0				

Fonte: Notas de aula do Professor Me. Anselmo Pitombeira Ramalho Neto

Na Figura 6, apresenta-se a disposição das operações e seus respectivos tempos no topo da planilha. Logo em seguida, são apresentadas as restrições de tempo de ciclo onde a coluna “limite” representa o máximo de tempo que uma estação de trabalho pode suportar afim de que a linha seja capaz de atender ao volume de produção demandado.

As próximas restrições referem-se às relações de precedências. Esse modelo propõe que a relação de precedência seja inserida na planilha e relacionada a cada uma das estações de trabalho da linha de montagem para garantir que não ocorra fluxo reverso entre as operações.

Figura 7 – Exemplo da disposição da função objetivo e variáveis de decisão

Restrições de localização das operações						
	OP1	OP2	OP3	OP4	OP5	OP6
Util	1	1	1	1	1	1
Limite	1	1	1	1	1	1
Função Objetivo						
z	25					
z'	0,24					
	Custo					
Estação 1	1					
Estação 2	2					
Estação 3	3					
Estação 4	4					
Variáveis de decisão						
	OP1	OP2	OP3	OP4	OP5	OP6
Estação 1	1	1	0	0	0	0
Estação 2	0	0	1	0	0	0
Estação 3	0	0	0	1	1	1
Estação 4	0	0	0	0	0	0
	1	1	2	3	3	

Fonte: Notas de aula do Professor Me. Anselmo Pitombeira Ramalho Neto

Por fim, na Figura 7, são inseridas as restrições de localização que garantem que uma operação pode ser alocada apenas a uma estação de trabalho evitando assim o fracionamento das operações.

Depois de alimentadas todas as restrições que garantem a solução ótima para a função objetivo, deve-se definir qual função deseja solucionar e a matriz das variáveis de decisão conforme se pode observar na figura acima.

Após o preenchimento de todas as restrições, função objetivo e área das variáveis de decisão no *OpenSolver*, a solução ótima é apresentada com a indicação de alocação ótima de todas as operações nas respectivas estações de trabalho. A Figura 8 mostra a tela do *OpenSolver*, na qual se configuram as restrições, função-objetivo e as variáveis de decisão.

Figura 8 – Tela do *OpenSolver* para inserir informações do modelo

What is AutoModel? AutoModel

AutoModel is a feature of OpenSolver that tries to automatically determine the problem you are trying to optimise by the observing the structure of the spreadsheet. It will turn its best guess into a Solver model, which you can then edit in this window and solve with OpenSolver or Solver. Note that you don't have to use this feature: the model can still be built manually. Please note that AutoModel will replace the model in this window, but won't save it to the sheet until you click Save Model.

Objective cell: maximise minimise target value:

Variable cells:

Constraints:

<Add new constraint>
 \$B\$8:\$B\$30 <= \$D\$8:\$D\$30
 \$B\$1526:\$BE\$1526 = \$B\$1527:\$BE\$1527
 \$B\$42:\$B\$64 <= \$C\$42:\$C\$64
 \$B\$68:\$B\$90 <= \$C\$68:\$C\$90
 \$B\$94:\$B\$116 <= \$C\$94:\$C\$116
 \$B\$120:\$B\$142 <= \$C\$120:\$C\$142
 \$B\$146:\$B\$168 <= \$C\$146:\$C\$168
 \$B\$172:\$B\$194 <= \$C\$172:\$C\$194
 \$B\$198:\$B\$220 <= \$C\$198:\$C\$220
 \$B\$224:\$B\$246 <= \$C\$224:\$C\$246
 \$B\$250:\$B\$272 <= \$C\$250:\$C\$272
 \$B\$1536:\$BE\$1558 bin

<=

Update constraint Cancel

Delete selected constraint

Make unconstrained variable cells non-negative

Modify a constraint: select, make changes, then click "Update constraint".
 Add a constraint: select "Add new constraint", enter the new constraint's details, then click "Add Constraint"

Shadow Prices: List constraints and shadow prices in a table with top-left cell:

Show model after saving Options... Save Model Cancel

Fonte: Imagem do OpenSolver

3.2.6 Etapa 6 – Desenvolvimento do balanceamento implementável

Neste estudo de caso, não foi possível incluir todas as restrições no modelo matemático, por esse motivo não se considerou, integralmente, os resultados obtidos nos balanceamentos ótimos de cada ano. Foi necessário realizar adequações para garantir um fluxo de materiais com menos quantidade de movimentações, pois não foi encontrada forma para expressar, essa restrição, matematicamente.

