

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

**GIOVANA CUNHA BANDINELLI**

**ANÁLISE DE IMPLEMENTAÇÃO DE  
AGVS EM UM AMBIENTE INDUSTRIAL**

Porto Alegre  
2018

**GIOVANA CUNHA BANDINELLI**

**ANÁLISE DE IMPLEMENTAÇÃO DE  
AGVS EM UM AMBIENTE INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-CCA)  
apresentado à COMGRAD-CCA da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul como parte dos re-  
quisitos para a obtenção do título de *Bacharel em  
Eng. de Controle e Automação* .

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Heraldo José Amorim**

Porto Alegre  
2018

**GIOVANA CUNHA BANDINELLI**

**ANÁLISE DE IMPLEMENTAÇÃO DE  
AGVS EM UM AMBIENTE INDUSTRIAL**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção dos créditos da Disciplina de TCC do curso *Eng. de Controle e Automação* e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Heraldo José Amorim, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul –  
Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Cararra, UFRGS  
Doutor pela McMaster University – Hamilton, Canadá

Prof. Dr. Marcelo Gotz, UFRGS  
Doutor pela Universität Paderborn – Paderborn, Alemanha

Prof. Dr. Valner João Brusamarello, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

---

Prof. Dr. Mario Sobczyk  
Coordenador de curso  
Eng. de Controle e Automação

Porto Alegre, dezembro de 2018.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente e principalmente, aos meus pais Débora e Paulo por todos os ensinamentos que me propiciaram ao longo dos anos. Desde os puxões de orelha quando criança, até os aconselhamentos sobre minha carreira e meu futuro agora no fim desta etapa da universidade. Obrigada por serem "os advogados do diabo", apesar de eu reclamar, tudo que vocês falam é levado em consideração. Obrigada especialmente por estarem sempre presentes para me confortar nos momentos de dúvida e de frustrações, obrigada por sempre me apoiarem e me lembrarem que eu sou capaz de atingir tudo que almejo. Eu não seria quem sou hoje e não estaria onde estou hoje sem vocês. Vocês são minha inspiração. Amo vocês!

Às minhas irmãs Paola e Fe, agradeço pelo apoio e pela cumplicidade. Obrigada por sempre me compreender e me aconselhar. Amo vocês!

Ao meu orientador, Heraldo Amorim, obrigada por ter comprado a ideia deste trabalho, por ter me apoiado em todos os momentos, pelas conversas descontraídas e por conversar comigo apesar de eu chegar no teu horário de saída (desculpa por isso).

Em relação a execução deste trabalho, agradeço também a alguns amigos que foram essenciais nesta etapa. Ao Carlos Miguel Tonin, pelo grande apoio, não só na execução deste trabalho, mas também durante toda a graduação. Tu é um guri sensacional e tenho orgulho de ser tua amiga. Ao Paulo Fam Santos, obrigada pela boa vontade de ler meu trabalho e fazer sugestões de melhoria, além da parceria e ajuda ao longo dos anos. Agradeço ao Alex Treviso por realizar minha matrícula no TCC e por também ler e opinar sobre o texto. Ao Luiz Paraboni, obrigada pelo apoio incondicional, pelos conselhos e por fingir que leu meu TCC. Aos meus amigos e colegas Jonnas Espindula e Luiz Frederico Villalobos, pela companhia e parceria nesta etapa de final de curso.

Sobre os anos vividos cursando Engenharia de Controle e Automação tenho muito a agradecer a todos meus colegas. Um agradecimento generalizado a todos, pelas risadas, pela companhia e apoio nos momentos de desespero e por estarem comigo durante esta etapa tão importante. Eu não teria me formado sem o apoio de todos vocês. Em especial, agradeço meus grandes amigos Anne Alderete, Arthur Irgang, Thomás Schulze e Richard Adolphs por me conhecerem como poucos e por educarem meu lado nerd.

Aos meus grandes amigos, Ana Elisa Pires, Carolina Martinbiancho, Lara Horn, Lara Godinho e Leonardo Polessio. Não tem nem como descrever tudo que vocês significaram para mim ao longo desses anos. Muito obrigada. Agradeço também os amigos da Purdue University, os amigos e colegas do trabalho e os amigos que surgiram ao longo desses anos. Cada um de vocês marcou uma etapa muito importante da minha jornada, sou eternamente grata por isso.

Por fim, gostaria de agradecer àqueles que de alguma forma contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.

## RESUMO

Abastecimento de peças em uma linha de montagem automática é essencial para assegurar o tempo de ciclo da linha e depende fortemente no fornecimento de material. No entanto, manuseio e transporte de materiais não agregam valor ao produto final. Além disso, custos inerentes e riscos ao produto e aos operadores podem aumentar se mão-de-obra humana é utilizada, juntamente com uma potencial redução de eficiência. Esses problemas podem ser atenuados com o uso de um sistema automatizado para o manuseio e transporte de peças e materiais. Neste trabalho, um estudo foi feito para avaliar a viabilidade de substituir um sistema interno de distribuição operado por pessoas por um sistema de veículos guiados automaticamente (AGVS) para abastecer para a linha de montagem automática, com foco no aumento de eficiência e redução de custo. Após uma revisão dos diferentes modelos de veículos guiados automaticamente oferecidos no mercado, as opções foram comparadas com base na aplicabilidade no ambiente da planta e custos, incluindo valor de mercado e instalação. Ainda, o número de veículos necessários para atender a demanda da produção foi estimado através da carga de trabalho necessária e a disponibilidade estimada dos mesmos. MACBETH foi utilizado como um método adicional de tomada de decisões. A análise realizada demonstra a viabilidade de utilizar um AGVS para o abastecimento da linha de montagem avaliada. O sistema de guiamento escolhido deve considerar a estabilidade do *layout* da planta: sistemas de AGVs ativo indutivos são a melhor opção quando menos de cinco mudanças no *layout* são esperadas em um horizonte de dez anos desde a implementação, devido aos custos de instalação das guias. Quando mais de cinco modificações no *layout* são previstas nesse período, sistemas de guiamento natural são mais baratos. Considerando os dados disponíveis, um tempo de retorno do investimento menor que 18 meses é esperado.

**Palavras-chave:** Veículos Guiados Automaticamente, Manuseio de Materiais, Linha de Montagem Automática, Retorno sobre Investimento.

## **ABSTRACT**

Parts feeding in an automated assembly plant is essential to ensure the line cycle time and depend strongly on material supply. However, material handling and transportation do not aggregate value to the final product. Moreover, inherent costs and risks to the product and operators may increase if human labor is used, along with a potential reduction of the efficiency. This issues may be softened by the use of an automated system for the handling and transportation of parts and materials. In this work, a study was performed to evaluate the feasibility of replacing human-operated internal distribution system for an automated guided vehicle system (AGVS) for supplying an automated assembly line, aiming the increase of efficiency and cost reduction. After a review on the different models of automated guided vehicles offered on the market, the options were compared based on adaptability to the plant environment and costs, including market price and installation. Also, the number of vehicles needed to comply with production demand was estimated through the necessary workload and the estimated vehicle availability. MACBETH was used as an additional decision-making tool. The analysis performed indicate the feasibility of using AGVS for the supply of the evaluated assembly line. The guidance system chosen must consider the stability of the plant layout: active-inductive AGVS are the best option when less than five layout changes are expected to occur in a ten-year horizon from the implementation, due to the installation costs of active guides. When more than five layout changes are expected in this period, natural-guided systems are cheaper. Considering the available data, an investment return time smaller than 18 months is expected.

**Keywords: Automated Guided Vehicle System, Material Handling, Automated Assembly Line, Return of Investment.**

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> . . . . .	7
<b>LISTA DE TABELAS</b> . . . . .	8
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> . . . . .	9
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> . . . . .	10
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	11
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> . . . . .	12
<b>2.1 Tecnologias de Navegação</b> . . . . .	12
2.1.1 Guiamento Óptico . . . . .	12
2.1.2 Guiamento Ativo Indutivo . . . . .	13
2.1.3 Guiamento a Fita Magnética . . . . .	14
2.1.4 Guiamento a Laser . . . . .	14
2.1.5 Guiamento Natural . . . . .	15
<b>2.2 Análise do Sistema</b> . . . . .	16
2.2.1 Ferramentas Gráficas . . . . .	16
2.2.2 Cálculo do Número de Veículos . . . . .	16
<b>3 ESTUDO DE CASO</b> . . . . .	18
<b>4 DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO</b> . . . . .	20
<b>4.1 Seleção do Modelo de AGV</b> . . . . .	20
4.1.1 Análise da Adaptação ao Ambiente . . . . .	22
4.1.2 Análise da Flexibilidade . . . . .	23
4.1.3 Resultado Final . . . . .	24
<b>4.2 Análise das Rotas</b> . . . . .	26
4.2.1 Cálculo do Tempo de Ciclo . . . . .	26
4.2.2 Demanda das peças e Carga de Trabalho . . . . .	27
4.2.3 Estimativa do número de veículos . . . . .	28
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .	31
<b>5.1 Retorno sobre Investimento</b> . . . . .	31
<b>6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	34
<b>6.1 Trabalhos Futuros</b> . . . . .	34
<b>BIBLIOGRAFIA</b> . . . . .	35

