

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E GESTÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Flávio Fraga Vilela**

**PROPOSTA DE UMA EQUAÇÃO MATEMÁTICA PARA A INTEGRAÇÃO  
QUANTITATIVA DO FATOR HUMANO EM PROJETOS DE SIMULAÇÃO A  
EVENTOS DISCRETOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão da Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia de Produção.

**Área de Concentração:** Engenharia de Produção

**Orientador:** Prof. Dr. José Arnaldo Barra Montevechi

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E GESTÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Flávio Fraga Vilela**

**PROPOSTA DE UMA EQUAÇÃO MATEMÁTICA PARA A INTEGRAÇÃO  
QUANTITATIVA DO FATOR HUMANO EM PROJETOS DE SIMULAÇÃO A  
EVENTOS DISCRETOS**

Banca examinadora:

Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva

Prof. Dr. Luiz Ricardo Pinto

Prof. Dr. Rafael De Carvalho Miranda

Prof. Dr. Fabiano Leal

Prof. Dr. José Arnaldo Barra Montevechi (Orientador)

## **DEDICATÓRIA**

Ao meu Senhor e Deus, por me sustentar, fortalecer, cuidar e guiar por meio de seu Santo Espírito em todos os momentos desta árdua caminhada.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço de todo o coração a Deus pela oportunidade de estudar e completar a minha formação acadêmica. Também agradeço imensamente:

Aos meus pais Carlos Romeu Vilela e Maria Goreti Fraga Vilela por todo suporte e incentivo.

A minha esposa Darlene Janaína Rodrigues por me apoiar e compreender em todos os momentos que tive que estudar e dedicar para conseguir finalizar a presente tese.

Ao meu orientador, professor e amigo José Arnaldo Barra Montevechi por acreditar em meu trabalho e por toda a orientação prestada nesse trabalho. Seu auxílio, empenho e conselhos ao longo desta caminhada foram imprescindíveis.

Ao meu grande amigo Diego Dobscha por todo suporte, incentivo e parceria.

Ao professor e amigo, Wilson Trigueiro, por toda amizade e contribuições realizadas a esta tese.

Aos professores do Núcleo de Estudos Avançados para Auxílio à Decisão (NEAAD), Alexandre Pinho, Fabiano Leal, José Hamilton, José Antônio de Queiroz e Rafael De Carvalho Miranda.

A todos os meus amigos de pesquisa, em especial a João Victor, Afonso, Carlos, Fernanda, Gustavo, João Paulo, Milena, Mona Liza, Tábata, Tanita e Tiago.

A todos os funcionários da UNIFEI, que direta ou indiretamente ajudaram nesse trabalho.

A CAPES, CNPq e à FAPEMIG pelo apoio e incentivo à pesquisa brasileira.

Por fim, agradeço a Universidade Federal de Itajubá, a quem sempre terei uma dívida de gratidão.

Que Deus abençoe todos vocês grandemente, de coração meu muito obrigado!

## **EPIGRAFE**

“Feliz é o homem que persevera na provação, porque depois de aprovado receberá a coroa da vida, que Deus prometeu aos que o amam”.

Tiago 1:12

## RESUMO

Em projetos de simulação a eventos discretos (SED), geralmente, alguns critérios de validação computacional não são definidos de forma assertiva e os fatores humanos não são integrados e considerados na fase de modelagem dos dados de entrada. Uma suposição errônea, assumida durante a etapa da modelagem dos dados de entrada é que os trabalhadores operam a uma taxa imutável. Isso acaba sendo um problema para a modelagem de sistemas produtivos, principalmente, se o processo a ser modelado envolver uma ampla parcela de trabalho manual. Neste contexto, o objetivo desta tese é propor uma equação matemática para integrar três fatores humanos em um projeto de SED. E a inovação desta pesquisa baseia-se na equação matemática proposta, que pretende modelar e integrar os fatores humanos, ritmo circadiano, performance e aprendizagem e aplicá-los por meio da equação em três projetos distintos de SED. A aderência da equação proposta foi verificada com o auxílio de testes de validação, utilizados, de modo a validar o modelo computacional desenvolvido. Portanto, a supracitada equação foi concebida nesta pesquisa para representar o fator humano a partir dos tempos de processamento de cada atividade considerada em cada objeto de estudo. Na etapa metodológica foi apresentada a sistemática concebida na presente tese, e foram planejados seis cenários, CIA, CIB e CIC que não consideram os fatores humanos, ritmo circadiano, performance e aprendizagem. E os cenários CIIA, CIIB e CIIC que consideram, por meio da equação proposta, esses três fatores humanos. Finalmente, foi realizado uma validação quantitativa por meio do teste *two-sample t-test* e uma validação qualitativa usando o Teste de *Turing* nos resultados provenientes do modelo computacional. Como conclusão, ficou constatado que a validação do modelo computacional conduzida por meio das duas técnicas, citadas acima, não ocorreu para os cenários CIA, CIB e CIC e, logo, somente ocorreu de forma parcial ou integral, para os cenários CIIA, CIIB e CIIC. Por conseguinte, verificou-se que a validação computacional em um projeto de SED é influenciada quando esses três fatores humanos são considerados e a equação matemática proposta é uma novidade para os pesquisadores da área de simulação a eventos discretos.

**Palavras-chave:** Simulação a Eventos Discretos; Fator Humano; Equação Matemática; Validação Computacional.

## ***ABSTRACT***

In discrete event simulation (DES) projects, generally, some computational validation criteria are not defined assertively and human factors are not integrated and considered in the input data modeling phase. An erroneous assumption made during the input data modeling step is that workers operate at an unchanging rate. This ends up being a problem for the modeling of production systems, especially if the process to be modeled involves a large amount of manual work. In this context, the objective of this thesis is to propose a mathematical equation to integrate three human factors in an DES project. And the innovation of this research is based on the proposed mathematical equation, which intends to model and integrate human factors, circadian rhythm, performance and learning and apply them through the equation in three different DES projects. The adherence of the proposed equation was verified with the help of validation tests, used in order to validate the developed computational model. Therefore, the aforementioned equation was conceived in this research to represent the human factor from the processing times of each activity considered in each object of study. In the methodological stage, the system conceived in this thesis was presented, and six scenarios were planned, CIA, CIB and CIC that do not consider human factors, circadian rhythm, performance and learning. And the CIIA, CIIB and CIIC scenarios that consider, through the proposed equation, these three human factors. Finally, a quantitative validation was performed using the two-sample t-test and a qualitative validation using the Turing Test on the results from the computational model. As a conclusion, it was found that the validation of the computational model conducted through the two techniques mentioned above did not occur for the CIA, CIB and CIC scenarios and, therefore, only occurred partially or in full, for the CIIA, CIIB and CIIC. Therefore, it was found that the computational validation in an DES project is influenced when these three human factors are considered and the proposed mathematical equation is a novelty for researchers in the field of discrete-event simulation.

**Keywords:** Discrete Event Simulation; Human Factor; Mathematical Equation; Computational Validation.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. 1 - CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA QUANTITATIVA.....	15
FIGURA 1. 2 - SEQUÊNCIA DE ETAPAS PARA A SIMULAÇÃO SEGUNDO MONTEVECHI .....	17
FIGURA 1. 3 - SIMBOLOGIA UTILIZADA NA TÉCNICA IDEF-SIM.....	18
FIGURA 1. 4 - A ESTRUTURA DO PROCESSO DE INTEGRAÇÃO DO FATOR HUMANO .....	22
FIGURA 2. 1 - O CRESCENTE INTERESSE E RECONHECIMENTO DA IMPORTÂNCIA DOS FHS EM PROJETOS DE SED... ..	35
FIGURA 2. 2 - OS 15 AUTORES COM MAIS PUBLICAÇÕES SOBRE A IMPORTÂNCIA DOS FHS EM PROJETOS DE SED ..	36
FIGURA 2. 3 - GRÁFICO DOS FHS E SEU IMPACTO NA SAÍDA DE ITENS. ....	46
FIGURA 2. 4 - GRÁFICO DOS TRÊS FHS CONSIDERADOS NA EMT. ....	47
FIGURA 2. 5 - TÍPICA CURVA DE APRENDIZAGEM.....	48
FIGURA 2. 6 - ALTERAÇÃO NO DESEMPENHO DEVIDO AO RITMO CIRCADIANO.....	50
FIGURA 2. 7 - ALTERAÇÃO NO DESEMPENHO DEVIDO À IDADE .....	52
FIGURA 4. 1 - MODELAGEM CONCEITUAL USANDO O IDEF-SIM.....	62
FIGURA 4. 2 - DEFINIÇÃO DAS DPES PARA O CIA .....	67
FIGURA 4. 3 - ALGUMAS DAS DPES DISPONÍVEIS NA FERRAMENTA <i>EXPERTFIT</i> .....	67
FIGURA 4. 4 - MODELO COMPUTACIONAL USANDO O SOFTWARE <i>FLEXSIM</i> ®.....	69
FIGURA 4. 5 - UTILIZAÇÃO DA REGRA <i>BY PERCENTAGE</i> NO SOFTWARE <i>FLEXSIM</i> ® .....	70
FIGURA 4. 6 - APLICAÇÃO DA DPE NO <i>PROCESS TIME</i> DO SOFTWARE <i>FLEXSIM</i> ® .....	70
FIGURA 4. 7 - MODELAGEM CONCEITUAL LMER, PARTE 01 USANDO O IDEF-SIM .....	75
FIGURA 4. 8 - MODELAGEM CONCEITUAL LMER, PARTE 02 USANDO O IDEF-SIM .....	76
FIGURA 4. 9 - MODELO COMPUTACIONAL LMER PARTE 01, USANDO O SOFTWARE <i>FLEXSIM</i> ® .....	81
FIGURA 4. 10 - MODELO COMPUTACIONAL LMER PARTE 02, USANDO O SOFTWARE <i>FLEXSIM</i> ®.....	82
FIGURA 4. 11 - MODELAGEM CONCEITUAL DO PS, USANDO O IDEF-SIM .....	85
FIGURA 4. 12 - MODELO COMPUTACIONAL PS PARTE 01, USANDO O SOFTWARE <i>FLEXSIM</i> ® .....	89
FIGURA 4. 13 - MODELO COMPUTACIONAL PS PARTE 02, USANDO O SOFTWARE <i>FLEXSIM</i> ® .....	89
FIGURA 4. 14 - MODELO COMPUTACIONAL PS PARTE 03, USANDO O SOFTWARE <i>FLEXSIM</i> ® .....	90

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 - DEFINIÇÃO DOS SEIS CENÁRIOS .....	21
TABELA 2. 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS TRABALHOS SOBRE SED E FHS.....	37
TABELA 2. 2 - INFLUÊNCIA DOS FHS NOS SISTEMAS PRODUTIVOS MANUAIS .....	44
TABELA 2. 3 – FHS E SEU IMPACTO NA TAXA DE SAÍDA DE ITENS.....	45
TABELA 3. 1 - DPES CONSIDERADAS PARA O TESTE DE ANDERSON E DARLING (1954).....	58
TABELA 4. 1 - CÁLCULOS DO FATOR HUMANO RITMO CIRCADIANO PARA O CIA.....	63
TABELA 4. 2 - CÁLCULOS DO FATOR HUMANO PERFORMANCE PARA O CIA .....	64
TABELA 4. 3 - VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA CÁLCULO DO <i>N</i> PARA O CIA .....	65
TABELA 4. 4 - RESULTADO DOS CÁLCULOS DO FATOR HUMANO APRENDIZAGEM PARA O CIA .....	65
TABELA 4. 5 - DPES PARA OS CENÁRIOS CIA E CIA .....	68
TABELA 4. 6 - RESULTADO SUMARIZADO TST PARA O PRIMEIRO OBJETO DE ESTUDO .....	73
TABELA 4. 7 - TESTES DE VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DO PRIMEIRO OBJETO DE ESTUDO .....	74
TABELA 4. 8 - CÁLCULOS DO FATOR HUMANO RITMO CIRCADIANO PARA O CIIB .....	77
TABELA 4. 9 - CÁLCULOS DO FATOR HUMANO PERFORMANCE PARA O CIIB.....	78
TABELA 4. 10 - VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA CÁLCULO DO <i>N</i> PARA O CIIB .....	78
TABELA 4. 11 - RESULTADOS DOS CÁLCULOS DO FATOR HUMANO APRENDIZAGEM PARA O CIIB.....	79
TABELA 4. 12 - DPES PARA OS CENÁRIOS CIB E CIIB .....	80
TABELA 4. 13 - RESULTADO SUMARIZADO TST PARA O SEGUNDO OBJETO DE ESTUDO .....	84
TABELA 4. 14 - TESTES DE VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DO SEGUNDO OBJETO DE ESTUDO .....	84
TABELA 4. 15 - CÁLCULOS DO FATOR HUMANO RITMO CIRCADIANO PARA O CIIC .....	86
TABELA 4. 16 - CÁLCULOS DO FATOR HUMANO PERFORMANCE PARA O CIIC.....	87
TABELA 4. 17 - VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA CÁLCULO DO <i>N</i> PARA O CIIC .....	87
TABELA 4. 18 - RESULTADOS DOS CÁLCULOS DO FATOR HUMANO APRENDIZAGEM PARA O CIIC.....	87
TABELA 4. 19 - DPES PARA OS CENÁRIOS CIC E CIIC .....	88
TABELA 4. 20 - RESULTADO SUMARIZADO TST PARA O TERCEIRO OBJETO DE ESTUDO .....	92
TABELA 4. 21 - TESTES DE VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DO TERCEIRO OBJETO DE ESTUDO .....	92
TABELA 5. 1 - TODOS OS RESULTADOS DA VALIDAÇÃO COMPUTACIONAL.....	94

## LISTA DE ABREVIATURAS

AP	Aprendizagem
BD	Big Data
CIA	Cenário I do Primeiro Objeto de Estudo
CIB	Cenário I do Segundo Objeto de Estudo
CIC	Cenário I do Terceiro Objeto de Estudo
CIIA	Cenário II do Primeiro Objeto de Estudo
CIIB	Cenário II do Segundo Objeto de Estudo
CIIC	Cenário II do Terceiro Objeto de Estudo
CI	Circuitos Integrados
DAA	Distribuição Acumulativa Ajustada
DPE	Distribuição de Probabilidade Estatística
DT	<i>Digital Twin</i> (Gêmeo Digital)
EMT	Equação Matemática
EP	Engenharia de Produção
ER	Espelhos Retrovisores
FH	Fator Humano
FHs	Fatores Humanos
HRAC	Histórico Real de Atendimento do Terceiro Objeto de Estudo
HRPA	Histórico Real de Produção do Primeiro Objeto de Estudo
HRPB	Histórico Real de Produção do Segundo Objeto de Estudo
I4.0	Indústria 4.0
IOT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
LMER	Linha de Montagem de Espelhos Retrovisores
MC	Modelo Conceitual
MCP	Modelo Computacional
ME	Modelo Estocástico
NET	Nível de Experiência do Trabalhador
OE	Objeto de Estudo
OP	Operador
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PE	Placas Eletrônicas
PF	<i>Performance</i>
PMR	Protocolo de Manchester
PS	Pronto-Socorro
QPA	Quantidade de Pacientes Atendidos
QR	Quantidade de Repetições
QRA	Quantidade de Retrovisores Automotivos

QTP	Quantidade Teórica Produzida
RC	Ritmo Circadiano
RSACIC	Resultado da Simulação de Atendimento Cenário I do Terceiro Objeto de Estudo
RSACIIC	Resultado da Simulação de Atendimento Cenário II do Terceiro Objeto de Estudo
RSPCIA	Resultado da Simulação da Produção Cenário I do Primeiro Objeto de Estudo
RSPCIB	Resultado da Simulação da Produção Cenário I do Segundo Objeto de Estudo
RSPCIAA	Resultado da Simulação da Produção Cenário II do Primeiro Objeto de Estudo
RSPCIIB	Resultado da Simulação da Produção Cenário II do Segundo Objeto de Estudo
SCF	Sistemas Ciberfísicos
SCFP	Sistemas Ciberfísicos de Produção
SED	Simulação a Eventos Discretos
TCM	Tempo de Ciclo Médio
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
TP	Tempo de Processamento
TST	<i>Two Sample t Test</i>
VM	Verificação Modular
VR	<i>Virtual Reality</i> (Realidade Virtual)
WIP	<i>Work in Process</i> (Trabalho em Processo)
WIP R	<i>Work in Process in Rework</i> (Trabalho em Processo no Retrabalho)

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	11
1.2. RELEVÂNCIA CIENTÍFICA E JUSTIFICATIVA .....	12
1.3. QUESTÕES DA PESQUISA E OBJETIVOS .....	13
1.4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
1.4.1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	14
1.4.2. MÉTODO DA PESQUISA .....	16
1.5. LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	23
1.6. ESTRUTURA DA PESQUISA .....	23
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>25</b>
2.1. NOVO CONTEXTO DE IMPLANTAÇÃO DOS PROJETOS DE SED .....	25
2.2. MODELAGEM E SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS .....	28
2.3. FATORES HUMANOS E SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS .....	34
2.4. FATORES HUMANOS CONSIDERADOS NA EQUAÇÃO PROPOSTA .....	43
2.4.1. FATOR HUMANO APRENDIZAGEM .....	47
2.4.2. FATOR HUMANO RITMO CIRCADIANO .....	49
2.4.3. FATOR HUMANO PERFORMANCE.....	51
<b>3. EQUAÇÃO MATEMÁTICA PROPOSTA</b> .....	<b>54</b>
3.1. ENUNCIÇÃO DA EQUAÇÃO MATEMÁTICA.....	54
3.2. TRANSFORMAÇÃO PARA O MODELO ESTOCÁSTICO .....	57
<b>4. DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA</b> .....	<b>61</b>
4.1. PRIMEIRO OBJETO DE ESTUDO .....	61
4.1.1. ETAPA DE CONCEPÇÃO DE UM PROJETO DE SED.....	61
4.1.2. APLICAÇÃO DA EMT NO CIIA .....	63
4.1.3. ETAPA DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROJETO DE SED.....	68
4.1.4. VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL PARA OS CENÁRIOS CIA E CIIA .....	71
4.2. SEGUNDO OBJETO DE ESTUDO .....	74
4.2.1. ETAPA DE CONCEPÇÃO DE UM PROJETO DE SED.....	75
4.2.2. APLICAÇÃO DA EMT NO CIIB .....	77
4.2.3. ETAPA DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROJETO DE SED.....	81
4.2.4. VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL PARA OS CENÁRIOS CIB E CIIB .....	83
4.3. TERCEIRO OBJETO DE ESTUDO.....	85
4.3.1. ETAPA DE CONCEPÇÃO DE UM PROJETO DE SED.....	85
4.3.2. APLICAÇÃO DA EMT NO CIIC .....	86
4.3.3. ETAPA DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROJETO DE SED.....	89
4.3.4. VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL PARA OS CENÁRIOS CIC E CIIC .....	90
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>93</b>

5.1. VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	93
5.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
5.3. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	96
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>97</b>
<b>APÊNDICE I – CÁLCULO DO NET: CIA E CIA .....</b>	<b>117</b>
<b>APÊNDICE II – DETERMINAÇÃO DO FH APRENDIZAGEM: CIA.....</b>	<b>118</b>
<b>APÊNDICE III – CRONOANÁLISE: PRIMEIRO OBJETO DE ESTUDO.....</b>	<b>119</b>
<b>APÊNDICE IV – TEMPOS APÓS A APLICAÇÃO DA EMT NO CIA.....</b>	<b>120</b>
<b>APÊNDICE V– QUANTIDADE DE PLACAS PRODUZIDAS: HRPB.....</b>	<b>121</b>
<b>APÊNDICE VI– <i>OUTPUTS</i> SED: RSPCIA E RSPCIA.....</b>	<b>122</b>
<b>APÊNDICE VII– GRÁFICO <i>BOXPLOT</i>: RSPCIA E RSPCIA.....</b>	<b>123</b>
<b>APÊNDICE VIII – INDEPENDÊNCIA DAS AMOSTRAS: CIA E CIA .....</b>	<b>124</b>
<b>APÊNDICE IX – TESTE DE NORMALIDADE: CIA E CIA .....</b>	<b>127</b>
<b>APÊNDICE X – TST: PRIMEIRO OBJETO DE ESTUDO.....</b>	<b>130</b>
<b>APÊNDICE XI – TESTE DE <i>TURING</i>: PRIMEIRO OBJETO DE ESTUDO .....</b>	<b>133</b>
<b>APÊNDICE XII – CRONOANÁLISE: SEGUNDO OBJETO DE ESTUDO.....</b>	<b>135</b>
<b>APÊNDICE XIII – TEMPOS APÓS A APLICAÇÃO DA EMT NO CIIB.....</b>	<b>137</b>
<b>APÊNDICE XIV – CODIFICAÇÃO DPES NO <i>FLEXSIM</i>®.....</b>	<b>139</b>
<b>APÊNDICE XV– QUANTIDADE DE PLACAS PRODUZIDAS: HRPB .....</b>	<b>141</b>
<b>APÊNDICE XVI – <i>OUTPUTS</i> SED: RSPCIB E RSPCIB .....</b>	<b>142</b>
<b>APÊNDICE XVII – TESTE DE NORMALIDADE: CIA E CIA.....</b>	<b>144</b>
<b>APÊNDICE XVIII – TST: SEGUNDO OBJETO DE ESTUDO .....</b>	<b>147</b>
<b>APÊNDICE XIX – TESTE DE <i>TURING</i>: SEGUNDO OBJETO DE ESTUDO .....</b>	<b>150</b>
<b>APÊNDICE XX – CRONOANÁLISE: TERCEIRO OBJETO DE ESTUDO .....</b>	<b>152</b>
<b>APÊNDICE XXI – TEMPOS APÓS A APLICAÇÃO DA EMT NO CIIC.....</b>	<b>153</b>
<b>APÊNDICE XXII – NÚMERO DE PACIENTES ATENDIDOS: HARC .....</b>	<b>154</b>
<b>APÊNDICE XXIII – <i>OUTPUTS</i> SED: RSACIC E RSACIC.....</b>	<b>155</b>
<b>APÊNDICE XXIV – TESTE DE NORMALIDADE: CIC E CIIC.....</b>	<b>157</b>
<b>APÊNDICE XXV – TST: TERCEIRO OBJETO DE ESTUDO .....</b>	<b>160</b>
<b>APÊNDICE XXVI- TESTE DE <i>TURING</i>: TERCEIRO OBJETO DE ESTUDO.....</b>	<b>163</b>
<b>APÊNDICE XXVII – RESULTADOS DA TESE .....</b>	<b>166</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização da pesquisa

Os avanços nas tecnologias de informação e comunicação (TICs) e sua crescente aplicação podem ser resumidos pelos sistemas ciberfísicos (MONOSTORI, 2014; LEE, 2008) e *big data* (RUSSOM, 2011). Esta evolução tecnológica ascendente tem efeitos significativos nos sistemas de manufatura, sendo que no planejamento e controle da produção (PCP), por exemplo, as tarefas serão realizadas cada vez mais *online* e os dados em tempo real do processo de fabricação serão disponibilizados para o PCP de forma ágil e dinâmica (KUPRAT *et al.*, 2015; HEGER *et al.*, 2016).

Porém, mesmo com todos esses avanços nas TICs, desvios na execução de um cronograma de produção podem ocorrer repetidamente e por uma variedade de razões técnicas, gerenciais e pessoais, pois o planejamento da produtividade, no que tange ao fator humano (FH) apresenta comumente uma baixa confiabilidade (BAINES, 1994).

No contexto da modelagem computacional, os projetos de simulação a eventos discretos (SED), também, não consideram de forma assertiva a influência desses FH nos projetos. Com o aumento da integração entre os projetos de SED e os atuais pilares da Indústria 4.0 apresentados por Kusiak (2018), uma abordagem para integrar esses FH se faz necessária e impreterível, sobretudo, com o aprimoramento recente entre a simulação a eventos discretos e *big data* (GREASLEY e EDWARDS, 2021). Logo, a falta de integração dos fatores humanos em projetos de SED pode ter consequências negativas nos resultados finais apresentados no modelo computacional. Isso pode, portanto, afetar a confiabilidade e a precisão dos resultados deste modelo computacional. Uma premissa comumente assumida é que os trabalhadores (recursos humanos) operam a uma taxa constante ao longo do dia (BAINES *et al.*, 2005). A fim de reduzir o tempo geral de *design* de um modelo computacional estocástico, os responsáveis pelos projetos de SED geralmente consideram esses trabalhadores como “recursos comuns”. Isso acaba sendo um problema para a modelagem de sistemas de produção, principalmente, se o processo a ser modelado envolver uma alta parcela de trabalho manual, como é o caso de uma linha de montagem manual (BAINES *et al.*, 2004).

Neste contexto, vários pesquisadores mostraram enorme interesse em compreender e modelar os fatores humanos relacionados à produtividade para uma consideração e integração mais precisa e assertiva no planejamento e projeto de sistemas de manufatura (ABUBAKAR e WANG, 2021; BAINES *et al.*, 2004; GLONEGGER e REINHART, 2014; KIASSAT *et al.*, 2014; MASON *et al.*, 2005; NEUMANN e MEDBO, 2009; TEYARACHAKUL *et al.*, 2011).

Portanto, é imperativo que os sistemas de produção utilizem novas abordagens para mitigar os problemas oriundos de cronogramas de produção não cumpridos, pois o resultado de uma omissão do fator humano no sistema modelado é uma produtividade incompatível com a realidade (HEGER *et al.*, 2017). De forma análoga e conforme mencionado previamente, os projetos de simulação a eventos discretos geralmente consideram, também, os funcionários como recursos comuns.

Logo, para melhorar a confiabilidade dos *outputs* de um projeto de simulação computacional, é necessário considerar da melhor forma possível o comportamento do operador e seu subsequente desempenho produtivo ou ritmo normal de produção. É notório apresentar, à vista disso, que existem algumas novas teorias e pesquisas relacionando os fatores humanos em projetos de SED (ABUBAKAR e WANG, 2021; OLEGHE e SALONITIS, 2019a; ABUBAKAR e WANG, 2019; MUKERJEE *et al.*, 2019; ABUBAKAR e WANG, 2018; NEUMANN e MEDBO, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2017; DODE *et al.*, 2016; SEO *et al.*, 2015). Embora esses estudos tenham uma sólida base inicial, mais pesquisas são necessárias para expandir o conhecimento sobre SED e fatores humanos.

## 1.2. Relevância científica e justificativa

A justificativa da escolha e desenvolvimento do tema dentro do contexto dos fatores humanos e SED, para a presente tese, se deram pelos vários problemas que a Engenharia de Produção deve lidar para representar a realidade dos sistemas de produção por meio de abordagens de modelagem e simulação.

Uma questão de ineditismo reforça a relevância científica para a elaboração da presente tese, contribuindo assim, para área da simulação a eventos discretos. Ela se relaciona à apresentação da equação matemática (EMT), concebida para integrar os fatores humanos em um projeto de SED. Esta proposta quantitativa de consideração e integração dos fatores humanos é feita e apresentada de forma metódica e objetiva. Sendo que sua confiabilidade inicial é satisfatória, pois se apoia nas principais pesquisas publicadas acerca desta temática, preenchendo, dessa forma, uma oportunidade na teoria sobre modelagem dos fatores humanos em projetos de simulação a eventos discretos (VILELA *et al.*, 2020; KESHTKAR *et al.*, 2020; BAROSZ *et al.*, 2020; QURESHI *et al.*, 2020; OLEGHE e SALONITIS, 2019a; QURESHI *et al.*, 2019; TOUHAMI *et al.*, 2019; MACHADO *et al.*, 2019; OLEGHE e SALONITIS, 2019b; ABUBAKAR e WANG, 2019; MUKERJEE *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2018; ABUBAKAR e WANG, 2018; AVRUNIN *et al.*, 2018; KAMPA e GOLDA, 2018; STEWART *et al.*, 2017;

WANG e ABUBAKAR, 2017; KAMPA *et al.*, 2017; NEUMANN e MEDBO, 2017; BORGHETTI *et al.*, 2017; PAIVA *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2017; ALSHAMMRI e QIN, 2017).

### 1.3. Questões da pesquisa e objetivos

Uma pergunta sem uma resposta satisfatória é uma premissa importante para o início de uma boa pesquisa, ou seja, buscar uma solução para algum problema existente na literatura vigente é algo que justifica a concepção da pesquisa. Neste contexto, a pergunta para a presente tese foi: como integrar de forma quantitativa os fatores humanos existentes em um projeto de simulação a eventos discretos de forma assertiva? A resposta se encontra na abordagem inovadora apresentada por meio da equação matemática proposta a seguir.

Logo, o objetivo geral da presente tese é propor uma equação matemática para integrar três fatores humanos em um projeto de simulação a eventos discretos. A novidade desta pesquisa baseia-se, portanto, na abordagem quantitativa proposta, que visa modelar e integrar os fatores humanos: ritmo circadiano, performance e aprendizagem, já listados na literatura vigente sobre esta temática.

A aderência da equação matemática foi verificada por meio de testes estatísticos aplicados na etapa de validação do modelo computacional.

Como objetivos específicos desta pesquisa, gerados pelo desdobramento do objetivo geral, pode-se citar:

1. Testar a sensibilidade e confiabilidade da equação matemática proposta, em três objetos de estudo referentes a casos reais, sendo o primeiro no contexto da indústria eletrônica, o segundo na indústria automobilística e o terceiro no pronto-socorro de um hospital regional, por meio de seis cenários;
2. Executar testes estatísticos e o Teste de *Turing* nos resultados da simulação computacional referente aos três estudos de casos considerados na presente tese, para medir a confiabilidade da equação proposta dentro das condições de contorno e premissas definidas.

## 1.4. Materiais e métodos

Nesta presente seção é apresentado o referencial metodológico utilizado na concepção da presente tese, visando delimitar os resultados esperados com a determinação do método científico empregado. São apresentados, também, a classificação da pesquisa, o método de pesquisa e os detalhes acerca de todas as etapas aplicadas à pesquisa.

### 1.4.1. Classificação da pesquisa

A classificação das pesquisas científicas realizadas na área de conhecimento da Engenharia de Produção, de acordo com Turrioni e Mello (2012), possuem três dimensões básicas referentes à sua natureza, objetivo e a abordagem considerada. No que tange a natureza da pesquisa, as pesquisas podem ser divididas como básicas, ou aplicadas (TURRIONI e MELLO, 2012).

De fato, o que leva a realização de uma pesquisa científica podem ser razões intelectuais como o desejo e satisfação de conhecer, ou práticas como o desejo de fazer algo que pode impactar no mundo real (GERHARDT *et al.*, 2009). É importante frisar que segundo Gil (2007) a pesquisa é definida como um procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos. E de acordo com Marconi *et al.* (2002) a pesquisa aplicada caracteriza-se por seu interesse prático, isto é, na solução de problemas que ocorrem na realidade. Por fim, segundo Appolinário (2006), a pesquisa aplicada seria suscitada por objetivos comerciais através do desenvolvimento de novos processos ou produtos orientados para as necessidades do mercado.

Neste caso, a presente pesquisa pode ser categorizada como aplicada, pois há o interesse de que a nova equação matemática desenvolvida para integrar os fatores humanos seja utilizada em projetos de simulação computacional do “mundo real” dentro da área da simulação a eventos discretos.

Na dimensão “objetivo”, a pesquisa pode ser classificada como exploratória quando visa tornar explícito ou construir hipóteses para um problema; descritiva quando tem por objetivo descrever as características de determinado assunto; explicativa ao se determinar os fatores que contribuem para a ocorrência do fenômeno desejado; e normativa ao se tentar ou encontrar uma solução ótima para novas definições de problemas definidos ou para comparar várias estratégias e políticas em relação a um problema existente (TURRIONI e MELLO, 2012).

No entanto, segundo Bertrand e Fransoo (2002), pesquisa quantitativa baseada em modelos é a pesquisa, no qual, são desenvolvidos, analisados e testados modelos de relações

causais entre variáveis de controle e variáveis de desempenho. Este tipo de pesquisa parte do princípio que é possível construir modelos objetivos que expliquem parte do comportamento dos processos reais, ou que podem capturar parte dos problemas de tomada de decisão enfrentados pelos gestores na vida real.

Os diferentes tipos de pesquisa quantitativa, segundo Bertrand e Fransoo (2002) são apresentados na Figura 1.1.

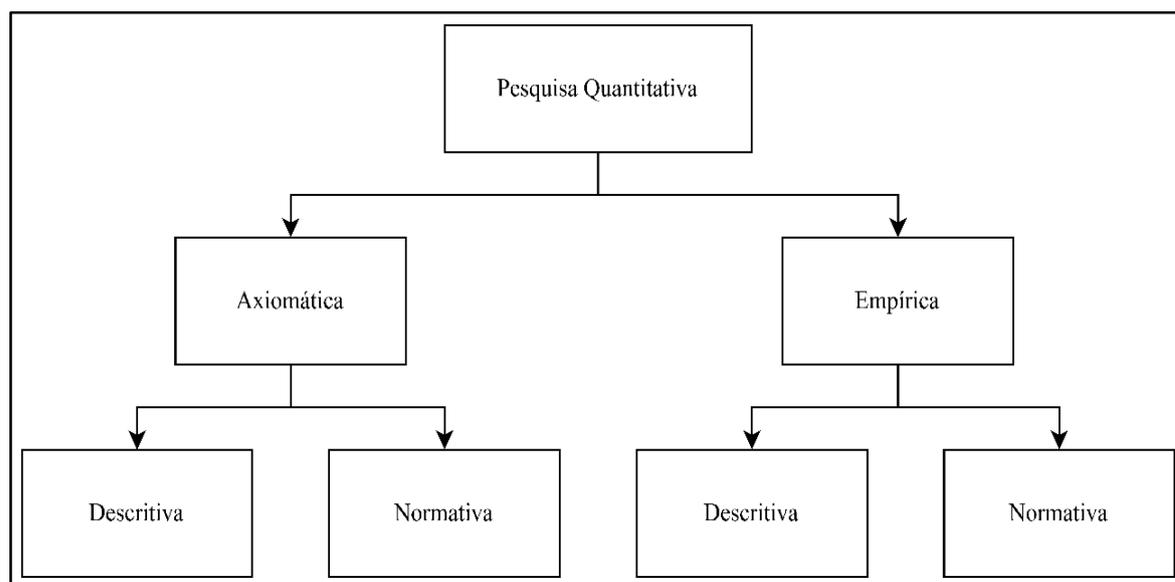


Figura 1. 1 - Classificação da pesquisa quantitativa  
Fonte: Bertrand e Fransoo (2002)

Logo, Bertrand e Fransoo (2002) classificam a pesquisa quantitativa em pesquisa axiomática e pesquisa empírica. As pesquisas axiomáticas e empíricas podem ser subdivididas em descritiva e normativa. Normalmente a pesquisa descritiva relaciona-se com o estudo de um processo e a pesquisa normativa está ligada ao estudo de um problema.

Dessa forma, para presente tese, uma pesquisa empírica descritiva foi adotada, pois está voltada a criar um modelo que descreva adequadamente as relações causais que possam existir na realidade e conduz ao entendimento do processo corrente.

Na dimensão “abordagem”, é definido que para se conduzir a pesquisa e comprovar o atendimento dos objetivos, é necessário adotar métodos quantitativos, qualitativos ou uma combinação dos dois para a geração e análise de dados numéricos ou subjetivos (TURRIONI e MELLO, 2012).

Dentre as abordagens quantitativas mais importantes, de acordo com os autores Miguel *et al.*, (2012) e Turrioni e Mello (2012), pode-se relacionar: os experimentos, a pesquisa levantamento (*survey*) e a modelagem e simulação. Considerando os métodos qualitativos

pode-se citar: o estudo de caso, a pesquisa-ação, e *soft systems methodology*. Finalmente, vale ressaltar que a extensão para a solução do modelo é feita na pesquisa axiomática normativa, da qual a solução é a pesquisa central reportada. Em muitos artigos axiomáticos normativos, o processo de modelagem também está incluído e os resultados retornam ao modelo conceitual, que equivale ao que Mitroff *et al.* (1974) chama de *feedback* limitado.

Nesse caso, a qualidade da pesquisa pertence à extensão no qual o resultado prova ser a melhor solução possível para o problema. Por consequência, na presente tese a abordagem quantitativa foi utilizada e o método da modelagem e simulação, também, empregado.

### 1.4.2. Método da pesquisa

A metodologia científica na área da SED teve o trabalho descritivo desenvolvido por Montevechi *et al.* (2010). Em seu modelo, os autores propõem três etapas e os requisitos necessários para se passar de uma etapa à outra de forma consistente. O modelo está apresentado na Figura 1.2.

Na etapa da “concepção”, uma primeira ação necessária é definir o objetivo do projeto de simulação computacional. Em seguida, deve-se executar a validação do modelo conceitual, modelagem dos dados de entrada e documentação final.

A modelagem conceitual corresponde a uma fase essencial da simulação a eventos discretos, embora muitos livros e muitos analistas “pulem” esta etapa (CHWIF e MEDINA, 2010). Em seu trabalho, Sargent (2014) procura explicar a diferença entre o modelo conceitual e o modelo computacional. Segundo este autor, o modelo conceitual é a representação matemática, lógica ou verbal do problema, e o modelo computacional é o modelo conceitual implementado em um computador.

Para Balci (2003), o modelo conceitual pode ser utilizado como uma ferramenta de controle aos requerimentos do processo de modelagem e simulação, para avaliar conceitos de simulação, eficácia e erro, como base para o projeto de modelagem e simulação, além de, auxiliar no processo de verificação e validação do modelo computacional.

Para Hernandez-Matias *et al.* (2008), não há um único método de modelagem conceitual que pode modelar completamente um sistema complexo de manufatura.

Como resultado das limitações destas técnicas, diferentes métodos integrados de modelagem têm sido desenvolvidos.

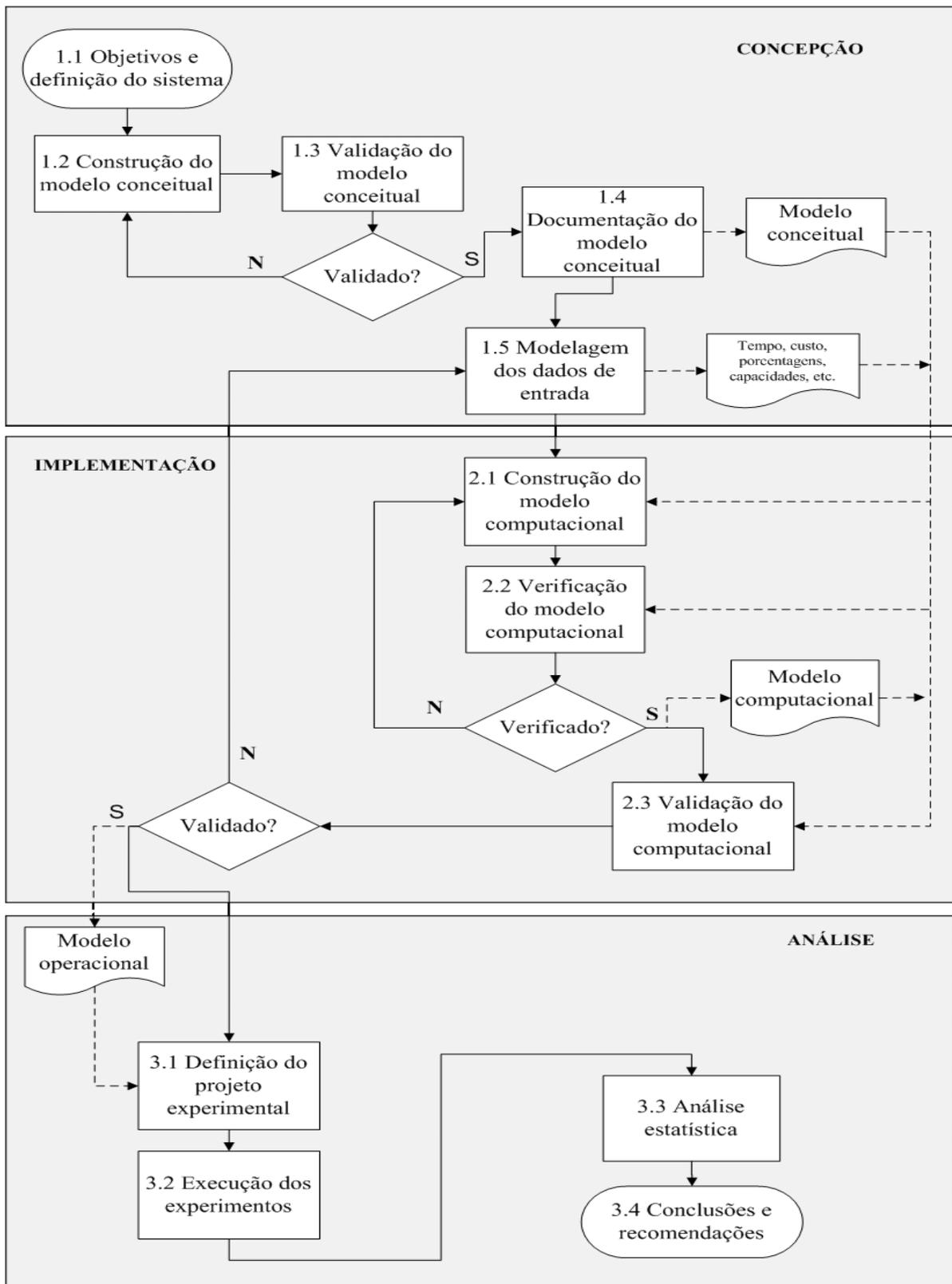


Figura 1. 2 - Sequência de etapas para a simulação segundo Montevechi  
 Fonte: Adaptado de Montevechi *et al.* (2010)

Em seu trabalho, Robinson (2013) afirma que uma das questões mais difíceis na modelagem é determinar o conteúdo do modelo de simulação. O trabalho do modelista é entender o sistema real, que é o tema do estudo de simulação e transformar isso em um modelo de simulação apropriado. O modelo escolhido pode variar de uma forma muito simples até uma forma bem mais complexa. Com efeito, há um número infinito de modelos que poderiam ser selecionados dentro desta faixa, cada um com um conteúdo ligeiramente diferente.

Chwif, Paul e Barreto (2006) propõem uma técnica para redução da complexidade de um modelo de simulação a eventos discretos já na fase de modelagem conceitual. A importância do modelo conceitual também é destacada no trabalho de Zhou, Zhang e Chen (2006). Neste trabalho, os autores propõem que a automação pode auxiliar na melhoria dos resultados da utilização de modelos conceituais em simulação. Para os autores Silva *et al.* (2014), na fase conceitual, a equipe do projeto define os objetivos específicos e o alcance do modelo. Em seguida, o modelo conceitual é construído com o objetivo de representar o sistema atual, e para tanto o uso de técnicas específicas de mapeamento torna a construção do modelo de simulação mais fácil, tal como referido em Montevechi *et al.* (2010). Uma dessas técnicas é o IDEF-SIM, que pode ser empregado de forma prática e ágil na fase de concepção de um projeto de simulação computacional (LEAL, 2008). A Figura 1.3 apresenta a simbologia utilizada na técnica IDEF-SIM, sendo:

Elementos	Simbologia	Técnica de origem
Entidade		IDEF3 (modo descrição das transições)
Funções		IDEF0
Fluxo da entidade		IDEF0 e IDEF3
Recursos		IDEF0
Controles		IDEF0
Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos	 &	Regra E
	 X	Regra OU
	 O	Regra E/OU
Movimentação		Fluxograma
Informação explicativa		IDEF0 e IDEF3
Fluxo de entrada no sistema modelado		
Ponto final do sistema		
Conexão com outra figura		

Figura 1. 3 - Simbologia utilizada na técnica IDEF-SIM  
 Fonte: Leal, Almeida e Montevechi (2008)

- a) Entidade: Itens a serem processados pelo sistema, representando matéria-prima, produtos, pessoas, documentos, entre outros;
- b) Funções: Locais nos quais a entidade sofrerá alguma ação. Entendem-se como funções os postos de trabalho, esteiras de movimentação, filas e estoques e postos de atendimento;
- c) Fluxo da entidade: Direcionamento da entidade dentro do modelo;
- d) Recursos: Elementos utilizados para movimentar as entidades e executar as funções. Os recursos podem representar pessoas ou equipamentos;
- e) Controles: Regras utilizadas nas funções, como sequenciamento, regras de filas, programações, entre outros;
- f) Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos: Estas regras são chamadas de junções, na técnica IDEF3;
- g) Movimentação: Deslocamento de entidade, no qual o modelador acredita possuir efeito importante sobre o modelo;
- h) Informação explicativa: Utilizada para inserir uma explicação no modelo, com o objetivo de facilitar o entendimento do modelo;
- i) Fluxo de entrada no sistema modelado: Define a entrada ou criação das entidades dentro do modelo;
- j) Ponto final do sistema: Define o final de um caminho dentro do fluxo modelado. Tudo que se encontra além deste ponto está fora dos limites do modelo;
- k) Conexão com outra figura: Utilizado para dividir o modelo em figuras diferentes.

Uma vez que o modelo conceitual foi construído e validado pelos especialistas do processo, as variáveis de entrada e as variáveis de saída podem ser definidas. Ainda segundo Montevechi *et al.* (2010), a principal característica do IDEF-SIM é a semelhança da sua lógica de aplicação com a lógica usada em simulação de eventos discretos. Essa característica tem como objetivo a criação de um modelo conceitual do processo a ser simulado que contém os elementos necessários na fase de modelagem por computador.

Ainda na etapa de “concepção”, uma segunda ação a ser executada é a realização da modelagem dos dados de entrada. Neste último, o objetivo principal é obter modelos probabilísticos que permitam inferir as propriedades de um dado fenômeno aleatório. Após coletados os dados, estes devem ser tratados de forma precisa. Esse tratamento consiste em se utilizar técnicas para descrever os dados levantados, identificar as possíveis falhas nos valores amostrados e aumentar o conhecimento à cerca do fenômeno. Nesta fase, torna-se comum o uso de pacotes comerciais (*best fitting*).

Após a coleta dos dados e análise, deve-se inferir qual o comportamento da população a partir de uma amostra. Como resultado, tem-se um modelo probabilístico que representará o fenômeno aleatório em estudo e este será incorporado ao modelo de simulação. Law (2013) afirma que, uma parte importante, mas muitas vezes negligenciada, de qualquer estudo de simulação é a fase de modelar cada fonte dos dados de entrada, por meio de uma distribuição de probabilidade apropriada.

Para Ankenman e Nelson (2012), a incerteza decorrente do *input* refere-se ao impacto frequentemente não reconhecido, e raramente quantificado, do uso de distribuições de probabilidade nos dados de entrada pouco confiáveis em projetos de simulação que são simplificados de forma a "encaixar" a uma amostra finita de dados do mundo real. Vale ressaltar ainda, que segundo Xie *et al.* (2014), quando se usa a simulação para estimar o desempenho de um sistema estocástico, a falta de fidelidade nos modelos aleatórios de entrada pode levar a estimativas de desempenho do sistema pouco confiáveis. Esta falta de confiabilidade nos resultados do modelo de simulação pode, também, ser proveniente da não incorporação do fator humano nos projetos de simulação a eventos discretos (VILELA, 2015).

Na etapa de “implementação”, o software para a construção do modelo computacional é escolhido e sua verificação e validação são realizadas de forma sistemática. No entanto, na presente tese, várias técnicas de validação computacional serão aplicadas para uma verificação mais assertiva acerca da confiabilidade do modelo computacional em estudo.

É essencial frisar que a validação computacional pode ser feita por meio de uma abordagem quantitativa ou qualitativa (LAW, 2009). Se o modelo computacional for validado, o analista pode seguir para a etapa de execução dos experimentos. Caso contrário, a modelagem do projeto de SED terá que ser, cuidadosamente, revisada por inteiro ou em suas partes constituintes até que seja devidamente validada.

A “análise” é a última etapa da simulação de eventos discretos de acordo com Montevechi *et al.* (2010) e nesta etapa final os experimentos para a simulação são realizados, concomitantemente com a análise estatística dos resultados do modelo computacional e por fim, algumas recomendações do analista líder do sistema modelado são apresentadas.

Desta forma, na etapa de “análise” da presente tese, foram definidos seis cenários conforme indica a Tabela 1.1, cada um dos quais possui um conjunto de tempos de processamento das etapas modeladas, que serão estocasticamente atribuídos ao *delay* do projeto de simulação computacional dependendo dos três fatores humanos considerados em cada um dos contextos produtivos.

É importante frisar que a equação matemática que será enunciada posteriormente será aplicada antes da determinação das respectivas distribuições de probabilidade estatística alocada para cada uma das estações de trabalho consideradas por cenário.

Tabela 1.1 - Definição dos seis cenários

<b>Cenário</b>	<b>Descrição</b>	<b>Fator ritmo circadiano</b>	<b>Fator performance</b>	<b>Fator aprendizagem</b>	<b>Manufatura/Serviço</b>
<b>CIA</b>	Cenário I para o primeiro objeto de estudo				Eletrônica
<b>CIIA</b>	Cenário II para o primeiro objeto de estudo	x	x	x	Eletrônica
<b>CIB</b>	Cenário I para o segundo objeto de estudo				Automobilística
<b>CIIB</b>	Cenário II para o segundo objeto de estudo	x	x	x	Automobilística
<b>CIC</b>	Cenário I para o terceiro objeto de estudo				Pronto-Socorro
<b>CIIC</b>	Cenário II para o terceiro objeto de estudo	x	x	x	Pronto-Socorro

Fonte: Próprio autor

Nessa Tabela 1.1, vale ressaltar que a seguinte marcação "x" significa considerar o correspondente fator humano nos cenários concebidos. Portanto, o CIIA, CIIB e CIIC usam os três FHs apresentados que são: o fator de ritmo circadiano (RC), o fator de performance (PF) e o fator de aprendizagem (AP). Entretanto, o CIA, CIB e CIC não consideram nenhum desses fatores humanos. Estes últimos cenários representam a abordagem convencional da maioria dos projetos de simulação a eventos discretos (BAROZ *et al.*, 2020; QURESHI *et al.*, 2020; VILELA *et al.*, 2020; OLEGHE e SALONITIS, 2019A; ABUBAKAR e WANG, 2019; MUKERJEE *et al.*, 2019; ABUBAKAR e WANG, 2018; NEUMANN e MEDBO, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2017; DODE *et al.*, 2016; SEO *et al.*, 2015), porque não dão a devida atenção aos fatores humanos intrinsecamente relacionados com o sistema, ao construir o projeto de SED.

A Figura 1.4 apresenta a estrutura utilizada para integrar o fator humano em um projeto de simulação a eventos discretos. Vale ressaltar que a Figura 1.4 foi construída usando-se os símbolos de fluxo proposto pelos autores Fitzsimmons e Fitzsimmons (2014).

A primeira fase desta abordagem é utilizar os tempos de processamento coletados, respectivamente, das estações de trabalho consideradas no objeto de estudo.

Em seguida, deve-se determinar os três fatores humanos considerados na presente tese e usados como elementos essenciais na equação que será proposta.

Na sequência, a equação deverá ser aplicada, sendo que no Capítulo 3, será apresentado com detalhes os procedimentos para se chegar nesta supracitada equação matemática.

