

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ISAAC PERGHER

MODELOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA GESTÃO DA PRODUÇÃO

RECIFE
2018

ISAAC PERGHER

MODELOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA GESTÃO DA PRODUÇÃO

Tese de Doutorado apresentada à UFPE
para a obtenção de grau de Doutor como
parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção

Área de Concentração: Gerência da
Produção.

Orientador: Prof. Adiel Teixeira de
Almeida, PhD.

RECIFE
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO DE

ISAAC PERGHER

“Modelos de Decisão Multicritério para Gestão da Produção”

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GERÊNCIA DE PRODUÇÃO

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato **ISAAC PERGHER, APROVADO.**

Recife, 05 de Fevereiro de 2018

Prof. ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA, PhD (UFPE)

Prof. SÉRGIO EDUARDO GOUVEA DA COSTA, Doutor (PUC-PR/UTFPR)

Prof. ANDRÉ MARQUES CAVALCANTI, Doutor (UFPE)

Prof. ANA PAULA CABRAL SEIXAS COSTA, Doutor (UFPE)

Prof. CRISTIANO ALEXANDRE VIRGÍNIO CAVALCANTE, Doutor (UFPE)

AGRADECIMENTOS

Ao Criador, pela oportunidade de concluir mais essa etapa.

A minha família pelo apoio.

Ao PPGEF-UFPE por aceitar minha candidatura ao programa de doutorado.

Serei sempre grato ao meu orientador, Prof. PhD Adiel Teixeira de Almeida, com quem tive inúmeras oportunidades de aprendizado.

A todos os professores do PPGEF, em especial ao Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida Filho, pelos conhecimentos construídos.

Aos meus colegas de estudo, Sinndy Dayana Rico Lugo, Tulio Fidel e Darlan Marques por me acompanharem ao longo desta jornada.

Aos colegas, Amanda Fenerich, Mirian Bortoluzzi, Lucas Frederico Ribeiro, Iranildo Sales, Fagner Mello, Camila Famá, Henrique Santos, Armando Muchanga, Waldemir Cordeiro, Jansen Campos, Ciro Figueiredo, Aline Leal, Deyvison Souza, Natalia Veloso, Natalia Mores e Rachel Palha por me oferecerem sua valiosa amizade.

Ao amigo Roberto Nietiedt (in Memoriam).

Aos avaliadores, pelas significativas contribuições para o aprimoramento deste estudo.

RESUMO

A estratégia de produção descreve o padrão das ações que buscam gerar valor para os clientes e acionistas, tendo em vista a sustentabilidade da empresa no longo prazo. Durante o desenvolvimento da estratégia de produção, um dos aspectos a ser considerado diz respeito à estruturação do sistema produtivo que apoiará os objetivos estratégicos. Contudo, cada sistema exige a determinação de diferentes regras ou parâmetros operacionais táticos, que podem proporcionar um desempenho adequado para um conjunto específico de objetivos e ao mesmo tempo, gerar resultados insatisfatórios em outros objetivos. Assumindo que a estratégia de produção objetiva maximizar o desempenho do sistema produtivo sob uma perspectiva multidimensional, este trabalho apresenta três modelos multicritério de apoio à decisão para sistemas produtivos *job-shop* e *conwip*. O primeiro modelo de decisão é baseado no método FITradeoff, o qual permite a avaliação de diferentes combinações de regras de controle utilizadas na atribuição da data de entrega, seleção e priorização de ordens em sistemas *job-shop* gerenciados pelo *workload control*. O segundo modelo utiliza a Teoria da Utilidade Multiatributo para subsidiar a determinação de parâmetros operacionais em sistemas *conwip* à luz das potenciais consequências de superestimar e as consequências de subestimar os níveis de estoque em processo e de produtos prontos. O terceiro modelo proposto integra a Teoria da Utilidade Multiatributo com o *Rank Dependent Utility* para apoiar a escolha de regras de prioridade em sistemas *job-shop*. Fundamentado nesta proposta, esta tese pode ser caracterizada quanto aos procedimentos técnicos pelo uso da simulação computacional e relativo à natureza dos dados, destaca-se uma abordagem essencialmente de pesquisa quantitativa. Para demonstrar a utilidade prática desses modelos, dados realísticos de empresas do segmento metal-mecânico e calçadista foram utilizados. Os resultados obtidos sugerem vantagens para o planejamento e controle da produção em termos de avaliação dos trade-offs entre múltiplos atributos de desempenho, que na maioria das vezes são conflitantes.

Palavras-chave: MAUT. RDU. FITradeoff. WLC. *Conwip*. Regras de prioridade.

ABSTRACT

The production strategy describes the pattern of actions that seek to create value for customers and shareholders, with focus on longterm sustainable. During the development of the strategy of production, one of the aspects to be considered concerns the structure of the production system that will support the strategic objectives. However, each system requires the determination of different rules or tactical operational parameters, which can provide adequate performance for a specific set of objectives and at the same time, lead to unsatisfactory results in other objectives. Assuming the production strategy aims to maximize the performance of the production system over a multidimensional perspective, this work presents three multicriteria models to support decisions in job-shop and conwip production systems. The first decision model is based on the FITradeoff method, which allows the evaluation of different combinations of control rules used for due date assignment, selection and prioritization of orders on job-shop systems managed by workload control. The second model uses the Multiatributo Utility Theory to aim the determination of operating parameters in conwip systems by considering the potential consequences of overestimate and underestimate the consequences of finished goods and in-process inventory levels. The third model proposed integrates the Multiatributo Utility Theory with the Rank Dependent Utility to support the choice of rules of priority in job-shop systems. Based on this proposal, this thesis can be characterized as technical procedures by the use of computer simulation and on the nature of the data is essentially quantitative research approach. To demonstrate the practical usefulness of these models, realistic data of companies in the metal-mechanic and footwear segment were used. The results suggest advantages for production planning and control in terms of evaluating the trade-offs between multiple performance attributes, which most often are conflicting.

Keywords: MAUT. RDU. FITradeoff. WLC. *Conwip*, Dispatching rules.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Estrutura típica do WLC.	17
Figura 2.2 – Abordagem conwip.	18
Figura 2.3 – Loterias para validação da independência aditiva.....	21
Figura 3.1 – Etapas do modelo WLC.	34
Figura 3.2 – Diagrama do sistema de produção.	36
Figura 3.3 – Input matriz de consequências.	41
Figura 3.4 – Ordenação dos atributos.....	42
Figura 3.5 – Resultados Parciais.	43
Figura 3.6 – Perguntas apresentadas ao decisor.	43
Figura 3.7 – Desempenho de a2 e a4.....	44
Figura 4.1 – Etapas do modelo de decisão MAUT.....	48
Figura 4.2 – Diagrama do sistema conwip/MTS.....	51
Figura 4.3 – Intensidade das Preferências.	61
Figura 5.1 – Estrutura do modelo MRDU.....	63
Figura 5.2 – Diagrama do sistema de produção.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Síntese das pesquisas.	28
Tabela 3.1 – Resumos dos tempos de processamento e tamanho dos lotes de produção.....	37
Tabela 3.2 – Características das estações de trabalho simuladas.	38
Tabela 3.3 – Regras WLC avaliadas.	38
Tabela 3.4 – Matriz de consequências.....	40
Tabela 4.1 – Parâmetros estatísticos das estações de trabalho.	52
Tabela 4.2 – Configuração das alternativas.....	54
Tabela 4.3 – Resultados do modelo de decisão MAUT	57
Tabela 5.1 – Resumos dos tempos de processamento e tamanho dos lotes de produção.....	67
Tabela 5.2 – Características das estações de trabalho simuladas.	68
Tabela 5.3 – Regras de prioridade avaliadas.	69
Tabela 5.4 – Resultados do modelo MRDU.....	71

LISTA DE SIGLAS

A – Conjunto de alternativas

$Conwip$ – *Constant work-in-process*

CT – Leadtime de produção

DSS – Sistema de apoio a decisão

HC – Custo de manutenção de estoques

LPP – Problema de Programação Linear

MTO – Produzir sob encomenda (*Make-to-order*)

MTS – Produzir para estoque (*Make-to-stock*)