Porém, a solução ótima calculada em cada ano em estudo permitiu observar o limite do percentual de ociosidade da linha e esse limite serviu de referencial para o desenvolvimento de um balanceamento implementável.

O balanceamento implementável foi desenvolvido após a obtenção dos resultados do balanceamento ótimo e, baseando-se nesses resultados, procurou-se alcançá-los ao

máximo. Porém, com uma diferença. Para o desenvolvimento desse balanceamento considerou-se a restrição que garante um fluxo adequado dos materiais em processo dentro da linha de montagem.

Para o volume de vendas previsto em 2013, calculou-se a necessidade de fabricar um produto a cada 149 segundos. Para atender à essa demanda, foi calculado pela programação inteira binária, a necessidade de 13 estações de trabalho por meio de um balanceamento quase perfeito atingindo a ociosidade total de, apenas, 3,34%. A Tabela 5 mostra os resultados da otimização em cada ano de planejamento.

Tabela 5 – Resultados da otimização em cada ano de planejamento

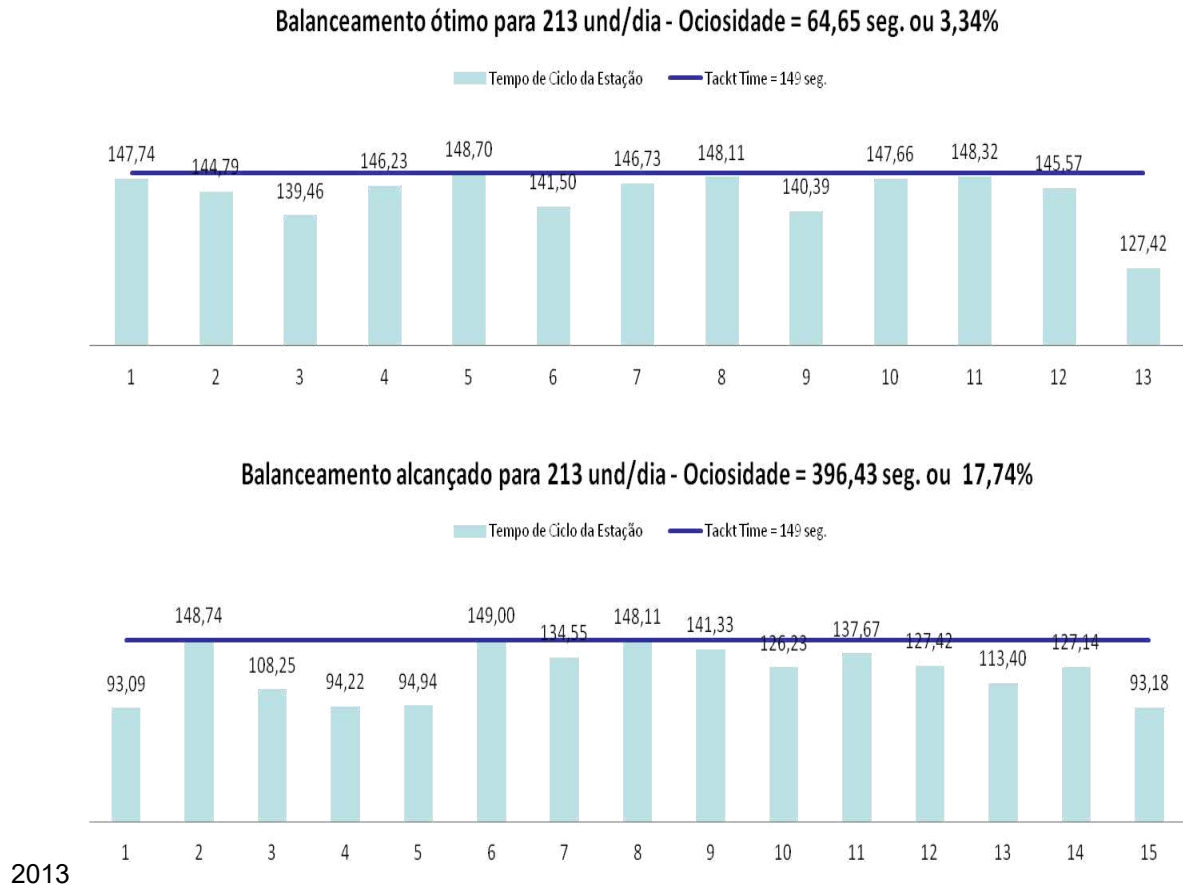
	2013	2014	2015
Tempo de ociosidade total da linha	64,65 seg.	188,56 seg.	117,17 seg.
Porcentagem de ociosidade	3,35%	9,52%	6,37%
Quantidade de estações de trabalho	13	20	23