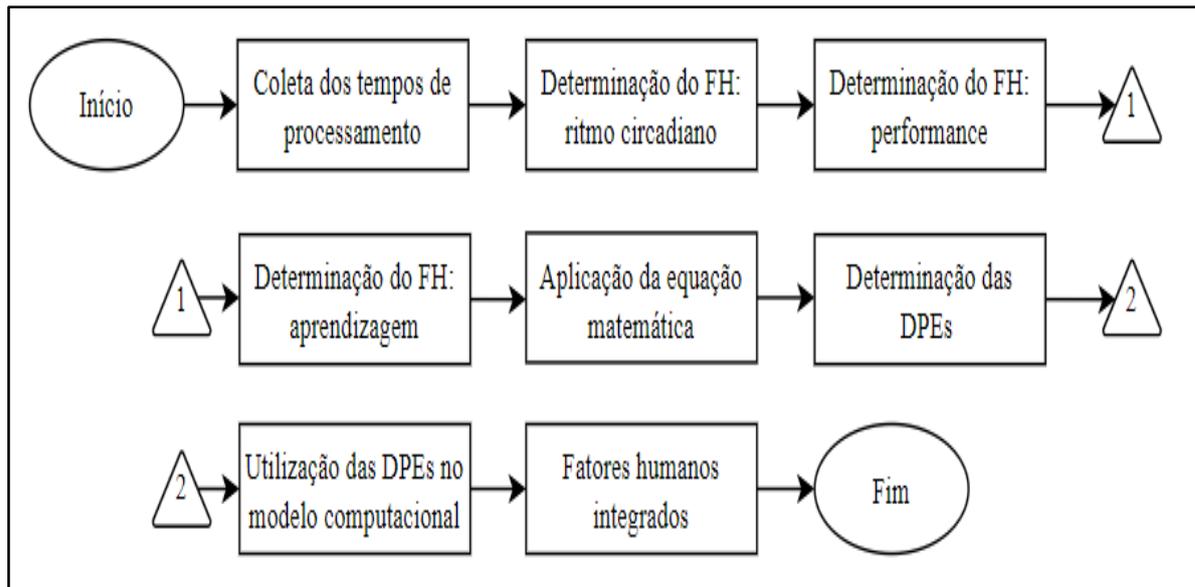


Figura 1. 4 - A estrutura do processo de integração do fator humano  
Fonte: Próprio autor

Na etapa subsequente, as distribuições de probabilidade estatística (DPEs) devem ser encontradas para cada uma das estações de trabalho consideradas. Finalmente, essas DPEs devem ser inseridas no modelo computacional, respectivamente, para cada estação de trabalho considerada. Logo, desta forma, os fatores humanos foram incorporados e integrados a um projeto de SED de forma quantitativa. Portanto, a Figura 1.4 evidencia que dentro da metodologia proposta, a equação é apresentada para desempenhar a função de integrar de maneira quantitativa os fatores humanos antes, portanto, da definição estocástica que será aplicada na etapa de *input*, da modelagem computacional.

Por fim, é essencial ressaltar que na perspectiva de um projeto de SED, a equação matemática, proposta na presente tese entra como uma “técnica de correção dos dados” (tempos de processamento) antes que eles sejam transformados nas respectivas distribuições de probabilidade estatística.

## 1.5. Limitações da pesquisa

A presente pesquisa apresenta duas limitações, pois trata de um assunto extremamente complexo e inexplorado. Desta forma, pode-se afirmar que a modelagem matemática dos fatores humanos, intrinsecamente qualitativos e subjetivos foi desafio notável. Portanto, é importante enfatizar as limitações e condições de contorno encontradas, para que uma equação bem definida possa ser estabelecida e apresentada no Capítulo 3.

- A primeira limitação foi aplicar a equação matemática em apenas três estudos de caso.
- A segunda limitação foi não demonstrar matematicamente, que não existe interação significativa entre os três fatores humanos, ritmo circadiano, performance e aprendizagem, e que não existe, também, sobreposição ou anulação desses três fatores humanos na equação.

## 1.6. Estrutura da pesquisa

A presente tese foi concebida e organizada em cinco capítulos que serão devidamente explanados a seguir.

O Capítulo 1, já introduzido, faz um delineamento contextualizado acerca da temática da pesquisa que é a simulação a eventos discretos e os fatores humanos, apontado os objetivos que devem ser atingidos no decurso da apresentação da sistemática empregada na pesquisa, as principais justificativas do trabalho e apresenta-se a metodologia utilizada e todas as etapas seguidas no procedimento metodológico proposto. Por fim, as principais limitações encontradas na condução da presente pesquisa são apresentadas de forma sucinta.

No Capítulo 2, são apresentadas importantes definições teóricas sobre a modelagem e simulação a eventos discretos e sobre a utilização dos fatores humanos em projetos de simulação computacional.

No Capítulo 3, é apresentada a equação matemática, seguindo de forma sistemática todos os passos para a demonstração matemática da equação enunciada. Todo o embasamento e alicerce teórico para corroborar a proposta da equação matemática são, também, detalhadamente apresentados e referenciados.

No Capítulo 4, apresenta-se a aplicação do método em três objetos de estudo reais e distintos, no contexto da manufatura (linha de montagem de placas eletrônicas e linha de montagem de espelhos retrovisores automotivos) e serviço (pronto-socorro de um hospital regional) e os respectivos resultados obtidos. Neste capítulo a um projeto de SED foi aplicado considerando e integrando os fatores humanos por meio da implementação da equação proposta. Os resultados são, também, demonstrados e analisados. Por meio destes resultados,

foi possível verificar e demonstrar neste Capítulo 4 que a validação do modelo computacional é influenciada quando os fatores humanos são considerados e integrados de forma quantitativa em um projeto de simulação a eventos discretos.

No Capítulo 5, apresentam-se as conclusões do trabalho, onde é evidenciado novamente os importantes resultados encontrados na pesquisa. Ou seja, quando os fatores humanos, ritmo circadiano, performance e aprendizagem são considerados por meio da equação, a validação do modelo computacional ocorre para todos os casos reais analisados. Ainda neste Capítulo 5, algumas sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

Por fim, as “referências bibliográficas” utilizadas para a construção da tese são apresentadas, seguida pelos apêndices que contém a demonstração de todos os procedimentos e cálculos executados na concepção da presente tese. Finalmente, o último apêndice exibe uma listagem dos artigos acadêmicos publicados e outras produções relevantes geradas com a presente pesquisa.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Novo contexto de implantação dos projetos de SED

Nos dias atuais, um novo contexto deve ser levado em conta quando novos projetos de simulação a eventos discretos forem projetados. Este novo *background* está inserido dentro da Quarta Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0 (SCHWAB, 2016). A Indústria 4.0 engloba muitas tecnologias avançadas e tem como objetivo usar essas tecnologias para tornar a fabricação mais inteligente, autônoma e integrada. As fábricas inteligentes e o sistema ciberfísico (SCF) atingirão esses objetivos usando robótica, análise *big data* (BD), computação em nuvem, *internet of things* (IoT), integração de sistemas, virtual reality (VR) e simulação computacional (GUNAL, 2019). Para corroborar a pesquisa deste último, os autores Turner *et al.* (2016) e Kagermann *et al.* (2013), também, afirmam que as principais áreas do conhecimento que podem contribuir para que o sistema de produção vigente alcance o estágio de “fábrica inteligente” são: robótica, estudo dos materiais, informação, informática, manufatura e simulação a eventos discretos.

O SCF trata de digitalizar recursos físicos, mecânicos e eletrônicos de máquinas, com software e criar uma réplica no formato de *Digital Twin* (DT). Um DT é, portanto, um modelo de simulação da fábrica que obtém dados reais e os manipula para criar ações específicas. Logo, antes de agir, os sistemas podem ser simulados com DT para observar os efeitos de possíveis mudanças.

Para um maior detalhamento dos sistemas ciberfísicos, segue uma definição sucinta proposta pelo autor Lee (2008), que diz que os SCFs são integrações da computação com os processos físicos, sendo que computadores e redes embarcados monitoram e controlam os processos físicos, frequentemente com *loops de feedback* em que os processos físicos afetam os cálculos e vice-versa. Já o sistema ciberfísico de produção (SCFP) conta com a evolução da informática, das tecnologias de informação e comunicação (MONOSTORI, 2014). E eles consistem em subsistemas e elementos autônomos que interagem entre si dependendo da situação, desde o nível de máquina até as redes de produção e logística (MONOSTORI, 2014).

Sendo assim, a integração vertical e horizontal no SCF é necessária para conectar entidades do mundo físico de forma sistemática. A integração vertical tem como função fazer com que os componentes de uma fábrica se reconheçam para criar uma fábrica inteligente. Já a integração horizontal trata da comunicação entre as fábricas inteligentes. Para realizar essas conexões a modelagem híbrida e a simulação híbrida podem ser usadas, testando modos de integração alternativos e cenários de operação variados (GUNAL, 2019).

Implementando vários SCF nas fábricas, por exemplo, uma enorme quantidade de dados é criada, e deve ser processada e analisada posteriormente. Nesse contexto, o termo “*big data* inflacionário” também é usado nas publicações atuais. Existem várias definições, que têm em comum que grandes e complexos volumes de dados são capturados, comunicados, agregados, armazenados e analisados (RUSSOM, 2011).

Sobre a VR, pode-se dizer que ele possui grandes potenciais no âmbito da Indústria 4.0, pois ajuda a criar um mundo virtual dentro do processo de fabricação. Neste “novo mundo”, a tomada de decisões e o treinamento podem ser feitos de forma não tradicional, com mais recursos visuais. Seguindo essa tendência, as inovações provenientes da Indústria 4.0 vão além do supracitado e são surpreendentes. Por exemplo, em um ambiente fabril que implantou as premissas básicas da Indústria 4.0 é possível analisar os dados coletados da operação por meio da IoT e obter inferências assertivas sobre o processo. Sendo que, a ferramenta de simulação computacional pode ajudar a criar essas inferências de forma ágil e prática.

Sobre a contribuição da simulação a eventos discretos para a quarta revolução industrial os pesquisadores Vieira *et al.* (2018), apontam para os principais aspectos:

- Troca de dados automatizados: Receber dados reais de objetos reais (por exemplo, máquinas, sensores e outros) e inseri-los automaticamente no modelo de simulação computacional.

- Geração automática de modelo: A capacidade de construir modelos de simulação automaticamente. No contexto do I4.0 em que as fábricas são muito dinâmicas, os sistemas em modelagem podem exigir mudanças frequentes, que devem ser atendidas pelos modeladores, de forma rápida e ágil;

- Visualização: A capacidade de visualizar sistemas complexos, através da capacidade de imergir os usuários em um ambiente de realidade virtual, ou integração com realidade aumentada.

Por fim, os autores Vieira *et al.* (2018) também propuseram áreas promissoras de aplicação de SED no contexto da quarta revolução industrial:

- 1-Estudos que utilizam a SED como ferramenta instrutiva para a dinâmica dos processos;

- 2- Uso da SED para avaliar o valor agregado de I4.0 aos processos das organizações;

- 3- Submodelos reutilizáveis;

- 4- Usar a SED para alcançar o “gêmeo digital” das fábricas;

- 5- Usar a SED em tempo real para modelar as cadeias de abastecimento atuais, caracterizadas por sua incerteza e variabilidade;

Portanto, pode-se constatar que a simulação computacional está entrando em uma nova era com o advento da Indústria 4.0. À medida que a digitalização aumenta, é possível a constatação de mais simulações no futuro. Novos usos e necessidades de simulação surgirão, portanto, na manufatura na era da Indústria 4.0, e os grupos de pesquisadores na área da simulação computacional deverão responder com novos métodos, algoritmos e abordagens.

Essas novas abordagens podem ter como foco principal o fator humano. Segundo Kinzel (2017) na indústria 4.0, o ser humano está bastante presente, como nos exemplos a seguir: equipes de *designers* de sistemas, grupos de trabalhadores e os clientes presentes na sociedade. Bonekamp e Sure (2015) afirmam que trabalhos menos complexos têm grande tendência de queda na Indústria 4.0, em contraste com trabalhos de maior complexidade e que precisam de atualização profissional constante para o funcionário. Por sua complexidade, não é recomendável tratar o fator humano como algo constante e simples neste cenário.

É possível observar que com mais SCFs nas fábricas, também as tarefas de planejamento convencionais, como o agendamento e sequenciamento da produção, serão realizadas cada vez mais em *real time*, sendo que os dados do processo de fabricação atual estarão disponíveis para o controle da fabricação (KUPRAT *et al.*, 2015). Logo, devido ao aumento na quantidade dos dados em tempo real, mais fatores podem ser considerados na tomada de decisão. Como o fator humano é a parte mais importante do SCFP (DOMBROWSKI *et al.*, 2014), é particularmente promissor e factível considerar-se de “alguma forma” esses fatores humanos no controle dos sistemas de manufatura.

No entanto, o caminho para a Indústria 4.0 e a crescente implementação de sistemas ciberfísicos estão causando mudanças no trabalho humano e na organização do trabalho, criando assim novos desafios e oportunidades. Para usar essas oportunidades e enfrentar os desafios, é imperativo uma compreensão holística das interações sociotécnicas emergentes e a aplicação de novas abordagens e métodos centrados no fator humano, na introdução de novas tecnologias digitais e no *design* do trabalho (KADIR *et al.*, 2019). Assim sendo, é importante frisar que segundo esses últimos autores, existe a necessidade de mais pesquisas sobre as evidências empíricas e melhorias da cooperação entre as áreas da emergente Indústria 4.0 (incluindo a simulação computacional), fatores humanos e ergonomia.

Por isso, embora exista uma tendência crescente na automação do trabalho humano em quase todos os setores, os trabalhadores humanos ainda desempenham um papel central em muitos sistemas de produção e logística (SGARBOSSA *et al.*, 2020).

## 2.2. Modelagem e Simulação a Eventos Discretos

A simulação a eventos discretos (SED) é uma ferramenta utilizada em operações de manufatura e serviços com a finalidade de analisar e avaliar os sistemas produtivos. De forma mais específica, esta robusta ferramenta pode e não se limita à: reconfiguração de layouts, balanceamento de linha, determinação da utilização dos operadores, visualização do fluxo entre outras aplicações. Os modelos de simulação são formas de representar uma operação existente, uma operação em construção ou até mesmo uma operação hipotética do sistema. Essas representações podem ser matemáticas, lógicas ou simbólicas, permitindo que o modelo seja analisado sem a necessidade de um sistema real reduzindo, portanto, os riscos e os custos que a mudança de um sistema pode causar (LAURINDO *et al.*, 2018). Em um contexto *Lean Production*, a simulação a eventos discretos traz dinamismo para o mapa do estado atual e mapa do estudo futuro de um processo, sendo possível perceber como os recursos estão sendo utilizados e onde estão localizadas as perdas de processo, trazendo assim uma melhoria na eficiência da operação (DOGAN e UNUTULMAZ, 2014). Logo, a modelagem e simulação é amplamente utilizada em muitos setores para avaliar opções alternativas e para testar estratégias ou regras operacionais que são muito complexas para serem modeladas analiticamente (BRAILSFORD *et al.*, 2012).

Neste contexto, os autores Banks *et al.* (2010) afirmam que, a simulação tem se tornado uma das técnicas mais populares, para se analisar problemas complexos. Atualmente, com a evolução dos estudos na área, a simulação a eventos discretos vem sendo cada vez mais utilizada e os benefícios com ela obtidos têm gerado impactos nos mais diferentes sistemas (MIRANDA *et al.*, 2010). Segundo Hillier e Lieberman (2010), a simulação é uma técnica extremamente versátil, podendo ser utilizada para investigar praticamente qualquer tipo de sistema estocástico. Essa versatilidade fez da simulação a técnica de pesquisa operacional mais utilizada para estudos que lidam com sistemas estocásticos.

Ainda, segundo estes autores, devido à enorme diversidade de sua aplicação, é praticamente impossível enumerar todas as áreas nas quais a simulação vem sendo utilizada. Os autores Banks *et al.* (2010) e Hillier e Lieberman (2010), também, apresentam algumas categorias particularmente importantes de aplicações da simulação. Entre as principais categorias, destacam-se: projeto e operações em manufatura, gerenciamento de projetos e construção civil, logística, *supply chain* e redes de distribuição, administração do sistema de estoques, modelagem de transporte e tráfego, análise de riscos, aplicações médicas, aplicações militares e aplicações nas mais diversas áreas de serviços, tais como serviços governamentais,

bancos, hotelaria, restaurantes, instituições educacionais, entre outros. Ainda segundo Banks *et al.* (2010), inúmeras são as vantagens proporcionadas pela simulação, embora esta, também apresente algumas desvantagens. Pinho (2008) e Torga (2007) afirmam que, se comparada a modelos matemáticos, as vantagens proporcionadas pela simulação a eventos discretos são enormes. Principalmente, no que diz respeito à sua conceituação de fácil compreensão e à possibilidade de comparação virtual, trazendo maiores contribuições para o objeto em estudo.

Complementando as definições acerca de SED, os autores Harrel *et al.* (2004), afirmam que a simulação é a imitação de um sistema real modelado em computador para posterior realização de experimentos para avaliação e melhoria de seu desempenho. Para Banks *et al.* (2010), a simulação a eventos discretos é a criação e a observação de uma história de um sistema real para gerar inferências referentes a ele. Leal (2003) define simulação como a representação de um procedimento em um tempo menor do que levaria no cenário real e com menor custo, favorecendo a previsão do comportamento do sistema para que se possam tomar as devidas ações corretivas visando à redução de custos. Segundo Bloomfield *et al.* (2012), o fato de a simulação a eventos discretos simular o comportamento de sistemas sem que ele exista fisicamente, reduz drasticamente o custo de desenvolvimento desse sistema.

Segundo Siebers (2004), devido à complexidade dos sistemas reais, um modelo de simulação é apenas uma cópia restrita do sistema real. Para Robinson (2013), deve-se incluir em um modelo o mínimo de detalhes necessários para se atingir o objetivo do projeto. Por outro lado, o mesmo autor adverte que a simplificação e a abstração de um modelo, muitas vezes, levam a alguma perda na exatidão e afirma que, seria muito útil estimar a extensão dessa perda.

Por fim, segundo Law (2009), a simulação é uma alternativa à experimentação direta no sistema real, evitando, assim, os custos devidos à experimentação real e à interrupção do fluxo de atividades do sistema real. Chwif e Medina (2010) ressaltam que, devido à grande complexidade dos modelos de manufatura, devido à sua natureza dinâmica e aleatória, um modelo de simulação permite reproduzir em um computador o mesmo comportamento que o sistema teria se submetido às mesmas condições de contorno.

Por isso, não é novidade que as aplicações dos projetos de simulação computacional têm aumentado em todas as áreas, auxiliando os gestores na tomada de decisão em problemas de simples à complexos, dessa forma possibilitando um melhor conhecimento dos processos nas organizações (SAKURADA e MIYAKE, 2009).

Conseqüentemente a aplicação dessa ferramenta vem ocorrendo em uma variedade de sistemas como, terminais de aeroportos (TOMASELLA *et al.*, 2017), sistemas e processos médicos (RICHARDSON e COHN, 2018), entre outros, com o objetivo de melhorar o

desempenho deste sistema, diagnosticar eventuais problemas e avaliar alternativas mais eficientes (PADILLA *et al.*, 2016). Vale ressaltar que a simulação computacional pode, também, ser usada para dimensionar um sistema, melhorar o uso de equipamentos e demonstrar o potencial para a instalação de novos equipamentos (NA e SHINOZUKA, 2009).

Outras vantagens e características da simulação a eventos discretos incluem: a capacidade de simular anos de um sistema real em um tempo menor; capacidade de estudar diferentes componentes de um sistema e suas interações; melhor entendimento do sistema em análise, beneficiando todos os *stakeholders* envolvidos; estudar alternativas sem incorrer em riscos, custos e perigos desnecessários; monitorar e controlar o sistema, resolvendo problemas complexos, tomadas de decisão, entre outros (FOWLER e ROSE, 2004; POPOVICS *et al.*, 2016 apud. VIEIRA *et al.*, 2018). No entanto, vale frisar que em uma perspectiva operacional, para realizar os projetos de simulação computacional, normalmente, são utilizados softwares comerciais como, por exemplo, *Simio*®, *PlantSimulation*®, *FlexSim*® (DIAS *et al.*, 2016; ABU-TAIEH e EL SHEIKH, 2007; HLUPIC e PAUL, 1999 apud. VIEIRA *et al.*, 2018).

Porém, os softwares de simulação são o “meio” e não o “fim”, embora os vendedores de softwares de simulação tenham desenvolvido pacotes que exigem somente a entrada de dados para sua operação (modelos genéricos), simulação não é só conhecimento de software. Um estudo de simulação é uma atividade sofisticada de análise do sistema que exige que o analista tenha, ainda que, mínimo conhecimento do método de simulação (validação de modelos, seleção de distribuições de probabilidade para entrada de dados, projeto e análise de experimentos simulados, etc.), teoria da probabilidade, estatística, gerenciamento de projetos, e conhecimento detalhado das operações do sistema a ser estudado (LAW, 2009).

É válido, também, listar mais uma grande vantagem da SED que é procurar repetir o mesmo comportamento que o processo real teria em condições similares. Sendo assim, o modelo de simulação computacional é utilizado, particularmente, como uma ferramenta para obter-se respostas a sentenças do tipo: “o que ocorre se” (CHWIF E MEDINA, 2010).

Dessa maneira, a modelagem e simulação ajuda visualizar, avaliar, implementar, modificar e melhorar o complexo processos de produção, usando animações de computador dentro de um tempo e investimento razoável (SANDANAYAKE, ODUOZA, e PROVERBS, 2008; SANDANAYAKE e ODUOZA, 2009). Na sequência, os pesquisadores Ryan e Heavey (2006) apontam, a simulação como uma das técnicas de pesquisa mais utilizada devido, principalmente, à sua versatilidade, flexibilidade e poder de análise.

Portanto, a modelagem e simulação a eventos discretos é uma ferramenta poderosa de análise de sistemas. Porém, na prática, vários erros podem comprometer um estudo de

simulação computacional que pode levar o tomador de decisão a uma conclusão errada, por essa razão, algumas precauções devem ser tomadas dentro de sete importantes aspectos: coleta de dados, construção de modelo, verificação e validação, análise, gráficos da simulação, gerenciamento do processo de simulação e fatores humanos, conhecimento e habilidades (BANKS e CHWIF, 2011).

No contexto da coleta de dados os autores Nelson e Yamnitsky (1998), alertam que durante a fase de modelagem dos dados de entrada, determinados modelos de entrada, adotados na SED, falham por diversas razões. Dentre essas, pode-se dizer: as distribuições teóricas de probabilidade representam formas delimitadas e não flexíveis para se modelar todo tipo de dado; os processos de entrada não são inerentemente independentes, sejam na forma de série temporal ou em relação a outros processos de entrada no simulador; os processos de entrada mudam com o tempo; e, por fim, nenhum dado de entrada está disponível para a seleção ou avaliação de uma distribuição de probabilidade.

Já na etapa de implementação do modelo computacional, o analista deve ficar atento com a “verificação” e “validação” do sistema alvo da modelagem (MONTEVECHI *et al.* 2010). Uma importante definição é apresentada pelos autores Chwif e Medina (2010), que apresentam a distinção do termo “validação” e “verificação” associado ao modelo conceitual. Para os mesmos autores, verificar, num sentido mais simplista, significa retirar os *bugs* do modelo, ou seja, a verificação está relacionada com o modo como o modelo está sendo implementado. Já a validação está relacionada com o que será modelado. Na visão de Kleijnen (1998), a verificação objetiva um programa computacional perfeito, de tal forma que o código de programação utilizado não contenha erros.

Ainda de acordo com Chwif e Medina (2010), duas importantes regras da verificação e validação devem sempre ser levadas em consideração:

1-Não há como validar um modelo 100% ou garantir que ele seja 100% válido. O que se consegue é aumentar a confiança no modelo ou mesmo acreditar que ele representa satisfatoriamente o sistema;

2-Não há como garantir que um modelo seja totalmente livre de *bugs*. Ou seja, embora o modelo possa ser verificado para determinada circunstância, não há como garantir que, para quaisquer circunstâncias, funcione conforme o pretendido.

A literatura apresenta algumas técnicas de verificação de modelos de simulação computacional, como:

1-Verificação modular (CHWIF e MEDINA, 2010): a confecção do modelo em partes permite uma verificação focada em cada parte do modelo construída, o que facilita a

identificação de erros no modelo e uma ação corretiva mais clara ao modelador. Esta técnica de verificação complementa a ideia, de que, o modelo não deve ser construído na sua forma final logo na primeira vez. Este deve ser incrementado na medida, em que, o modelador realiza a verificação da versão anterior;

2-Uso de valores constantes ou simplificados *versus* cálculos nominais (CHWIF e MEDINA, 2010; KLEIJNEN, 1998): tomar os valores médios de cada distribuição e considerar estes valores como constantes e determinísticos. É bem provável que os resultados estarão incorretos, mas, torna-se possível comparar os resultados do modelo com os resultados de uma base de cálculo;

3-Utilização do *debugger* ou depurador (CHWIF e MEDINA, 2010): a presença de um depurador em *softwares* de simulação favorece o uso desta técnica;

4-Uso da animação gráfica (CHWIF e MEDINA, 2010; KLEIJNEN, 1998): considerada uma poderosa ferramenta de verificação, a animação permite ao modelador acompanhar o processo na tela do computador. Eventos como o abastecimento de postos de trabalho, formação de filas, trajeto de itens, movimentação de funcionários, paradas para manutenção, podem ser visualizados através da animação gráfica, permitindo ao modelador verificar a presença de possíveis falhas na programação. A animação permite não apenas a visualização de erros de programação, mas erros conceituais, o que também implica no processo de validação.

Segundo Kleijnen (1998), o analista pode avaliar alguns resultados intermediários da simulação manualmente e comparar estes resultados com os dados de saída da simulação. O processo de captura de todos os resultados intermediários do modelo computacional, de forma automática, é chamado de *tracing*. O autor também aponta como técnica de verificação a comparação dos dados de saída da simulação com resultados analíticos. Esta ação é facilitada com o uso de valores constantes para as variáveis de entrada, confirmando o “item b” apresentado previamente.

De acordo com Kleijnen (1998), casos em que o modelo é inválido, mas se aceita este modelo como um modelo válido, correspondem aos erros mais comuns em simulação. Este erro é também conhecido como risco do usuário do modelo. Ainda, segundo o autor, a escolha do valor de  $\alpha$  no teste de hipóteses é problemático. Os valores mais utilizados são 0,10 e 0,05. A escolha depende da análise das consequências financeiras.

Em seguida, algumas técnicas de validação aplicadas ao modelo computacional podem ser apontadas:

1-Teste de *Turing* ou validação *black-box* (CHWIF e MEDINA, 2010; KLEIJNEN, 1998; SARGENT, 2014): escolhe-se uma pessoa que entenda bem do sistema (especialista) que

foi modelado e apresenta-se a ela dois conjuntos de dados de saída, um vindo do sistema real e outro do modelo de simulação. Caso o especialista não consiga distinguir se os resultados apresentados são provenientes do sistema real ou do modelo de simulação, então o modelo pode por meio desta técnica ser considerado “válido”;

2-Duplicação de modelos (CHWIF e MEDINA, 2010): prática eficiente, porém onerosa, pois supõe a existência de duas equipes independentes desenvolvendo modelos do mesmo sistema. Desta forma, se as duas equipes (operando de forma independente), desenvolverem modelos similares, este seria um bom indicador da validade do modelo;

3-Comparação com modelos anteriores (CHWIF e MEDINA, 2010): desenvolvimento de um modelo a partir de outro já validado;

4-Validação “face-a-face” (CHWIF e MEDINA, 2010; KLEIJNEN, 1998; SARGENT, 2014): discussão com especialistas, objetivando alcançar o aval para o uso do modelo aplicado tanto no modelo conceitual como no operacional. Nesta técnica de validação, Kleijnen (1995) defende a utilização da animação, como forma de apresentação do modelo aos especialistas;

5-Comparação dos dados reais e simulados (CHWIF e MEDINA, 2010, KLEIJNEN, 1998; SARGENT, 2014): pode-se plotar os dados de saída do sistema real e do modelo simulado, em um eixo horizontal, representando o tempo, e um eixo vertical, representado o sistema real e o simulado. Através da observação, o analista pode perceber se os dados da simulação refletem o comportamento dos dados reais. O “teste  $t$ ” é indicado pelos autores nesta técnica;

6-Uso de dados históricos (CHWIF e MEDINA, 2010; KLEIJNEN, 1998; SARGENT, 2014): pode-se utilizar dados históricos para calibrar o modelo. Desta forma, não se utilizaria um modelo probabilístico, mas sim dados históricos que representam o ocorrido durante o ano, por exemplo. Por fim, Kleijnen (1998) alerta que, em algumas situações, chega a ser impossível obter dados relevantes.

Consequentemente, as saídas do modelo devem ser compatíveis com o desempenho verificado no sistema. Os autores recomendam o uso do teste  $t$  emparelhado nesta técnica de validação.

Sargent (2014) destaca a preocupação com a validação desde a fase da modelagem conceitual. Segundo o autor, há dois tipos de suposições do modelo conceitual. São as suposições estruturais e as de dados. As suposições estruturais podem ser validadas através de observações do sistema do mundo real e através de discussões com a equipe especializada no sistema. O autor destaca que, nenhuma pessoa conhece tudo sobre o sistema. Desta forma, várias pessoas precisam ser consultadas para a validação das suposições do modelo conceitual.

A validação através da comparação dos resultados fornecidos pelo modelo e dos resultados obtidos no sistema real deve ocorrer através de testes estatísticos. Uma das formas a serem citadas foi apresentada no livro dos autores (CHWIF e MEDINA, 2010), que foi proposta tendo como base o trabalho de Kleijnen (1998). A ideia consiste em tomar o intervalo de confiança para a diferença entre os dois conjuntos (dados do modelo e dados do sistema). Se o intervalo contiver o zero pode-se afirmar que, com um nível de confiança  $[(1-\alpha).100\%]$ , as respostas do sistema real e do modelo de simulação são equivalentes.

Segundo Leal *et al.* (2011), à medida que o número de experiências de simulação aumenta, a necessidade de validação e verificação desses modelos exige uma atenção especial por parte dos praticantes da simulação. Para tanto, deve-se ter consciência que a variação do ritmo do trabalho humano pode interferir no nível de confiabilidade da validação aplicada em um modelo de simulação a eventos discretos.

Raunak e Olsen (2014) afirmam que, a validação do modelo de simulação é uma tarefa difícil e necessita para tanto de uma avaliação rigorosa. Portanto, a quantificação da validação é uma ação necessária para responder à pergunta "qual o critério adequado para a validação?". Pode-se responder esta questão através do desenvolvimento de critérios de adequação para medir a validação realizada em um determinado modelo de simulação. Para Sargent (2014), a verificação e validação estão preocupadas em determinar se um modelo e seus resultados são "corretos", para um uso ou finalidade específica. A verificação do modelo é formalmente definida como "assegurar que o programa de computador do modelo computadorizado e sua implementação estão corretos e a validação do modelo é definida como a comprovação de que o modelo computadorizado, dentro de seu domínio de aplicabilidade, possui uma precisão aceitável".

### 2.3. Fatores humanos e simulação a eventos discretos

Para investigar as pesquisas relacionadas ao tema da presente tese, o seguinte procedimento de revisão da literatura foi aplicado. Considerou-se como base de dados o Scopus® e no campo de pesquisa de trabalhos acadêmicos as palavras-chave "*discrete event simulation*" and "*human factor*" foram selecionadas e consideradas apenas para o *abstract*, *keyword* e *title*. Como resultado, a base de dados considerada retornou um total de 74 trabalhos publicados entre os períodos de 01/01/1994 à 28/12/2021.

Porém, desse total encontrado, 40 trabalhos não foram analisados, por se desviarem do assunto principal, abordando a SED de forma isolada e não relacionada com a modelagem dos

fatores humanos e considerando o SED em associação com a simulação baseada em agentes ou simulação dinâmica. Vale ressaltar, que livros sobre essa temática não foram considerados, apenas pesquisas publicadas em periódicos e congressos internacionais. Também, foram excluídas as pesquisas que utilizaram a SED como meio para se testar uma abordagem prática para melhorar as condições dos fatores humanos.

Por fim, foram excluídas as pesquisas que apresentaram um foco muito “intenso” nos fatores humanos e apenas comentaram sobre a SED de forma superficial. Após a aplicação dos critérios de exclusão, 34 trabalhos foram considerados elegíveis para análise.

A Figura 2.1, foi retirada dos relatórios da Scopus® e nela fica evidente que embora no início da década de 90 poucos trabalhos tenham sido publicados acerca da temática SED e FHs, nos últimos 10 anos fica nítido a existência de uma tendência crescente de publicações com este tema. Isso é uma evidência do crescente interesse e reconhecimento da importância dos FHs em projetos de SED.

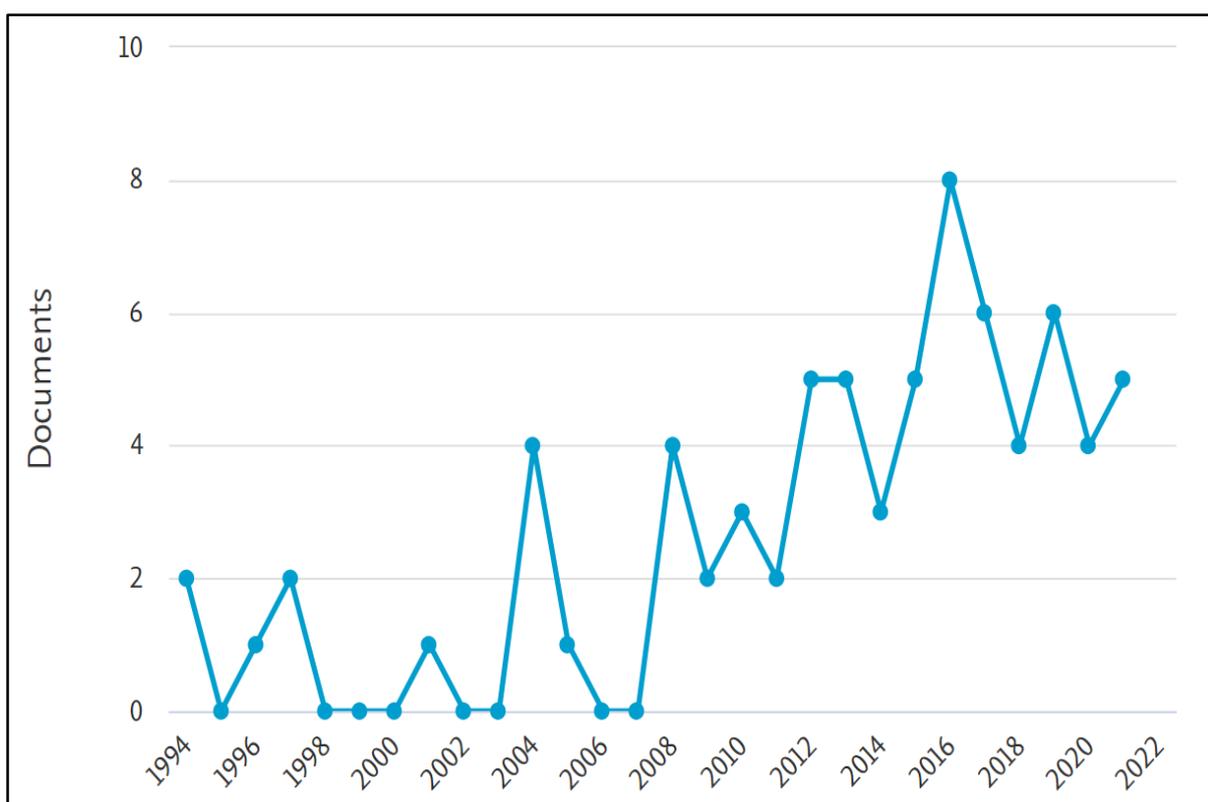


Figura 2. 1 - O crescente interesse e reconhecimento da importância dos FHs em projetos de SED

Fonte: Scopus®

A Figura 2.2, é outro relatório retirado da Scopus® e nela estão classificados os principais autores internacionais que produziram teorias acerca da temática SED e FHs.

Portanto, nesta figura é exibido os 15 pesquisadores com mais publicações entre os anos de 01 de janeiro de 1994 até 31 de dezembro de 2021 sobre a temática simulação a eventos discretos e fatores humanos.

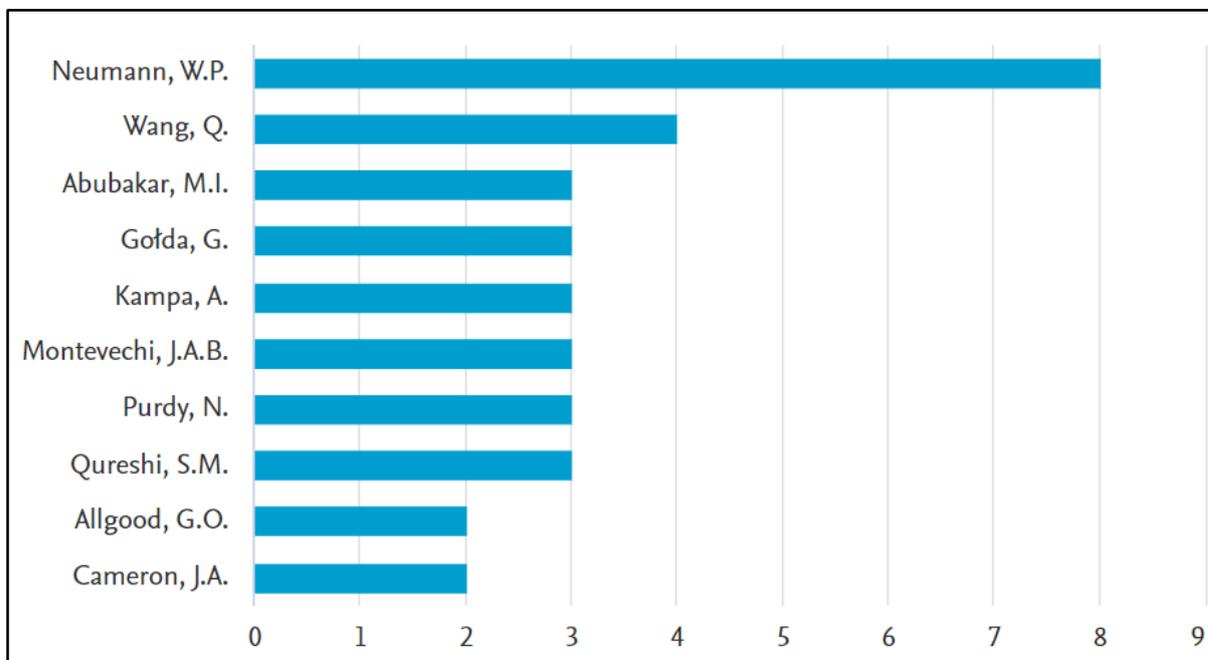


Figura 2. 2 - Os 15 autores com mais publicações sobre a importância dos FHS em projetos de SED  
Fonte: Scopus®

Conforme mencionado, os 34 trabalhos selecionados foram estudados e analisados. Vale ressaltar, em vista disso, que a sistemática aplicada na presente tese tem por função principal contextualizar o *background* do tema estudado que é acerca da simulação a eventos discretos e fatores humanos, para em seguida, ser adequadamente apresentada a novidade desta presente tese que é a enunciação de uma equação matemática para integrar três importantes fatores humanos em um projeto de simulação a eventos discretos.

Para tanto uma tabela foi construída com o objetivo de sumarizar alguns aspectos importantes (representados nas quatro colunas da tabela) dos 34 trabalhos selecionados e analisados rigorosamente segundo o procedimento de revisão da literatura mencionado no início desta seção.

É importante salientar que os critérios de exclusão aplicados foram definidos de forma objetiva, imparcial e sem qualquer tipo de conflitos de interesses. Desta forma, a Tabela 2.1 é exibida a seguir. Nesta Tabela 2.1 a primeira coluna "Desenvolve uma SED" classifica todas as pesquisas encontradas que fizeram o uso da simulação a eventos discretos em um objeto de estudo real.

Tabela 2. 1 - Classificação dos trabalhos sobre SED e FHs

<b>Autores</b>	<b>Desenvolve uma SED</b>	<b>Integra os FHs na SED</b>	<b>Reconhece a importância dos FHs</b>	<b>Apenas coment a sobre os FHs</b>	<b>Medida de performance</b>
Qureshi <i>et al.</i> (2021)	X	X	X		Qualidade no atendimento
Abubakar e Wang. (2021)	X	X	X		Produtividade
Vilela <i>et al.</i> (2020)	X	X	X		Produtividade
Keshtkar <i>et al.</i> (2020)	X			X	Taxa de transferência de paciente
Barosz <i>et al.</i> (2020)	X		X		Eficiência geral da fábrica
Qureshi <i>et al.</i> (2020)	X		X		Taxa enfermeira-paciente
Kimpara <i>et al.</i> (2020)	X			X	Não aplicável
Oleghe e Salonitis (2019a)	X	X	X		Operações TPM
Qureshi <i>et al.</i> (2019)	X			X	Taxa enfermeira-paciente
Touhami <i>et al.</i> , (2019)	X			X	Segurança e prevenção rodoviária
Machado <i>et al.</i> (2019)	X		X		Confiabilidade do modelo
Oleghe e Salonitis (2019b)	X		X		Indicadores <i>lean</i>
Abubakar e Wang (2019)	X	X	X		Fatores humanos
Mukerjee <i>et al.</i> (2019)	X	X	X		Tempo de reação humana
Wang <i>et al.</i> (2018)	X		X		Desempenho humano
Abubakar e Wang (2018)	X	X	X		Desempenho humano
Avrunin <i>et al.</i> (2018)	X			X	Ciência de dados cirúrgicos
Kampa e Golda (2018)	X		X		Eficiência geral da fábrica
Stewart <i>et al.</i> (2017)	X		X		Avaliação de risco
Wang e Abubakar (2017)	X		X		Não aplicável
Kampa <i>et al.</i> (2017)	X		X		Eficiência geral da fábrica
Neumann e Medbo (2017)	X	X	X		Aumento da produção
Borghetti <i>et al.</i> (2017)	X			X	Sistema de aprendizagem
Paiva <i>et al.</i> (2017)	X		X		Fatores humanos
Oliveira <i>et al.</i> (2017)	X	X	X		Fatores humanos
Alshammri e Qin (2017)	X		X		Performance da equipe
Caggiano <i>et al.</i> (2016)	X		X		Eficiência energética
Dode <i>et al.</i> (2016)	X	X	X		Produtividade e qualidade
El Mouayni <i>et al.</i> (2016)	X		X		Produtividade e qualidade
Seo <i>et al.</i> (2015)	X	X	X		Desempenho de construção
Perez <i>et al.</i> (2014)	X		X		Previsões de carga de trabalho
Neumann e Medbo (2009)	X		X		Produtividade e qualidade
McHaney (2008)	X		X		Fatores humanos
Baines <i>et al.</i> (2004)	X	X	X		Desempenho humano

Fonte: Próprio autor

A segunda coluna "Integra os FHs na SED", mostra as pesquisas que utilizaram de forma aplicada e quantitativa, pelo menos dois fatores humanos diretamente no projeto de simulação a eventos discretos com a finalidade de integrá-los ao projeto para aplicar a consideração destes FHs.

Na terceira coluna "Reconhece a importância dos FHs" estão os trabalhos que reconhecem a importância de considerar e integrar os fatores humanos em projetos de SED sem, no entanto, qualquer tipo de abordagem prática ou implementação quantitativa aplicada dentro do projeto de simulação computacional.

Na quarta coluna "Apenas comenta sobre os FHs" estão todos os trabalhos que comentam de forma superficial e sucinta sobre os fatores humanos sem, no entanto, reconhecer que estes fatores são de extrema importância no momento da concepção de um modelo de simulação a eventos discretos.

Na quinta e última coluna, "Medida de performance" são apresentados os tipos de medidas de desempenho adotadas por cada trabalho que foi classificado nesta Tabela 2.1. Esta última informação é relevante, pois aponta para quais contextos a temática SED e FHs está inserida.

Explorando o referencial presente na Tabela 2.1 é possível destacar que inúmeros aspectos determinam a produtividade dos fatores humanos nos sistemas de produção, portanto, existem muitos documentos e resultados de pesquisa que tratam de coleções e quantificações dessa produtividade dos fatores humanos (BAINES *et al.*, 2005; BISKUP, 2008; BONNEY *et al.*, 2000; FLETCHER *et al.*, 2008; PARK *et al.*, 2001; TORIIZUKA, 2001).

É essencial frisar que ultimamente, alguns autores têm trabalhado na temática dos fatores humanos e SED incisivamente, conforme demonstrado na Tabela 2.2 (VILELA *et al.*, 2020; OLEGHE e SALONITIS, 2019a; ABUBAKAR e WANG, 2019; NEUMANN e MEDBO, 2017). Consequentemente, algumas pesquisas recentes neste contexto apresentaram resultados convergentes sobre o tema FHs e SED.

A pesquisa de Vilela *et al.* (2020), por exemplo, investigou a influência do fator humano na produtividade de uma linha de montagem de placas eletrônicas em um projeto de SED. Ou seja, para melhorar a confiabilidade do modelo de simulação a eventos discretos, foi necessário representar da melhor forma possível o comportamento do operador e seu subsequente desempenho. Sabendo-se que os modelos de simulação determinísticos muitas vezes superestimam a capacidade de produção dos sistemas de manufatura porque não levam em consideração alguns relacionamentos importantes, como o impacto do desempenho do fator humano na produtividade, o trabalho dos autores Vilela *et al.* (2020) utilizou técnicas

estatísticas para analisar o número total de placas eletrônicas produzidas, tendo em conta as diferentes horas de trabalho, de forma a captar a variabilidade do desempenho humano em diferentes momentos do dia. Por fim, os resultados mostraram que o desempenho humano tem uma influência significativa na produtividade da linha de montagem examinada e influencia na confiabilidade das previsões de produção por meio da SED.

É imperativo, neste ponto, destacar também os resultados da pesquisa de Baines *et al.* (2005), pois suas descobertas oferecem uma estrutura de ponderação e classificação dos fatores humanos de produtividade tendo por base uma extensa revisão da literatura.

É notório apontar também que os autores Baines *et al.* (2005) diferenciam três categorias principais compreendendo 65 potenciais fatores humanos, sendo:

- a) Primeira categoria: são os fatores individuais, como a experiência e comprometimento do fator humano;
- b) Segunda categoria: são os fatores físicos do ambiente de trabalho que afetam direta ou indiretamente o desempenho do fator humano como ruído, temperatura e etc;
- c) Terceira categoria: são os fatores organizacionais e de nível, como padrões de turnos e organização da equipe de trabalho.

Além disso, é possível distinguir os potenciais fatores humanos em fatores de baixo e alto nível. Os fatores de baixo nível representam mecanismos fisiológicos básicos, como o biorritmo inerente e intrínseco a cada ser humano (BAINES *et al.*, 2004). Por outro lado, os fatores de alto nível são representados por interações complexas e mecanismos psicológicos imprevisíveis como o impacto que a satisfação no trabalho causa na produtividade, cuja implementação em modelos de simulação é difícil e onerosa (BAINES *et al.*, 2004).

Considerando a lista desses 65 potenciais fatores humanos proposta pelos autores Baines *et al.* (2005), pode-se dizer, portanto, que a literatura presta demasiada atenção em fatores específicos da produtividade humana. Como exemplo, pode-se citar o impacto dos efeitos da aprendizagem na produtividade. Este último trabalho, foi cientificamente apresentado no ano de 1930, por meio do resultado da pesquisa do autor Wright (1936), sendo que este último autor é frequentemente apontado como um dos pioneiros nessa área de aplicação.

Já os autores Singh e Srivastava (1981) foram pioneiros na análise do fator humano na década de 80 e estabeleceram que o moral do trabalhador está positivamente relacionado ao desempenho da atividade. Neste mesmo contexto, os pesquisadores Yitzhak e Ferris (1987), descobriram também que a identidade da tarefa estava relacionada ao desempenho no trabalho.

Em outro estudo sobre os FHs o autor Folkard (1996) descreveu como a seriedade de um indivíduo varia durante um dia de trabalho e Furnham (1992) investigou a relação entre a personalidade do operador e seu subsequente desempenho no trabalho.

Além disso, existem algumas pesquisas que se concentram na identificação de fatores humanos de produtividade, por exemplo, Neumann e Medbo (2009) estudam como considerar o efeito da autonomia do operador e sua capacidade de simular. De forma análoga, o trabalho dos autores Neumann *et al.* (2009), apresenta uma abordagem para integrar os fatores humanos em um projeto de SED em um contexto de estratégias de produção. Conclui-se que o FHs podem ser integrados a SED, o que permite que os riscos do operador e as fragilidades do sistema sejam levados em consideração em um estágio inicial. Porém, segundo esses autores, pesquisas futuras devem expandir o espectro e testar a validade dos FHs integrados aos processos de modelagem.

Por outro lado, Mason *et al.* (2005) trabalham na vertente da integração dos fatores humanos em projetos SED. Ou seja, de como representar a variação da produtividade do fator humano em um projeto de SED usando as funções da densidade de probabilidade estatística.

Nesta mesma linha, os autores Dode *et al.* (2016), também, aplicaram em suas pesquisas o fator humano em um projeto de SED em uma linha de montagem usando a métrica da produtividade como medida de desempenho analisada.

Sendo assim, esses últimos autores realizaram uma pesquisa que teve por objetivo aplicar uma abordagem de simulação baseada em fatores humanos em um estudo de caso comparando dois projetos de linha de montagem no contexto da indústria eletrônica. Essa nova abordagem pode prever o aumento da fadiga do operador, efeitos de qualidade relacionados à fadiga e mudanças de produtividade com base nas configurações do projeto do sistema. Na comparação de demonstração, a dose de fadiga no sistema proposto, que incluiu a integração dos FHs na fase de projeto, foi 7-33% menor. No sistema existente, a medida de dose de fadiga se correlacionou com déficits de qualidade, respondendo por 26%. Logo, os modelos de SED que não levam em consideração os aspectos humanos podem produzir resultados não confiáveis em termos de estimativas de produtividade e qualidade. Esta pesquisa mostra, portanto, que é possível tornar os sistemas de produção mais produtivos e, ao mesmo tempo, menos perigosos para o operador (DODE *et al.*, 2016).

De forma inovadora, o trabalho de Avrunin *et al.* (2018) fez a medição da carga cognitiva aplicada em associação com a SED para melhorar os indicadores de um procedimento cirúrgico. Ou seja, neste trabalho o peso do fator humano foi considerado dentro da “dimensão” cognitiva dos operadores em estudo.

Pode-se afirmar que de forma análoga, os autores Torres *et al.* (2016) investigam o impacto dos fatores humanos na variação do desempenho no trabalho e, portanto, na validade do modelo de computador por meio de quatro cenários que foram criados e dependiam do nível de detalhamento dos tempos das tarefas.

Com o mesmo propósito, porém, por meio de uma abordagem não ortodoxa, o estudo dos pesquisadores Ferguson *et al.* (2012) acompanhou 29 operadores em uma operação de mineração trabalhando em turnos de sete dias e sete noites, e coletou amostras de saliva para medição da melatonina. Nesta pesquisa foi, também, registrado o sono por meio de monitores de atividade. Por fim, os operadores passaram por testes de desempenho (tarefa de vigilância psicomotora) para um ciclo de escala completo e uma das importantes conclusões do trabalho foi que a privação cumulativa de sono está frequentemente associada a padrões de trabalho envolvendo os turnos noturnos ou matinais.

Neste mesmo contexto, os autores Azadeh *et al.* (2016) aplicam a integração dos fatores humanos em um projeto de SED por meio da modelagem dos erros humanos que são classificados com base no comportamento baseado em habilidade, regra e conhecimento. No estudo, três tipos de erros são avaliados, incluindo punção venosa repetida, transporte inseguro e erros de amostragem e setenta cenários aprovados por especialistas são considerados nesta densa pesquisa.

Em outras aplicações e nas circunstâncias de um novo método de intervenção para diminuir as falhas de máquinas, relacionadas com o homem, Kiassat *et al.* (2014) usam os fatores humanos como estratégia essencial para a obtenção de resultados confiáveis. Por fim, o trabalho dos autores Barosz *et al.* (2020) enfatizam que, frequentemente, em projetos de simulação computacional o fator humano não é suficientemente e adequadamente modelado, corroborando desta forma para a necessidade de uma abordagem assertiva que faça a integração destes fatores humanos em um projeto de SED.

Em outro importante trabalho os autores Baines *et al.* (2002) afirmam que há uma necessidade de expandir a capacidade de modelagem para incluir as relações entre fatores centrados no ser humano (demografia, atitudes, crenças, etc.), seu ambiente de trabalho (físico e organizacional) e seu desempenho subsequente em termos de rotinas produtivas.

Sobre a importância da consideração do fator humano para os sistemas de produção os autores Fletcher *et al.* (2008) afirmam que a contribuição do trabalho humano continua sendo um elemento vital que afeta o desempenho geral e a produção, sendo o desempenho individual dos trabalhadores conhecido como um produto de atitudes pessoais em relação ao trabalho. No entanto, nos processos de *design* (simulação computacional, balanceamento de linha e etc.) do

sistema atual, a variabilidade do desempenho do trabalhador é considerada amplamente insignificante e o impacto potencial das atitudes do trabalhador é ignorado completamente (FLETCHER *et al.*, 2008). Por fim, estes últimos autores concluem que o modo de tempos de ciclo da tarefa de produção excede em muito os parâmetros de desempenho padronizados que são normalmente usados por projetistas de sistemas para avaliações de projeto e balanceamento de linha.