MAUT – Teoria da Utilidade Multiatributo

NTJ – Número de pedidos em atraso

P_q – Quantidade total produzida

Q – Conjunto de prospectos

RDU – *Rank Dependent Utility*

SC – Custo da falta de estoques

T atraso dos pedidos

TOC – Teoria das Restrições

T_c – Custo total associado à implantação de a_i

TT_t lead time total

TH – Taxa de produção efetiva do sistema

WLC – *Workload Control*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	RELEVÂNCIA E CONTRIBUIÇÃO DO ESTUDO	13
1.2	OBJETIVOS.....	14
1.2.1	Objetivos Gerais	14
1.2.2	Objetivos Específicos.....	14
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1.1	Abordagens para o controle do fluxo de trabalho.....	16
2.1.2	Suporte à decisão	18
2.1.2.1	<i>Simulação Computacional por Eventos Discretos</i>	<i>18</i>
2.1.2.2	<i>Teoria do Valor Multiatributo (MAVT).....</i>	<i>19</i>
2.1.2.3	<i>Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT).....</i>	<i>21</i>
2.1.2.4	<i>Rank Dependent Utility (RDU)</i>	<i>22</i>
2.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE DECISÃO MULTICRITÉRIO EM SISTEMAS <i>JOB-SHOP</i> E <i>CONWIP/MTS</i>	23
2.3	SÍNTESE DO ESTADO DA ARTE E POSICIONAMENTO DESTE TRABALHO	30
3	MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA SELECIONAR AS REGRAS DE CONTROLE EM SISTEMAS WLC BASEADO NO MÉTODO FITRADEOFF	33
3.1	MODELO FITRADEOFF DE DECISÃO MULTICRITÉRIO.....	33
3.2	APLICAÇÃO DO MODELO FITRADEOFF.....	35
3.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	45
4	APOIO MULTICRITÉRIO PARA DETERMINAR OS PARÂMETROS OPERACIONAIS PARA SISTEMAS <i>CONWIP/MTS</i>.....	47
4.1	MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO SOB RISCO.....	47
4.2	APLICAÇÃO DO MODELO MAUT	51
4.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO.....	58

5	MODELO MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE REGRA DE PRIORIDADE EM AMBIENTES JOB-SHOP	62
5.1	MODELO MRDU PROPOSTO	62
5.2	APLICAÇÃO DO MODELO MRDU	65
5.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	72
6	CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS	74
6.1	CONCLUSÕES.....	74
6.1.1	Modelo FITradeoff aplicado problema de seleção de regras WLC.....	74
6.1.2	Modelo MAUT para identificação dos parâmetros operacionais conwip/MTS.	74
6.1.3	Modelo MRDU para seleção de regra de prioridade em sistemas job-shop	75
6.2	LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	76
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

Uma das formas de aumentar a participação no mercado consumidor e garantir a sustentabilidade da empresa no longo prazo é por meio do desenvolvimento da estratégia de produção. Na hierarquia do planejamento estratégico, a estratégia de produção vincula as decisões de longo e curto prazo e desenvolve as competências que a organização necessita para ser competitiva (Krajewski et al., 2009). Para Slack et al. (2009), a estratégia de produção refere-se às ações que caracterizam a missão, pretensões competitivas e as atividades da produção da organização; também envolve decisões que se relacionam ao projeto de um processo produtivo e a infra-estrutura necessária para sua gestão (Chase et al., 2006).

Durante o desenvolvimento da estratégia de produção, é necessário estruturar o sistema produtivo em consonância aos objetivos estratégicos que se pretende alcançar. Neste contexto, pode ser importante definir entre outros aspectos, o tipo de processo (Gaither e Frazier, 2002), o arranjo físico dos recursos (Groover, 2001), abordagem para a gestão do fluxo de materiais (Hopp e Spearman, 2013) e a política de atendimento da demanda (Corrêa et al., 2001).

Ao focalizar os sistemas produtivos orientados a produzir para estoque (MTS), com fluxo de materiais controlados pelo *conwip* (*constant work in process*), Hopp e Spearman (2013) relatam que o desempenho deste sistema é dependente dos níveis de estoque em processo e de produtos finalizados. Esta condição é demonstrada pela Lei de Little (Little, 1961) da seguinte maneira: ao considerar um sistema com estoque em processo igual à zero, o aumento gradativo deste estoque proporciona um melhor desempenho para a taxa de produção, que é limitada pela capacidade do recurso gargalo (Goldratt e Cox, 1984, 1993). No entanto, quando a taxa de produção for igual à capacidade do(s) recurso(s) restritivo(s), o incremento no nível de estoque em processo provocará o aumento no lead time. Além disso, o volume de estoque de produtos prontos gerenciado sob a política MTS afeta diretamente os custos de estocagem e de vendas perdidas. Uma vez que a disponibilidade dos produtos requisitados pelos clientes também depende da taxa de produção e do lead time, o alinhamento da gestão desses estoques aos planos de demanda e capacidade podem minimizar os custos associados aos estoques, contribuindo assim com a lucratividade à curto prazo.

Para sistemas *job-shop* que operam sob a estratégia *make-to-order* (MTO), a gestão do fluxo dos materiais pode ser obtida pelo uso de regras de prioridade (Pinedo 2009) ou através do *workload control* – WLC (Hendry e Kingsman, 1989). Em relação ao uso de regras de

prioridade (ou sequenciamento), a literatura é rica em regras que, em muitos casos, maximizam o desempenho do sistema para um único objetivo (atributo ou critério). No caso do WLC, essa abordagem requer a especificação das regras de controle e parâmetros inerentes para os três níveis de controle (entrada, liberação e priorização dos trabalhos). Assim, dependendo da combinação das regras WLC utilizadas, o sistema produtivo pode apresentar um desempenho satisfatório em um objetivo e, ao mesmo tempo, um desempenho baixo para outro objetivo. Neste contexto, o baixo desempenho para um determinado conjunto de objetivos pode afetar negativamente a imagem da empresa, bem como impactar vendas futuras.

Sob esta perspectiva, o uso de ferramentas que subsidiem o processo decisório, como a Simulação Computacional e Métodos de Apoio à Decisão Multicritério (MCDM/A), podem contribuir com definição dos níveis de estoque em processo e inventário de produtos prontos em sistemas *conwip*/MTS, escolha de regras WLC e regras de prioridade para sistemas *job-shop*/MTO, visando proporcionar ganhos significativos, em termos de obtenção de vantagem competitiva.

1.1 RELEVÂNCIA E CONTRIBUIÇÃO DO ESTUDO

Os modelos de decisão apresentados neste trabalho tem por finalidade apoiar decisões no âmbito do planejamento e controle da produção, com foco na avaliação dos trade-offs entre múltiplos atributos de desempenho. Para evitar experimentações práticas no sistema produtivo real, os modelos propostos utilizam a técnica de simulação por eventos discretos (Law e Ketlon, 2000). A partir dos resultados simulados, emprega-se um método de decisão multicritério específico para lidar com as características intrínsecas a cada problema abordado neste trabalho. O objetivo principal é subsidiar a avaliação dos benefícios e perdas de cada um dos cenários simulados à luz das preferências do decisor para cada conjunto de critérios inerentes ao problema de decisão.

No que diz respeito ao desempenho econômico de algumas indústrias brasileiras que operam sob as estratégias MTO e MTS, são ressaltados os seguintes exemplos: (i) a indústria automobilística brasileira, que em 2016 empregou 1,3 milhões de pessoas (direta e indiretamente) em 67 plantas industriais que produziam automóveis, comerciais leves, caminhões, ônibus, máquinas agrícolas e rodoviárias. A geração de tributos diretos (IPI, PIS/Cofins, ICMS, IPVA) em 2015 desta indústria foi igual a R\$ 39,7 bilhões (Relatório Anual ANFAVEA, 2017); (ii) segundo a ABINEE, associação que representa os segmentos

de automação industrial, componentes elétricos-eletrônicos, equipamentos industriais, equipamentos de segurança eletrônica, informática, geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, o investimento em ativos fixos deste setor em 2016 somaram R\$ 2,38 milhões. No mesmo período, o faturamento foi de R\$ 129,4 bilhões e o número de pessoas empregadas foi igual a 232,8 mil; (iii) conforme a MOVERGS, as vendas no comércio varejista de móveis aumentaram 16,3% em volume de peças e a produção de móveis apresentou um crescimento de 11,0% no mês de maio de 2017. O emprego da indústria moveleira teve alta de 7,9% e produtividade média do setor aumentou 0,7% para este período; e (iv) no ano de 2016, o parque calçadista brasileiro foi constituído por aproximadamente 7,7 mil empresas que geraram diretamente mais 300 mil empregos. Um total de 944 milhões de pares de calçados foram produzidos, dos quais 126 milhões foram exportados, conforme relatório anual da ABICALÇADOS.

