

# Em Direção a Smart Working: Integração de Simulação Computacional, Robótica e Medição em Processo no Projeto de uma Célula de Manufatura

Otávio Detanico Bonatto e Ivandro Cecconello

## Resumo

Indústria 4.0 é o termo utilizado para representar a quarta revolução industrial. Nesta, diversas tecnologias são utilizadas para alavancar melhores resultados em sistemas de produção, incluindo simulação, automação e conectividade de informações. Este artigo apresenta um estudo de viabilidade de automação das atividades operacionais, em um grupo de tornos CNC, para operação de usinagem de engrenagens. Foram propostos quatro sistemas distintos, que utilizam de robôs colaborativos e máquina de medição tridimensional conectados. Estes foram avaliados por simulações de eventos discretos, com o software Flexsim®, que confirmaram a superioridade do sistema proposto com um operador, robô e máquina de medição, para três tornos. Os resultados apresentam ganhos em produtividade e redução de custos, ao utilizar das tecnologias de indústria 4.0.

## Palavras-chave

Indústria 4.0, Simulação de eventos discretos, Manufatura inteligente, Automação, Robôs Industriais

# Towards Smart Working: Integration of Computer Simulation, Robotics and Measurement in Process in the Design of a Manufacturing Cell

## Abstract

Industry 4.0 is the term used to represent the fourth industrial revolution. In this, several technologies are used to improve results in production systems, including simulation, automation and connectivity. This article presents a feasibility study of automation of operational activities, in a group of CNC lathes, for gears machining operations. Four different systems have been proposed, using collaborative robots and a connected three-dimensional measuring machine. These were evaluated by discrete event simulations, with the Flexsim® software, which confirmed the superiority of the proposed system with one operator, robot and a measuring machine, for three lathes. The results present gains in productivity and cost reduction, using industry 4.0 technologies.

## Keywords

Industry 4.0, Discrete Event Simulation, Smart Manufacturing, Automation, Industrial Robots

## I. INTRODUÇÃO

A quarta revolução industrial, ou indústria 4.0, está progressivamente sendo inserida nos mais diversos setores. A tendência de desenvolvimento industrial baseado na introdução das tecnologias de indústria 4.0 vêm sendo adotadas por praticamente todos países e companhias industrializadas [1]. O conceito em questão conta com o uso de tecnologias digitais para aquisição de dados em tempo real e sua análise, fornecendo informações úteis sobre o sistema de manufatura [2]. Para se tornarem *smart*, as companhias de manufatura devem implementar métodos inteligentes de produção e visar um negócio onde informação é compartilhada entre produtos e máquinas [3].

Nos últimos 50 anos o uso de robôs industriais tem sido amplamente utilizado na manufatura, ao substituir humanos

em diversas atividades [4]. A automação baseada no uso de robôs passou por suas próprias revoluções, entre estas integrando tecnologias de sensores para segurança, mobilidade através de manipuladores e integração de sistemas de percepção e inteligência [5]. A implementação de sistemas robotizados normalmente apresenta vantagens financeiras em relação ao uso de mão de obra, porém carregam um custo considerável em sua implementação. Segurança, produtividade, qualidade e flexibilidade são alguns dos pontos que devem ser considerados ao comparar aplicações de sistemas de manufatura [6]. As variáveis relacionadas às aplicações podem ser demais para a tomada de decisão intuitiva, que deve avaliar a presença de múltiplos equipamentos, robôs, instrumentos de medição, movimentação, variedade de produtos e interferência humana.

E-mails: odbonatt@ucs.br, iceccone@ucs.br

Data de envio: 30/11/2020  
Data de aceite: 14/12/2020

<http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v8iss2p206>

Desenvolver a configuração de novos sistemas de manufatura e planos de produção requer a avaliação de diversas variáveis complexas e co-dependentes [7]. Neste contexto, o termo manufatura virtual tem aparecido frequentemente em estudos recentes como resultado do aumento do interesse do uso de realidade virtual para simulação de sistemas de manufatura, que provou sua efetividade ao reduzir lacunas entre as diversas áreas de especialidade profissional [8]. Uma das principais razões para sua popularidade é a flexibilidade em visualizar e modelar os diversos elementos de sistemas industriais [6].

Este trabalho foi motivado pela necessidade de validação técnico e econômica para aplicação de automação, sistemas de coleta de dados e auto-correção de equipamentos de usinagem, presentes em sistemas de manufatura já estabelecidos. Será confrontada e avaliada a hipótese de que o investimento em robôs industriais gera um retorno econômico viável [9]. Assim como a aplicação de sistemas automáticos de medição aplicados ao chão de fábrica. A aplicação correta de uma simulação 3D de eventos discretos pode retratar precisamente a aparência e funcionalidade de um equipamento de manufatura, sendo que tal ferramenta tem o potencial de prevenir retrabalhos e indicar soluções ótimas e baixos custos [10].

Dado as justificativas anteriores, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar técnica e economicamente a transformação de uma estação de trabalho em *smart working*.

## II. REFERENCIAL RETÓRICO

### A. Indústria 4.0

A quarta revolução industrial, ou indústria 4.0, foi idealizada em 2011 pelo governo da Alemanha, junto a universidades e companhias privadas [2]. A idealização gira em torno de aplicação de novas tecnologias a fim de aplicar o conceito de *Smart Manufacturing*, a qual utiliza como base a digitalização de informações e utilização de dados para tornar a indústria mais eficiente. As principais tecnologias habilitadoras de indústria 4.0 são (1) Simulação; (2) Internet Industrial das Coisas (IIOT); (3) Robótica autônoma; (4) *Big data* e *analytics*; (5) Computação em nuvem; (6) Manufatura aditiva; (7) Realidade aumentada; (8) Integração horizontal e vertical de software; (9) Segurança cibernética.

A aplicação isolada das tecnologias listadas já pode trazer resultados às indústrias, as quais focam no avanço da aplicação destas, conforme sua necessidade. Porém, os benefícios da aplicação das tecnologias podem variar ao serem aplicadas em sinergia [11]. Esta integração resulta em um sistema conhecido por *Cyber physical systems* (CPS) [12]. Como em uma aplicação onde o conjunto de dados coletados por sensores (IIOT e big data), são aplicados a modelos de realidade virtual (simulação), para previsão de resultados (*analytics*) e autocorreção de variáveis físicas.

As tecnologias que compõem o conceito de indústria 4.0 podem ser divididas em duas camadas: tecnologias de frente e de base. A primeira refere-se às aplicações que interagem diretamente com os processos operacionais e pode ser dividida entre *Smart Manufacturing*, *Smart Product*, *Smart*

*Supply Chain* e *Smart Working*. Na segunda camada são classificadas tecnologias que proveem conectividade e inteligência à frente [2].