Por isso, é válido ressaltar que, segundo os autores Brailsford *et al.* (2012), os resultados do modelo de simulação mais sofisticado e complexo podem não refletir verdadeiramente o que acontece no mundo real, porque tais modelos não levam em consideração o comportamento humano. Por essa razão pesquisadores como Kiassat *et al.* (2014) apresentam um novo método para quantificar os efeitos dos fatores humanos sobre o risco de falha nas indústrias. Logo, um método foi desenvolvido para incorporar os fatores humanos, além de fatores relacionados à máquina. Isso permitiu ao modelo considerar o tempo de atividade esperado e a probabilidade de falha, dado o nível de habilidade do operador e as condições de trabalho, para calcular a receita esperada associada a cada método de intervenção proposto.

No trabalho dos autores Digiesi *et al.* (2009), ficou demonstrado que o comportamento dinâmico do trabalhador ao longo do tempo tem um impacto profundo no comportamento de filas das linhas de fluxo e os resultados da simulação mostram que essa conclusão vale para modelos de simulação de curto prazo e longo prazo.

De forma inédita e em um contexto de processos industriais e de negócios, a pesquisa dos autores Bruzzone *et al.* (2007) buscou enfatizar o impacto do comportamento humano, fornecendo também casos reais como suporte para validação da abordagem proposta. Esta abordagem buscou avaliar quantitativamente os benefícios potenciais da introdução de inúmeros fatores que afetam o desempenho operacional como o efeito das emoções, interações individuais e o impacto de instalações e subestruturas. Portanto, a abordagem dos autores estava focada na obtenção de uma avaliação quantitativa dos benefícios fornecidos pela introdução de fatores humanos no modelo de simulação computacional.

De forma complementar e sabendo-se que os comportamentos humanos são formados e avaliados por seu fator de modelagem de desempenho, o objetivo da pesquisa do autor Torizuka (2001) foi realizar uma modelagem de desempenho original para tarefas de manutenção e caracterizar essa modelagem por meio da análise estrutural.

É imprescindível citar também, que no trabalho dos pesquisadores Mason *et al.* (2005) foi utilizado funções de densidade de probabilidade para representar a variação dos tempos de atividade do trabalhador nos modelos DES.

Outro aspecto importante considerado dentro dos FHs é a fadiga, sendo a mesma multidimensional: cansaço, falta de energia, desconforto físico, desmotivação e sonolência distinguem-se como formas de fadiga (JABER *et al.*, 2013). Dessa forma e dada a sua relevância, o efeito da fadiga foi documentado em muitos setores industriais e de serviços e suas consequências incluem perda de rendimento, aumento de erros, insatisfação do trabalhador, redução de desempenho, lesões e acidentes.

No contexto das falhas de sistemas, os pesquisadores Akinci *et al.* (2006) estimam que 50% do retrabalho do produto estão relacionados a erros humanos, sendo que esses erros causam imperfeições no produto e afetam a qualidade da produção. Portanto, a “probabilidade de erro humano” depende da capacidade do trabalhador, da experiência, da própria tarefa e do ambiente (MICHALOS *et al.*, 2013). É importante complementar este último aspecto (erro humano) e apontar para os autores Givi *et al.* (2015) que apresentam um modelo para estimar a “probabilidade de erro humano” usando o nível de experiência e fadiga do operador.

Por fim, de forma complementar ao que foi supracitado, a pesquisa de Wang e Abubakar (2017) teve o objetivo de identificar possíveis fatores humanos que afetam principalmente o desempenho em sistemas de manufatura centrados no homem, por meio de um modelo que incorpora parâmetros de fatores humanos em um projeto de SED.

## **2.4. Fatores humanos considerados na equação proposta**

Como já foi mencionado no início deste Capítulo 2, existem inúmeros fatores humanos que podem ser considerados em uma possível integração quantitativa, no entanto, na presente tese foram escolhidos três FHs. Sendo assim, nesta seção serão apresentados de forma detalhada e na perspectiva da revisão da literatura estes três fatores que compõem a equação matemática que será apresentada no Capítulo 3.

Um sistema produtivo convencional emprega, geralmente, trabalhadores humanos e, conseqüentemente, este tipo de sistema de manufatura é centrado no ser humano, já que seu desempenho depende do fator humano (WANG e ABUBAKAR, 2017). Vale ressaltar que, esses fatores humanos podem incluir elementos cognitivos como experiência, nível de QI e elementos físicos como idade, sexo e destreza. No entanto, os resultados desses estudos são basicamente descritivos e os engenheiros de manufatura costumam encontrar dificuldades para compreender e aplicar os fatores humanos em projetos de sistemas de manufatura.

Por essa razão na prática, esse problema é frequentemente negligenciado pelos projetistas de sistemas de manufatura, e um ajuste dele no sistema real deve ser feito com base

em experiências pessoais e julgamento dos gerentes de produção (WANG e ABUBAKAR, 2017). A Tabela 2.2 refere-se aos autores que tem como foco de suas pesquisas os fatores humanos e seus efeitos em sistemas produtivos manuais. Buscou-se na literatura existente acerca desta temática os principais pesquisadores precursores deste assunto, por isso, é possível constatar neste referencial sumarizado várias pesquisas da década de 80 e 90.

Tabela 2. 2 - Influência dos FHs nos sistemas produtivos manuais

Fatores humanos	Medidas de desempenho	Referencial
Capacidade física de trabalho	Tempo de ciclo	Galen <i>et al.</i> (1987); Govindaraju <i>et al.</i> (2001); Boenzi <i>et al.</i> (2015)
	Satisfação no trabalho	Govindaraju <i>et al.</i> (2001); Narahari <i>et al.</i> (2017)
Performance (idade)	Carga de trabalho física	Shepherd <i>et al.</i> (2000); Schibye <i>et al.</i> (2001); Bridger <i>et al.</i> (2009); Stead <i>et al.</i> (1983); Göbel <i>et al.</i> (2009); Kenny <i>et al.</i> (2015)
	Tempo de reação	Woodson <i>et al.</i> (1992); Der <i>et al.</i> (2006); Salvia <i>et al.</i> (2016); Svetina <i>et al.</i> (2016); Doroudgar <i>et al.</i> (2017)
	Aprendizagem e esquecimento	Göbel <i>et al.</i> (2009); Parkinson <i>et al.</i> (1985); Boenzi <i>et al.</i> (2015)
	Habilidades cognitivas gerais	Warr <i>et al.</i> (1995); Boenzi <i>et al.</i> (2015); Parkinson <i>et al.</i> (1985); LImarinen <i>et al.</i> (2001)
	Satisfação no trabalho	Rhodes <i>et al.</i> (1983); Drabe <i>et al.</i> (2015); Clark <i>et al.</i> (1986); Kumar <i>et al.</i> (2017)
Gênero	Carga de trabalho física	Bridger <i>et al.</i> (2009)
	Tempo de reação	Der <i>et al.</i> (2006); Adam <i>et al.</i> (1999)
Performance (experiência)	Tempo de ciclo	Reagans <i>et al.</i> (2005)
	Taxa de saída de itens	Reagans <i>et al.</i> (2005); Hunter <i>et al.</i> (1986)
	Aprendizagem e esquecimento	Shafer <i>et al.</i> (2001); Hunter <i>et al.</i> (1986); Reagans <i>et al.</i> (2005)
	Carga de trabalho física	Giniger <i>et al.</i> (1983)
	Tempo de reação	Ando <i>et al.</i> (2004); Visser <i>et al.</i> (2007)
	Habilidades cognitivas gerais	Giniger <i>et al.</i> (1983); LImarinen <i>et al.</i> (2001); Boenzi <i>et al.</i> (2015)
Aprendizagem	Tempo de ciclo	Falck <i>et al.</i> (2012)
	Taxa de saída de itens	Shafer <i>et al.</i> (2001); Hunter <i>et al.</i> (1986)
Satisfação no trabalho	Taxa de saída de itens	Rodriguez <i>et al.</i> (2016)
Ritmo circadiano	Tempo de reação	Berg <i>et al.</i> (2006)

Fonte: Adaptado de Wang e Abubakar (2017)

Analisando de forma mais específica o conteúdo da Tabela 2.2, os fatores humanos possuem aspectos como: habilidades físicas, conhecimento, estados fisiológicos e traços psicológicos (WANG; ABUBKAR, 2017).

Dando continuidade no estudo dos fatores humanos, na década de 90 os autores Adam *et al.*, (1999) investigaram a relação entre capacidade cognitiva geral e tempo de reação. Já Berg *et al.*, (2006) afirmaram que a reação e o tempo podem ser afetados por distrações e fadiga mental. Lmarinen (2001) observou que o envelhecimento, afeta negativamente as habilidades cognitivas gerais e afeta positivamente a experiência.

Por fim, Kenny *et al.*, (2015) encontraram uma diminuição na capacidade aeróbia e musculoesquelética que leva a uma queda média de 20% na capacidade de trabalho físico dos operadores de 40 a 60 anos.

Sintetizando todos os trabalhos previamente mencionados na Tabela 2.2 foi possível construir a Tabelas 2.3 (WANG e ABUBAKAR, 2017).

Tabela 2. 3 – FHs e seu impacto na taxa de saída de itens

<b>Fator Humano</b>	<b>Impacto na Taxa de Saída de Itens (%)</b>
Ritmo circadiano	7,6
Satisfação no trabalho	28
Segurança	40,7
Aprendizagem	62,8
Performance (idade)	100
Performance (experiência)	95,5
Habilidades cognitivas gerais	80,8
Carga de trabalho física	52,4
Tempo de reação	58,3
Qualidade	58,3
Fatores ambientais	43,6
Gênero	17,4

Fonte: Adaptado de Wang e Abubakar (2017)

Na Tabela 2.3, o critério selecionado para receber o impacto do fator humano foi a “taxa de saída de itens” do sistema produtivo, pois foi uma métrica encontrada em vários artigos da Tabela 2.2. Finalmente, para apresentar esses resultados de forma mais visual e clara, a Figura 2.3 é exibida em uma escala de até 100%.

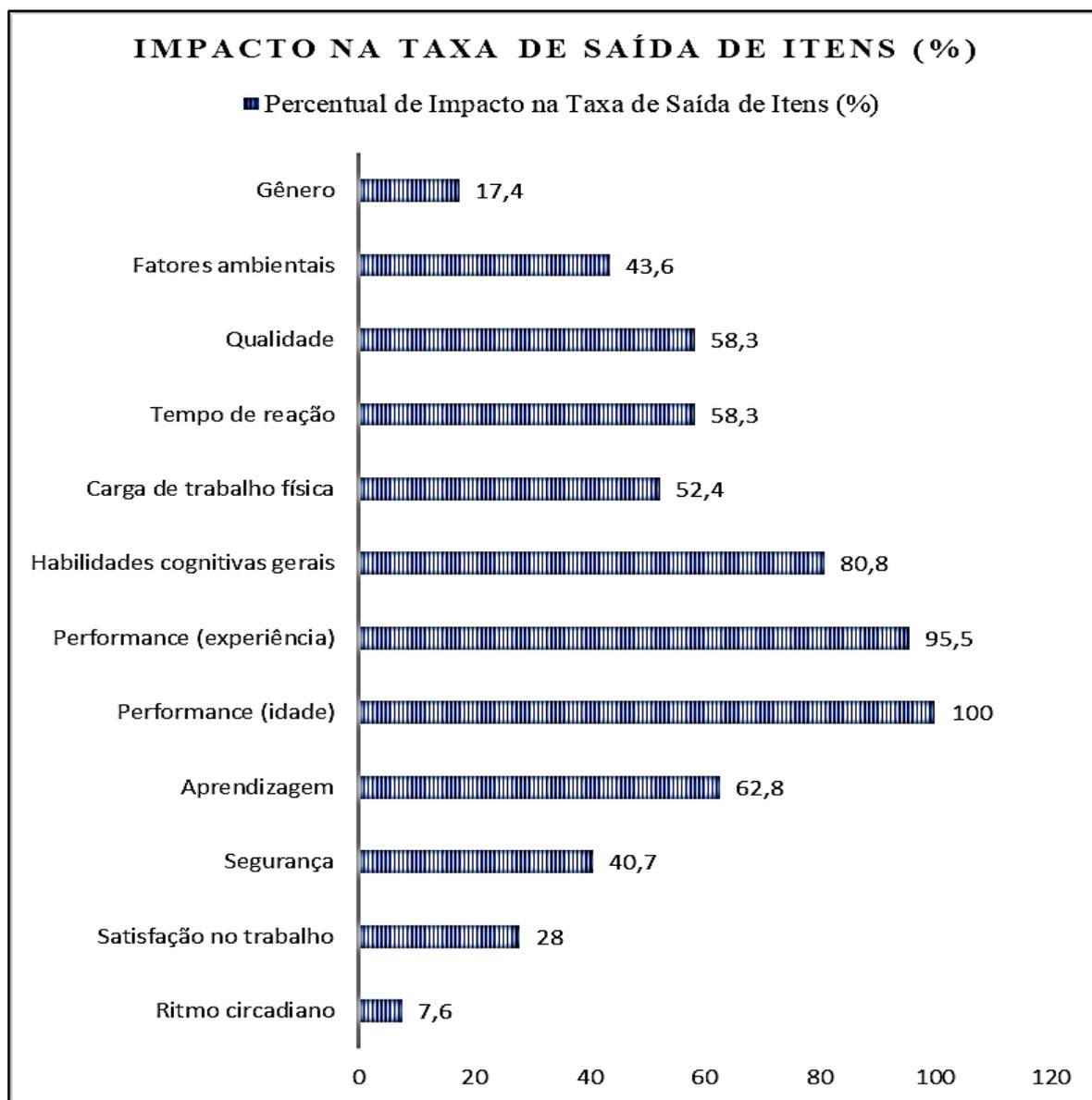


Figura 2. 3 - Gráfico dos FHs e seu impacto na saída de itens.

Fonte: Adaptado de Wang e Abubakar (2017)

Em suma, fica evidente que os fatores humanos que mais causam impacto na taxa de saída de itens são: performance (idade), performance (experiência), habilidades cognitivas gerais e aprendizagem.

No entanto, os fatores humanos que foram selecionados e estão exibidos na Figura 2.4 foram: performance, considerando de forma “média”, a idade e experiência por apresentarem o maior valor percentual, aprendizagem e ritmo circadiano, ambos por apresentarem um embasamento teórico robusto.

Vale frisar que, mesmo apresentando um alto valor no impacto percentual, o fator humano habilidades cognitivas gerais não foi selecionado, pois apresenta uma correlação

positiva em relação a performance e poderia duplicar o efeito se fosse considerado na equação que será proposta.

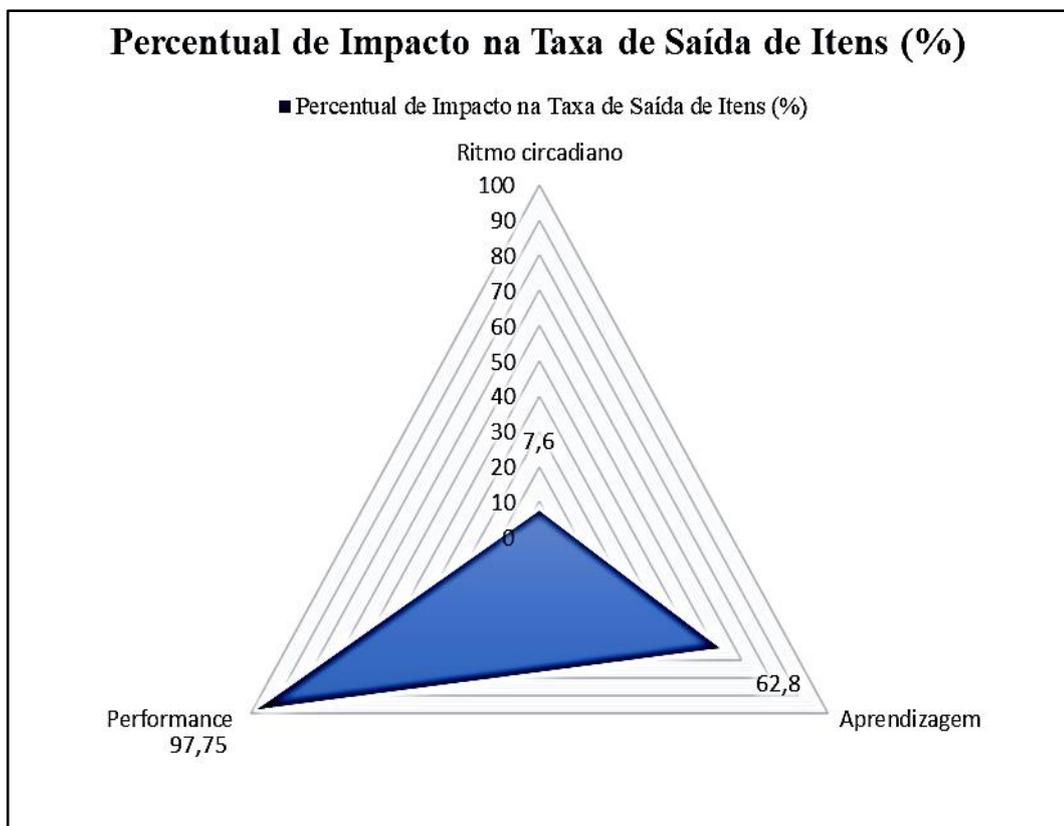


Figura 2. 4 - Gráfico dos três FHs considerados na EMT.  
Fonte: Próprio autor (2021)

É importante salientar que o valor que foi considerado para “performance” é a média aritmética entre a performance (idade) e performance (experiência). Vale mencionar, também, que um cuidado especial foi tomado durante a concepção da equação para “não somar fatores humanos similares”, por isso o critério não foi simplesmente selecionar os fatores humanos com o maior impacto na taxa de saída de itens.

### 2.4.1. Fator humano aprendizagem

Aprender e esquecer são fenômenos naturais que afetam diretamente o desempenho do indivíduo e também dos trabalhadores. Dois fatores principais dos processos de montagem, que afetam principalmente o desempenho do trabalhador, são variedade de produtos e complexidade de tarefas (ABUBAKAR e WANG, 2018). Referente a variedade de produto, é importante frisar que à medida que a variedade do produto aumenta, torna-se mais difícil aprender e mais fácil de esquecer.

Neste contexto, surge a curva de aprendizagem, também conhecida como curva de experiência, que descreve a eficiência ou desempenho obtido da repetição de uma operação de uma tarefa específica por um dado trabalhador. Ou seja, conforme Figura 2.5, o tempo necessário para realizar uma tarefa diminui em uma taxa decrescente conforme a experiência com a tarefa aumenta.

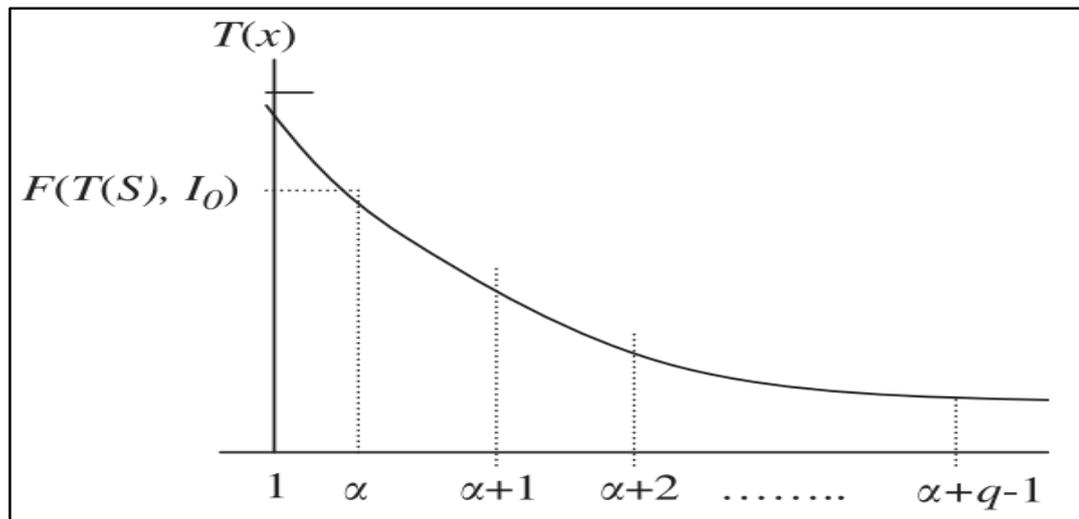


Figura 2. 5 - Típica curva de aprendizagem.

Fonte: Teyarachakul *et al.* (2011)

Desse modo, na curva de aprendizagem a melhoria do desempenho é frequentemente medida em termos de tempo de ciclo, que é o resultado do processo de aprendizagem. É imperativo complementar, também, que a curva de aprendizagem é um fator humano importante e diversos estudos empíricos já foram realizados comprovando este fato (CONWAY e SCHULTZ, 1959; VENEZIA, 1985, p.197; COCHRAN, 1960, p.323; GHEMAWAT, 1985; DAY e MONTGOMERY, 1983; WEBB, 1994; GIVI *et al.*, 2015; JABER e BONNEY, 1997; SHAFER *et al.*, 2001; JABER *et al.*, 2013; WRIGHT, 1936; CARLSON e ROW, 1976). Dando continuidade na pesquisa acerca da curva de aprendizagem, vale ressaltar, que a pesquisa de Biskup (2008) apresenta uma quantificação bem fundamentada da supracitada curva de aprendizagem e é utilizada como referência quantitativa na elaboração da equação matemática que é apresentada na presente tese.

Nesta mesma vertente de estudo, a pesquisa dos autores Teyarachakul *et al.* (2011) investiga o efeito do aprendizado e do esquecimento nas decisões de programação da produção. Neste trabalho foi considerado, como a quantidade esquecida aumenta com a duração do intervalo entre dois lotes e que o esquecimento pode ser lento em um curto intervalo inicial

seguido por um esquecimento rápido. Logo, a conclusão desta pesquisa foi que as empresas podem se sair melhor produzindo em lotes menores na presença de aprendizado e esquecimento.

Já na pesquisa dos autores Neumann e Medbo (2017) os modelos de aprendizagem humana foram integrados assertivamente em um projeto de simulação a eventos discretos para investigar diferenças no tempo de espera entre estratégias de produção em série e em fluxo paralelo. Esse modelo experimental examinou três níveis da taxa de aprendizagem e tempos de ciclo mínimos. Por fim, os pesquisadores Mummolo *et al.* (2004) apresentaram um modelo que considera o aprendizado e a fadiga simultaneamente por meio de uma equação matemática.

#### **2.4.2. Fator humano ritmo circadiano**

O campo de estudos da área do ritmo circadiano estuda como os organismos controlam o tempo de vários eventos biológicos internos e como eles recebem “dicas” do ambiente (como luz e comida). Essas “dicas” ambientais são usadas para coordenar os ritmos biológicos internos de um organismo e suas partes constituintes. Este campo de estudos possui pesquisas em todos os níveis, incluindo comportamento, fisiologia, biologia celular e molecular e genética; todos examinados em uma ampla variedade de organismos, incluindo os humanos.

A etimologia da palavra “circadiano” tem origem na expressão latina *circa diem*, que significa “cerca de um dia”. Logo, essa expressão diz respeito ao funcionamento do nosso relógio biológico, que precisa de 24 horas para encerrar um ciclo. Quase todos os organismos vivos têm relógios biológicos, incluindo bactérias, fungos, plantas e animais (humanos, ratos, morcegos, moscas, etc.).

Em humanos, os relógios biológicos coordenam o tempo de comportamento (ciclos de sono-vigília, alimentação, atividade, humor, cognição), fisiologia (metabolismo, liberação de hormônio, pressão sanguínea, temperatura corporal) e função celular individual (reparo e ciclo celular) para permitir que o corpo funcione adequadamente (BASS e LAZAR, 2016). Simplificando, os relógios biológicos garantem que tudo esteja acontecendo no lugar certo e na hora certa do dia.

No entanto, é importante mencionar que o ritmo circadiano requer muitos dias para se realinhar a uma eventual mudança na rotina, pois nesse período de tempo o ritmo circadiano fica em estado de desarmonia, com uma “quebra” nas relações normais de fase entre os vários componentes (MONK, 1986).

Em um contexto da programação de períodos de serviço de pilotos de companhias aéreas civis, a importante pesquisa de Spencer (1987) criou um modelo que incluía a hora do dia e a

hora desde o sono para prever variações no desempenho do trabalhador para períodos de trabalho começando em diferentes horas do dia. Como conclusão, constatou-se que o desempenho do operador variou com o ritmo circadiano e a duração dos períodos de trabalho.

Ou seja, o pesquisador Spencer (1987) realizou um experimento para analisar a variação da performance do ser humano no ambiente de trabalho ao longo do dia, devido à influência do ritmo circadiano e apresenta uma equação que relaciona a hora do dia com o tempo em que a pessoa está acordada até aquele momento, para prever o desempenho dos operadores em diferentes períodos do dia.

A Figura 2.6 apresenta uma alteração no desempenho do trabalho de um dado operador devido ao efeito do ritmo circadiano. No eixo “y” essa variação está em um intervalo que vai de “-5 a 3” e cada uma das curvas plotadas neste gráfico referem-se ao período do dia (manhã, tarde e noite) considerado.

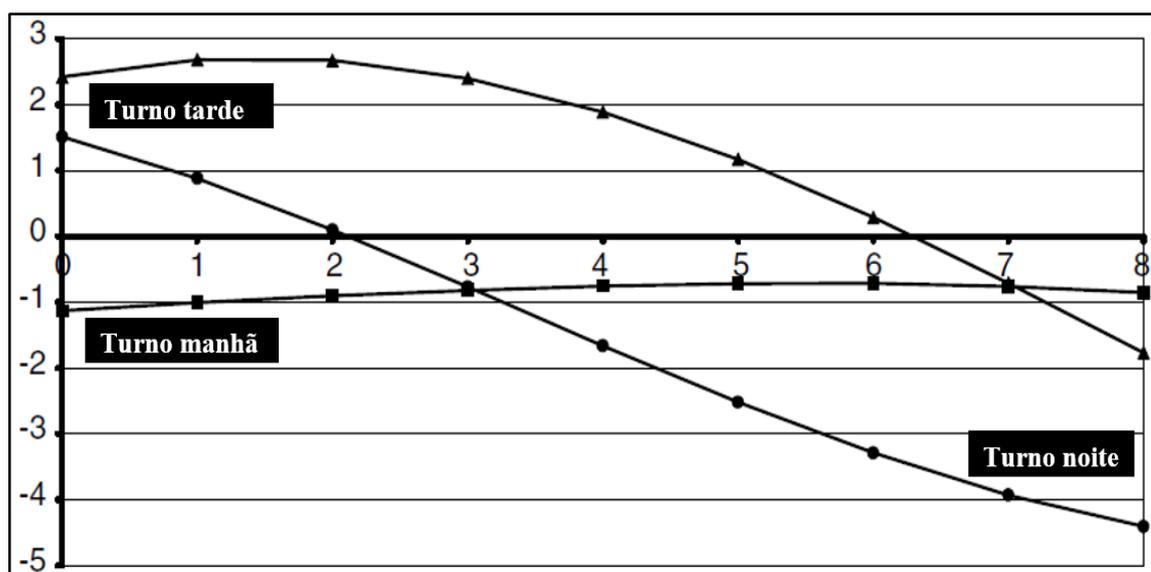


Figura 2. 6 - Alteração no desempenho devido ao ritmo circadiano.

Fonte: Adaptado de Spencer (1987)

Fica evidente, portanto, a intensidade da alteração da performance do operador no período da noite. Sobre os impactos do RC na produtividade do sistema é válido apontar para a pesquisa dos autores Piper e Vachon (2001) que em suas pesquisas de planejamento agregado em uma linha manual de montagem, aplicando como técnica a programação linear, usaram como premissas o efeito da hora extra, da motivação e o ritmo circadiano dos fatores humanos envolvidos na modelagem do problema. Os autores Glonegger e Reinhart (2014), também, estudaram a influência do ciclo circadiano dos fatores humanos para a realização do planejamento e sincronização de uma linha de montagem.

Neste contexto, é válido destacar que o RC representa uma típica flutuação do padrão da produtividade do fator humano dependendo da hora do dia analisado (BJERNER *et al.*, 1955). Neste cenário, é conhecido que a adaptação de um ser humano trabalhando a certa velocidade em relação ao ritmo circadiano tem um efeito positivo na sua condição fisiológica (SCHLICK *et al.*, 2010).

Por fim, na modelagem do fator humano a pesquisa de Paiva *et al.* (2017) examinou os efeitos dos fatores humanos, como ritmos circadianos e flutuações nos dias de trabalho, no desempenho do operador por meio de um método de coleta de dados que levou em consideração diferentes períodos de tempo para cada turno de trabalho.

Embora os autores Walch *et al.* (2016) não tratem especificamente de SED a abordagem apresentada em sua pesquisa é extremamente importante, pois faz interface com um aspecto relevante do fator humano que é o sono. Por conseguinte, estes últimos autores apresentam de forma objetiva a influência do ciclo circadiano no planejamento do sono que foi extensivamente investigada em laboratório e apontam para o impacto na sociedade sobre as questões relacionadas ao sono. No estudo destes últimos autores, um aplicativo de smartphone foi desenvolvido para a coleta de dados precisos sobre hábitos de sono em todo o mundo. Por meio da modelagem matemática e estatística, descobriu-se que a pressão social é antagônica aos impulsos biológicos à noite, fazendo com que as pessoas atrasem a hora de dormir com o consequente “encurtamento” do sono. Finalmente, descobriu-se que a idade é o principal determinante de quando dormir. Por fim, hipóteses para testes futuros são apresentadas e formas importantes de neutralizar a crise global do sono são discutidas.

Finalmente e de forma complementar, Branton (1970) encontrou em suas pesquisas uma correlação fundamental e relevante entre o horário do dia considerado de acordo com o ritmo circadiano e a ocorrência de acidentes.

### **2.4.3. Fator humano performance**

A performance está relacionada principalmente a dois aspectos que são a idade e experiência do indivíduo. A perspectiva da performance adotada na presente tese será referente somente à idade, pois existem trabalhos que conseguem desenvolver uma quantificação assertiva sobre este aspecto como a pesquisa de Baines *et al.* (2004).

Segundo a pesquisa dos autores Abubakar e Wang (2019), o desempenho humano é imprevisível e pode ser alterado devido a vários estados psicológicos e fisiológicos, que muitas vezes são esquecidos pelos pesquisadores ao projetar, implementar ou avaliar um sistema de

manufatura. Em síntese, o objetivo da pesquisa destes autores foi abordar os estados psicológicos e fisiológicos, explorando os fatores humanos e suas interações que podem afetar o desempenho humano em sistemas de modelagem centrados no homem.

A Figura 2.7 mostra o comportamento do desempenho do operador conforme a idade do mesmo aumenta. Fica evidente que após os 30 anos de idade, o desempenho do trabalhador diminui de forma significativa até a idade de 65 anos.

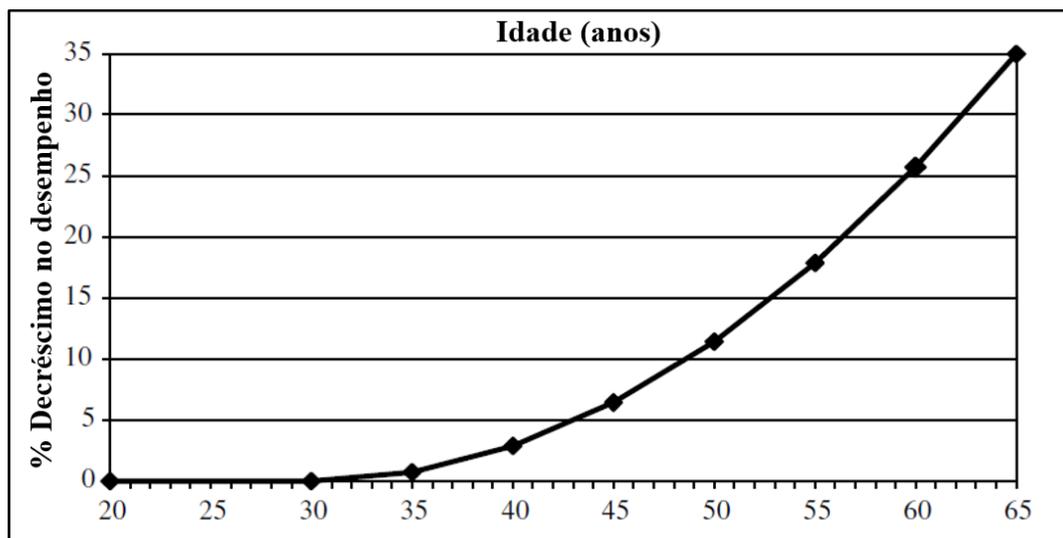


Figura 2.7 - Alteração no desempenho devido à idade  
Fonte: Adaptado de Baines *et al.* (2004)

Por isso, para corroborar a pesquisa de Baines *et al.* (2004), existem muitas outras evidências que sugerem que o desempenho diminui com o aumento da idade (KLEIN *et al.*, 2000; SNEL e CREMER, 2020). Ambas as faculdades cognitivas e físicas, por exemplo, apresentam uma diminuição no desempenho máximo de aproximadamente 1% ao ano de idade, a partir dos 20 anos (SALTHOUSE, 2000).

Complementado a interpretação da Figura 2.7, é importante frisar que até 20 anos de idade, o corpo humano ainda está em desenvolvimento e o desempenho aumenta até este ponto “além da colina”, que varia entre os indivíduos. Funções cognitivas básicas do corpo humano, como memória de curto prazo, velocidade de processamento e tomada de decisão bem como faculdades físicas gerais, como aptidão aeróbica, consumo de oxigênio e a força muscular máxima demonstrou diminuir de forma linear quando considerada isoladamente (MUNOZ *et al.*, 1998; SHEPARD, 2000).

Abubakar e Wang (2019) afirmam que a significância do envelhecimento no desempenho humano também foi estudada e concluiu-se que o tempo médio da atividade realizada pelo trabalhador (fator humano) aumenta em média 1% ao ano após a idade de 38

anos. Göbel *et al.*, (2009) observaram que a capacidade aeróbia de um trabalhador diminui em cerca de 10% por década ao longo das idades de 20 a 60, 15% de 60 a 80 e 30% após 80, ou seja, cerca de 1% ao ano.

Já os autores Avolio *et al.*, (1990) confirmaram este resultado usando uma análise de regressão polinomial para prever o desempenho do trabalho em interface com a idade e experiência.

No entanto esses efeitos podem ser significativamente reduzidos por aumentos nas habilidades técnicas e interpessoais, experiência, treinamento físico, estilo de vida saudável e o desenvolvimento de mecanismos pessoais de enfrentamento (GAUDART, 2000; SCHIBYE *et al.*, 2001).

Por outro lado, é importante mencionar que nem toda a teoria sobre desempenho do trabalhador e idade é convergente, pois na pesquisa dos autores McEvoy *et al.*, (1989) o resultado do estudo mostra que não há relação “clara” entre idade e desempenho no trabalho.

Finalmente, de acordo com Warr (1995), esses efeitos mascaram a diminuição no desempenho devido a envelhecimento. Na tentativa de representar tais mecanismos de mascaramento, um modelo foi desenvolvido com base na suposição de que, uma tarefa requer significativamente menos do que o máximo desempenho na mudança efetiva e, portanto, o desempenho nesse caso não é linear. O modelo assume que os decréscimos de idade não são mensuráveis até depois dos 30 anos e que os efeitos de mascaramento reduzir linearmente o impacto do envelhecimento até os 65 anos, quando o impacto total da idade é sentido.

Por fim, é relevante comentar que em uma abordagem inovadora e multifacetada os autores Wang *et al.* (2018) apresentam um estudo com o objetivo de incorporar os parâmetros emissores de consumo de energia, emissões de CO<sub>2</sub> e fatores humanos (idade e experiência) em um modelo de simulação a eventos discretos.

### 3. EQUAÇÃO MATEMÁTICA PROPOSTA

Neste capítulo é enunciada a equação matemática seguido da transformação dos tempos de processamento provenientes dessa EMT para um dado modelo estocástico (ME). A EMT tem, enfim, o objetivo de promover uma integração quantitativa dos três fatores humanos considerados (aprendizagem, ritmo circadiano e performance) em um projeto de simulação a eventos discretos, sendo que essa EMT será aplicada na etapa de “concepção” do modelo computacional (MONTEVECHI *et al.*, 2010). Especificamente, sua aplicação foi feita na fase de modelagem dos dados de entrada.

#### 3.1. Enunciação da equação matemática

A EMT proposta nesta presente pesquisa, adota a estrutura de desenvolvimento quantitativo do trabalho dos autores Heger *et al.* (2017) como um arcabouço primário e se baseia na multiplicação e soma de fatores e ou variáveis matemáticas para consideração na formulação da equação.

Desta forma, partindo da premissa que as variáveis escolhidas não são correlacionadas e para evitar uma sobreposição de efeitos similares a EMT foi cuidadosamente estruturada e será apresentada. Vale ressaltar, no entanto, que a aplicação da sistemática desses últimos autores está inserida em um contexto de previsão estatística usando-se para tanto o método da suavização exponencial. Por conseguinte, a pesquisa dos autores Heger *et al.* (2017) examina como a produtividade pode ser considerada no agendamento *online* usando dados passados e em tempo real e que efeito isso tem no desempenho geral do sistema. Desta forma, uma simulação de eventos discretos, considerando exemplarmente os fatores de produtividade humana, mostrou os resultados promissores, mas também a necessidade de métodos de previsão mais complexos e robustos. Ao passo que, nesta presente tese a aplicação é direcionada à simulação a eventos discretos em associação com uma abordagem quantitativa que realiza uma integração dos três fatores humanos selecionados por meio da equação.

A pesquisa do autor Slack *et al.* (2002, p.259-260) que define o tempo padrão como sendo composto por duas partes que são o tempo básico e as tolerâncias também foi utilizada como referência no momento da criação da EMT proposta. Esses últimos autores fazem a consideração das tolerâncias como “aumento percentual” para modelar um efeito de fadiga do trabalhador e de pausa para as necessidades pessoais. Até mesmo uma tabela de tolerâncias é utilizada como base para a determinação de quanto será este acréscimo (SLACK *et al.*, 2002, p.260).

Finalmente, a Equação 1, tem por função realizar a integração dos três fatores humanos considerados neste trabalho (aprendizagem, ritmo circadiano e performance) em um projeto de SED:

$$Thf_{o,s}^p = \{[(cr_o^{t,T} + pr_o + lf_{n,o})/10] + 1\} * \tau_{p,o,s,\alpha} \quad (1)$$

Sendo que:

$Thf_{o,s}^p$  = tempo necessário para o operador “o” terminar a etapa “s” no turno “p”.

$cr_o^{t,T}$  = representa o fator humano ritmo circadiano do operador “o” que desempenha uma dada função que depende do horário do dia “t” e do tempo desde o sono “T”, com  $t, T \in \mathbb{Q}_0^+$ , e  $t \leq 24$ .

$pr_o$  = representa o fator humano performance do operador "o" em relação à sua idade.

$lf_{n,o}$  = representa o fator humano aprendizagem para um dado operador “o” após executar a atividade de produção “n” vezes.

$\tau_{p,o,s,\alpha}$  = representa o tempo cronometrado da amostra “α”, na etapa “s” executada pelo operador "o" no turno "p".

O ritmo circadiano é o primeiro fator humano considerado na Equação 1 e foi usado na presente tese de acordo com o modelo proposto por Spencer (1987). Foi escolhido porque concentra o trabalho anterior de vários pesquisadores e oferece uma equação matemática que pode ser implementada diretamente em um projeto de SED. De forma mais específica, a produtividade de um dado operador que executa uma tarefa depende do horário do dia "t" e o tempo desde o sono "T", conforme ilustra a Equação 2.

$$cr_o^{t,T} = \frac{233,33 + 1,54T - 0,304T^2 + 0,0108T^3 + 4,97 \cos\left(2\pi \frac{t-17,05}{24}\right)}{230} \quad (2)$$

Sendo que:

$cr_o^{t,T}$  = representa o fator humano ritmo circadiano do operador “o” que desempenha uma dada função que depende do horário do dia “t” e do tempo desde o sono “T”, com  $t, T \in \mathbb{Q}_0^+$ , e  $t \leq 24$ , e  $cr_o^{t,T} \in \mathbb{Q}_0^+$ . Vale ressaltar que ao denominador foi adicionado à função original (SPENCER, 1987) de modo que seja possível o cálculo de um fator percentual  $cr_o^{t,T}$  para um determinado operador "o".

O segundo fator humano considerado é a performance do operador "o" em relação à sua idade ( $pr_o$ ), sendo portanto este fator uma consequência das habilidades do operador em relação à sua idade. Conforme teoria apresentada previamente no capítulo anterior, existem muitas evidências científicas que sugerem que o desempenho do operador diminui com o aumento da idade (KLEIN *et al.*, 2000; SHEPARD, 2000).

Logo, os aspectos cognitivos e físicos do fator humano mostram uma diminuição no desempenho máximo de aproximadamente 1% ao ano de idade, após cerca de 20 anos (SALTHOUSE, 2000). Até os 20 anos, o corpo humano ainda está se desenvolvendo e o desempenho aumenta, o que varia entre indivíduos. Por fim, é válido lembrar que as funções cognitivas básicas do corpo humano, como memória de curto prazo, velocidade de processamento e tomada de decisão, bem como aspectos físicos gerais, como aptidão aeróbia, consumo de oxigênio e força muscular máxima, mostraram diminuir linearmente com o passar dos anos (MUNOZ *et al.*, 1998; SHEPARD, 2000).

Finalmente, a Equação 3 é apresentada e vale mencionar que ela assume que diminuições na idade não são mensuráveis após os 30 anos e que os efeitos de mascaramento reduzem linearmente o impacto do envelhecimento até os 65 anos, quando o impacto total da idade é sentido. Portanto, a premissa assumida é que a taxa de diminuição da performance em função da idade ( $pr_o$ ) não é uma constante, mas aumenta linearmente dos 30 aos 65 anos.

$$pr_o = \frac{(a - 30)}{35} \quad (3)$$

Sendo que:

$pr_o$  = representa o fator humano performance do operador "o" em relação à sua idade.

Com  $a \in \mathbb{Q}_0^+$ , e  $30 \leq a \leq 65$ . Se "a" estiver fora deste intervalo, o valor de  $pr_o$  deve ser nulo.

$pr_o \in \mathbb{Q}_0^+$ , quando  $0 \leq a \leq 100$ .

O terceiro fator humano considerado na Equação 1 é a influência da aprendizagem do trabalhador sobre produtividade do sistema, que é representada pela curva de aprendizado. De acordo com a Equação 4 (BISKUP, 2008), a curva de aprendizagem é representada por uma constante somada a uma variável exponencial, que tem um expoente logarítmico multiplicado pela taxa de aprendizagem.

$$lf_{n,o} = 0,85 + n^{\log(2)LR} \quad (4)$$

Sendo que:

$lf_{n,o}$  = representa o fator humano aprendizagem para um dado operador “o” após executar a atividade de produção “n” vezes.

$$\log_2 LR = \frac{\log LR}{\log 2}, \text{ com } \log_2 LR \leq 0.$$

$LR$  = representa taxa de aprendizagem e é uma constante com um valor de 0,8 de acordo com Biskup (2008).

$n$  = representa o nível de experiência do trabalhador (NET).

Para considerar diferentes níveis de experiência do operador, o valor de  $n$  como a habilidade inicial de um operador pode ser definida aleatoriamente como “50 para um trabalhador com pouca experiência”, “500 para um trabalhador com média experiência” e “5000 para um trabalhador com alta experiência”. Sendo importante ressaltar, que este fator humano muda dinamicamente com cada trabalho processado (HEGER *et al.*, 2017). No entanto, na presente tese uma nova sistemática foi aplicada para a determinação deste valor de  $n$ , que será explanado com detalhes na próxima seção.

Por fim, o último termo da Equação 1, não é um fator humano, contudo, trata-se de um tipo de tempo de processamento (TP). Portanto, a variável  $\tau_{p,o,s,\alpha}$  é o tempo cronometrado da amostra “ $\alpha$ ” na etapa “s”, executada pelo operador “o” no turno “p”. Esse tempo cronometrado deve ser obtido por meio de um projeto de cronoanálise (BARNES, 1977).

Finalmente, vale ressaltar que uma implicação matemática importante proveniente da Equação 1 e uma consequência direta da escolha dos FHs ritmo circadiano, performance e aprendizagem é que a integração do fator humano é sempre de “acréscimo” no tempo de processo (duração da atividade) vigente e nunca de “decréscimo”. Ou seja, parte-se do pressuposto que o operador teve seu tempo considerado “abaixo do que de fato deveria ser” e por essa razão deve ser “corrigido para mais”, seguindo a mesma lógica dos autores Barnes (1977) e Slack *et al.* (2009).

### 3.2. Transformação para o modelo estocástico

A transformação para o modelo estocástico é essencial após a aplicação da EMT para que as entradas (tempo de processamento) assumam variações aleatórias de modo que os resultados sejam diferentes na execução de um projeto de SED de forma análoga ao que geralmente acontece no mundo real.

Portanto, o uso de modelos de simulação estocástica possibilita a condução dos experimentos *what if* e testes de *stress* por meio de variações nas hipóteses fundamentais, permitindo a identificação de gargalos, oportunidades de melhorias e valores aleatórios nas saídas para que seja possível a aplicações de testes de hipóteses.

Dessa forma, no conjunto dos tempos de processamento obtidos após a aplicação da Equação 1 será usado o “Teste de Anderson” (ANDERSON e DARLING, 1954) que é realizado para atestar acerca da “excelência da qualidade de ajuste” da distribuição acumulativa ajustada (DAA). É importante enfatizar que os testes de qualidade de ajuste são calculados para cada DAA para determinar a qualidade relativa desse ajuste (BREIMAN, 1973; LAW e KELTON, 2000; BANKS *et al.*, 1984; KENDALL *et al.*, 1987).

Por conseguinte, o objetivo do “Teste de Anderson” é descobrir uma distribuição de probabilidade estatística. Após esta etapa, os dados cuidadosamente transformados devem ser inseridos nas entradas do modelo computacional. As distribuições de probabilidade estatística (DPE) consideradas após a utilização da EMT estão na Tabela 3.1 (KOTZ e JOHNSON, 2006; MONTGOMERY e RUNGER, 2013).

Tabela 3. 1 - DPEs consideradas para o teste de Anderson e Darling (1954)

<b>Distribuição de Probabilidade Estatística</b>	
DPE. Arcsine	DPE. de Lindley
DPE. de Bates	DPE. Lognormal
DPE. Bernoulli	DPE. Lomax
DPE. Binomial Beta	DPE. Multimodal
DPE. Beta	DPE. Multinomial
DPE. Geométrica Beta	DPE. Nakagami
DPE. Binomial	DPE. Binomial Negativa
DPE. Bimodal	DPE. Normal
DPE. Normal Bivariada	DPE. de Pareto
DPE. Bradford	DPE. de Pearson
DPE. de Rebarbas	DPE. Pert
DPE. Categórica	DPE. Rayleigh
DPE. de Cauchy	DPE. Rician
DPE. de Dirichlet	DPE. Trapezoidal
DPE. Erlang	DPE. Triangular
DPE. Exponencial	DPE. Normal truncada
DPE. Fatorial	DPE. Tukey Lambda
DPE. Fisk	DPE. Tweedie
DPE. Geométrica	DPE. Uniforme
DPE. Gompertz	DPE. Unimodal
DPE. Hipergeométrica	DPE. de Von Mises
DPE. Gaussiana Inversa	DPE. Von Mises Fisher
DPE. Irwin-Hall	DPE. Weibull
DPE. Kent	DPE. Wishart
DPE. Kumaraswamy	DPE. Yule-Simon
DPE. Landau	DPE. Zeta
DPE. Laplace	

fonte: Kotz e Johnson (2006) e Montgomery e Runger (2013)

Logo, usando nas DPEs os tempos de processo provenientes da EMT e as equações de (ANDERSON e DARLING, 1954) é possível determinar qual distribuição de probabilidade melhor representa os dados amostrais. Para verificar a adequação da distribuição  $F(x)$ , é necessário aplicar o seguinte teste de hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: \text{a amostra tem distribuição } F(x) \\ H_1: \text{a amostra não tem distribuição } F(x) \end{cases}$$

Por meio da Equação 5, segue a estatística em função de  $F(x)$  para testar (ANDERSON e DARLING, 1954):

$$A^2 = n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[F_n(x) - F(x)]^2}{F(x)(1-F(x))} dF(x), \quad (5)$$

Sendo  $F_n(x)$  a função de distribuição acumulada definida pela a Equação 6:

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbb{1}_{\{x_i \leq x\}} = \begin{cases} 0, & \text{se } x < x_{(1)}, \\ & \text{espaço} \\ \frac{k}{n}, & \text{se } x_{(k)} \leq x \leq x_{(k+1)}, \\ & \text{espaço} \\ 1, & \text{se } x > x_{(n)}, \end{cases} \quad (6)$$

Sendo  $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)}$ , as estatísticas na ordem da amostra aleatória e  $\mathbb{1}_{\{x_i \leq x\}}$  a função  $x_i > x, i = 1, \dots, n$ . Logo, a estatística  $A^2$  pode ser representada pela Equação 7:

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(2i - 1) \ln(F(x_{(i)})) + (2(n - i) + 1) \ln(1 - F(x_{(i)}))] \quad (7)$$

A transformação  $F(x_{(i)})$  leva  $x_{(i)}$  em  $U_{(i)}$ , sendo  $U_{(1)}, \dots, U_{(n)}$  uma amostra de tamanho  $n$  com distribuição definida por meio da Equação 8:

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(2i - 1) \ln(U_i) + (2(n - i) + 1) \ln(1 - U_i)] \quad (8)$$

Finalmente, para calcular o valor de  $A^2$  deve-se seguir os seguintes passos abaixo e utilizar a Equação 9:

1. Ordene os valores da amostra:  $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)}$ ;
2. Quando necessário, estime os parâmetros de distribuição de interesse;
3. Calcule  $U_i = F(x_{(i)})$  e calcule o valor da estatística de Anderson Darling:

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(2i - 1) (\ln(U_i) + \ln(1 - U_{n+1-i}))] \quad (9)$$

Logo, observa-se que esta é uma forma equivalente disponível para aplicação. É importante enfatizar que os testes de qualidade de ajuste são calculados para cada distribuição de probabilidade ajustada para determinar se a qualidade relativa de ajuste é suficiente (BREIMAN, 1973; LAW e KELTON, 2000; BANKS *et al.*, 2010; KENDALL *et al.*, 1987).

Portanto, após a aplicação da Equação 1, proposta na presente tese, e que tem por função integrar o fator humano em um projeto de SED, se faz necessário a aplicação do teste de qualidade de ajuste (ANDERSON e DARLING, 1954), para que seja possível “descobrir” uma distribuição de probabilidade estatística para cada atividade ou estação de trabalho considerada na etapa de concepção (MONTEVECHI *et al.*, 2010) de um projeto de simulação a eventos discretos.

Desta forma, o modelo computacional construído será estocástico, e réplicas poderão ser feitas para posteriores testes de validação do modelo computacional (CHWIF e MEDINA, 2010; KLEIJNEN, 1998; SARGENT, 2014).

## 4. DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA

Após a enunciação da EMT no capítulo anterior, o próximo passo é fazer uma demonstração de uso da equação concebida para integrar os fatores humanos em três objetos de estudo, por meio da simulação a eventos discretos. Portanto, neste Capítulo 4 a EMT proposta é aplicada e todos os pormenores são apresentados de forma detalhada e sistemática dentro da metodologia de pesquisa proposta no Capítulo 1.

Os três objetos de estudo considerados não foram selecionados de forma aleatória. A regra de seleção foi escolher operações de manufatura (linha de montagem de PE e ER) e serviços (PS), com um alto volume de produção e atendimento, sendo constituídas por etapas com predominância de tarefas manuais realizadas por apenas um operador.

