

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**Vitor Costa Antonelli Correia**

**Um Estudo sobre o Impacto da Robótica Colaborativa  
na Produtividade em Tarefas Manuais**

**São Carlos**

**2018**



**Vitor Costa Antonelli Correia**

**Um Estudo sobre o Impacto da Robótica Colaborativa  
na Produtividade em Tarefas Manuais**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Glauco Augusto de Paula Caurin

**São Carlos  
2018**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C824u	Correia, Vitor Costa Antonelli Um estudo sobre o impacto da robótica colaborativa na produtividade em tarefas manuais / Vitor Costa Antonelli Correia; orientador Glauco Augusto de Paula Caurin. São Carlos, 2018.  Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.  1. Robótica Colaborativa. 2. Produtividade. 3. Eficiência. 4. Guiagem de Mão. I. Título.
-------	---

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Vitor Costa Antonelli Correia

Título: “Um estudo sobre o impacto da robótica colaborativa na produtividade em tarefas manuais”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 25/06/2018,

com NOTA 7,0 (Sete, zero), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Titular Glauco Augusto de Paula Caurin - Orientador - SAA/EESC/USP*

*Prof. Associado Evandro Luis Linhari Rodrigues - SEL/EESC/USP*

*Mestre Gustavo José Giardini Lahr - Doutorando - SEM/EESC/USP*

**Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino**



## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe, Marili, por todo amor dedicado à minha criação, por todos os ensinamentos e conselhos dados.

À minha tia Maria Glória e à minha avó Maria Aparecida por todo o amor dedicado à minha criação e por todos os ensinamentos e conselhos.

Aos meus amigos do curso de Engenharia Elétrica - Ênfase em Sistemas de Energia e Automação que em 2012 começaram como colegas e hoje fazem parte das memórias de um dos melhores períodos da minha vida.

Aos meus amigos de infância Matheus, Danilo, Diego, Lucas Paiva, Lucas Cucco, Manuélino e Guilherme Ribeiro que sabendo ou não contribuíram, e muito, para que eu conseguisse chegar até este momento.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Glauco, pela oportunidade de elaboração deste trabalho, por todas as contribuições e ensinamentos.

Ao meu colega de laboratório Gustavo Lahr pela contribuição sem a qual este trabalho não passaria de rabiscos em uma folha de papel.

Ao meu colega e amigo João Victor Rocha por ter me apresentado o laboratório no qual desenvolvi o estudo apresentado neste documento e por ter me ajudado de forma inestimável na elaboração deste estudo.

Agradeço também à todos que contribuíram de alguma forma para que este momento se realizasse.



## RESUMO

CORREIA, V. C. A. **Um Estudo sobre o Impacto da Robótica Colaborativa na Produtividade em Tarefas Manuais**. 2018. 67p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Com a crescente evolução tecnológica o mercado de robôs tem ganhado grande importância na economia global, em geral tais robôs são utilizados em ambientes industriais. Mesmo com a crescente utilização de mão-de-obra robótica, algumas tarefas ainda são desempenhadas por seres humanos devido as suas características porém, a utilização de robôs manipuladores que podem realizar tarefas com a presença de humanos no entorno ou ajudá-los diretamente nas tarefas vêm ganhando espaço. Por ser uma tecnologia nova e com poucos estudos na área, os impactos da utilização de tais robôs ainda não são muito claros, desta forma vê-se a necessidade de estudos sobre os impactos de sua utilização na produtividade das linhas de produção. Este trabalho se propõe a elaborar algumas tarefas a serem realizadas em primeiro momento por uma pessoa sozinha e em sequência pela mesma pessoa, porém com a ajuda de um braço robótico para auxiliar na tarefa. Tais tarefas foram elaboradas de forma que braço robótico é ensinado quais posições e movimentos deve realizar através do aprendizado por guiagem de mão e deve esperar um sinal do usuário para realizar cada ação, além disso as tarefas foram elaboradas para abranger diferentes habilidades como força, precisão, rapidez, entre outras. Com base nos tempos observados para a realização das tarefas foi feita uma análise sobre a alteração na capacidade de produção da linha e na eficiência com a substituição da mão-de-obra humana pela colaborativa. Em tal análise foi verificado que a variação na capacidade de produção apresenta variações muito divergentes, por exemplo em uma das tarefas apresentou 70% de ganho na produtividade enquanto que em outra das tarefas foi verificado uma diminuição de 36%. Esta divergência pode ser oriunda de diversos fatores que estão intrínsecos a tarefa desempenhada por cada operário, quando realizada com robôs colaborativos, e é melhor explicada no decorrer deste documento.

**Palavras-chave:** Robótica Colaborativa. Produtividade. Eficiência. Guiagem de Mão.



## ABSTRACT

CORREIA, V. C. A. **A Study on the Impact of Collaborative Robotics on Productivity on Manual Tasks.** 2018. 67p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

With the increasing technological evolution the market of robots has gained great importance in the global economy, in general such robots are used in industrial environments. Even with the increasing use of robotic workforce some tasks are still performed by humans due to their features, however the use of robot manipulators that can perform tasks with the presence of humans in the environment or help them directly in the tasks comes gaining space. As a new technology and with few studies in the area the impacts of the use of such robots are still not very clear, this way it is necessary to study the impacts of its use on the productivity of the production lines. This study proposes to elaborate some tasks to be carried out in the first moment by a person alone and in sequence by the same person, but with the help of a robotic arm to assist in the task. Such tasks have been designed so that robotic arm is taught which positions and movements to perform through hand-guiding and should expect a signal from the user to perform each action, moreover the tasks were designed to encompass different skills such as strength, precision, speed, among others. Based on the times observed for the accomplishment of the tasks, an analysis was made on the change in line production capacity and on the efficiency with the substitution of human labor by the collaborative. In this analysis it was verified that the variation in the production capacity presents very divergent variations, for example in one of the tasks it presented a gain of 70% in productivity while in another of the tasks a variation of -36% was observed. This divergence may be due to several factors that are intrinsic to the task performed by each worker, when performed with cooperative robots, and is better explained in the course of this document.

**Keywords:** Collaborative Robotics. Productivity. Efficiency. Hand Guiding



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Unidades robóticas em uso no mundo . . . . .	17
Figura 2 – Histórico de crescimento nas pesquisas envolvendo interação Homem-Máquina . .	18
Figura 3 – Número de unidades robóticas vendidas por ano no mundo . . . . .	22
Figura 4 – Número de unidades robóticas vendidas por ano em alguns países . . . . .	22
Figura 5 – Exemplo de linha de montagem com robôs e seres humanos lado a lado . . . . .	24
Figura 6 – Diferença no ambiente de operação dos dois tipos de robôs . . . . .	24
Figura 7 – Diferentes modos de operação de um robô . . . . .	25
Figura 8 – Aspectos dos robôs colaborativos . . . . .	26
Figura 9 – Quantidade de estudos por tópico . . . . .	27
Figura 10 – Interação entre Operação Normal e Exceções . . . . .	29
Figura 11 – Diferença de Tempo quando há uma Exceção . . . . .	29
Figura 12 – Modelo de Robô Manipulador Utilizado . . . . .	33
Figura 13 – Esquema da montagem do experimento I . . . . .	34
Figura 14 – Placa de Madeira utilizada no Experimento . . . . .	35
Figura 15 – Garra Utilizada no Experimento . . . . .	35
Figura 16 – Esquema da montagem do experimento II . . . . .	36
Figura 17 – Bloco de Madeira Utilizado . . . . .	37
Figura 18 – Sketch da montagem do experimento III . . . . .	37
Figura 19 – Apoios Verticais Utilizados . . . . .	65
Figura 20 – Parafusos Allen para fixação dos apoios . . . . .	65
Figura 21 – Parafusos utilizados no Experimento I . . . . .	65
Figura 22 – Chave 13mm utilizada no Experimento I . . . . .	66
Figura 23 – Pregos utilizados no Experimento II . . . . .	66
Figura 24 – Martelo utilizado no Experimento II . . . . .	67



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempo medidos para cada iteração do Experimento I – Operário Humano . . .	39
Tabela 2 – Tempo medidos para cada iteração do Experimento I – Operário Misto . . .	40
Tabela 3 – Comparação entre os tempos médios e mínimos para os dois tipos de operadores	40
Tabela 4 – Comparação entre as capacidades real e ideal para os dois tipos de operadores	41
Tabela 5 – Tempo medidos para cada iteração do Experimento II – Operário Humano . . .	41
Tabela 6 – Tempo medidos para cada iteração do Experimento II – Operário Misto . . .	42
Tabela 7 – Comparação entre os tempos médios e mínimos para os dois tipos de operadores	42
Tabela 8 – Comparação entre as capacidades real e ideal para os dois tipos de operadores	43
Tabela 9 – Tempo medidos para cada iteração do Experimento III – Operário Humano . . .	43
Tabela 10 – Tempo medidos para cada iteração do Experimento III – Operário Misto . . .	44
Tabela 11 – Comparação entre os tempos médios e mínimos para os dois tipos de operadores	44
Tabela 12 – Comparação entre as capacidades real e ideal para os dois tipos de operadores	45



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>18</b>
1.2.1	Objetivo Geral	18
1.2.2	Objetivos Específicos	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Introdução à Robótica Colaborativa</b>	<b>21</b>
2.1.1	Panorama do Mercado de Robôs Manipuladores	21
2.1.2	Conceitos da Robótica Colaborativa	23
<b>2.2</b>	<b>Divisão de tarefas na Robótica Colaborativa</b>	<b>26</b>
<b>2.3</b>	<b>Análise de Produtividade em Linhas de Produção</b>	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>DETALHAMENTO DOS EXPERIMENTOS PROPOSTOS</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Experimento I - Parafuso</b>	<b>34</b>
<b>3.2</b>	<b>Experimento II - Prego</b>	<b>36</b>
<b>3.3</b>	<b>Experimento III - Caixa de Papelão</b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Experimento I</b>	<b>39</b>
<b>4.2</b>	<b>Experimento II</b>	<b>41</b>
<b>4.3</b>	<b>Experimento III</b>	<b>43</b>
<b>4.4</b>	<b>Considerações e Trabalhos Futuros</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>49</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>51</b>
	<b>APÊNDICE A – CÓDIGO - EXPERIMENTO I</b>	<b>53</b>
	<b>APÊNDICE B – CÓDIGO - EXPERIMENTO II</b>	<b>57</b>
	<b>APÊNDICE C – CÓDIGO - EXPERIMENTO III</b>	<b>61</b>

**APÊNDICE D – FOTOS DOS EQUIPAMENTOS E COMPONENTES**

.....