### B. Smart Working

O termo *Smart Working* é normalmente utilizado para descrever métodos modernos de trabalho, onde as pessoas se dispõem da necessidade de formalização de horários e locais e passam a trabalhar com atividades focadas no cliente e em agregar valor ao negócio [13]. Ao aplicar o conceito a atividades operacionais de chão de fábrica há uma abordagem diferente. Neste contexto *Smart Working* se refere às novas maneiras que trabalhadores executarão suas atividades, com base no uso de tecnologias emergentes [2]. O objetivo deste conjunto de tecnologias é melhorar as condições de trabalho aos trabalhadores para alcançar maior produtividade [14].

No contexto de indústria 4.0 diversos elementos tangíveis e intangíveis emergiram para criar um mecanismo integrado sociotécnico, incluindo homem e máquina [15]. Para executar esta integração são utilizadas tecnologias que buscam a rastreabilidade das atividades operacionais, disponibilidade de informação em tempo real, utilização de realidade aumentada (AR), realidade virtual (VR) e robótica colaborativa [2].

Na aplicação dos dois primeiros pontos são utilizados softwares de sensoriamento, SCADA e MES, a fim de monitoramento e disponibilidade de informações [11] (ex.: OEE, controle estatístico do processo, status do trabalho). Ferramentas virtuais, como simulação, AR e VR são parte de *Smart Manufacturing* por auxiliarem na tomada de decisão [13]. Diferente da robótica convencional, que é aplicada há décadas, a robótica colaborativa busca estreitar o contato entre trabalhador e máquina [15]. Como ponto em comum, as tecnologias abordadas proveem suporte para as diferentes necessidades do sistema de produção com indústria 4.0, focando na integração entre o sistema de manufatura e os trabalhadores [2].

### C. Simulação de Eventos Discretos

Uma simulação consiste na aplicação de técnicas matemáticas, aplicadas para imitar o funcionamento de uma atividade, operação ou processo. Para facilitar a aplicação das técnicas, que podem abranger centenas de variáveis, e auxiliar no projeto de instalações industriais com flexibilidade e recursos visuais, são utilizados softwares de simulação computacional.

O objetivo de uma simulação computacional é prever com precisão algum comportamento do universo físico, porém, somente isto não torna uma simulação útil [16]. Os resultados de uma simulação são encontrados quando a informação gerada por este é utilizada em uma aplicação. Exemplos desta são a definição de escolhas de um projeto, a criação de sequência de um processo, ou até mesmo a aplicação simultânea de modificações em componentes físicos, com base em resultados previstos pelo simulador.

O processo de desenvolver uma simulação é dividido em quatro atividades principais, sendo estas: modelagem

conceitual, codificação do modelo, experimentação e implementação [2] [17].

#### D. Robótica

A colaboração entre humanos e robôs tem um papel importante em *smart working*, em função de sua contribuição para maior produtividade e aumento de eficiência [4]. As aplicações de indústria 4.0 buscam ampliar o uso da robótica, através de conectividade entre máquinas (M2M) e utilização de robôs colaborativos, que permitem homens e equipamentos dividirem o mesmo espaço de trabalho de maneira segura [18].

Um robô industrial convencional possui entre suas principais características a quantidade de graus de liberdade, alcance, capacidade de carga e caracterização dos manipuladores. Aplicações de robótica colaborativa consistem na utilização de robôs que possuem sensoriamento e programação inteligente, que reduzam velocidade e realizem paradas imediatas em função de proximidade ou contato com humanos [4].

O design de manipuladores funcionais para uma automação é um dos critérios mais complexos na robótica [19]. Em muitas aplicações é necessário que um único robô atue em diferentes tarefas, o que aumenta a complexidade dos manipuladores, que devem ser flexíveis para manter alta produtividade.

#### E. Medição em Processo

Uma atividade importante da maior parte dos trabalhadores de indústria é garantir a qualidade dos produtos fornecidos. Para tal, em muitos casos é necessária a avaliação das características do produto após a operação. Esta atividade permite identificar falhas no processo e corrigi-las antes que o problema seja agravado. Equipamentos de medição são elementos comuns encontrados em indústrias de manufatura, como trenas, paquímetros e micrômetros. Em aplicações de indústria 4.0 há duas principais tecnologias aplicáveis, automação das atividades de medição e comunicação entre máquinas [20].

O uso de ferramentas de medição digitais pode ser utilizado para realizar um preciso controle estatístico do processo. Através da conexão imediata entre equipamentos e software MES, as informações sobre a qualidade das operações podem ser disponibilizadas e utilizadas para tomada de decisão. Estas podem ser feitas em tempo real, ao conectar o sistema MES diretamente aos equipamentos que realizam as operações e programá-los a realizar correções dimensionais com base nas leituras. Juntando isto ao uso de robótica para manipulação dos produtos é criado um ambiente de *Smart Working*, onde as atividades operacionais são reduzidas e facilitadas em função da qualidade de informação e autonomia dos equipamentos [4].

### III. MÉTODO

A execução deste projeto de estudo foi dividida em seis partes, conforme Figura 1: levantamento de dados operacionais, elaboração de propostas de trabalho, simulação

de estado atual, simulação de estado futuro, avaliação de resultados e análise econômica.

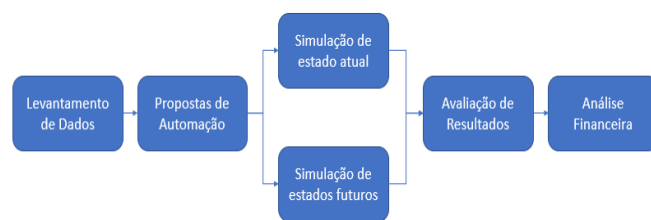


Figura 1 – Método

### IV. DESENVOLVIMENTO

O objeto de estudo é uma existente célula de manufatura que realiza operações de torneamento de acabamento em engrenagens já endurecidas por tratamento térmico. A seguir são apresentadas as etapas planejadas pelo método, as quais buscam atingir o objetivo deste trabalho.

#### A. Levantamento de Dados

A simulação de um evento discreto requer que a informação seja representativa do sistema físico real. Nesta etapa de avaliação foi realizada a cronoanálise das atividades operacionais, assim como a concatenação das informações de processo relacionadas às operações dos equipamentos avaliados. A célula de operação é composta por três tornos de usinagem CNC de mesmo modelo e capacidade. Foram identificados 118 produtos com operações nestes equipamentos, sendo que, para cada item há o registro de informação de tempo de usinagem, operação e demanda cadastrados no ERP. Ao cruzar estas informações foi calculado uma carga de máquina de 70%, ou seja, os equipamentos necessitam de 70% do tempo disponível em operação para atender à demanda de produção.