### 4.1. Primeiro objeto de estudo

O primeiro objeto de estudo (OE) da presente tese foi uma linha manual de montagem de placas eletrônicas (PE) de uma empresa de médio porte situada no “Vale da Eletrônica”. Além da montagem essa empresa realiza o teste de placas eletrônicas e desenvolvimento de novos projetos de PE caso seja a necessidade do cliente final.

A linha de montagem funciona com um *mix* reduzido de PE da mesma família de produtos com uma produção de alto volume para atender às entregas diárias. Devido ao alto nível de qualidade exigido pelos clientes finais, as placas eletrônicas devem ser confeccionadas e testadas com uma alta confiabilidade e devem ser devidamente embaladas para evitar danos durante o transporte.

Por fim, é válido comentar que esta linha de produção utiliza um *layout* linear com quatro estações de trabalho e quatro pontos para trabalho em processo. Especificamente, a força de trabalho deste sistema de montagem de PE é composta por mulheres e um líder de produção que atua indiretamente para inspecionar esta linha de montagem durante a manhã e à tarde.

#### 4.1.1. Etapa de concepção de um projeto de SED

Esta seção apresenta as etapas de “concepção”, “implementação” e “análise” do projeto de simulação a eventos discretos (MONTEVECHI *et al.*, 2010). É importante frisar que a equação matemática proposta será aplicada na etapa de “concepção” do projeto de simulação a eventos discretos, mais especificamente esta EMT será aplicada na fase de modelagem dos dados de entrada.

Na fase de concepção, a Figura 4.1 mostra o resultado final da modelagem conceitual utilizando a técnica IDEF-SIM, apresentada por Leal *et al.* (2011), para este primeiro objeto de estudo que é a linha de montagem de PE.

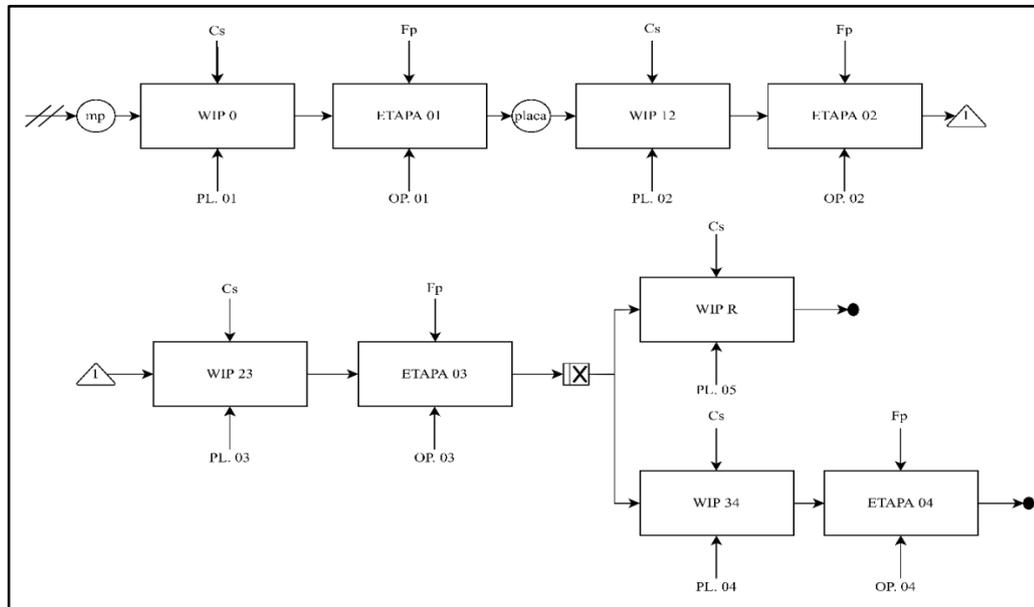


Figura 4. 1 - Modelagem conceitual usando o IDEF-SIM

Fonte: Próprio autor

Inicialmente, chega “mp” ou matéria-prima sem processar proveniente do almoxarifado no “WIP 0”. Logo após, na “etapa 01” a revisão da placa eletrônica é realizada, principalmente, nos pontos de soldagem dos componentes eletrônicos que possuem muitos terminais de contato, sobretudo os circuitos integrados (CIs).

A “etapa 02” refere-se a uma ação de “retoque” em toda a placa eletrônica. As soldas são conferidas novamente, tecnicamente limpas e o alinhamento de alguns componentes eletrônicos (capacitores, resistores, CIs e etc.) é verificado.

Na “etapa 03”, a placa eletrônica é testada em condições físicas que simulam situações típicas de uso ou ainda mais severas. É importante notar que, se a PE não passar neste teste, ela vai para o palete de retrabalho (WIP R).

Finalmente, na “etapa 04” a placa eletrônica é embalada seguindo todos os critérios de qualidade exigidos pelos clientes para que esta PE não seja danificada durante o procedimento de transporte da mesma. O estoque intermediário ou *work-in-process* (WIP) está presente entre todas essas etapas.

Por fim, vale frisar que cada etapa necessita de um operador para a realização da atividade, sendo que o turno de trabalho é das 7h30 às 17h00, incluindo uma pausa para o

almoço, que ocorre das 11h30 às 13h00, com duas paradas de dez minutos para ginástica laboral. Este modelo conceitual (MC) apresentado da linha de montagem manual de PE foi cuidadosamente validado pelo líder da operação de montagem e teste das placas. Portanto, este MC foi usado como base inicial para a construção do modelo computacional.

#### 4.1.2. Aplicação da EMT no CIIA

Ainda na etapa de “concepção” a modelagem dos dados de entrada foi realizada aplicando a EMT proposta, previamente apresentada no capítulo 3 da presente tese. Para aplicar a EMT, será explicado como todos os cálculos foram executados termo a termo:

Referente ao primeiro termo da equação,  $cr_o^{t,T}$  que representa o fator humano ritmo circadiano do operador “o” que desempenha uma dada função que depende do horário do dia “t” e do tempo desde o sono “T”, com  $t, T \in \mathbb{Q}_0^+$ , e  $t \leq 24$ . Segue abaixo três premissas importantes adotadas:

- 1) Foi considerado que o operador acorda por volta das 7h00 (Walch *et al.*, 2016).
- 2) Uma média aritmética do intervalo considerado foi aplicada ao índice “t”.
- 3) Para todos os cálculos, foram consideradas quatro casas decimais.

A Tabela 4.1 a seguir exhibe os resultados dos cálculos aplicados por período para se determinar o valor do ritmo circadiano. É importante frisar, que foi considerado a mediana dos intervalos dos turnos manhã e tarde conforme indicado nas linhas 3 e 7 da supracitada tabela.

Tabela 4. 1 - Cálculos do fator humano ritmo circadiano para o CIIA

<b>Turno manhã</b>	<b>07:00 - 08:00</b>	<b>08:00 - 09:00</b>	<b>09:00 - 10:00</b>	<b>10:00 - 11:00</b>
<b>T</b>	0,5	1,5	2,5	3,5
<b>Mediana t</b>	7,5	8,5	9,5	10,5
$cr_o^{t,T}$	1,0001	1,0082	1,0150	1,0205
<b>Turno tarde</b>	<b>13:00 - 14:00</b>	<b>14:00 - 15:00</b>	<b>15:00 - 16:00</b>	<b>16:00 - 17:00</b>
<b>T</b>	6,5	7,5	8,5	9,5
<b>Mediana t</b>	13,5	14,5	15,5	16,5
$cr_o^{t,T}$	1,0279	1,0270	1,0245	1,0203

Fonte: Próprio autor

Referente ao segundo termo da equação  $pr_o$  que representa o fator humano performance do operador "o" em relação à sua idade, as seguintes quatro premissas foram utilizadas com o propósito de definir o nível de habilidade do operador ( $n$ ):

- 1) A idade do operador foi considerada como um número inteiro.
- 2) Os valores de "a" fazem referência a idade de cada um dos operadores no ano em que os dados foram obtidos.
- 3) Não existe nenhuma prática de *job rotation* na linha de montagem de PE.
- 4) Para todos os cálculos, foram consideradas quatro casas decimais.

A Tabela 4.2 a seguir exibe os resultados dos cálculos da performance aplicados por operador. Nesta tabela é exibido, também, as idades consideradas de cada um dos operadores que desempenham a atividade de montagem nas etapas de 1 a 4 da referida linha de montagem de PE.

Tabela 4. 2 - Cálculos do fator humano performance para o CIIA

<b>Operador</b>	<b>Etapas</b>	<b>Idade</b>	$pr_o$
1	1	34	0,1142
2	2	36	0,1714
3	3	40	0,2857
4	4	31	0,0285

Fonte: Próprio autor

Finalmente, o terceiro termo da equação,  $lf_{n,o}$  representa o fator humano aprendizagem para um dado operador "o" após executar a atividade de produção "n" vezes, as seguintes cinco premissas foram utilizadas com o propósito de definir o nível de habilidade do operador ( $n$ ):

- 1) Foi considerado 20 dias trabalhados em um mês.
- 2) Foi considerado 12 meses trabalhados no ano.
- 3) Não existe nenhuma prática de *job rotation* na linha de montagem de PE.
- 4) Utilizado a "quantidade de repetições em um ano" para determinar o  $n$ . Todos os cálculos estão descritos no Apêndice I desta presente tese. A Tabela 4.3 apresenta os resultados desses cálculos.

5) O valor de 0,8 para  $L_r$  é adotado segundo a pesquisa de Biskup (2008).

Tabela 4. 3 - Variáveis utilizadas para cálculo do  $n$  para o CIIA

Variável	Etapa 01	Etapa 02	Etapa 03	Etapa 04
<b>TCM por dia</b>	86	212	39	17
<b>QT por dia</b>	294	119	646	1472
<b>QR por ano</b>	70490	28475	154978	353168

Fonte: Próprio autor

Na primeira linha da Tabela 4.3, tem-se o “tempo de ciclo médio por dia” que usou os dados coletados para um “ $n$  igual a 40”. Na segunda linha desta Tabela 4.3, tem-se a “quantidade teórica produzida por dia”. Por fim, tem-se na última linha a “quantidade de repetições em um ano” para cada uma das quatro etapas consideradas.

É válido ressaltar que quando o projeto de coleta de tempos se iniciou na linha de montagem de PE, a mesma já funcionava por um ano. Então, considerando 20 dias trabalhados por mês (calendário da empresa), chegou-se aos 240 dias em 1 ano. Logo, cada etapa terá seu próprio número de repetições, e como cada etapa tem seu próprio TCM, o valor de “ $n$ ” vai variar dependendo da atividade considerada.

Após a supracitada definição e cálculo do NET, o fator de aprendizagem foi determinado para cada um dos quatro operadores da linha de montagem, conforme indica a Tabela 4.4. O detalhamento de todos os cálculos está disponível no Apêndice II.

Tabela 4. 4 - Resultado dos cálculos do fator humano aprendizagem para o CIIA

Operador	Etapa	$l_{f_{n,o}}$
1	1	0,8775
2	2	0,8868
3	3	0,8713
4	4	0,8664

Fonte: Próprio autor

Uma vez calculados os três termos referentes aos fatores humanos da EMT, o próximo passo é substituí-los na Equação 1 e colocar o respectivo tempo de processamento “real” proveniente do Apêndice III.

Para o operador 01 que tem 34 anos de idade, trabalha na etapa 01, acordou as 07:00 da manhã e teve seu tempo de execução de atividade extraído (amostra 01) entre as 07:00 e 08:00:

$$cr_o^{t,T} = 1,0001 \text{ (T=0,5; t=7,5);}$$

$$pr_o = 0,4571 \text{ (a=34);}$$

$$lf_{n,o} = 0,8775 \text{ (NET=70490; Lr=0,8);}$$

$$\tau_{p,o,s,\alpha} = 93 \text{ (etapa 01; operador 01; turno manhã; amostra 01).}$$

Lembrando que  $\tau_{p,o,s,\alpha}$  é igual ao tempo cronometrado da amostra “ $\alpha$ ”, na etapa “s” executada pelo operador “o” no turno “p”. Logo,  $Thf_{o,s}^p = 114,7128$  segundos.

Agora para o operador 01 que tem 34 anos de idade, trabalha na etapa 01, acordou as 07:00 da manhã e teve seu tempo de execução de atividade extraído (amostra 02) entre as 07:00 e 08:00:

$$cr_o^{t,T} = 1,0001 \text{ (T=0,5; t=7,5);}$$

$$pr_o = 0,4571 \text{ (a=34);}$$

$$lf_{n,o} = 0,8775 \text{ (NET=70490; Lr=0,8);}$$

$$\tau_{p,o,s,\alpha} = 82 \text{ (etapa 01; operador 01; turno manhã; amostra 02).}$$

$$\text{Logo, } Thf_{o,s}^p = 101,1446 \text{ segundos}$$

E assim de forma análoga aos exemplos acima e sucessivamente, chega-se, por fim à tabela disponível no Apêndice IV.

Após a aplicação da EMT proposta, o próximo passo foi aplicar a transformação dos dados determinísticos para estocásticos para os dois conjuntos de tempos (Apêndice III e Apêndice IV).

Para agilizar esta transformação, conforme exibido na Figura 4.2, a ferramenta *ExpertFit*® foi utilizada para determinar automaticamente e com precisão qual a distribuição de probabilidade melhor representa os conjuntos de tempos.

Trata-se de uma ferramenta, proposta por Averill Law e possui mais de 430 DPEs (Figura 4.3), 30 gráficos, 4 testes de ajuste e suporta tamanhos de amostras de mais de 100.000 dados.

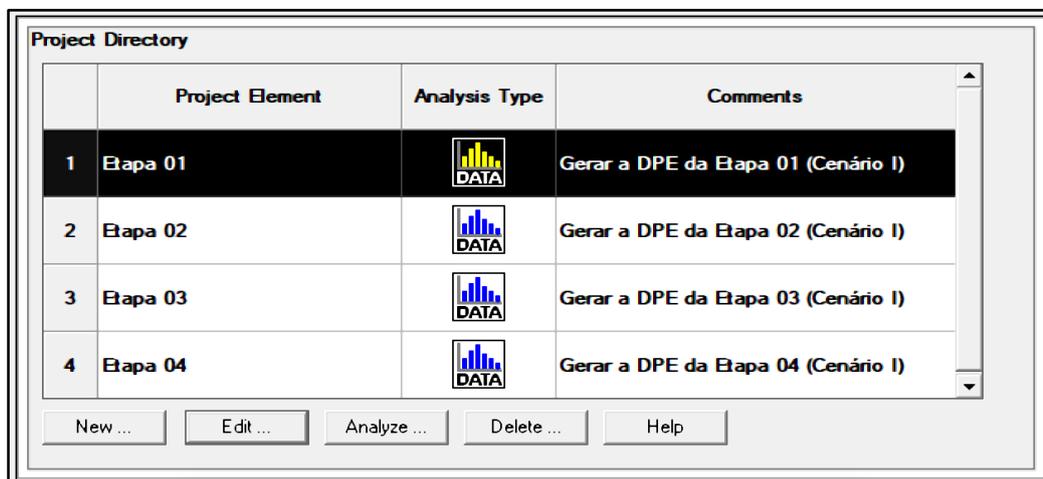


Figura 4. 2 - Definição das DPEs para o CIA  
Fonte: *ExpertFit*®

Após a aplicação da transformação dos tempos de processamento para estocásticos, por meio da supracitada ferramenta, foi possível determinar todas as DPEs necessárias para compor os tempos estocásticos dos CIA e CIIA.

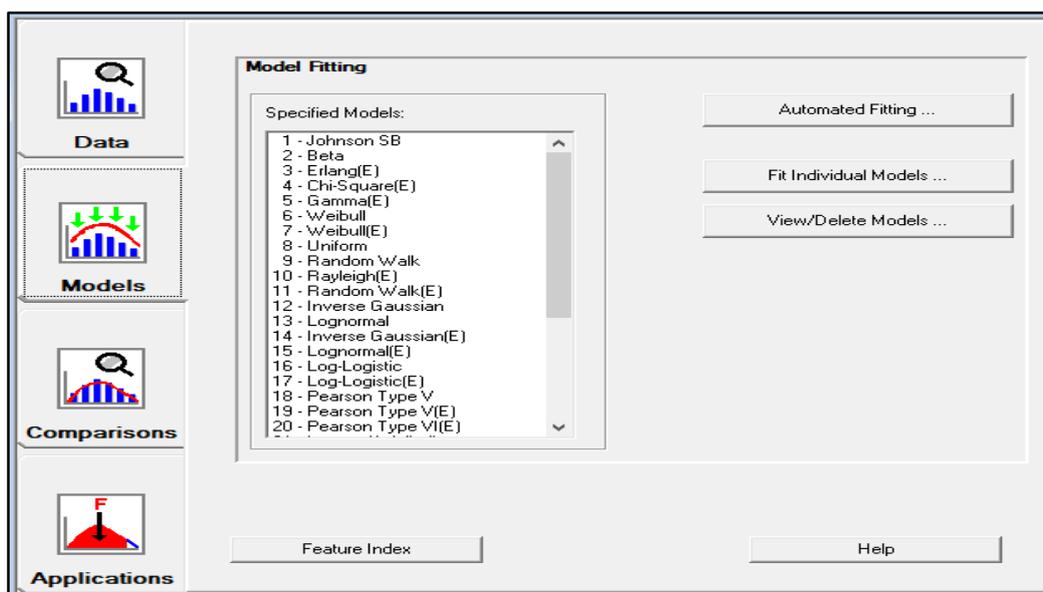


Figura 4. 3 - Algumas das DPEs disponíveis na ferramenta *ExpertFit*  
Fonte: *ExpertFit*®

Por fim, a Tabela 4.5 a seguir apresenta de forma resumida todas as DPEs determinadas após a transformação dos tempos de processamento. Vale mencionar que o detalhamento

completo e codificação acerca das DPEs aplicadas ao software *Flexsim*® encontra-se no Apêndice XIV.

Tabela 4. 5 - DPEs para os cenários CIA e CIIA

<b>Etapas</b>	<b>Tamanho da amostra</b>	<b>DPEs CIA</b>	<b>DPEs CIIA</b>
1	40	Beta	Johnson SB
2	40	Gamma	Johnson SB
3	40	Beta	Weibull
4	40	Beta	Log-Logistic

Fonte: Próprio autor

As distribuições de probabilidade no CIA foram projetadas sem usar a equação. É importante notar que o tamanho das amostras foi o mesmo para os dois cenários. Os tempos de processamento ( $\tau_{p,o,s,\alpha}$ ) utilizados na Equação 1 foram obtidos a partir de um intenso trabalho de cronometragem das estações de trabalho da linha de montagem manual de PE.

Em um abrangente trabalho de cronoanálise, 160 tomadas de tempo de processamento foram coletadas ao longo de várias semanas de coleta de dados. De forma específica, 40 tempos de ciclo por etapa foram cronometrados. Portanto, o total de tempos medidos (duração) foi de 160, pois o modelo considera quatro etapas (40 x 4).

Portanto, no CIA foram consideradas as distribuições de probabilidade sem nenhum “tratamento” ou “correção” e principalmente sem considerar a influência do fator humano no projeto. Entretanto, no CIIA esses tempos cronometrados foram “normalizados” ou “suavizados” por meio da Equação 1, que visa integrar os fatores humanos ritmo circadiano, performance e aprendizagem em um projeto de SED.

### 4.1.3. Etapa de implementação de um projeto de SED

Para a implantação e construção do modelo computacional, o software *FlexSim*® foi utilizado na etapa de “implementação”, conforme mostrado na Figura 4.4, com base no modelo conceitual construído pela técnica IDEF-SIM.

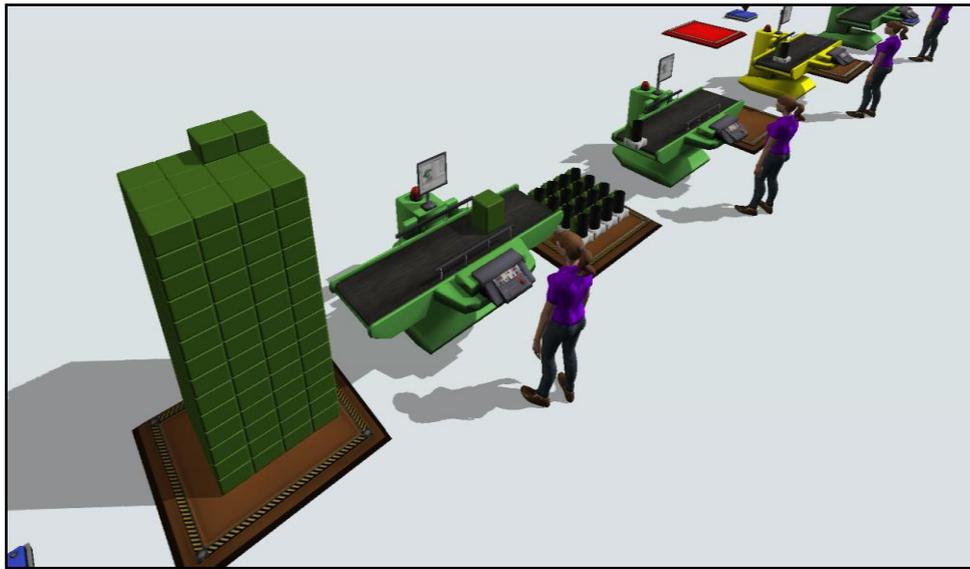


Figura 4. 4 - Modelo computacional usando o software *FlexSim*®  
Fonte: Próprio autor

No presente projeto de simulação a eventos discretos, o tempo total de simulação foi de 864.000 segundos (um mês com trinta dias de oito horas) e um tempo de aquecimento (*warm-time*) de 180 minutos foi considerado para modelar precisamente a situação real. É válido ressaltar que o período de aquecimento é fundamental, pois remove os traços resultantes da inicialização, antes do início da coleta dos dados estatísticos (BATEMAN *et al.*, 2013).

A taxa de chegada foi definida no *source* de forma programada, utilizando-se a opção *arrival schedule*. A regra aplicada determinou que a cada 120 minutos 110 *flowitens* (placa eletrônica) deveriam entrar no modelo computacional cinco vezes a cada 480 minutos. Outra regra aplicada no modelo foi a *by percentage*, usado na “etapa 03”, onde a placa eletrônica é testada em condições físicas que simulam situações típicas de uso.

É importante notar que, se a PE não passar neste teste, ela vai para o palete de retrabalho (WIP R). E, para modelar este retrabalho, um percentual de aproximadamente 7% foi considerado na regra *by percentage* da etapa 03 (*step 03*), aplicada dentro da opção *flow* do objeto *processor*, conforme indica a Figura 4.5. Sendo que, o valor de 7% foi determinado, com base na média aritmética de retrabalho por dia apontado pelo líder da linha de montagem nos relatórios reais de produção.

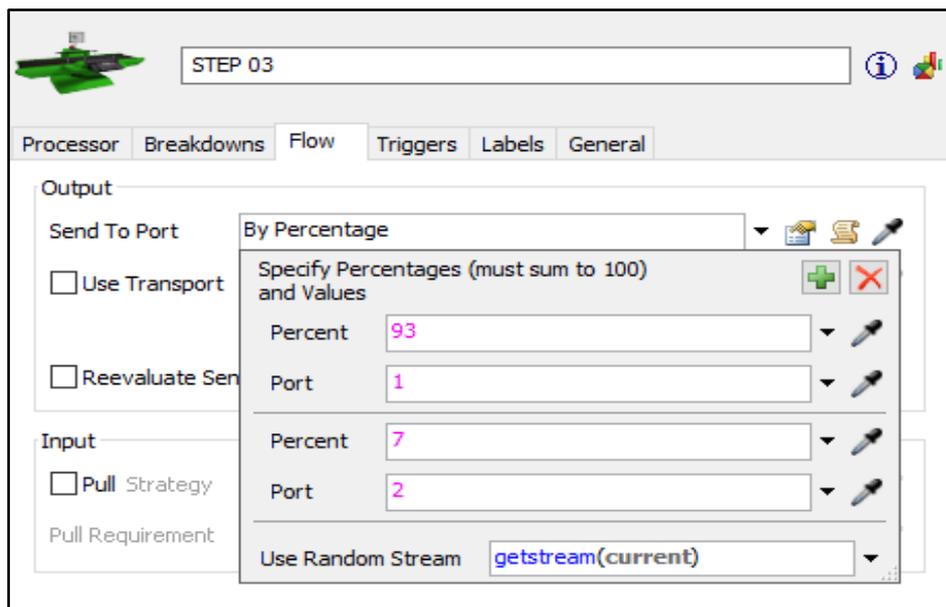


Figura 4. 5 - Utilização da regra *by percentage* no software *FlexSim*®

Fonte: Próprio autor

O tempo de processamento é a duração de cada tarefa e foi outro dado importante considerado neste projeto de SED. Como todas as tarefas são manuais, é o tempo necessário para o operador realizar sua atividade. Esses tempos de processamento foram obtidos através de um intenso trabalho de cronoanálise. Para realizar essa medição da duração das etapas, três operadores fizeram as medições utilizando cronômetros e anotando as informações em planilhas eletrônicas. Esses tempos foram transformados em DPEs, sendo que para o CIIA, a EMT foi aplicada antes desta transformação. A Figura 4.6 a seguir exhibe como essa DPE foi inserida no *process time* da “etapa 01” do software *FlexSim*®.

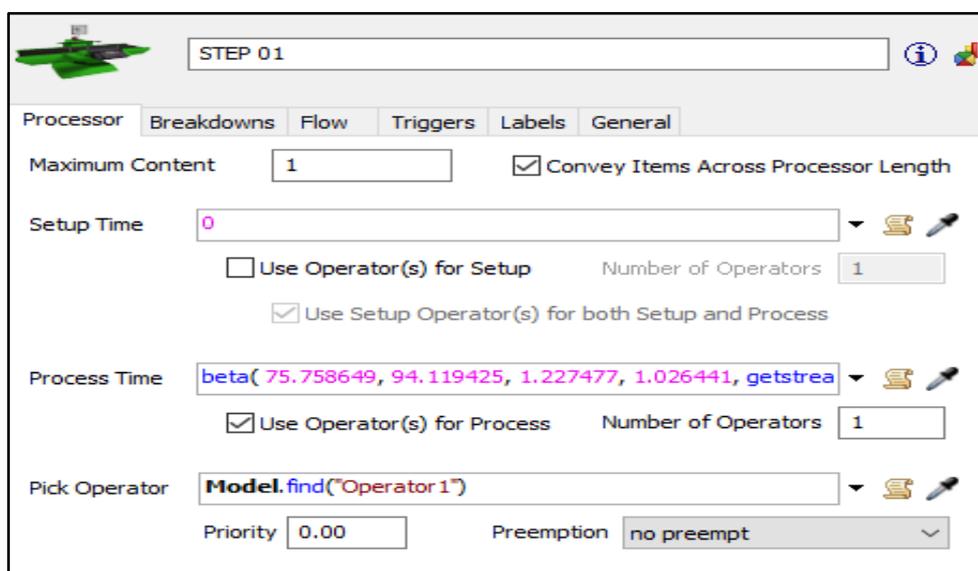


Figura 4. 6 - Aplicação da DPE no *process time* do software *FlexSim*®

Fonte: Próprio autor

Vale ressaltar que os parâmetros específicos da DPE foram colocados na formatação do software *FlexSim*®. O comando *getstream* utilizado neste contexto usa um fluxo de números aleatórios exclusivo para cada objeto no modelo e isso melhora a repetibilidade do modelo e evita que pequenas alterações feitas em uma parte do modelo afetem o comportamento de outras partes do modelo computacional.

Finalmente, sobre a confiabilidade técnica do modelo de simulação desenvolvido, vale frisar que durante a construção do modelo computacional, ciclos de verificação foram realizados pelo líder responsável da linha de montagem manual de PE e o desenvolvedor do projeto de SED, que realizaram conjuntamente e periodicamente a verificação deste modelo.

Portanto, uma verificação modular (VM) foi aplicada e a confecção do modelo em partes permitiu uma verificação focada em cada parte do modelo construído, o que facilitou a identificação de erros no modelo e ações corretivas quando necessário. Essa técnica de verificação complementa a ideia de que o modelo não deve ser construído em sua forma final logo na primeira vez. Dessa forma, a VM deve ser aumentada na medida em que o modelador do projeto de SED realiza a verificação da versão anterior do modelo (BANKS e CHWIF, 2011).

#### **4.1.4 Validação do modelo computacional para os cenários CIA e CIIA**

Na presente tese, dois diferentes testes de validação computacional foram aplicados para obter um maior nível de confiabilidade nas conclusões da pesquisa. Os testes foram aplicados de acordo com os trabalhos de Sargent (2014) e Kleijnen (1998). Esses autores fornecem várias abordagens para a validação computacional comparando-se, geralmente, na validação quantitativa os resultados fornecidos pelo modelo computacional com os resultados obtidos do sistema real através de testes estatísticos específicos.

A técnica qualitativa aplicada foi o Teste de *Turing* ou validação *black-box* (KLEIJNEN, 1998; SARGENT, 2014), sendo que para implementar este teste é necessário apresentar a um *expert* do sistema simulado dois conjuntos de dados de saída (por exemplo, quantidade produzida), um do sistema real e um do sistema simulado. Se o especialista não consegue distinguir se os resultados são do sistema real ou do sistema simulado, então o modelo computacional pode ser considerado “válido” segundo esta supracitada técnica.

Neste projeto estocástico de simulação, 30 réplicas foram consideradas para executar a validação quantitativa do modelo computacional. E para aplicar a comparação estatística de amostras de tamanhos iguais ( $n=30$ ) foi necessário obter da empresa estudada informações de

sua produção real por mês no período de 2 anos e meio (30 meses). O histórico real de produção do primeiro objeto de estudo (HRPA) da empresa referente à linha de montagem de PE alvo deste presente estudo está no Apêndice V e os resultados da simulação da produção do primeiro objeto de estudo desta mesma linha de montagem, referente aos CIA e CIIA estão todos disponíveis no Apêndice VI. Vale frisar, entretanto, que no presente trabalho optou-se por utilizar apenas os resultados referentes à quantidade de placas eletrônicas produzidas.

Com a finalidade de sumarizar de forma visual os resultados encontrados no RSPCIA e RSPCIIA, dois gráficos do tipo *boxplot* foram construídos e estão disponíveis no Apêndice VII.

Ademais, o HRPA (n=30) “vs” RSPCIA (n=30) e HRPA (n=30) “vs” RSPCIIA (n=30) foram comparados por meio do teste estatístico *two-sample t-test* (TST), também conhecido como “teste t não-pareado”. Vale ressaltar que todas as premissas necessárias para a aplicação do teste foram satisfeitas:

- a) Os indivíduos devem ser sorteados aleatoriamente da população;
- b) As duas amostras devem ser independentes (Apêndice VIII);
- c) A variável de interesse deve se distribuir de forma “normal” em cada uma das populações (Apêndice IX);
- d) Deve-se saber se as variâncias são aproximadamente iguais ou não.

Sendo assim, ao realizar um teste estatístico, em primeiro lugar, deve-se elaborar as hipóteses. Desta forma, duas hipóteses foram criadas para que fosse possível efetuar as comparações entre os cenários elaborados nesta presente tese:

$H_0$ : hipótese nula diz que a média das duas populações são iguais

$H_1$ : hipótese alternativa diz a média das duas populações são diferentes

Ou seja,

$$\begin{cases} H_0: \mu_1 = \mu_2 \\ H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \end{cases}$$

Por conseguinte, o *two-sample t-test* com um nível de 95% de confiança, respeitando-se as premissas de normalidade, independência e etc dos dados foi aplicado.

É válido mencionar que para contemplar a premissa do “item d”, foi necessário se fazer um teste para se comparar as variâncias (homocedasticidade ou heterocedasticidade) e nesse teste, considerou-se, também, um nível de confiança de 95%.

Após obtenção dos resultados do teste TST (Apêndice X) via relatório *Minitab*® fez-se necessário a interpretação do *P-Value*. De forma sucinta, quando o *P-Value* < 0,05, rejeita-se a hipótese inicial. Caso contrário, quando o *P-Value* > 0,05 não há evidências estatísticas para rejeitar  $H_0$ .

Como *P-Value* < 0,05 em todas as comparações realizadas, nenhum cenário foi validado por esta técnica.

A Tabela 4.6 a seguir exhibe o resultado da validação do modelo computacional de formas sucinta para os três tipos de comparações.

Tabela 4. 6 - Resultado sumarizado TST para o primeiro objeto de estudo

<b>Comparação</b>	<b><i>P-Value</i></b>	<b>Modelo Computacional Validado?</b>
CIA vs CIIA	0,000	Não se aplica
CIA vs HRPA	0,000	Modelo reprovado na validação computacional
CIIA vs HRPA	0,007	Modelo aprovado na validação computacional

Fonte: Próprio autor

Por fim, a comparação entre os CIA e CIIA aponta que eles são diferentes, ou seja, estatisticamente suas médias aritméticas não são iguais.

Para finalizar a fase de validação do modelo computacional deste primeiro objeto de estudo, uma validação qualitativa foi aplicada. Trata-se do Teste de *Turing*.

Os dados de quantidade produzida de placas eletrônicas foram mostrados ao especialista e líder da linha de montagem. Neste objeto de estudo da presente tese, o líder é o operador mais habilidoso, experiente e proativo da linha de montagem e também é responsável por controlar a quantidade produzida de PE, o tempo de ciclo e verificar a qualidade da placa eletrônica montada. Esse líder tem, sobretudo, autonomia para parar a linha de montagem em caso de problema de qualidade ou em outra situação que ele julgar pertinente.

O Apêndice XI exhibe duas tabelas que o líder teve que avaliar. A primeira tabela (RSPCIA vs HRPA) mostra 60 valores acerca da quantidade produzida de PE do CIA mesclado com o HRPA. A sigla “OK” quer dizer que o valor é factível de ser encontrado na linha de montagem segundo a *expertise* do líder, e a sigla “NOK” quer dizer, portanto, o oposto. A “Confiabilidade da Validação” foi calculada em função do número de vezes que “OK” apareceu

dividido pelo total (OK+NOK) vezes 100. Logo, para esta primeira tabela o valor determinado foi de 45%. Aplicando-se um raciocínio análogo para a segunda tabela (CIIA vs HRP), chega-se no valor de 95%.

Portanto foi determinado, uma validação computacional com um percentual de 95% por meio do Teste de *Turing* para o Cenário II. Vale ressaltar que este procedimento quantitativo apresentado para complementar o Teste de *Turing* foi idealizado pelo autor desta presente tese e até certo ponto pode ser considerado uma “nova abordagem” dentro deste contexto.

Por fim, pode-se afirmar que o líder da linha de montagem de PE validou apenas os resultados provenientes do CIIA.

Finalmente, a Tabela 4.7 resume o que foi mencionado em relação aos dois cenários e apresenta os resultados sumarizados dos dois testes de validação computacional aplicados.

Portanto demonstra-se, desta forma, que o CIIA é validado apenas para a técnica de validação qualitativa.

Tabela 4. 7 - Testes de validação do modelo computacional do primeiro objeto de estudo

<b>Tipo de validação</b>	<b>Técnica de validação</b>	<b>CIA validado?</b>	<b>CIIA validado?</b>
Quantitativa	<i>Two-sample t-test</i>	Não	Não
Qualitativa	Teste de <i>Turing</i>	Não	Sim

Fonte: Próprio autor

Logo, o CIIA obtém a validação computacional por meio do Teste de *Turing*. Já para o CIA, que não considera nenhum fator humano, a validação do modelo computacional não ocorre para nenhuma das técnicas de validação computacional utilizadas.

## 4.2. Segundo objeto de estudo

O segundo objeto de estudo da presente tese é uma linha de montagem de espelhos retrovisores (LMER) de uma empresa especializada no desenvolvimento e manufatura deste tipo de produto. A referida empresa é fornecedora da indústria automobilística e possui capacidade de atendimento a altos volumes de produção caso seja necessário. A LMER foi projetada e tem a função de suprir uma demanda média de 50.000 peças por ano.

### 4.2.1. Etapa de concepção de um projeto de SED

Esta seção apresenta as etapas de “concepção” e “implementação” do projeto de simulação a eventos discretos (MONTEVECHI *et al.*, 2010) para este segundo objeto de estudo, sendo que a equação matemática proposta será aplicada na fase de modelagem dos dados de entrada da LMER.

Na etapa de concepção, as Figuras 4.7 e 4.8 mostram a modelagem conceitual da LMER utilizando a técnica IDEF-SIM, apresentada por Leal *et al.* (2011). Para garantir a confiabilidade desta etapa, o modelo conceitual foi validado pela equipe do projeto de SED.

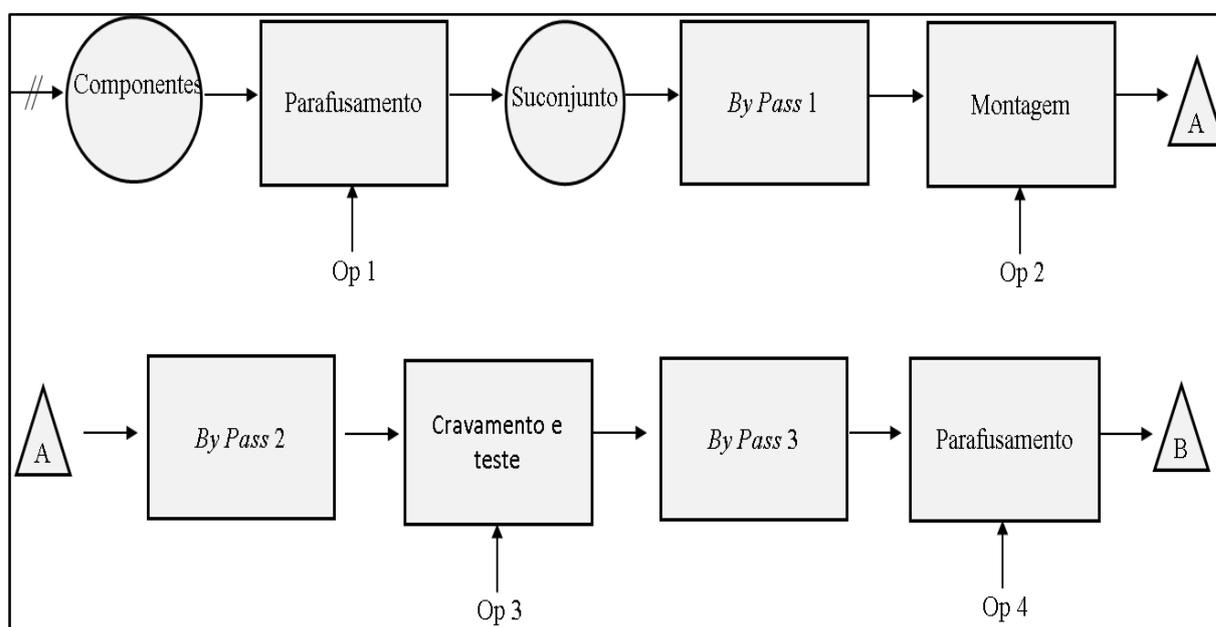


Figura 4. 7 - Modelagem conceitual LMER, parte 01 usando o IDEF-SIM  
Fonte: Próprio autor

O processo é composto por oito operadores e um operador líder responsável por cada um dos oito postos de trabalho e sete pontos fixos de *work-in-process* (estoques intermediários), denominados *by pass*.

Conforme representado na Figura 4.7, no modelo atual há a chegada dos componentes no processo, onde o “Op1” realiza o primeiro parafusamento dos componentes. Ao finalizar a operação, o subconjunto é colocado no “*by pass 1*” e, em seguida, o “Op2” realiza a montagem manual dos componentes.

O subconjunto ainda passa pelas etapas de cravamento e teste da lente do retrovisor e o segundo parafusamento, sendo essas etapas realizadas respectivamente pelos operadores “Op3” e “Op4”.

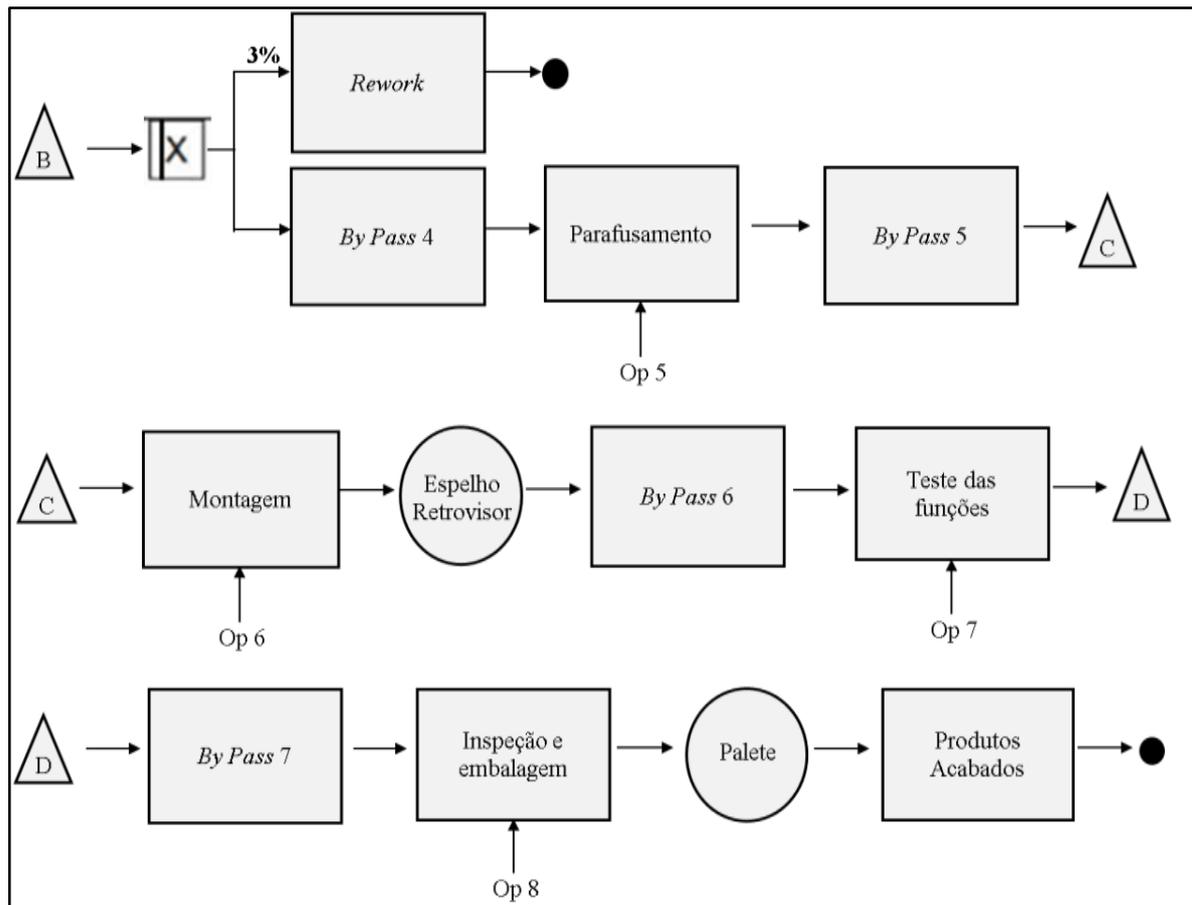


Figura 4. 8 - Modelagem conceitual LMER, parte 02 usando o IDEF-SIM  
Fonte: Próprio autor

O “Op4” realiza a separação dos produtos que estão fora dos parâmetros de qualidade, e devem ser direcionados para o *rework* (aproximadamente 3%) e os demais semi-produtos continuam o fluxo, passando pelas etapas de terceiro parafusamento e montagem, realizadas pelos operadores “Op5” e “Op6”, respectivamente, que ao finalizar, entregam o espelho retrovisor que ainda passa pelo teste das funções, realizado pelo “Op7”. Finalmente, o “Op8” inspeciona e embala os espelhos retrovisores no *pallet*, que segue para área de produtos acabados.

Ademais, os tempos de execução das atividades foram cronometradas durante 6 meses pelo responsável do projeto de SED. Dessarte, a informação de 3% de retrabalho foi obtida do relatório semanal de controle de processos do departamento de qualidade da empresa.

E por último, a linha de montagem de retrovisores trabalha em um turno das 07h 30min às 17h 18min sendo que existe uma pausa de uma hora para o almoço. Este regime de trabalho ocorre de segunda-feira à sexta-feira. Eventuais horas-extras ocorrem após as 17h 18min, quando necessário.

### 4.2.2 Aplicação da EMT no CIIB

Ainda na etapa de “concepção” a modelagem dos dados de entrada foi realizada aplicando a EMT proposta. A sistemática apresentada na seção 4.1.2 foi replicada para o contexto da LMER. A Tabela 4.8 a seguir exhibe os resultados dos cálculos aplicados por período para se determinar o valor do ritmo circadiano. É importante frisar que foi considerado para este CIIB, também, a mediana dos intervalos dos turnos manhã e tarde conforme indicado nas linhas 3 e 7 (“Mediana  $t$ ”).

Tabela 4. 8 - Cálculos do fator humano ritmo circadiano para o CIIB

<b>Turno manhã</b>	<b>07:00 - 08:00</b>	<b>09:00 - 10:00</b>	<b>10:00 - 11:00</b>
<b>T</b>	0,5	2,5	3,5
<b>Mediana t</b>	7,5	9,5	10,5
$cr_o^{t,T}$	1,0001	1,0150	1,0205
<b>Turno tarde</b>	<b>13:00 - 14:00</b>	<b>15:00 - 16:00</b>	<b>16:00 - 17:00</b>
<b>T</b>	6,5	8,5	9,5
<b>Mediana t</b>	13,5	15,5	16,5
$cr_o^{t,T}$	1,0279	1,0245	1,0203

Fonte: Próprio autor

Além disso, a Tabela 4.9 a seguir exhibe os resultados dos cálculos do fator humano performance aplicados para os oito operadores pertencentes a LMER. Nesta tabela é exibido, também, as idades consideradas de cada um dos operadores desta linha de montagem. E para cada etapa listada, a respectiva descrição é apresentada.

Vale observar que o “Op1” tem 30 anos e, esse fato, faz a Equação 3 “zerar”. Portanto, o efeito do fator humano performance para o operador 01 é nulo, conforme teoria apresentada no Capítulo 2.

Tabela 4. 9 - Cálculos do fator humano performance para o CIIB

<b>Operador (Op)</b>	<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>	<b>Idade</b>	$pr_o$
1	1	Primeiro Parafusamento	30	0,0000
2	2	Primeira Montagem	32	0,0571
3	3	Cravamento e teste da lente	36	0,1714
4	4	Segundo Parafusamento	35	0,1428
5	5	Terceiro Parafusamento	31	0,0285
6	6	Segunda Montagem	45	0,4285
7	7	Teste das funções	40	0,2857
8	8	Inspeção e embalagem	37	0,2

Fonte: Próprio autor

Finalmente, a Tabela 4.10 apresenta os resultados dos cálculos para a determinação do  $n$ , que será empregado na Equação 4, para seja possível encontrar o valor referente ao último fator humano considerado na Equação 1.

Tabela 4. 10 - Variáveis utilizadas para cálculo do  $n$  para o CIIB

<b>Variável</b>	<b>Etapa 01</b>	<b>Etapa 02</b>	<b>Etapa 03</b>	<b>Etapa 04</b>
TCM por dia	33	40	20	22
QT por dia	753	632	1291	1122
QR por ano	180717	151769	309889	269199
<b>Variável</b>	<b>Etapa 05</b>	<b>Etapa 06</b>	<b>Etapa 07</b>	<b>Etapa 08</b>
TCM por dia	34	41	24	16
QT por dia	742	617	1066	1556
QR por ano	177970	147993	255910	373333

Fonte: Próprio autor

Logo após, o fator humano aprendizagem foi determinado para cada um dos oito operadores da LMER, conforme indicado na Tabela 4.11.

Tabela 4. 11 - Resultados dos cálculos do fator humano aprendizagem para o CIIB

Operador	Etapa	$lf_{n,o}$
1	1	0,8703
2	2	0,8715
3	3	0,8671
4	4	0,8679
5	5	0,8704
6	6	0,8717
7	7	0,8682
8	8	0,8661

Fonte: Próprio autor

Em síntese, uma vez calculados os três termos referentes aos fatores humanos da EMT, o próximo passo é substituí-los na Equação 1 e colocar o respectivo tempo de processamento “real” proveniente do Apêndice XII. Após a aplicação da EMT em todos os tempos, chega-se, finalmente ao resultado do Apêndice XIII.

Na sequência, o próximo passo foi aplicar a transformação dos dados determinísticos para estocásticos para os dois conjuntos de tempos (Apêndice XII e Apêndice XIII).

Para agilizar esta transformação, a ferramenta *ExpertFit*® foi utilizada, novamente, para determinar automaticamente e com precisão qual a distribuição de probabilidade melhor representa os conjuntos de tempos de processamento.

Assim sendo, após a aplicação da transformação dos tempos de processamento para estocásticos, por meio da ferramenta mencionada acima, foi possível determinar todas as DPEs necessárias para compor os tempos estocásticos dos cenários CIB e CIIB.

Logo, a Tabela 4.12 a seguir apresenta de forma resumida todas as DPEs determinadas após a transformação dos tempos de processamento para o segundo objeto de estudo. É

importante frisar que a codificação dessas DPEs aplicadas ao software *Flexsim*®, encontra-se no Apêndice XIV.

Tabela 4. 12 - DPEs para os cenários CIB e CIIB

<b>Etapas</b>	<b>Tamanho da amostra</b>	<b>DPEs CIB</b>	<b>DPEs CIIB</b>
1	60	Johnson Bounded	Johnson Bounded
2	60	Johnson Bounded	Beta
3	60	Beta	Beta
4	60	Beta	Beta
5	60	Beta	Beta
6	60	Beta	Johnson Bounded
7	60	Beta	Johnson Bounded
8	60	Beta	Beta

Fonte: Próprio autor

As distribuições de probabilidade no CIB foram projetadas sem usar a equação. É importante notar que o tamanho das amostras foi o mesmo para os dois cenários, ou seja, um “ $n$ ” igual a 60. Os tempos de processamento ( $\tau_{p,o,s,\alpha}$ ) utilizados na Equação 1 foram obtidos a partir de um trabalho de cronometragem das oito etapas da LMER.

Logo, um abrangente trabalho de cronoanálise resultou em 480 tomadas de tempo de processamento, que foram coletadas ao longo de vários meses. De forma específica, 60 tempos de ciclo por etapa foram cronometrados. Portanto, o total de tempos medidos (duração) foi de 480 (60 x 8).

Dessa forma, no CIB foram consideradas as distribuições de probabilidade sem nenhum “tratamento” ou “correção” e principalmente sem considerar a influência do fator humano no projeto.

Entretanto, no CIIB esses tempos cronometrados foram “normalizados” ou “suavizados” por meio da Equação 1, que visa integrar os fatores humanos ritmo circadiano, performance e aprendizagem em um projeto de SED.

### 4.2.3. Etapa de implementação de um projeto de SED

Para a implementação e construção do modelo computacional, utilizou-se o software *FlexSim*®, conforme ilustra a Figura 4.9, com base no modelo conceitual construído pela técnica IDEF-SIM e nos dados de entrada apresentados no Apêndice XIV.



Figura 4. 9 - Modelo computacional LMER parte 01, usando o software *FlexSim*®  
Fonte: Próprio autor

O modelo computacional importou a planta baixa da LMER (arquivo .dwg) e ajustou os *fixed resources* e *task executers* em uma escala precisa para uma modelagem mais assertiva da dimensão 3D. Também foi utilizado no modelo uma biblioteca gráfica específica para o contexto da linha de montagem para explorar de forma mais “visual” as potencialidades 3D oferecidas pelo software *FlexSim*®.

As taxas de chegada foram definidas de forma programada no *source*, usando-se o *arrival schedule*. Como o almoxarifado da empresa entrega 80 kits de material para a linha de montagem a cada meia hora, 16 vezes por dia, a regra aplicada na programação do modelo determinava que a cada 30 minutos 80 *flowitens* deveriam entrar 16 vezes no modelo computacional. Outra regra aplicada no modelo foi a *by percentage*, usada para modelar quantidade de 3% de retrabalho.

O tempo total de simulação foi de 864.000 segundos (trinta dias de oito horas) e um *warm-up* de 1800 segundos foi considerado. Além disso, o período de *warm-up* é essencial,

pois remove os vestígios decorrentes da inicialização, antes que a coleta de dados estatísticos seja iniciada (BATEMAN *et al.*, 2013).