Concernente aos resultados que podem ser obtidos com a aplicação dos modelos propostos no contexto industrial, é possível destacar: (i) para o problema de decisão *conwip*/MTS, o modelo proposto objetiva auxiliar na determinação dos parâmetros importantes para o planejamento e controle do sistema, tais como o lead time de produção e o nível de utilização de capacidade produtiva, levando em consideração os riscos associados ao nível dos estoques (em processo e de produtos finalizados); (ii) para o problema de seleção de regras WLC em sistemas *job-shop*, o modelo de decisão permite simular o desempenho de diferentes combinações de regras envolvendo os três níveis de controle do WLC e avaliar compensações entre múltiplos critérios simultaneamente, de modo a obter uma solução que represente as preferências do decisor; e (iii) para o problema de seleção de regras de prioridade, a solução recomendada pelo modelo de decisão traduz os julgamentos de trade-off e o perfil de risco do decisor, em relação ao desempenho estocástico que as regras avaliadas provocam em cada atributo de decisão.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

Proposição de modelos multicritério para apoiar decisões táticas em sistemas produtivos *job-shop* e *conwip*.

1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho se limita aos seguintes objetivos:

- Estruturar um modelo de decisão multicritério sob certeza para seleção de regras de controle em sistemas WLC;
- Propor um modelo de decisão multicritério sob risco para definição dos parâmetros operacionais em sistemas *conwip*/MTS;
- Desenvolver um modelo multicritério de utilidade não-esperada para seleção de regras de prioridade em sistemas *job-shop*;
- Realizar a aplicação numérica dos modelos propostos, utilizando dados realísticos de empresas do segmento metal-mecânico e calçadista.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturada em seis capítulos a seguir:

O Capítulo I, a Introdução, apresenta a justificativa e os objetivos que se pretende atingir.

O Capítulo II trata da fundamentação teórica sobre a qual foi desenvolvida esta tese. Inclui uma visão geral sobre WLC, regras de prioridade (ou sequenciamento) e *conwip*. Também é apresentada uma revisão bibliográfica concernente à área ‘apoio à decisão’, destacando os seguintes temas: simulação por eventos discretos, MAVT, MAUT e RDU. O capítulo encerra com uma revisão da literatura sobre apoio multicritério em sistemas *job-shop* e *conwip*/MTS.

O Capítulo III apresenta um modelo de decisão baseado no método FITradeoff para o problema de seleção de regras de controle em sistemas *job-shop* orientados pelo WLC. Uma aplicação numérica foi desenvolvida usando dados realísticos de uma empresa produtora de calçados femininos.

No Capítulo IV é proposto um modelo que utiliza a MAUT para determinar os parâmetros operacionais em sistemas *conwip*/MTS. Também será ilustrada uma aplicação deste modelo no contexto metal mecânico.

O Capítulo V apresenta um modelo que integra MAUT e RDU para apoio a escolha de regras de prioridade em sistemas produtivos *job-shop*. Ainda, desenvolveu-se uma aplicação numérica deste modelo (MRDU), considerando dados realísticos de uma empresa fabricante de acessórios para móveis.

No Capítulo VI são descritas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os principais conceitos teóricos que sustentam essa pesquisa são abordados neste capítulo. Inicialmente são apresentados os conceitos sobre regras de prioridade, WLC e *conwip*. Posteriormente, é delineada uma revisão sobre as técnicas de apoio à decisão utilizadas neste trabalho.

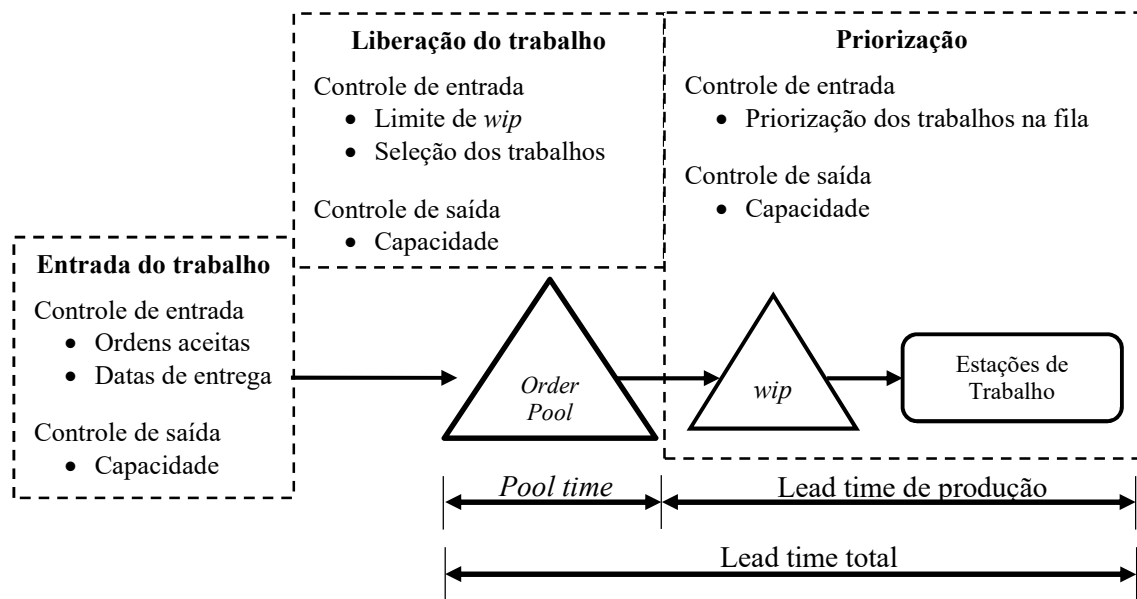
2.1.1 Abordagens para o controle do fluxo de trabalho

Sistemas *job-shop* podem ser distinguidos pelo uso da estratégia *make-to-order* (MTO) e por serem flexíveis quanto à diferentes roteiros de produção (Slack et al., 2009; Antunes et al., 2008). Neste tipo de ambiente produtivo, a gestão do progresso dos trabalhos (ou ordens de produção) pode ser realizada com o apoio de regras de prioridades (Pinedo, 2016). Assim, os trabalhos que estão aguardando na fila serão selecionados de acordo com um índice de prioridade, o qual é calculado com base na heurística utilizada. Diversas regras têm sido propostas na literatura para lidar com objetivos de desempenho distintos (Blackstone et al., 1982; El Bouri e Amin, 2015). No entanto, cabe salientar que não há uma regra de prioridade que maximize o desempenho de sistemas *job-shop* para todos os objetivos avaliados.

A gestão do fluxo de trabalho em sistemas *job-shop* também pode ser feita por meio do workload control (Zäpfel e Missbauer, 1993; Kingsman e Hendry, 2002; Land e Gaalman, 2009). WLC integra as funções de marketing e planejamento da produção em uma estrutura de decisão com três níveis hierárquicos (Baker, 1984; Breithaupt et al., 2002). A Figura 2.1 apresenta a hierarquia de decisão do WLC.

Conforme Fredendall, Ojha e Patterson (2010), o primeiro nível de decisão desta hierarquia tem por finalidade: aceitar ou rejeitar as ordens dos clientes; e definir as datas de entrega. As decisões no segundo nível referem-se à: quando liberar as ordens aceitas que estão no *order pool* aguardando o início de produção; quantas ordens devem ser liberadas; e de quais serão os tipos. A nomenclatura ‘*time pool*’ usada pela literatura deste tema refere-se ao tempo que uma ordem (que foi aceita no primeiro nível) permanece aguardando a autorização para entrar em produção. O terceiro nível da estrutura diz respeito à priorização das ordens que estão aguardando na fila das estações de trabalho. Note que o controle de saída dos três níveis da hierarquia apresentada na Figura 2.1 diz respeito ao ajuste da capacidade produtiva.