Fonte: Autoria própria

Essa solução ótima não impede que o produto seja montado de forma correta, mas requer uma alta movimentação de materiais, inviabilizando a implementação da mesma. Por isso, foi necessário construir um balanceamento que levasse em consideração essa restrição e fosse tão eficiente quanto possível comparada à solução ótima calculada.

A mesma situação ocorreu ao desenvolver o balanceamento dos outros dois anos estudados. A Figura 9 representa a comparação entre o gráfico do balanceamento ótimo e o gráfico do balanceamento alcançado para o cenário de 2013.

Figura 9 – Gráficos do balanceamento ótimo e alcançado em



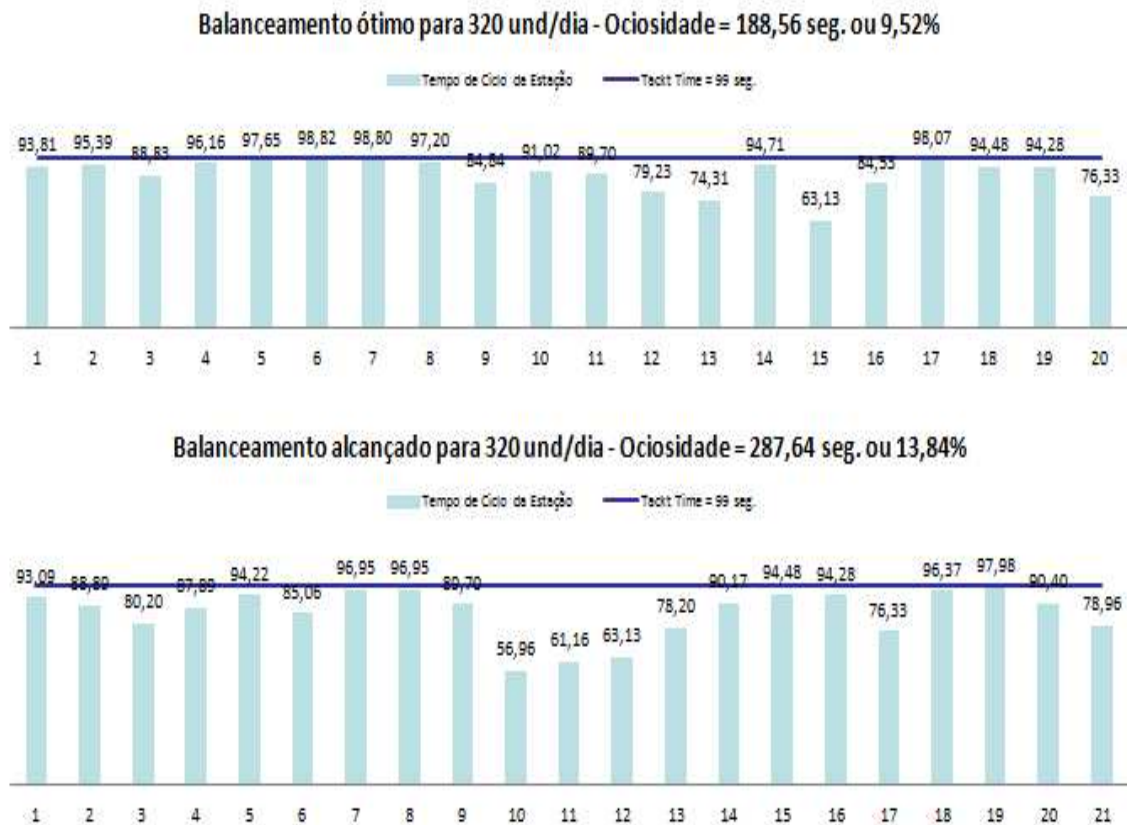
Fonte: Autoria própria

Pode-se perceber, pela análise da figura acima, que o balanceamento alcançado não conseguiu distribuir as operações em uma quantidade de estações de trabalho menor que 15, por esse motivo atingiu uma taxa de ociosidade distante da taxa calculada pela programação matemática.