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1:	Exemplo da navegação por fita. . . . .	13
Figura 2:	Exemplo da navegação ativo indutiva. . . . .	13
Figura 3:	Exemplo de funcionamento do sistema de guiamento a laser. . . . .	15
Figura 4:	Exemplo de funcionamento do sistema de guiamento natural. . . . .	15
Figura 5:	Exemplo de um gráfico de-para. . . . .	16
Figura 6:	Exemplo de um diagrama de rede. . . . .	17
Figura 7:	Modelo similar à planta estudada. . . . .	18
Figura 8:	Matriz de comparação do critério Adaptação ao Ambiente. . . . .	22
Figura 9:	Pontuação do critério Adaptação ao Ambiente. . . . .	22
Figura 10:	Níveis de Flexibilidade . . . . .	23
Figura 11:	Categorização da Flexibilidade . . . . .	23
Figura 12:	Pontuação do critério flexibilidade. . . . .	23
Figura 13:	Comparação dos critérios. . . . .	24
Figura 14:	Pontuação ponderada. . . . .	24
Figura 15:	Análise de custo-benefício. . . . .	25
Figura 16:	Mapa da planta analisada. . . . .	26



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Vantagens e desvantagens de cada tecnologia . . . . .	21
Tabela 2:	Estimativa de custo para cada modelo de AGV. . . . .	25
Tabela 3:	Gráfico de-para da planta. (Distância (m) / Quantidade de Curvas) . .	27
Tabela 4:	Definições de tempo do sistema MTM. . . . .	27
Tabela 5:	Gráfico de-para da planta. (Tempo de ciclo (min)) . . . . .	28
Tabela 6:	Demanda de cada peça. . . . .	28
Tabela 7:	Carga de trabalho das rotas. . . . .	28
Tabela 8:	Número de veículos por rota. . . . .	29
Tabela 9:	Novas rotas e tempos de ciclo. . . . .	30
Tabela 10:	Carga de trabalho e número de veículos das rotas. . . . .	30
Tabela 11:	Carga de Trabalho e Número de Veículos das Rotas. . . . .	32
Tabela 12:	Retorno sobre o investimento ao longo dos anos. . . . .	32
Tabela 13:	ROI ao longo dos anos considerando modificação das rotas. . . . .	33
Tabela 14:	Comparação do ROI para cargas múltiplas e cargas unitárias. . . . .	33

## LISTA DE ABREVIATURAS

AGV	Veículo Guiado Automaticamente
MACBETH	Medição de Atratividade por Técnica de Avaliação baseada em Categorias
MDCA	Análise Multicritério de Apoio à Decisão
MTM	<i>Method-Time Measurement</i>
ROI	<i>Return of Investment</i>
SGV	Veículo Auto-Guiado

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Disponibilidade
$AT$	Tempo disponível de cada veículo
$F_t$	Fator de congestionamento
$L$	Distância total percorrida
$L_d$	Distância percorrida com carga
$L_e$	Distância percorrida sem carga
$n_c$	Número de veículos
$R_f$	Entregas por hora
$T_c$	Tempo de ciclo
$T_L$	Tempo de carga
$T_U$	Tempo de descarga
$v$	Velocidade do veículo
$v_c$	Velocidade do veículo com carga
$v_o$	Velocidade do veículo sem carga
$WL$	Carga de trabalho

# 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho visa analisar a viabilidade de aplicar a tecnologia de veículos guiados automaticamente (AGVs - *Automated Guided Vehicles*) em uma fábrica. Assumindo um layout da planta já estruturado e sem disponibilidade para modificações imediatas, deseja-se substituir a mão-de-obra utilizada para manuseio de materiais por este novo sistema a fim de reduzir, principalmente, custos de produção.

Segundo Groover (2008, p. 273) “o manuseio de materiais deve ser realizado de maneira segura, eficiente, com baixo custo, em tempo hábil, precisamente e sem danos aos materiais”. No cenário analisado neste trabalho, percebem-se oportunidades para se adequar a concepção de Groover de uma operação bem-sucedida. Quanto à segurança, por exemplo, a situação atual não atende a visão de um ambiente de trabalho com zero acidentes. Como os veículos rebocadores de peças são operados por pessoas, essa movimentação de carga está suscetível à desatenção dos mesmos. Com o uso de veículos guiados automaticamente, sensores de segurança são utilizados para prevenir colisões, assim o fator humano é mitigado (BOEHNING, 2014).

O foco neste trabalho está em tornar o manuseio de materiais em uma operação de baixo custo e que é feita em tempo hábil. Atualmente, o valor gasto com funcionários para movimentar peças dentro da fábrica, uma atividade que não agrega valor ao produto final (BICHENO; HOLWEG, 2009), é próximo ao gasto com a mão-de-obra que, de fato, agrega valor. Esse fato demonstra que, apesar de diversas iniciativas para otimizar a distribuição de materiais, a atividade ainda tem um custo elevado. Como as vias disponíveis para navegação de rebocadores não tem flexibilidade, ou seja, não há como melhorar o layout da fábrica para criar uma movimentação mais eficiente, uma das alternativas propostas para solucionar esse problema é o uso da tecnologia.

Tendo em vista definir se a implementação de AGVs nesta planta seria algo benéfico financeiramente, este trabalho fará uma análise sobre os diferentes fatores que devem ser considerados para tal feito. Primeiramente, serão detalhados os diferentes tipos de tecnologia de veículos guiados automaticamente disponíveis no mercado. Após essa revisão inicial, será analisado como cada método se relacionaria com o ambiente fabril estudado e quais seriam as melhores escolhas para a aplicação. Para este estudo serão considerados aspectos como: valor, facilidade de flexibilização das rotas dos veículos e adaptação às características do local.

Para definir o valor final de investimento, é preciso estimar a quantidade de veículos necessários para suprir a demanda da produção sem impactá-la. Para tal, serão analisadas as rotas utilizadas atualmente, assim como a demanda de cada peça. Com esses dados, é possível determinar o número ideal de AGVs para o cenário analisado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para implementar um sistema de veículos guiados automaticamente na planta analisada neste trabalho é necessário primeiramente entender os diferentes modelos presentes no mercado e suas vantagens e desvantagens dentro do ambiente estudado. Os veículos possuem diferentes características em relação a tecnologia utilizada para sua navegação. Logo, cada tipo de AGV possuirá uma performance distinta dependendo do ambiente o qual é inserido.

Além disso, para tornar a aplicação algo viável, precisa-se entender quantos veículos são necessários para executar as operações do sistema. Para tal, um cálculo do número de veículos ideal é feito utilizando como base informações da movimentação das peças na linha e da demanda da produção.

Portanto, neste capítulo, será feita uma breve introdução às diferentes configurações que um AGV pode apresentar. Posteriormente serão descritas as equações utilizadas para determinar o número de veículos a serem instalados no sistema.

### 2.1 Tecnologias de Navegação

O diferencial dos AGVs em comparação aos meios de transporte de materiais usuais está no fato de não ser necessário uma pessoa para executar a tarefa de manuseio. Portanto, as tecnologias de navegação são um ponto importante quando se trata sobre esses sistemas, pois são elas que permitem que o veículo navegue autonomamente de maneira precisa e segura.

Ao longo dos anos, diversas tecnologias para direcionamento dos veículos foram desenvolvidas e, ainda hoje, novos métodos são testados e refinados. Pontos importantes a se analisar quando comparando as diferentes tecnologias são: flexibilidade e adaptação ao ambiente.

#### 2.1.1 Guiamento Óptico

Na navegação óptica, o caminho que o veículo deve percorrer é demarcado utilizando fitas coladas ou pintadas no piso. Sensores ópticos embarcados no AGV identificam o contraste entre a fita e o piso e utilizam algoritmos de detecção de borda para que o veículo navegue executando um controle de seguimento de linha. A tecnologia é considerada uma solução apropriada para *layouts* descomplicados pela sua simplicidade (ULLRICH, 2015). Um esboço da aplicação pode ser visto na Figura 1.

O guiamento óptico possui algumas restrições quanto aos ambientes nos quais ele pode ser aplicado. Devido ao fato de sua navegação se dar pela detecção do contraste entre a fita e o piso, a faixa deve receber uma manutenção constante a fim de garantir

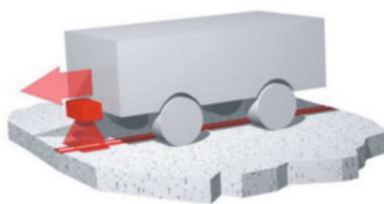


Figura 1: Exemplo da navegação por fita.

Fonte: (ULLRICH, 2015)

sua integridade e distinção do solo (GROOVER, 2008). Essa tecnologia, portanto, não se adapta bem em ambientes sujos ou que possam causar algum tipo de corrosão às fitas, como ambientes externos. Locais com muita movimentação de pessoas e veículos também aumentam o risco de danificar a demarcação da rota.

Quanto à flexibilidade das malhas de percurso, essa tecnologia demanda um retrabalho quando se deseja fazer alguma alteração nos caminhos definidos. É necessário que as fitas sejam reposicionadas nos novos locais pretendidos. Assim, apesar do retrabalho ser indesejado, não é de difícil execução.