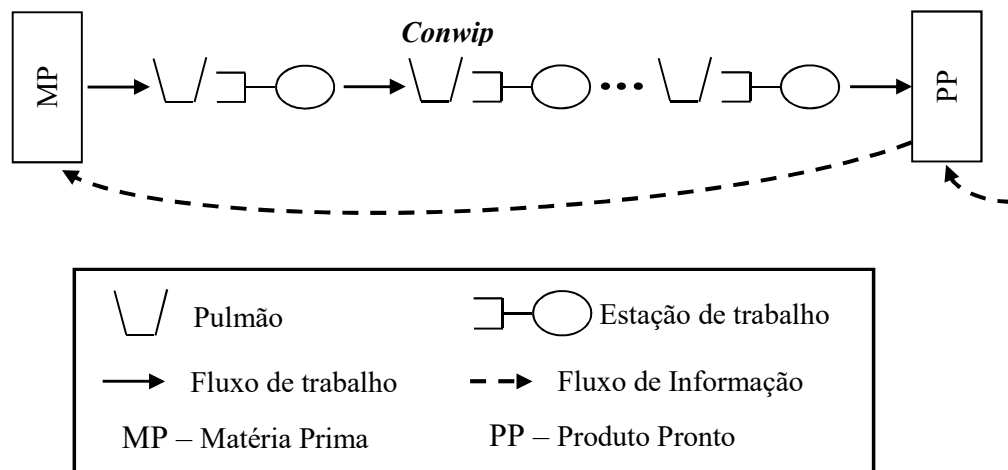
Figura 2.1 – Estrutura típica do WLC.



Fonte: Adaptado de Fredendall, Ojha e Patterson (2010).

O princípio do WLC é controlar a carga de trabalho (volume de *wip*) nas estações de trabalho. Assim, quando o tamanho da fila é baixo, o lead time de produção (*CT*) pode ser controlado (Haskose et al., 2004). Essa relação é mais bem explicada pela Lei de Little (Little, 1961). No entanto, para apoiar as decisões em cada um dos níveis da hierárquica WLC, é necessário apontar as regras de controle WLC e parâmetros inerentes. Neste contexto, é necessário determinar pelo menos, uma regra para atribuição da data de entrega, uma para a seleção e liberação dos trabalhos que estão aguardando no *order pool* e uma regra de priorização para os trabalhos no chão de fábrica. Contudo, diversos estudos tem demonstrado que diferentes combinações de regras WLC fornecem bons resultados para diferentes objetivos de desempenho (Ragatz e Mabert, 1988; Ahmed e Fisher, 1992; Sabuncuoglu e Karapinar, 1999; Moreira e Alves, 2009; Lu et al., 2011; Thüerer et al., 2014^a; Thüerer et al., 2014^b; Thüerer et al., 2015^a; Fernandes et al., 2015; e Fernandes et al., 2016).

Para sistemas produtivos intermitentes que operam sob a estratégia *make-to-stock* (MTS), uma das possibilidades para controlar o fluxo dos trabalhos é o *conwip*. Segundo Hopp e Spearman (2013), o *conwip* mantém o volume de *wip* constante por meio da sincronização entre as entradas e as saídas dos trabalhos no ambiente produtivo. Uma representação sucinta do funcionamento do sistema *conwip*/MTS de único tipo de produto é ilustrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Abordagem *conwip*.

Fonte: Adaptado de Hopp e Spearman (2013).

Na Figura 2.2, quando um item é retirado do estoque de produtos prontos, essa informação é transmitida por meio de um cartão de produção, o qual autorizará a entrada de um novo trabalho sistema. Este trabalho será “empurrado” ao longo do roteiro de produção até chegar ao estoque de produtos prontos, onde aguardará a requisição da demanda. Para sistemas *conwip*/MTS com diferentes tipos de produtos, é necessário adotar métodos para sequenciar a liberação dos trabalhos, a qual ocorrerá toda vez que o nível de *wip* no sistema for menor que o *wip* admitido.

No que diz respeito à determinação do nível de *wip* admitido no sistema, Hopp e Spearman (2013) sugerem o uso da Lei de Little (Little, 1961), a qual descreve o comportamento da taxa de produção efetiva do sistema (*TH*) e do *CT*, em função do *wip*. Entretanto, o desempenho de sistemas *conwip*/MTS é afetado também pelo nível dos estoques de produtos prontos, principalmente no que diz respeito ao custo de manutenção dos estoques e o custo da falta de estoque.

2.1.2 Suporte à decisão

2.1.2.1 Simulação Computacional por Eventos Discretos

Na simulação por eventos discretos, os eventos que alteram o estado do sistema ocorrem em pontos de tempo aleatórios (Hillier e Lieberman, 2013). Este tipo de simulação tem sido utilizada no âmbito da Gestão da Produção para projeto e avaliação de novos sistemas, bem como, para analisar cenários que propõem alterações nos procedimentos operacionais existentes.

Pidd (2009) relata que o cerne da modelagem por eventos discretos está em capturar as características mais importantes do sistema em termos de estados e entidades. Assim, o desenvolvimento de um modelo de simulação por eventos discretos consiste em formular através de alguma linguagem computacional, as regras lógicas que controlarão como e quando as entidades do sistema devem mudar de estado.

Entretanto, o sucesso de um projeto de simulação por eventos discretos pode ser alcançado pelo uso de um método que gerencie todas as atividades relacionadas ao experimento. É importante que este método articule de forma sistemática todas as etapas, desde a modelagem conceitual do problema até a avaliação dos resultados obtidos. Neste sentido, alguns exemplos de métodos de condução de projetos de simulação encontrados na literatura são: Law (2015); Law e Kelton (2000); Cassel (1996); Pritsker, Sigal e Hammesfahr (1989); e Gogg e Mott (1992).

Neste trabalho, o experimento de simulação do modelo MAUT utiliza a abordagem proposta por Law e Kelton (2000), enquanto que os modelos FITradeoff e MRDU utilizam o método de Law (2015). Esses métodos apresentam uma estrutura que se adapta ao escopo do problema tratado por cada modelo e ainda, possibilita uma conexão com a metodologia proposta por de Almeida et al. (2015), a qual foi utilizada para assessorar o desenvolvimento dos modelos de decisão multicritério.

2.1.2.2 Teoria do Valor Multiatributo (MAVT)

Os métodos de decisão baseados na MAVT agregam em uma função de valor global as preferências do decisor, elicitadas sobre as consequências (ou desempenho) que cada alternativa apresenta em diferentes critérios (Belton e Stewart, 2002). Na forma mais tradicional, a função global pode ser calculada por meio do modelo aditivo dado pela Equação 2.1 (de Almeida et al., 2015). Em um contexto de decisão sob certeza, deve-se selecionar a alternativa a_i que tenha o máximo valor para $V(a_i)$.

$$V(a_i) = \sum_{j=1}^m \lambda_j v_j(x_{ij}) \quad (2.1)$$

Onde: $v_j(x_{ij})$ representa o valor normalizado da consequência x para a alternativa i , dado o critério j ; e λ_j são as constantes de escala, normalizadas para $\sum_{j=1}^m \lambda_j = 1$.

No modelo aditivo, as constantes de escala refletem a idéia de compensação entre múltiplos atributos, de modo que o baixo desempenho observado em um atributo pode ser

compensado pelo bom desempenho em outros atributos (de Almeida et al., 2015). O valor de λ_j pode ser determinado por meio do procedimento trade-off proposto por Keeney e Raiffa (1976). Este procedimento é composto pelas seguintes etapas:

- 1) Avaliação intra-critério: são obtidas os valores de $v_j(x_{ij})$;
- 2) Ordenação dos critérios: Os critérios são ordenados do melhor para o pior $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m$, considerando o espaço de consequências de cada j ;
- 3) Explorar o espaço de consequências: questões baseadas em comparações entre consequências são apresentadas ao decisor, visando melhorar a sensibilidade de avaliação;
- 4) Obtenção das constantes de escala λ_1 e λ_2 : sendo $\lambda_1 > \lambda_2$, o desempenho de λ_1 é gradativamente reduzido até que o decisor seja indiferente entre as consequências associadas a λ_1 e λ_2 . Uma vez que o modelo aditivo pode ser representado por $\sum_{j=1}^m \lambda_j v_j(x_{ij})$, λ_2 é determinado através da substituição de λ_1 , neste somatório, por $\lambda_2 v_2(x_{i2}) = \lambda_1$;
- 5) Avaliação das demais λ_j : aplica-se o procedimento apresentado na etapa 4 para os demais critérios;
- 6) Finalização: testes de consistência são feitos para validar os coeficientes obtidos para λ_j .