Um projeto de automação ganha maior complexidade quando se aumentam as variáveis de trabalho. Neste caso, quanto maior a quantidade de itens automatizados, maior a complexidade. Para otimizar a avaliação, foram selecionados os itens de maior demanda dos equipamentos, em quantidade suficiente para que fossem automatizados dois tornos de usinagem, e estes mantenham uma carga de máquina de 85% em 16 horas de trabalho (dois turnos). A Tabela 3 Tabela 2 apresenta as informações referentes aos itens selecionados.

As atividades operacionais cíclicas e acíclicas das operações avaliadas podem ser resumidas entre carga, descarga e medição. Estas atividades foram acompanhadas, filmadas e analisadas, para identificar o tempo de execução destas. A Tabela 1 demonstra quais são as atividades envolvidas, suas frequências e tempos de execução.

Atividade	Frequência	Execução (s)
Desabastecer e Abastecer equipamento	1/1	25
Medição de Diâmetro Interno	1/5	7
Medição de Altura	1/5	60
Medição de Rugosidade	1/10	68
Medição de Batimento e Paralelismo	1/20	210

Tabela 1 - Atividades Operacionais

### B. Propostas de Automação

Com as informações dos tempos das atividades e itens envolvidos, se torna possível levantar e avaliar hipóteses de sistemas de trabalho automatizados, que melhor atenderiam à demanda de manufatura. A análise de carga de máquina demonstrou que poucos itens são o suficiente para ocupar dois equipamentos. Esta avaliação nos permite limitar o escopo de automação a somente dois dos três tornos da célula, sendo que o torno não automatizado manterá a flexibilidade para usar itens de baixo volume de demanda. Ao avaliar a execução das atividades operacionais fica claro que o tempo de atividades manuais é ocupado em grande parte por inspeção. Tais atividades são executadas em função de normas e desempenho dos equipamentos, questões não trabalhadas neste projeto.

Com o objetivo inicial de aumentar a produtividade da célula, foram propostas quatro opções de automação, sendo estas:

- Utilizar um robô para alimentar dois tornos;
- Utilizar um robô para alimentar dois tornos e um equipamento de medição autônomo;
- Utilizar dois robôs para alimentar dois tornos;
- Utilizar dois robôs para alimentar dois tornos e um equipamento de medição autônomo.

Entre as opções levantadas há diversas características e tecnologias que precisam ser definidas para compor o sistema de trabalho. Entre estas é importante destacar o tipo de robô, garra de fixação da peça, sistema de segurança, método de alimentação e descarga e sistema de medição em processo.

### C. Robôs

Entre as opções de robôs industriais existentes a mais adequada à operação é um articulado com seis graus de liberdade, o mais comum a aplicações nas indústrias. Existem

diversos modelos e fabricantes com opções de robôs como estes, porém a primeira avaliação foi de escolha de um robô articulado convencional ou colaborativo. Entre as opções de robôs colaborativos avaliadas foi identificada a limitação de carga de 16 kg. Conforme a Tabela 3/Tabela 2, o item de maior peso possui 9,4 kg. Mesmo com a adição do peso de uma garra ao sistema, esta opção de robô colaborativo se torna viável ao sistema, porém com a limitação de manipular somente uma peça por vez. Com o intuito de reduzir o tempo de carga dos tornos, foram escolhidos robôs articulados convencionais, que permitam a manipulação de duas peças simultaneamente. Tal decisão limita a escolha de robôs aos de capacidade superior a 25 kg.

### D. Garra de Fixação

A decisão sobre o método de manipulação das peças possui relação com a geometria dos itens e o sistema de fixação dos equipamentos. Os tornos deste sistema de trabalho possuem fixação com placa hidráulicas e castanhas, que agarram as peças pelo diâmetro externo, além de possuírem ponteira, para engrenamento. A solução mais compatível à aplicação foi de garras que manipulem as engrenagens pelo diâmetro interno. Esta solução se mostrou mais viável e flexível à aplicação, em função de que a amplitude dimensional desta característica é menor que ao diâmetro externo. Desta maneira foi definido que as garras mais adequadas seriam compostas por castanhas pneumáticas, com três pontos de fixação e expansão dentro de dois agrupamentos dimensionais, conforme Tabela 2.

Sistema	Range (mm)
Sistema de Fixação 1	40 – 70
Sistema de Fixação 2	70 - 110

Tabela 2 – Abrangências das garras manipuladoras.

ITEM	Ø Interno (mm)	Ø Externo (mm)	Altura (mm)	Volume Mensal (pçs)	TP (pçs/h)	Tempo usinagem (s)	Tempo Total (h)	Ocupação 2T	Ocupação Total 2T
A1	82,3	237,0	59,7	3408	20	156	167	50%	50%
A2	63,5	194,3	32,6	2824	40	70	71	21%	71%
A3	58,1	162,4	26,2	1993	40	70	50	15%	86%
A4	81,8	124,8	74,0	1587	42	65	37	11%	97%
A5	73,2	128,6	42,7	1474	34	85	43	13%	109%
A6	99,0	153,9	78,0	1445	30	99	48	14%	124%
A7	58,1	186,7	27,0	1252	40	70	31	9%	133%
A8	50,8	172,2	46,8	1227	50	52	25	7%	140%
A9	82,3	238,0	59,6	1105	20	156	54	16%	156%
A10	99,0	153,5	78,0	613	30	100	20	6%	163%
A11	73,2	171,5	52,7	321	27	113	12	4%	166%
A12	54,6	179,0	43,9	263	22	142	12	4%	170%

Tabela 3 – Características dos Itens

Desta forma, as garras foram idealizadas com duas fixações, de maneira que duas peças possam ser manipuladas simultaneamente, a fim de otimizar os movimentos do robô e

reduzir a espera dos equipamentos durante movimentação. Apesar da solução ser a mais flexível, esta apresenta limitações adicionais ao ser aplicada às propostas de

automação a) e b). Nestes casos o robô deverá atuar de forma que cada lado da garra atenda a um item diferente, perdendo a característica de otimização da operação.

#### E. Método de alimentação

As propostas de automação levantadas buscam reduzir a carga de trabalho operacional no processo, porém não a eliminar. Ao automatizar a carga da máquina com um robô, o operador não se torna mais um limitante a esta atividade, porém o robô ainda deverá estar recebendo as peças através de um sistema mecânico, que será monitorado manualmente. Para tal foram feitas três propostas, sendo estas.