### 2.1.2 Guiamento Ativo Indutivo

O guiamento ativo indutivo, também conhecido como orientação por fio, é, entre as tecnologias atuais, o método de navegação mais robusto e muito popular em veículos mais antigos (ULLRICH, 2015). Enquanto, no guiamento óptico, o que define o percurso dos veículos são as fitas presas ao solo, na navegação ativo indutiva o que demarcam os trajetos são fios elétricos instalados cerca de 2 centímetros abaixo do piso.

Os fios que definem as trajetórias são energizados e geram um campo eletromagnético por toda sua extensão, como exemplifica a Figura 2. Duas bobinas presentes na parte inferior do veículo são responsáveis pela detecção desse campo. Elas são instaladas de maneira que a diferença do sinal captado entre as duas represente um desvio da rota estabelecida. O sinal captado por essas bobinas é utilizado em um controle de malha fechada, assim a diferença de sinal serve como um erro em comparação com a referência e faz com que o sistema controle o AGV para que o mesmo siga o trajeto (ULLRICH, 2015).

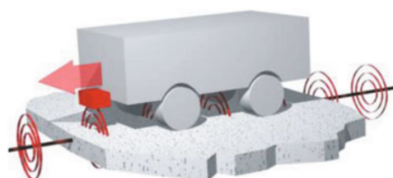


Figura 2: Exemplo da navegação ativo indutiva.

Fonte: (ULLRICH, 2015)

Por essa tecnologia utilizar o campo eletromagnético para se guiar, um ambiente com sujeira não irá impactar na precisão da navegação (ULLRICH, 2015). Esses veículos, portanto, se adaptam bem em ambientes externos e em ambientes com muita movimentação. Entretanto, esse tipo de AGV possui como limitação a impossibilidade de implementação

em locais onde o piso é metálico devido à interferência que seria causada no campo gerado pelo fio.

Quando se considera instalar um sistema de AGVs com a tecnologia de guiamento ativo indutivo, deve-se atentar ao fato que esse método é o menos flexível entre os tipos comercializados. Para a instalação dos fios utilizados nesse sistema, é necessário fazer um corte no piso a fim de posicioná-los sob o solo, o que pode tornar alterações no layout caras e de grande duração. Portanto, esse tipo de veículo é recomendado para aplicações em que os trajetos não são passíveis a modificações.

### 2.1.3 Guiamento a Fita Magnética

O método de guiamento por fita magnética pode ser considerado um híbrido das duas tecnologias de navegação descritas anteriormente, a navegação óptica e a ativo indutivo. Assim como o guiamento óptico, este modelo também utiliza fitas coladas no piso para demarcar a trajetória que os veículos devem percorrer. Contudo, ao invés de utilizar um sistema óptico de detecção de contrastes para navegar, essa tecnologia utiliza um sistema de captação do campo magnético, como no guiamento ativo indutivo (CHING-YAO CHAN et al., 2000).

Por conta de utilizar fitas para definir seu trajeto, o guiamento a fita magnética não possui uma das maiores desvantagens do guiamento ativo indutivo, a falta de flexibilidade. Nesse aspecto, essa tecnologia é similar ao guiamento óptico: é possível modificar a rota, porém, para isso, é necessário um retrabalho. O fato de utilizar fitas, entretanto, torna este sistema suscetível à degradação das mesmas. Apesar de não ser afetado por sujeira, devido ao fato do sistema utilizar um campo magnético para guiamento, a fita é passível a danos em ambientes abrasivos. A tecnologia de navegação a fita magnética, portanto, pode ser considerada um meio termo entre robustez e flexibilidade quando comparada aos métodos expostos previamente.

### 2.1.4 Guiamento a Laser

Diferente das tecnologias mencionadas nos seções anteriores, o guiamento a laser não possui uma rota fisicamente definida por fitas ou fios. Esse tipo de navegação é um dos representantes da chamada "Navegação Livre". Nessa categoria de AGVs, os veículos são denominados Veículos Auto-Guiados (SGVs - *Self Guided Vehicles*) (GROOVER, 2008).

Painéis refletores são dispostos em paredes e colunas em uma posição elevada. Cada painel possui uma referência espacial definida e ao fazer uma varredura do ambiente, o *scanner* a laser detecta os refletores a sua volta. De posse das informações dos seus arredores, um método de triangulação é aplicado para saber a localização e orientação do veículo e, com isso, corrigir quaisquer desvios da rota programada (ULLRICH, 2015). A Figura 3 ilustra o sistema em funcionamento. É importante destacar que, para realizar uma estimativa precisa da posição do veículo, o ideal é haver pelo menos três painéis refletores no campo de visão do sensor.

Esse método de navegação é muito flexível quando comparado com os descritos anteriormente. Por conta de não possuir um percurso demarcado, o veículo pode realizar qualquer rota estipulada desde que a mesma esteja dentro da área com painéis refletores. Para que a navegação seja feita, é necessário que o sensor rotativo possua um campo de visão de 360°, portanto o ambiente deve permitir que os painéis refletores sejam dispostos em locais nos quais não ocorrerá bloqueio do campo de visão por pessoas, equipamentos. Isso pode limitar a aplicação dessa tecnologia em ambientes saturados. Em casos de expansão da rota ou mudanças significativas, é necessário adicionar painéis refletores.

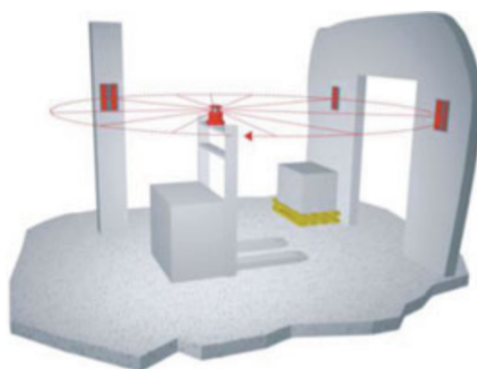


Figura 3: Exemplo de funcionamento do sistema de guiamento a laser.

Fonte: (ULLRICH, 2015)

### 2.1.5 Guiamento Natural

A navegação natural, assim como o guiamento a laser, é uma das tecnologias classificadas como “Navegação Livre”. Esse método utiliza duas fontes de informação, leitura do ambiente e inercial. A leitura do ambiente pode ser feita por lasers ou por câmeras e se distingue de outras tecnologias existentes por não necessitar de objetos auxiliares dispostos no trajeto para o veículo se localizar. Ao invés disso, esse método se guia pelo próprio ambiente, detectando pontos de referência a partir dos contornos identificados pelos sensores, como ilustra a Figura 4. Esse sistema necessita uma maior capacidade de processamento de dados em comparação às outras tecnologias descritas anteriormente.

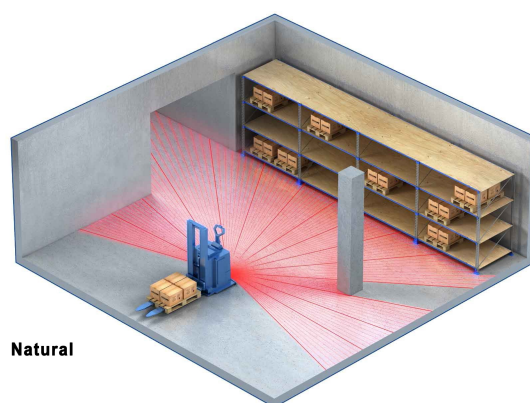


Figura 4: Exemplo de funcionamento do sistema de guiamento natural.

Fonte: <https://www.transbotics.com/learning-center/guidance-navigation>

Os dados inerciais são utilizados como apoio para o sistema de leitura do ambiente. Eles são coletados com base nos encoders instalados nas rodas do veículo e, a partir disso, uma localização estimada é calculada. O sistema de detecção dos contornos utiliza essa informação aproximada para relacionar os diferentes marcos salvos na sua memória com a leitura do ambiente que está sendo captada (DURRANT-WHYTE; RYE; NEBOT, 1996).

Utilizar somente um guiamento inercial não traz precisão à navegação. As rodas estão sujeitas a não idealidades, como derrapagens, e a leitura tende a ser prejudicada nessas ocasiões. No decorrer do trajeto, a estimativa de posição a partir dos encoders tende a ser



diferente da localização real do veículo.

O guiamento natural é o método mais flexível entre os apresentados, pois não necessita de nenhuma instalação, apenas a leitura do ambiente e ajuste na programação do veículos. Essa tecnologia, portanto, é recomendada para ambientes que têm probabilidade de alteração frequente das rotas. Além disso, por não depender de objetos de apoio para o guiamento, a precisão desse método não é impactada por sujeira ou ambientes abrasivos.

## 2.2 Análise do Sistema

Determinar o número teórico de veículos que são necessários para atender a demanda da planta é uma das etapas na análise de implementação da tecnologia de AGVs. Para tal, é preciso inicialmente coletar algumas informações da movimentação que se deseja fazer, como, por exemplo, local de partida e destino da rota, quantidade de cargas transportadas por hora, distância entre os pontos, entre outros. Assim, é possível aplicar esses dados nas equações matemáticas e calcular a quantidade de veículos estimada para realizar as operações analisadas.