O modelo de apoio à decisão sob certeza apresentado no capítulo 3 utiliza o método FITradeoff (de Almeida et al., 2016) para a eliciação das constantes de escala. O FITradeoff adapta o protocolo de eliciação proposto por Keeney e Raiffa (1976) para considerar a informação parcial fornecida pelo decisor, por meio de um processo flexível que exige menos esforço cognitivo para responder as questões de trade-off. Este método é operado por meio de um sistema de apoio a decisão (DSS), que pode ser disponibilizado segundo solicitação do leitor. Este DSS fornece flexibilidade em processos de tomada de decisão, sendo esta, uma das principais características do método FITradeoff (de Almeida et al., 2016).

No que diz respeito aos pressupostos para uso do modelo aditivo, o decisor deve apresentar uma estrutura de preferência compensatória e os julgamentos de preferência condicionados a um dado critério não poderá ser influenciado por outro critério (pressuposto de mútua independência preferencial entre critérios de Keeney e Raiffa (1976)).

2.1.2.3 Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT)

Segundo Dyer (2005), MAUT fornece os fundamentos axiomáticos para lidar com problemas de decisão multicritério sob risco, os quais apresentam alternativas de escolha associadas à ocorrências probabilísticas. Conforme de Almeida et al. (2015), MAUT agrega em uma função utilidade multiatributo $U(\cdot)$ os julgamentos de trade-off e a atitude de risco do decisor em relação as diferentes dimensões inerentes ao problema.

Em MAUT, a solução de um problema de decisão envolve a escolha de uma alternativa que maximize o valor esperado de $U(\cdot)$, a qual é obtida pela função utilidade unidimensional u_j e pela função densidade de probabilidade das consequências avaliadas (Gomes et al., 2006).

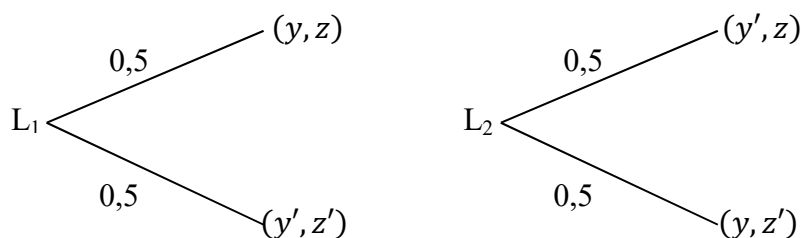
Conforme Keeney e Raiffa (1976), o protocolo de elicitação de uma função utilidade multiatributo consiste de cinco etapas: introdução das terminologias e idéias, validação dos pressupostos independência, avaliação da função utilidade condicional, elicitação das constantes de escala e verificação da consistência.

A etapa 1 tem por objetivo familiarizar o decisor com os principais conceitos utilizados na avaliação de $U(\cdot)$. Além disso, é importante assegurar que o decisor consiga identificar os resultados mais satisfatórios em diferentes regiões do espaço de consequências.

Na etapa seguinte, são validados os pressupostos de independência em utilidade e independência aditiva entre atributos. Conforme Keeney e Raiffa (1976), o atributo Y é independente em utilidade do atributo Z , quando as preferências do decisor avaliadas para Y dado um nível específico Z' não são alteradas para outros níveis em Z .

A condição de independência aditiva entre os atributos Y e Z é válida quando duas loterias L_1 e L_2 forem igualmente preferíveis para as consequências (y, z) e (y', z') conforme apresentado na Figura 2.3. Neste sentido, existe uma probabilidade de 50% de se obter y ou y' independente do valor de z .

Figura 2.3 – Loterias para validação da independência aditiva.



Fonte: Adaptado de Keeney e Raiffa (1976).

A etapa 3 consiste na elicitación da função u_j para cada atributo j . Esta função pode ser obtida pelo protocolo de elicitación proposto por Keeney e Raiffa (1976), apresentado na Seção 2.1.2.2.

Na etapa 4, a elicitación das constantes de escala está condicionada a validação dos pressupostos de independência da etapa 2. Para o caso em que a independência aditiva é verificada, é possível utilizar loterias para determinar o valor de λ_j .

Por fim, a etapa 5 visa examinar a consistência da função $U(\cdot)$, a qual representa as preferências do decisor sobre consequências probabilísticas. A validação de $U(\cdot)$ pode ser feita através de múltiplas comparações baseadas em consequências. Deste modo, seja $U(y, z)$ e o decisor prefira $u(y_1, z_1)$ à $u(y_2, z_2)$, então $U(y_1, z_1) > U(y_2, z_2)$.

2.1.2.4 Rank Dependent Utility (RDU)

Na literatura concernente ao tema decisão sob risco, existem alguns paradoxos relacionados ao uso da utilidade esperada (ver Allais, 1953; Machina, 1982). Em alguns casos, o RDU (Quiggin, 1981, 1982) tem sido considerado para lidar com os desvios de linearidade nas preferências do decisor, em relação à probabilidade de eventos raros (localizados nas extremidades do espaço de consequências). No RDU, o perfil de risco do decisor é caracterizado pelas funções de utilidade $u(x)$ de ponderação da probabilidade $w(p)$.

Admitindo um prospecto discreto q com três consequências x_3 , x_2 e x_1 com probabilidades associadas a cada consequencia p_3 , p_2 e p_1 , o valor da utilidade não-esperada deste prospecto, $V_{RDU}(q)$ pode ser obtido da seguinte maneira (Wakker, 2010):

- 1) Ordenar as consequências x da melhor para a pior, $q = \{x_1, p_1; x_2, p_2; x_3, p_3\}$.
- 2) Calcule o rank $r_a(x)$, de modo que $r_a(x_1) = 0$, $r_a(x_2) = p_1$ e $r_a(x_3) = p_1 + p_2$.
- 3) Para todos os valores de r_a , determinar $w(r_a)$.
- 4) Calcular o *decision weight* $\pi_x = w(p + r_a) - w(r_a)$, dado cada x .
- 5) Determinar a utilidade $u(x)$.
- 6) Multiplicar o valor de cada $u(x)$ pelo π_x correspondente e some os resultados, assim

$$V_{RDU}(q) = [u(x_1)\pi_{x_1}] + [u(x_2)\pi_{x_2}] + [u(x_3)\pi_{x_3}]$$

Quando $w(p) = p$ para todo $p \in (0,1)$, o $V_{RDU}(q)$ apresenta o mesmo resultado que seria obtido por meio da Teoria da Utilidade Esperada, a qual considera uma ponderação linear para a probabilidade de eventos raros.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE DECISÃO MULTICRITÉRIO EM SISTEMAS *JOB-SHOP* E *CONWIP/MTS*

Este item apresenta uma revisão da literatura referente ao uso do apoio multicritério em sistemas *job-shop* e *conwip/MTS*, com ênfase em trabalhos relacionados à seleção/avaliação: (i) de regras de controle WLC; (ii) de regras de prioridade (ou sequenciamento) de pedidos (ordens) na fila; e (iii) de parâmetros de planejamento e de controle da produção. Os resultados desta busca são apresentados a seguir.

Visando apresentar o estado atual do tema tratado por esta tese foram realizadas pesquisas nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus*. Para tanto, as seguintes palavras-chave foram utilizadas: “*conwip*”; “*constant work in process*”; “*workload control criteria*”; “*workload control multicriteria*”; “*workload control attribute*”; “*workload control multiattribute*”; “*workload control criteria decision*”; “*workload control multicriteria decision*”; “*workload control multiattribute*”; “*work in process criteria decision*”; “*work in process multicriteria*”; “*work in process attribute*”; “*work in process multiattribute*”; “*discrete event simulation workload control criteria*”; “*discrete event simulation workload control multicriteria*”; “*discrete event simulation workload control attribute*”; “*discrete event simulation workload control multicriteria decision*”; “*dispatching rules*”; “*WLC rules*”; “*discrete event simulation workload control multiattribute*”; “*simulation multicriteria decision production*”; “*simulation multicriteria decision production manufacturing*”; “*production planning and control multicriteria*”; “*production planning and control attribute*”; “*production planning and control multiattribute*”; e “*production planning and control criteria decision*”. Os resultados obtidos são detalhados a seguir.