O fato pode ser explicado pela quantidade de variáveis imensuráveis envolvidas no processo de montagem do produto. Essas variáveis não são consideradas pelo modelo matemático e, por isso, muitas vezes, considera-se uma solução utópica para o problema. Porém, ainda assim, apresenta-se como uma boa ferramenta, pois fornece referência sobre o nível de eficiência.

Para o cenário de 2014, pode-se perceber uma maior proximidade entre os resultados alcançados e os resultados calculados matematicamente. A Figura 10 ilustra esse fato pela comparação dos gráficos.

Figura 10 – Gráficos do balanceamento ótimo e alcançado em 2014

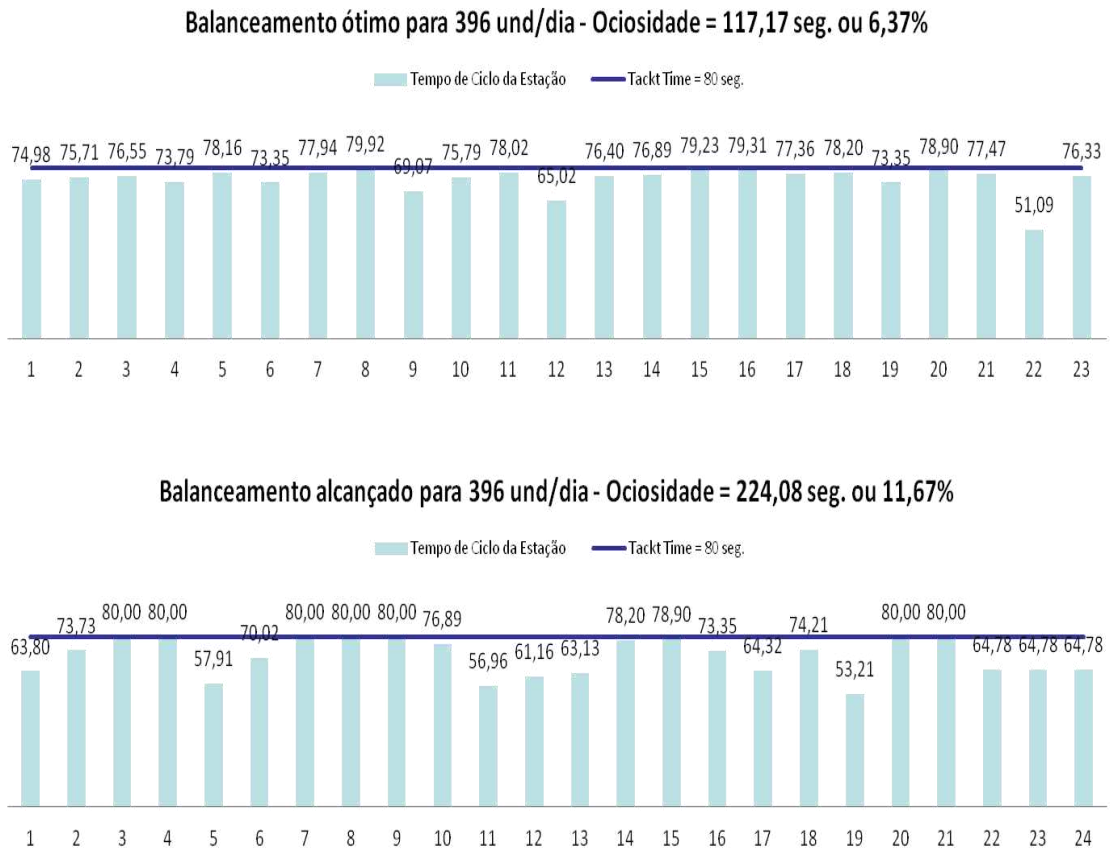


Fonte: Autoria própria

Apesar de apresentar estações de trabalho com grande quantidade de tempo ocioso (caso das estações 10, 11 e 12), o balanceamento implementável desenvolvido para o cenário de 2014 foi o que mais se aproximou da solução ótima.

Por fim, foi desenvolvido o balanceamento implementável para o ano de 2015 por meio do mesmo procedimento adotado para os dois anos anteriores. Pode-se verificar a comparação dos resultados na Figura 11.