### 2.2.1 Ferramentas Gráficas

A fim de facilitar a visualização das movimentações planejadas, é comum a utilização de ferramentas gráficas durante o estudo, tais como: o gráfico de-para e o diagrama de rede (GROOVER, 2008).

O gráfico de-para, Figura 5, indica as informações do manuseio de materiais para diferentes configurações de ponto de partida e ponto de destino. As estações de carga são listadas na coluna da esquerda e as de descarga, na linha superior. A tabela é alimentada pela informação que for relevante para a análise a ser feita, como, por exemplo, distância entre as duas estações ou tempo de deslocamento.

	<i>De</i>	1	2	3	4	5
Para	1	0	9/50	5/100	6/200	0
	2	0	0	0	0	9/50
	3	0	0	0	2/80	3/150
	4	0	0	0	0	8/90
	5	0	0	0	0	0

Figura 5: Exemplo de um gráfico de-para.

As informações da tabela de-para podem ser apresentadas através de um diagrama de rede (Figura 6), que relaciona as quantidades movidas, rotas e distâncias.

### 2.2.2 Cálculo do Número de Veículos

O número de veículos no sistema,  $n_c$ , deve ser o suficiente para atender a demanda da produção. Portanto, é preciso calcular a carga de trabalho existente,  $WL$  (minutos/hora), e relacioná-la com a disponibilidade de cada veículo,  $AT$  (minutos/hora/veículo), como na Equação 1, (GROOVER, 2008).

$$n_c = \frac{WL}{AT} \quad (1)$$

A carga de trabalho é definida como

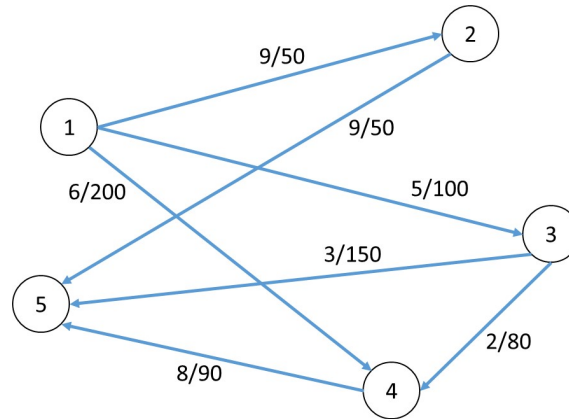


Figura 6: Exemplo de um diagrama de rede.

$$WL = R_f T_c \quad (2)$$

onde  $R_f$  (entregas/hora) é a quantidade de entregas que devem ser feitas por hora e  $T_c$  (minutos/entrega) é o tempo de ciclo das rotas definidas. A quantidade de entregas por hora provém da demanda da linha de produção e é especificada quando se faz o gráfico de-para.

O ciclo das rotas depende de fatores como o tempo de carga das peças,  $T_L$  (min), o tempo de descarga,  $T_U$  (min), a distância percorrida com carga,  $L_d$  (metros), a velocidade do veículo quando carregado,  $v_c$  (m/min), a distância percorrida sem carga,  $L_e$  (metros) e a velocidade do veículo descarregado,  $v_o$  (m/min). A Equação 3 define essa relação.

$$T_c = T_L + \frac{L_d}{v_c} + T_U + \frac{L_e}{v_o} \quad (3)$$

O tempo disponível por veículo,  $AT$ , definido na Equação 4, é onde as possíveis não idealidades da movimentação e do processo são consideradas. Fatores de congestionamento,  $F_t$ , como cruzamentos ou interferência de pedestres, são incluídos no cálculo dessa variável. Caso não haja interferência,  $F_t = 1,0$ . Da mesma maneira, o tempo de manutenção ou o tempo de carga da bateria de um veículo reduzem a disponibilidade do mesmo,  $A$ . Onde não ocorrem interferências do tipo,  $A$  tem valor 1.

$$AT = 60AF_t \quad (4)$$

### 3 ESTUDO DE CASO

Definir a viabilidade de aplicar uma nova tecnologia a uma indústria depende de questões técnicas e financeiras. No primeiro caso, deve-se considerar se a tecnologia atende às necessidades e se o ambiente comporta o uso da ferramenta. Por outro lado, é necessário avaliar se a nova solução gera um retorno financeiro em relação à situação atual. Se qualquer um desses fatores não for avaliado positivamente não há motivo para implementar a tecnologia avaliada.

A proposta deste trabalho é substituir os rebocadores de peças, de operação manual, por veículos automaticamente guiados visando principalmente redução no custo com manuseio de materiais. O estudo é baseado em um ambiente que possui uma linha de montagem automatizada similar à mostrada na Figura 7.



Figura 7: Modelo similar à planta estudada.

Fonte: <https://www.boschrexroth.com/en/xc/industries/factory-automation/automotive/production/body-shop/body-shop-3>

Na planta estudada, as peças devem ser inseridas na linha de produção através das estações de abastecimento localizadas ao longo do processo para que as mesmas sejam integradas ao produto fabricado. A cada ciclo de produção, que dura por volta de 48 segundos, um item é retirado de uma caixa de armazenamento e alimentado na célula por operadores. Quando as peças disponíveis na estação de armazenamento atingem uma quantidade mínima a reposição é solicitada, e deve ser feita antes que acabem as unidades à disposição do funcionário. Deve-se evitar que o operador fique sem peças disponíveis para abastecimento, pois isso causa o bloqueio da linha, que para de produzir por falta de material.

As estantes com peças são entregues pelos rebocadores, que as movimentam do estoque para cada estação. Cada grupo de peças é entregue em uma quantidade padrão (carga unitária) de unidades a serem consumidas, portanto o intervalo entre entregas de uma mesma peça deve considerar a demanda de produção e o tamanho da carga unitária das peças.

A planta produz diferentes modelos de produto e, portanto, algumas peças utilizadas na fabricação são exclusivas de alguma versão. Os modelos não são produzidos em quantidades equivalentes, ou seja, alguns são mais frequentes que outros. Isso resulta em uma demanda reduzida para alguns tipos de peças e uma demanda constante para outros. O manuseio de materiais possui essas informações mapeadas e planeja a distribuição das peças de acordo.

Os AGVs instalados, por fim, deverão executar a tarefa de buscar peças nos estoques e transportá-las até o respectivo ponto de uso. Essa atividade deve ser executada em um tempo hábil, a fim de não interromper a produção da linha automática. Além disso, as rotas devem ser planejadas considerando as diferentes demandas das peças distribuídas.

O processo realizado pela planta gera fuligem. Em razão disso, o ambiente é sujo e a limpeza é de difícil manutenção. Além disso, há um fluxo considerável de pessoas pelo chão de fábrica. Ambas essas características podem interferir no funcionamento adequado dos AGVs e devem ser considerados na análise.

## 4 DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO

Neste capítulo serão analisados os modelos de AGVs quanto à sua aplicabilidade no ambiente industrial estudado. Além disso, será feito um estudo do *layout* da planta e das rotas nas quais os veículos irão transitar para, posteriormente, estimar-se a quantidade de veículos necessários para atender a demanda da linha de montagem.

### 4.1 Seleção do Modelo de AGV

Deseja-se implementar os veículos guiados automaticamente em um ambiente específico, assim é necessário analisar a aplicabilidade de cada modelo comparando suas vantagens e desvantagens com a situação na qual eles serão implantados. No Capítulo 2, foram detalhadas as diferentes tecnologias de AGVs encontradas no mercado, na Tabela 1 são resumidos os prós e contras desses métodos de navegação.

Um dos pontos analisados é a questão da flexibilidade da tecnologia. Alguns sistemas demandam um esforço maior para realizar alguma modificação nas rotas, outros precisam apenas de alterações na programação das trajetórias. Contudo, se alterações no layout não são frequentes, a questão da flexibilidade não será tão relevante para a escolha da tecnologia a ser empregada como outros fatores de comparação. Portanto, quando está se analisando a melhor opção para o cenário estudado, deve-se considerar influências distintas dos critérios que estão sendo ponderados.

Com o intuito de selecionar o melhor modelo para o cenário estudado com base em critérios com relevâncias distintas, optou-se por utilizar um dos métodos de Análise Multicritério de Apoio à Decisão (MDCA - *Multi-Criteria Decision Analysis*). Esses mecanismos de tomada de decisão são aplicados com o objetivo de auxiliar no processo de escolha, orientando para a opção que se mostre mais condizente com os diferentes critérios avaliados (ROY, 2016).

Especificamente, dentro das ferramentas de MDCA existentes, utilizou-se o método MACBETH, *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*, em tradução livre Medição de Atratividade por Técnica de Avaliação baseada em Categorias. Esse método é aplicado com o apoio de um *software* dedicado, o M-Macbeth. A ideia é realizar classificações qualitativas das opções em diferentes categorias e, a partir dessas relações, determinar qual a melhor escolha (BANA E COSTA; DE CORTE; VANSNICK, 2016). Contudo, ao invés de ordenar todas as alternativas de uma única vez, o método compara duas opções a fim de determinar diferença entre elas.

No *software* é possível determinar as categorias que servirão como base de comparação, neste caso foram inseridas duas: Flexibilidade e Adaptação ao Ambiente. A partir disso, foram comparadas as opções levando em conta o cenário no qual elas seriam inseridas.