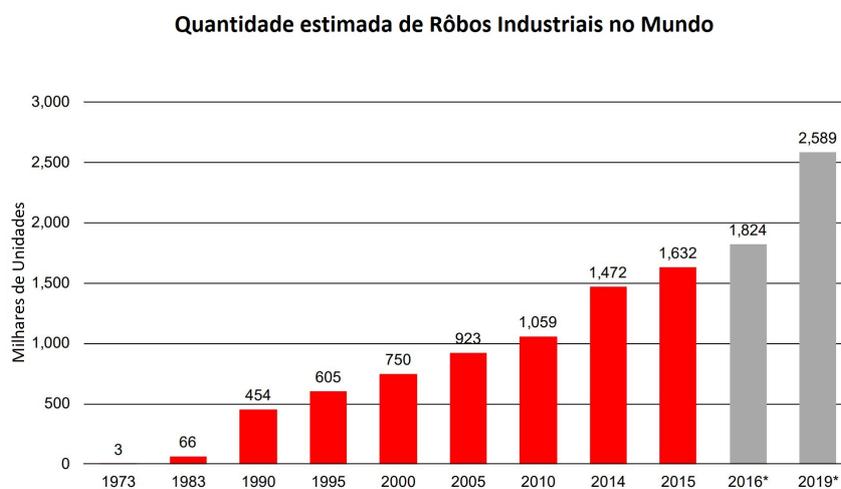
# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

Desde a grande revolução industrial no começo deste século, o homem vem estudando formas de aumentar a produtividade das linhas de produção pela inserção de máquinas que facilitem e agilizem os processos de manufatura. Dado o grande crescimento na demanda por produtos, as indústrias passam por um período de grandes investimentos em formas de agilizar as linhas de produção e esses investimentos são feitos na forma de implementação de robôs manipuladores nos processos de produção. A utilização de robôs gera um ganho de produtividade nas indústrias visto sua alta capacidade de realização de tarefas repetitivas com grande precisão e velocidade. Dessa forma, o mercado de robôs passa por um crescimento constante desde o início do século e segundo estudos da Federação Internacional de Robótica (IFR) tal crescimento ainda deve se manter por mais algum tempo. O ambiente fabril atual busca colocar robôs e pessoas lado a lado para realização de diversas tarefas, porém poucas são as realizadas por ambos em conjunto, seja por motivos de segurança, seja por ainda existirem dificuldades em definir a divisão de tarefas de forma a tornar o processo mais eficiente (DING et al., 2013).

A Figura 1 ilustra a quantidade em milhares de unidades robóticas em uso atualmente no mundo todo com o passar dos anos. Pode-se perceber o salto de quase 9 vezes entre 1983 e 1990 quando ocorreu a entrada de robôs em linhas de produção, pode-se perceber também que as projeções indicam um crescimento de aproximadamente 40% entre os anos de 2016 e 2019 visto a crescente demanda do mercado por robôs para serem utilizados em linhas de produção.

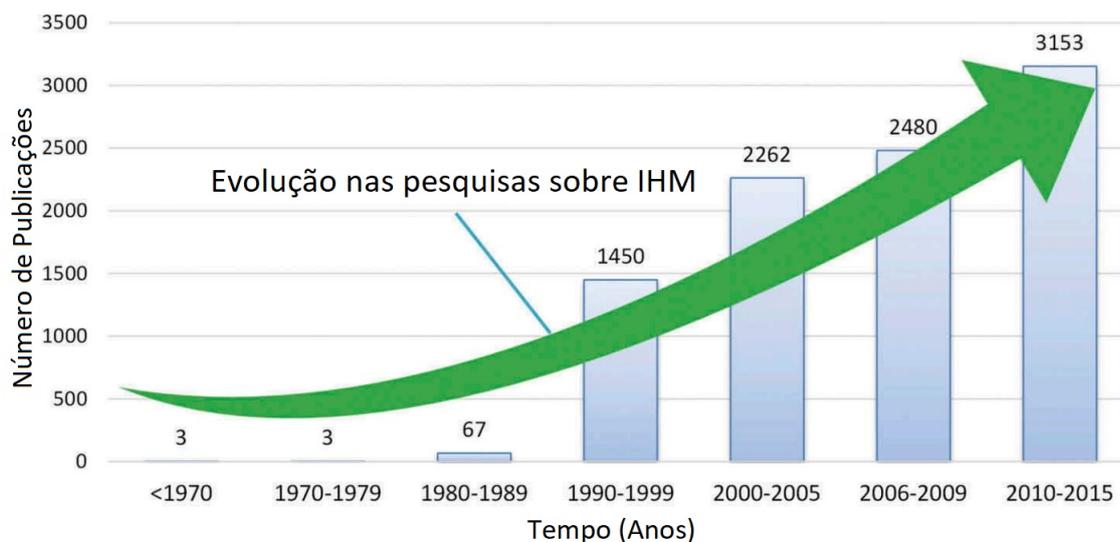
Figura 1: Unidades robóticas em uso no mundo



Fonte: IFR (2016)

Ainda na Figura 1 também é possível perceber o crescimento ao longo dos últimos anos da quantidade de robôs empregados nas linhas de produção. Segundo a IFR a tendência do mercado mundial para os próximos anos é aumentar a utilização de robótica colaborativa devido a suas vantagens e facilidades de implementação, desta forma existe um crescente foco no desenvolvimento de estudos sobre robótica colaborativa no que tange a produtividade e as melhores formas de implementação como divisão de tarefas e segurança.

Figura 2: Histórico de crescimento nas pesquisas envolvendo interação Homem-Máquina



Fonte: Tsarouchi et al. (2016)

A Figura 2 mostra o crescimento de pesquisas com relação a interação homem – máquina com o passar dos anos, como pode-se observar desde a introdução da robótica industrial a quantidade de pesquisas na área apresenta uma taxa de crescimento positiva e a tendência é que continue a crescer nos próximos anos devido a novas tecnologias e a introdução da robótica colaborativa nas indústrias.

Neste documento é proposto um estudo sobre o impacto na produtividade quando tarefas são realizadas de forma colaborativa. Para a realização deste estudo, serão propostas algumas atividades que possam ser desenvolvidas por uma pessoa e um robô em conjunto, será analisado o tempo de realização de cada tarefa de duas formas, somente a pessoa realizando a tarefa e depois sendo realizada em conjunto com a máquina.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo é a estipulação de tarefas a serem realizadas com robótica colaborativa e por uma pessoa sozinha e determinar informações sobre a produtividade da utilização de robôs colaborativos em tarefas ligadas ao ambiente industrial.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

São descritos, em forma de tópicos, os objetivos específicos deste estudo:

- Determinar atividades e rotinas a serem postas em uso para a medição do tempo de realização das tarefas;
- Desenvolvimento do código a ser implementado no robô manipulador para realizar as tarefas propostas anteriormente;
- Executar tarefas tanto pela pessoa sozinha quanto de forma colaborativa com o robô e o tempo de duração será medido para análise futura;
- Análise dos dados coletados durante as tarefas, de forma a criar uma compreensão do impacto na produtividade com o uso de robótica colaborativa;



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Introdução à Robótica Colaborativa

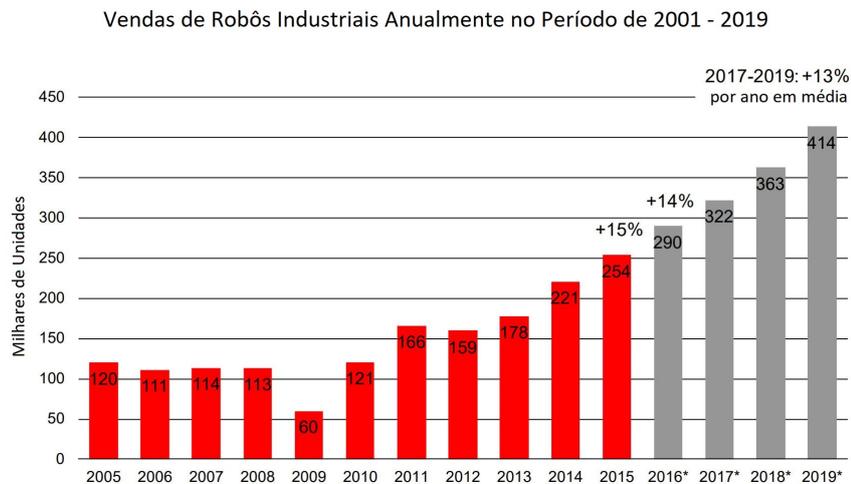
#### 2.1.1 Panorama do Mercado de Robôs Manipuladores

Durante muito tempo as células clássicas de trabalho, que são basicamente operários humanos treinados para realizar cada tarefa, representavam a totalidade da força de trabalho nas linhas de produção. Com o advento unidades robóticas capazes de realizar tarefas com eficiência igual ou superior a operários humanos, as células robóticas começaram a se tornar uma parcela da força de trabalho nas indústrias, tal comportamento pode ser observado na figura 1 dado o grande crescimento na quantidade de robôs entre 1983 e 1990. Devido à recente globalização de muitos produtos e das diferentes necessidades dos clientes, a demanda por produtos variados fez com que as indústrias tivessem que adaptar suas linhas de montagem de forma a criar uma gama de customização que atendesse o público, mas que ainda fosse eficiente e rentável.

Empresas fabricantes de maquinário industrial, principalmente as envolvidas com robôs industriais, como a Universal Robotics ou a ABB Robotics, tiveram que vencer desafios e descobrir formas de criar máquinas que permitissem a manufatura de produtos similares sem que muitas modificações fossem necessárias. É neste ponto que a robótica industrial ganhou força, devido ao modo compartimentalizado das linhas de manufatura a utilização de robôs manipuladores se tornou atrativa visto a versatilidade e a customização deste tipo de ferramenta que permite justamente que linhas de produções sejam versáteis e eficientes.

A introdução de robôs em indústrias alavancou o mercado robótico nos últimos anos e a tendência é que o crescimento perdure por muito tempo ainda, segundo dados da IFR (2016) estima-se que até o ano de 2019 aproximadamente 1.4 milhões de novos robôs serão instalados nas mais diversas indústrias pelo mundo. A figura 3 ilustra a crescente demanda por robôs no mundo com o passar dos anos, pode-se perceber que as previsões para os próximos anos indicam um crescimento de aproximadamente 13% na demanda por ano. Tais dados apontam para o fato de que a robótica industrial tem se tornado um dos pilares para o crescimento das empresas e como consequência se tornou também um dos principais pontos de estudos visto a vastidão da área e a crescente evolução das tecnologias empregadas.

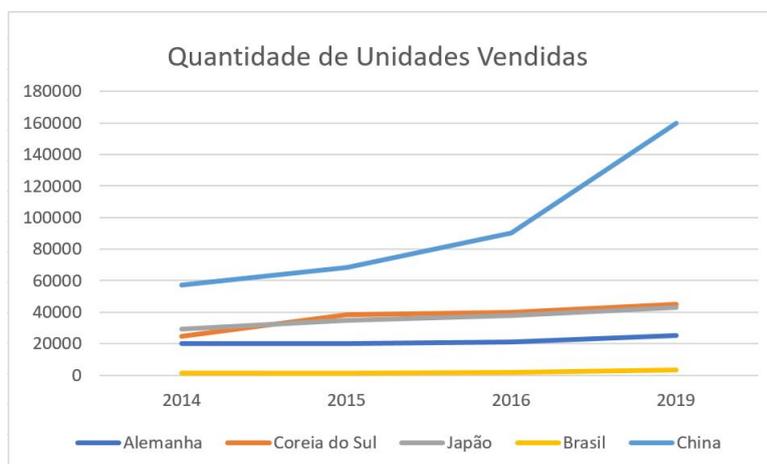
Figura 3: Número de unidades robóticas vendidas por ano no mundo



Fonte: IFR (2016)

Segundo dados da IFR (2016) a média mundial de robôs a cada 10 mil operários é de aproximadamente 69 robôs, porém esta média não é bem distribuída, por exemplo, a Coreia do Sul possui uma densidade de robôs superior a 300 a cada 10 mil operários enquanto que países como o Brasil possuem densidade de apenas 9 robôs para a mesma quantidade de operários. Apesar da baixa densidade o mercado brasileiro tem uma taxa de crescimento constante como mostra a figura 4, a previsão é que até 2019 o mercado atinja uma demanda de 3500 unidades por ano. Logicamente se comparado a outros países, como Coreia do Sul, Japão e Alemanha tal crescimento ainda é pequeno, porém mostra a força da robótica industrial tanto em mercados desenvolvidos quanto em mercados em desenvolvimento.

Figura 4: Número de unidades robóticas vendidas por ano em alguns países



Fonte: Próprio Autor

Nota-se que do gráfico acima que apesar do mercado brasileiro não ser muito expressivo

---

em números seu crescimento segue a mesma proporção de diversos países desenvolvidos com exceção da China que apresenta um crescimento exacerbado.