Figura 11 – Gráficos do balanceamento ótimo e alcançado em 2015



Fonte: Autoria Própria

Na figura acima, fica visível a aparência homogênea presente entre as estações de trabalho do balanceamento ótimo ao comparar com o balanceamento alcançado em 2015, apesar da boa proximidade entre os dois resultados.

3.2.7 Etapa 7 – Projeto do arranjo físico

Nessa etapa, foram desenhados os arranjos físicos de cada ano planejado nas etapas anteriores. Para isso, foi utilizado, como base, o desenho do arranjo físico atual (ver Figura 5) e os resultados dos balanceamentos implementáveis.

Definiu-se que o arranjo físico atual deveria servir de base para o projeto dos arranjos físicos posteriores para evitar grandes mudanças estruturais e facilitar as ampliações. Portanto, manteve-se, praticamente, inalterado o fluxo atual dos materiais dentro da linha de montagem.

As adequações realizadas nos desenhos das três ampliações seguiram o mesmo padrão praticado atualmente, como o posicionamento das estações de trabalho e as dimensões das bancadas. Foram propostas pequenas modificações como a transferência das estações de trabalho relacionadas às operações de acabamento e embalagem para o lado de fora da sala por serem operações que não oferecem risco de contaminação do produto.

Durante a criação do desenho, houve também preocupações quanto à quantidade de operadores dividindo um espaço fechado e a quantidade de movimentações devido ao transporte dos produtos em processo. Esses fatores influenciaram na definição das dimensões projetadas assim como a quantidade de máquinas, bancadas e prateleiras de estocagem.

Os desenhos foram criados no Software *AutoCAD* e em cada desenho constam o arranjo físico do ano em questão e o seu respectivo balanceamento representado de forma detalhada. Os três desenhos foram plotados em folhas de tamanho A0 e podem ser consultados no apêndice deste trabalho.

3.2.8 Etapa 8 – Estruturação do plano de investimentos

Baseando-se pelo resultado do balanceamento implementável e projeto do arranjo físico construído nas etapas anteriores, foi estruturada, nessa etapa, o plano de investimentos em recursos de mão de obra e máquinas entre os anos de 2012 à 2015. A Tabela 6 demonstra esse plano.

Tabela 6 – Plano de ampliações gradativas

	Valor unit.	Invest. (2012–2013)		Invest. (2013–2014)		Invest. (2014–2015)	
		QTD.	Total	QTD.	Total	QTD.	Total
Operador 2	1.566,40	5	7.832,00	5	7.832,00	3	4.699,00
Soldador	2.092,20	0	-	1	2.092,00	0	-
Bomba	10.000,00	0	-	2	20.000,00	1	10.000,00
CPT	5.000,00	1	5.000,00	2	10.000,00	1	5.000,00
		Total	12.832,00	Total	39.924,20	Total	19.699,20

Fonte: Autoria própria

Para calcular o custo médio por operador e soldador foram considerados os salários e os custos tributários disponibilizados pelo setor de Engenharia Industrial. Para os valores unitários da bomba de vácuo e máquina de teste funcional (CPT), foram considerados os valores orçados pelo setor de Engenharia.

Identificou-se que o investimento necessário em 2012 para atender ao volume previsto em 2013 resume-se à aquisição de um CPT e cinco operadores. Além disso, não será necessário investimento em estrutura física entre esses períodos.

Pode-se observar pela tabela acima, que o período entre os anos de 2013 e 2014 apresenta a maior quantidade de investimentos necessários para atender ao volume de vendas previsto. Isso pode ser explicado pelo alto nível de ociosidade existente no ano de 2012, pois, com isso, não foi necessário planejar grandes investimentos para atender à demanda prevista para 2013. A partir daí, não sobraram ociosidades para consumir e, praticamente, toda a ampliação da capacidade teve que ser planejado por meio de investimentos financeiros.

3.3 Considerações finais do estudo de caso

É possível inferir que a adequada utilização do balanceamento de linhas de montagens por Programação Matemática pode auxiliar no projeto e planejamento da capacidade.

O balanceamento atual da linha gera taxa de ociosidade de mais de 35% e produtividade de 11,3 und./HH causando alto custo unitário de produção. Após o estudo, obteve-se 17,8% de ociosidade e mais de 25% de aumento de produtividade entre os anos de 2012 e 2013.