- a) Mesa giratória: consiste de uma mesa redonda com posições variadas para distribuição dos itens, sendo que metade da mesa estaria disponível para o operador e metade ao robô. Neste caso os itens poderiam ser empilhados verticalmente em n posições, às quais deverão ser identificadas pelo robô. Em funcionamento, o operador deve manter seu lado abastecido, antes que o lado do robô fique vazio;
- b) Esteira Linear: permite distribuir as peças horizontalmente em uma fila sequencial para abastecimento. Neste caso o robô teria acesso somente à primeira peça na fila, enquanto o operador tem acesso a abastecer a ponta da esteira. Em funcionamento, o operador não pode permitir que a esteira esvazie.
- c) Carro duplo com roldanas: consiste na disponibilidade de dois carros de peças onde um serve de espera e outro estaria disponível ao robô. Estes carros possuem placas de identificação de posicionamento personalizados, e o robô tem acesso a qualquer uma das peças a qualquer momento. Em funcionamento o operador deve sempre manter o carro de espera abastecido, antes que o robô esvazie o seu.

Entre os três sistemas avaliados a mesa giratória se destaca pela maior capacidade de armazenamento de peças, por empilhar e distribuir, porém, perde controle em relação ao carro duplo e a autonomia do sistema ser somente metade da capacidade. A esteira linear possui a menor capacidade de carga entre os três, porém sua autonomia é de 100% do abastecido, além disso o sistema só possui controle sob uma peça por vez. Carro duplo possui o maior controle, porém a menor autonomia entre os três.

Entre estes a melhor opção avaliada foi a mesa giratória, em função da baixa necessidade de controle e da dimensão dos itens, os quais precisam ser empilhados para ganhar autonomia superior a 30 minutos, com um sistema que não extrapole o espaço disponível.

#### F. Sistema de medição em processo

O sistema de medição foi pensado de maneira que houvesse integração entre os sistemas. A intenção deste, além de reduzir a carga operacional, é de coletar informações sobre as peças fabricadas, informar a um sistema online para controle estatístico do processo (CEP) e ao equipamento, para que este realize correção de sua programação para buscar atender às características esperadas. Foram avaliadas quatro opções de

medição automática de dimensões. Duas destas foram descartadas por não atenderem a todas as características necessárias para o funcionamento do sistema, ou representaram deficiências à operação. Em todos os casos a característica de medição de rugosidade não foi possível de ser feita de maneira automática.

A primeira opção foi de incluir apalpadores à torre dos tornos, com o intuito de realizar a medição em processo, sendo esta manipulada pelo próprio movimento disponível do equipamento. Esta opção não foi viável por não alcançar todos os pontos necessários das peças, com somente um apalpador. Apesar da solução ser possível, não há posições disponíveis suficientes nas torres dos tornos avaliados, para todos os apalpadores necessários. Além disto este sistema iria requisitar tempo extra do equipamento, assim aumentando a carga de máquina destes.

A segunda opção foi desenvolver dispositivos de medição e fixação estáticos, com ponteiras de medição que enviam as características medidas ao contato com a peça. Estes dispositivos seriam abastecidos pelo robô e funcionariam de maneira independente aos tornos. Por não possuírem movimento este sistema se demonstrou incapaz de medir características de batimento ou paralelismo. Além disto este sistema não seria robusto o suficiente à aplicação por requerer diversas adequações a cada item utilizado, além de que seriam necessários diversos dispositivos para todos os itens, e ao menos dois precisariam estar em utilização durante a operação. Os robôs também precisariam ser programados a cada troca de itens e os dispositivos calibrados. A Figura 2 apresenta um exemplo de tais dispositivos.

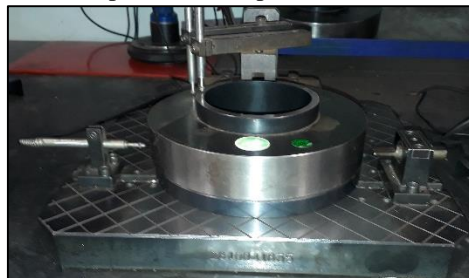


Figura 2 – Dispositivo de Medição Fixo.

As melhores soluções encontradas foram de máquinas tridimensionais autônomas, que possuem sistema de movimentação própria dos apalpadores e podem ser conectadas ao robô e ao torno, para integrar o sistema de funcionamento dos três equipamentos. Tais equipamentos possuem alta sensibilidade às variações ambientais, como temperatura, vibração e sujidade, porém a tecnologia das mesmas vem evoluindo nos últimos anos a fim de identificar estas variações e se auto corrigir, o que viabiliza a aplicação no chão de fábrica, em alguns casos.

Foram identificados três equipamentos que atendem à aplicação, apresentados no apêndice, sendo que dois desses realizam a medição das peças pelo contato, e um destes por comparação, o que necessita de uma peça par com dimensões ideais.

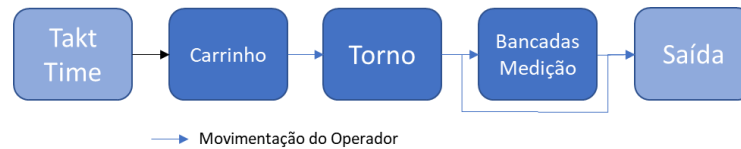


Figura 3 – Fluxo de atividades sistema atual

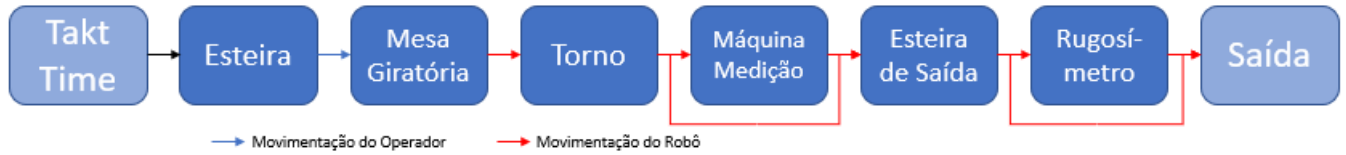


Figura 4- Fluxo de atividades propostas b) e d)

Em função da grande quantidade de itens do sistema, foi escolhido trabalhar com equipamentos de medição, mesmo que o tempo de medição por comparação ter sido inferior a este.

O tempo de execução do conjunto de medidas foram testados nas máquinas tridimensionais, conforme Tabela 4.

Frequência	Tempo (s)
1/5	165
1/10	190
1/20	200

Tabela 4 – Tempo de Execução das Medições

G. Simulação do Estado atual e futuro

A avaliação de proposta de projeto foi feita a partir de simulações de eventos discretos. A fim de validar estas, é necessário comprovar que o sistema simulado é coerente à aplicação, assim como a comparação é útil a fim de medir as variações de resultado. A execução da simulação foi feita utilizando o software FlexSim®. A preparação da simulação foi feita com base no levantamento de dados e nas propostas de automação. O desenvolvimento da simulação pode ser dividido entre preparação do layout, conexões de fluxo, conexões de execução, atribuição de tempos e frequências, dashboard de resultados e recursos visuais.