A maioria das pesquisas em sistemas *job-shop* controlados pelo WLC se concentraram no desenvolvimento de regras para controlar a liberação de trabalhos (ou aprimoramentos das regras existentes), bem como na avaliação do desempenho (de regras existentes) sob diferentes condições experimentais. Neste contexto, são destacados os estudos de Thürer et al. (2017)^a; Thürer et al. (2017)^b; Fernandes et al. (2016); Thürer e Stevenson (2016); Thürer et al. (2016); Yan et al. (2016); Akillioglu et al. (2016); Fernandes et al. (2015); Thürer et al. (2015)^a; Thürer et al. (2015)^b; e Pürgstaller e Missbauer (2012). São poucos os estudos que avaliam diferentes combinações de regras WLC utilizando o apoio multicritério. Yoon et al. (2014) integraram a simulação por eventos discretos com o método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), para selecionar a combinação mais satisfatória de regras para liberação e sequenciamento de trabalhos à luz dos seguintes

critérios: CT , wip , TH , atraso dos pedidos (T) e pedidos entregues no prazo. Weng et al. (2008) desenvolveram uma metodologia multi-agente formada por quatro agentes independentes, uma para cada nível de controle do WLC e um para feedback de informações. Este modelo multi-agente minimiza uma função ponderação dos desvios da data de entrega (pedidos concluídos antecipadamente e em atraso).

Referente ao uso de regras para priorização de trabalhos que estão aguardando processamento nas estações de trabalho, pesquisas recentes tem focado principalmente no desenvolvimento de regras, ou ainda, na comparação de desempenho sob diferentes condições experimentais. Em algumas pesquisas, os resultados são apresentados para cada combinação envolvendo os níveis dos diferentes fatores avaliados no experimento. Sharma e Jain (2015) simularam nove regras de priorização considerando os efeitos da dependência entre os tempos de setup e diferentes níveis de utilização do sistema. O desempenho das regras foi avaliado com base nas seguintes métricas: makespan (C_{max}), lead time total (TT_t), valor máximo de TT_t , T , valor máximo de T , número de pedidos em atraso (NTJ), total de setups feitos e tempo médio de setup. Jia et al. (2015) integraram a metaheurística GRASP (*greedy randomized adaptive search procedure*) com a simulação de eventos discretos para abordar o problema de configuração de máquina e programação de lotes em sistemas de montagem e teste de semicondutores. Os objetivos utilizados para avaliar as diferentes heurísticas foram: TH ponderado, C_{max} , soma ponderada de escassez de dispositivo chave e número de máquinas utilizadas. Por meio de um experimento de simulação, Xiong et al. (2017) investigaram os efeitos do prazo de entrega e do percentual de trabalhos com restrições técnicas na programação de sistemas de manufatura com lotes de produção. O desempenho de vinte regras de priorização (incluindo quatro novas regras propostas pelos autores) foi avaliado em relação à porcentagem de pedidos em atraso e valor máximo de T . Sharma e Jain (2016) apresentam quatro novas regras de prioridade para sistemas produtivos com tempo de setup dependente. O desempenho destas regras foi comparado à nove regras clássicas de prioridade, em termos do CT , T e tempo médio de setup. Para o problema de sequenciamento de lotes em sistemas que produzem componentes eletrônicos, Chung et al. (2016)^a propõem uma heurística formada por 2 estágios. Esta heurística foi comparada à cinco regras de prioridade à luz do CT , T e porcentagem de pedidos em atraso. Para este mesmo problema, Chung et al. (2016)^b apresentam uma heurística que considera o efeito de alta prioridade nos lotes de produção. A avaliação de desempenho desta regra em termos de CT , T e utilização dos recursos foi feita por meio da simulação. He et al. (2016) identificaram a melhor

combinação de regras de prioridade para o problema de sequenciamento em sistemas flexíveis de manufatura, utilizando a simulação e o teste t de comparação entre médias. Os critérios utilizados na comparação das médias foram o CT , nível de utilização do robô e quantidade produzida.

Diferentes metodologias têm sido propostas para abordar o problema de seleção de regras de prioridade em sistemas *job-shop*, considerando múltiplos objetivos de desempenho simultaneamente. El Bouri e Amin (2015) apresentam uma abordagem multicritério que utiliza a OWA (ordered weighted averaging) para avaliar o nível de otimismo do decisor e DEA (data envelopment analysis) para agregar as pontuações obtidas pela OWA e identificar a regra de priorização mais eficiente. Este modelo considera como objetivos o C_{max} , TT_t , utilização dos recursos produtivos, T , valor máximo de T , porcentagem de pedidos concluídos no prazo e média dos desvios da data de entrega. Parthanadee e Buddhakulsomsiri (2010) desenvolveram um experimento de simulação para avaliar o desempenho de nove regras de prioridade em relação ao TT_t , T e NTJ . Para obter a solução final, os resultados são comparados por meio o teste de Tukey e TOPSIS.

A Lógica fuzzy tem sido aplicada para lidar com as incertezas e ambiguidades que inevitavelmente podem existir, quando o problemas de seleção de regras de prioridade é abordado sob uma perspectiva multidimensional. Em um problema de programação de células robotizadas, Abd et al. (2016) combinaram a lógica fuzzy com métodos Taguchi para identificar a combinação de regras de sequenciamento (para os quatro fatores em estudo) que forneça o melhor desempenho para o C_{max} , T e NTJ . Asadi (2017) apresentou dois modelos que consideram os efeitos de aprendizagem dos trabalhadores sobre o tempo de processamento, em problemas de sequenciamento que envolvem uma única máquina. O objetivo é minimizar o C_{max} , tempo total de conclusão dos trabalhos e o tempo total de conclusão dos trabalhos ponderado. Neste estudo, as regras *shortest processing time* e *weighted shortest processing time* foram consideradas. Huang e Süer (2015) propuseram um modelo baseado na lógica fuzzy e algoritmos genéticos (AG), que identifica a combinação de regras de prioridade com o mais alto nível de satisfação fuzzy para o decisor, tendo em conta o C_{max} , CT , T e valor máximo de T . Foroozesh et al. (2017) apresentam uma abordagem multicritério para seleção de regras de prioridade em sistemas de manufatura flexíveis baseada em *interval-valued fuzzy sets*. Os critérios considerados na avaliação de três diferentes regras foram o CT , T , tamanho e tempo de espera na fila.

Como uma alternativa ao uso de regras de prioridade, metaheurísticas como a programação genética (PG) e AG também tem sido utilizadas em diferentes tipos de problemas de sequenciamento. Nguyen et al. (2014) apresentam quatro métodos multi-objetivos para o desenvolvimento de políticas de programação, incluindo regras de prioridade e definição da data de entrega em sistemas *job-shop*. Os autores utilizaram a análise de Pareto para avaliar os trade-offs entre C_{max} , atraso total ponderado normalizado e média absoluta da porcentagem dos erros da estimação de CT . Đurasević et al. (2016) investigaram o uso de PG na programação de máquinas paralelas não relacionadas. O desempenho da heurística proposta pelos autores foi comparado com outros modelos de PG, considerando o C_{max} , TT_t , atraso dos pedidos ponderado e número de pedidos em atraso ponderado. Para um contexto produtivo similar, Cheng e Huang (2017) integraram AG com um mecanismo de controle de liberação distribuído visando minimizar os desvios da data de entrega. Outros estudos recentes que abordam o problema de programação de máquinas paralelas podem ser encontrados em Hamzadayi e Yildiz (2016) e Su et al. (2017). Yang et al. (2017) apresenta um modelo baseado em AG para otimizar a programação de múltiplas linhas de produção. O desempenho deste modelo foi comparado à regras clássicas de prioridade considerando sete cenários experimentais. Os objetivos avaliados foram a disponibilidade da estação de trabalho, C_{max} , número de mudanças do componente pré-moldado, custos de penalidade contratual e de estocagem. Outras técnicas, como a inteligência artificial e *variable neighborhood search* tem sido utilizadas para lidar com o problema de sequenciamento (Heger et al., 2016; Rahmani e Ramezani, 2016).