Figura 4. 10 - Modelo computacional LMER parte 02, usando o software FlexSim®  
Fonte: Próprio autor

Por fim, sendo o modelo computacional da LMER estocástico, considerou-se 60 réplicas na simulação computacional para posterior uso na fase de validação.

O tempo de processamento é a duração de cada tarefa e foi outro dado importante considerado neste projeto de SED. Como todas as tarefas são manuais e ou semi-automáticas, o TP é o tempo necessário para o operador realizar sua atividade. Esses tempos de processamento foram obtidos através de um intenso trabalho de cronoanálise. Para realizar essa medição da duração das etapas, quatro operadores fizeram as medições utilizando cronômetros e anotando as informações em planilhas eletrônicas. Esses tempos foram transformados em DPEs, sendo que para o CIIB, a EMT foi aplicada antes desta transformação.

Finalmente, sobre a confiabilidade técnica do modelo de simulação desenvolvido, vale frisar que durante a construção do modelo computacional, ciclos de verificação foram realizados pelo líder responsável da LMER e o desenvolvedor do projeto de SED.

Portanto, uma verificação modular (VM) foi aplicada e a confecção do modelo em partes permitiu uma verificação focada em cada parte do modelo construído, o que facilitou a identificação de erros na fase de concepção do modelo computacional (BANKS e CHWIF, 2011).

#### 4.2.4 Validação do modelo computacional para os cenários CIB e CIIB

As mesmas técnicas de validação computacional foram empregadas neste segundo OE, conforme explicado detalhadamente na seção 4.1.4.

Neste projeto estocástico de simulação, 60 réplicas foram consideradas para executar a validação quantitativa do modelo computacional.

O histórico real de produção do segundo objeto de estudo (HRPB) da empresa referente à LMER está no Apêndice XV e os resultados da simulação da produção RSPCIB e RSPCIIB desta mesma linha de montagem, estão todos disponíveis no Apêndice XVI. Vale frisar, entretanto, que no presente trabalho optou-se por utilizar apenas os resultados referentes à quantidade de retrovisores automotivos (QRA).

Ademais, o HRPB (n=60), RSPCIB (n=60) e RSPCIIB (n=60) foram comparados por meio do TST. Vale ressaltar que todas as premissas necessárias para a aplicação do teste foram satisfeitas, sendo que no Apêndice XVII encontra-se a aprovação da importante premissa de normalidade das amostras.

Desta forma, duas hipóteses foram criadas para que fosse possível efetuar as comparações entre os cenários elaborados nesta presente tese:

$H_0$ : hipótese nula diz que a média das duas populações são iguais

$H_1$ : hipótese alternativa diz a média das duas populações são diferentes

Ou seja,

$$\begin{cases} H_0: \mu_1 = \mu_2 \\ H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \end{cases}$$

Dessa forma, o *two-sample t-test* com um nível de 95% de confiança, respeitando-se as premissas de normalidade, independência e etc dos dados foi aplicado.

É válido mencionar que foi necessário se fazer um teste para se comparar as variâncias (homocedasticidade ou heterocedasticidade) e nesse teste, considerou-se, também, um nível de confiança de 95%.

Após obtenção dos resultados do teste TST (Apêndice XVIII) via relatório *Minitab*® fez-se necessário a interpretação do *P-Value*. De forma sucinta, quando o *P-Value* < 0,05, rejeita-se a hipótese inicial. Caso contrário, quando o *P-Value* > 0,05 não há evidências estatísticas para rejeitar  $H_0$ .

Como  $P\text{-Value} > 0,05$  apenas entre a comparação entre o CIIB e HRPB, pode-se afirmar que somente houve validação computacional para o CIIB.

A Tabela 4.13 a seguir exhibe o resultado da validação do modelo computacional de formas sucinta para os três tipos de comparações. Conforme mencionado acima, o CIIB validou, já o CIB não foi validado, pois seu  $P\text{-Value}$  é igual a zero.

Tabela 4. 13 - Resultado sumarizado TST para o segundo objeto de estudo

<b>Comparação</b>	<b><i>P-Value</i></b>	<b>Modelo Computacional Validado?</b>
CIB vs CIIB	0,000	Não se aplica
CIB vs HRPB	0,000	Modelo reprovado na validação computacional
CIIB vs HRPB	0,382	Modelo aprovado na validação computacional

Fonte: Próprio autor

Por fim, a comparação entre os CIB e CIIB aponta que eles são diferentes (estatisticamente suas médias aritméticas não são iguais). E esse fato corrobora os resultados encontrados sobre a validação computacional destes CIA e CIIB.

Para finalizar a fase de validação do modelo computacional deste segundo objeto de estudo, a validação qualitativa denominada Teste de *Turing* foi novamente aplicada, de acordo com a sistemática apresentada na seção 4.1.4.

Finalmente, o Apêndice XIX exhibe os resultados desta validação qualitativa, portanto, para um percentual de 95% a validação por meio do Teste de *Turing*, ocorre apenas para o CIIB, e o líder da linha de montagem de ER validou apenas os resultados provenientes deste CIIB. Por fim, a Tabela 4.14 resume o que foi mencionado em relação aos dois cenários e apresenta os resultados sumarizados dos dois testes de validação computacional aplicados.

Logo, demonstra-se desta forma, que o CIIB é validado para as duas técnicas de validação computacional empregadas. Sendo que, este cenário considera e integra de forma quantitativa os fatores humanos por meio da EMT proposta.

Tabela 4. 14 - Testes de validação do modelo computacional do segundo objeto de estudo

<b>Tipo de validação</b>	<b>Técnica de validação</b>	<b>CIB validado?</b>	<b>CIIB validado?</b>
Quantitativa	<i>Two-sample t-test</i>	Não	Sim
Qualitativa	Teste de <i>Turing</i>	Não	Sim

Fonte: Próprio autor

Logo, o CIIB obtém a validação por meio dessas duas técnicas distintas e complementares de validação do modelo computacional. Já para o CIB que não considera

nenhum fator humano, a validação do modelo computacional não ocorre para nenhuma das técnicas de validação computacional utilizadas. Por fim, vale frisar que esses resultados obtidos do segundo objeto de estudo no que tange a validação do modelo computacional, convergem para as mesmas conclusões encontradas no primeiro objeto de estudo. Ou seja, a validação computacional só ocorre quando os fatores humanos são integrados por meio da Equação 1 enunciada nesta presente tese.

### 4.3. Terceiro objeto de estudo

O terceiro objeto de estudo da presente tese é o pronto socorro (PS) de um hospital regional de Minas Gerais. O hospital em questão é referência na sua microrregião e sua demanda apresenta uma tendência ascendente para os próximos anos. Neste hospital, a rede de emergências é reconhecida e classificada como multifuncional, e sua área de atendimento corresponde a 191 municípios. Na etapa inicial de atendimento, classifica-se por meio do Protocolo de Manchester (PMR) os pacientes deste hospital de acordo com a gravidade de seu caso clínico e inicia-se o diagnóstico e posterior intervenção médica, caso seja necessário. A modelagem deste pronto socorro limitou-se apenas a fase de acolhimento. Portanto, o fluxo do paciente por todos os possíveis procedimentos de cuidados médicos, até a alta ou encaminhamento do paciente para outro setor não foi considerada para o escopo desta modelagem.

#### 4.3.1. Etapa de concepção de um projeto de SED

Esta seção apresenta as etapas de “concepção” e “implementação” do projeto de simulação a eventos discretos (MONTEVECHI *et al.*, 2010) para este terceiro objeto de estudo, sendo que a EMT será aplicada na fase de modelagem dos dados de entrada do PS. Na etapa de concepção, a Figura 4.11 mostra a modelagem conceitual do PS utilizando a técnica IDEF-SIM (LEAL *et al.*, 2011). Para garantir a confiabilidade desta etapa, o modelo conceitual foi validado pelo enfermeiro líder do setor.

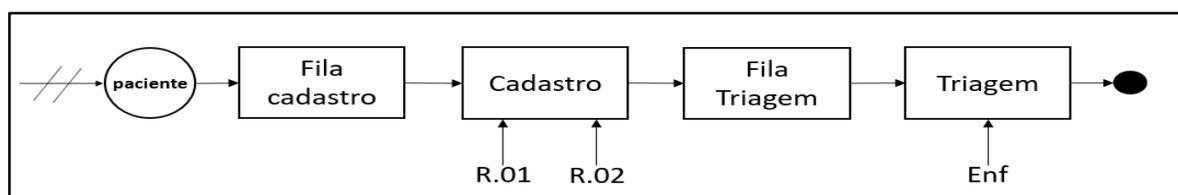


Figura 4. 11 - Modelagem conceitual do PS, usando o IDEF-SIM  
Fonte: Próprio autor

O paciente chega no hospital *walk-in* e dirige-se à fila de registro, onde aguarda por alguns minutos nesta fila ou fica sentado quando a espera é muito alta. Na sequência, este paciente vai até o balcão de registro para realizar seu cadastro por uma das duas recepcionistas que, geralmente, estão neste posto de trabalho atendendo.

Após o cadastro, o paciente segue para fila de triagem, onde fica sentado aguardando ser chamado pelo enfermeiro que executa a triagem no pronto-socorro. Em seguida, o paciente é chamado para triagem, onde é triado por um enfermeiro que utiliza como referência o PMR. Na sequência o paciente entra no PS para ser atendido clinicamente. Toda esta descrição acima, faz referência ao “acolhimento do paciente” e o projeto de simulação computacional limita-se, apenas até este ponto.

Vale frisar, que os pacientes que chegam como urgência e emergência são atendidos imediatamente e seguem, portanto, outro fluxo. Ou seja, os pacientes que não são *walk-in*, são classificados segundo o PMR como “laranja” ou “vermelho”.

Ademais, os tempos de execução dos atendimentos no cadastro e triagem, foram cronometradas durante 10 meses, pelo responsável do projeto de SED.

### 4.3.2 Aplicação da EMT no CIIC

Ainda na etapa de “concepção” a modelagem dos dados de entrada foi realizada aplicando a EMT proposta. A sistemática apresentada na seção 4.1.2 foi replicada, novamente, para o contexto do PS. A Tabela 4.15 a seguir exhibe os resultados dos cálculos aplicados por período para se determinar o valor do ritmo circadiano. É importante frisar que foi considerado para este CIIC, também, a mediana dos intervalos dos turnos manhã e tarde conforme indicado nas linhas 3 e 7 (“Mediana t”).

Tabela 4. 15 - Cálculos do fator humano ritmo circadiano para o CIIC

<b>Turno manhã</b>	<b>07:00 - 08:00</b>	<b>09:00 - 10:00</b>	<b>10:00 - 11:00</b>
<b>T</b>	0,5	2,5	3,5
<b>Mediana t</b>	7,5	9,5	10,5
$CT_o^{t,T}$	1,0001	1,0150	1,0205
<b>Turno tarde</b>	<b>13:00 - 14:00</b>	<b>15:00 - 16:00</b>	<b>16:00 - 17:00</b>
<b>T</b>	6,5	8,5	9,5
<b>Mediana t</b>	13,5	15,5	16,5
$CT_o^{t,T}$	1,0279	1,0245	1,0203

Fonte: Próprio autor

Além disso, a Tabela 4.16 a seguir exibe os resultados dos cálculos do fator humano performance aplicados para os três operadores pertencentes ao PS. Nesta tabela é exibido, também, as idades consideradas de cada um dos operadores.

Vale observar que, a atendente “R.01” tem 25 anos e, esse fato, faz a Equação 3 ficar indeterminada. Portanto, o efeito do fator humano performance para essa atendente “R.01” é nulo, conforme teoria apresentada no Capítulo 2.

Tabela 4. 16 - Cálculos do fator humano performance para o CIIC

<b>Operador (Op)</b>	<b>Etapa</b>	<b>Idade</b>	$pr_o$
R.01	Cadastro	25	indeterminada
R.02	Cadastro	34	0,1142
Enf	Triagem	39	0,2571

Fonte: Próprio autor

Finalmente, a Tabela 4.17 apresenta os resultados dos cálculos para a determinação do  $n$ , que será empregado na Equação 4, para seja possível encontrar o valor referente ao último fator humano, considerado na Equação 1 para terceiro objeto de estudo. O valor de QR foi considerado para um período de experiência de 10 meses dos três colaboradores considerados no presente projeto de SED.

Tabela 4. 17 - Variáveis utilizadas para cálculo do  $n$  para o CIIC

<b>Variável</b>	<b>Etapa 01</b>	<b>Etapa 02</b>	<b>Etapa 03</b>
TCM por dia	265	226	149
QT por dia	95	111	169
QR por ano	28539	33446	50642

Fonte: Próprio autor

Logo após, o fator humano aprendizagem foi determinado para cada um dos operadores do PS, conforme indicado na Tabela 4.18.

Tabela 4. 18 - Resultados dos cálculos do fator humano aprendizagem para o CIIC

<b>Operador (Op)</b>	<b>Etapa</b>	$lf_{n,o}$
R.01	Cadastro	0,8868
R.02	Cadastro	0,8850
Enf	Triagem	0,8806

Fonte: Próprio autor

Em síntese, uma vez calculados os três termos referentes aos fatores humanos da EMT, o próximo passo é substituí-los na Equação 1 e colocar o respectivo tempo de processamento

“real” proveniente do Apêndice XX. Após a aplicação da EMT em todos os tempos, chega-se, finalmente ao resultado do Apêndice XXI.

Na sequência, o próximo passo foi aplicar a transformação dos dados determinísticos para estocásticos para os dois conjuntos de tempos (Apêndice XX e Apêndice XXI).

Para agilizar esta transformação, a ferramenta *ExpertFit*® foi utilizada, novamente, para determinar a distribuição de probabilidade, que melhor representa os conjuntos de tempos dos cenários CIC e CIIC.

Assim sendo, após a aplicação da transformação dos tempos de processamento para estocásticos, foi possível determinar todas as DPEs necessárias para compor os tempos estocásticos dos cenários CIC e CIIC.

Logo, a Tabela 4.19 a seguir apresenta de forma resumida todas as DPEs determinadas após a transformação dos tempos de processamento para o terceiro objeto de estudo. É importante frisar que a codificação dessas DPEs aplicadas ao software *Flexsim*®, encontra-se no Apêndice XIV.

Tabela 4. 19 - DPEs para os cenários CIC e CIIC

<b>Etapas</b>	<b>Tamanho da amostra</b>	<b>DPEs CIC</b>	<b>DPEs CIIC</b>
Cadastro (R.01)	60	Person	Person
Cadastro (R.02)	60	Loglogistic	Loglogistic
Triagem (Enf)	60	Loglaplace	Loglaplace

Fonte: Próprio autor

As distribuições de probabilidade no CIC foram projetadas sem usar a equação. É importante notar que o tamanho das amostras foi o mesmo para os dois cenários, ou seja, um “*n*” igual a 60. Os tempos de processamento ( $\tau_{p,o,s,\alpha}$ ) utilizados na Equação 1, foram obtidos a partir de um trabalho de cronometragem das etapas consideradas no acolhimento do PS. É válido frisar que, um trabalho de cronoanálise, resultou em 180 tomadas de tempo de processamento, que foram coletadas ao longo de várias semanas. De forma específica, 60 tempos de ciclo por etapa foram cronometrados. Portanto, o total de tempos medidos (duração) foi de 180 (60 x 3).

Dessa forma, no CIC foram consideradas as distribuições de probabilidade sem nenhum “tratamento” ou “correção” e principalmente sem considerar a influência do fator humano no projeto de simulação a eventos discretos.

Entretanto, no CIIC esses tempos cronometrados foram “normalizados” ou “suavizados” por meio da Equação 1, que visa integrar os fatores humanos ritmo circadiano, performance e aprendizagem em um projeto de SED.

### 4.3.3. Etapa de implementação de um projeto de SED

Para a implementação e construção do modelo computacional, utilizou-se o software *FlexSim*® módulo *Healthcare*, conforme ilustram as Figuras 4.12 e 4.13.



Figura 4. 12 - Modelo computacional PS parte 01, usando o software FlexSim®  
Fonte: Próprio autor

As taxas de chegada foram definidas de forma programada no *source*, usando-se o *arrival schedule*. Os dados utilizados para a determinação da taxa de chegada, foram todos retirados do banco de dados do hospital regional, e não foram liberados para apresentação no apêndice desta presente tese, devido às normativas da Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD) vigentes neste hospital



Figura 4. 13 - Modelo computacional PS parte 02, usando o software FlexSim®  
Fonte: Próprio autor

Vale mencionar que, o tempo total de simulação foi de 864.000 segundos (trinta dias de oito horas) e um *warm-up* de 1800 segundos foi considerado. Por fim, sendo o modelo

computacional do OS, estocástico, considerou-se, 100 réplicas na simulação computacional para posterior uso na fase de validação.

O tempo de processamento é a duração de cada tarefa (cadastro e triagem) e foi outro dado importante considerado neste projeto de SED, e para realizar essa medição da duração das etapas, dois cronotécnicos fizeram as medições utilizando cronômetros e anotando as informações em planilhas eletrônicas. Esses tempos foram transformados em DPEs, sendo que para o CIIC, a EMT foi aplicada antes desta transformação.



Figura 4. 14 - Modelo computacional PS parte 03, usando o software FlexSim®  
Fonte: Próprio autor

Finalmente, sobre a confiabilidade técnica do modelo de simulação desenvolvido, vale frisar que durante a construção do modelo computacional, ciclos de verificação foram realizados pelo enfermeiro líder.

#### 4.3.4 Validação do modelo computacional para os cenários CIC e CIIC

As mesmas técnicas de validação computacional foram empregadas neste terceiro OE, conforme explicado detalhadamente na seção 4.1.4,

Neste projeto estocástico de simulação, 100 réplicas foram consideradas para executar a validação quantitativa do modelo computacional, e o histórico real de atendimento do terceiro objeto de estudo (HARC) está no Apêndice XXII, e os resultados da simulação de atendimento Cenário I do terceiro objeto de estudo (RSACIC) e os resultados da simulação de atendimento Cenário II do terceiro objeto de estudo (RSACIIC), estão todos disponíveis no Apêndice XXIII. Vale frisar, entretanto, que no presente trabalho optou-se por utilizar apenas os *outputs* do modelo computacional, referentes à quantidade de pacientes atendidos (QPA).

Ademais, o HARC (n=100), RSACIC (n=100) e RSACIIC (n=100) foram comparados por meio do TST. Vale ressaltar que todas as premissas necessárias para a aplicação do teste foram satisfeitas, sendo que no Apêndice XXIV, encontra-se a contemplação da premissa de normalidade das amostras.

Desta forma, duas hipóteses foram criadas para que fosse possível efetuar as comparações, entre os cenários elaborados neste terceiro objeto de estudo:

$H_0$ : hipótese nula diz que a média das duas populações são iguais

$H_1$ : hipótese alternativa diz a média das duas populações são diferentes

Ou seja,

$$\begin{cases} H_0: \mu_1 = \mu_2 \\ H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \end{cases}$$

Dessa forma, o *two-sample t-test* com um nível de 95% de confiança, respeitando-se as premissas de normalidade, independência e etc. dos dados foi aplicado.

É válido mencionar que foi necessário se fazer um teste para se comparar as variâncias (homocedasticidade ou heterocedasticidade) e nesse teste, considerou-se, também, um nível de confiança de 95%.

Após obtenção dos resultados do teste TST (Apêndice XXV), via relatório *Minitab*® fez-se necessário uma interpretação do *P-Value*.

Como *P-Value* > 0,05 apenas entre a comparação entre o CIIC e HARC, pode-se afirmar que somente houve validação computacional para o CIIC. É importante mencionar, que os dados HARC são “aparentemente estáveis”, e classificados estatisticamente como “dados normais”, pois o Pronto-Socorro atende aos pacientes *walk-in*, até certo limite. E quando este limite é ultrapassado, a administração do hospital faz o encaminhamento do paciente para outros hospitais vicinais e ou clínicas de pronto atendimento.

Já o paciente que entra no PS, como urgência e emergência, o comportamento dos dados que representa esta supracitada situação, é completamente instável, imprevisível e caótica. Sendo que esta perspectiva não foi analisada, e ficou de fora do escopo do projeto de simulação computacional deste presente terceiro objeto de estudo. A Tabela 4.20 a seguir, exhibe o resultado da validação do modelo computacional, para os três tipos de comparações. Conforme mencionado acima, o CIIC validou, e CIC não foi validado, pois seu *P-Value* é igual a “zero”.

Tabela 4. 20 - Resultado sumarizado TST para o terceiro objeto de estudo

<b>Comparação</b>	<b>P-Value</b>	<b>Modelo Computacional Validado?</b>
RSACIIC vs RSACIC	0,000	Não se aplica
RSACIC vs HARC	0,000	Modelo reprovado na validação computacional
RSACIIC vs HARC	0,184	Modelo aprovado na validação computacional

Fonte: Próprio autor

Por fim, a comparação entre os CIC e CIIC aponta que, estatisticamente suas médias aritméticas não são iguais. E esse fato, corrobora os resultados encontrados sobre a validação computacional destes CIC e CIIC. Para finalizar a fase de validação do modelo computacional deste terceiro objeto de estudo, a validação qualitativa denominada Teste de *Turing* foi novamente aplicada, de acordo com a sistemática apresentada na seção 4.1.4.

Finalmente, o Apêndice XXVI, exhibe os resultados desta validação qualitativa, e para um percentual de 100% a validação por meio do Teste de *Turing*, ocorre apenas para o CIIC, sendo que o enfermeiro líder do PS, validou apenas os resultados provenientes deste CIIC. Por fim, a Tabela 4.14 resume o que foi mencionado em relação aos dois cenários e apresenta os resultados sumarizados dos dois testes de validação computacional aplicados.

Logo, demonstra-se, que o CIIC é validado para as duas técnicas de validação computacional empregadas. Sendo que, este cenário considera e integra de forma quantitativa os fatores humanos por meio da EMT proposta.

Tabela 4. 21 - Testes de validação do modelo computacional do terceiro objeto de estudo

<b>Tipo de validação</b>	<b>Técnica de validação</b>	<b>CIC validado?</b>	<b>CIIC validado?</b>
Quantitativa	<i>Two-sample t-test</i>	Não	Sim
Qualitativa	Teste de <i>Turing</i>	Não	Sim

Fonte: Próprio autor

Logo, o CIIC, obtém a validação por meio dessas duas técnicas distintas e complementares de validação do modelo computacional. Já para o CIC, que não considera nenhum fator humano, a validação do modelo computacional não ocorre para nenhuma das técnicas de validação computacional utilizadas.

Por fim, vale frisar que esses resultados obtidos deste terceiro objeto de estudo, no que tange a validação do modelo computacional, convergem para as mesmas conclusões encontradas no primeiro e segundo objetos de estudo. Ou seja, a validação computacional só ocorre quando os fatores humanos são integrados por meio da Equação 1 enunciada nesta presente tese.

## 5. CONCLUSÃO

No presente capítulo é exibida a apreciação do atendimento dos objetivos propostos no Capítulo 1 e as considerações finais de acordo com as percepções do autor durante a construção da tese. As recomendações para futuras pesquisas, que poderão surgir a partir dos resultados da atual tese, também, são apresentadas.

Sendo que, essas recomendações podem sobremaneira, ajudar na concepção e expansão de novos conhecimentos na área. De tal forma, que esses conhecimentos, seguramente, serão somados à literatura contemporânea no que tange ao assunto fatores humanos e simulação a eventos discretos.

### 5.1. Verificação dos objetivos específicos

No Capítulo 1 foram definidos dois objetivos específicos, que servem de subsídios essenciais para o desenvolvimento do objetivo geral apresentado na presente tese, que é propor uma equação matemática para integrar os fatores humanos em um projeto de simulação a eventos discretos.

1. Testar a sensibilidade e confiabilidade da equação matemática proposta, em três objetos de estudo referentes a casos reais, sendo o primeiro no contexto da indústria eletrônica, o segundo na indústria automobilística e o terceiro no pronto-socorro de um hospital regional, por meio de seis cenários;

O modelo computacional foi desenvolvido de forma factível no software comercial *FlexSim*® e de forma estocástica, pois os tempos de processamento (duração das atividades) foram transformados em DPEs por meio da ferramenta *ExpertFit*® após a aplicação da EMT nos tempos cronometrados, e por meio dos três estudos de caso apresentados na tese, foi possível a aplicação da equação matemática proposta para a integração dos fatores humanos na SED. A programação do modelo computacional foi realizada e conforme mencionado acima, nos tempos de processamento foram inseridas distribuições de probabilidade específicas, referentes a cada estação de trabalho, de cada estudo de caso analisado.

A equação proposta foi aplicada em três cenários (CIIA, CIIB e CIIC) de maneira sistemática e estruturada.

Dessa forma, os cenários CIIA, CIIB e CIIC, usaram os três FHs apresentados que são: o fator de ritmo circadiano (RC), o fator de performance (PF) e o fator de aprendizagem (AP),

por meio da EMT enunciada. Entretanto, os cenários CIA, CIB e CIC, não levaram em conta nenhum desses fatores humanos. Estes últimos cenários representam a abordagem convencional da maioria dos projetos de SED.

2. Executar testes estatísticos e o Teste de *Turing* nos resultados da simulação computacional referente aos três estudos de casos considerados na presente tese, para medir a confiabilidade da equação proposta dentro das condições de contorno e premissas definidas.

Dessa forma, os testes de validação TST e Teste de *Turing*, foram assertivamente aplicados e, todos os resultados encontram-se sumarizados na Tabela 5.1:

Tabela 5. 1 - Todos os resultados da validação computacional

Tipo de operação objeto de estudo: Manufatura ou Serviços		Eletrônica		Automobilística		Pronto-Socorro	
Tipo de validação	Técnica de validação	CIA validado?	CIJA validado?	CIB validado?	CIIB validado?	CIC validado?	CIIC validado?
Quantitativa	<i>Two-sample t-test</i>	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim
Qualitativa	Teste de <i>Turing</i>	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim

Fonte: Próprio autor

## 5.2. Considerações finais

Em um contexto de TICs e sistemas cyber-físicos, as tarefas de planejamento e programação serão realizadas cada vez mais *online* e os dados em tempo real do processo de fabricação estarão à disposição do setor de planejamento e controle de forma ágil. A aplicação do SED, neste novo paradigma deve ser feita de forma mais precisa, uma vez que o grande volume de informações tende a dificultar a modelagem computacional.

Portanto, é importante analisar cuidadosamente como a SED será aplicada. Como mencionado acima, os sistemas de produção precisam lidar com cronogramas de produção imprecisos e o uso da SED para auxiliar o plano de produção é imperativo na nova era da Indústria 4.0. No entanto, para que os resultados da SED sejam confiáveis, uma integração mais precisa e metódica do fator humano precisa ocorrer.

Geralmente, no contexto da modelagem e simulação, os projetos de SED não consideram de forma assertiva a influência desses FHs nos projetos e com o aumento da integração entre os projetos de SED e os atuais pilares da Indústria 4.0 apresentados por Kusiak (2018), uma abordagem para integrar esses FHs se faz necessária e indispensável, sobretudo, com o aprimoramento recente entre a simulação a eventos discretos e *big data* (GREASLEY e EDWARDS, 2021). Sendo que, a falta de integração dos fatores humanos em projetos de SED pode ter consequências negativas nos resultados finais apresentados no modelo computacional. Isso pode, sobretudo, afetar a confiabilidade e a precisão dos resultados deste modelo computacional.

Vale ressaltar que, uma premissa comumente assumida é que os trabalhadores operam a uma taxa constante ao longo do dia (BAINES *et al.*, 2005) e com o propósito de reduzir o tempo geral de *design* de um modelo computacional estocástico, os responsáveis pelos projetos de SED, geralmente consideram esses trabalhadores como “recursos comuns”. Isso acaba sendo um problema para a modelagem de sistemas de produção, principalmente, se o processo a ser modelado envolver uma alta parcela de trabalho manual.

E para mitigar esse problema e melhorar a confiabilidade dos *outputs* de um projeto de simulação computacional, é necessário representar da melhor forma possível o comportamento do operador e seu subsequente desempenho produtivo ou ritmo normal de produção.

Por conseguinte, dado o *background* apresentado acima, o objetivo geral da presente tese, foi propor uma equação matemática para integrar os fatores humanos em um projeto de simulação a eventos discretos, e a novidade desta pesquisa baseia-se, portanto, na abordagem quantitativa proposta, que visa modelar e integrar três fatores humanos essenciais já listados na literatura vigente sobre esta temática. Vale frisar, por fim, que a aplicação da presente equação, foi em três projetos de SED. Sendo, o primeiro no contexto da indústria eletrônica, o segundo na indústria automobilística e o terceiro no pronto-socorro de um hospital regional, por meio de seis cenários, a aderência da equação matemática foi verificada usando-se testes de validação computacional (quantitativo e qualitativo) aplicados na etapa de validação do modelo computacional.

Como resultado, ficou evidenciado que a validação computacional por meio das técnicas apresentadas *two-sample t-test* e o Teste de *Turing* ocorreu apenas nos cenários CIIB e CIIC, que integra os fatores humanos de forma quantitativa, por meio da Equação 1 proposta nesta pesquisa. Entretanto, para os cenários CIA, CIB e CIC, o modelo computacional não foi validado. Vale frisar, também, que o cenário CIIA, validou apenas por meio do Teste de *Turing*. Um fator de ruído não indetificável na validação quantitativa impediu à priori a validação TST.

Portanto, demonstra-se, desta forma, que os cenários CIIA, CIIB e CIIC, são considerados validados por ao menos uma técnica de validação computacional empregada, sendo que, estes cenários, levam em conta, de forma quantitativa os fatores humanos ritmo circadiano, performance e aprendizagem por meio da EMT proposta. Enquanto que, para os cenários CIA, CIB e CIC, que não consideram nenhum fator humano, a validação do modelo computacional não ocorre para nenhuma das técnicas de validação computacional utilizadas.

Por fim, esses resultados mostram que, os fatores humanos combinados e integrados através da EMT, afetam a validação do modelo computacional, e, conseqüentemente, sua confiabilidade.

### **5.3. Sugestões de trabalhos futuros**

A partir da elaboração da presente tese foram assinaladas as seguintes oportunidades para a realização de trabalhos futuros:

- Realizar a aplicação da EMT proposta em outros contextos produtivos e operacionais, e analisar os novos resultados obtidos, verificando acerca da convergência ou não destes resultados com as conclusões apresentadas na presente tese.
- Aplicar outros testes de validação do modelo computacional, para validar o projeto SED, visando corroborar ou não a eficácia da equação matemática enunciada nesta presente tese.
- Provar matematicamente que os fatores humanos considerados na EMT possivelmente interagem, e determinar o peso desta interação.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUBAKAR, M. I.; WANG, Q. Incorporating learning and aging attributes of workers into a DES model. **International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS)**, p.1-5, 2018. Doi: 10.1109/ICRAS.2018.8442367.

ABUBAKAR, M. I.; WANG, Q. Integrating human factor decision components into a des model. **International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)**, p.562-566, 2019.

ABUBAKAR, M. I.; WANG, Q. Key human factors and their effects on human centered assembly performance. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v.69, p.48–57, 2019.

ABUBAKAR, M. I.; WANG, Qian. Incorporation of human factors into a Discrete Event Simulation Model for human centred assembly performance evaluation. **Nigerian Journal of Technology**, v. 40, n. 3, p. 437-448, 2021.

ABU-TAIEH, E.; EL SHEIKH, A. Commercial simulation packages: a comparative study. **International Journal of Simulation**, v. 8, n. 2, p. 66-76, 2007.

ADAM, J. J. Gender differences in choice reaction time: evidence for differential strategies. **Ergonomics**, v. 42, n. 2, p. 327-335, 1999.

AKINCI, B., BOUKAMP, F., GORDON, C., HUBER, D., LYONS, C., PARK, K. A formalism for utilization of sensor systems and integrated project models for active construction quality control. **Automation in Construction**, v.15, p.124–138, 2006. doi:10.1016/j.autcon.2005.01.008.

ALSHAMMARI, M.; QIN, S. A hybrid simulation model of individual and team performance in software project environment. **Proceedings - 22nd International Congress on Modelling and Simulation, MODSIM 2017**, (December), 298–304, 2017. Doi: 10.36334/modsim.2017.c1.alshammri.

ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. A test of goodness of fit. **Journal of the American statistical association**, v. 49, n. 268, p. 765-769, 1954. Doi: 10.1080/01621459.1954.10501232.

---

ANDO, S.; KIDA, N.; ODA, S. Retention of practice effects on simple reaction time for peripheral and central visual fields. **Perceptual and Motor Skills**, v. 98, n. 3, p. 897-900, 2004.

ANKENMAN, B.E.; NELSON, B.L. A quick assessment of input uncertainty. **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Berlin, Germany, 2012.

APPOLINÁRIO, F. **Metodologia da ciência – filosofia e prática da pesquisa**. São Paulo: Editora Pioneira Thomson Learning, 2006.

AVOLIO, B. J.; WALDMAN, D. A.; MCDANIEL, M. A. Age and work performance in nonmanagerial jobs: The effects of experience and occupational type. **Academy of Management Journal**, v. 33, n. 2, p. 407-422, 1990.

AVRUNIN, G. S., CLARKE, L. A., CONBOY, H. M., OSTERWEIL, L. J., DIAS, R. D., YULE, S. J., ZENATI, M. A. Toward improving surgical outcomes by incorporating cognitive load measurement into process-driven guidance. In: **Proceedings of the International Workshop on Software Engineering in Healthcare Systems**, p. 2-9, 2018. Doi: 10.1145/3194696.3194705.

AZADEH, A., POUREBRAHIM AHVAZI, M., MOTEVALI HAGHIGHII, S., & KERAMATI, A. Simulation optimization of an emergency department by modeling human errors. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v.67, p.117–136, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.04.005>.

BAINES, T. S., & KAY, J. M. Human performance modelling as an aid in the process of manufacturing system design: A pilot study. **International Journal of Production Research**, v.40(10), p.2321–2334, 2002. <https://doi.org/10.1080/00207540210128198>.

BAINES, T., MASON, S., SIEBERS, P. O., LADBROOK, J. Humans: the missing link in manufacturing simulation?. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 12, n. 7-8, p. 515-526, 2004. Doi: 10.1016/s1569-190x(03)00094-7.

BAINES, T. S., ASCH, R., HADFIELD, L., MASON, J. P., FLETCHER, S., & KAY, J. M. Towards a theoretical framework for human performance modelling within manufacturing systems design. **Simulation modelling practice and theory**, v. 13, n. 6, p. 486-504, 2005. Doi: 10.1016/j.simpat.2005.01.003.

---

BAINES, T. S. **Modelling in the evaluation of a manufacturing strategy**. PhD Thesis. Cranfield University, UK. 1994.

BALCI, O. Verification, validation, and certification of modeling and simulation applications. **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, New Orleans, Louisiana, USA, 2003.

BANKS, J., & CHWIF, L. Warnings about simulation. **Journal of Simulation**, v.5(4), p.279–291, 2011. <https://doi.org/10.1057/jos.2010.24>.

BANKS, J.; CARSON II, J.S.; NELSON, B.L.; NICOL, D.M. **Discrete-event system simulation**. New Jersey: Pearson, p. 622, 2010.

BARNES, R. M. **Estudo de movimentos e de tempos: projeto e medida do trabalho**. Editora Blucher, 1977.

BAROSZ, P.; GOLDA, G.; KAMPA, A. Efficiency Analysis of Manufacturing Line with Industrial Robots and Human Operators. **Applied Sciences**, v. 10, n. 8, p. 2862, 2020. Doi: 10.3390/APP10082862.

BASS, J.; LAZAR, M. A. Circadian time signatures of fitness and disease. **Science**, v. 354, n. 6315, p. 994-999, 2016.

BATEMAN, R. E. **Simulação de sistemas: aprimorando processos de logística, serviços e manufatura**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modelling and simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

BISKUP, D. A state-of-the-art review on scheduling with learning effects. **European Journal of Operational Research**, v. 188, n. 2, p. 315-329, 2008. Doi: 10.1016/j.ejor.2007.05.040.

BJERNER, B.; HOLM, Å.; SWENSSON, Å. Diurnal variation in mental performance: a study of three-shift workers. **British journal of industrial medicine**, v. 12, n. 2, p. 103, 1955. Doi: 10.1136/oem.12.2.103.

---

BLOOMFIELD, R.; MAZHARI, E.; HAWKINS, J.; SON, Y.J. Interoperability of manufacturing applications using the Core Manufacturing Simulation Data (CMSD) standard information model. **Computer & Industrial Engineering**, 62 (4), p.1065-1079, 2012.

BOENZI, F., MOSSA, G., MUMMOLO, G., & ROMANO, V. A. Workforce aging in production systems: Modeling and performance evaluation. **Procedia Engineering**, v. 100, p. 1108-1115, 2015.

BONEKAMP, L.; SURE, M. Consequences of Industry 4.0 on human labour and work organisation. **Journal of Business and Media Psychology**, v. 6, n. 1, p. 33-40, 2015.

BONNEY, M., HEAD, M., RATCHEV, S., & MOUALEK, I. A manufacturing system design framework for computer aided industrial engineering. **International Journal of Production Research**, v. 38, n. 17, p. 4317-4327, 2000. Doi: 10.1080/00207540050205118.

BORGHETTI, B. J.; GIAMETTA, J. J.; RUSNOCK, C.F. Assessing continuous operator workload with a hybrid scaffolded neuroergonomic modeling approach. **Human factors**, v. 59, n. 1, p. 134-146, 2017. Doi: 10.1177/0018720816672308.

BRAILSFORD, S. C., HARPER, P. R., & SYKES, J. Incorporating human behaviour in simulation models of screening for breast cancer. **European Journal of Operational Research**, v.219(3), p.491–507, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.10.041>.

BRANTON, P. A field study of repetitive manual work in relation to accidents at the work place. **The International Journal of Production Research**, v. 8, n. 2, p. 93-107, 1970. Doi: 10.1080/00207547008929833.

BREIMAN, L. **Statistics: with a view toward applications**. January 1, 1973.

BRIDGER R. S. **Introduction to ergonomics**. United State of America: CRC Press, 2009.

BRUZZONE, A. G., BRIANO, E., BOCCA, E.; MASSEI, M. Evaluation of the impact of different human factor models on industrial and business processes. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v.15(2), p.199–218, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2006.09.020>.

CAGGIANO, A.; MARZANO, A.; TETI, R. Sustainability enhancement of a turbine vane manufacturing cell through digital simulation-based design. **Energies**, v. 9, n. 10, p. 790, 2016. Doi: 10.3390/en9100790.

- 
- CARLSON, J., ROW, A. **How much does forgetting cost.** *Ind. Eng.* Vol.8, p.40–47, 1976.
- CHWIF, L.; MEDINA, A.C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos, Teoria & publicações.** 3. ed. São Paulo: Ed do autor, 2010.
- CHWIF, L.; PAUL, R. J.; BARRETTO, M. R. P. Discrete event simulation model reduction: A causal approach. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 14, n. 7, p. 930-944, 2006.
- CLARK, A.; OSWALD, A.; WARR, P. Is job satisfaction u-shaped in age. **Journal of occupational and organizational psychology**, v. 69, p. 57-81, 1996.
- COCHRAN, E.B. New concepts of the learning curve. **The Journal of Industrial Engineering**, v.11, p.317–327, 1960.
- CONWAY, R.W., SCHULTZ, A. The manufacturing progress function. **The Journal of Industrial Engineering**, v.10, p.39–54, 1959.
- DAY, G.S., MONTGOMERY, D.B. Diagnosing the experience curve. **Journal of Marketing**, v.47, p.44–58, 1983.
- DER, G.; DEARY, I. J. Age and sex differences in reaction time in adulthood: results from the United Kingdom Health and Lifestyle Survey. **Psychology and aging**, v. 21, n. 1, p. 62, 2006.
- DIAS, L. M. S.; VIEIRA, A. A. C.; PEREIRA, G. A. B.; OLIVEIRA, J. A. Discrete simulation software ranking – a top list of the worldwide most popular and used tools, **Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference**, 1060-1071, 2016. doi:10.1109/WSC.2016.7822165.
- DIGIESI, S., KOCK, A. A. A., MUMMOLO, G., & ROODA, J. E. The effect of dynamic worker behavior on flow line performance. **International Journal of Production Economics**, v.120(2), p.368–377, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.12.012>.
- DODE, P., GREIG, M., ZOLFAGHARI, S., NEUMANN, W. P. Integrating human factors into discrete event simulation: a proactive approach to simultaneously design for system performance and employees' well being. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. 10, p. 3105-3117, 2016. Doi: 10.1080/00207543.2016.1166287.

---

DOGAN, N. O.; UNUTULMAZ, O. Lean production in healthcare: a simulation-based value stream mapping in the physical therapy and rehabilitation department of a public hospital. **Total Quality Management & Business Excellence**, v.27, p. 64-80, 2014.

DOMBROWSKI, U.; RIECHEL, C.; EVERS, M. Industrie 4.0–Die Rolle des Menschen in der vierten industriellen Revolution. **Industrie**, v. 4, p. 129-153, 2014.

DOROUDGAR, S., CHUANG, H. M., PERRY, P. J., THOMAS, K., BOHNERT, K., CANEDO, J. Driving performance comparing older versus younger drivers. **Traffic injury prevention**, v. 18, n. 1, p. 41-46, 2017.

DRABE, D.; HAUFF, S.; RICHTER, N. F. Job satisfaction in aging workforces: An analysis of the USA, Japan and Germany. **The International Journal of Human Resource Management**, v. 26, n. 6, p. 783-805, 2015.

EL MOUAYNI, I., ETIENNE, A., SIADAT, A., DANTAN, J. Y., & LUX, A. A simulation based approach for enhancing health aspects in production systems by integrating work margins. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 12, p. 1697-1702, 2016. Doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.826.

FALCK, A.C.; ROSENQVIST, M. What are the obstacles and needs of proactive ergonomics measures at early product development stages? An interview study in five Swedish companies. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 42, n. 5, p. 406-415, 2012.

FERGUSON, S. A., KENNAWAY, D. J., BAKER, A., LAMOND, N., & DAWSON, D. Sleep and circadian rhythms in mining operators: Limited evidence of adaptation to night shifts. **Applied Ergonomics**, v.43(4), p.695–701, 2012.

FITZSIMMONS, J. A.; FITZSIMMONS, M. J. **Administração de serviços: Operações, estratégia e tecnologia da informação**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2014.

FLETCHER, S. R.; BAINES, T. S.; HARRISON, D. K. An investigation of production workers' performance variations and the potential impact of attitudes. The **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 35, n. 11-12, p. 1113, 2008. Doi: 10.1007/s00170-006-0793-y.

FOLKARD, S. **Body rhythms and shiftwork**. In: Psychology at Work, Penguin Books, 1996.

---

FOWLER, J. W.; ROSE, O. Grand challenges in modeling and simulation of complex manufacturing systems. **Simulation**, v. 80, n. 9, p. 469-476, 2004. doi:10.1177/0037549704044324.

FURNHAM, A. **Personality at Work: The Role of Individual Differences in the Workplace** (Routledge).1992.

GALEN L. **Applied Ergonomics**. Oxford: Butterworth, 1987.

GAUDART, C. Conditions for maintaining ageing operators at work—a case study conducted at an automobile manufacturing plant. **Applied Ergonomics**, v. 31, n. 5, p. 453-462, 2000.

GERHARDT, T. E., RAMOS, I. C. A., RIQUINHO, D. L., & SANTOS, D. L. D. Estrutura do projeto de pesquisa. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GHEMAWAT, P. Building strategy on the experience curve – a venerable management tool remains valuable – in the right circumstances. **Harvard Business Review** v.63 II, p.143–149, 1985.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4.ed. Atlas: São Paulo, 2007.

GINIGER, S.; DISPENZIERI, A.; EISENBERG, J. Age, experience, and performance on speed and skill jobs in an applied setting. **Journal of applied psychology**, v. 68, n. 3, p. 469, 1983.

GIVI, Z.S., JABER, M.Y., NEUMANN, W.P. Modelling worker reliability with learning and fatigue. **Applied Mathematical Modeling**, v.39, p.5186–5199, 2015.

GLONEGGER, M.; REINHART, G. Planning of synchronized assembly lines taking into consideration human performance fluctuations. **Production Engineering**, v. 9, n. 2, p. 277-287, 2015. Doi: 10.1007/s11740-014-0595-2.

GÖBEL, C.; ZWICK, T. Age and productivity-Evidence from linked employer employee data. **ZEW-Centre for European Economic Research Discussion Paper**, n. 09-020, 2009.

GOVINDARAJU, M.; PENNATHUR, A.; MITAL, A. Quality improvement in manufacturing through human performance enhancement. **Integrated Manufacturing Systems**, 2001.

---

GREASLEY, A., & EDWARDS, J. S. Enhancing discrete-event simulation with big data analytics: A review. **Journal of the Operational Research Society**, v.72(2), p.247–267, 2021. <https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1678406>.

GUNAL, M. M. (Ed.). **Simulation for Industry 4.0: Past, Present, and Future**. Springer, 2019.

HARREL, C.; GHOSH, B.K.; BOWDEN, R.O. **Simulation using ProModel**. 2.ed. New York: McGraw-Hill, 2004.

HEGER, J., BRANKE, J., HILDEBRANDT, T., & SCHOLZ-REITER, B. Dynamic adjustment of dispatching rule parameters in flow shops with sequence-dependent set-up times. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. 22, p. 6812-6824, 2016. Doi: 10.1080/00207543.2016.1178406.

HEGER, J.; GRUNDSTEIN, S.; FREITAG, M. Online-scheduling using past and real-time data. An assessment by discrete event simulation using exponential smoothing. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 19, p. 158-163, 2017. Doi: 10.1016/j.cirpj.2017.07.003.

HERNANDEZ-MATIAS, J.C.; VIZAN, A.; PEREZ-GARCIA, J.; RIOS, J. N. Integrated modeling framework to support manufacturing system diagnosis for continuous improvement. **Robotics and computer-integrated manufacturing**, v.24, n.2, p.187-199, 2008.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. **Introduction to operations research**. McGraw-Hill, 2001.

HLUPIC, V.; PAUL, R. J. Guidelines for selection of manufacturing simulation software. **IIE transactions**, v. 31, n. 1, p. 21-29, 1999. doi:10.1023/A:1007568516643.

HUNTER, J.E. Cognitive ability, cognitive aptitudes, job knowledge, and job performance. **Journal of vocational behavior**, v. 29, n. 3, p. 340-362, 1986.

ILMARINEN, J. E. Aging workers. **Occupational and environmental medicine**, v. 58, n. 8, p. 546-546, 2001.

JABER, M.Y., BONNEY, M. A comparative study of learning curves with forgetting. **Applied Mathematical Modeling**, v.21, p.523–531, 1997.

---

JABER, M.Y., GIVI, Z., NEUMANN, W. Incorporating human fatigue and recovery into the learning forgetting process. **Applied Mathematical Modeling**, vol.37, p.7287–7299, 2013.

KADIR, B. A., BROBERG, O., & CONCEIÇÃO, C. S. da. Current research and future perspectives on human factors and ergonomics in Industry 4.0. **Computers and Industrial Engineering**, 137(July), 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106004>.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Securing the future of German manufacturing industry**. Final report of the Industrie 4.0 Working Group, Forschungsunion, Frankfurt/Main, 2013.

KAMPA, A.; GOŁDA, G. Modelling and Simulation Method for Production Process Automation in Steel Casting Foundry. **Archives of Foundry Engineering**, v. 18, 2018. Doi: 10.24425/118810.

KAMPA, A.; GOŁDA, G.; PAPROCKA, I. Discrete event simulation method as a tool for improvement of manufacturing systems. **Computers**, v. 6, n. 1, p. 10, 2017. Doi: 10.3390/computers6010010.

KENDALL, M. G.; STUART, A.; ORD, J. K. **Kendall's advanced theory of statistics**. Oxford University Press, Inc., 1987.

KENNY, G. P., GROELLER, H., MCGINN, R., & FLOURIS, A. D. Age, human performance, and physical employment standards. **Applied physiology, nutrition, and metabolism**, v. 41, n. 6, p. S92-S107, 2016.

KESHTKAR, L., RASHWAN, W., ABO-HAMAD, W., & ARISHA, A. A hybrid system dynamics, discrete event simulation and data envelopment analysis to investigate boarding patients in acute hospitals. **Operations Research for Health Care**, v. 26, p. 100266, 2020. Doi: 10.1016/j.orhc.2020.100266.

KIASSAT, C.; SAFAEI, N.; BANJEVIC, D. Choosing the optimal intervention method to reduce human-related machine failures. **European Journal of Operational Research**, v. 233, n. 3, p. 604-612, 2014. Doi: 10.1016/j.ejor.2013.09.002.

---

KIMPARA, H., MBANISI, K. C., LI, Z., TROY, K. L., PROKHOROV, D., & GENNERT, M. A. Force Anticipation and Its Potential Implications on Feedforward and Feedback Human Motor Control. **Human Factors**, p. 0018720819900842, 2020. Doi: 10.1177/0018720819900842.

KINZEL, H. Industry 4.0—Where does this leave the Human Factor?. **Journal of Urban Culture Research**, v. 15, p. 70-83, 2017.

KLEIJNEN J.P.C. Theory and methodology: verification and validation of simulation models. **European Journal of Operational Research**, v.82, p.145-162, 1995. Doi: 10.1016/0377-2217(94)00016-6.

KLEIJNEN, J. P.C. Experimental design for sensitivity analysis, optimization, and validation of simulation models. **Handbook of simulation**, v. 173, p. 223, 1998.

KLEIN, C., FISCHER, B., HARTNEGG, K., HEISS, W. H., & ROTH, M. Optomotor and neuropsychological performance in old age. **Experimental brain research**, v. 135, n. 2, p. 141-154, 2000.

KOTZ, S. AND JOHNSON, N.L. **Encyclopedia of Statistical Science**, 2nd ed., Vol. 16, Wiley, Hoboken, NJ, 2006.

KUMAR, T.V. Factors impacting job satisfaction among police personnel in India: A multidimensional analysis. **International criminal justice review**, v. 27, n. 2, p. 126-148, 2017.

KUPRAT, T.; MAYER, J.; NYHUIS, P. Aufgaben der Produktionsplanung im Kontext von Industrie 4.0. **Industrie 4.0 Management**, v. 31, n. 2, p. 11-14, 2015.

KUSIAK, A. Smart manufacturing. **International Journal of Production Research**, v.56, p.508–517, 2018. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>.

LAURINDO, Q. M. G.; PEIXOTO, T. A.; RANGEL, J. J. A. Communication mechanism of the discrete event simulation and the mechanical project softwares for manufacturing systems. **Journal of computational Design and Engineering**, v.6, p.70-80, 2018.

LAW, A. M. How to build valid and credible simulation models. **Winter Simulation Conference**, Austin, TX, USA, 2009.

---

LAW, A. M., KELTON, W. D., & KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis** (Vol. 3). New York: McGraw-Hill, 2000.

LAW, A.M. A tutorial on how to select simulation input probability distributions. **Winter Simulation Conference**, Washington, DC, USA, 2013.

LEAL, F. **Um diagnóstico do processo de atendimento a clientes em uma agência bancária através de mapeamento do processo e simulação computacional**. 2003. 224 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2003.

LEAL, F.; SILVA, R.F.; MONTEVECHI, J.A.B.; ALMEIDA, D.A.; MARINS, F.A.S. A practical guide for operational validation of discrete simulation models. **Pesquisa Operacional**, v. 31, n. 1, p. 57-77, 2011. doi:10.1590/S0101-74382011000100005.

LEAL, F. **Análise do efeito interativo de falhas em processos de manufatura através de projeto de experimentos simulados**. 2008. 237 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/106417>>.

LEE, E. A. Cyber physical systems: Design challenges. In: **2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)**. IEEE, 2008. p. 363-369.

MACHADO, R. H. C., HELLENO, A. L., DE OLIVEIRA, M. C., SANTOS, M. S. C. D., & DIAS, R. M. D. C. Analysis of the Influence of Standard Time Variability on the Reliability of the Simulation of Assembly Operations in Manufacturing Systems. **Human factors**, v. 61, n. 4, p. 627-641, 2019. Doi: 10.1177/0018720819829596.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa**. 5.ed. Atlas: São Paulo, 2002.

MASON, S., BAINES, T., KAY, J. M., & LADBROOK, J. Improving the design process for factories: Modeling human performance variation. **Journal of Manufacturing Systems**, v.24(1), p.47–54, 2005. [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(05\)80006-8](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(05)80006-8).