H. Preparação do layout

Diversos eventos monitorados na simulação são calculados em função de variáveis de distância e velocidade. Ao preparar o layout, estas variáveis devem ser consideradas para que o modelo represente a situação real de trabalho. Entre estas foram medidas distância entre equipamentos, ferramentas, bancadas, assim como as dimensões físicas destes. As características de operadores são variáveis, em função do sistema ser operado por diferentes pessoas. Portanto, foram utilizados padrões generalizados para a simulação, assim como dados medidos por observação, conforme Tabela 5.

Característica	Valor
Velocidade máxima	2 m/s
Aceleração	1 m/s <sup>2</sup>
Desaceleração	1 m/s <sup>2</sup>
Capacidade de Carga	1 peça
Tempo para levantar peças	1 s

Tabela 5 – Características do Operador

Entre a simulação do estado atual e as propostas de automação, cinco layouts foram preparados. O layout de estado atual foi elaborado utilizando as dimensões atuais da célula de trabalho. As simulações de estado futuro utilizaram de dimensões semelhantes, com adaptações às distâncias e utilização de dimensões propostas para os demais equipamentos.

A Figura 5 apresenta o layout montado da proposta d) de automação, o qual possui a maior quantidade de elementos entre as propostas. Neste caso foram representadas barreiras (em amarelo), que indicam o isolamento de segurança dos equipamentos. Tal elemento é significativo à simulação para limitar a movimentação do operador. Todos os elementos físicos simulados foram declarados como objetos, para que não seja permitida colisão ou atravessamento entre si, desta maneira a simulação se torna mais real, ao representar os caminhos e movimentações reais ou esperados.

Às propostas de automação também foram atribuídos elementos de carregamento do sistema, como mesas e esteiras, às quais serão a interface entre robô e operador. Para estes elementos foram atribuídos limites de capacidade de 20 peças. Este valor foi definido com base na autonomia operacional mínima esperada. Por consequência, este valor é refletido na dimensão real dos elementos, calculados com base na média ponderada das dimensões dos itens. Com isso, podemos salientar que a capacidade varia de acordo com o produto simulado, porém segue o valor esperado.

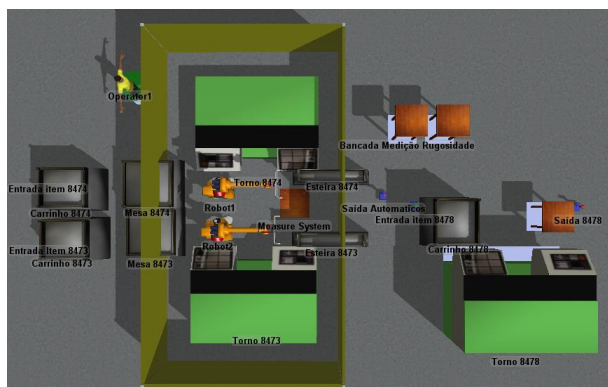


Figura 5 – Layout da Proposta d) de Automação

### I. Conexões de Fluxo e Execução

A declaração das conexões entre elementos é um passo importante da simulação, pois define a sequência, priorização e reflete na limitação de capacidade dos recursos.

O primeiro ponto a ser conectado não inicia em um elemento físico, que é a entrada de peças. Os itens a serem usinados surgem do elemento definido como *Takt Time*. Este foi atribuído com o valor de tempo de aparição de cada peça, calculado a partir da demanda apresentada na Tabela 3 e o tempo disponível. Para simular a capacidade total de produção são atribuídos valor baixos de *takt*, assim o sistema não é limitado pela demanda.

Todas as movimentações entre objetos precisam ser declaradas, e quando executadas por um elemento auxiliar (ex.: operador ou robô), estes também são conectados. As conexões de atividades operacionais foram feitas com a declaração de prioridades, sendo que para o estado futuro o foco do operador é de manter os equipamentos automatizados sempre em funcionamento, portanto esteiras de entrada e saída ganharam maior prioridade ao operador. A Figura 3 representa as conexões entre atividades do sistema atual e a Figura 4 do estado futuro.

### J. Atribuição de Tempos e Frequências

Conforme apresentado nas Tabelas 1, 2 e 4, as atividades operacionais e automatizadas podem ser representadas pelo seu tempo e frequência de execução. Os eventos cíclicos têm seu tempo declarado para todas as sequências de atividades. Para os eventos acíclicos foi utilizada a opção de execução aleatória, com base em probabilidade.

Desta forma a atividade irá acontecer ou não, de acordo com a frequência de execução conforme Tabela 1 e Tabela 4. Por exemplo, se atividade de medição ocorre uma vez a cada cinco peças, a probabilidade de uma peça ser enviada à máquina de medição é de 20%. No equipamento de medição há três opções, com isso há 50% de chance de a atividade levar 190 segundos e 25% de 200 segundos. Para as demais atividades acíclicas são seguidas regras semelhantes. Este método possui maior semelhança ao sistema real ao ser simulado em regime permanente.

### K. Dashboard de Resultados

Os elementos utilizados para avaliar os resultados de cada sistema foram definidos com o intuito de permitir a comparação entre os resultados simulados e a situação medida do estado atual, a fim de validar a simulação e encontrar a melhor situação proposta. Os principais indicadores de performance da célula de trabalho são OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) e a Produtividade, representados pelas equações:

$$OEE = \frac{\text{Tempo Operação}}{\text{Tempo Disponível}} \times \frac{\text{Peças produzidas}}{\text{Meta Peças}} \times \frac{\text{Produção} - \text{Scrap}}{\text{Produção Total}}$$

$$\text{e Produtividade} = \frac{\text{Tempo Padrão Gerado}}{\text{Tempo Disponível de Mão de Obra}}$$

Com isso os indicadores de resultado da simulação foram definidos para buscar melhorar os resultados de performance medidos no sistema atual.

O OEE foi representado pelos gráficos de pizza que acompanham a performance dos equipamentos, sendo que é possível identificar as perdas do processo simulado, o que é parte significativa da informação do OEE.

A produtividade foi representada pelo gráfico de pizza que monitora as atividades operacionais. Estas quando comparadas com o índice de processamento dos tornos representam o cálculo de produtividade, sendo que a capacidade de produção por operador é refletida pelo sistema como um todo. A Figura 6 apresenta o *dashboard* de resultados elaborado.

Uma das partes importantes da simulação foi buscar entender como otimizar as atividades operacionais e dos equipamentos em função dos resultados identificados. Ao longo da execução da modelagem das simulações, pequenos ajustes são realizados para encontrar o melhor resultado para a proposta, sendo que variáveis como tempo e frequências foram mantidas fixas, porém layout, priorização de atividades e dimensões de projeto podem variar.