Tabela 1: Vantagens e desvantagens de cada tecnologia

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Guiamento Óptico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solução simples.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não se adapta bem em ambientes sujos.</li> <li>• Fita pode ser danificada.</li> <li>• Trabalhoso para expandir ou modificar.</li> </ul>
Guiamento Ativo Indutivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se adapta bem em ambientes sujos.</li> <li>• Tecnologia robusta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pouco flexível.</li> <li>• Instalação cara e demorada.</li> <li>• Tecnologia antiga.</li> <li>• Não é recomendada em pisos metálicos.</li> </ul>
Guiamento a Fita Magnética	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se adapta bem em ambientes sujos.</li> <li>• Solução simples.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fita pode ser danificada.</li> <li>• Trabalhoso para expandir ou modificar.</li> </ul>
Guiamento a Laser	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Navegação livre.</li> <li>• Flexível dentro da área previamente demarcada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Refletores precisam ser instalados.</li> <li>• Requer manutenção da limpeza dos refletores.</li> <li>• Risco de obstrução dos refletores.</li> </ul>
Guiamento Natural	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Navegação livre.</li> <li>• Não necessita de instalação.</li> <li>• Muito flexível.</li> <li>• Se adapta bem em ambientes sujos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demanda maior capacidade de processamento de informações.</li> </ul>

#### 4.1.1 Análise da Adaptação ao Ambiente

Como mencionado anteriormente, o ambiente da planta possui muita fuligem devido aos processos realizados na linha de montagem, acarretando em uma dificuldade de manter o piso limpo. Isso significa que um veículo com navegação óptica, por exemplo, não se adaptaria bem ao ambiente, pois iria demandar uma manutenção muito frequente da limpeza, o que não é desejado. Além disso, o local possui tráfego intenso de pessoas e veículos, situação que se traduz em desvantagens quando se analisa a implementação de tecnologias que dependem de fitas para a navegação, devido ao fato de que as chances das fitas sofrerem algum tipo de dano aumentam.

Fazendo essas considerações, chegou-se ao resultado mostrado na Figura 8. A matriz compara a diferença entre as opções apenas quanto à sua adaptação ao ambiente da planta. A partir disso, pontua as mesmas dentro desse critério, resultado que pode ser visto na Figura 9.

 Adaptação ao Ambiente


	Natural	Ativo Indutivo	Laser	Fita Magnética	Óptico
Natural	nula	mt. fraca	moderada	forte	extrema
Ativo Indutivo		nula	moderada	moderada	mt. forte
Laser			nula	fraca	mod-fort
Fita Magnética				nula	moderada
Óptico					nula

Figura 8: Matriz de comparação do critério Adaptação ao Ambiente.

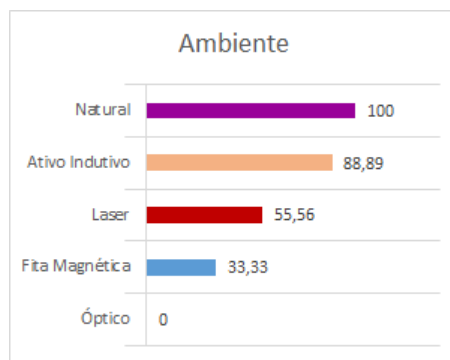


Figura 9: Pontuação do critério Adaptação ao Ambiente.

O método de guiamento natural se sobressaiu dos demais por não possuir restrições quanto ao local de aplicação. Em comparação, a navegação ativo indutiva teve uma pequena desvantagem por não operar satisfatoriamente em pisos metálicos, contudo, como isso não ocorre na realidade da planta estudada, isso não se torna um grande impedimento. Por fim, como explicado anteriormente, tecnologias que envolvem o uso de fitas e que têm o desempenho comprometido pela sujeira são alternativas menos atrativas para esse ambiente em comparação com as outras opções, assim obtiveram as menores pontuações.

#### 4.1.2 Análise da Flexibilidade

Para classificar as opções quanto a flexibilidade das rotas, utilizou-se um método distinto do anterior. Ao invés de julgar as alternativas diretamente, foram criados níveis de flexibilidade, expostos na Figura 10, e esses foram comparados qualitativamente em uma matriz semelhante a da seção anterior.

Níveis de performance:

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		A rota pode ser modificada sem qualquer alteração física.	Muito alta
2		A rota pode ser modificada com poucas alterações	Alta
3		A rota pode ser modificada com alterações de fácil execução	Suficiente
4		A rota pode ser modificada com grandes alterações/alterações complicadas	Baixa
5		A rota não pode ser modificada	Nula

Figura 10: Níveis de Flexibilidade

Considerou-se, no primeiro nível, uma condição na qual nenhuma alteração é necessária para modificar a rota do AGV, independente das mudanças que sejam feitas. No segundo nível, seriam necessárias pequenas alterações eventuais, apenas em casos que a rota sofresse grandes modificações. Ambos terceiro e quarto níveis necessitam de alterações significativas no sistema de guiamento, contudo no terceiro nível essas modificações seriam fáceis de serem executadas, já no quarto elas seriam mais complexas. Por último, o quinto nível não permite alterações.

As opções foram então catalogadas nestes níveis e pontuadas de acordo, como mostram as Figuras 11 e 12 respectivamente.

Tabela de performances

Opções	Flexibilidade
Óptico	Suficiente
Ativo Indutivo	Baixa
Fita Magnética	Suficiente
Laser	Alta
Natural	Muito alta

Figura 11: Categorização da Flexibilidade

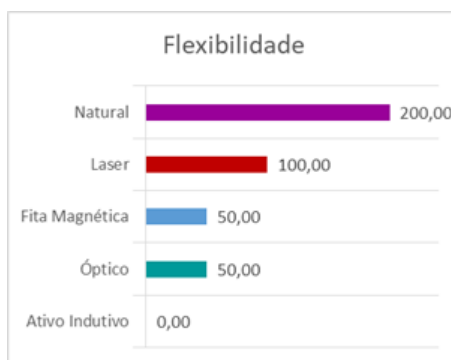


Figura 12: Pontuação do critério flexibilidade.



### 4.1.3 Resultado Final

Tendo as pontuações por categoria definidas, o próximo passo na seleção do modelo de AGV mais apropriado para a planta é definir os pesos de cada critério. Para tal, eles foram comparados qualitativamente quanto a relevância no sistema e, a partir disso, foram determinados os valores de ponderação, como mostra a Figura 13. Foi considerado que, como as rotas não serão modificadas com uma frequência considerável, a flexibilidade, apesar de ser uma vantagem, não é prioridade na escolha do modelo.

	[ Ambiente ]	[ Flexibilidade ]	Escala atual
[ Ambiente ]	nula	fort-mfort	83.33
[ Flexibilidade ]		nula	16.67

Figura 13: Comparação dos critérios.

Ordenando as opções com base nos critérios, já com seus valores ponderados, chegou-se ao resultado mostrado na Figura 14. Por se sobressair em ambos critérios, a navegação natural obteve o maior escore ponderado. Já o guiamento ativo indutivo, por ter uma pontuação elevada na categoria com maior peso, posicionou-se como a segunda melhor opção para os critérios analisados.

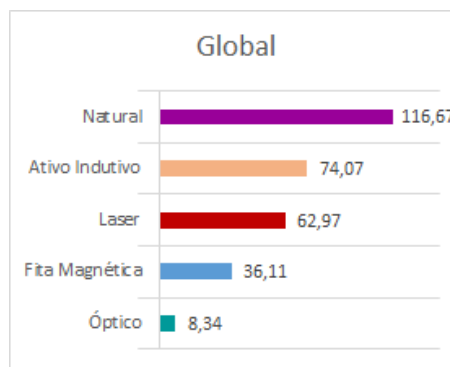


Figura 14: Pontuação ponderada.

Contudo, o aspecto financeiro não foi levado em conta na classificação mostrada. Para abordar esse parâmetro de escolha, o *software* M-Macbeth permite definir o custo de cada opção e, de posse dessas informações e da classificação ponderada, determinar as opções com o melhor custo-benefício.

No custo de cada modelo devem ser considerados o valor dos veículos e o valor para instalação do sistema. Na Tabela 2 são detalhadas estimativas dos custos de cada tecnologia. Os valores utilizados como referência para a análise foram captados da indústria. A fim de proteger dados da indústria estudada neste trabalho, todos os valores monetários foram ajustados por um fator de multiplicação menor que 1 e serão representados representados por "Unidade Monetária", UM\$.

Como ilustra a Tabela 2, o valor dos veículos de tecnologias seguidoras de linha é o mesmo. O guiamento a laser, em comparação, possui um custo por veículo mais elevado devido ao uso de uma tecnologia de navegação mais nova. Essa justificativa também se aplica para o guiamento natural que apresenta o custo por veículo mais elevado entre as tecnologias contrastadas.

Estimar o valor para instalação de cada tecnologia é uma tarefa mais complexa. Usualmente, quando esse orçamento é feito, as dimensões do *layout* já são conhecidas. Além disso, para mensurar o impacto dos valores de instalação em comparação ao investimento feito nos veículos, é necessário saber a quantidade de AGVs que se pretende utilizar no sistema. Com o objetivo de contornar essas indefinições do projeto, algumas considerações foram feitas.