MCEVOY, G. M.; CASCIO, W. F. Cumulative evidence of the relationship between employee age and job performance. **Journal of applied psychology**, v. 74, n. 1, p. 11, 1989.

- 
- MCHANEY, R. W. (2008). Use cases and personas: uses in service sector simulation development. **International Journal of Simulation and Process Modelling**, 4(3-4), 264-279.
- MICHALOS, G., MAKRIS, S., CHRYSSOLOURIS, G. The effect of job rotation during assembly on the quality of final product. **Cirp J. Manuf. Sci. Technol**, vol.6, p.187–197, 2013. doi:10.1016/j.cirpj.2013.03.001.
- MIRANDA, R. C.; COUTINHO, B. F.; RIBEIRO, J. R.; MONTEVECHI, J. A. B.; PINHO, A. F. Avaliação da operação de *setup* em uma célula de manufatura de uma indústria de autopeças através da simulação a eventos discretos. **Revista Gestão Industrial**, 6 (3), p.01-21, 2010.
- MONK, T. H. Advantages and disadvantages of rapidly rotating shift schedules—A circadian viewpoint. **Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society**, v. 28, n. 5, p. 553-557, 1986.
- MONOSTORI, L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. **Procedia Cirp**, v. 17, p. 9-13, 2014. Doi: 10.1016/j.procir.2014.03.115.
- MONTEVECHI, J.A.B.; LEAL, F.; PINHO, A.F. ; COSTA, R.F.S.; OLIVEIRA, M.L.M. de; SILVA, A.L.F. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company. **Winter simulation conference**. IEEE, 2010. p. 1624-1635.
- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. John Wiley & Sons, 2010.
- MUKERJEE, J.; SHEEHAN, P.; CAELLI, T. Investigating Human Machine Integration Concepts for ISAR Classification. In: **2019 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)**. IEEE, 2019. p. 1-9. Doi: 10.1109/ICNSURV.2019.8735219.
- MUMMOLO, G., MOSSA, G., DIGIESI, S., 2004. Learning and tiredness phenomena in manual operation performed in lean automated manufacturing systems: a reference model. In: **International IMS Intelligent Manufacturing Systems Forum**, Cernobbio, CO, Italy, p.341–346, 2004.

---

MUNOZ, D. P., BROUGHTON, J. R., GOLDRING, J. E., & ARMSTRONG, I. T. Age-related performance of human subjects on saccadic eye movement tasks. **Experimental brain research**, v. 121, n. 4, p. 391-400, 1998.

NA, U. J., & SHINOZUKA, M. Simulation-based seismic loss estimation of seaport transportation system. **Reliability Engineering and System Safety**, v.9, n.3, p.722-731, 2009.

NARAHARI, C. L.; KONERU, D. K. A study on the role of occupational stress in organisations. **International Journal of Engineering Technology, Engineering, Management and Applied Science**, v. 5, p. 53-59, 2017.

NELSON, B.L. E YAMNITSKY, M. "Input modeling tools for complex problems". **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, p. 105 – 112, 1998.

NEUMANN, W. P.; MEDBO, P. Integrating human factors into discrete event simulations of parallel flow strategies. **Production Planning and Control**, v. 20, n. 1, p. 3-16, 2009. Doi: 10.1080/09537280802601444.

NEUMANN, W. P.; MEDBO, P. Simulating operator learning during production ramp-up in parallel vs. serial flow production. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 3, p. 845-857, 2017. Doi: 10.1080/00207543.2016.1217362.

OLEGHE, O.; SALONITIS, K. Hybrid simulation modelling of the human-production process interface in lean manufacturing systems. **International Journal of Lean Six Sigma**, 2019a. Doi: 10.1108/IJLSS-01-2018-0004.

OLEGHE, O.; SALONITIS, K. The application of a hybrid simulation modelling framework as a decision-making tool for TPM improvement. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 2019b. Doi: 10.1108/JQME-06-2018-0056.

OLIVEIRA, M. L. M., MONTEVECHI, J. A. B., PINHO, A. F., & MIRANDA, R. C. Using hybrid simulation to represent the human factor in production systems. **International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)**, v. 16, n. 2, 2017. Doi: 10.2507 / IJSIMM16 (2) 7.378.

PADILLA, J. J., LYNCH, C. J., DIALLO, S. Y., GORE, R. J., BARRACO, A., KAVAK, H., & JENKINS, B. Using simulation games for teaching and learning discrete-event simulation. **Winter Simulation Conference**, Washington, DC, USA, p.3375-3384, 2016.

---

PAIVA, C. N., MONTEVECHI, J. A. B., MIRANDA, R. D. C. & PEREIRA, T. F. Human factors in an automotive discrete event simulation model. **Acta Scientiarum. Technology**, v.39(5),p. 615, 2017. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i5.30446>.

PARK, J., JUNG, W., KIM, J., HA, J., & SHIN, Y. The step complexity measure for emergency operating procedures - comparing with simulation data. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 74, n. 1, p. 63-74, 2001. Doi: 10.1016/s0951-8320(01)00063-1.

PARKINSON, S.R.; INMAN, V. W.; DANNENBAUM, S. E. Adult age differences in short-term forgetting. **Acta Psychologica**, v. 60, n. 1, p. 83-101, 1985.

PEREZ, J., DE LOOZE, M. P., BOSCH, T., & NEUMANN, W. P. Discrete event simulation as an ergonomic tool to predict workload exposures during systems design. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 44, n. 2, p. 298-306, 2014. Doi: 10.1016/j.ergon.2013.04.007.

PINHO, A. F. Proposta de um método de otimização de modelos de simulação a eventos discretos. 2008. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, SP, 2008.

PIPER, C. J.; VACHON, S. Accounting for productivity losses in aggregate planning. **International Journal of Production Research**, v. 39, n. 17, p. 4001-4012, 2001. Doi: 10.1080/00207540110073019.

POPOVICS, G.; PFEIFFER, A.; MONOSTORI, L. Generic data structure and validation methodology for simulation of manufacturing systems. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 29, n. 12, p. 1272-1286, 2016. doi:10.1080/0951192X.2016.1187296.

QURESHI, S. M., PURDY, N., MOHANI, A., & NEUMANN, W. Predicting the effect of nurse-patient ratio on nurse workload and care quality using discrete event simulation. **Journal of nursing management**, v. 27, n. 5, p. 971-980, 2019. Doi: 10.1111/jonm.12757.

QURESHI, S. M.; PURDY, N.; NEUMANN, W. P. Development of a Methodology for Healthcare System Simulations to quantify Nurse Workload and Quality of Care. **IISE**

---

**Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors**, v. 8, n. 1, p. 27-41, 2020.

Doi: 10.1080/24725838.2020.1736692.

QURESHI, S. M., PURDY, N., & NEUMANN, W. P. (2021). Developing a modelling approach to quantify quality of care and nurse workload - Field validation study. **Operations Research for Health Care**, 29, 100301.

RAUNAK, M.; OLSEN, M. Quantifying validation of discrete event simulation models. **Winter Simulation Conference**, Savannah, USA, 2014.

REAGANS, R.; ARGOTE, L.; BROOKS, D. Individual experience and experience working together: Predicting learning rates from knowing who knows what and knowing how to work together. **Management science**, v. 51, n. 6, p. 869-881, 2005.

RHODES, S. R. "Age-Related Differences in Work Attitudes and Behavior: A Review and Conceptual Analysis." *Psychological Bulletin*, v.93, p.328-367, 1983.

RICHARDSON, D.B.; COHN, A.E.M. Modeling the impact of make-ahead chemotherapy drug policies through discrete-event simulation. In:Proceedings of Winter Simulation Conference, Gothenburg, Sweden, p.2690-2700, 2018.

ROBINSON, S. Conceptual modeling for simulation. **Winter Simulation Conference**, Washington, DC, USA, 2013.

RODRÍGUEZ, D., BUYENS, D., VAN LANDEGHEM, H., & LASIO, V. Impact of lean production on perceived job autonomy and job satisfaction: An experimental study. **Human factors and ergonomics in manufacturing & service industries**, v. 26, n. 2, p. 159-176, 2016.

RUSSOM, P. Big data analytics. **TDWI best practices report, fourth quarter**, v. 19, n. 4, p. 1-34, 2011.

RYAN, J.; HEAVEY, C. Process modeling for simulation. **Computers in Industry**, 57, p. 437–450, 2006.

SAKURADA, N.; MIYAKE, D. I. Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. **Gestão da Produção**, v.16, n.1, p.25-43, 2009.

---

SALTHOUSE, T. A. Aging and measures of processing speed. **Biological psychology**, v. 54, n. 1-3, p. 35-54, 2000.

SALVIA, E., PETIT, C., CHAMPELY, S., CHOMETTE, R., DI RIENZO, F., & COLLET, C. Effects of age and task load on drivers' response accuracy and reaction time when responding to traffic lights. **Frontiers in aging neuroscience**, v. 8, p. 169, 2016.

SANDANAYAKE, Y. G., AND C. F. ODUOZA. Dynamic Simulation For Performance Optimization In Just-in-time-enabled Manufacturing Processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 42 (3–4): 372–380, 2009.

SANDANAYAKE, Y. G., C. F. ODUOZA, AND D. G. PROVERBS. A Systematic Modelling and Simulation Approach for JIT Performance Optimization. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing** 24 (6): 735–74, 2008.

SARGENT, R.G. Verifying and validating simulation models. **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Savannah, USA, 2014.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. **Journal of simulation**, v. 7, n. 1, p. 12-24, 2013. Doi: 10.1057/jos.2012.20.

SCHIBYE, B., HANSEN, A. F., SØGAARD, K., & CHRISTENSEN, H. Aerobic power and muscle strength among young and elderly workers with and without physically demanding work tasks. **Applied ergonomics**, v. 32, n. 5, p. 425-431, 2001.

SCHLICK, C.; LUCZAK, H.; BRUDER, R. Ergonomische Gestaltung. In: **Arbeitswissenschaft**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. p. 949-1172.

SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution**. Geneva: World Economic Forum, 2016.

SEO, J.; MOON, M.; LEE, S. Construction operation simulation reflecting workers' muscle fatigue. In: **Computing in Civil Engineering 2015**. 2015. p. 515-522.

SGARBOSSA, F., GROSSE, E. H., NEUMANN, W. P., BATTINI, D., & GLOCK, C. H. Human factors in production and logistics systems of the future. *Annual Reviews in Control*, v.49, p.295–305, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.04.007>.

---

SHAFER, S. M.; NEMBHARD, D. A.; UZUMERI, M. V. The effects of worker learning, forgetting, and heterogeneity on assembly line productivity. **Management Science**, v. 47, n. 12, p. 1639-1653, 2001.

SHEPHARD, R. J. Aging and productivity: some physiological issues. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 25, n. 5, p. 535-545, 2000.

SIEBERS, P.O. **The Impact of Human Performance Variation on the Accuracy of Manufacturing System Simulation Models**. (PhD thesis). Cranfield University, Cranfield, UK, 2004.

SILVA, C.E.S.; SALGADO, E.G.; MELLO, C.H.P.; OLIVEIRA, E.S.; LEAL, F. Integration of computer simulation in design for manufacturing and assembly. **International Journal of Production Research**, 52 (10), 2851–2866, 2014.

SINGH, A. e SRIVASTAVA, G. Effect of morale and ego-strength on performance of blue collar industrial workers. *Indian Psychological Review*, 20, 32-39, 1981.

SLACK, N., CHAMBERS, S. & JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SNEL, J.; CREMER, R. **Work and aging: A European prospective**. CRC Press, 2020.

SPENCER, M. B. The influence of irregularity of rest and activity on performance: a model based on time since sleep and time of day. **Ergonomics**, v. 30, n. 9, p. 1275-1286, 1987. Doi: 10.1080/00140138708966022.

STEAD, M. e PAGE, M. **Ergonomics at work**. England: Manpower Service Commission, 1983.

STEWART, A., ELYAN, E., ISAACS, J., MCEWEN, L., & WILSON, L. The effect of person order on egress time: A simulation model of evacuation from a Neolithic visitor attraction. **Human factors**, v. 59, n. 8, p. 1222-1232, 2017. Doi: 10.1177/0018720817729608.

SVETINA, M. The reaction times of drivers aged 20 to 80 during a divided attention driving. **Traffic injury prevention**, v. 17, n. 8, p. 810-814, 2016.

---

TEYARACHAKUL, S.; CHAND, S.; WARD, J. Effect of learning and forgetting on batch sizes. **Production and Operations Management**, v. 20, n. 1, p. 116-128, 2011. Doi: 10.1111/j.1937-5956.2010.01140.x.

TOMASELLA, M.; HANCOCK, P., HRISTOVA, B.; VANCOVA, Z.; BUKE, B. Enhancing the toolkit of airport operations analysts: evidence from an airport baggage handling system improvement project. **Proceedings of Winter Simulation Conference**, Las Vegas, NV, USA, p.2542-2553, 2017.

TORGA, B.L.M. **Modelagem, simulação e otimização em sistemas puxados de manufatura**. 2007. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2007.

TORIIZUKA, T. Application of performance shaping factor (PSF) for work improvement in industrial plant maintenance tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, v. 28, n. 3-4, p. 225-236, 2001. Doi: 10.1016/s0169-8141(01)00036-1.

TORRES, A. F., MARTINS, P. C., LEAL, F., MONTEVECHI, J. A. B., CAMPOS, A. T., & QUEIROZ, J. A. de. **Effect of Human Performance Variability on Discrete Event Simulation**. *Xlviii Sbp*, p.2912–2922, 2016.

TOUHAMI, K. O., ASSOUL, S., & SOUISSI, N. Discrete event simulation as an innovative approach to support education and awareness strategies in road safety and prevention. **Journal of Theoretical and Applied Information Technology**, v.97(12), p.3343–3354, 2019.

TURNER, C. J.; HUTABARAT, W.; OYEKAN, J.; TIWARI, A. Discrete event simulation and virtual reality use in industry: New opportunities and future trends. **IEEE Transactions on Human-Machine Systems**, v. 46, n. 6, p. 882-894, 2016. doi:10.1109/THMS.2016.2596099.

VAN DEN BERG, J.; NEELY, G. Performance on a simple reaction time task while sleep deprived. **Perceptual and Motor Skills**, v. 102, n. 2, p. 589-599, 2006.

VENEZIA, I. On the statistical origins of the learning curve. **European Journal of Operational Research** v.19, p.191–200, 1985.

---

VIEIRA, A. A. C., DIAS, L. S., SANTOS, M. Y., PEREIRA, G., & OLIVEIRA, J. A. Setting an industry 4.0 research and development agenda for simulation-a literature review. **International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)**, v. 17, n. 3, 2018.

VILELA, F. F., LEAL, F., MONTEVECHI, J. A. B., PIEDADE, D. D. Effect of human factor performance on the productivity of a manual assembly line. **International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)**, v. 19, n. 3, 2020. Doi: 10.2507/ijssimm19-3-508.

VILELA, F. F. **Modelagem do ritmo do trabalho humano em um projeto de simulação através da criação de cenários com múltiplas distribuições**. 83 f. Dissertação (Mestrado em engenharia de produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2015.

VISSER, I.; RAIJMAKERS, M. E.J.; MOLENAAR, P.C.M. Characterizing sequence knowledge using online measures and hidden Markov models. **Memory & cognition**, v. 35, n. 6, p. 1502-1517, 2007.

WALCH, O. J., COCHRAN, A., & FORGER, D. B. A global quantification of “normal” sleep schedules using smartphone data. **Science Advances**, v.2(5), p.1–7, 2016. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501705>.

WANG, Q., NUJOOM, R., & ABUBAKAR, M. Integration of missing parameters into a des tool. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 436(1), 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/436/1/012016>.

WANG, Q.; ABUBAKAR, M. I. Human factors and their effects on human-centred assembly systems—a literature review-based study. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2017. Doi: 10.1088/1757-899X/239/1/012006.

WANG, Z. Selecting verification and validation techniques for simulation projects: a planning and tailoring strategy. **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Washington, DC, USA, 2013.

WARR, P. **Work and aging: a european perspective**. Great Britain: Taylor and Francis Ltd, 1995.

WEBB, G.K. Integrated circuit (IC) pricing. **High Technology Management Research** v.5 (II), p.247–260, 1994.

WOODSON, W. E.; TILLMAN, B.; TILLMAN, P. **Human factors design handbook: information and guidelines for the design of systems, facilities, equipment, and products for human use**. 1992.

WRIGHT, T. P. Factors affecting the cost of airplanes. **Journal of the aeronautical sciences**, v. 3, n. 4, p. 122-128, 1936. Doi: 10.2514/8.155.

XIE, W.; NELSON, B.L.; BARTON, R.R. Statistical uncertainty analysis for stochastic simulation with dependent input models. **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Savannah, USA, 2014.

YITZHAK, F.; FERRIS, G. **The validity of the job characteristics model: a review and meta-analysis**. *Personnel Psychology*, 1987.

ZHOU, M.; ZHANG, Q.; CHEN, Z. What can be done to automate conceptual simulation modeling? In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Monterey, CA, USA, 2006.

## Apêndice I – Cálculo do NET: CIA e CIIA

<b>Amostra</b>	<b>Etapa 01</b>	<b>Etapa 02</b>	<b>Etapa 03</b>	<b>Etapa 04</b>
	93	220	42	17
	82	140	43	16
	90	162	40	16
	92	212	41	18
	89	184	41	17
	85	185	40	16
	84	168	42	16
	87	165	40	18
	82	195	38	14
	76	192	40	18
	91	226	33	17
	89	192	41	16
	93	175	40	15
	92	192	35	18
	90	194	40	17
	81	205	38	16
	80	162	40	16
	87	180	36	18
	82	182	41	17
	80	190	40	17
	88	252	40	18
	85	255	41	18
	90	232	34	17
	94	251	34	19
	92	240	35	18
	78	262	35	19
	82	222	43	17
	89	224	41	17
	82	212	42	18
	83	198	42	19
	88	262	39	17
	80	274	41	19
	90	271	40	18
	79	250	40	18
	91	249	33	17
	78	277	33	16
	78	202	41	16
	92	198	40	18
	80	223	35	17
	88	221	41	16
<b>Média Aritmética = TCM</b>	<b>85,8000</b>	<b>212,4000</b>	<b>39,0250</b>	<b>17,1250</b>
<b>QTP = 25200 segundos/TCM</b>	<b>293,7063</b>	<b>118,6441</b>	<b>645,7399</b>	<b>1471,5328</b>
<b>QR = QTP x 240 dias</b>	<b>70489,5105</b>	<b>28474,5763</b>	<b>154977,5785</b>	<b>353167,8832</b>
<b>NET (n)</b>	<b>70490</b>	<b>28475</b>	<b>154978</b>	<b>353168</b>

## Apêndice II – Determinação do FH aprendizagem: CIIA

Variáveis	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
FH aprendizagem=	0,877495	0,886812	0,8713357	0,8663662
NET=	70490	28475	154978	353168
Lr=	0,8	0,8	0,8	0,8
Log(2)=	0,3010	0,3010	0,3010	0,3010
Log(Lr)=	-0,0969	-0,0969	-0,0969	-0,0969
Log(Lr)/Log(2)=	-0,3219	-0,3219	-0,3219	-0,3219
Exp=	0,0275	0,0368	0,0213	0,0164

### Apêndice III – Cronoanálise: primeiro objeto de estudo

Período do turno	CIA: tempos de processamento das etapas em segundos			
	Etapa 01	Etapa 02	Etapa 03	Etapa 04
07:00 - 08:00	93	220	42	17
	82	140	43	16
	90	162	40	16
	92	212	41	18
	89	184	41	17
08:00 - 09:00	85	185	40	16
	84	168	42	16
	87	165	40	18
	82	195	38	14
	76	192	40	18
09:00 - 10:00	91	226	33	17
	89	192	41	16
	93	175	40	15
	92	192	35	18
	90	194	40	17
10:00 - 11:00	81	205	38	16
	80	162	40	16
	87	180	36	18
	82	182	41	17
	80	190	40	17
13:00 - 14:00	88	252	40	18
	85	255	41	18
	90	232	34	17
	94	251	34	19
	92	240	35	18
14:00 - 15:00	78	262	35	19
	82	222	43	17
	89	224	41	17
	82	212	42	18
	83	198	42	19
15:00 - 16:00	88	262	39	17
	80	274	41	19
	90	271	40	18
	79	250	40	18
	91	249	33	17
16:00 - 17:00	78	277	33	16
	78	202	41	16
	92	198	40	18
	80	223	35	17
	88	221	41	16

## Apêndice IV – Tempos após a aplicação da EMT no CIIA

Período do turno	CIIA: tempos de processamento das etapas em segundos			
	Etapa 01	Etapa 02	Etapa 03	Etapa 04
07:00 - 08:00	114,7128	284,1400	61,8599	20,2215
	101,1446	180,8164	63,3328	19,0320
	111,0124	209,2304	58,9142	19,0320
	113,4793	273,8077	60,3871	21,4110
	109,7789	237,6444	60,3871	20,2215
08:00 - 09:00	104,9143	239,0866	58,9468	19,0450
	103,6800	217,1165	61,8941	19,0450
	107,3828	213,2394	58,9468	21,4257
	101,2114	252,0102	55,9994	16,6644
	93,8057	248,1331	58,9468	21,4257
09:00 - 10:00	112,3822	292,2278	48,6536	20,2470
	109,9122	248,2643	60,4485	19,0560
	114,8521	226,2826	58,9741	17,8650
	113,6171	248,2643	51,6023	21,4380
	111,1472	250,8504	58,9741	20,2470
10:00 - 11:00	100,0768	265,1861	56,0462	19,0647
	98,8413	209,5617	58,9960	19,0647
	107,4899	232,8463	53,0964	21,4478
	101,3123	235,4335	60,4709	20,2563
	98,8413	245,7822	58,9960	20,2563
13:00 - 14:00	108,7900	326,1697	59,0253	21,4610
	105,0812	330,0527	60,5010	21,4610
	111,2625	300,2832	50,1715	20,2688
	116,2075	324,8754	50,1715	22,6533
	113,7350	310,6378	51,6472	21,4610
14:00 - 15:00	96,4208	339,0905	51,6442	22,6517
	101,3654	287,3209	63,4486	20,2673
	110,0186	289,9094	60,4975	20,2673
	101,3654	274,3786	61,9730	21,4595
	102,6016	256,2592	61,9730	22,6517
15:00 - 16:00	108,7600	339,0238	57,5365	20,2630
	98,8728	354,5516	60,4870	22,6469
	111,2319	350,6697	59,0117	21,4549
	97,6369	323,4960	59,0117	21,4549
	112,4678	322,2020	48,6847	20,2630
16:00 - 17:00	96,3686	358,3188	48,6710	19,0644
	96,3686	261,3011	60,4701	19,0644
	113,6656	256,1268	58,9952	21,4475
	98,8396	288,4660	51,6208	20,2559
	108,7236	285,8789	60,4701	19,0644

**Apêndice V– Quantidade de placas produzidas: HRPA**

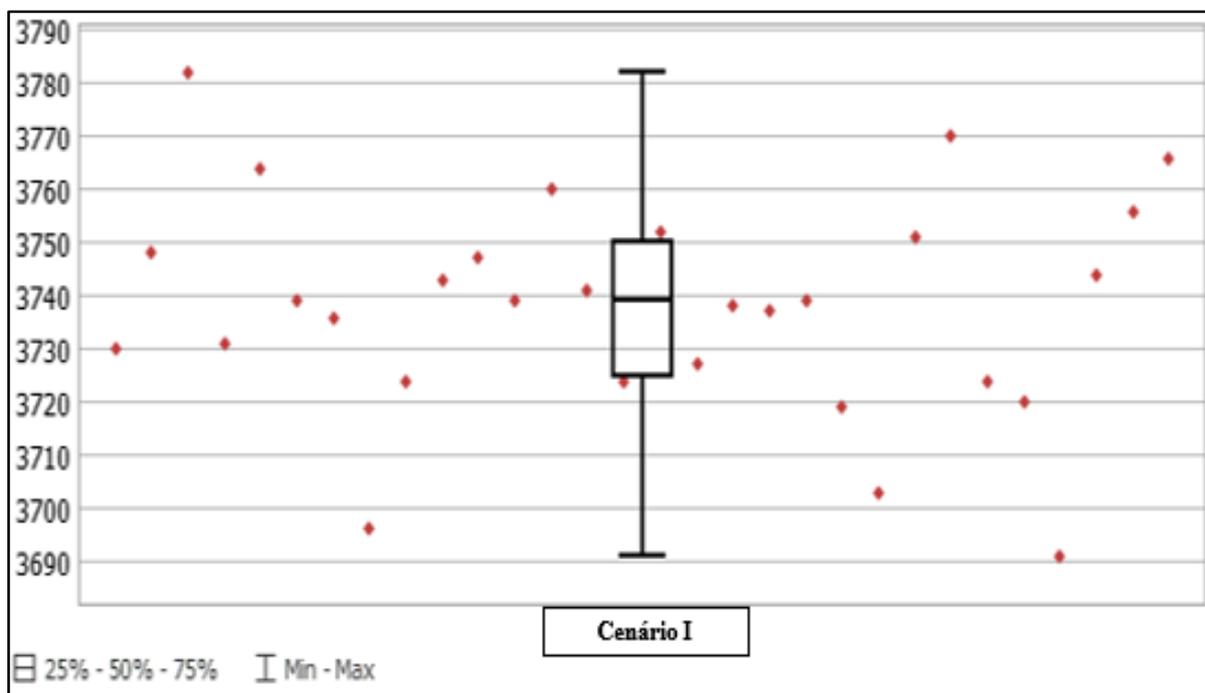
<b>Período (mês)</b>	<b>Quantidade real produzida de PE na empresa</b>
1	2651
2	2650
3	2630
4	2649
5	2645
6	2631
7	2635
8	2670
9	2630
10	2658
11	2655
12	2640
13	2675
14	2680
15	2650
16	2650
17	2645
18	2658
19	2663
20	2678
21	2643
22	2658
23	2649
24	2660
25	2647
26	2648
27	2680
28	2637
29	2644
30	2635

## Apêndice VI– *Outputs* SED: RSPCIA e RSPCIIA

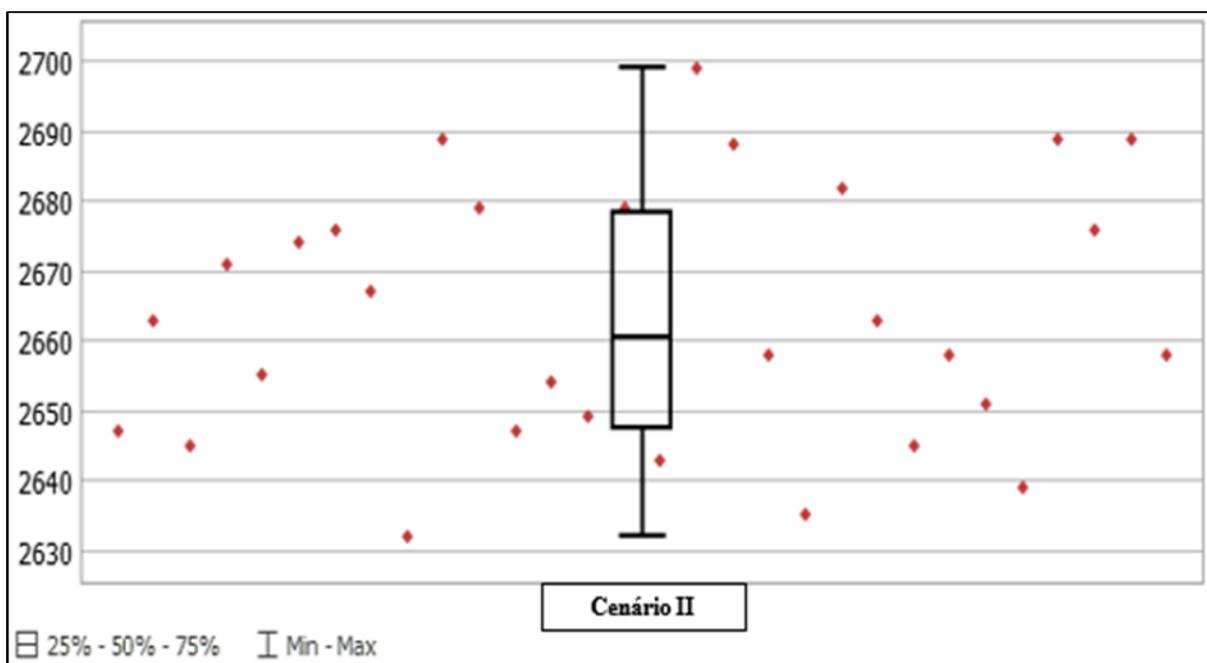
RSPCIA		RSPCIIA	
Réplica	Quantidade de PE produzidas por mês	Réplica	Quantidade de PE produzidas por mês
1	3730	1	2647
2	3748	2	2663
3	3782	3	2645
4	3731	4	2671
5	3764	5	2655
6	3739	6	2674
7	3736	7	2676
8	3696	8	2667
9	3724	9	2632
10	3743	10	2689
11	3747	11	2679
12	3739	12	2647
13	3760	13	2654
14	3741	14	2649
15	3724	15	2679
16	3752	16	2643
17	3727	17	2699
18	3738	18	2688
19	3737	19	2658
20	3739	20	2635
21	3719	21	2682
22	3703	22	2663
23	3751	23	2645
24	3770	24	2658
25	3724	25	2651
26	3720	26	2639
27	3691	27	2689
28	3744	28	2676
29	3756	29	2689
30	3766	30	2658

## Apêndice VII– Gráfico *boxplot*: RSPCIA e RSPCIIA

Apresentação do gráfico *boxplot* dos dados provenientes dos *outputs* da simulação da produção, referente ao Cenário I.

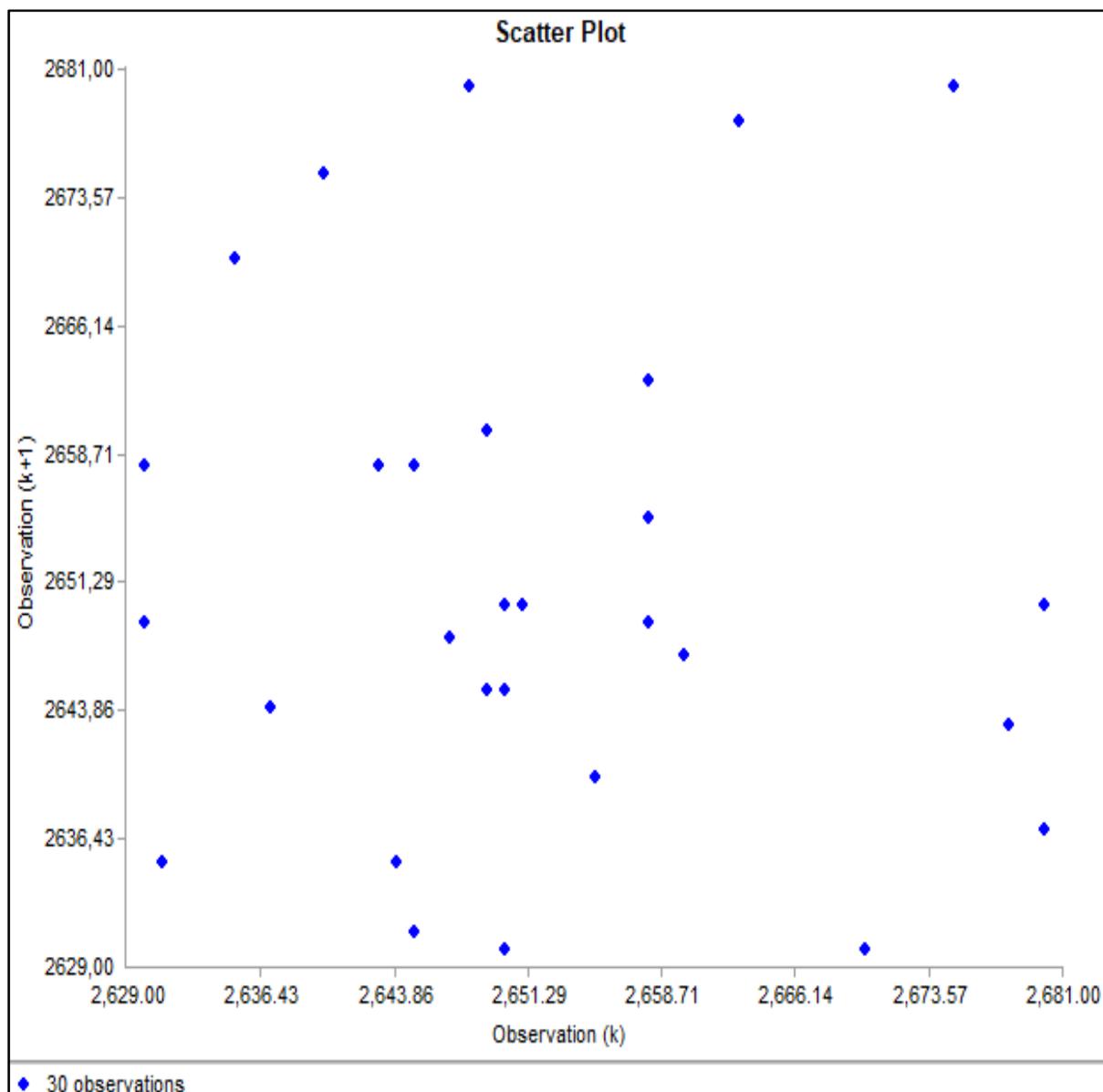


Apresentação do gráfico *boxplot* dos dados provenientes dos *outputs* da simulação da produção, referente ao Cenário II.

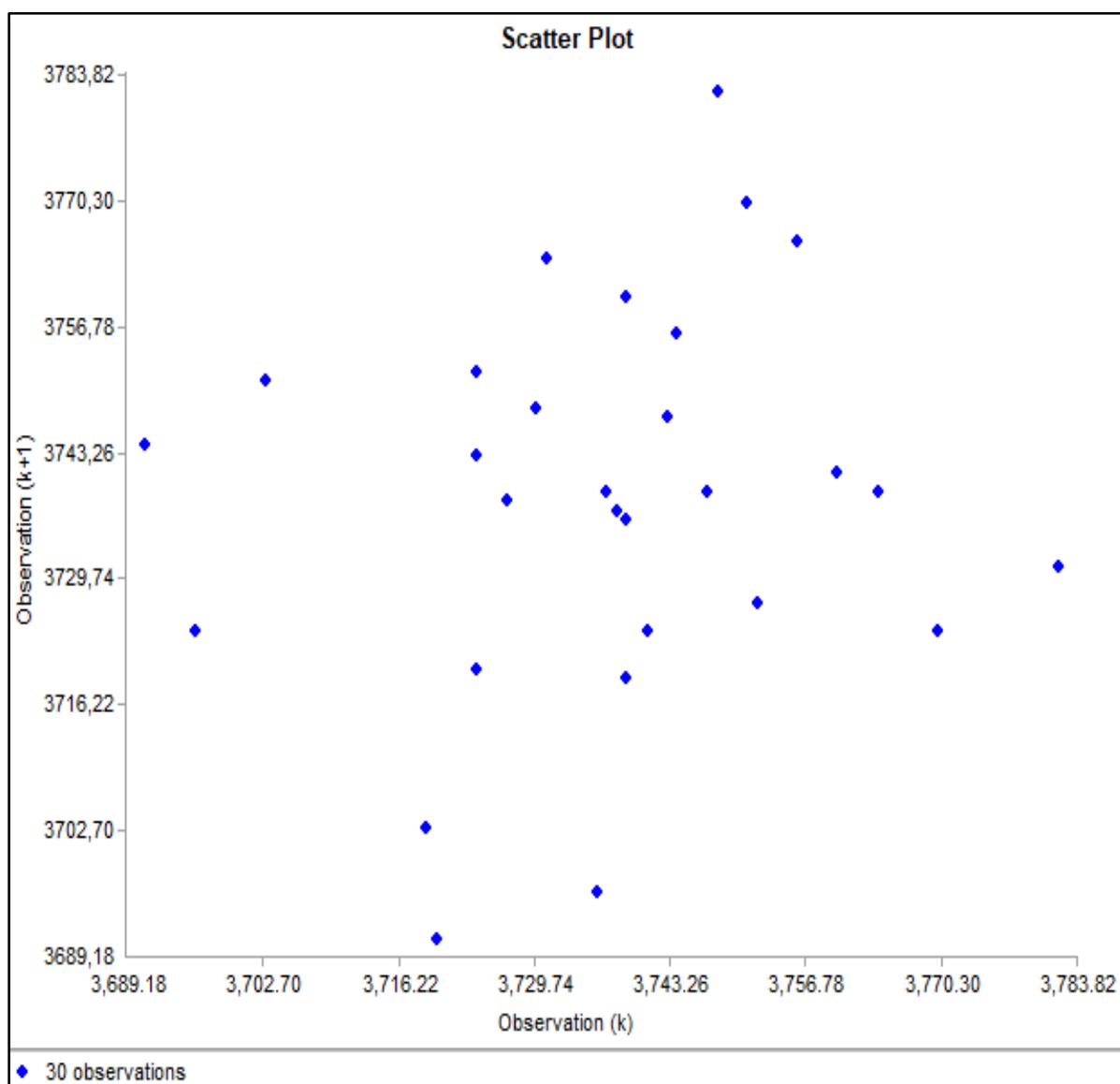


## Apêndice VIII – Independência das amostras: CIA e CIIA

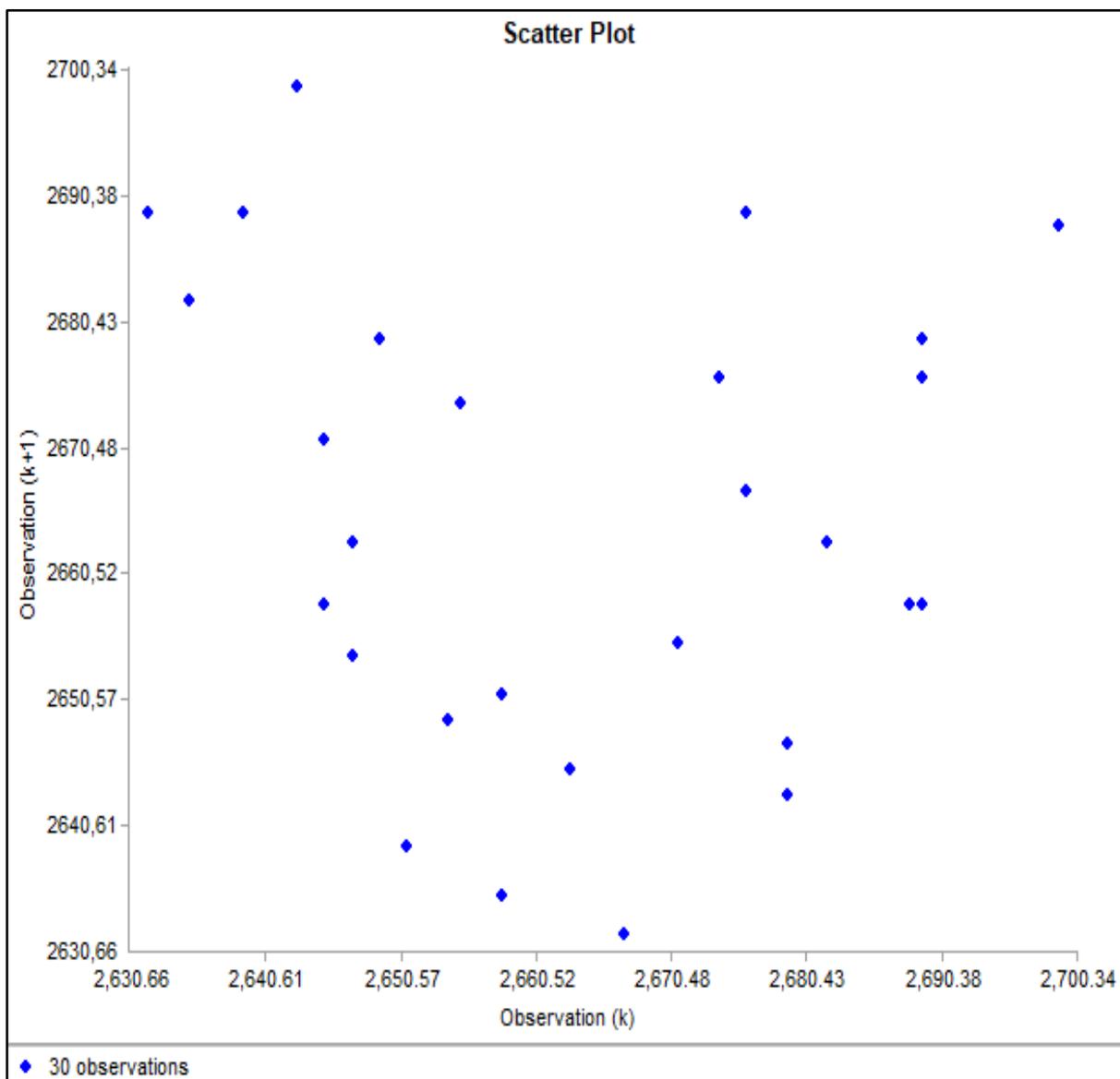
Resultado da análise de independência dos dados proveniente do *ExpetFit*®: histórico real de produção.



Resultado da análise de independência dos dados proveniente do *ExpetFit*®: quantidade produzida segundo os resultados da simulação computacional para o Cenário I.

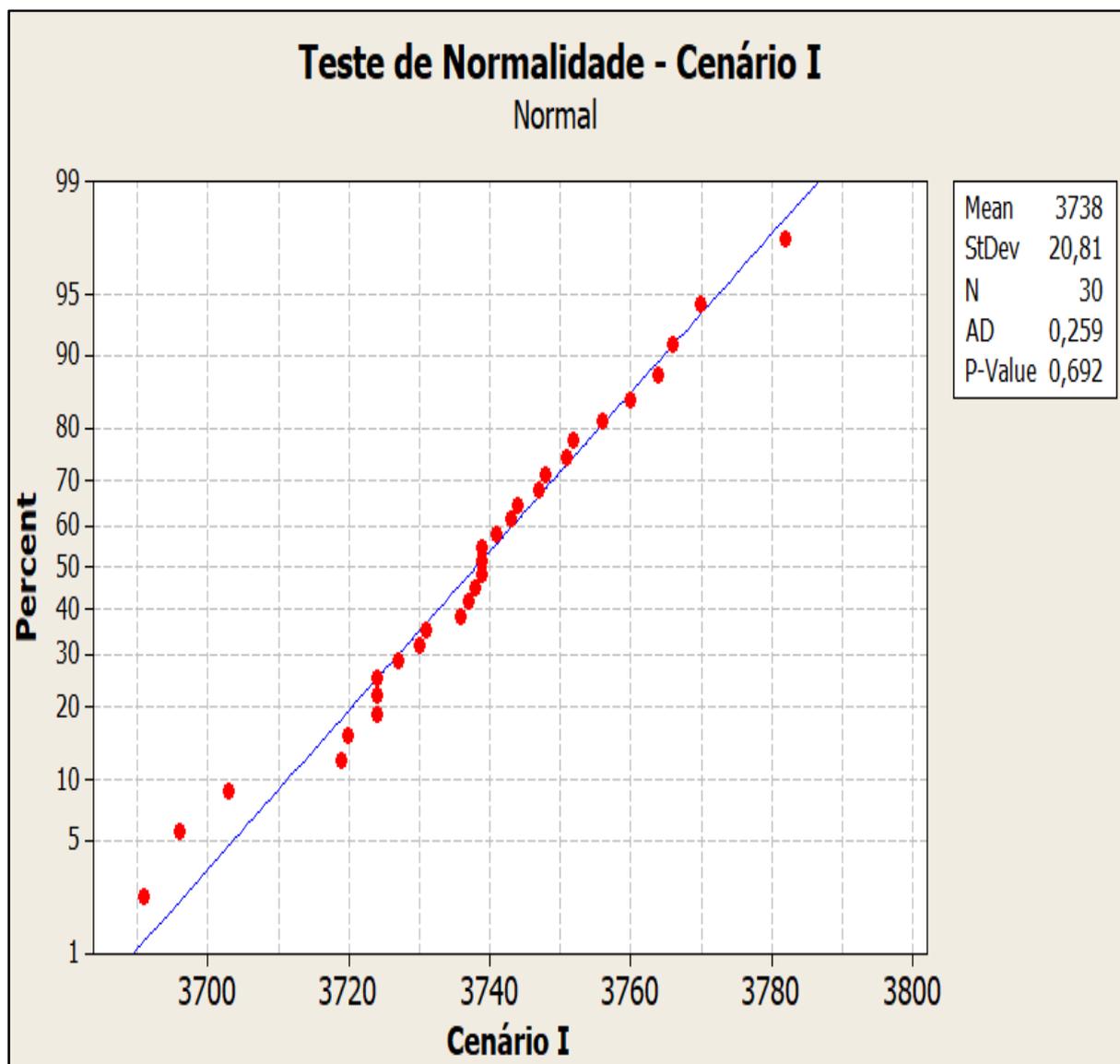


Resultado da análise de independência dos dados proveniente do *ExpetFit*®: quantidade produzida segundo os resultados da simulação computacional para o Cenário II.

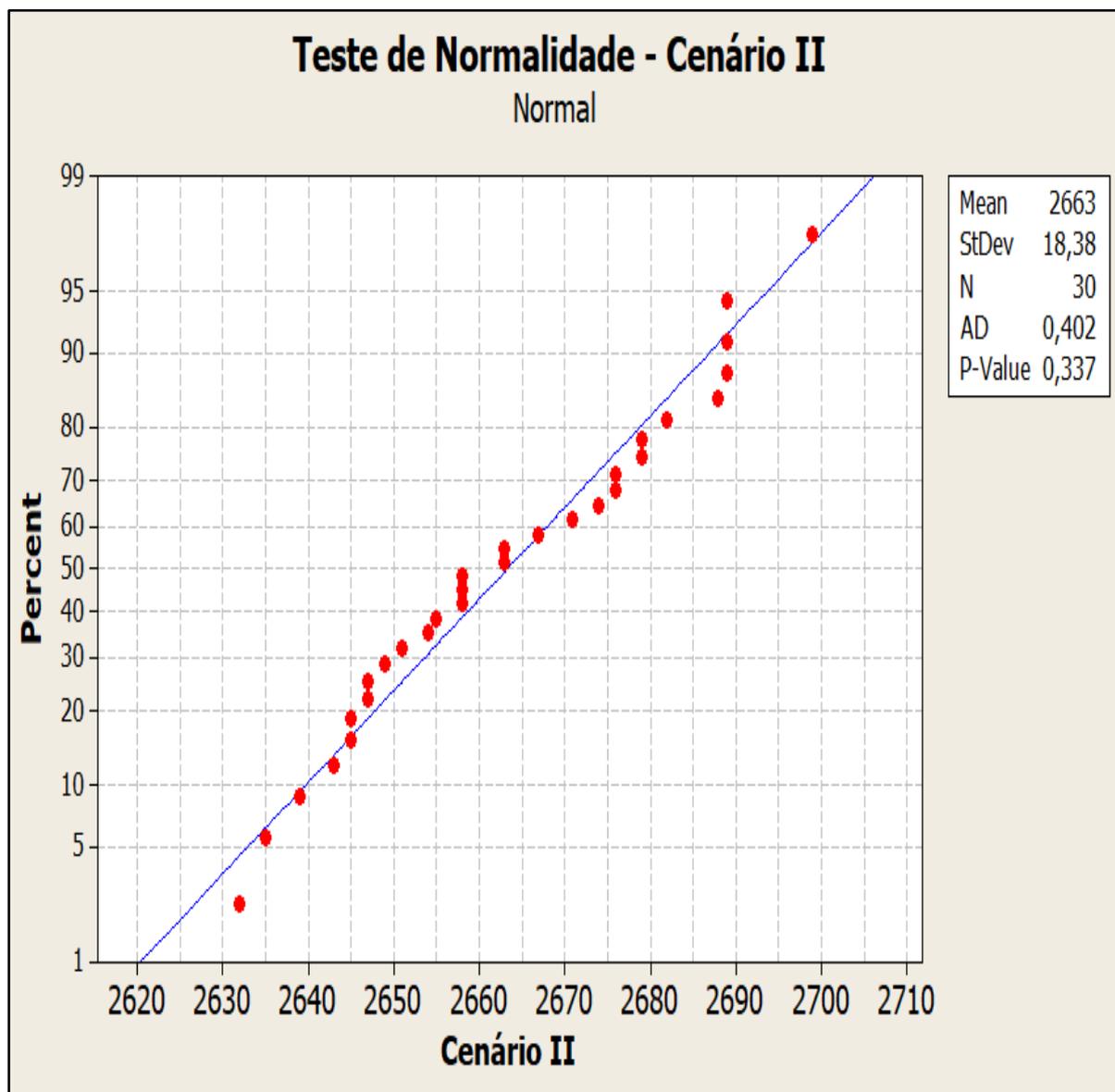


## Apêndice IX – Teste de normalidade: CIA e CIIA

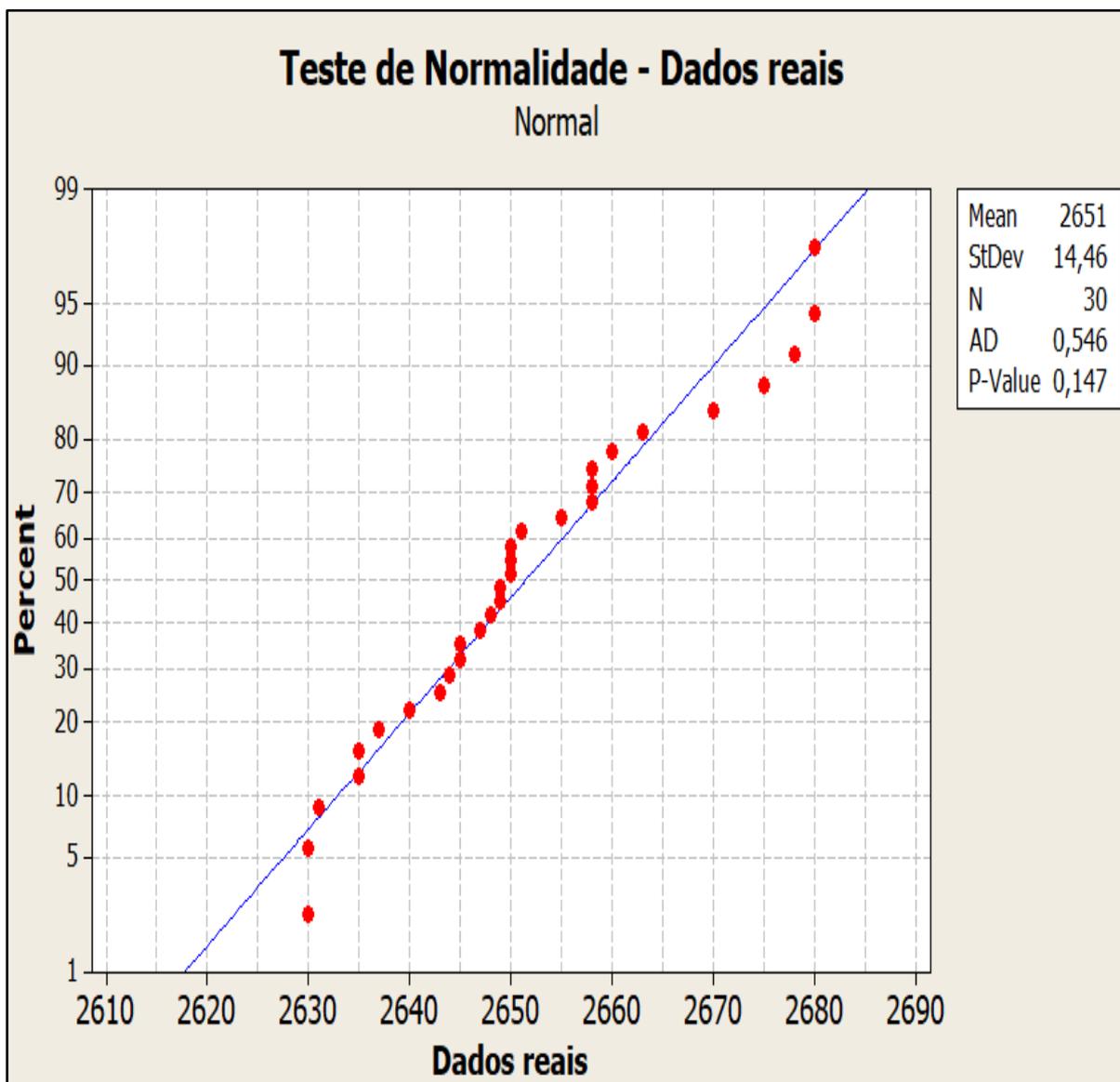
Teste de Normalidade para o Cenário I. Conforme resultados do software *Minitab*®, *P-Value* é igual a 0,692 que é maior que 0,05.