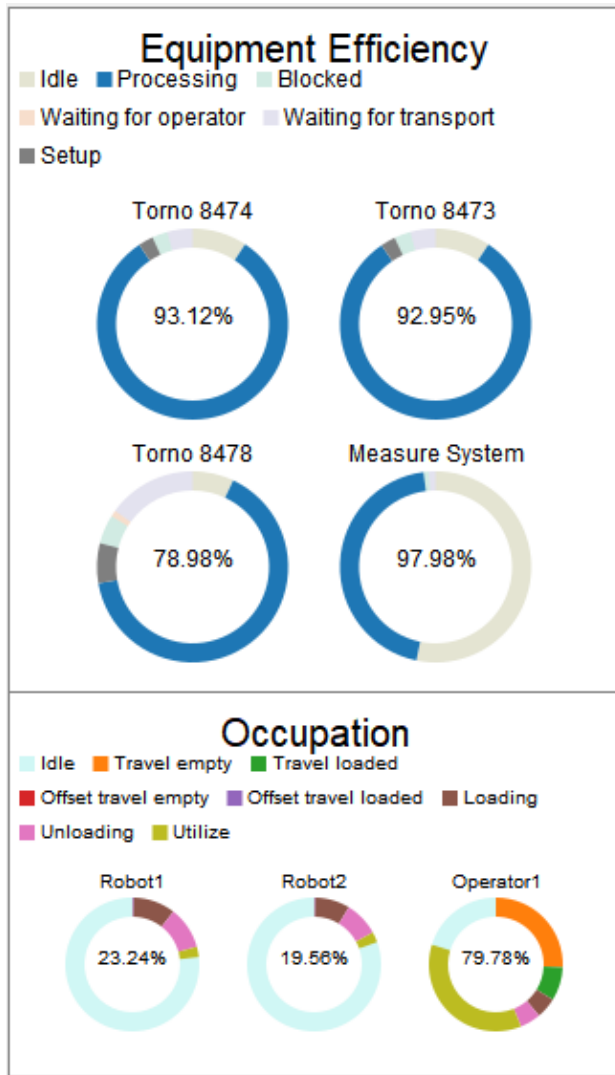


Figura 6 – Dashboard de Resultados

L. Recursos Visuais

Por fim, o aspecto visual da simulação foi feito utilizando poucos recursos visuais que ajudam a comparar o simulado com o real. A aparência base dos equipamentos de execução foram alterados para o mais similar disponível no software FlexSim®. Tornos, bancadas carrinhos e robôs tiveram a aparência alterada. A aparência das peças foi editada para diferenciação entre os fluxos de usinagem e a etapa de operação. Desta maneira, foi variado o diâmetro total, altura e cor dos itens, conforme Figura 7.

Torno	Entrada	Saída
1		
2		
3		

Figura 7 – Aparência dos itens.

V. RESULTADOS

Os resultados foram coletados a partir da execução das simulações e comparação de valores resultantes entre estas. A Tabela 6 apresenta os resultados encontrados com a simulação das quatro propostas de automação, assim como o estado atual. Foram calculados a produtividade e OEE a partir dos dados simulados. A eficiência do equipamento apresentada refere-se somente ao tempo em usinagem do equipamento. O OEE foi calculado a partir da média resultante de ocupação dos três tornos, considerando tempo em usinagem e alimentação do robô ou operador. A produtividade foi calculada considerando a ocupação operacional e o somatório do tempo em usinagem dos tornos. A Figura 8 apresenta o resultado final da proposta de automação b).

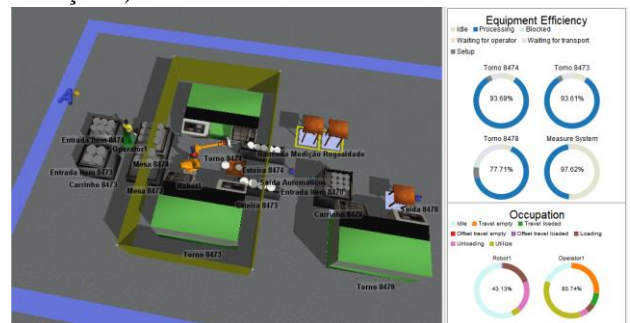


Figura 8 – Simulação da Proposta de Automação b)

A simulação tornou evidente a grande variação de produtividade ao acrescentar componentes de automação ao processo. A adição de um robô articulado ao processo reflete em um aumento de 18% na produtividade do sistema e 26% de OEE. Ao incluir uma máquina de medição tridimensional a produtividade cresce em 64% e o OEE em 38%, em relação ao sistema atual.



Simulação	Quantidade Robôs	Equip Medição	Eficiência Eq. 8473	Eficiência Eq. 8474	Eficiência Eq. 8478	Ocupação Medidora	Ocupação Operador	Ocupação Robôs	Produtividade de (HPM/HH)	OEE
Atual	0	Ausente	64%	64%	48%	NA	99%	NA	1,8	64%
A	1	Ausente	82%	84%	43%	NA	100%	38%	2,1	81%
B	1	Presente	82%	83%	65%	48%	79%	43%	2,9	89%
C	2	Ausente	84%	83%	47%	NA	100%	20%	2,2	82%
D	2	Presente	83%	83%	66%	48%	79%	22%	2,9	89%

Tabela 6 – Resultados das propostas de automação

A inclusão de um segundo robô articulado ao sistema se mostrou inefetivo, em função de não demonstrar variação tanto à produtividade quanto ao OEE. Tal resultado era esperado ao avaliar a ocupação dos robôs simulados nas propostas a) e b), onde ~~está esta~~ não passa de 43%. Apesar disto é importante ressaltar que as simulações não consideraram tamanho de lote e montagem dos equipamentos. Tais informações certamente poderiam resultar a favor do uso

de dois robôs, em função da complexidade de padronização do ferramental, e a necessidade de paradas simultâneas dos equipamentos, dependendo da intensidade destas variáveis.

Um segundo conjunto de simulações foi executado a fim de prever o impacto da variação de frequências de medição sobre os indicadores da célula de trabalho, os quais estão apresentados na Tabela 7. Para tal, foi utilizado o tempo de medição completo do processo, conforme Tabela 4.

Robôs	Freq. Medição	OEE 8474	OEE 8473	OEE 8478	Aprov. Tempo Medidora	Ocupação Robô	Ocupação operador
1	1/1	58%	0%	79%	84%	18%	58%
1	1/2	65%	44%	75%	79%	29%	68%
1	1/5	80%	78%	73%	46%	37%	76%
1	1/10	84%	83%	72%	25%	37%	78%
1	1/20	84%	84%	72%	12%	37%	78%
2	1/1	58%	0%	78%	84%	6%	58%
2	1/2	65%	43%	75%	78%	15%	69%
2	1/5	80%	76%	72%	45%	19%	77%
2	1/10	83%	82%	71%	24%	19%	78%
2	1/20	84%	83%	70%	12%	18%	80%

Tabela 7 - Resultado de Simulações com Variação de Freq.