Baseado no balanceamento ótimo foi possível desenvolver um balanceamento implementável com bons índices de eficiência e produtividade, além de gerar uma economia estimada em mão de obra de, aproximadamente, R\$ 400,00 acumulado até 2015. Na Tabela 7 é possível perceber o ganho alcançado com o desenvolvimento desse estudo de caso.

Tabela 7 – Resumo dos resultados alcançados

	Ociosidade		Produtividade (Und/HH)	Economia estimada em mão de obra direta (R\$)	Investimento necessário (R\$)	Saldo restante (R\$)
	Alcançado	Ótimo				
2012	35,92%	-	11,30	-	-	-
2013	17,80%	3,35%	14,20	72.746,87	12.832,00	59.914,87
2014	13,84%	9,52%	15,24	133.298,68	39.924,20	93.369,48
2015	11,67%	6,37%	16,50	202.616,25	19.699,20	182.917,05
			Total (R\$)	408.656,80	72.455,40	336.201,40

Fonte: Autoria própria

Para calcular o valor da economia estimada em mão-de-obra anual, considerou-se a diferença entre o índice mensal em 2012 e o índice mensal do ano em estudo multiplicado

pelo volume de produção anual. O índice mensal de cada ano foi calculado pela divisão entre o custo de mão-de-obra mensal pelo volume de produção mensal. A diferença entre o índice atual e o índice do ano em estudo representa a economia mensal do mesmo ano. Multiplicando-se essa diferença ao volume de produção anual encontra-se o valor da economia estimada em mão-de-obra anual. A seguir, a Tabela 8 representa os valores considerados para esses cálculos.

Tabela 8 – Cálculos para a economia estimada em mão-de-obra anual

	2012	2013	2014	2015
Custo de mão-de-obra mensal (Salário*Tributos)	R\$ 16.189,80	R\$ 24.021,80	R\$ 33.946,00	R\$ 38.645,20
Volume de produção mensal	2.373	4.473	6.720	8.316
(Custo mão-de-obra)/(volume de produção mensal)	6,82	5,37	5,05	4,65
Economia estimada em mão-de-obra anual		R\$ 72.746,87	R\$ 133.293,68	R\$ 202.616,25

Fonte: Autoria própria

A necessidade de atender uma demanda crescente exigiu aumento da capacidade e, conseqüentemente, da quantidade de estações de trabalho ao longo dos anos, porém o resultado obtido pelo balanceamento ótimo possibilitou identificar um aumento de capacidade.

Por fim, a proposta apresentada serve de base para implementação de uma linha de montagem capaz de atender às previsões de vendas dos próximos três anos com um planejamento eficiente, projeto detalhado e um plano de investimentos estruturado.

4 CONCLUSÕES

Ao longo do estudo, o trabalho teve o objetivo de dimensionar a linha de produção pelo cálculo do balanceamento de cada ano em estudo, projetar e desenhar o arranjo físico das ampliações necessárias e estruturar o plano de investimentos entre os anos, conforme o explicado a seguir.

Para o planejamento da capacidade pelo cálculo do balanceamento foram definidas três etapas. A primeira procurou-se identificar as relações de precedência tecnológicas existentes entre as operações da linha de montagem. A segunda objetivou-se em calcular a solução ótima para a função objetivo em cada um dos cenários de três anos. Por conseguinte, iniciou-se o processo de adequação do balanceamento ótimo com o objetivo de torna-lo implementável na prática.

Uma vez dimensionadas as capacidades necessárias, o projeto detalhado do arranjo físico definiu como serão dispostas as ampliações planejadas nas etapas anteriores com detalhamento das operações atribuídas a cada estação de trabalho.

Em resumo, os objetivos deste trabalho foram atingidos, pois a proposta de projetar e planejar uma linha de montagem de forma eficiente e capaz de atender aos volumes de vendas demandados nos próximos três anos foram alcançados.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a implantação do projeto detalhando para se concretizar a racionalização de mão-de-obra e identificação de aumento da produtividade. Também aplicar a programação matemática para calcular o balanceamento de outras linhas de montagens visando a comparação entre os resultados.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Giancarlo F.; PEINADO, Jurandir; GRAEML, Alexandre R. **Simulações de arranjos físicos por produto e balanceamento de linha de produção: o estudo de um caso real no ensino para estudantes de engenharia**. Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2007.