Primeiramente, foram apurados valores de mercado como o custo dos painéis refletores, utilizados na navegação a laser, o custo por metro dos fios elétricos utilizados no guiamento ativo indutivo, e das fitas ópticas e magnéticas. Em seguida, foi estimado o valor da mão-de-obra necessária para realizar essas instalações. Para o guiamento ativo indutivo, também é necessária a instalação de um gerador, responsável por gerar o campo magnético nos fios. Considerou-se um gerador a cada 200 metros de trajeto, uma vez que cada gerador deve alimentar uma rota fechada. Para a navegação a laser, é sempre necessário três painéis refletores no campo de visão do veículo, assim foram considerados três painéis a cada 15 metros. Por fim, como fator de comparação, considerou-se o uso de um AGV a cada 200 metros.

Tabela 2: Estimativa de custo para cada modelo de AGV.

Modelo	Custo por veículo	Custo de instalação	Total
Guiamento Óptico	UM\$ 90 mil	UM\$ 3,5 mil	UM\$ 93,5 mil
Guiamento Ativo Indutivo	UM\$ 90 mil	UM\$ 9,3 mil	UM\$ 99,3 mil
Guiamento a Fita Magnética	UM\$ 90 mil	UM\$ 4,1 mil	UM\$ 94,1 mil
Guiamento a Laser	UM\$ 99 mil	UM\$ 1,5 mil	UM\$ 100,5 mil
Guiamento Natural	UM\$ 112,5 mil	-	UM\$ 112,5 mil

Com os valores de cada modelo definidos, esses dados foram inseridos no *software* M-Macbeth para análise de custo-benefício. O resultado pode ser visto na Figura 15.

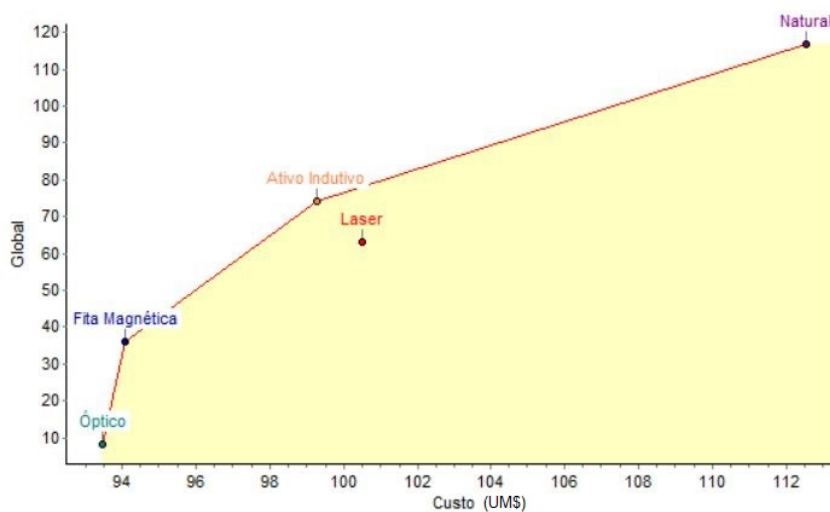


Figura 15: Análise de custo-benefício.

O eixo Y representa a pontuação definida anteriormente, Figura 14. O eixo X representa o custo de cada tecnologia de acordo com a Tabela 2. Os métodos de guiamento

conectados pela linha vermelha são as opções não descartadas na comparação entre benefícios e custo. A navegação a laser, por exemplo, não foi considerada uma opção vantajosa pois, além de possuir uma pontuação (benefício) menor do que o guiamento ativo indutivo, também possui um custo mais elevado.

Por fim, a escolha dependerá do que se considera essencial: um custo reduzido ou um bom desempenho nos critérios avaliados. Como um dos objetivos deste trabalho é avaliar o retorno financeiro do investimento, optou-se por continuar a análise considerando as tecnologias de guiamento natural e guiamento ativo indutivo, pois deseja-se averiguar o desempenho de um sistema que utiliza uma tecnologia robusta e com boa performance no ambiente da planta.

## 4.2 Análise das Rotas

Atualmente na planta estudada, os rebocadores são utilizados para transportar os materiais do estoque até postos de trabalho, onde operadores inserem peças na linha automática através de esteiras ou mesas giratórias. Deseja-se utilizar os veículos guiados automaticamente com a mesma finalidade. As rotas de movimentação, portanto, devem passar pelos pontos de uso para realizar o descarregamento e voltar para o estoque para buscar novas peças. Um mapa da planta com as vias e as estações de trabalho demarcadas é apresentado na Figura 16. A análise neste trabalho será feita utilizando uma rota como exemplo. Para expandir o estudo para o restante da planta, é necessário apenas seguir a mesma metodologia.

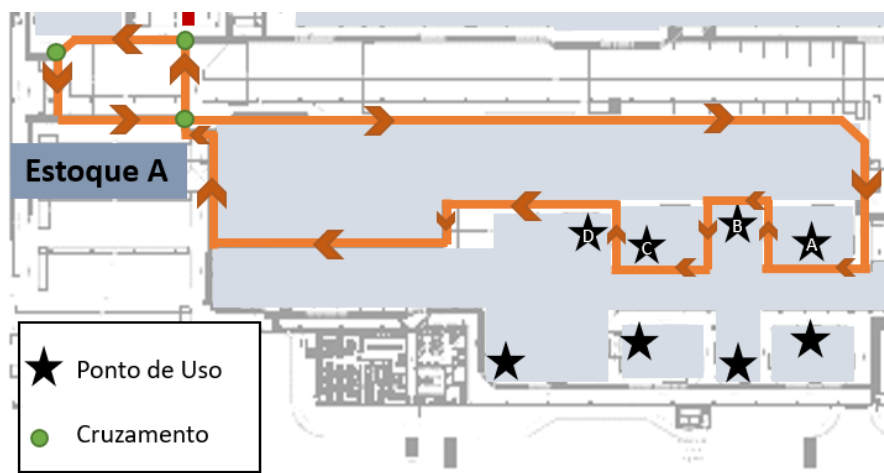


Figura 16: Mapa da planta analisada.

Veículos guiados automaticamente podem se movimentar em vias unidirecionais ou bi-direcionais (GASKINS; J. M. a. TANCHOCO, 1987). A planta estudada possui corredores que são estreitos, não sendo capazes de comportar rotas bi-direcionais. Portanto, o estudo considerará vias de sentido único na maior parte do sistema.

### 4.2.1 Cálculo do Tempo de Ciclo

Na Tabela 3 está detalhado o gráfico de-para da movimentação de materiais estudada. O gráfico é uma versão adaptada do padrão usual no qual todos os pontos são listados nos dois eixos. Como os locais de partida sempre serão os estoques e os destinos, os pontos de uso, optou-se por resumir a tabela. Portanto, as informações apresentadas já consideram

os trajetos de ida e de volta. Na tabela são apresentados dois elementos separados por uma barra: a distância entre os pontos em metros e a quantidade de curvas na rota. Ambas informações são relevantes para calcular o tempo de ciclo da trajetória.

Tabela 3: Gráfico de-para da planta. (Distância (m) / Quantidade de Curvas)

	<i>De</i>	<i>Estoque A</i>	<i>Estoque B</i>
Para	A	561,9 / 18	-
	B	561,9 / 18	-
	C	561,9 / 18	-
	D	561,9 / 18	-

Como detalhado no Capítulo 2, o tempo de ciclo é calculado considerando tempos de carga, descarga e deslocamento. Contudo, para um resultado mais condizente com a realidade, é importante considerar que o tempo para realizar uma curva é maior que o tempo para um deslocamento retilíneo. Afim de quantificar esse valor e os tempos de carga e descarga, utilizou-se como referência as definições do sistema MTM (*Method-Time Measurement*), (KARGER; BAYHA, 1987). Nesse sistema são definidos padrões de duração de tarefas realizadas na indústria. Na Tabela 4 são apresentados os valores padrão que serão considerados neste estudo.

Tabela 4: Definições de tempo do sistema MTM.

Ação	Duração (seg)	Duração (min)
Curva de 90°	3,31	0,06
Carregar de Peças	13,25	0,22
Descarregar de Peças	10,26	0,17

Para uma análise inicial do tempo de ciclo será considerado que os rebocadores executarão ciclos de comando simples, ou seja, cada rebocador entregará somente uma carga unitária por viagem. Assim, calcula-se o ciclo das rotas a partir da Equação 5. Esse cálculo é uma adaptação da Equação 3 levando em conta as ponderações feitas neste estudo, como o tempo para realizar uma curva,  $T_{curva}$ , e a quantidade de curvas no trajeto,  $c$ . Além disso, considera-se que a velocidade do veículo é a mesma para situações com ou sem carga, não sendo necessárias duas variáveis para definir essa grandeza como na Equação 3.

$$T_c = T_L + \frac{L}{v} + T_U + c T_{curva} \quad (5)$$

Seguindo a Norma VDI 2510, a fim de garantir a segurança do ambiente, a velocidade máxima de um AGV deve ser 1  $m/s$ . De posse dessas informações, é possível estimar o tempo de ciclo de cada rota. O resultado pode ser visto na Tabela 5.