Os dados mostram mais uma vez que o aumento da quantidade de robôs foi irrelevante para os resultados da célula. Conforme a frequência de execução das atividades acíclicas de medição é aumentada, maior é a ocupação da máquina de medição, sendo que esta se torna o gargalo do processo, chegando a se tornar limitante à capacidade de produção da célula. Como o tempo de medição total da peça é superior ao de usinagem, o equipamento de medição se torna até mesmo o gargalo de fabricação para um único equipamento. Outro ponto a ressaltar é que, contra intuitivamente, a carga de trabalho operacional é aumentada conforme a frequência de medição é reduzida, mesmo com a eficiência do equipamento não automatizado possuir pouca variação. Tal resultado ocorreu em função da limitação da célula de trabalho pela medidora, o que tornou o trabalho operacional ocioso, com longos períodos de espera.

Os dados mostram mais uma vez que o aumento da quantidade de robôs foi irrelevante para os resultados da célula. Conforme a frequência de execução das atividades acíclicas de medição é aumentada, maior é a ocupação da máquina de medição, sendo que esta se torna o gargalo do processo, chegando a se tornar limitante à capacidade de produção da célula. Como o tempo de medição total da peça é superior ao de usinagem, o equipamento de medição se torna até mesmo o gargalo de fabricação para um único equipamento. Outro ponto a ressaltar é que, contra

intuitivamente, a carga de trabalho operacional é aumentada conforme a frequência de medição é reduzida, mesmo com a eficiência do equipamento não automatizado possuir pouca variação. Tal resultado ocorreu em função da limitação da célula de trabalho pela medidora, o que tornou o trabalho operacional ocioso, com longos períodos de espera.

As propostas de automação da célula foram cotadas em diferentes integradores regionais, os quais apresentaram escopo de implementação *turn-key* semelhantes, aos quais serão considerados iguais e resumidos como um único, a fim de focar na comparação entre as propostas a) e d). O retorno econômico calculado com a implementação de cada proposta foi avaliado de acordo com projeções de redução de despesas com mão de obra direta e rejeição de peças. Para estes casos foi desconsiderado o ganho econômico resultante do aumento do tempo do equipamento em usinagem, em função destes possuírem capacidade superior à demanda, conforme Tabela 3.

A

Valor (R\$)	Proposta a	Proposta b	Proposta c	Proposta d
<b>Investimentos</b>				

Um Robô	R\$ 195.000	x	x			Scrap	R\$ 4.524		x	x	
Dois Robôs	R\$ 390.000			x	x	Economia em tempo setup + ajuste (1h/setup)	R\$ 9.673		x	x	
Sistema Automação + NR12 unificado 2 máquinas	R\$ 364.000	x	x			Tempo em Operação (+7,5% = 1,25h)	R\$ 12.872	x		x	
Sistema Automação + NR12 separado 2 máquinas	R\$ 728.000			x	x	Tempo em Operação (+12% = 2h)	R\$ 19.308		x	x	
Medidora Tridimensional	R\$ 429.698		x		x	<b>Investimento Total</b>	R\$ 599.000	R\$ 997.498	R\$ 1.158.000	R\$ 1.556.498	
Programação do sistema de medição	R\$ 8.800		x		x	<b>Retorno Anual Total</b>	R\$ 148.592	R\$ 227.412	R\$ 158.265	R\$ 237.085	
Medição manual com apalpadores	R\$ 40.000	x		x		<b>Payback direto (anos)</b>	4,0	4,4	7,3	6,6	
<b>Retorno Anual</b>											
MOD Operação	R\$ 135.720	x	x	x	x						
MOD Inspeção	R\$ 67.860		x		x						
<b>Valor (R\$)</b>							<b>Proposta a</b>	<b>Proposta b</b>	<b>Proposta c</b>	<b>Proposta d</b>	
<b>Investimentos</b>											
Um Robô							R\$ 195.000	x	x		
Dois Robôs							R\$ 390.000			x	x
Sistema Automação + NR12 unificado 2 máquinas							R\$ 364.000	x	x		

Tabela 8 resume a avaliação financeira das aplicações propostas. Nestes casos é importante ressaltar que os valores de retorno e investimento estão sujeitos à inflação do mercado brasileiro, e o segundo caso principalmente às flutuações da cotação do dólar, em função de grande parte do investimento estar concentrado em equipamentos importados. Um segundo ponto de atenção é o potencial de aumento ou queda de retorno econômico com base na demanda. Nestes casos o limite máximo de retorno possa ser especulado com uma demanda de 100% em três turnos de trabalho, o que aumentaria o retorno em cerca de 30% sobre MOD, em relação à tabela 8, reduzindo o *payback* simples da proposta a) para 3,1 anos. Maiores detalhes sobre os valores avaliados foram limitados por controle de informação.

Sistema Automação + NR12 separado 2 máquinas	R\$ 728.000			x	x
Medidora Tridimensional	R\$ 429.698			x	x
Programação do sistema de medição	R\$ 8.800			x	x
Medição manual com apalpadores	R\$ 40.000	x		x	
<b>Retorno Anual</b>					
MOD Operação	R\$ 135.720	x	x	x	x
MOD Inspeção	R\$ 67.860			x	x
Scrap	R\$ 4.524			x	x
Economia em tempo setup + ajuste (1h/setup)	R\$ 9.673			x	x
Tempo em Operação (+7,5% = 1,25h)	R\$ 12.872	x		x	
Tempo em Operação (+12% = 2h)	R\$ 19.308			x	x
<b>Investimento Total</b>		R\$ 599.000	R\$ 997.498	R\$ 1.158.000	R\$ 1.556.498
<b>Retorno Anual Total</b>		R\$ 148.592	R\$ 227.412	R\$ 158.265	R\$ 237.085
<b>Payback direto (anos)</b>		4,0	4,4	7,3	6,6

Tabela 8 – Análise econômica das propostas de automação

Conforme esperado, as propostas b) e d) se mostraram as menos rentáveis, refletindo os resultados da simulação. Apesar da proposta b) ter apresentado os melhores resultados em simulação, ao avaliar o retorno econômico direto da aplicação, a proposta a) se sobressaiu, mesmo sem contemplar todos os pontos de automação. Nestes casos podemos apontar que grande parte do potencial de utilização de um equipamento tridimensional em chão de fábrica está relacionando a ganhos em qualidade, os quais atualmente não representam grandes custos para o sistema avaliado, em função do grande volume de controles e robustez do processo de fabricação. Em contrapartida, estes controles agregam custo com mão de obra, sendo que se a utilização do sistema for ampliada para três turnos completos, a proposta b) apresentará a melhor taxa de retorno econômico.

## VI. CONCLUSÃO

As tecnologias destacadas em indústria 4.0 representam o futuro da manufatura, considerando a proposta, avaliação e validação do projeto proposto. Neste trabalho foram utilizadas técnicas de simulação para avaliar quatro propostas de automação para uma célula de torneamento de engrenagens. Os sistemas projetados incluem a utilização de robôs industriais responsáveis pela manipulação de peças, garras que atendam especificações de produto e sistema de controle estatístico de processo automatizado.