Em sistemas produtivos MTS controlados pelo *conwip*, diferentes abordagens tem sido utilizadas para apoiar decisões sob uma perspectiva multidimensional. Xanthopoulos et al. (2017) integraram simulação com algoritmos evolucionários multi-objetivos para avaliar o desempenho de nove políticas de controle (sendo que duas políticas foram propostas neste estudo) baseadas no *kanban* e *conwip* em relação ao *wip*, estoque de produtos finalizados e tamanho da fila de ordens pendentes. Neste estudo, a avaliação dos trade-offs entre objetivos foi executada por meio da análise de Pareto. Thüerer et al. (2017^c) avaliaram o desempenho do *conwip* à luz de doze regras de controle de liberação de trabalhos (*backlog-sequencing rules*) utilizando simulação e ANOVA. Os critérios utilizados foram: TT_t , porcentagem de pedidos em atraso, T , CT e desvio padrão do atraso. Neste estudo, os resultados são apresentados conforme as regras de prioridade utilizadas, que foram a FSFS (*First in System First Served*), ODD (*Operation Due Date*), SPT (*Shortest Processing Time*) e MODD (*Modified Operation*

Due Date). Huang et al. (2015) apresentam um sistema que utiliza simulação e redes neurais para estimar o *TH* à luz de diferentes níveis de *conwip*, *MTTR* (*Mean Time To Repair*) e sequenciamento. Para avaliar este sistema, os autores utilizaram o atributo *MAPE* (*The Mean Absolute Percentage Error*) e o teste *t* de comparação entre médias de desempenho. Onyeocha (2015) simulou os efeitos que a composição do mix de produtos pode causar em uma linha de montagem com operações em série e paralelo. Neste contexto, os autores avaliaram três estratégias de controle do fluxo de trabalho, sendo o *kanban*, *extended kanban* e *basestock kanban-conwip*. Com base nos resultados obtidos para o nível de serviço, *backlogs* e *wip*, a melhor estratégia foi identificada pela abordagem *ranking* de Nelson. Onyeocha et al. (2015) utilizaram simulação e *AG* para identificar os parâmetros de controle que minimizam o *wip* e *backlogs*, considerando os efeitos que uma demanda instável pode causar no desempenho do sistema. Para comparar os resultados e escolher a melhor política, o procedimento proposto por Nelson et al. (2001) foi utilizado. Xanthopoulos e Koulouriotis (2014) identificaram por meio da simulação e algoritmos evolucionários multi-objetivo os parâmetros de controle ótimos ou aproximados para as políticas *kanban*, *basestock*, *conwip* e o híbrido entre *kanban* e *conwip*. O objetivo é identificar os parâmetros que minimizam a média do *wip* e do número de *backlogs*. Azadeh et al. (2010) integraram simulação com a lógica fuzzy para selecionar um programa de manutenção que minimize o custo de produção e o tempo de resposta do sistema.

Apesar da natureza conflituosa dos objetivos de desempenho em sistemas *conwip*, poucos estudos tem utilizado *MCDM/A*. Lu et al. (2011) apresentam um procedimento para implantar o sistema *lean* puxado combinado com o *conwip*. Para tanto foi empregado o mapeamento do fluxo de valor, simulação por eventos discretos e para analisar os dados simulados, foram empregados os métodos de Taguchi e *TOPSIS*. Vale destacar que os critérios utilizados no modelo de decisão são *CT*, *TH* e *wip*, sendo avaliado um total de 50 cenários. Por fim, os autores construíram um mapa para o estado futuro, com base na alternativa escolhida. Pergher e Vaccaro (2014) desenvolveram um modelo de decisão baseado na simulação e no método *Electre Tri* que quantifica o *wip* considerando a *TH*, investimento em *wip*, giro do estoque de produtos prontos, ganho \$ dias em atraso e estoque \$ dias. Cabe observar que um detalhamento sobre as métricas da *TOC*, ganho \$ dias em atraso e estoque \$ dias pode ser encontrado em Kendall (2007).

A Tabela 2.1 apresenta uma síntese das principais características referentes aos estudos apresentados nos parágrafos anteriores.

Tabela 2.1 – Síntese das pesquisas.

(Continua)

Autor(es)	Sistema produtivo	Problema	Método(s)	Lista de Critérios principais
Yoon et al. (2014)	<i>Job-shop</i>	Seleção/avaliação de regra(s) WLC	Simulação e TOPSIS	CT , wip , TH , T e pedidos entregues no prazo
Weng et al. (2008)	<i>Job-shop</i>	Seleção de regra(s) WLC	Metodologia multi-agente	Função ponderação dos desvios da data de entrega
Sharma e Jain (2015)	<i>Job-shop</i>	Avaliação de regras de prioridade à luz da sequência dependente do setup e utilização dos recursos produtivos	Simulação	C_{max} , TT_t , valor máximo de TT_t , T , valor máximo de T , NTJ , total de setups feitos e tempo médio de setup
Jia et al. (2015)	<i>Job-shop</i>	Configuração da máquina e programação de lotes	GRASP e simulação	TH ponderado, C_{max} , soma ponderada de escassez de dispositivo chave e número de máquinas utilizadas
Xiong et al. (2017)	<i>Job-shop</i>	Programação da produção sob diferentes níveis de prazo de entrega e percentual de trabalhos com restrições técnicas.	Simulação	Porcentagem de pedidos em atraso e valor máximo de T
El Bouri e Amin (2015)	<i>Job-shop</i>	Seleção de regra(s) de prioridade	OWA e DEA	C_{max} , TT_t , utilização dos recursos produtivos, T , valor máximo de T , porcentagem de pedidos concluídos no prazo e média dos desvios da data de entrega
Parthanadee e Buddhakulsomsiri (2010)	<i>Job-shop</i>	Avaliação/seleção de regra(s) de prioridade	Simulação, teste de Tukey e TOPSIS	TT_t , T e NTJ
Abd et al. (2016)	<i>Job-shop</i>	Seleção de regra(s) de prioridade	Lógica fuzzy e métodos Taguchi	C_{max} , T e NTJ
Asadi (2017)	<i>Job-shop</i>	Programação de uma máquina sob os efeitos de aprendizagem dos trabalhadores	Lógica fuzzy	C_{max} , tempo total de conclusão dos trabalhos e o tempo total de conclusão dos trabalhos
Huang e Süer (2015)	<i>Job-shop</i>	Seleção de regra(s) de prioridade	Lógica fuzzy e AG	C_{max} , CT , T e valor máximo de T
Foroozesh et al. (2017)	<i>Job-shop</i>	Seleção de regra(s) de prioridade	<i>Interval-valued fuzzy sets</i> .	CT , T , tamanho e tempo de espera na fila
Nguyen et al. (2014)	<i>Job-shop</i>	Proposição de métodos para desenvolvimento de políticas de programação	AG e análise de Pareto	C_{max} , atraso total ponderado normalizado e média absoluta da porcentagem dos erros da estimação de CT
Đurasević et al. (2016)	<i>Job-shop</i>	Programação de máquinas paralelas não relacionadas	PG	C_{max} , TT_t , atraso dos pedidos ponderado e número de pedidos em atraso ponderado

(Continua)

Autor(es)	Sistema produtivo	Problema	Método(s)	Lista de Critérios principais
Cheng e Huang (2017)	<i>Job-shop</i>	Programação de máquinas paralelas não relacionadas	AG	Desvios da data de entrega
Yang et al. (2017)	Linhas de produção	Otimização da programação de múltiplas linhas de produção	AG	disponibilidade da estação de trabalho, C_{max} , número de mudanças do componente pré-moldado, custos de penalidade contratual e de estocagem
Sharma e Jain (2016)	<i>Job-shop</i>	Problema de sequenciamento com tempos de setup dependentes	Simulação	CT , T e tempo médio de setup
Chung et al. (2016) ^a	Indefinido	Problema de sequenciamento de lotes	Simulação	CT , T e porcentagem de pedidos em atraso
Chung et al. (2016) ^b	Indefinido	Problema de sequenciamento de lotes de alta prioridade	Simulação	CT , T e utilização dos recursos
He et al (2016)	<i>Job-shop</i>	Problema de sequenciamento em sistemas flexíveis de manufatura	simulação e teste t	CT , nível de utilização do robô e quantidade produzida
Xanthopoulos et al. (2017)	<i>Conwip</i>	Avaliação do desempenho de políticas de controle baseadas no kanban e <i>conwip</i>	Simulação, algoritmos evolucionários multi-objetivos e análise de Pareto	<i>Wip</i> , estoque de produtos finalizados e tamanho da fila de ordens pendentes
Thürer et al. (2017 ^c)	<i>Conwip</i>	Avaliação do desempenho do <i>conwip</i> à luz de regras de controle para liberação de trabalhos	Simulação e ANOVA	TT_t , porcentagem de pedidos em atraso, T , CT e desvio padrão do atraso
Huang et al. (2015)	<i>Conwip</i>	Estimação de TH	Simulação, redes neurais e teste t	MAPE
Onyeocha (2015)	<i>Conwip</i>	Impacto que a composição do mix de produtos pode causar em três estratégias de controle do fluxo de trabalho	Simulação e Ranking de Nelson	Nível de serviço, <i>backlogs</i> e <i>wip</i>
Onyeocha et al. (2015)	<i>Conwip</i>	Identificação dos parâmetros de controle	Simulação, AG e abordagem de Nelson et al. (2001)	<i>wip</i> e <i>backlogs</i>
Xanthopoulos e Koulouriotis (2014)	<i>Conwip</i>	Identificação dos parâmetros de controle	Simulação e algoritmos evolucionários	<i>wip</i> e do número de <i>backlogs</i>