Teste de Normalidade para o Cenário II. Conforme resultados do software *Minitab*®, *P-Value* é igual a 0,337 que é maior que 0,05.



Teste de Normalidade para o HRP A ou simplesmente “dados reais”. Conforme resultados do software *Minitab*®, *P-Value* é igual a 0,147 que é maior que 0,05.



## Apêndice X – TST: primeiro objeto de estudo

Comparação entre CIA e CIIA, assumindo variâncias diferentes e um nível de confiança de 95%: não há evidência estatística para rejeitar  $H_1$ .

### Two-Sample T-Test and CI: Cenário I; Cenário II

Two-sample T for Cenário I vs Cenário II

	N	Mean	StDev	SE Mean
Cenário I	30	3738,0	20,8	3,8
Cenário II	30	2663,3	18,4	3,4

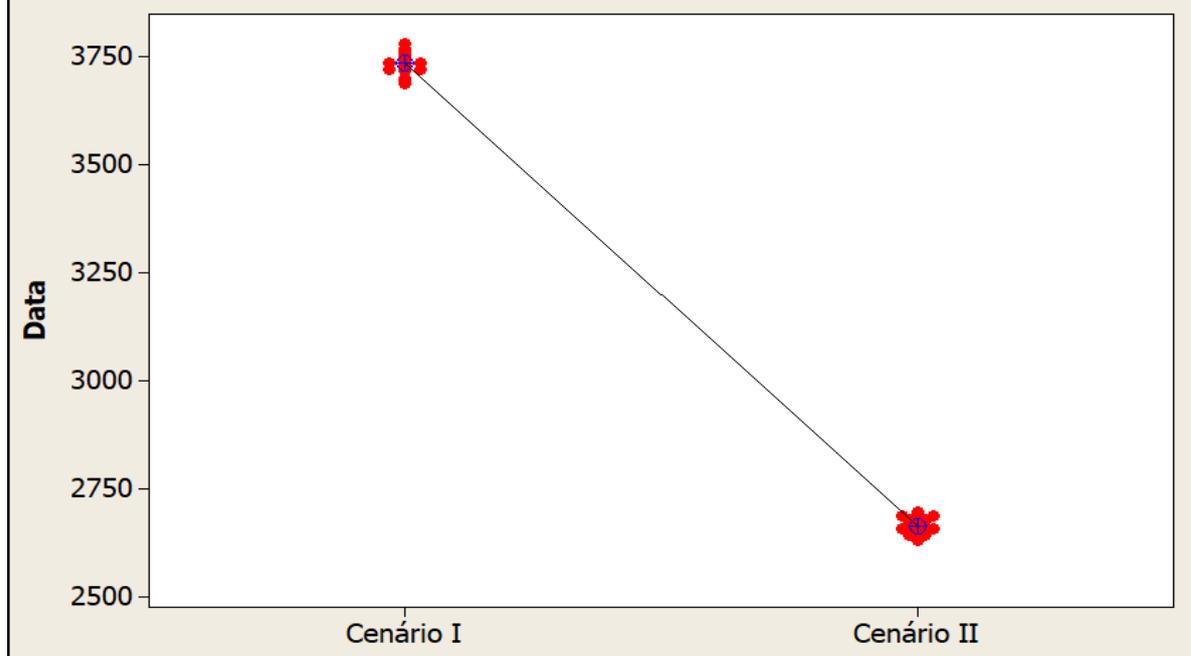
Difference = mu (Cenário I) - mu (Cenário II)

Estimate for difference: 1074,70

95% CI for difference: (1064,55; 1084,85)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 212,01 P-Value = 0,000 DF = 57

### Individual Value Plot of Cenário I; Cenário II



Comparação entre CIA e HRP, assumindo variâncias diferentes e um nível de confiança de 95%: não há evidência estatística para rejeitar  $H_1$ .

### Two-Sample T-Test and CI: Cenário I; Dados reais

Two-sample T for Cenário I vs Dados reais

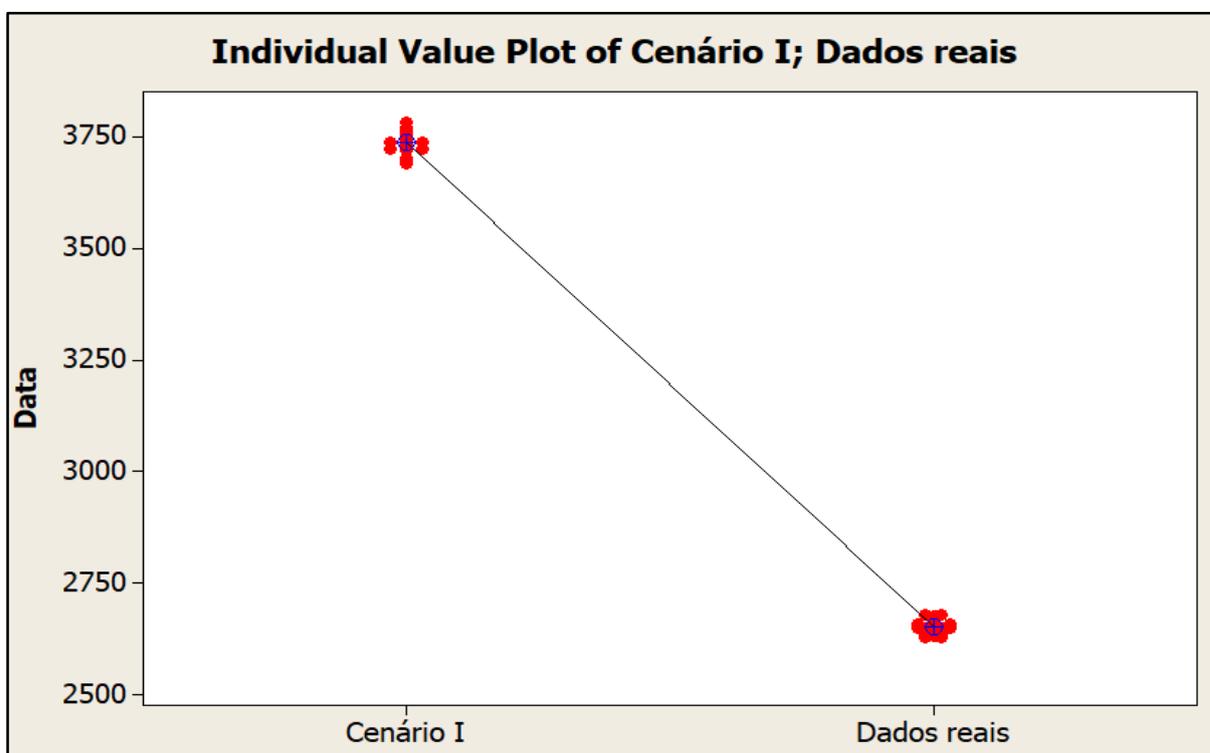
	N	Mean	StDev	SE Mean
Cenário I	30	3738,0	20,8	3,8
Dados reais	30	2651,5	14,5	2,6

Difference = mu (Cenário I) - mu (Dados reais)

Estimate for difference: 1086,57

95% CI for difference: (1077,28; 1095,85)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 234,88 P-Value = 0,000 DF = 51



Comparação entre CIA e HRP, assumindo variâncias diferentes e um nível de confiança de 95%: não há evidência estatística para rejeitar  $H_1$ .

### Two-Sample T-Test and CI: Cenário II; Dados reais

Two-sample T for Cenário II vs Dados reais

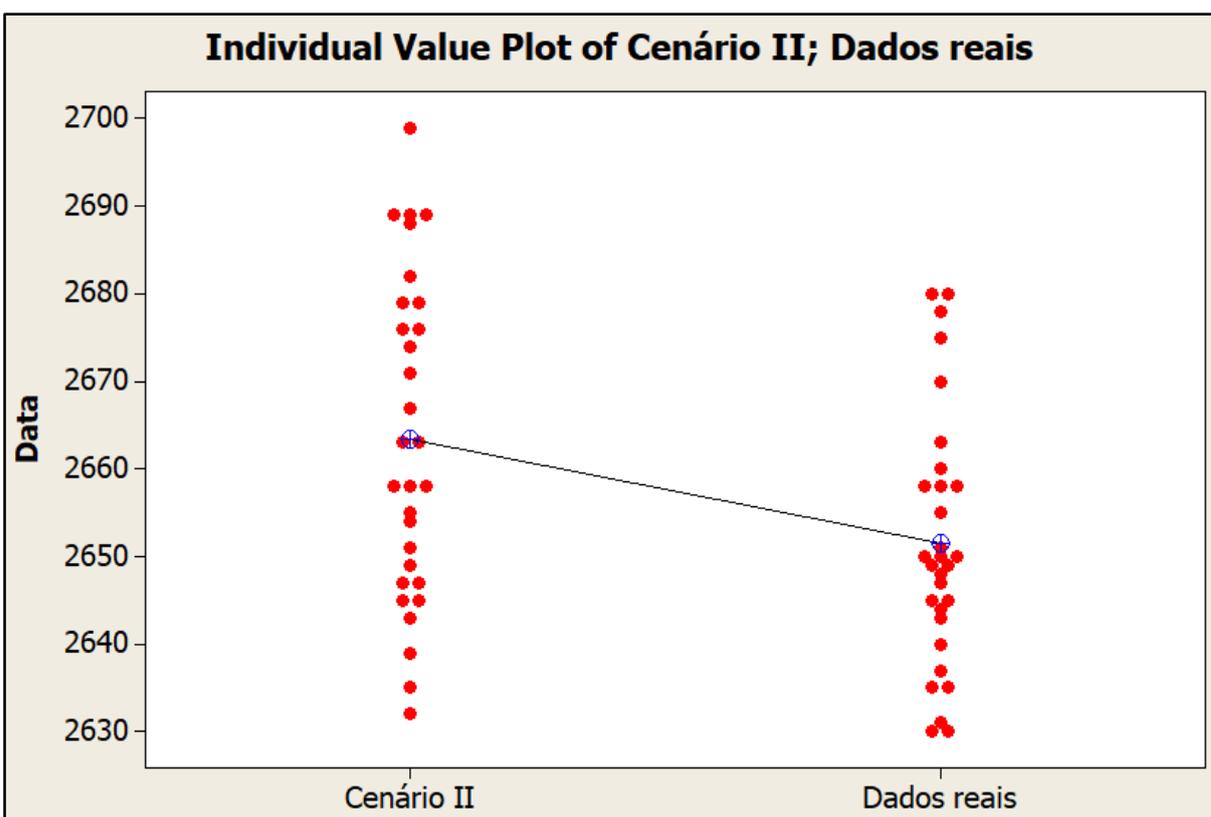
	N	Mean	StDev	SE Mean
Cenário II	30	2663,3	18,4	3,4
Dados reais	30	2651,5	14,5	2,6

Difference =  $\mu$  (Cenário II) -  $\mu$  (Dados reais)

Estimate for difference: 11,87

95% CI for difference: (3,31; 20,43)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 2,78 P-Value = 0,007 DF = 54



## Apêndice XI – Teste de *Turing*: primeiro objeto de estudo

Validação do Modelo Computacional (Teste de <i>Turing</i> )					
RSPCIA vs HRP					
n	Quantidade de placa produzida por dia	Avaliação Líder	n	Quantidade de placa produzida por dia	Avaliação Líder
1	3738	NOK	31	2660	OK
2	3736	NOK	32	2635	OK
3	3727	NOK	33	3756	NOK
4	2650	OK	34	3696	NOK
5	3730	NOK	35	3724	NOK
6	2663	NOK	36	2645	OK
7	3719	NOK	37	3744	NOK
8	2637	OK	38	2649	OK
9	3760	NOK	39	2675	OK
10	2635	OK	40	2645	OK
11	2650	OK	41	3770	NOK
12	3731	NOK	42	2648	OK
13	2630	OK	43	3724	NOK
14	2680	OK	44	2631	OK
15	3691	NOK	45	2670	OK
16	3703	NOK	46	3743	NOK
17	2647	OK	47	2630	OK
18	2680	NOK	48	2658	OK
19	3741	NOK	49	3764	NOK
20	3766	NOK	50	3751	NOK
21	2640	OK	51	3720	NOK
22	3739	NOK	52	3737	NOK
23	3747	NOK	53	2650	OK
24	3739	NOK	54	2643	OK
25	2651	OK	55	3724	NOK
26	2658	OK	56	2649	OK
27	2655	OK	57	3748	NOK
28	3739	NOK	58	3752	NOK
29	3782	NOK	59	2644	OK
30	2658	OK	60	2678	NOK
n°NOK		33	Percentual da Validação		45,00%
n°OK		27			

Validação do Modelo Computacional (Teste de <i>Turing</i> )					
RSPCIIA vs HRP A					
n	Quantidade de placa produzida por dia	Avaliação Líder	n	Quantidade de placa produzida por dia	Avaliação Líder
1	2648	OK	31	2675	OK
2	2651	OK	32	2674	OK
3	2647	OK	33	2660	OK
4	2654	OK	34	2663	OK
5	2631	OK	35	2635	OK
6	2676	OK	36	2663	OK
7	2651	OK	37	2658	OK
8	2639	OK	38	2647	OK
9	2682	OK	39	2643	OK
10	2676	OK	40	2645	OK
11	2679	OK	41	2680	OK
12	2645	OK	42	2630	OK
13	2679	OK	43	2632	OK
14	2699	NOK	44	2663	OK
15	2647	OK	45	2644	OK
16	2658	OK	46	2658	OK
17	2680	OK	47	2643	OK
18	2658	OK	48	2635	OK
19	2640	OK	49	2689	NOK
20	2645	OK	50	2635	OK
21	2655	OK	51	2630	OK
22	2650	OK	52	2671	OK
23	2658	OK	53	2678	OK
24	2649	OK	54	2688	OK
25	2637	OK	55	2689	NOK
26	2689	OK	56	2655	OK
27	2650	OK	57	2650	OK
28	2670	OK	58	2649	OK
29	2667	OK	59	2658	OK
30	2649	OK	60	2645	OK
<b>n°NOK</b>		<b>3</b>	<b>Percentual da Validação</b>		<b>95,00%</b>
<b>n°OK</b>		<b>57</b>			

## Apêndice XII – Cronoanálise: segundo objeto de estudo

Amostra (n)	Etapa 01	Etapa 02	Etapa 03	Etapa 04	Etapa 05	Etapa 06	Etapa 07	Etapa 08
1	30	49	17	23	35	28	24	14
2	39	39	22	25	35	50	20	18
3	29	41	18	22	33	50	25	18
4	31	32	22	24	34	42	27	20
5	42	38	18	21	34	28	20	14
6	34	39	19	25	36	50	26	12
7	26	38	19	22	35	37	20	13
8	38	49	21	23	34	46	26	15
9	42	39	21	21	34	47	23	13
10	34	30	18	21	34	44	22	14
11	38	33	19	24	32	43	21	16
12	32	38	17	22	34	50	25	20
13	35	43	22	24	32	28	25	20
14	29	50	19	22	36	44	24	12
15	35	36	19	21	33	40	25	20
16	39	36	18	20	32	44	25	18
17	29	36	20	22	32	50	24	18
18	31	47	19	25	35	33	21	17
19	30	31	19	21	36	42	25	14
20	35	34	18	23	33	47	24	16
21	28	30	21	24	32	41	25	18
22	28	34	17	22	32	47	26	15
23	40	49	19	24	36	47	23	17
24	34	35	22	20	33	29	21	19
25	34	31	22	23	34	28	26	19
26	27	39	17	21	34	35	24	19
27	26	36	20	24	35	38	20	20
28	29	33	20	22	36	49	20	18
29	35	33	21	23	35	50	25	17
30	42	40	22	21	35	29	22	13

<b>Amostra (n)</b>	<b>Etapa 01</b>	<b>Etapa 02</b>	<b>Etapa 03</b>	<b>Etapa 04</b>	<b>Etapa 05</b>	<b>Etapa 06</b>	<b>Etapa 07</b>	<b>Etapa 08</b>
<b>31</b>	29	42	19	21	35	47	23	13
<b>32</b>	28	45	18	23	32	35	22	15
<b>33</b>	30	45	18	24	34	37	22	19
<b>34</b>	31	47	21	22	33	42	23	17
<b>35</b>	32	50	20	25	35	43	22	19
<b>36</b>	34	35	22	24	35	43	24	20
<b>37</b>	37	47	17	21	33	33	26	16
<b>38</b>	29	50	19	25	33	48	26	13
<b>39</b>	33	49	22	20	33	50	20	14
<b>40</b>	34	30	20	20	36	46	27	13
<b>41</b>	39	46	20	23	36	43	25	17
<b>42</b>	42	38	20	20	35	48	22	13
<b>43</b>	42	44	19	25	36	44	24	12
<b>44</b>	29	38	19	23	34	41	20	19
<b>45</b>	27	39	17	20	34	28	22	12
<b>46</b>	35	30	20	22	35	46	27	19
<b>47</b>	42	49	18	20	35	30	20	14
<b>48</b>	29	46	21	24	35	43	20	13
<b>49</b>	28	36	20	25	33	35	25	13
<b>50</b>	33	36	20	23	32	29	25	20
<b>51</b>	36	49	19	24	32	47	23	12
<b>52</b>	37	48	20	20	33	35	27	18
<b>53</b>	29	31	22	22	32	40	27	20
<b>54</b>	38	40	22	20	35	47	27	13
<b>55</b>	41	45	18	25	35	51	24	18
<b>56</b>	32	35	21	23	35	36	23	18
<b>57</b>	29	48	19	21	32	38	27	14
<b>58</b>	36	41	17	22	32	46	24	16
<b>59</b>	30	37	20	23	34	32	23	18
<b>60</b>	36	37	17	23	34	33	24	17

## Apêndice XIII – Tempos após a aplicação da EMT no CIIB

Amostra (n)	Etapa 01	Etapa 02	Etapa 03	Etapa 04	Etapa 05	Etapa 06	Etapa 07	Etapa 08
1	35,6111	58,7306	21,9227	28,9391	41,6467	51,2408	35,3409	18,5726
2	46,2945	46,7448	28,3706	31,4556	41,6467	91,5015	29,4507	23,8791
3	34,4241	49,1419	23,2123	27,6809	39,2669	91,5015	36,8134	23,8791
4	36,7982	38,3547	28,3706	30,1973	40,4568	76,8613	39,7585	26,5323
5	49,8556	45,5462	23,2123	26,4227	40,4568	51,2408	29,4507	18,5726
6	40,3593	46,7448	24,5019	31,4556	42,8366	91,5015	38,2860	15,9194
7	30,8630	45,5462	24,5019	27,6809	41,6467	67,7111	29,4507	17,2460
8	45,1074	58,7306	27,0810	28,9391	40,4568	84,1814	38,2860	19,8992
9	49,8556	46,7448	27,0810	26,4227	40,4568	86,0114	33,8684	17,2460
10	40,3593	35,9575	23,2123	26,4227	40,4568	80,5213	32,3958	18,5726
11	45,1384	39,5801	24,5173	30,2169	38,1030	78,7263	30,9404	21,2389
12	38,0113	45,5771	21,9366	27,6988	40,4845	91,5422	36,8338	26,5486
13	41,5748	51,5741	28,3885	30,2169	38,1030	51,2636	36,8338	26,5486
14	34,4477	59,9699	24,5173	27,6988	42,8659	80,5572	35,3604	15,9292
15	41,5748	43,1783	24,5173	26,4398	39,2937	73,2338	36,8338	26,5486
16	46,3262	43,1783	23,2269	25,1807	38,1030	80,5572	36,8338	23,8937
17	34,4477	43,1783	25,8077	27,6988	38,1030	91,5422	35,3604	23,8937
18	36,8234	56,3717	24,5173	31,4759	41,6752	60,4179	30,9404	22,5663
19	35,6356	37,1813	24,5173	26,4398	42,8659	76,8955	36,8338	18,5840
20	41,5748	40,7795	23,2269	28,9578	39,2937	86,0497	35,3604	21,2389
21	33,2790	36,0024	27,1125	30,2333	38,1249	75,0926	36,8509	23,9060
22	33,2790	40,8028	21,9482	27,7138	38,1249	86,0818	38,3249	19,9217
23	47,5414	58,8040	24,5303	30,2333	42,8905	86,0818	33,9028	22,5779
24	40,4102	42,0029	28,4035	25,1944	39,3163	53,1143	30,9547	25,2341
25	40,4102	37,2025	28,4035	28,9736	40,5077	51,2828	38,3249	25,2341
26	32,0905	46,8032	21,9482	26,4541	40,5077	64,1035	35,3768	25,2341
27	30,9019	43,2029	25,8214	30,2333	41,6991	69,5980	29,4807	26,5623
28	34,4675	39,6027	25,8214	27,7138	42,8905	89,7449	29,4807	23,9060
29	41,5987	39,6027	27,1125	28,9736	41,6991	91,5764	36,8509	22,5779
30	49,9185	48,0033	28,4035	26,4541	41,6991	53,1143	32,4288	17,2655

<b>Amostra (n)</b>	<b>Etapa 01</b>	<b>Etapa 02</b>	<b>Etapa 03</b>	<b>Etapa 04</b>	<b>Etapa 05</b>	<b>Etapa 06</b>	<b>Etapa 07</b>	<b>Etapa 08</b>
31	34,4834	50,4264	24,5407	26,4656	41,7183	86,1075	33,9154	17,2726
32	33,2943	54,0283	23,2491	28,9861	38,1424	64,1226	32,4408	19,9299
33	35,6725	54,0283	23,2491	30,2464	40,5263	67,7868	32,4408	25,2445
34	36,8616	56,4296	27,1239	27,7259	39,3344	76,9471	33,9154	22,5872
35	38,0507	60,0314	25,8323	31,5067	41,7183	78,7792	32,4408	25,2445
36	40,4288	42,0220	28,4156	30,2464	41,7183	78,7792	35,3900	26,5732
37	43,9961	56,4296	21,9575	26,4656	39,3344	60,4585	38,3391	21,2586
38	34,4834	60,0314	24,5407	31,5067	39,3344	87,9396	38,3391	17,2726
39	39,2397	58,8308	28,4156	25,2053	39,3344	91,6037	29,4916	18,6012
40	40,4288	36,0189	25,8323	25,2053	42,9102	84,2754	39,8137	17,2726
41	46,4028	55,2627	25,8470	29,0030	42,9366	78,8108	36,8829	22,5997
42	49,9723	45,6518	25,8470	25,2200	41,7439	87,9748	32,4569	17,2821
43	49,9723	52,8599	24,5546	31,5250	42,9366	80,6436	35,4076	15,9527
44	34,5047	45,6518	24,5546	29,0030	40,5512	75,1451	29,5063	25,2585
45	32,1250	46,8531	21,9699	25,2200	40,5512	51,3186	32,4569	15,9527
46	41,6406	36,0383	25,8453	27,7401	41,7409	84,3052	39,8312	25,2568
47	49,9687	58,8626	23,2608	25,2183	41,7409	54,9817	29,5046	18,6103
48	34,5022	55,2587	27,1375	30,2620	41,7409	78,8071	29,5046	17,2810
49	33,3125	43,2460	25,8453	31,5229	39,3557	64,1453	36,8807	17,2810
50	39,2611	43,2460	25,8453	29,0010	38,1631	53,1490	36,8807	26,5862
51	42,8212	58,8501	24,5482	30,2559	38,1550	86,1260	33,9244	15,9486
52	44,0106	57,6491	25,8402	25,2132	39,3473	64,1364	39,8243	23,9230
53	34,4948	37,2317	28,4242	27,7345	38,1550	73,2987	39,8243	26,5811
54	45,2001	48,0409	28,4242	25,2132	41,7320	86,1260	39,8243	17,2777
55	48,7685	54,0460	23,2562	31,5165	41,7320	93,4559	35,3994	23,9230
56	38,0500	42,0213	27,1235	28,9857	41,7175	65,9539	33,9149	23,9155
57	34,4828	57,6292	24,5403	26,4652	38,1417	69,6181	39,8132	18,6009
58	42,8062	49,2249	21,9571	27,7254	38,1417	84,2745	35,3895	21,2582
59	35,6719	44,4225	25,8319	28,9857	40,5256	58,6257	33,9149	23,9155
60	42,8062	44,4225	21,9571	28,9857	40,5256	60,4578	35,3895	22,5869

## Apêndice XIV – Codificação DPEs no *Flexsim*®

<b>CIA</b>	
Etapa 01	beta( 75.758649, 94.119425, 1.227477, 1.026441, getstream(current))
Etapa 02	gamma( 100.281823, 11.561272, 9.697737, getstream(current))
Etapa 03	beta( 23.009000, 43.104000, 5.266630, 1.337437, getstream(current))
Etapa 04	beta( 12.974369, 20.204090, 5.199339, 3.886368, getstream(current))
<b>CIA</b>	
Etapa 01	johnsonbounded( 93.437703, 116.405424, -0.164779, 0.642873, getstream(current))
Etapa 02	johnsonbounded( 164.858920, 416.102112, 0.358036, 1.198393, getstream(current))
Etapa 03	johnsonbounded( 35.135179, 63.545186, -1.581667, 1.010190, getstream(current))
Etapa 04	loglogistic( 13.571677, 6.551508, 8.992030, getstream(current))
<b>CIB</b>	
Etapa 01	johnsonbounded( 25.534040, 45.268018, 0.421736, 0.793919, getstream(current))
Etapa 02	johnsonbounded( 29.281163, 51.164562, 0.060073, 0.611976, getstream(current))
Etapa 03	beta( 16.249260, 23.207840, 1.850399, 2.099616, getstream(current))
Etapa 04	beta( 19.524150, 25.416322, 1.257930, 1.256647, getstream(current))
Etapa 05	beta( 31.396508, 36.215290, 1.320413, 1.121852, getstream(current))
Etapa 06	beta( 23.327599, 51.064690, 1.681014, 0.969169, getstream(current))
Etapa 07	beta( 17.932428, 27.664940, 2.288424, 1.607661, getstream(current))
Etapa 08	beta( 11.895110, 20.170445, 0.757803, 0.712605, getstream(current))
<b>CIIB</b>	
Etapa 01	johnsonbounded( 30.329348, 53.468441, 0.388237, 0.783540, getstream(current))
Etapa 02	beta( 35.716817, 60.423146, 0.829596, 0.854996, getstream(current))
Etapa 03	beta( 21.085133, 29.632210, 1.679202, 1.813852, getstream(current))
Etapa 04	beta( 24.712205, 31.969545, 1.160110, 1.183564, getstream(current))
Etapa 05	beta( 37.453048, 43.117449, 1.261400, 1.070328, getstream(current))
Etapa 06	johnsonbounded( 45.585825, 93.680460, -0.412146, 0.625375, getstream(current))
Etapa 07	johnsonbounded( 25.456251, 41.743049, -0.391393, 1.059211, getstream(current))
Etapa 08	beta( 15.812773, 26.739287, 0.734400, 0.680336, getstream(current))

---

<b>CIC</b>	
Etapa 01	pearson5( 5.209669, 332.327979, 2.213005, getstream(current))
Etapa 02	loglogistic( 13.737667, 151.193138, 2.144086, getstream(current))
Etapa 03	loglaplace( 0.000000, 140.000000, 3.151852, getstream(current))
<b>CIIC</b>	
Etapa 01	pearson5( 6.575438, 419.227323, 2.212775, getstream(current))
Etapa 02	loglogistic( 16.966500, 186.856556, 2.143904, getstream(current))
Etapa 03	loglaplace( 0.000000, 198.872498, 3.151857, getstream(current))

## Apêndice XV– Quantidade de placas produzidas: HRPB

Período (mês)	Quantidade real produzida de ER na empresa	Período (mês)	Quantidade real produzida de ER na empresa
1	10526	31	10549
2	10541	32	10596
3	10578	33	10571
4	10556	34	10554
5	10566	35	10598
6	10589	36	10599
7	10551	37	10558
8	10527	38	10558
9	10564	39	10575
10	10544	40	10545
11	10580	41	10564
12	10581	42	10604
13	10570	43	10539
14	10575	44	10553
15	10575	45	10574
16	10569	46	10546
17	10548	47	10537
18	10540	48	10520
19	10523	49	10558
20	10556	50	10530
21	10606	51	10582
22	10541	52	10553
23	10522	53	10548
24	10560	54	10565
25	10557	55	10573
26	10591	56	10602
27	10573	57	10525
28	10586	58	10525
29	10576	59	10539
30	10523	60	10572

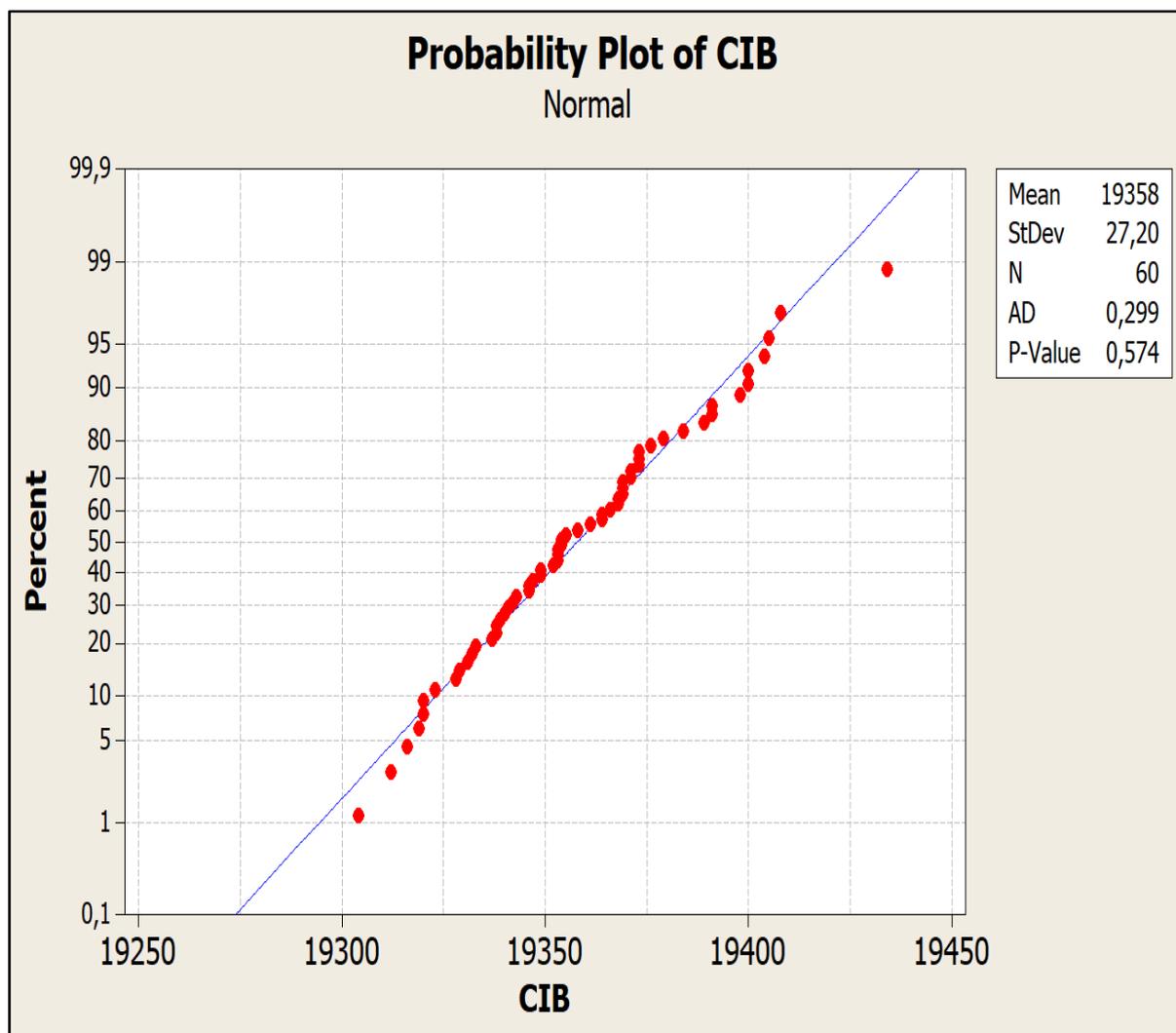
## Apêndice XVI – *Outputs* SED: RSPCIB e RSPCIIB

RSPCIB			
Réplicas	Quantidade real produzida de ER na empresa	Réplicas	Quantidade real produzida de ER na empresa
1	19376	31	19320
2	19329	32	19366
3	19331	33	19368
4	19369	34	19379
5	19371	35	19369
6	19312	36	19408
7	19349	37	19384
8	19434	38	19400
9	19404	39	19368
10	19320	40	19323
11	19358	41	19349
12	19389	42	19355
13	19354	43	19391
14	19373	44	19343
15	19398	45	19364
16	19405	46	19340
17	19353	47	19338
18	19361	48	19373
19	19352	49	19346
20	19400	50	19354
21	19353	51	19353
22	19347	52	19369
23	19328	53	19319
24	19371	54	19337
25	19333	55	19339
26	19373	56	19341
27	19304	57	19342
28	19346	58	19332
29	19364	59	19316
30	19338	60	19391

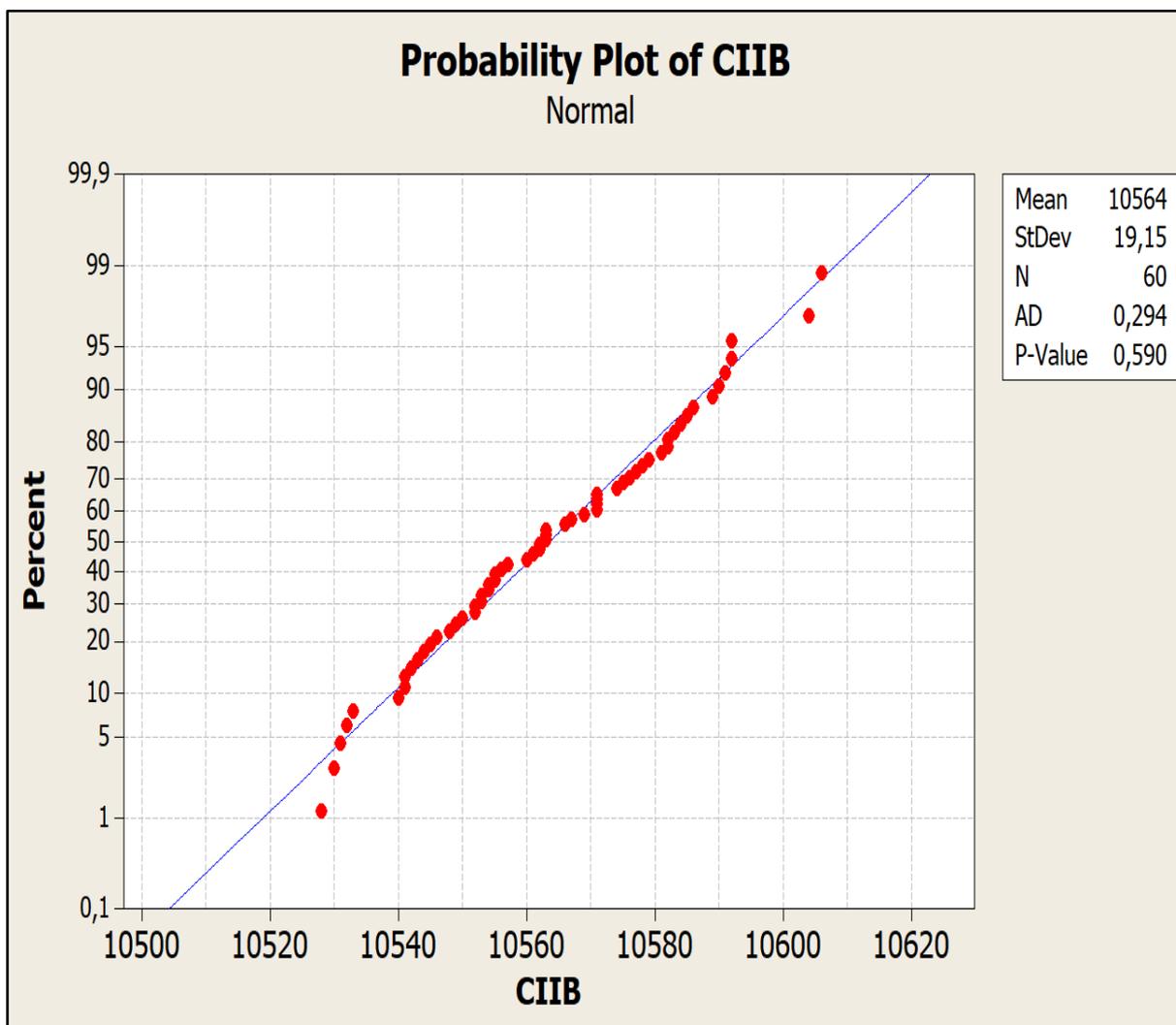
<b>RSPCIIB</b>			
<b>Réplicas</b>	<b>Quantidade real produzida de ER na empresa</b>	<b>Réplicas</b>	<b>Quantidade real produzida de ER na empresa</b>
1	10562	31	10541
2	10550	32	10579
3	10571	33	10531
4	10549	34	10528
5	10569	35	10590
6	10592	36	10574
7	10561	37	10575
8	10544	38	10581
9	10604	39	10553
10	10530	40	10552
11	10578	41	10577
12	10591	42	10554
13	10606	43	10541
14	10586	44	10571
15	10552	45	10540
16	10553	46	10563
17	10582	47	10563
18	10554	48	10583
19	10546	49	10555
20	10585	50	10589
21	10567	51	10563
22	10533	52	10545
23	10555	53	10582
24	10548	54	10543
25	10562	55	10557
26	10584	56	10576
27	10592	57	10560
28	10542	58	10566
29	10532	59	10556
30	10571	60	10571

## Apêndice XVII – Teste de normalidade: CIA e CIIA

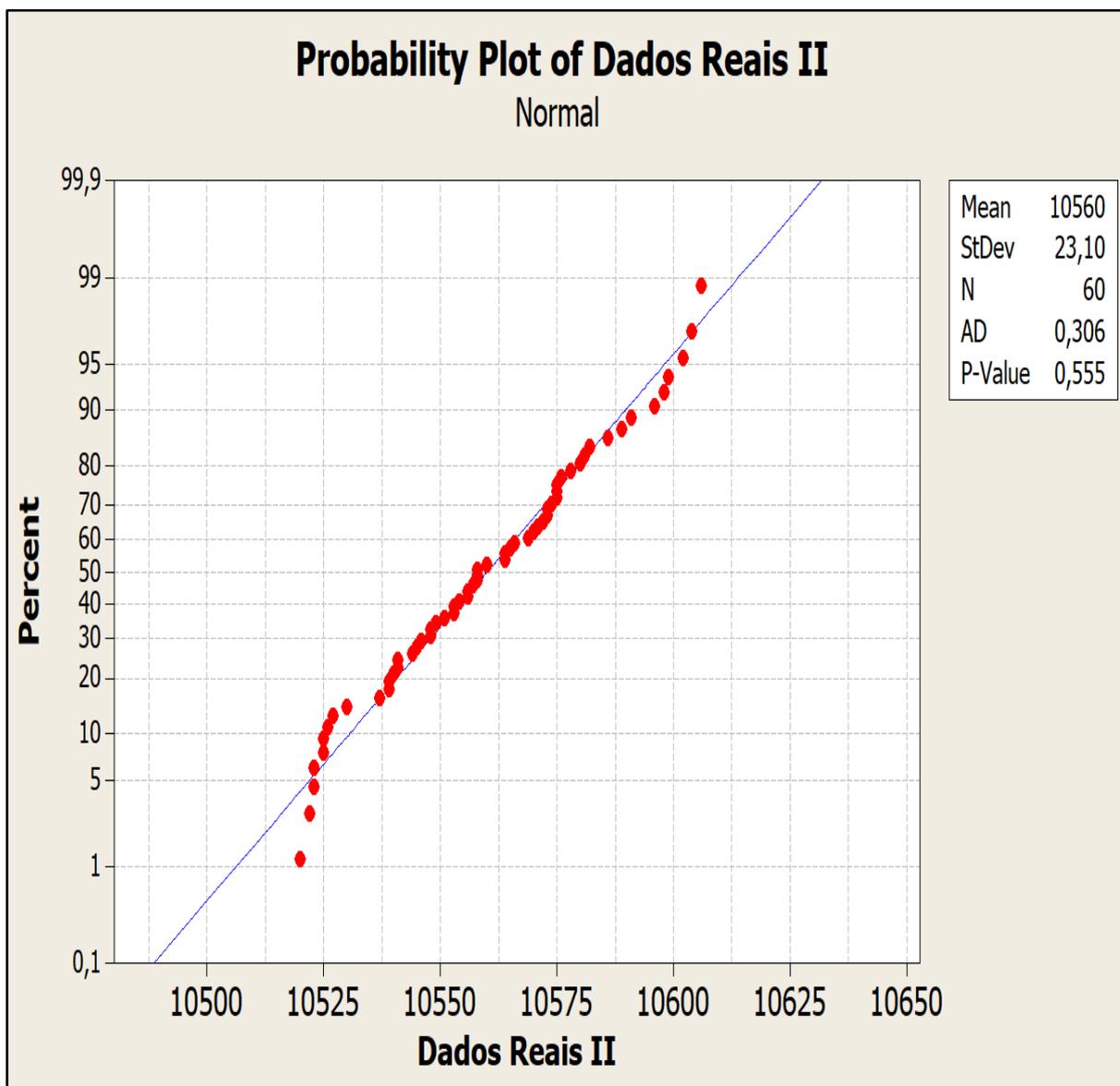
Teste de Normalidade para o CIB. Conforme resultados do software *Minitab*®, *P-Value* é igual a 0,574 que é maior que 0,05.



Teste de Normalidade para o CIB. Conforme resultados do software *Minitab*®, *P-Value* é igual a 0,590 que é maior que 0,05.



Teste de Normalidade para o HRPB. Conforme resultados do software *Minitab*®, *P-Value* é igual a 0,555 que é maior que 0,05.



## Apêndice XVIII – TST: segundo objeto de estudo

Comparação entre CIB e CIIB, assumindo variâncias diferentes e um nível de confiança de 95%: não há evidência estatística para rejeitar  $H_1$ .

### Two-Sample T-Test and CI: CIB; CIIB

Two-sample T for CIB vs CIIB

	N	Mean	StDev	SE Mean
CIB	60	19357,9	27,2	3,5
CIIB	60	10563,5	19,2	2,5

Difference = mu (CIB) - mu (CIIB)

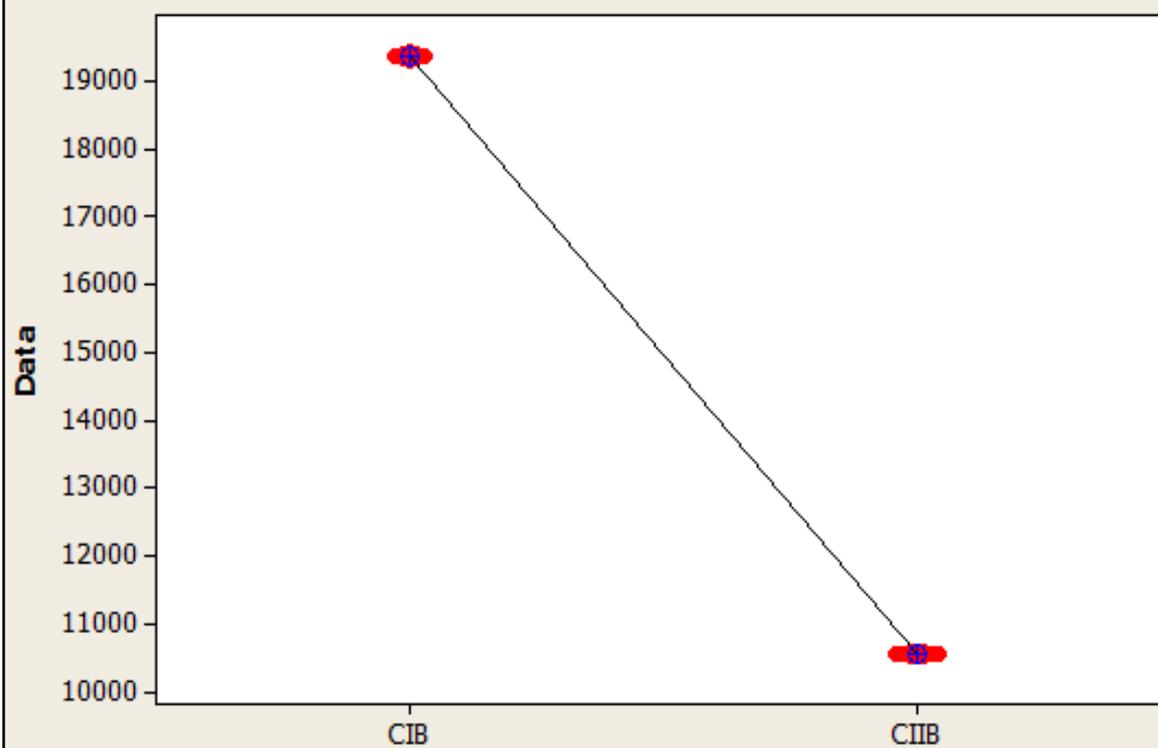
Estimate for difference: 8794,37

95% CI for difference: (8785,86; 8802,87)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 2047,68 P-Value = 0,000  
118

Both use Pooled StDev = 23,5235

### Individual Value Plot of CIB; CIIB



Comparação entre CIB e HRPB, assumindo variâncias diferentes e um nível de confiança de 95%: não há evidência estatística para rejeitar  $H_1$ .

### Two-Sample T-Test and CI: CIB; Dados Reais II

Two-sample T for CIB vs Dados Reais II

	N	Mean	StDev	SE Mean
CIB	60	19357,9	27,2	3,5
Dados Reais II	60	10560,1	23,1	3,0

Difference = mu (CIB) - mu (Dados Reais II)

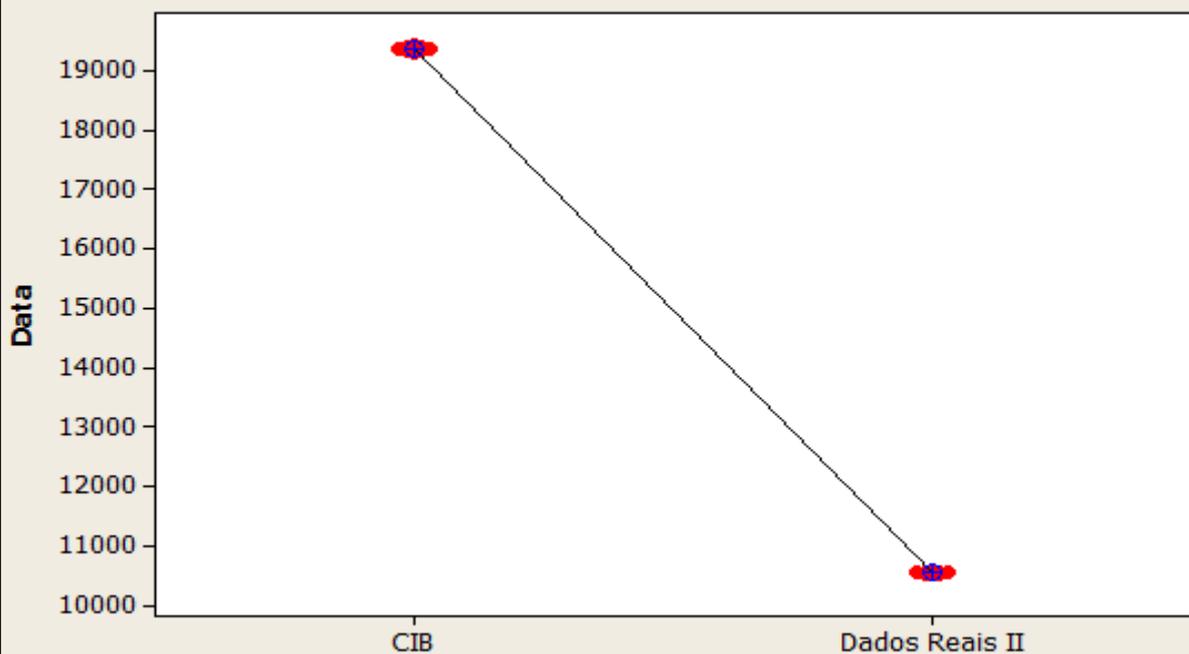
Estimate for difference: 8797,77

95% CI for difference: (8788,64; 8806,89)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 1909,83 P-Value = 0,000  
118

Both use Pooled StDev = 25,2312

### Individual Value Plot of CIB; Dados Reais II



Comparação entre CIIB e HRPB, assumindo variâncias diferentes e um nível de confiança de 95%: não há evidência estatística para rejeitar  $H_0$ .