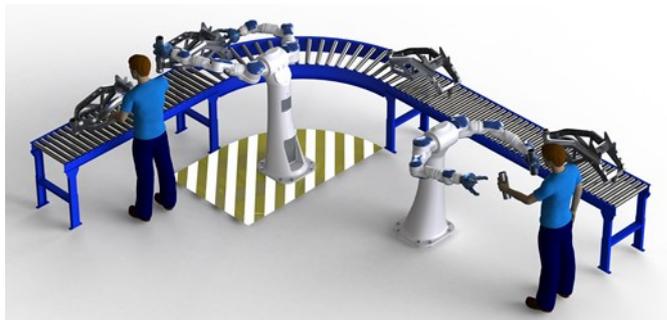
### 2.1.2 Conceitos da Robótica Colaborativa

Ao longo dos anos de estudo na área de automação industrial verificou-se que muitas vezes a solução mais eficiente para uma produção flexível é não apenas utilizar mão de obra humana ou robótica, mas criar uma combinação destes dois (AMIRSHIRZAD; KAYA; OZTOP, 2016). O termo robótica colaborativa é utilizado para designar um ambiente no qual uma pessoa trabalha próxima a um robô, porém não necessariamente existe uma interação física entre ambos, a maioria dos ambientes de trabalho contam com uma pessoa e um robô realizando tarefas próximos um do outro como é o exemplo em linhas de montagem onde operários humanos são responsáveis por algumas tarefas e os robôs manipuladores são responsáveis por outras tarefas.

A ideia de robótica colaborativa veio para mesclar os pontos positivos de operários humanos e robóticos, por exemplo a capacidade cognitiva do ser humano com a precisão e força de um robô manipulador. Robôs colaborativos apresentam facilidades na programação como por exemplo serem programados por demonstração de guiagem manual. Podem operar próximos a seres humanos desde que respeitadas as normas de segurança, e a integração com outros sensores e atuadores é menos complexa que a de robôs industriais completamente autônomos (ROSENSTRAUCH; KRÜGER, 2017). A utilização da robótica colaborativa também diminui o espaço físico ocupado pela célula de trabalho já que não é necessária uma cela para o robô visto que o robô colaborativo pode operar com pessoas próximas.

Com relação a utilização de robôs colaborativos na indústria existem duas vertentes principais, uma na qual o operador realiza a tarefa com a ajuda do robô, podendo ser, por exemplo a função do robô o posicionamento da peça enquanto o operador fixa a mesma de alguma forma, ou também de forma que exista uma interação entre o robô e o operador na forma de troca de ferramentas ou situações similares. Ou a segunda vertente na qual o operário humano realiza uma tarefa diferente do robô, porém em um espaço muito próximo como uma linha de montagem de produtos (SHEN; REINHART; TSENG, 2015). A figura 5 serve de ilustração para as duas situações expostas anteriormente, a esquerda tem-se a interação direta entre o operador e o robô manipulador, e a direita temos uma linha de montagem na qual o robô e o operário trabalham lado a lado, porém sem interação direta.

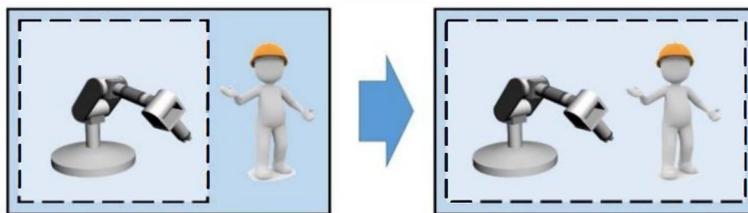
Figura 5: Exemplo de linha de montagem com robôs e seres humanos lado a lado



Fonte: <https://leanbox.es> (2017)

Como já mencionado robôs industriais clássicos operam em ambientes onde pessoas não devem adentrar durante o funcionamento de robô, porém esse conceito desaparece com o uso de robôs colaborativos. A figura 6 ilustra a diferença de ambiente de operação entre os dois tipos de robôs.

Figura 6: Diferença no ambiente de operação dos dois tipos de robôs



Fonte: Rosenstrauch e Kruguer (2017)

Com a evolução na integração de robôs manipuladores e seres humanos há uma crescente preocupação com a segurança no ambiente de operação de forma que normas técnicas foram desenvolvidas e vem sendo aprimoradas para garantir que a ocorrência e a gravidade dos acidentes sejam reduzidas para tornar o ambiente seguro para operadores humanos que trabalham em proximidade ou que interagem com robôs manipuladores. A primeira norma a estabelecer os critérios de segurança para a utilização de robôs e não apenas na sua fabricação foi a ANRI/RIA R15.06 (FRYMAN, 2014), este documento é a base para as normas atuais e foi criado por desenvolvedores americanos. Em 2006 foi estabelecida a ISO10218 que até hoje é a norma mais completa sobre segurança em robótica industrial. Em 2011 houve uma nova revisão para a ISO10218 visto a quantidade de tecnologias sendo implementadas pelo mundo, e a necessidade de que novos padrões fossem estabelecidos (FRYMAN, 2014).

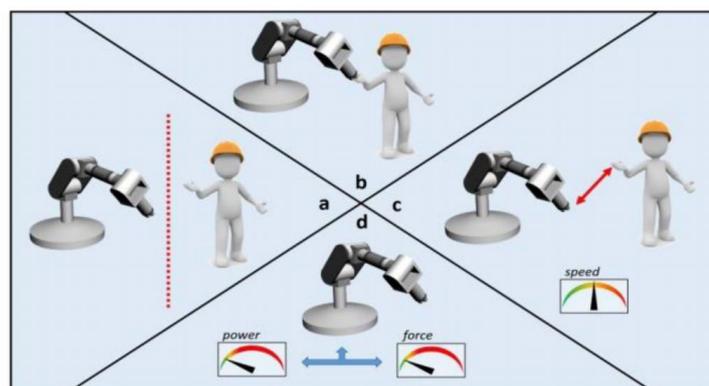
Em 2016 uma especificação técnica foi lançada para complementar as normas vigentes, a ISO/TS 15066. Neste documento estão citados todos os parâmetros que um robô deve seguir para ser considerado apto para operar em interação com seres humanos, ou seja, esta atualização nas normas é em decorrência da introdução de robôs colaborativos em ambientes industriais e afins.

A principal motivação para a atualização das normas de segurança foi a necessidade da adaptação dos padrões devido a incapacidade das normas em vigência até o momento para garantir o máximo de segurança ao operário e uma interação homem-máquina flexível (ROSENSTRAUCH; KRÜGER, 2017).

Foi criada uma divisão no que tange a robótica colaborativa quanto a modo de operação e interação em robôs manipuladores e operários humanos, são quatro modos de operação diferentes, que são listados abaixo e exemplificados na Figura 7. Para seguir as normas de segurança diversas soluções foram estabelecidas e novas vem sendo pesquisadas e postas em prática, as soluções mais utilizadas são o controle de impedância, suas versões modificadas para limitação de força, amortecimento adaptativo e redundâncias (NAVARRO et al., 2016).

- (a) Avaliação de segurança para Parada Monitorada: neste modo a operação do robô só é liberada caso não exista uma pessoa dentro do seu espaço de trabalho, assim que uma pessoa entra no espaço o robô automaticamente para sua tarefa;
- (b) Guia de Mão: neste modo o operador pode guiar o robô manipulador pelo ambiente de trabalho;
- (c) Monitoramento de distância e velocidade: este modo permite a presença de uma pessoa dentro do ambiente de trabalho do robô, porém dependendo de sua proximidade a velocidade do robô é reduzida ou não para garantir que acidentes não ocorram, caso a distância seja menor que o limite o robô irá interromper sua operação;
- (d) Limitação de Força: este modo permite a interação total entre o robô e o operador humano, porém para evitar acidentes a força e a velocidade com as quais o robô se move são limitadas dependendo do tipo de movimento em função do tipo de lesão que pode ocorrer.

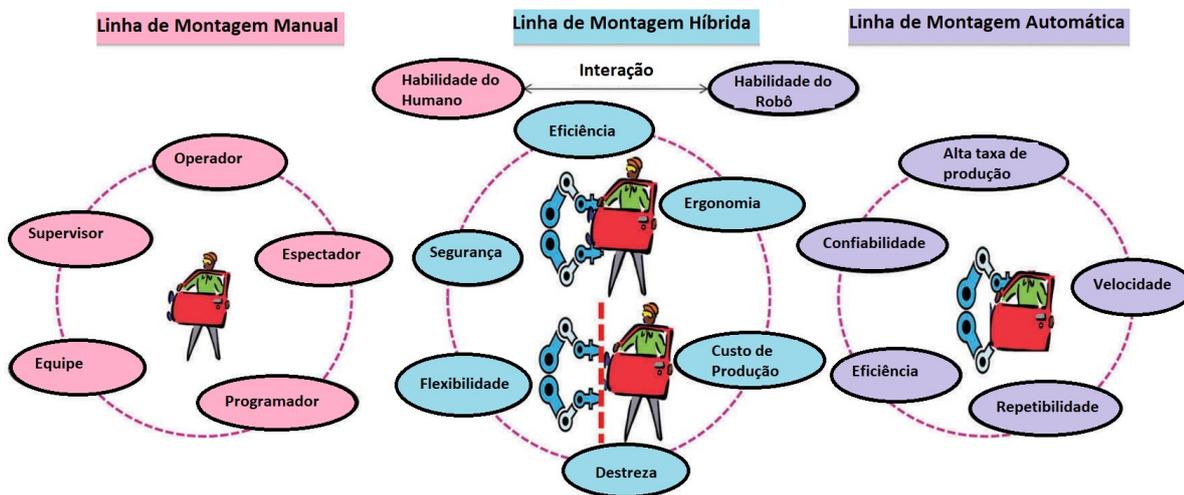
Figura 7: Diferentes modos de operação de um robô



## 2.2 Divisão de tarefas na Robótica Colaborativa

A robótica colaborativa mescla as vantagens de ambas as partes, de um lado tem-se a capacidade cognitiva e tomada de decisões humanas e do outro as capacidades físicas dos robôs (ROSENSTRAUCH; KRÜGER, 2017). A figura 8, ilustra a de um lado quais as funções que os seres humanos podem ter uma linha de produção colaborativa, como programador, supervisor, operador. Do outro lado têm-se as características que um robô apresenta como repetibilidade, alta taxa de produção, velocidade, eficiência e confiabilidade. E no centro, unindo os dois tipos de operários são apresentados aspectos da linha colaborativa como a eficiência, o custo de produção, a segurança, a flexibilidade e a ergonomia