#### 4.2.2 Demanda das peças e Carga de Trabalho

Devido ao fato da planta produzir mais de um modelo de produto, nem todas as peças distribuídas terão a mesma demanda. Na Tabela 6, são detalhadas quantas peças são necessárias por hora, quantas unidades são distribuídas por vez, ou seja, o tamanho da carga

Tabela 5: Gráfico de-para da planta. (Tempo de ciclo (min))

	<i>De</i>	<i>Estoque A</i>	<i>Estoque B</i>
Para	A	11,14	-
	B	11,14	-
	C	11,14	-
	D	11,14	-

unitária de cada peça e quantas entregas precisam ser feitas por hora,  $R_f$ . A quantidade de entregas por hora é obtida a partir da razão entre a demanda e o número de peças na carga unitária (Equação 6).

$$R_f = \frac{\text{Demanda}/h}{\text{Carga Unitária}} \quad (6)$$

Tabela 6: Demanda de cada peça.

Peça	Demanda por hora	Carga Unitária	Entregas por hora $R_f$
A	65,0	26	2,50
B	65,0	26	2,50
C	60,7	26	2,33
D	4,3	26	0,17

Com o tempo de ciclo por rota e a quantidade de entregas por hora definidos, é possível calcular a carga de trabalho,  $WL$ , de determinado trajeto a partir da Equação 2. A Tabela 7 apresenta esses resultados em minutos por hora.

Tabela 7: Carga de trabalho das rotas.

Peça	Carga de Trabalho $WL$ (min/h)
A	27,85
B	27,85
C	26,01
D	1,84

#### 4.2.3 Estimativa do número de veículos

O objetivo desta análise, por fim, é determinar a quantidade de veículos requeridos para atender a demanda de movimentação de peças. Obter esse valor, a partir da Equação 1, depende dos valores de carga de trabalho, calculados previamente, e dos valores de disponibilidade do sistema. Contudo, definir valores de disponibilidade, como a disponibilidade dos veículos,  $A$ , e o fator de tráfego,  $F_t$ , antes da instalação e teste do sistema não é algo trivial (EILERS; ROSSMANN, 2015). Por esta razão, decidiu-se utilizar valores padrão para essas variáveis.

Segundo Fitzgerald (1985, p. 79), o fator de tráfego de um sistema de AGVs bem projetado é entre 0,85 e 1,0. Para este trabalho, será utilizado o valor de 0,95. Considera-

se que, na implementação do sistema completo, todos os AGVs devem coletar as peças para distribuição no estoque, aumentando as chances de congestionamento.

Para os valores de disponibilidade,  $A$ , considera-se o impacto que o tempo de carga das baterias tem no sistema. Essa quantia depende de diversos fatores, como as regras de envio dos veículos para carga e o fabricante das baterias. Por essa razão, definiu-se o valor de disponibilidade em 0,85, com base nas simulações realizadas por McHaney (1995).

Com essas considerações feitas, estima-se a quantidade de veículos por rota,  $n_c$ . Os resultados são detalhados na Tabela 8.

Tabela 8: Número de veículos por rota.

Peça	Número de Veículos $n_c$
A	0,57
B	0,57
C	0,54
D	0,04

Somando os valores de  $n_c$  e arredondando o resultado para cima, estima-se que serão necessários 2 veículos para suprir a demanda detalhada anteriormente. Contudo, como mostram a Figura 16 e a Tabela 3, algumas peças possuem a mesma rota de movimentação. Esse fato pode ser utilizado para reduzir a quantia estimada.

A análise, até este momento, considerava que os AGVs transportariam apenas um carga unitária por vez. Bilge e J. M. Tanchoco (1997) mostram que a adoção de ciclos de comando múltiplo, com movimentações com múltiplas cargas, trazem diversos benefícios, incluindo a redução do número de veículos necessários para atender a produção. Assim, a fim de comparar essas abordagens, o estudo será refeito, dessa vez, considerando o transporte de diversas peças por rota.

A diferença da abordagem considerando movimentação de múltiplas cargas está no cálculo do tempo de ciclo da rota. Ao invés de considerar uma ocorrência de carga e uma de descarga em cada trajeto, como na abordagem de ciclos de comando simples (Equação 5), esta análise considera que haverá diversas cargas e descargas em um mesmo percurso. Por isso, a equação para estimar o tempo de ciclo é adaptada para a Equação 7.

$$T_c = \sum \frac{T_L R_f}{\max R_f} + \sum \frac{T_U R_f}{\max R_f} + c T_{curva} + \frac{L}{v} \quad (7)$$

Valores referentes ao deslocamento, como distância,  $L$ , e número de curvas,  $c$ , continuam sendo considerados apenas uma vez. Porém os tempos de carga,  $T_L$ , e descarga,  $T_U$ , serão um somatório ponderado dos valores para cada peça transportada considerando como fator de ajuste as respectivas demandas, detalhadas anteriormente na Tabela 6. Isso se justifica pelo fato de que nem todas as peças de uma rota possuem a mesma demanda, assim não necessitarão ser transportadas em todas as viagens e o ciclo da rota não será impactado pelo valor absoluto de carga e descarga dessas peças.

O agrupamento das rotas é feito de acordo com a Tabela 9. Na tabela também é detalhado o novo tempo de ciclo estimado para cada rota, já considerando a movimentação de múltiplas cargas.

Apenas analisando o tempo de ciclo estimado, já é possível perceber a otimização da movimentação. Na rota 1, por exemplo, o ciclo equivalente para transportar todas as peças individualmente seria 44,57 minutos. Na nova configuração estudada, esse tempo

Tabela 9: Novas rotas e tempos de ciclo.

Rota	Peças				Tempo de Ciclo (min)
	A	B	C	D	
1					12,71

é reduzido para 12,71 minutos. Isso equivale a uma diminuição de mais de 70% no ciclo da rota.

A próxima etapa da análise é estimar a carga de trabalho das rotas,  $WL$ , e, a partir disso, o número de veículos necessário para operar,  $n_c$ . As peças distribuídas através de uma mesma rota possuem demandas variadas, por conta disso, cada ciclo transportará uma quantidade diferente de cargas unitárias. A peça com a maior demanda será transportada em todos os ciclos e determinará o valor de  $R_f$  da rota. Essa quantia será considerada para estimar  $WL$ .

Os valores de disponibilidade dos veículos, aplicados no cálculo do número de veículos, são os mesmos considerados anteriormente. Assim, os resultados são detalhados na Tabela 10.

Tabela 10: Carga de trabalho e número de veículos das rotas.

Rota	Carga de Trabalho $WL$ (min/h)	Número de Veículos $n_c$
1	31,77	0,66

Como esperado, a quantidade de veículos necessária para atender a produção, utilizando a abordagem de cargas múltiplas, foi reduzida em comparação com a abordagem de cargas unitárias. Posteriormente, na análise de retorno de investimento, será estimado o ganho financeiro correspondente.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos capítulos anteriores, o estudo sobre a implementação dos AGVs na planta analisada foi estruturado. Determinou-se os modelos de navegação que melhor se aplicariam no cenário estudado. Além disso, a quantidade de veículos necessária para operar sem afetar a produção foi estimada. Contudo, o projeto não foi comparado com a situação atual da planta, o manuseio de materiais realizado com uma mão-de-obra dedicada.

### 5.1 Retorno sobre Investimento

Apesar de veículos guiados automaticamente serem um avanço tecnológico e trazerem benefícios para a empresa, como aumento na segurança, o investimento nessa tecnologia não será feito se não houver uma previsão de retorno financeiro. Os cálculos de retorno sobre investimento (ROI - *Return of Investment*) são utilizados para entender os ganhos que uma empresa terá ao investir em uma nova tecnologia ou implementar um novo projeto. A equação mais simples de ROI pode ser vista na Equação 8, (PHILLIPS; ZUNIGA, 2008). Ela compara os gastos para implementar o novo sistema com o lucro que essas modificações trarão. No caso do investimento estudado neste trabalho, o lucro se daria pela economia obtida a partir da redução da mão-de-obra dedicada e da economia com a reposição ou manutenção dos rebocadores usuais.

$$ROI = \frac{Lucro}{Custos} \times 100\% \quad (8)$$

A análise de ROI será feita comparando os dois modelos de tecnologia de navegação selecionados como candidatos a implementação: o guiamento ativo indutivo e a navegação natural. Os custos destas tecnologias já foram estimados anteriormente e encontram-se detalhados na Tabela 2. O custo da manutenção não foi considerado, pois estima-se que a maior influência para esse valor está manutenção do veículo propriamente dito. Como já se utiliza um veículo que requer manutenção, o custo se manteria aproximadamente o mesmo.

A quantidade de funcionários requerida para atender a demanda de movimentação de materiais está detalhada na Tabela 11. O custo anual de um funcionário é aproximadamente UM\$ 22, 5 mil, assim como o custo dos AGVs, esse valor também foi ajustado pelo fator de multiplicação menor que 1. Esta quantia já inclui todos os gastos que a empresa poderia ter com o funcionário como férias, 13º salário, seguro de saúde, etc.

Além do custo com funcionários, o valor gasto com a reposição de rebocadores deve também deve ser estimado para compor o cálculo do ROI. Veículos guiados automaticamente possuem uma vida útil prevista de no mínimo 10 anos, enquanto rebocadores e empilhadeiras devem ser substituídos a cada quatro anos aproximadamente (ULLRICH,



Tabela 11: Carga de Trabalho e Número de Veículos das Rotas.