### Two-Sample T-Test and CI: CIIB; Dados Reais II

Two-sample T for CIIB vs Dados Reais II

	N	Mean	StDev	SE Mean
CIIB	60	10563,5	19,2	2,5
Dados Reais II	60	10560,1	23,1	3,0

Difference = mu (CIIB) - mu (Dados Reais II)

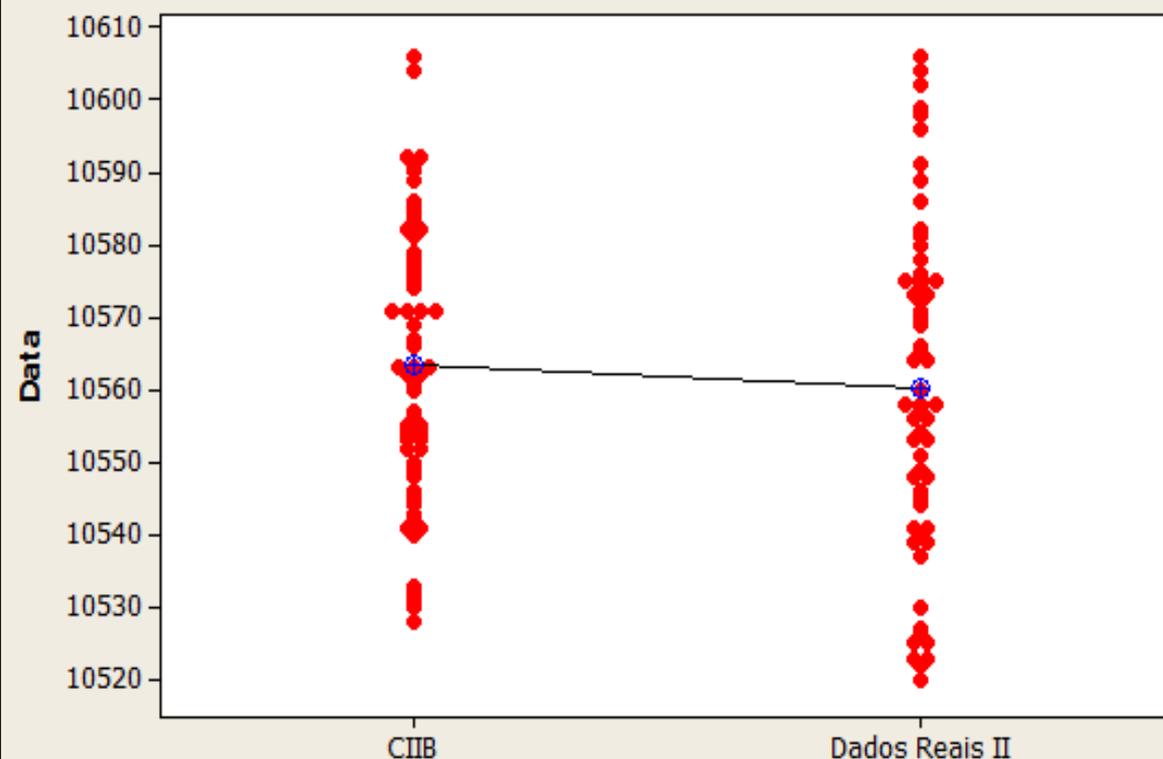
Estimate for difference: 3,40

95% CI for difference: (-4,27; 11,07)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0,88 P-Value = 0,382

Both use Pooled StDev = 21,2169

### Individual Value Plot of CIIB; Dados Reais II



## Apêndice XIX – Teste de *Turing*: segundo objeto de estudo

Validação do Modelo Computacional (Teste de <i>Turing</i> )					
RSPCIB vs HRPB					
n	QRA	Avaliação Líder	n	QRA	Avaliação Líder
1	19376	NOK	31	19320	NOK
2	19329	NOK	32	19366	NOK
3	19331	NOK	33	19368	NOK
4	19369	NOK	34	19379	NOK
5	19371	NOK	35	19369	NOK
6	19312	NOK	36	19408	NOK
7	19349	NOK	37	19384	NOK
8	19434	NOK	38	19400	NOK
9	19404	NOK	39	19368	NOK
10	19320	NOK	40	19323	NOK
11	19358	NOK	41	19349	NOK
12	19389	NOK	42	19355	NOK
13	19354	NOK	43	19391	NOK
14	19373	NOK	44	19343	NOK
15	19398	NOK	45	19364	NOK
16	19405	NOK	46	19340	NOK
17	19353	NOK	47	19338	NOK
18	19361	NOK	48	19373	NOK
19	19352	NOK	49	19346	NOK
20	19400	NOK	50	19354	NOK
21	19353	NOK	51	19353	NOK
22	19347	NOK	52	19369	NOK
23	19328	NOK	53	19319	NOK
24	19371	NOK	54	19337	NOK
25	19333	NOK	55	19339	NOK
26	19373	NOK	56	19341	NOK
27	19304	NOK	57	19342	NOK
28	19346	NOK	58	19332	NOK
29	19364	NOK	59	19316	NOK
30	19338	NOK	60	19391	NOK
n°NOK		60	Percentual da Validação		0,00%
n°OK		0			

<b>Validação do Modelo Computacional (Teste de Turing)</b>					
<b>RSPCIIB vs HRPB</b>					
<b>n</b>	<b>QRA</b>	<b>Avaliação Líder</b>	<b>n</b>	<b>QRA</b>	<b>Avaliação Líder</b>
1	10562	OK	31	10541	OK
2	10550	OK	32	10579	OK
3	10571	OK	33	10531	OK
4	10549	OK	34	10528	OK
5	10569	OK	35	10590	OK
6	10592	OK	36	10574	OK
7	10561	OK	37	10575	OK
8	10544	OK	38	10581	OK
9	10604	OK	39	10553	OK
10	10530	OK	40	10552	OK
11	10578	OK	41	10577	OK
12	10591	OK	42	10554	OK
13	10606	OK	43	10541	OK
14	10586	NOK	44	10571	OK
15	10552	OK	45	10540	OK
16	10553	OK	46	10563	OK
17	10582	OK	47	10563	OK
18	10554	OK	48	10583	OK
19	10546	OK	49	10555	NOK
20	10585	OK	50	10589	OK
21	10567	OK	51	10563	OK
22	10533	OK	52	10545	OK
23	10555	OK	53	10582	OK
24	10548	OK	54	10543	OK
25	10562	OK	55	10557	NOK
26	10584	OK	56	10576	OK
27	10592	OK	57	10560	OK
28	10542	OK	58	10566	OK
29	10532	OK	59	10556	OK
30	10571	OK	60	10571	OK
<b>n°NOK</b>		<b>3</b>	<b>Percentual da Validação</b>		<b>95,00%</b>
<b>n°OK</b>		<b>57</b>			

## Apêndice XX – Cronoanálise: terceiro objeto de estudo

<b>Amostra (n)</b>	<b>R.01</b>	<b>R.02</b>	<b>Enf</b>	<b>Amostra (n)</b>	<b>R.01</b>	<b>R.02</b>	<b>Enf</b>
<b>1</b>	300	139	160	<b>31</b>	868	95	161
<b>2</b>	240	131	147	<b>32</b>	165	530	140
<b>3</b>	180	492	173	<b>33</b>	100	620	82
<b>4</b>	120	134	148	<b>34</b>	391	79	158
<b>5</b>	120	262	115	<b>35</b>	262	48	48
<b>6</b>	120	201	178	<b>36</b>	212	452	159
<b>7</b>	120	75	197	<b>37</b>	53	160	138
<b>8</b>	120	95	140	<b>38</b>	168	140	75
<b>9</b>	120	80	132	<b>39</b>	680	182	73
<b>10</b>	180	197	517	<b>40</b>	215	208	72
<b>11</b>	540	49	121	<b>41</b>	224	154	77
<b>12</b>	240	172	123	<b>42</b>	151	151	113
<b>13</b>	540	776	202	<b>43</b>	99	156	109
<b>14</b>	240	20	156	<b>44</b>	307	84	193
<b>15</b>	120	118	94	<b>45</b>	105	200	295
<b>16</b>	180	108	126	<b>46</b>	456	107	105
<b>17</b>	420	94	127	<b>47</b>	547	96	119
<b>18</b>	480	130	130	<b>48</b>	190	78	213
<b>19</b>	120	261	146	<b>49</b>	117	483	174
<b>20</b>	120	48	74	<b>50</b>	1415	574	220
<b>21</b>	60	513	119	<b>51</b>	269	125	151
<b>22</b>	120	234	111	<b>52</b>	144	220	99
<b>23</b>	60	178	126	<b>53</b>	66	301	156
<b>24</b>	60	154	134	<b>54</b>	144	262	245
<b>25</b>	120	274	167	<b>55</b>	171	157	210
<b>26</b>	351	1080	210	<b>56</b>	117	165	84
<b>27</b>	153	250	76	<b>57</b>	442	192	207
<b>28</b>	316	100	129	<b>58</b>	998	398	195
<b>29</b>	127	78	38	<b>59</b>	534	122	174
<b>30</b>	126	420	237	<b>60</b>	171	160	159

## Apêndice XXI – Tempos após a aplicação da EMT no CIIC

<b>Amostra (n)</b>	<b>R.01</b>	<b>R.02</b>	<b>Enf</b>	<b>Amostra (n)</b>	<b>R.01</b>	<b>R.02</b>	<b>Enf</b>
<b>1</b>	378,0348	171,5568	227,1193	<b>31</b>	1095,5556	117,4453	228,8681
<b>2</b>	302,4278	161,6830	208,6659	<b>32</b>	208,2565	655,2213	199,0157
<b>3</b>	226,8209	607,2370	245,5728	<b>33</b>	126,2161	766,4853	116,5663
<b>4</b>	151,2139	165,3857	210,0854	<b>34</b>	493,5049	97,6651	224,6034
<b>5</b>	151,2139	323,3661	163,2420	<b>35</b>	330,6861	59,3408	68,2340
<b>6</b>	151,2139	248,0785	252,6703	<b>36</b>	267,5781	558,7925	226,0250
<b>7</b>	151,2139	92,5666	279,6407	<b>37</b>	66,8945	197,8026	196,1726
<b>8</b>	151,2139	117,2511	198,7294	<b>38</b>	212,0430	173,0773	106,6156
<b>9</b>	151,2139	98,7377	187,3735	<b>39</b>	858,2694	225,0005	103,7725
<b>10</b>	226,8209	243,1417	733,8794	<b>40</b>	271,3646	257,1434	102,3509
<b>11</b>	680,9024	60,5168	171,8575	<b>41</b>	282,8884	190,4980	109,5151
<b>12</b>	302,6233	212,4262	174,6982	<b>42</b>	190,6971	186,7870	160,7170
<b>13</b>	680,9024	958,3879	286,9027	<b>43</b>	125,0265	192,9720	155,0279
<b>14</b>	302,6233	24,7007	221,5684	<b>44</b>	387,7086	103,9080	274,4990
<b>15</b>	151,3116	145,7343	133,5092	<b>45</b>	132,6039	247,4000	419,5710
<b>16</b>	226,9675	133,3839	178,9591	<b>46</b>	575,8408	132,3498	149,3298
<b>17</b>	529,5907	116,0934	180,3794	<b>47</b>	690,7564	118,7438	169,2405
<b>18</b>	605,2465	160,5547	184,6403	<b>48</b>	239,9337	96,4793	302,9262
<b>19</b>	151,3116	322,3444	207,3653	<b>49</b>	147,7486	597,4297	247,4608
<b>20</b>	151,3116	59,2817	105,1030	<b>50</b>	1786,8743	709,9889	312,8815
<b>21</b>	75,6968	633,9240	169,0982	<b>51</b>	339,6271	154,5825	214,7121
<b>22</b>	151,3936	289,1583	157,7303	<b>52</b>	181,8078	272,0652	140,7715
<b>23</b>	75,6968	219,9580	179,0452	<b>53</b>	83,3286	372,2347	221,8218
<b>24</b>	75,6968	190,3008	190,4131	<b>54</b>	181,8078	324,0049	348,3739
<b>25</b>	151,3936	338,5871	237,3059	<b>55</b>	215,8968	194,1556	298,6062
<b>26</b>	442,8264	1334,5768	298,4086	<b>56</b>	147,6704	203,9805	119,4077
<b>27</b>	193,0269	308,9298	107,9955	<b>57</b>	557,8659	237,3592	294,2546
<b>28</b>	398,6699	123,5719	183,3082	<b>58</b>	1259,6157	492,0258	277,1964
<b>29</b>	160,2249	96,3861	53,9978	<b>59</b>	673,9828	150,8220	247,3445
<b>30</b>	158,9633	519,0021	336,7755	<b>60</b>	215,8259	197,7993	226,0217

## Apêndice XXII – Número de pacientes atendidos: HARC

Amostra (n)	HARC	Amostra (n)	HARC
1	3860	51	3882
2	3870	52	3841
3	3854	53	3953
4	3901	54	3908
5	3848	55	3872
6	3992	56	3872
7	3928	57	3857
8	3895	58	3850
9	3921	59	3868
10	3994	60	3905
11	3991	61	3886
12	3900	62	3854
13	3869	63	3919
14	3917	64	3906
15	3946	65	3847
16	3915	66	3899
17	3989	67	3905
18	3895	68	3825
19	3874	69	3863
20	3864	70	3951
21	3922	71	3938
22	3894	72	3891
23	3822	73	3927
24	3890	74	3885
25	3872	75	3916
26	3840	76	3863
27	3852	77	3902
28	3840	78	3861
29	3906	79	3897
30	3859	80	3925
31	3860	81	3879
32	3868	82	3828
33	3907	83	3832
34	3883	84	3848
35	3868	85	3846
36	3766	86	3762
37	3878	87	3866
38	3934	88	3840
39	3791	89	3837
40	3914	90	3840
41	3914	91	3839
42	3938	92	3878
43	3882	93	3924
44	3875	94	3921
45	3885	95	3911
46	3880	96	3877
47	3911	97	3933
48	3902	98	3883
49	3865	99	3870
50	3896	100	3933

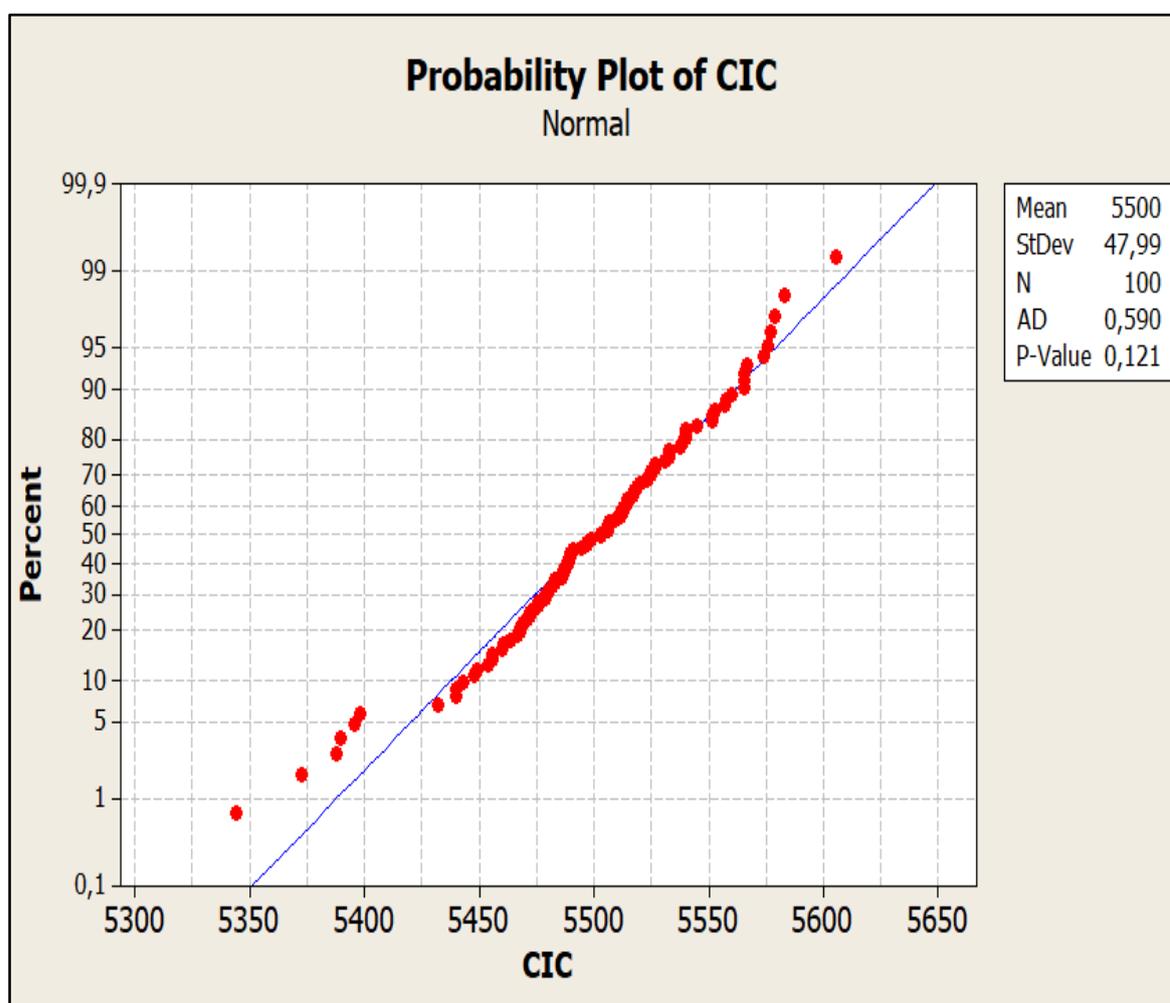
## Apêndice XXIII – *Outputs* SED: RSACIC e RSACIIC

RSPCIC			
Réplícas	QPA	Réplícas	QPA
1	5476	51	5512
2	5440	52	5456
3	5523	53	5440
4	5557	54	5558
5	5468	55	5472
6	5398	56	5515
7	5527	57	5525
8	5513	58	5490
9	5567	59	5503
10	5495	60	5507
11	5390	61	5488
12	5518	62	5472
13	5539	63	5579
14	5577	64	5538
15	5606	65	5461
16	5583	66	5503
17	5576	67	5540
18	5524	68	5432
19	5512	69	5443
20	5533	70	5566
21	5520	71	5533
22	5506	72	5476
23	5456	73	5560
24	5514	74	5509
25	5497	75	5519
26	5487	76	5482
27	5480	77	5527
28	5469	78	5481
29	5540	79	5488
30	5489	80	5553
31	5499	81	5506
32	5464	82	5487
33	5515	83	5460
34	5483	84	5448
35	5449	85	5467
36	5396	86	5373
37	5497	87	5489
38	5545	88	5468
39	5344	89	5479
40	5518	90	5479
41	5533	91	5474
42	5540	92	5513
43	5471	93	5566
44	5388	94	5566
45	5531	95	5491
46	5490	96	5483
47	5574	97	5517
48	5552	98	5525
49	5454	99	5486
50	5506	100	5552

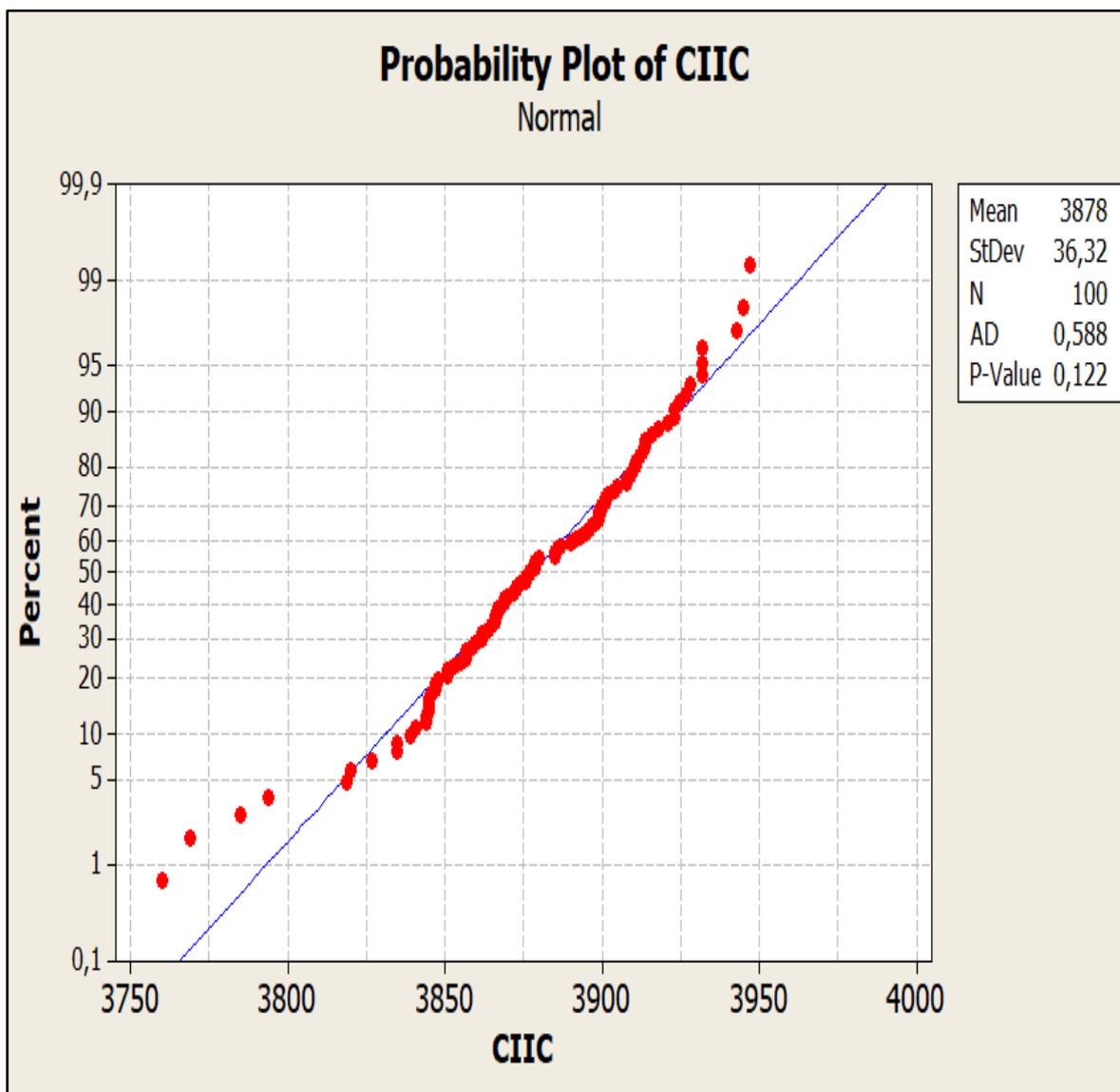
<b>RSPCIIC</b>			
<b>Réplicas</b>	<b>QPA</b>	<b>Réplicas</b>	<b>QPA</b>
1	3857	51	3876
2	3867	52	3835
3	3851	53	3947
4	3898	54	3902
5	3845	55	3866
6	3794	56	3866
7	3925	57	3851
8	3892	58	3844
9	3918	59	3862
10	3887	60	3899
11	3820	61	3880
12	3897	62	3848
13	3866	63	3913
14	3914	64	3900
15	3943	65	3841
16	3912	66	3893
17	3916	67	3899
18	3900	68	3819
19	3879	69	3857
20	3869	70	3945
21	3927	71	3932
22	3899	72	3885
23	3827	73	3921
24	3895	74	3879
25	3877	75	3910
26	3845	76	3870
27	3857	77	3909
28	3845	78	3868
29	3911	79	3904
30	3864	80	3932
31	3865	81	3886
32	3862	82	3835
33	3901	83	3839
34	3877	84	3855
35	3862	85	3853
36	3760	86	3769
37	3872	87	3873
38	3928	88	3847
39	3785	89	3844
40	3908	90	3847
41	3908	91	3846
42	3932	92	3885
43	3876	93	3914
44	3869	94	3911
45	3879	95	3901
46	3874	96	3867
47	3905	97	3923
48	3896	98	3873
49	3859	99	3860
50	3890	100	3923

## Apêndice XXIV – Teste de normalidade: CIC e CIIC

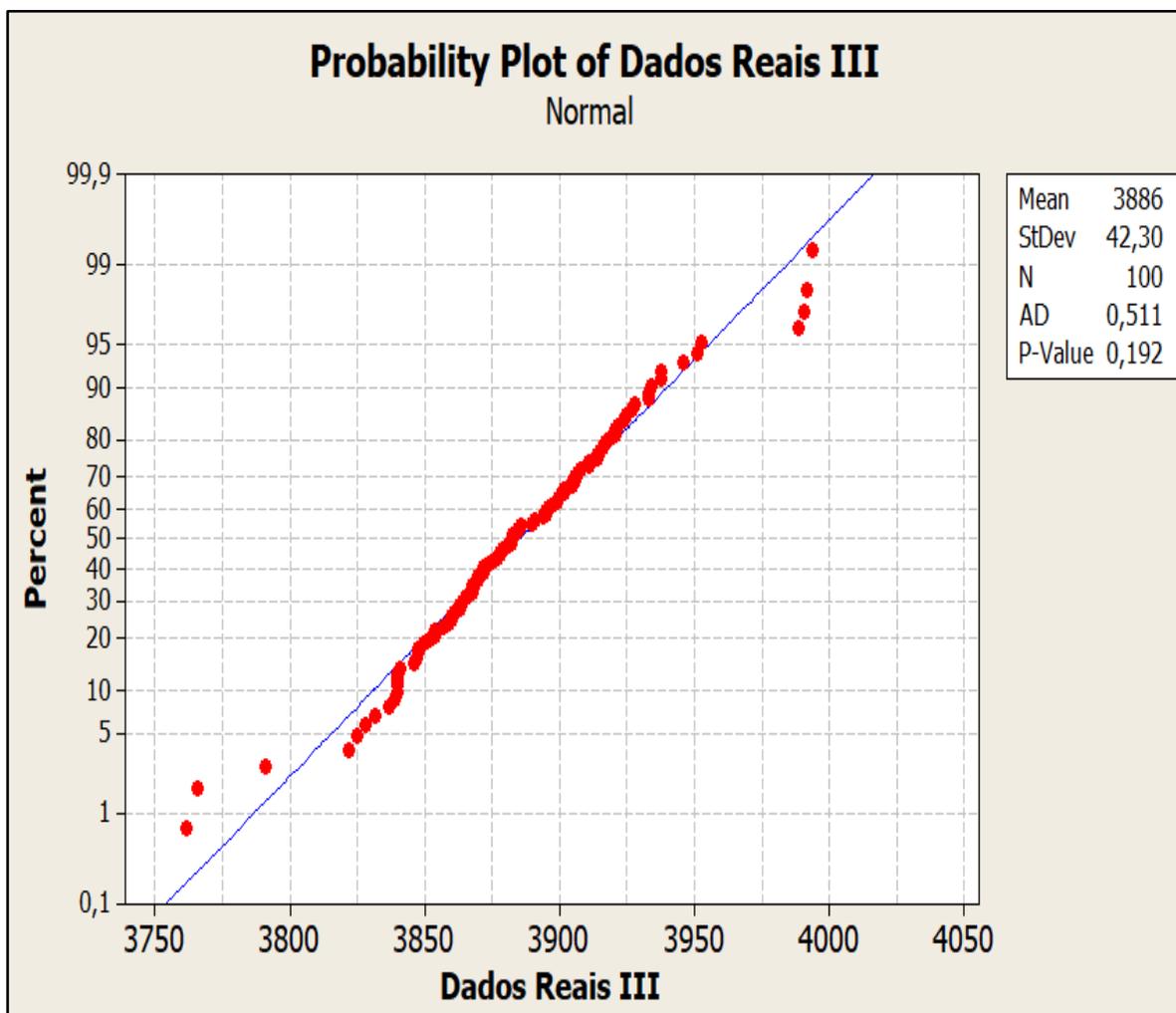
Teste de Normalidade para o Cenário I. Conforme resultados do software *Minitab*®, *P-Value* é igual a 0,121 que é maior que 0,05.



Teste de Normalidade para o Cenário I. Conforme resultados do software *Minitab*®, *P-Value* é igual a 0,122 que é maior que 0,05.



Teste de Normalidade para o Cenário I. Conforme resultados do software *Minitab*®, *P-Value* é igual a 0,192 que é maior que 0,05.



## Apêndice XXV – TST: terceiro objeto de estudo

Comparação entre CIC e CIIC, assumindo variâncias diferentes e um nível de confiança de 95%: não há evidência estatística para rejeitar  $H_1$ .

### Two-Sample T-Test and CI: CIC; CIIC

Two-sample T for CIC vs CIIC

	N	Mean	StDev	SE Mean
CIC	100	5499,9	48,0	4,8
CIIC	100	3878,1	36,3	3,6

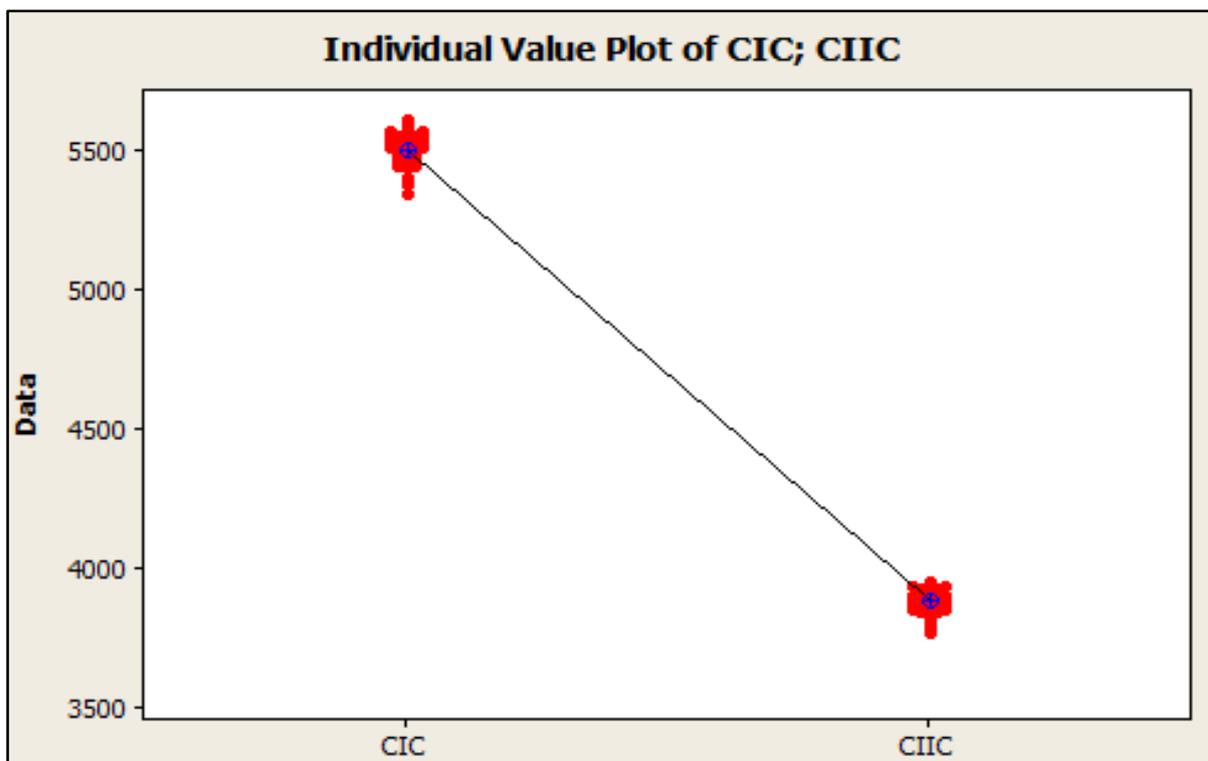
Difference = mu (CIC) - mu (CIIC)

Estimate for difference: 1621,77

95% CI for difference: (1609,90; 1633,64)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 269,49 P-Value = 0,000 DF = 198

Both use Pooled StDev = 42,5532



Comparação entre CIC e HRAC, assumindo variâncias diferentes e um nível de confiança de 95%: não há evidência estatística para rejeitar  $H_1$ .

### Two-Sample T-Test and CI: CIC; Dados Reais III

Two-sample T for CIC vs Dados Reais III

	N	Mean	StDev	SE Mean
CIC	100	5499,9	48,0	4,8
Dados Reais III	100	3885,5	42,3	4,2

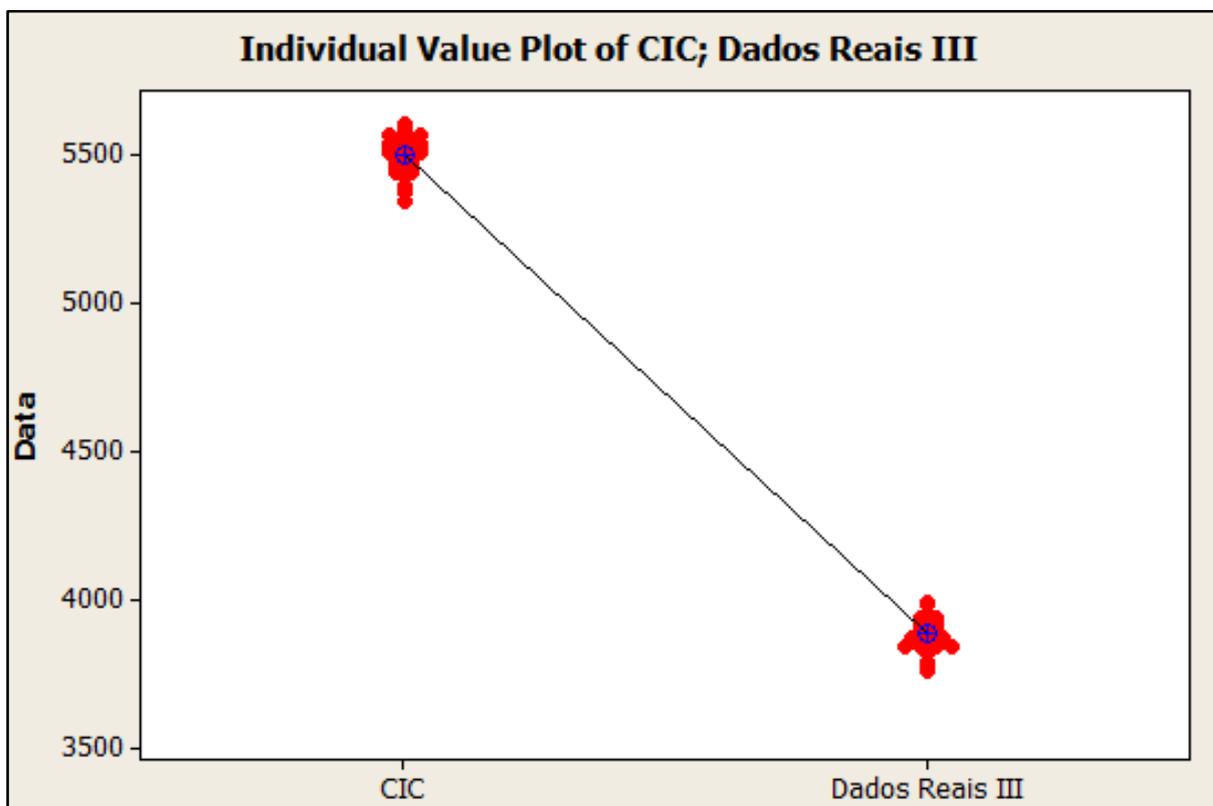
Difference = mu (CIC) - mu (Dados Reais III)

Estimate for difference: 1614,34

95% CI for difference: (1601,72; 1626,96)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 252,36 P-Value = 0,000 DF = 198

Both use Pooled StDev = 45,2342



Comparação entre CIIC e HRAC, assumindo variâncias diferentes e um nível de confiança de 95%: não há evidência estatística para rejeitar  $H_0$ .

### Two-Sample T-Test and CI: CIIC; Dados Reais III

Two-sample T for CIIC vs Dados Reais III

	N	Mean	StDev	SE Mean
CIIC	100	3878,1	36,3	3,6
Dados Reais III	100	3885,5	42,3	4,2

Difference = mu (CIIC) - mu (Dados Reais III)

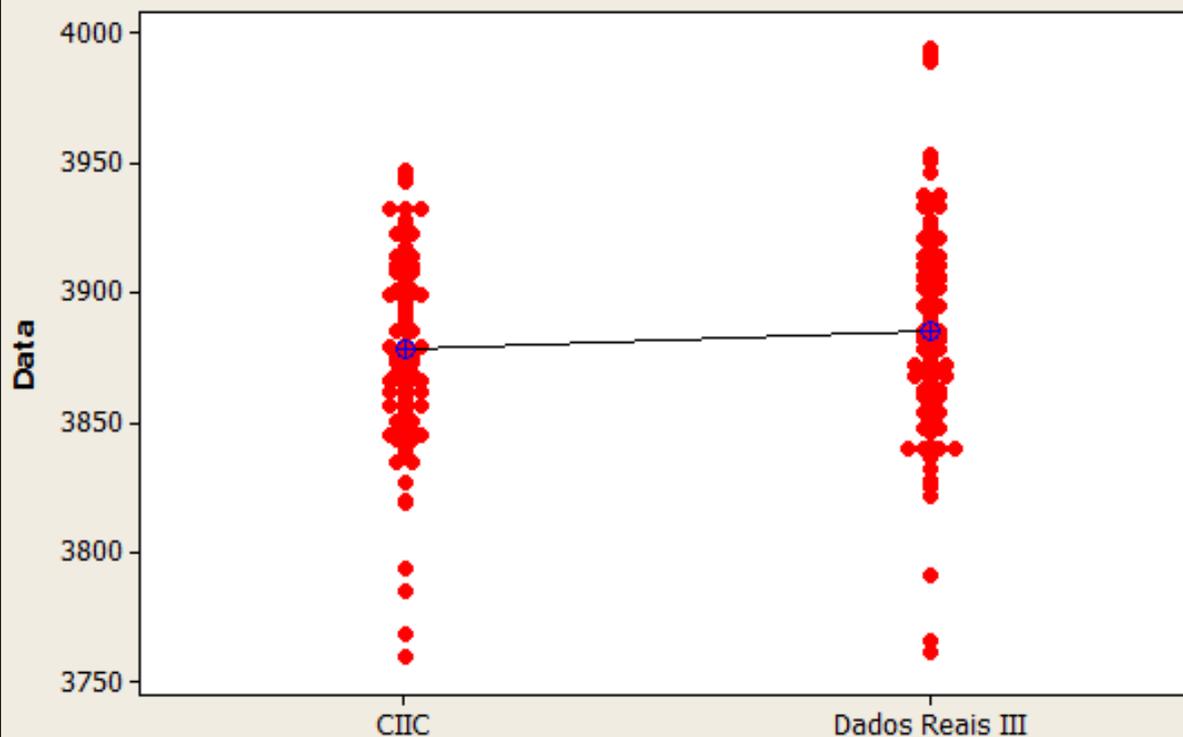
Estimate for difference: -7,43

95% CI for difference: (-18,42; 3,56)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -1,33 P-Value = 0,184 DF = 198

Both use Pooled StDev = 39,4232

### Individual Value Plot of CIIC; Dados Reais III



## Apêndice XXVI- Teste de *Turing*: terceiro objeto de estudo

Validação do Modelo Computacional (Teste de <i>Turing</i> )					
RSPCIC vs HARC					
n	QPA	Avaliação Líder	n	QPA	Avaliação Líder
1	5476	NOK	51	5512	NOK
2	5440	NOK	52	5456	NOK
3	5523	NOK	53	5440	NOK
4	5557	NOK	54	5558	NOK
5	5468	NOK	55	5472	NOK
6	5398	NOK	56	5515	NOK
7	5527	NOK	57	5525	NOK
8	5513	NOK	58	5490	NOK
9	5567	NOK	59	5503	NOK
10	5495	NOK	60	5507	NOK
11	5390	NOK	61	5488	NOK
12	5518	NOK	62	5472	NOK
13	5539	NOK	63	5579	NOK
14	5577	NOK	64	5538	NOK
15	5606	NOK	65	5461	NOK
16	5583	NOK	66	5503	NOK
17	5576	NOK	67	5540	NOK
18	5524	NOK	68	5432	NOK
19	5512	NOK	69	5443	NOK
20	5533	NOK	70	5566	NOK
21	5520	NOK	71	5533	NOK
22	5506	NOK	72	5476	NOK
23	5456	NOK	73	5560	NOK
24	5514	NOK	74	5509	NOK
25	5497	NOK	75	5519	NOK
26	5487	NOK	76	5482	NOK
27	5480	NOK	77	5527	NOK
28	5469	NOK	78	5481	NOK
29	5540	NOK	79	5488	NOK
30	5489	NOK	80	5553	NOK
31	5499	NOK	81	5506	NOK
32	5464	NOK	82	5487	NOK
33	5515	NOK	83	5460	NOK
34	5483	NOK	84	5448	NOK
35	5449	NOK	85	5467	NOK
36	5396	NOK	86	5373	NOK
37	5497	NOK	87	5489	NOK
38	5545	NOK	88	5468	NOK

<b>39</b>	5344	NOK	<b>89</b>	5479	NOK
<b>40</b>	5518	NOK	<b>90</b>	5479	NOK
<b>41</b>	5533	NOK	<b>91</b>	5474	NOK
<b>42</b>	5540	NOK	<b>92</b>	5513	NOK
<b>43</b>	5471	NOK	<b>93</b>	5566	NOK
<b>44</b>	5388	NOK	<b>94</b>	5566	NOK
<b>45</b>	5531	NOK	<b>95</b>	5491	NOK
<b>46</b>	5490	NOK	<b>96</b>	5483	NOK
<b>47</b>	5574	NOK	<b>97</b>	5517	NOK
<b>48</b>	5552	NOK	<b>98</b>	5525	NOK
<b>49</b>	5454	NOK	<b>99</b>	5486	NOK
<b>50</b>	5506	NOK	<b>100</b>	5552	NOK
<b>n°NOK</b>		<b>100</b>	<b>Percentual da Validação</b>		<b>0,00%</b>
<b>n°OK</b>		<b>0</b>			

<b>Validação do Modelo Computacional (Teste de Turing)</b>					
<b>RSPCIIC vs HARC</b>					
<b>n</b>	<b>QPA</b>	<b>Avaliação Líder</b>	<b>n</b>	<b>QPA</b>	<b>Avaliação Líder</b>
<b>1</b>	3857	OK	<b>51</b>	3876	OK
<b>2</b>	3867	OK	<b>52</b>	3835	OK
<b>3</b>	3851	OK	<b>53</b>	3947	OK
<b>4</b>	3898	OK	<b>54</b>	3902	OK
<b>5</b>	3845	OK	<b>55</b>	3866	OK
<b>6</b>	3794	OK	<b>56</b>	3866	OK
<b>7</b>	3925	OK	<b>57</b>	3851	OK
<b>8</b>	3892	OK	<b>58</b>	3844	OK
<b>9</b>	3918	OK	<b>59</b>	3862	OK
<b>10</b>	3887	OK	<b>60</b>	3899	OK
<b>11</b>	3820	OK	<b>61</b>	3880	OK
<b>12</b>	3897	OK	<b>62</b>	3848	OK
<b>13</b>	3866	OK	<b>63</b>	3913	OK
<b>14</b>	3914	OK	<b>64</b>	3900	OK
<b>15</b>	3943	OK	<b>65</b>	3841	OK
<b>16</b>	3912	OK	<b>66</b>	3893	OK
<b>17</b>	3916	OK	<b>67</b>	3899	OK
<b>18</b>	3900	OK	<b>68</b>	3819	OK
<b>19</b>	3879	OK	<b>69</b>	3857	OK

20	3869	OK	70	3945	OK
21	3927	OK	71	3932	OK
22	3899	OK	72	3885	OK
23	3827	OK	73	3921	OK
24	3895	OK	74	3879	OK
25	3877	OK	75	3910	OK
26	3845	OK	76	3870	OK
27	3857	OK	77	3909	OK
28	3845	OK	78	3868	OK
29	3911	OK	79	3904	OK
30	3864	OK	80	3932	OK
31	3865	OK	81	3886	OK
32	3862	OK	82	3835	OK
33	3901	OK	83	3839	OK
34	3877	OK	84	3855	OK
35	3862	OK	85	3853	OK
36	3760	OK	86	3769	OK
37	3872	OK	87	3873	OK
38	3928	OK	88	3847	OK
39	3785	OK	89	3844	OK
40	3908	OK	90	3847	OK
41	3908	OK	91	3846	OK
42	3932	OK	92	3885	OK
43	3876	OK	93	3914	OK
44	3869	OK	94	3911	OK
45	3879	OK	95	3901	OK
46	3874	OK	96	3867	OK
47	3905	OK	97	3923	OK
48	3896	OK	98	3873	OK
49	3859	OK	99	3860	OK
50	3890	OK	100	3923	OK
<b>n°NOK</b>		<b>0</b>	<b>Percentual da Validação</b>		<b>100,00%</b>
<b>n°OK</b>		<b>100</b>			

## Apêndice XXVII – Resultados da tese

Neste apêndice serão apresentados os resultados alcançados e contribuições para o programa de pós-graduação da Universidade Federal de Itajubá:

### 1- Software produzido e registrado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI):

**1.1. VILELA, F. F.; MONTEVECHI, J. A. B. ; SEGISMONDI, L. C. ; BARREIROS, W. T. ; LIMA, D. J. B. .** Software de Gestão e Controle da Engenharia Clínica (ENGC). 2019. Patente: Programa de Computador. Número do registro: BR512019001193-7, data de registro: 17/05/2019, título: "Software de Gestão e Controle da Engenharia Clínica (ENGC)", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

### 2- Artigos completos publicados em periódicos:

**2.1. VILELA, F. F.; LEAL, F. ; MONTEVECHI, J. A. B. ; PIEDADE, D. D. C. .** Effect of human factor performance on the productivity of a manual assembly line. *International Journal of Simulation Modelling JCR*, v. 19, p. 365-374, 2020.

**2.2. TEODORO, G.; CAMPOS, A. T.; MAGACHO, A. L.; SEGISMONDI, L.C.; VILELA, F. F.; QUEIROZ, J. A.; MONTEVECHI, J. A. B.** Lean thinking by integrating with discrete event simulation and design of experiments: an emergency department expansion. *PEERJ COMPUTER SCIENCE JCR*, v. 6, p. e284, 2020.

**2.3. SOUSA JUNIOR, W. T. DE ; MONTEVECHI, J. A. B. ; MIRANDA, R. DE C. ; ROCHA, F. ; VILELA, F. F. .** Economic Lot-Size Using Machine Learning, Parallelism, Metaheuristic and Simulation. *International Journal of Simulation Modelling JCR*, v. 18, p. 205-216, 2019.

**2.4. VILELA, F. F.; PIEDADE, D. D. C.; MONTEVECHI, J. A. B.; LEAL, F.** Balanceamento de operações e simulação a eventos discretos: redução da ociosidade dos operadores em uma linha de montagem. *REVISTA PRODUÇÃO ONLINE*, v. 20, p. 472-492, 2020.

**2.5. VILELA, F. F.; SEGISMONDI, L. C. ; PIEDADE, L. D. C. ; MONTEVECHI, J. A. B. ; PIEDADE, D. D. C. .** Application of value stream mapping: a case study in a hospital laundry. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, p. 4440-4449, 2020.

**2.6. VILELA, F. F.; AMARAL, J. V. S. ; LEAL, G. S. ; OLIVEIRA, G. F. ; MONTEVECHI, J. A. B. ; PIEDADE, D. D. C. .** Economic feasibility analysis for co-generation of power by diesel generator at peak time: Monte Carlo simulation approach in a hospital. *ACTA SCIENTIARUM. TECHNOLOGY (ONLINE) JCR*, v. 43, p. e50965, 2021.

**2.7. VILELA, F. F.; LEAL, F.; MONTEVECHI, J. A. B.** Modelagem do ritmo do trabalho humano em um projeto de simulação através de múltiplas distribuições de probabilidade estatística. *REVISTA PRODUÇÃO ONLINE*, 2022.

### **3- Capítulo de livro publicado:**

**3.1. VILELA, F. F.; SEGISMONDI, L. C. ; PIEDADE, D. D. C. ; MONTEVECHI, J. A. B. .** Utilização da simulação a eventos discretos no setor da lavanderia de um hospital regional. *Gestão da Produção em Foco*. 1ed.BH: Editora Poisson, 2020, v. 39, p. 101-106.

### **4- Trabalhos completos publicados em anais de congressos:**

**4.1. LOPES, F. J.; SOUZA, A. A.; VILELA, F. F.; PIEDADE, D. D. C.; MONTEVECHI, J. A. B.** Dimensionamento financeiro do desperdício da mão-de-obra usando simulação a eventos discretos. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2020, Foz do Iguaçu - PR. Dimensionamento financeiro do desperdício da mão-de-obra usando simulação a eventos discretos, 2020.

**4.2. PEREIRA, J. C.; PEREIRA JUNIOR, J. T.; VILELA, F. F.; PIEDADE, D. D. C.; LEAL, F.** Projeção de uma linha de montagem de retrovisores aplicando simulação a eventos discretos. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2020, Foz do Iguaçu - PR. Projeção de uma linha de montagem de retrovisores aplicando simulação a eventos discretos, 2020.

**4.3. VILELA, F. F.; FARIA, L. M. ; LIMA, E. M. ; PIEDADE, D. D. C. ; MONTEVECHI, J. A. B. .** Planejamento frente à flutuação do *takt-time*: uma aplicação da simulação a eventos discretos em uma linha de montagem de fornos a gás. In: LII Simpósio

Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2020, João Pessoa - PB. Planejamento frente à flutuação do *takt-time*: uma aplicação da simulação a eventos discretos em uma linha de montagem de fornos a gás, 2020.

**4.4.** TEODORO, G.; MAGACHO, A. L.; SEGISMONDI, L. C.; **VILELA, F. F.**; CAMPOS, A. T.; QUEIROZ, J. A. Aplicação da simulação a eventos discretos integrados com conceitos enxutos para a expansão de um departamento de emergência canadense. In: LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2019, Limeira - SP. Aplicação da simulação a eventos discretos integrados com conceitos enxutos para a expansão de um departamento de emergência canadense, 2019.

**4.5.** AMARAL, J. V. S.; MONTEVECHI, J. A. B.; **VILELA, F. F.**; NOGUEIRA, T. L.; GOMES, K. H. P. Mapeamento do fluxo de valor: desenvolvimento do estado futuro em uma indústria de capas para bancos automotivos. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2019, Santos - SP. Mapeamento do fluxo de valor: desenvolvimento do estado futuro em uma indústria de capas para bancos automotivos, 2019.

**4.6.** SEGISMONDI, L. C.; **VILELA, F. F.**; MONTEVECHI, J. A. B.; ROCHA, S. N.; ALVES, L. C. Aplicação da metodologia SMED para redução de setup em uma máquina de corte de chapas metálicas. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2019, Santos - SP. Aplicação da metodologia SMED para redução de setup em uma máquina de corte de chapas metálicas, 2019.

**4.7.** SEGISMONDI, L. C.; **VILELA, F. F.**; LEAL, F.; SOUSA JUNIOR, W. T. Aplicação da metodologia *lean* para redução de custos e desperdícios de uma lavanderia hospitalar. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2019, Santos - SP. Aplicação da metodologia *lean* para redução de custos e desperdícios de uma lavanderia hospitalar, 2019.

**4.8.** SOUSA JUNIOR, W. T.; MIRANDA, R. C.; MONTEVECHI, J. A. B.; OLIVEIRA, M. L. M.; **VILELA, F. F.** Teste e seleção de computadores para otimização via simulação utilizando paralelismo e aprendizagem de máquina. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2019, Santos - SP. Teste e seleção de computadores para otimização via simulação utilizando paralelismo e aprendizagem de máquina, 2019.

**4.9.** SEGISMONDI, L. C.; **VILELA, F. F.**; GABRIEL, G. T.; QUEIROZ, J. A.; MAGACHO, A. L. Aplicação de ferramentas *lean healthcare* e simulação computacional para melhoria de atendimento no hospital canadense Cape Breton. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2019, Santos - SP. Aplicação de ferramentas *lean healthcare* e simulação computacional para melhoria de atendimento no hospital canadense Cape Breton, 2019.

**4. 10.** ROSARIO, L. V.; NASCIMENTO, C. T.; **VILELA, F. F.**; SEGISMONDI, L. C.; MONTEVECHI, J. A. B. Aplicação da simulação à eventos discretos para melhoria de uma linha de produção de motores em uma fábrica de máquinas pesadas. In: XXVI Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP), 2019, Bauru-SP. Aplicação da simulação à eventos discretos para melhoria de uma linha de produção de motores em uma fábrica de máquinas pesadas, 2019.

**4.11.** **VILELA, F. F.**; SEGISMONDI, L. C. ; PIEDADE, D. D. C. ; MONTEVECHI, J. A. B. . Utilização da simulação a eventos discretos no setor da lavanderia de um hospital regional. In: XXVI Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP), 2019, Bauru-SP. Utilização da simulação a eventos discretos no setor da lavanderia de um hospital regional, 2019.

**4.12.** **VILELA, F. F.**; SEGISMONDI, L. C. ; PIEDADE, L. D. C. ; MONTEVECHI, J. A. B. . Aplicação do mapeamento da cadeia de valor: um estudo de caso em uma lavanderia hospitalar. In: XXVI Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP), 2019, Bauru-SP. Aplicação do mapeamento da cadeia de valor: um estudo de caso em uma lavanderia hospitalar, 2019.

**4.13.** SILVA, M. G.; MESQUITA, Y. F.; **VILELA, F. F.**; SEGISMONDI, L. C.; MONTEVECHI, J. A. B. Mapeamento do fluxo de atendimento do pronto socorro de um hospital regional. In: XXVI Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP), 2019, Bauru-SP. Mapeamento do fluxo de atendimento do pronto socorro de um hospital regional, 2019.

**4.14.** BRAGA, C. C.; CRUZ, J. R. B.; **VILELA, F. F.**; MONTEVECHI, J. A. B. Simulação a eventos discretos e *lean production*: quantificação dos desperdícios em uma indústria farmacêutica. In: XXVIII Simpósio de Engenharia de Produção, 2021, Online. XXVIII Simpósio de Engenharia de Produção, 2021.

**4.15.** REIS, D. A; FRANCO, W. D. L.; **VILELA, F. F**; MONTEVECHI, J. A. B. *Lean thinking* e simulação a eventos discretos: análise de uma linha de montagem de fornos elétricos. In: ENEGEP 2021 Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2021, *Online*, 2021.

## **5- Resumos publicados em anais de congressos:**

**5.1.** SEGISMONDI, L. C.; **VILELA, F. F.**; MONTEVECHI, J. A. B.; VENANCIO, R. V.; LEMES, N. M. Aplicação de múltiplas técnicas de validação computacional em uma empresa automobilística. In: LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2019, Limeira - SP. Aplicação de múltiplas técnicas de validação computacional em uma empresa automobilística, 2019.

## **6- Artigos aceitos para publicação:**

**6.1.** Discrete event simulation and lean production: quantification of waste in a pharmaceutical industry (**JOURNAL OF LEAN SYSTEMS**).

## **7- Artigos completos enviados para periódicos e em processo de revisão:**

**7.1.** Quantitative integration of human factor in a stochastic simulation model: a new approach using a mathematical equation (**INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH**).