Figura 8: Aspectos dos robôs colaborativos

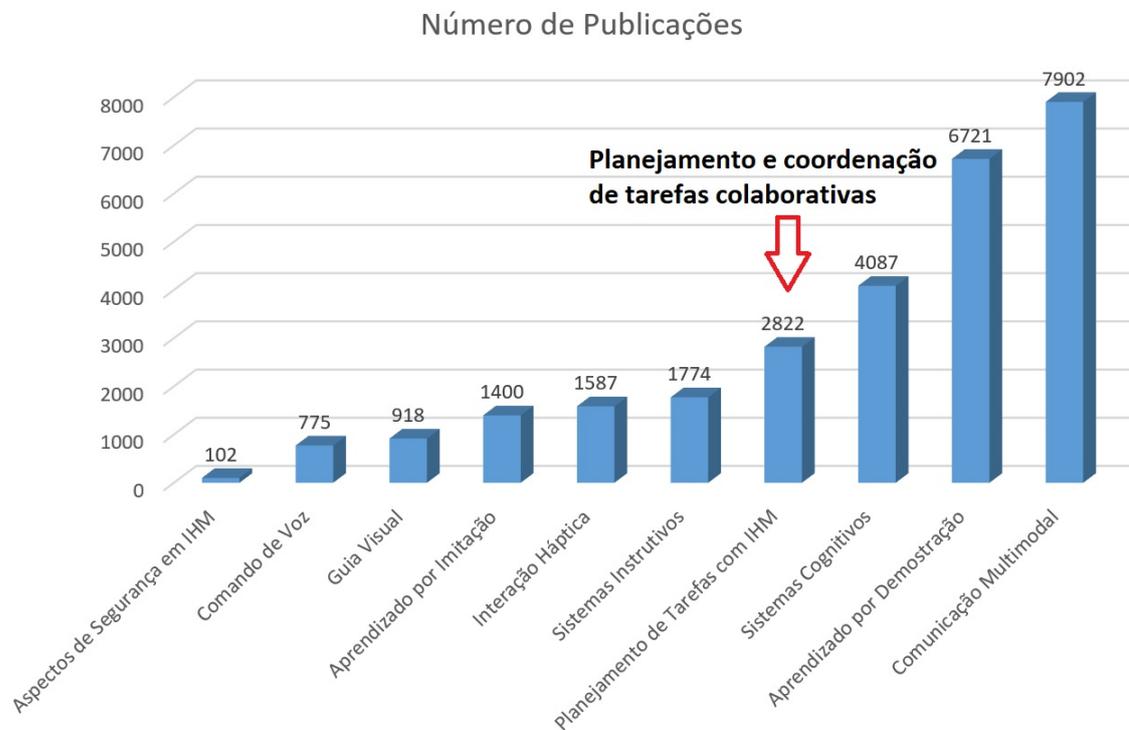


Fonte: Tsarouchi et al. (2016) - traduzido pelo Autor

Porém uma grande dificuldade é a divisão das tarefas. Existem diversos estudos para criar métodos de dividir quem realizará cada passo da tarefa de forma a criar uma rotina colaborativa eficiente e segura, levando em conta o fator humano. Por exemplo, em uma linha de montagem, um operário humano responsável por inserir uma peça pode nem sempre manter o mesmo ritmo, fato que pode levar a necessidade da parada das operações por motivos de segurança ou de continuidade, desta forma, a rotina colaborativa deve atrelar em sua concepção esses desvios padrões que podem ocorrer dado que existe um ser humano envolvido (DING et al., 2013). Na situação citada acima, uma das duas partes deve se adaptar, como exigir que o operário siga um ritmo fixo cria uma situação de muito estresse físico, é interessante que o robô manipulador se adapte ao ritmo da linha de produção. Esta adaptação deve ser realizada para evitar acidentes envolvendo o operador humano e manter a produtividade da tarefa em questão. A figura 9 ilustra a quantidade de estudos que envolvem o planejamento de tarefas em situações com interação

homem-máquina e foi construída com base em informações apresentadas por Tsarouchi et al. (2016).

Figura 9: Quantidade de estudos por tópico



Fonte: Próprio Autor

Para a melhor alocação de tarefas colaborativas é necessário ter em mente o tipo de trabalho a ser desenvolvido e o ambiente onde a tarefa será realizada. O ambiente de trabalho é um fator muito importante em situações que envolvem interação homem-máquina e deve ser estudado a ponto de que se possa indicar o melhor ambiente onde uma tarefa seja realizada. Por ambiente de trabalho entende-se o espaço físico a ser dividido pelo operário e pelo robô, e tal análise é importante para determinar padrões de segurança a serem implementados e definir o tipo de interação entre homem e máquina de forma a garantir um alto grau de produtividade. Na análise do ambiente de trabalho devem ser observados tantos aspectos do robô quanto do ser humano, de forma que seja criada uma base de dados bem ampla sobre o comportamento de ambas as partes (VAHRENKAMP et al., 2016).

Uma vez que o ambiente e o comportamento de ambas as partes já foram analisados deve-se passar por uma rotina de análise de riscos, tal rotina segue padrões determinados nas normas ISO12100 e EIC61508. Esta análise de risco é composta pelos seguintes processos:

- **Análise de Risco:** consiste em identificar todos os tipos de acidentes envolvendo o robô e o operário humano durante o funcionamento normal do robô levando em conta todas as possibilidades de operação e interação entre ambos;

- **Avaliação de Risco:** consiste em determinar o grau de gravidade e o grau de incidência de cada acidente identificado na etapa anterior;
- **Redução de Risco:** utilizando os dados coletados anteriormente busca-se determinar formas de mitigar os riscos e reduzir a ocorrência de acidentes, a forma de redução costuma se dar com regras mais rigorosas durante o funcionamento e a utilização de funções de segurança na programação do robô.

As etapas descritas acima são realizadas de forma iterativa, ou seja, após a redução dos riscos uma nova avaliação é realizada de forma a sempre reduzir acidentes e garantir que nenhuma situação passe sem ser testada (ROSENSTRAUCH; KRÜGER, 2017).

Durante a realização de uma tarefa colaborativa existem dois eventos que podem ocorrer e impedir seu prosseguimento: um é o fato citado anteriormente de que um ser humano pode não manter o ritmo constante durante todo o processo e outra é a ocorrência de um acidente como um contato indesejado entre a pessoa e o robô. Em ambos os casos talvez exista a necessidade de realizar uma parada nas operações do robô, e tal fato criar uma série de dificuldades quando se trata de uma linha de produção. Desta forma existem estudos que visam o desenvolvimento de formas de contornar tais eventos, como por exemplo a adaptação do robô ao ambiente em que opera (DING; SCHIPPER; MATTHIAS, 2013).

Para melhor explicar o plano que vem sendo desenvolvido nestes estudos primeiro é importante explicar a terminologia utilizada, são três termos principais sendo eles:

- **Comportamento de Produção:** significa a operação normal da produção onde é mantido os padrões de segurança e de produtividade;
- **Exceção de Produtividade ou Segurança:** é o termo utilizado quando alguma das situações citadas acima ocorre, um decréscimo na produtividade ou uma situação que coloca o operário em perigo;
- **Comportamento de Exceção:** consiste em duas etapas uma de reação e outra de recuperação. A etapa de reação consiste em uma rotina para lidar com a situação como mudança de trajetória ou adequação de ritmo. A etapa de recuperação consiste em rotinas para retornar à operação normal após a exceção acontecer e ser resolvida;

As figuras abaixo ilustram a interação entre a produção normal, a ocorrência de um evento inesperado e o retorno a operação normal após o evento ter sido resolvido. Mostra-se também a diferença no tempo entre a operação normal e a operação dado a ocorrência do evento.

Figura 10: Interação entre Operação Normal e Exceções



Fonte: DING et al. (2013) - traduzido pelo Autor

Figura 11: Diferença de Tempo quando há uma Exceção



Fonte: DING et al. (2013) - traduzido pelo Autor

Normalmente quando existe a ocorrência de eventos inesperados, como uma pessoa posicionada no caminho de um braço robótico, a saída em geral é realizar a parada completa do robô. A ideia proposta por alguns pesquisadores como (SCHIPPER; DING; MATTHIAS, 2014) é que no lugar de realizar uma parada completa o robô contenha em sua programação as rotinas de comportamento de exceção de forma que o robô se adapte a situação como por exemplo na situação da pessoa no caminho do braço o robô poderia alterar sua trajetória e desviar da pessoa.

### 2.3 Análise de Produtividade em Linhas de Produção

Como o objetivo deste estudo é analisar o impacto na produtividade de tarefas com a introdução de robôs colaborativos vê-se a necessidade de detalhar como será feita tal análise, quais os dados necessários e como interpreta-los. Primeiro tem-se o conceito de produtividade dado por (CAPUL; GARNIER, 1996) como a relação entre os meios, recursos utilizados e a produção final, ou seja, a capacidade de gerar um produto associado à um técnica e ao capital empregado. Dito isto, temos que dado uma linha de produção de um determinado produto o critério de produtividade está intimamente relacionado com a quantidade de peças produzidas bem como com os insumos e capitais utilizados no processo, como este estudo está mais focado no questão de quantidade e tempo não serão avaliados os critérios economicos do processo como capital.

É importante para este estudo também, ressaltar a diferença entre produtividade e eficiência, como posto por (TUPY; YAMAGUCHI, 1998) tal diferença pode ser colocada como a

produtividade está para quantidade como a eficiência está para a qualidade. O que os autores querem dizer com isso é que o conceito de produtividade está muito relacionado com a quantidade de peça produzidas no final enquanto que a eficiência está mais relacionada com a proporção de insumos, tempo e afins para o número final de peças. Por exemplo, duas pessoas que produzem cubos de madeira do mesmo tamanho, diga-se que a primeira pessoa produz 400 cubos por dia utilizando 20  $m^2$  de madeira, enquanto que a segunda pessoa produz 300 cubos por dia utilizando 12  $m^2$  de madeira. Pode-se perceber que para um mesmo período a primeira pessoa produz 100 cubos a mais que a segunda, portanto ela é mais produtiva em relação a segunda pessoa. Porém olhando para a relação entre a madeira utilizada e quantidade de produtos produzidos temos que a primeira pessoa produz 20 cubos por  $m^2$  de madeira enquanto que a segunda pessoa produz 25 cubos por  $m^2$ , logo ela é mais eficiente pois utiliza de forma melhor seus recursos, mesmo que isso acarrete em uma produtividade menor no final do dia.

Ambos os critérios são importantes para uma linha de produção e podem ser determinados de forma rápida. No âmbito deste estudo o que será analisado é o impacto no tempo para a realização de uma tarefa. Desta forma seria condizente analisar apenas a produtividade da operação visto que os experimentos não transformam matéria prima em um produto final onde existem excessos. Porém há uma forma de analisar a eficiência geral de um processo através do tempo que demora para a atividade ser realizada. Tal índice de eficiência é conhecido como Overall Equipment Effectiveness (OEE), que em português significa Eficiência Geral do Equipamento. Como dito por (NAKAJIMA, 1988) a OEE permite avaliar de forma simples o efeito do tempo de ciclo de operação, tempo que uma tarefa demora para ser realizada, o tempo de manutenção, e outras interrupções e a eficiência de um processo. Como neste estudo manutenção e falhas durante a produção serão descartadas deve-se utilizar uma versão mais simplificada da OEE para avaliar a eficiência dos experimentos propostos. A versão que melhor se adapta aos experimentos propostos e aos dados que serão coletados é descrita por (MORAES; SANTORO, 2006), nela são levados em consideração o menor tempo medido para que a tarefa seja realizada bem como o tempo médio para a tarefa ser realizada. As equações (2.1), (2.2) e (2.3) indicam as variáveis e seus significados:

$$C_i = \frac{3600}{t_{min}} \quad (2.1)$$

Onde:

$C_i$  = Capacidade ideal de produção

$t_{min}$  = Menor tempo de execução medido

---

$$C_r = \frac{3600}{t_{med}} \quad (2.2)$$

Onde:

$C_r$  = Capacidade real de produção

$t_{med}$  = Tempo médio de execução medido

$$OEE = \frac{C_r}{C_i} \quad (2.3)$$

Onde:

OEE = Eficiência Geral do Equipamento

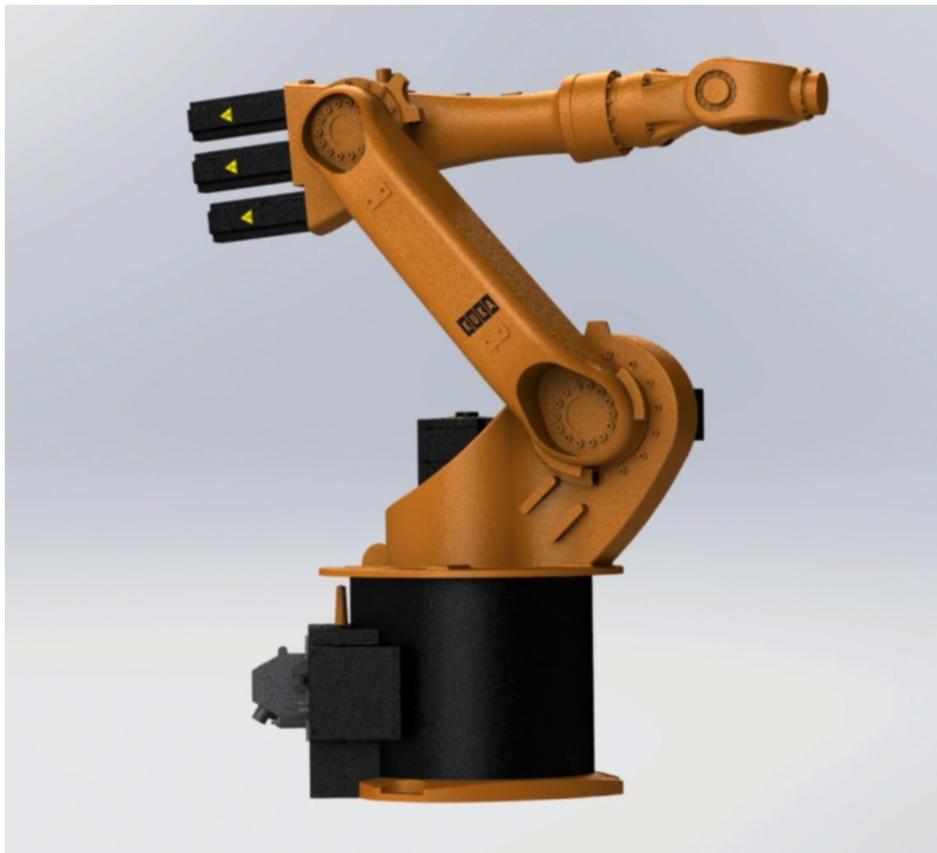
Como as tarefas propostas envolvem ações humanas e o ser humano diferente de um robô não consegue manter um ritmo perfeitamente fixo durante a realização de alguma atividade existe a necessidade de calcular as duas capacidades apresentadas acima. A capacidade ideal está relacionada com a capacidade de produção caso o operário humano fosse capaz de sempre realizar a atividade em seu menor tempo. Já a capacidade real leva em conta este fator humano (variação no ritmo de produção), ou seja, utiliza o tempo médio, que é calculado através da medição do tempo na realização da tarefa diversas vezes, para assim calcular qual velocidade de produção efetiva. A medida de eficiência do processo de produção é a relação entre estes dois fatores, ou seja, é a relação entre a capacidade ideal e da capacidade real da linha de produção.



### 3 DETALHAMENTO DOS EXPERIMENTOS PROPOSTOS

Nesta seção serão descritos os materiais utilizados, o roteiro de cada experimento, bem como qual a intenção na realização de cada tarefa no âmbito deste estudo. Todas as rotinas utilizadas estão na seção de apêndices, juntamente com algumas fotos dos equipamentos utilizados, como por exemplo modelo de robô manipulador. O intuito geral dos experimentos é adquirir os tempos de realização de cada tarefa para posteriormente analisar os impactos na produtividade com a inserção de um robô colaborativo na rotina da tarefa, tal análise será realizada no Capítulo 4.

Figura 12: Modelo de Robô Manipulador Utilizado



Fonte: <https://grabcad.com> (2017)

### 3.1 Experimento I - Parafuso

Este experimento foi desenvolvido para observar qual efeito a utilização de robôs colaborativos em tarefas que exijam maior precisão e coordenação motora. O experimento em questão consiste na fixação de um parafuso em uma peça de madeira com a utilização de uma porca. O experimento será realizado de forma colaborativa e sem a participação do robô para que depois sejam analisados os efeitos.

Primeiro a peça de madeira foi fixada em uma bancada de alumínio utilizando os dois apoios verticais como ilustra a figura 13, para que haja estabilidade durante a realização do experimento.

Figura 13: Esquema da montagem do experimento I



Fonte: Próprio Autor

A figura 14 mostra perfurações na peça que é o espaço em que o parafuso será fixado. Tendo a estrutura pronta, o próximo passo foi a programação do robô para a realização da tarefa, o código consiste em, através da guiagem de mão e utilizando o algoritmo implementado (Vide Apêndice A, mostrar ao robô onde a porca está e onde ela deve ser posicionada para a fixação do parafuso.

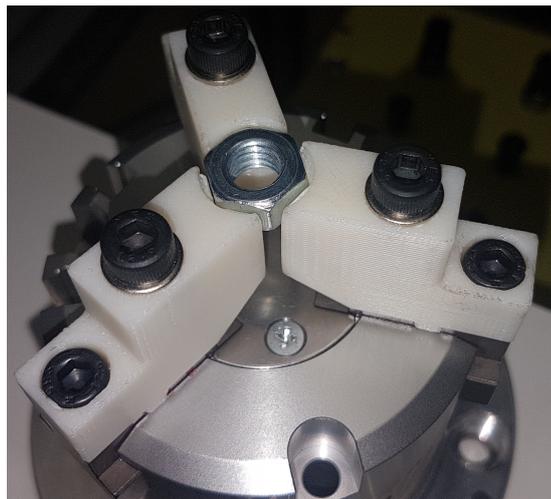
Figura 14: Placa de Madeira utilizada no Experimento



Fonte: Próprio Autor

A figura 15 mostra a garra utilizada no robô para realizar a tarefa.

Figura 15: Garra Utilizada no Experimento



Fonte: Próprio Autor

Com ambos, o robô e a plataforma, prontos, a tarefa foi realizada 30 (trinta) vezes com o operador humano e o robô trabalhando colaborativamente: o ser humano ficou responsável por posicionar o parafuso e, utilizando a chave de 13 mm, fixa-lo enquanto que o robô faria o trabalho da chave de contra porca segurando a porca fixa durante a operação. Após a aplicação de uma força equivalente de 30 Newtons no eixo Z, ou seja, na vertical o robô sabe que deve buscar a porca e se mover para a próxima posição que é onde há a perfuração para a passagem do parafuso. Após repetir o ciclo completo, foi hora de realizar, na mesma quantidade de repetições, a tarefa apenas com o ser humano envolvido, ou seja, uma chave de 13 mm seria utilizada pelo operador para apertar o parafuso e a outra chave igual seria utilizada para aplicar a força na contra porca. Ao final destas duas etapas, os tempos colhidos foram analisados.

### 3.2 Experimento II - Pregos

O intuito deste experimento é observar o efeito da robótica colaborativa em tarefas que exijam maior precisão e força por parte do operário, no caso a fixação de um prego em uma peça de madeira. O experimento será realizado de forma colaborativa e sem a participação do robô para que depois sejam analisados os efeitos.

Primeiro, como na tarefa descrita anteriormente, a peça de madeira foi fixada na bancada utilizando os quatro apoios verticais (2 de cada lado da peça) como ilustra a figura 16.

Figura 16: Esquema da montagem do experimento II



Fonte: Próprio Autor

Com a peça fixada, o próximo passo foi, através da guiagem de mão, ensinar ao braço robótico quais eram as posições em que deveria ficar através da guiagem de mão, utilizando o algoritmo implementado (Vide Apêndice B). Após o ensino das posições é possível repetir a tarefa diversas vezes sem mais esforços. A tarefa consiste no posicionamento de um prego em uma peça de madeira, ilustrada na figura 17, por parte do operador humano e o braço robótico faz o serviço de martelo, ou seja, o braço é posicionado acima do prego e então o fixa na peça de madeira através da aplicação da força necessária para que o prego atinja a profundidade especificada. Na situação na qual não há a utilização do robô manipulador o operário humano fica responsável por fixar o prego na peça de madeira com a utilização de um martelo comum. A tarefa foi realizada o mesmo número de vezes que a tarefa anterior tanto no modo colaborativo quanto na versão onde apenas o ser humano realiza as atividades.

Figura 17: Bloco de Madeira Utilizado



Fonte: Próprio Autor

### 3.3 Experimento III - Caixa de Papelão

Este experimento tem como objetivo a medição do tempo para a realização de uma tarefa que envolve fechar uma caixa de papelão e assim analisar o efeito na produtividade da linha de produção com a utilização da robótica colaborativa. Uma placa de madeira foi colocada acima da bancada de metal para que a caixa pudesse ser colocada encima, como ilustra a figura 18.

Figura 18: Sketch da montagem do experimento III



Fonte: Próprio Autor

Este experimento consiste na utilização do robô manipulador como auxiliar na tarefa de fechar uma caixa de papelão com as dimensões especificadas acima, passando uma das abas por baixo da outra para que a caixa fique fechada sem a necessidade da utilização de fita adesiva.

A tarefa é composta de forma que primeiro é ensinado ao robô as posições nas quais deve se posicionar em cada parte da tarefa utilizando a guiagem de mão, vide apêndice C para maiores detalhes do algoritmo utilizado. Após o ensino a tarefa pode ser realizada diversas vezes sem a necessidade de realizar toda a tarefa de demonstração por guiagem de mão novamente. Para o início da tarefa o operador coloca a caixa em cima da bancada, dobra as duas abas laterais para dentro, feito isso dobra a aba mais próxima do robô para dentro e dá um toque no braço robótico para que ele se mova para a posição de ajuda onde segura a aba na posição que deve ficar. Após a movimentação do robô o operário dobra a última aba e a prende por dentro de uma das abas laterais, finalizando o processo. Na situação sem o braço robótico o operário humano necessita segurar a aba, que o robô segurava, com uma das mãos e assim realizar o processo de prender a aba final por baixo de uma das abas laterais com apenas uma das mãos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após todos os experimentos serem realizados, os tempos de cada tarefa foram utilizados para a criação de tabelas comparativas entre a realização colaborativa e a só por parte do operador humano. Em posse dos dados relativos ao tempo necessário para a realização de cada tarefa, foi possível determinar grandezas que pudessem tornar os dados em algo relacionado a produtividade e eficiência na produção. Como mostrado por (MORAES; SANTORO, 2006) é possível utilizar tempos de realização para determinar a capacidade de manufatura de peças em uma linha de produção. Através das equações (2.1) e (2.2) pode-se determinar a capacidade ideal e a capacidade real de uma linha de produção.

### 4.1 Experimento I

A tabela 1 abaixo trás os tempos de realização para a situação onde apenas a pessoa realiza a tarefa. A tarefa consistia em fixar um parafuso em uma peça de madeira com uma porca e chaves de 13 mm.

Tabela 1: Tempo medidos para cada iteração do Experimento I – Operário Humano

Iteração	Tempo (s)	Iteração	Tempo (s)	Iteração	Tempo (s)
1	18,00	11	14,03	21	11,94
2	14,76	12	12,46	22	12,84
3	15,91	13	14,08	23	12,05
4	12,97	14	11,24	24	11,20
5	15,60	15	12,07	25	12,20
6	11,51	16	14,67	26	11,42
7	15,13	17	12,57	27	12,11
8	13,25	18	11,00	28	12,65
9	13,60	19	17,73	29	12,01
10	11,08	20	14,65	30	13,65

A tabela 2 trás os tempos de realização para a situação onde a pessoa realiza a tarefa com a ajuda do robô manipulador.