Rota	Número de funcionários
1	3

2015). O valor de mercado de um veículo rebocador é próximo de UM\$ 13,5 mil. Considerando esse investimento a cada quatro anos, anualmente o gasto com cada rebocador elétrico é aproximadamente UM\$ 3,4 mil.

Aplicando esses valores na Equação 8, obtém-se as estimativas de retorno sobre o investimento detalhadas na Tabela 12. O valor percentual é em relação ao custo do investimento, isto significa que, para a navegação ativo indutiva, após 10 anos de implementação do projeto, a empresa teria um lucro de aproximadamente UM\$ 677 mil. Já, implementando a navegação natural, esse valor seria de UM\$ 634 mil.

Tabela 12: Retorno sobre o investimento ao longo dos anos.

Ano	Navegação Ativo Indutiva	Navegação Natural
1	-22%	-31%
2	56%	38%
3	135%	107%
4	213%	176%
5	291%	245%
6	369%	314%
7	447%	383%
8	526%	452%
9	604%	521%
10	682%	590%

A tecnologia de navegação ativo indutiva teria o investimento recuperado após um ano e três meses. Em comparação, o guiamento natural demoraria um ano e cinco meses, dois meses a mais. Contudo, é interessante perceber que a tecnologia de navegação natural possui um benefício maior para a planta que a navegação ativo indutiva, Figura 15, principalmente em relação a flexibilidade das rotas. A probabilidade de ocorrer alguma alteração nas rotas de manuseio de materiais ao longo de 10 anos de operação é alta. Com o intuito de analisar qual seria o impacto de tal mudança, o valor de ROI foi estimado novamente. Nesta análise foi considerando um novo investimento em instalação, valores de acordo com a Tabela 2, contudo sem a compra de um novo gerador para a navegação ativo indutiva, reduzindo o valor da sua instalação para UM\$ 2,5 mil. Os resultados podem ser vistos na Tabela 13.

Como esperado, o lucro, ao final de 10 anos, para a navegação ativo indutiva foi reduzido para UM\$ 674,5 mil. Percebe-se que, quanto mais alterações nas trajetórias de navegação ao longo dos anos, menor a vantagem financeira do guiamento ativo indutivo em comparação à navegação natural. Com essa tendência, se houverem mais de cinco alterações de *layout*, o guiamento natural se torna o investimento mais rentável.

Outra comparação feita ao longo do estudo foi sobre a movimentação das peças carregando cargas unitárias ou múltiplas. No capítulo anterior, foi estimado que, com o uso da distribuição de múltiplas cargas por percurso, seria possível reduzir um AGV da quantia

necessária para operar sem impactos à produção. Na Tabela 14, a diferença do ROI para esses dois cenários está detalhada, simulando o uso de um AGV de navegação ativo indutiva. É possível perceber que, percentualmente, a comparação entre as situações é muito distinta. A movimentação de cargas unitárias leva aproximadamente o dobro de tempo para conferir o mesmo retorno percentual que a movimentação de cargas múltiplas.

Tabela 13: ROI ao longo dos anos considerando modificação das rotas.

Ano	Navegação Ativo Indutiva	Navegação Natural
1	-24%	-31%
2	53%	38%
3	129%	107%
4	205%	176%
5	281%	245%
6	358%	314%
7	434%	383%
8	510%	452%
9	586%	521%
10	663%	590%

Tabela 14: Comparação do ROI para cargas múltiplas e cargas unitárias.

Ano	Cargas Múltiplas	Carga unitária
1	-22%	-59%
2	56%	-18%
3	135%	23%
4	213%	64%
5	291%	105%
6	369%	146%
7	447%	187%
8	526%	228%
9	604%	269%
10	682%	310%

O maior objetivo, quando se implementa um projeto em uma empresa, é produzir mais gastando menos. Deseja-se aplicar a melhor solução possível, porém isso deve ser feito no menor custo disponível e com o maior retorno financeiro. Contudo, a solução mais adequada não é necessariamente a mesma para todos os cenários e, por este motivo, grande parte das escolhas feitas ao longo do planejamento não terão opções certas ou erradas. As alternativas terão vantagens e desvantagens em diferentes aspectos e cabe à equipe responsável decidir o que deve ser priorizado.

A análise realizada neste trabalho poderá ser aprimorada, visando aplicações futuras, através da utilização de dados referentes à disponibilidade e ao fator de tráfego de outras plantas da mesma empresa que utilizam AGVs.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

No decorrer deste trabalho foram analisadas as diferentes decisões que devem ser tomadas a fim de implementar um sistema de veículos guiados automaticamente em substituição a um sistema operado manualmente. Além das diferentes tecnologias existentes no mercado, que devem se adequar às expectativas do projeto, também é preciso entender as formas de movimentações dos materiais e as rotas que serão utilizadas.

Após comparar as diferentes alternativas de tecnologia de navegação, os métodos selecionados foram o guiamento ativo indutivo e o guiamento natural. Analisando o retorno financeiro das duas opções, a navegação ativo indutiva se mostrou uma alternativa mais econômica. Entretanto, esse resultado é baseado em um cenário onde há menos de cinco modificações nos percursos dos AGVs ao longo de 10 anos, algo que é pouco provável. Foi estimado que, se realizadas mais de cinco alterações no *layout*, a navegação natural seria a melhor escolha.

### 6.1 Trabalhos Futuros

Este trabalho foi um estudo baseado em um trecho da rede de rotas de movimentação de materiais existente na planta analisada. Trabalhos futuros têm a opção de aplicar o método utilizado neste trabalho nas rotas remanescentes. Essa análise pode mostrar outras melhorias em movimentações que não são percebidas utilizando apenas um trecho como referência.

Além disso, existe a possibilidade de se realizar uma avaliação sobre os percursos utilizados, a fim de compreender se eles são a opção mais eficiente para o *layout* analisado. Otimizar as rotas pode trazer uma redução ainda maior na quantidade de veículos necessária para operar sem impacto à produção.

Realizar uma simulação da dinâmica de todas as rotas em operação simultânea também é uma alternativa de continuação deste estudo. Desta forma seria possível estimar com mais precisão o impacto do tráfego na disponibilidade dos veículos, assim como ratificar considerações feitas nesta análise.

## BIBLIOGRAFIA

BANA E COSTA, C. A.; DE CORTE, J. M.; VANSNICK, J. C. On the mathematical foundations of MACBETH. **International Series in Operations Research and Management Science**, 2016.

BICHENO, J.; HOLWEG, M. **The Lean toolbox : the essential guide to Lean transformation**. 4th. [S.l.]: PICSIE Books, 2009. p. 290. ISBN 0954124456.

BILGE, Ü.; TANCHOCO, J. M. AGV Systems with Multi-Load Carriers: Basic Issues and Potential Benefits. **Journal of Manufacturing Systems**, 1997.

BOEHNING, M. Improving safety and efficiency of AGVs at warehouse black spots. In: 2014 IEEE 10th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP). [S.l.]: IEEE, set. 2014. p. 245–249.

CHING-YAO CHAN et al. Characterization of magnetic tape and magnetic markers as a position sensing system for vehicle guidance and control. In: PROCEEDINGS of the 2000 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No.00CH36334). [S.l.]: IEEE, 2000. p. 95–99.

DURRANT-WHYTE, H.; RYE, D.; NEBOT, E. Localization of Autonomous Guided Vehicles. In: ROBOTICS Research. London: Springer London, 1996. p. 613–625.

EILERS, K.; ROSSMANN, J. Modeling an AGV based facility logistics system to measure and visualize performance availability in a VR environment. In: PROCEEDINGS - Winter Simulation Conference. [S.l.: s.n.], 2015.

FITZGERALD, K. R. How to estimate the number of AGVs you need. **Modern Materials Handling**, v. 10, p. 79, 1985.

GASKINS, R. J.; TANCHOCO, J. M. a. Flow path design for automated guided vehicle systems. **Int. J. Prod. Res.**, 1987.

GROOVER, M. P. **Automation, Production Systems, and Computer-integrated Manufacturing**. 3rd. [S.l.]: Prentice Hall, 2008. ISBN 9780132393218.

KARGER, D. W.; BAYHA, F. H. **Engineered Work Measurement: The Principles, Techniques, and Data of Methods-time Measurement Background and Foundations of Work Measurement and Methods-time Measurement, Plus Other Related Material**. [S.l.]: Industrial Press, 1987. (Probability and Statistics). ISBN 9780831111700.

MCHANNEY, R. Modelling battery constraints in discrete event automated guided vehicle simulations. **International Journal of Production Research**, 1995.

PHILLIPS, J. J.; ZUNIGA, L. **Costs and ROI: Evaluating at the Ultimate Level**. [S.l.]: Wiley, 2008. (Essential knowledge resource). ISBN 9780787987213.

ROY, B. Paradigms and challenges. **International Series in Operations Research and Management Science**, 2016.

ULLRICH, G. **Automated Guided Vehicle Systems - A Primer with Practical Applications**. [S.l.]: Springer, 2015. v. 5, p. 227. ISBN 9783662448137.