A comparação dos resultados de simulação conclui que a automação de dois tornos automáticos, para os itens descritos na Tabela 3, o uso de um robô industrial e aquisição de equipamento de medição tridimensional, para execução de rotina de inspeção, apresentam o melhor custo benefício. Apesar disso, resultados superiores de produtividade podem ser alcançados com o uso de dois robôs.

Este artigo avaliou quatro propostas de automação com base em tecnologias utilizadas atualmente em indústria 4.0. Tais avaliações mostraram que há valor econômico e produtivo para empresas em realizar automação de processos manuais, apesar do investimento ser altamente impactado pela cotação do dólar. Avaliações futuras e semelhantes podem considerar a extensão da simulação e aplicação na cadeia de valor, assim como a proposta de sensoriamento dos equipamentos para aplicação de um gêmeo digital.

## VII. REFERENCIAL TEÓRICO

- [1] O. Ryabov, S. Kano, H. Sawada, J. Herwan, "Lathe machine as Industrie 4.0 Component (CPS)". *IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, p. 1656-1660, 2019.
- [2] A. G. Frank, L. S. Dalenogare, N. F. Ayala, "Industry 4.0 Technologies: Implementation patterns in manufacturing companies". *International Journal of production Economics*, vol. 210, pp. 15-26, 2019.
- [3] D. M. S. Velandia, N. Kaur, W. G. Whittow, P. P. Conway, A.A. West, "Towards industrial internet of things: Crankshaft monitoring, traceability and tracking using RFID". *Robotics and Computer - Integrated Manufacturing*, vol. 41, pp. 66-77, 2016.

- [4] S. Robla-Gómez, V. M. Becerra, J. R. Llata, E. Gonzalex-Sarabia, C. Torre-Ferrero and J. Perez-Oria, “Working Together: A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments”. *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 26754-26773, 2017.
- [5] L. Perez, I. Rodriguez, N. Rodriguezm R. Usamentiaga, D. F. Garcia, “Robot Guidance Using Machine Vision Techniques Industrial Environments: A Comparative Review”. *Sensors*, vol. 16, pp, 2016.
- [6] D. J. V. Zee, “Model simplification in manufacturing simulation – Review and framework”. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 127, pp. 1056-1067, 2019.
- [7] P. Barlas, C. Heavey, “Automation of input data to discrete event simulation for manufacturing: A review”. *International Journal of Modeling, Simulation and Scientific Computing*, vol. 7, pp. 1630001-1-27, 2016.
- [8] H. J. Yap, C. H. Tan, S. Y. Phoon, K. E. Liew and S. C. Sekaran, “Process planning and scheduling for loop layout robotic workcell using virtual reality technology”. *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, pp. 9-1-11, 2019.
- [9] A. M. Zanchettin, P. Rocco, S. Chiappa and R. Rossi, “Towards an optimal avoidance strategy for collaborative robots”. *Robots and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 59, pp. 47-55, 2019.
- [10] M. Anttila, “3D Manufacturing Simulation – Improving the Return on Investment”. *Proceedings 19th European Conference on Modelling and Simulation*, 2005.
- [11] L. S. Dalenogare, G. B. Benitez, N. F. Ayala and A. G. Frank, “The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance”. *International Journal of Production Economics*, vol. 204, pp. 383-394, 2018.
- [12] L. Wang, M. Torngren, M. Onori, “Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 37, pp. 517-527, 2015.
- [13] P. M. Bednar and C. Welch, “Socio-technical perspectives on Smart Working: Creating Meaningful and Sustainable Systems”. *Information Systems Frontiers*, vol. 22, pp. 281-298, 2020.
- [14] T. Stock, M. Obenaus, S. Kunz, H. Kohl, “Industry 4.0 as enabler for sustainable development: “A qualitative assessment of its ecological and social potential”. *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 118, pp. 254-267, 2018.
- [15] K. Thoben, S. Wiesner, T. Wuest, “Industrie 4.0 and Smart Manufacturing – A review of Research Issues and Application Examples. *International Journal of Automation Technology*, vol. 11, pp. 4-16, 2017.
- [16] J. S. Kaizer, A. K. Heller, W. L. Oberkampf, “Scientific computer simulation review”. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 138, pp. 210-218, 2015.
- [17] D. J. Zee, “Model simplification in manufacturing simulation – Review and framework”. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 127, pp. 1056-1067, 2019.
- [18] M. Ratiu, M. A. Prichici, “Industrial robot trajectory optimization – a review”. *MATEC Web of Conferences*, vol. 126, 2017.
- [19] M. Honarpardaz, M. Tarkian, J. Olvander, X. Feng. “Finger design automation for industrial grippers: A review”. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 87, pp. 104-119, 2017.
- [20] Q. P. He and J. Wang, “Statistical process monitoring as big data analytics tool for smart manufacturing”. *Journal of Process Control*, vol. 67, pp. 35-43, 2018.

## APÊNDICE

<b>Modelo de Máquina:</b>	<b>TIGO</b>	<b>EQUATOR</b>	<b>MiSTAR 555</b>
Fabricante:	Hexagon	Renishaw	Mitutoyo
Capacidade de Medição: (mm)	500x580x500	570x500x700	500x570x500
Capacidade de Medição: (mm)	500x580x500	Ø300 x 150mm	500x570x500
Precisão (E0, MPE):	0,0022 + L/300µm	±0,002µm	0,0022+3L/ 1000µm
Método de verificação:	Medição	Comparação	Medição
Temperatura:	15° a 30°C	5° a 50°C	10° a 40°C
Umidade relativa:	Máximo 80%	Máximo 80%	Máximo 80%
Infinity:	Sim	Sim	Sim
Correção de Máquina:	Sim	Sim	Sim
Custo de Calibração / Preventiva:	R\$ 10K	R\$ 4,6K	Estimado R\$ 5K
Calibração diária:	1 / Turno	4 / Turno	1 / Turno
Dispositivo:	Padrão Calibrado	Peça Padrão	Padrão Calibrado
Enclausuramento:	Sim*	Não	Não*
Tempo de Medição:	2 s / Toque	2 s / Toque	5-350 mm/s
Forma Geométrica:	Sim *Opcional software	Não	Sim *Opcional software
Ar Comprimido:	Sim	Não	Não
Medição de Característica GD&T:	Sim	Sim	Sim
Custo da Máquina:	R\$ 400K	R\$ 440K	R\$ 300K
Custo Enclausuramento	R\$ 80K	-	-
<b>Total:</b>	<b>R\$ 480K</b>	<b>R\$ 440K</b>	<b>R\$ 300K</b>