Tabela 2: Tempo medidos para cada iteração do Experimento I – Operário Misto

Iteração	Tempo (s)	Iteração	Tempo (s)	Iteração	Tempo (s)
1	15,86	11	14,00	21	17,33
2	12,30	12	17,24	22	14,67
3	14,19	13	13,63	23	13,40
4	13,42	14	15,02	24	14,22
5	16,17	15	15,65	25	12,25
6	14,86	16	14,31	26	12,60
7	17,76	17	16,94	27	16,04
8	12,36	18	13,48	28	14,10
9	12,23	19	16,70	29	14,81
10	15,02	20	15,07	30	17,67

As tabelas 3 e 4 abaixo mostram a comparação entre os resultados medidos para a situação na qual apenas a pessoa realiza a tarefa e quando há cooperação entre a pessoa e o robô. A tabela 4 foi construída utilizando as equações (2.1) e (2.2) apresentadas na seção 2.3. Como pode-se observar na tabela os tempos medidos quando há cooperação homem-máquina são maiores que os medidos quando apenas a pessoa realiza a tarefa. Pode-se perceber na Tabela 4 que a relação entre a capacidade ideal e real se manteve aproximadamente no mesmo patamar para ambos os tipos de produção, porém o número absoluto de peças produzidas foi menor na operação colaborativa. Essa redução indica que o uso de robótica colaborativa para a atividade desenvolvida não é interessante pois diminui o número de peças confeccionadas por hora. Há diversos fatores podem ter culminado nos tempos indicados, um ponto que foi observado durante a realização do experimento é que dependendo da posição que o parafuso for inserido isso pode dificultar o encaixe e assim atrasar a operação. Outro fator que influencia no tempo de realização é que no experimento desenvolvido como a pessoa utiliza as duas mãos, uma para segurar a porca e outra para apertar o parafuso, ao realizar o movimento de rotação com ambas as mãos o tempo é reduzido.

Tabela 3: Comparação entre os tempos médios e mínimos para os dois tipos de operadores

	Humano	Colaborativo
Tempo Médio (s)	13,28	14,78
Menor Tempo (s)	11,00	12,23

Tabela 4: Comparação entre as capacidades real e ideal para os dois tipos de operadores

	Capacidade Ideal	Capacidade Real	OEE
Operário Humano	328 (Pçs/hr)	272 (Pçs/hr)	82,9 (%)
Operário Misto	295 (Pçs/hr)	244 (Pçs/hr)	82,7 (%)
Variação Percentual	-10,06 (%)	-10,29 (%)	-0,24 (%)

## 4.2 Experimento II

Abaixo estão as tabelas referentes aos tempos de realização de cada uma das trinta iterações do experimento

A tabela 5 abaixo trás os tempos de realização para a situação onde apenas a pessoa realiza a tarefa. A tarefa consiste na fixação de um prego em uma peça de madeira com um martelo.

Tabela 5: Tempo medidos para cada iteração do Experimento II – Operário Humano

Iteração	Tempo (s)	Iteração	Tempo (s)	Iteração	Tempo (s)
1	50,44	11	28,95	21	35,58
2	38,65	12	34,07	22	33,39
3	54,52	13	37,43	23	32,01
4	36,67	14	37,83	24	38,54
5	40,54	15	30,81	25	30,65
6	46,21	16	28,47	26	35,18
7	49,37	17	31,97	27	42,48
8	42,77	18	34,10	28	37,31
9	41,85	19	36,95	29	29,18
10	40,36	20	35,51	30	41,58

A tabela 6 trás os tempos de realização para a situação onde a pessoa realiza a tarefa com a ajuda do robô manipulador.

Tabela 6: Tempo medidos para cada iteração do Experimento II – Operário Misto

Iteração	Tempo (s)	Iteração	Tempo (s)	Iteração	Tempo (s)
1	21,23	11	17,69	21	19,45
2	24,89	12	20,82	22	16,79
3	20,57	13	17,88	23	23,03
4	25,30	14	18,37	24	24,99
5	17,29	15	24,86	25	17,70
6	21,65	16	18,25	26	20,85
7	25,68	17	23,77	27	26,37
8	19,59	18	18,02	28	22,09
9	25,87	19	25,88	29	26,11
10	23,91	20	19,11	30	24,96

As tabelas 7 e 8 abaixo mostram a comparação entre os resultados medidos para a situação na qual apenas a pessoa realiza a tarefa e quando há cooperação entre a pessoa e o robô. A tabela 4 foi construída utilizando as equações (2.1) e (2.2) apresentadas na seção 2.3. Como pode-se observar na tabela os tempos medidos quando há cooperação homem-máquina são menores que os medidos quando apenas a pessoa realiza a tarefa, pode-se observar também que a relação entre a capacidade ideal e real se manteve aproximadamente no mesmo patamar para ambos os tipos de produção, porém o número absoluto de peças produzidas foi maior na operação colaborativa. Essa redução indica que o uso de robótica colaborativa para a atividade desenvolvida é interessante pois aumenta o número de peças confeccionadas por hora. O aumento na produtividade da linha é um indicativo de que a utilização de robôs colaborativos em tarefas que exijam o uso de força e precisão pode ser benéfico, como pode-se observar nas tabelas 5 e 6 os tempos de realização da tarefa são reduzidos drasticamente com a utilização do robô manipulador devido ao esforço necessário para a fixação de um prego com as dimensões especificadas na peça de madeira, esforço este que requer muito mais tempo do ser humano do que do braço robótico aumentando assim a produtividade da linha. Houve um ganho de aproximadamente 70% na produtividade, houve também um aumento na eficiência geral apesar de não ser muito expressivo.

Tabela 7: Comparação entre os tempos médios e mínimos para os dois tipos de operadores

	Humano	Colaborativo
Tempo Médio (s)	37,78	21,76
Menor Tempo (s)	28,47	16,79

Tabela 8: Comparação entre as capacidades real e ideal para os dois tipos de operadores

	Capacidade Ideal	Capacidade Real	OEE
Operário Humano	127 (Pçs/hr)	96 (Pçs/hr)	75,6 (%)
Operário Misto	215 (Pçs/hr)	166 (Pçs/hr)	77,2 (%)
Variação Percentual	69,29 (%)	72,91 (%)	2,11 (%)

### 4.3 Experimento III

Abaixo estão as tabelas referentes aos tempos de realização de cada uma das trinta iterações do experimento

A tabela 9 trás os tempos de realização para a situação onde apenas a pessoa realiza a tarefa. A tarefa consiste em fechar uma caixa de papelão com quatro abas.

Tabela 9: Tempo medidos para cada iteração do Experimento III – Operário Humano

Iteração	Tempo (s)	Iteração	Tempo (s)	Iteração	Tempo (s)
1	7,86	11	6,03	21	5,57
2	6,29	12	5,76	22	4,66
3	5,90	13	7,46	23	5,26
4	6,56	14	6,29	24	6,83
5	5,91	15	5,97	25	5,17
6	5,32	16	5,38	26	5,76
7	6,39	17	6,42	27	6,67
8	5,97	18	6,11	28	5,46
9	5,88	19	6,24	29	5,76
10	6,21	20	5,26	30	5,37

A tabela 10 trás os tempos de realização para a situação onde a pessoa realiza a tarefa com a ajuda do robô manipulador.

Tabela 10: Tempo medidos para cada iteração do Experimento III – Operário Misto

Iteração	Tempo (s)	Iteração	Tempo (s)	Iteração	Tempo (s)
1	9,71	11	8,86	21	9,69
2	9,05	12	9,73	22	9,70
3	7,81	13	9,07	23	8,15
4	8,49	14	7,78	24	9,78
5	8,33	15	9,20	25	7,36
6	8,16	16	8,81	26	8,09
7	7,92	17	8,32	27	8,85
8	9,34	18	9,03	28	9,84
9	7,36	19	9,58	29	7,69
10	8,53	20	8,43	30	8,38

As tabelas 11 e 12 abaixo mostram a comparação entre os resultados medidos para a situação na qual apenas a pessoal realiza a tarefa e quando há cooperação entre a pessoa e o robô. A tabela 12 foi construída utilizando as equações (2.1) e (2.2) apresentadas na seção 2.3. Como pode-se observar na tabela os tempos medidos quando há cooperação homem-máquina são maiores, como no experimento I, que os medidos quando apenas a pessoa realiza a tarefa, pode-se observar também que a relação entre a capacidade ideal e real se manteve aproximadamente no mesmo patamar para ambos os tipos de produção, porém o número absoluto de peças produzidas foi menor na operação colaborativa. Essa redução indica que o uso de robótica colaborativa para a atividade desenvolvida não é interessante pois reduz o número de peças confeccionadas por hora. A redução na produtividade da linha é um indicativo de que a utilização de robô colaborativos em tarefas que como a proposta não é interessante, pois para este tipo de atividade a velocidade do robô é menor do que a desempenhada pelo ser humano. A produção por unidade de tempo foi reduzida em aproximadamente 31%. por outro lado, houve um aumento na eficiência geral de quase 9%.

Tabela 11: Comparação entre os tempos médios e mínimos para os dois tipos de operadores

	Humano	Colaborativo
Tempo Médio (s)	5,99	8,70
Menor Tempo (s)	4,46	7,36

Tabela 12: Comparação entre as capacidades real e ideal para os dois tipos de operadores

	Capacidade Ideal	Capacidade Real	OEE (%)
Operário Humano	773 (Pçs/hr)	601 (Pçs/hr)	77,7 (%)
Operário Misto	490 (Pçs/hr)	414 (Pçs/hr)	84,5 (%)
Variação Percentual	-36,61 (%)	-31,11 (%)	8,75 (%)

#### 4.4 Considerações e Trabalhos Futuros

Algumas considerações sobre o estudo apresentado neste documento são importantes de serem revisitadas como o número de iterações em cada experimento, os critérios avaliados e as tarefas implementadas. Em primeiro lugar é importante visitar o fato de que dentro dos estudos envolvendo interação homem-máquina, os estudos sobre planejamento de tarefas representam menos de 15% do total, além disso muitos dos estudos sobre planejamento se atem mais especificamente a questões de como ensinar os robôs e sobre quesitos de segurança e não especificamente sobre análises de produtividade e eficiência. Sobre o número de vezes que cada experimento foi realizado, que foram 30 vezes, é importante ressaltar que é um número arbitrário sem nenhum embasamento estatístico, porém devesse notar que existem poucos estudos especificamente sobre a análise de tarefas realizadas com o auxílio de robôs colaborativos e nos encontrados o número de repetições são relativamente baixos.

Com relação as tarefas escolhidas, é importante ressaltar que como dito por (VAHRENKAMP et al., 2016) cada tarefa deve ser estudada detalhadamente levando em consideração todos os recursos envolvidos com a finalidade de entender as funções desempenhadas e como aplicar cada recurso de forma a aumentar a produtividade e eficiência da tarefa. Em outras palavras, cada tarefa deve ser estudada separadamente para determinar qual o impacto causado pela introdução de um robô colaborativo, desta forma não há um critério para escolher qual tarefa a ser estudada ou qual tarefa tem maior representatividade quando se está estudando a produtividade de robôs colaborativos. Por final, com relação aos critérios avaliados este estudo se propôs a verificar o impacto de um robô colaborativo na produtividade de uma tarefa, porém devido a baixa quantidade de estudos nessa área não foram encontradas referências sobre técnicas para tal estudo, desta forma recorreu-se a métodos utilizados em outros campos e que tem como objetivo um estudo mais simplificado da produtividade de uma tarefa através da utilização do tempo de realização.