CORRÊA, H, L; CORRÊA, C, A. **Administração de produção e operações: Manufatura e serviços. Uma abordagem estratégica**. São Paulo: Atlas, 2005.

DONNINI, N.; MAGATÃO, L.; RODRIGUES, L. C. A. **Balanceamento de uma linha de montagem de bancos de automóveis com buffer intermediário usando programação linear inteira mista**. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2010.

FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M.; CUTIGI, R. A.; GUIGUET, A. M. **O uso da programação inteira 0-1 para o balanceamento montagem: modelagem, estudos de caso e avaliação**. Produção, v. 18, 2008.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da produção e operações**. São Paulo: Pioneira, 2002.

HILLER, F.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional, 8ªEd**. São Paulo: Edusp, 2010.

KAWAMURA, Márcio. **Aplicação do Método Branch and Bound na programação de tarefas em uma única máquina com data de entrega comum sob penalidades de adiantamento e atraso**. Dissertação de Mestrado de Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

MEZZENA, Marco A. S.: **Comparação entre dois algoritmos para balanceamento de linhas de montagem utilizando o software de desenvolvimento Delphi, 2000**.

MOREIRA, Daniel Augusto. **Introdução à administração da produção e operações**. 3. ed. São Paulo: Pioneira, 1998.

MUTHER, Richard. **Planejamento do layout: sistema SLP**. São Paulo: Edgard Blucher, 1978.

OLIVEIRA, Fernanda da Silva. **Programação Inteira Binária por *Branch and Bound* para rebalanceamento de linhas de montagem em ambiente de mix de modelos de produtos: Um estudo de caso em uma empresa da indústria automobilística**. Dissertação de Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial, Faculdade Tecnologia SENAI. Salvador, 2011.

RITZMAN, L. P.; KRAJEWSKI, L. J. **Administração da produção e operações**. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. São Paulo: Atlas, 2002.

STEVENSON, W. J. **Administração das operações e produção**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
TAHA, Hamdy A. **Pesquisa Operacional**. São Paulo: Pearson, 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE A -Relações de Precedência

Grupo	Identificação	Precedências
Pré-montagem da Cuba	OP 1	
	OP 2	
	OP 3	OP1 e OP2
	OP 4	OP3
	OP 5	OP4
	OP 6	OP5
	OP 7	OP6
	OP 8	OP7
	OP 9	OP8
	OP 10	OP9
	OP 11	OP7
	OP 12	OP11
Pré-montagem Base do Compressor	OP 13	
	OP 14	OP13
	OP 15	
	OP 16	
	OP 17	OP14, OP15 e OP16
	OP 18	OP17
	OP 19	
	OP 20	OP19
	OP 21	OP18 e OP20
	OP 22	OP21
	OP 23	OP12 e OP22
OP 24	OP23	
Montagem do Produto	OP 25	OP24
	OP 26	OP25
	OP 27	OP25
	OP 28	OP27
	OP 29	OP25
	OP 30	OP25
	OP 31	OP26, OP27, OP28, OP29 e OP30
	OP 32	OP31
	OP 33	OP73 e OP75
	OP 34	OP33
	OP 35	OP34
	OP 36	OP67 E OP35
	OP 37	OP36
	OP 38	OP37

Montagem do Produto	OP 39	OP38
	OP 40	OP32
	OP 41	OP40
	OP 42	OP41
	OP 43	OP42
	OP 44	OP3
	OP 45	OP43
	OP 46	OP45
	OP 47	OP46
	OP 48	OP47
	OP 49	
	OP 50	OP49
	OP 51	OP50
	OP 52	OP44 E OP51
	OP 53	OP51
	OP 54	OP48, OP52, OP67 e OP75
	OP 55	
	OP 56	
	OP 57	OP54
	OP 58	
OP 59	OP57	
OP 60	OP59	
Pré-montagem Conj. Frontal	OP 61	
	OP 62	OP61
	OP 63	OP62
	OP 64	OP63
	OP 65	OP64
	OP 66	OP65
	OP 67	
Pré-montagem Lateral Direita	OP 68	
	OP 69	OP68
	OP 70	OP69
	OP 71	OP70
	OP 72	OP71
	OP 73	OP72
	OP 74	
	OP 75	OP74

APÊNDICE B – Layout e Balanceamento de 2013

APÊNDICE C – Layout e Balanceamento 2014

APÊNDICE D – Layout e Balanceamento 2015