Feitas essas considerações sobre o estudo aqui apresentado, é interessante levantar alguns pontos que podem ser melhorados ou incorporados ao escopo de estudos futuros nesta área. Primeiramente é importante avaliar mais detalhadamente o tipo de tarefa implementada e o tipo de interação que é desejada de forma a elaborar as funções de cada parte dentro da tarefa e assim determinar quais dados são importantes para o estudo. Por exemplo, neste estudo foram elaboradas tarefas que exigiam força e destreza do operador, tarefas que abordem outras

capacidades como velocidade ou precisão podem, e devem, ser implementadas e estudadas a fim de criar um melhor entendimento sobre a robótica colaborativa. Outro ponto interessante é a utilização de ferramentas estatísticas durante a coleta de dados para garantir uma distribuição normal nas medições e assim evitar que os dados sejam influenciados por resultados muito fora do padrão. Um número de repetições elevado também é interessante para estudar alguns fatores como a fadiga que um operário humano apresenta ao longo do dia e que interfere diretamente no ritmo da produção e na produtividade, visto que afasta mais capacidade real de produção da capacidade ideal.

Também é interessante que o estudo vá além da produtividade e da eficiência em questão de tempo de realização, critérios como eficiência com relação a insumos utilizados, qualidade do produto final também apresentam grande importância para a indústria e ainda não são muito estudados no âmbito da robótica colaborativa. Por exemplo, não foi escopo deste estudo, mas na tarefa de fixação de um prego numa peça de madeira, um operador humano tem muito mais dificuldade de fixar todos os pregos na mesma profundidade do que um robô colaborativo utilizado como martelo o que gera um ganho na qualidade e diminui a variação entre uma peça e outra do produto final.

Como dito diversas vezes anteriormente, cada tarefa deve ser analisada de forma independente para determinar qual função cada recurso deve ter a fim de tornar a tarefa como um todo mais produtiva. Devido a essa enorme gama de tarefas e recursos que podem ser estudados é interessante o estudo e desenvolvimento de métodos que facilitem a análise dos diversos critérios relacionados a tarefa, como os já citados produtividade, eficiência, qualidade do resultado e segurança. Esses métodos se mostrariam ótimas ferramentas para que, pelo menos, uma análise inicial e superficial fosse realizada e desse uma base para a verificação da necessidade de uma análise mais profunda e complexa da tarefa seja realizada ou o descarte da robótica colaborativa na tarefa proposta dependendo do resultado encontrado.

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo se propôs a, através do desenvolvimento e realização de algumas tarefas, analisar o impacto na produtividade causado pela utilização de robôs manipuladores de forma colaborativa. Com base nos dados expostos no capítulo anterior é possível retirar algumas conclusões sobre tal efeito. Conclui-se que a variação da OEE não está diretamente relacionada com a variação na capacidade de produção, por exemplo, no experimento III apesar da redução na capacidade houve um aumento na eficiência de quase 9%. Percebe-se que o aumento ou redução na OEE está mais relacionado à diferença entre as capacidades real e ideal de produção, ou seja, caso a introdução do robô colaborativo contribua de forma a tornar a capacidade real mais equivalente a capacidade ideal, através de uma redução no tempo médio de realização da tarefa, a OEE apresenta um aumento. Caso o robô colaborativo aumente a diferença entre as capacidades, então haverá uma redução na OEE, o que traz a conclusão que no quesito de eficiência é interessante utilizar ferramentas que permitam que o ritmo de produção seja o mais constante possível, assim o tempo médio será próximo do menor tempo registrado. No critério de produtividade a conclusão observada é um pouco diferente, porém é compatível com o apresentado por (VAHRENKAMP et al., 2016) visto que o efeito gerado na produtividade com a introdução de um robô colaborativo depende muito do tipo de tarefa a ser executada e da função que será desempenhada pelo robô. Como dito anteriormente, o fato de que não foi encontrada uma resposta única e conclusiva acerca deste assunto mostra que são necessários mais estudos aprofundados sobre o tema.

Com isso podemos concluir que a utilização de robôs manipuladores em tarefas como as propostas altera tanto a eficiência do processo quanto a produtividade seja de forma positiva seja de forma negativa. Pode-se notar, nestas mesmas tabelas, que alguns experimentos apresentam ganhos de produtividade com o uso de robôs manipuladores, enquanto que outras tarefas apresentam uma grande redução na produtividade, redução esta que pode chegar a 70%. Com base no observado nos experimentos, grande parte dessa variação se deve ao tipo de tarefa a ser executada, tarefas que exijam mais força bruta como a fixação de um prego de 5 centímetros em uma peça de madeira quando realizadas com um braço robótico são desempenhadas em tempos mais rápidos e com maior facilidade. Por outro lado, tarefas que necessitam de maior destreza, como por exemplo o fechamento de uma caixa de papelão ou parafusar uma placa de madeira, geralmente são desempenhadas muito mais rapidamente por pessoas devido a necessidade de maior flexibilidade em termos de habilidade manual. Por exemplo, na fixação do parafuso, caso o parafuso seja encaixado um pouco fora do eixo correto a porca não irá chegar ao final do curso, porém como o braço robótico, ainda, não detém as capacidades adaptativas do ser humano haverá pouco espaço para correções durante a execução das tarefas, já o ser humano utilizando ambas as mãos terá maior habilidade para corrigir a posição da porca e/ou do parafuso sem a necessidade

de reiniciar todo o processo. Esse tipo de situação aponta para o fato de que ainda existe muito espaço para o crescimento e desenvolvimento da robótica colaborativa, não como um robô seguro para os seres humanos, mas como uma ferramenta capaz de se adaptar as diferentes situações a serem encontradas em um ambiente fabril sem a necessidade de toda uma programação prévia.

Desta forma percebe-se que para a utilização de robôs colaborativos são necessários estudos detalhados sobre a tarefa a ser executada e os recursos envolvidos a fim de alocar os recursos de forma que os efeitos sobre a produtividade sejam benéficos. Como exposto anteriormente os estudos sobre planejamento de tarefas colaborativas representaram apenas 10% do total em 2016 (TSAROUCHI; MAKRIS; CHRYSOLOURIS, 2016), ou seja, ainda é uma área pouco explorada e que apresenta espaço para grandes avanços. Assim percebe-se a necessidade de trabalhos futuros mais detalhados e criteriosos no que tange a robótica colaborativa e tarefas colaborativas tanto para melhoria na produtividade como também na eficiência das tarefas desenvolvidas, visto que o mercado de robôs tende a continuar se expandindo bem como sua utilização em diversos segmentos da economia.

## REFERÊNCIAS

- AMIRSHIRZAD, N.; KAYA, O.; OZTOP, E. Synergistic human-robot shared control via human goal estimation. In: **Proceedings of the SICE Annual Conference**. Tsukuba, Japan: IEEE, 2016. p. 691–695.
- CAPUL, J.-Y.; GARNIER, O. **Dicionário de Economia e Ciências Sociais**. Lisbon, Portugal: Plátano Edições Técnicas, 1996.
- CENCEN, A. et al. Exploring human robot coproduction. In: **Emerging Technology and Factory Automation**. Barcelona, Spain: IEEE, 2015.
- DING, H. et al. Structured collaborative behavior of industrial robots in mixed human-robot environments. In: **International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)**. Madison, USA: IEEE, 2013. p. 1101–1106.
- DING, H.; SCHIPPER, M.; MATTHIAS, B. Collaborative behavior design of industrial robots for multiple human-robot collaboration. In: **International Symposium on Robotics (ISR)**. Seoul, South Korea: IEEE, 2013.
- FRYMAN, J. Updating the industrial robot safety standard. In: **International Symposium on Robotics - Proceedings of ISR/Robotik**. Munich, Germany: VDE, 2014. p. 704–707.
- MORAES, L. H.; SANTORO, M. C. Medida de eficiência em linhas de produção. In: **XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. [S.l.]: ENEGEP, 2006.
- NAKAJIMA, S. Introduction to total productive maintenance (tradução do original em japonês). **TPM Nyumon**, Productivity Press, 1988.
- NAVARRO, B. et al. An iso10218-compliant adaptive damping controller for safe physical human-robot interaction. In: **International Conference on Robotics and Automation (ICRA)**. Stockholm, Sweden: IEEE, 2016. p. 3043–3048.
- ROSENSTRAUCH, M.; KRÜGER, J. Safe human-robot-collaboration-introduction and experiment using iso/ts. In: **3rd International Conference on Control, Automation and Robotics**. Nagoya, Japan: IEEE, 2017. p. 740–744.
- SCHIPPER, M.; DING, H.; MATTHIAS, B. Optimized task distribution for industrial assembly in mixed human-robot environments – case study on io module assembly. In: **International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)**. Taipei, Taiwan: IEEE, 2014. p. 19–24.
- SHEN, Y.; REINHART, G.; TSENG, M. M. A design approach for incorporating task coordination for human-robot-coexistence within assembly systems. In: **9th Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)**. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2015.
- TSAROUCI, P.; MAKRIS, S.; CHRYSOLOURIS, G. Human–robot interaction review and challenges on task planning and programming. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, IEEE, p. 916–931, 2016.
- TUPY, O.; YAMAGUCHI, L. C. T. Eficiência e produtividade: Conceitos e medição. **Agricultura em São Paulo**, 1998.

VAHRENKAMP, N. et al. Workspace analysis for planning human-robot interaction tasks. In: **International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)**. Cancun, Mexico: IEEE, 2016. p. 1298–1303.

WANTIA, N. et al. Task planning for human robot interactive processes. In: **International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)**. Berlin. Germany: IEEE, 2016.

## **Apêndices**



## APÊNDICE A – CÓDIGO - EXPERIMENTO I

```

...os - Universidade\TCC\TCC_Vitor\TCC_v2\Tarefa_Parafuso.cs 1
1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.Linq;
4 using System.Text;
5 using System.Threading.Tasks;
6 using SoftKuka;
7 using System.IO;
8 using System.Diagnostics;
9
10 namespace TCC_Codigo
11 {
12     class Tarefa_Parafuso
13     {
14         static Kuka KR16;
15
16         static void Main (string[] args)
17         {
18             //////////////////////////////////////>
19             //INICIALIZAÇÃO DO PROGRAMA
20             //////////////////////////////////////>
21             //Setando parâmetros iniciais do Robô
22             KR16 = new Kuka(6008, 1, 0.4);
23
24             //Iniciar Comunicação com o Kuka
25             KR16.StartCommunication();
26
27             //Aguardar Comunicação
28             KR16.Ready2Receive = false;
29             while (KR16.Ready2Receive == false) { }
30             KR16.Ready2Receive = false;
31             while (KR16.Ready2Receive == false) { }
32
33             //////////////////////////////////////>
34             //INÍCIO DO CÓDIGO
35             //////////////////////////////////////>
36             //SALVANDO AS POSIÇÕES
37             //////////////////////////////////////>
38             KR16.HandGuidingON(false, false, true); //LIBERA O HAND GUIDING
39             Console.WriteLine("AJUSTE A COODERNADA Z DA TAREFA E APLIQUE FORÇA EM
40             KR16.FTCtrl); //ESCREVE NO CONSOLE A POSIÇÃO ATUAL E A FORÇA DO

```



```

...os - Universidade\TCC\TCC_Vitor\TCC_v2\Tarefa_Parafuso.cs 3
    KR16.FTctrl); //ESCREVE NO CONSOLE A POSIÇÃO ATUAL E A FORÇA DO ➤
    ROBÔ
75 while (KR16.FTctrl.Z < 30) { }
76 KR16.HandGuidingOFF();
77 Position PontoParafuso1_Aprox = KR16.ActPosition - ➤
    KR16.InitialPosition; //SALVA A POSIÇÃO DE APROXIMAÇÃO
78 Console.WriteLine("POSIÇÃO PARAFUSO 1A SALVA");
79
80 KR16.HandGuidingON(true, false, false);
81 Console.WriteLine("AJUSTE A COORDENADA X DO PARAFUSO 1 E APLIQUE ➤
    FORÇA EM Z");
82 Console.WriteLine(KR16.ActPosition - KR16.InitialPosition + "\t" + ➤
    KR16.FTctrl); //ESCREVE NO CONSOLE A POSIÇÃO ATUAL E A FORÇA DO ➤
    ROBÔ
83 while (KR16.FTctrl.Z < 30) { }
84 KR16.HandGuidingOFF();
85 Position PontoParafuso1_Final = KR16.ActPosition - ➤
    KR16.InitialPosition; //SALVA A POSIÇÃO FINAL DO PARAFUSO 1
86 Console.WriteLine("POSIÇÃO PARAFUSO 1B SALVA");
87 Console.WriteLine("APLIQUE FORÇA EM Z PARA RETORNAR A POSIÇÃO ➤
    ANTERIOR E AGUARDE O MOVIMENTO");
88 while (KR16.FTctrl.Z < 30) { }
89 KR16.SendPosition(PontoParafuso1_Aprox);
90 while (KR16.IsMoving()) { }
91
92
93
94 //////////////////////////////////////////////////////////////////// ➤
    ////////////////////////////////////////////////////////////////////
95 //REALIZANDO A TAREFA
96 using (StreamWriter file = new StreamWriter("F:\\Parafuso.txt"))
97 { //SELECIONA QUAL O CAMINHO DA FILE QUE VOCÊ IRÁ ESCREVER
98     file.WriteLine("ITERAÇÃO" + "\t" + "PARAFUSO 1");
99     double Iteração = 1;
100    while (true)
101    {
102        Stopwatch Cronometro = new Stopwatch(); //DEFINE O VARIÁVEL ➤
            CRONOMÊTRO
103        Stopwatch AtrasoGarra = new Stopwatch();
104        Console.WriteLine("COM O ROBO NA POSIÇÃO INCIAL, APLIQUE ➤
            FORÇA EM X PARA COMEÇAR");
105
106        while (KR16.FTctrl.X < 30) { } //AGUARDA O SINAL DE INÍCIO
107        Cronometro.Start(); //INICIA O CRONOMÊTRO
108
109        KR16.SendPosition(PontoPorca_Aprox); //MOVE PARA A POSIÇÃO DA ➤
            PORCA
110        while (KR16.IsMoving()) { }
111        KR16.OpenCramp(); //ABRIR GARRA

```

```
112         AtrasoGarra.Start();
113         while (AtrasoGarra.ElapsedMilliseconds < 100) { }
114         KR16.SendPosition(PontoPorca_Final); //MOVE PARA A POSIÇÃO  ➤
115         FINAL PARA PEGAR A PORCA
116         while (KR16.IsMoving()) { }
117         KR16.CloseCramp(); //FECHA GARRA
118         AtrasoGarra.Restart();
119         while (AtrasoGarra.ElapsedMilliseconds < 100) { }
120         double Tempo1 = Cronometro.ElapsedMilliseconds;
121         KR16.SendPosition(PontoParafuso1_Aprox); //MOVE PARA A  ➤
122         POSIÇÃO DO PARAFUSO 1
123         while (KR16.IsMoving()) { }
124         KR16.SendPosition(PontoParafuso1_Final);
125         while (KR16.FTCtrl.Z < 30) { } //ESPERA SINAL DE TÉRMINO DO  ➤
126         USUÁRIO
127         KR16.OpenCramp();
128         double Tempo2 = Cronometro.ElapsedMilliseconds;
129         while (KR16.IsMoving()) { }
130         KR16.SendPosition(PontoParafuso1_Aprox);
131
132         double Tempo7 = Cronometro.ElapsedMilliseconds;
133         file.WriteLine(Iteração + "\t" + Tempo2);
134         Cronometro.Stop();
135         Cronometro.Reset();
136         AtrasoGarra.Stop();
137         AtrasoGarra.Reset();
138         KR16.CloseCramp();
139         Iteração = Iteração + 1;
140         while (KR16.FTCtrl.X < 30) { }
141         KR16.SendPosition(PosInicial);
142         while (KR16.IsMoving()) { }
143     }
144 }
145 }
146 }
147 }
148 }
```

## APÊNDICE B – CÓDIGO - EXPERIMENTO II

```

...tos - Universidade\TCC\TCC_Vitor\TCC_v2\Tarefa_Martelo.cs 1
1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.Linq;
4 using System.Text;
5 using System.Threading.Tasks;
6 using SoftKuka;
7 using System.IO;
8 using System.Diagnostics;
9
10 namespace TCC_Codigo
11 {
12     class Tarefa_Martelo
13     {
14         static Kuka KR16;
15
16         static void Main(string[] args)
17         {
18             //////////////////////////////////////////////////////////////////// ➤
19             //INICIALIZAÇÃO DO PROGRAMA
20             //////////////////////////////////////////////////////////////////// ➤
21             //Setando parâmetros iniciais do Robô
22             KR16 = new Kuka(6008, 2, 0.4);
23
24             //Iniciar Comunicação com o Kuka
25             KR16.StartCommunication();
26
27             //Aguardar Comunicação
28             KR16.Ready2Receive = false;
29             while (KR16.Ready2Receive == false) { }
30             KR16.Ready2Receive = false;
31             while (KR16.Ready2Receive == false) { }
32
33             //////////////////////////////////////////////////////////////////// ➤
34             //INÍCIO DO CÓDIGO
35             //////////////////////////////////////////////////////////////////// ➤
36
37             //SALVANDO A POSIÇÃO DOS PREGOS
38             KR16.HandGuidingON(false, false, true); //AJUSTANDO A ALTURA DO BRAÇO
39             Console.WriteLine("AJUSTE A COORDENADA Z DA TAREFA E APLIQUE FORÇA EM ➤
40             X");
41             Console.WriteLine(KR16.ActPosition - KR16.InitialPosition); //ESCREVE ➤
42             NO CONSOLE A POSIÇÃO ATUAL DO ROBÔ
43             while (KR16.FTCtrl.X < 30) { }
44             KR16.HandGuidingOFF();
45
46         }
47     }
48 }

```



```
82         while (KR16.FTCtrl.Z < 30) { } //AGUARDA O SINAL DE INÍCIO
83         Cronometro.Start(); //INICIA O CRONOMÊTRO
84
85         while (KR16.FTCtrl.X < 30) { } //AGUARDA COMANDO DO USUÁRIO ➤
86         PARA SE MOVER
87
88         KR16.SendPosition(Prego1_aprox); //MOVE PARA A POSIÇÃO ➤
89         PROGRAMADA DO PREGO 1
90         while (KR16.IsMoving()) { }
91         while (KR16.FTCtrl.X < 30) { } //AGUARDA COMANDO DO USUÁRIO ➤
92         PARA MARTELAR O PREGO
93         KR16.SendPosition(Prego1_final); //MARTELA O PREGO 1
94         while (KR16.IsMoving()) { }
95         while (KR16.IsMoving()) { }
96         double Tempo1 = Cronometro.ElapsedMilliseconds;
97         //KR16.MaxSpeed = 4;
98
99
100        while (KR16.FTCtrl.X < 30) { }
101
102        Cronometro.Stop();
103        Cronometro.Reset();
104        file.WriteLine(Iteracao + "\t" + Tempo1);
105        KR16.SendPosition(Pos_Inicial);
106        while (KR16.IsMoving()) { }
107        Iteracao = Iteracao + 1;
108    }
109 }
110 }
111 }
112 }
```

```
1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.Linq;
4 using System.Text;
5 using System.Threading.Tasks;
6 using System.IO;
7 using System.Diagnostics;
8
9 namespace Kuka_SampleCode_JoaoVRSoares
10 {
11     class Program
12     {
13         static Kuka KR16;
14
15         static void Main(string[] args)
16         {
17             //////////////////////////////////////////////////////////////////// ➤
18             //INICIALIZAÇÃO DO PROGRAMA
19             //////////////////////////////////////////////////////////////////// ➤
20             //Setando parâmetros iniciais do Robô
21             KR16 = new Kuka(6008, 2, 0.4);
22
23             //Iniciar Comunicação com o Kuka
24             KR16.StartCommunication();
25
26             //Aguardar Comunicação
27             KR16.Ready2Receive = false;
28             while (KR16.Ready2Receive == false) { }
29             KR16.Ready2Receive = false;
30             while (KR16.Ready2Receive == false) { }
31
32             //////////////////////////////////////////////////////////////////// ➤
33             //INÍCIO DO CÓDIGO
34             //////////////////////////////////////////////////////////////////// ➤
35             //SALVANDO AS POSIÇÕES
36             KR16.HandGuidingON(false, false, true); //FIXANDO A COORDENADA Z DA ➤
37             TAREFA
38             Console.WriteLine("FIXAR A COORDENADA Z DA TAREFA");
39             Console.WriteLine(KR16.ActPosition - KR16.InitialPosition + "\t" + ➤
40                 KR16.FTCtrl);
41             while (KR16.FTCtrl.X < 30) { }
42             KR16.HandGuidingON(true, true, false);
43             Console.WriteLine("FIXAR AS COORDENADAS X E Y DA TAREFA");
44             Console.WriteLine(KR16.ActPosition - KR16.InitialPosition + "\t" + ➤
45                 KR16.FTCtrl);
```

**APÊNDICE C – CÓDIGO - EXPERIMENTO III**

```

43     while (KR16.FTCtrl.Z < 30) { }
44     KR16.HandGuidingOFF();
45     Position Posicao1 = KR16.ActPosition - KR16.InitialPosition; //SALVA A POSIÇÃO INICIAL
46     Console.WriteLine("POSIÇÃO 1 SALVA");
47
48     KR16.HandGuidingON(true, true, false);
49     Console.WriteLine("AJUSTAR A POSIÇÃO DE AJUDA");
50     Console.WriteLine(KR16.ActPosition - KR16.InitialPosition + "\t" + KR16.FTCtrl);
51     while (KR16.FTCtrl.Z < 30) { }
52     KR16.HandGuidingOFF();
53     Position Posicao2 = KR16.ActPosition - KR16.InitialPosition; //SALVA A POSIÇÃO DE APROXIMAÇÃO
54     Console.WriteLine("POSIÇÃO 2 SALVA");
55
56
57     while (KR16.FTCtrl.Z < 30) { }
58     KR16.SendPosition(Posicao1);
59     while (KR16.IsMoving()) { }
60
61     ////////////////////////////////////////
62     //REALIZANDO A TAREFA
63     using (StreamWriter file = new StreamWriter("C://Caixa.txt"))
64     {
65         file.WriteLine("TEMPO TOTAL");
66
67         while (true)
68         {
69             Stopwatch Cronometro = new Stopwatch(); //DEFINE O VARIÁVEL CRONÔMETRO
70             Stopwatch Atraso = new Stopwatch();
71
72             while (KR16.FTCtrl.X < 30) { }
73             Cronometro.Start();
74             KR16.SendPosition(Posicao2);
75             while (KR16.IsMoving()) { }
76             while (KR16.FTCtrl.X < 30) { }
77             double Tempo1 = Cronometro.ElapsedMilliseconds;
78             KR16.SendPosition(Posicao1);
79             double Tempo2 = Cronometro.ElapsedMilliseconds;
80             while (KR16.IsMoving()) { }
81
82             Cronometro.Stop();
83             Cronometro.Reset();
84             file.WriteLine(Tempo2);
85
86         }

```

```
87         file.Close();
88     }
89 }
90 }
91 }
92
```



## APÊNDICE D – FOTOS DOS EQUIPAMENTOS E COMPONENTES

Figura 19: Apoios Verticais Utilizados



Fonte: Próprio Autor

Figura 20: Parafusos Allen para fixação dos apoios



Fonte: Próprio Autor

Figura 21: Parafusos utilizados no Experimento I



Fonte: Próprio Autor

Figura 22: Chave 13mm utilizada no Experimento I



Fonte: Próprio Autor

Figura 23: Pregos utilizados no Experimento II



Fonte: Próprio Autor

Figura 24: Martelo utilizado no Experimento II



Fonte: Próprio Autor