(Conclusão)

Autor(es)	Sistema produtivo	Problema	Método(s)	Lista de Critérios principais
Azadeh et al. (2010)	<i>Conwip</i>	Seleção de uma estratégia de manutenção	Simulação e lógica fuzzy	o custo de produção e o tempo de resposta do sistema.
Lu et al. (2011)	<i>Conwip</i>	Proposição de um método para implantar o sistema lean puxado combinado com o <i>conwip</i>	Mapeamento do fluxo de valor, simulação, métodos de Taguchi e TOPSIS	<i>CT, TH e wip</i>
Pergher e Vaccaro (2014)	<i>Conwip</i>	Definição do <i>wip</i>	Simulação e Electre Tri	<i>TH</i> , investimento em <i>wip</i> , giro do estoque de produtos prontos, ganho \$ dias em atraso e estoque \$ dias

Fonte: Essa Pesquisa (2017).

Com base na Tabela 2.1 é possível observar que são poucos os estudos que empregam métodos MCDM/A para assessorar a busca de uma solução compromisso sob uma perspectiva multidimensional. Esta é uma característica distintiva desta tese em relação a literatura atual, a qual será melhor apresentada na próxima seção.

2.3 SÍNTESE DO ESTADO DA ARTE E POSICIONAMENTO DESTE TRABALHO

Com base na breve revisão de literatura descrita na Seção 2.2, é possível observar que os estudos relacionados ao WLC não consideram as preferências do decisor no processo de avaliação dos trade-offs entre os múltiplos atributos de desempenho. Além disso, muitas pesquisas caracterizam o desempenho de cada regra WLC conforme o resultado obtido em cada combinação de níveis de fatores e atributos de desempenho.

A maioria dos autores concordam que uma avaliação de trade-off sobre os vários objetivos de desempenho pode ser necessária à solução para este problema WLC. Thüerer et al. (2016) apresentam uma abordagem para determinar quando ajustar a capacidade produtiva, tendo como base o nível de carga de trabalho no sistema produtivo. Conforme relatado pelos autores, há um trade-off entre a porcentagem de pedidos concluídos em atraso e o tempo médio de atraso dos pedidos que deve ser considerado durante a definição normas que controlam a carga de trabalho. Fernandes et al. (2016) apresentam duas novas abordagens para gerenciar a liberação de ordens para o sistema. Usando simulação e análise de variância, os autores demonstram melhorias significativas no desempenho do tempo de atraso dos pedidos e no desvio-padrão do atraso, em relação as regras de liberação contínua (CR) e CR

LUMS. Contudo, para identificar a melhor alternativa para implantação, o trade-off entre o desempenho do sistema sob vários atributos e o nível de carga de trabalho deve ser avaliado.

Fernandes et al. (2015) buscaram identificar qual regra de liberação de ordem utilizar para um sistema de produção de perfis de alumínio. Com base na porcentagem de ordens em atraso, a regra de CR foi recomendada como solução para o problema. Contudo, o desempenho desta regra à luz de múltiplos atributos varia de acordo com o *wip* e taxa de atendimento (*fill rate*) da demanda praticados. No estudo de simulação de Thüerer et al. (2014a), os autores sugerem que a decisão final sobre a qual uma combinação de regras de controle deve ser aplicada empregada depende de um trade-off entre desempenho do sistema e a sofisticação da regra. Thüerer et al. (2014^b) sugerem o uso do método de liberação LUMS CR para sistemas com tempos de setup dependentes. Apesar deste método melhorar significativamente o desempenho do sistema em vários atributos, o método de liberação de ordem SLAR dá um melhor desempenho para o atributo de lead time de produção, em comparação com LUMS COR. Por meio da aplicação do modelo de decisão baseado na MAVT, é possível identificar qual opção poderia ser implementada, tendo em consideração os julgamentos de trade-off do decisor sobre os vários atributos de desempenho. Por exemplo, no estudo de Fernandes et al. (2016), as alternativas à escolha seriam estabelecidas com base nas regras usadas pelos três níveis de decisão do WLC, e também por diferentes níveis de *wip*. Através do FITradeoff, é desenvolvida uma função que agrega as preferências do decisor sobre os critérios considerados no estudo. A partir desta função, cada alternativa simulada recebe um valor global de avaliação, permitindo selecionar a alternativa que maximize este valor.

Com relação ao problema de seleção de regras de prioridade, os modelos de decisão apresentados na seção anterior não incorporam os julgamentos de trade-off do decisor e a sua atitude em relação a risco, a qual é influenciada pelas consequências probabilísticas associadas à múltiplos atributos. Semelhante situação ocorre em pesquisas que visam identificar os parâmetros operacionais em sistemas *conwip*/MTS. Por conseguinte, torna-se difícil avaliar e buscar meios para reduzir os riscos associados à escolha de uma alternativa. Além disso, a solução recomendada por estes modelos pode ser inadequada em situações onde o decisor está disposto a compensar o baixo desempenho de um atributo, pela vantagem obtida em um outro atributo. Admitindo que as preferências do decisor podem refletir os objetivos operacionais que a organização pretende alcançar, uma abordagem que explore os

trade-offs e julgamentos de preferência sobre múltiplos atributos conflitantes pode ser necessária para lidar com tais problemas.

Neste sentido, o modelo MAUT proposto para o problema *conwip*/MTS incorpora na solução de compromisso, os julgamentos de trade-off e o comportamento de risco do decisor. A MAUT pode ser útil para lidar com as incertezas inerentes à este tipo de problema, uma vez que apresenta uma estrutura axiomática bem definida que permite avaliar as incertezas associadas a cada alternativa, bem como agregar as preferências do decisor em um contexto probabilístico. Cabe observar que esta teoria tem sido aplicada para modelar problemas de decisão multicritério envolvendo riscos na área de gestão da produção (Brito e de Almeida, 2012; Pergher e de Almeida, 2017; Aqlan et al., 2017).

Para o problema de seleção de regras de prioridade, o modelo híbrido MAUT-RDU (MRDU) assume que o perfil de risco do decisor é influenciado pela probabilidade dos eventos que estão situados nos extremos do espaço amostral. O uso do RDU (Quiggin, 1981, 1982) pode ser particularmente útil para modelar as incertezas inerentes aos sistemas *job-shops*, visto que a ocorrência desses eventos podem gerar um impacto negativo no desempenho do sistema produtivo. O RDU tem sido aplicado para modelar o comportamento de risco do decisor em diferentes contextos de decisão (Drouhin, 2015; Bahaji e Casta, 2016; Pergher e de Almeida, 2018).

Desta forma, observa-se a relevância este trabalho a partir da proposição de modelos de decisão que incorporem no processo de decisão, os aspectos estocásticos das consequências das alternativas à escolha sob uma perspectiva multicritério.

3 MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA SELECIONAR AS REGRAS DE CONTROLE EM SISTEMAS WLC BASEADO NO MÉTODO FITRADEOFF

Este capítulo apresenta um modelo multicritério de decisão sob certeza para avaliar diferentes combinações de regras de controle WLC. Também é ilustrada uma aplicação numérica baseada em dados realísticos de uma empresa produtora de calçados femininos.

3.1 MODELO FITRADEOFF DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

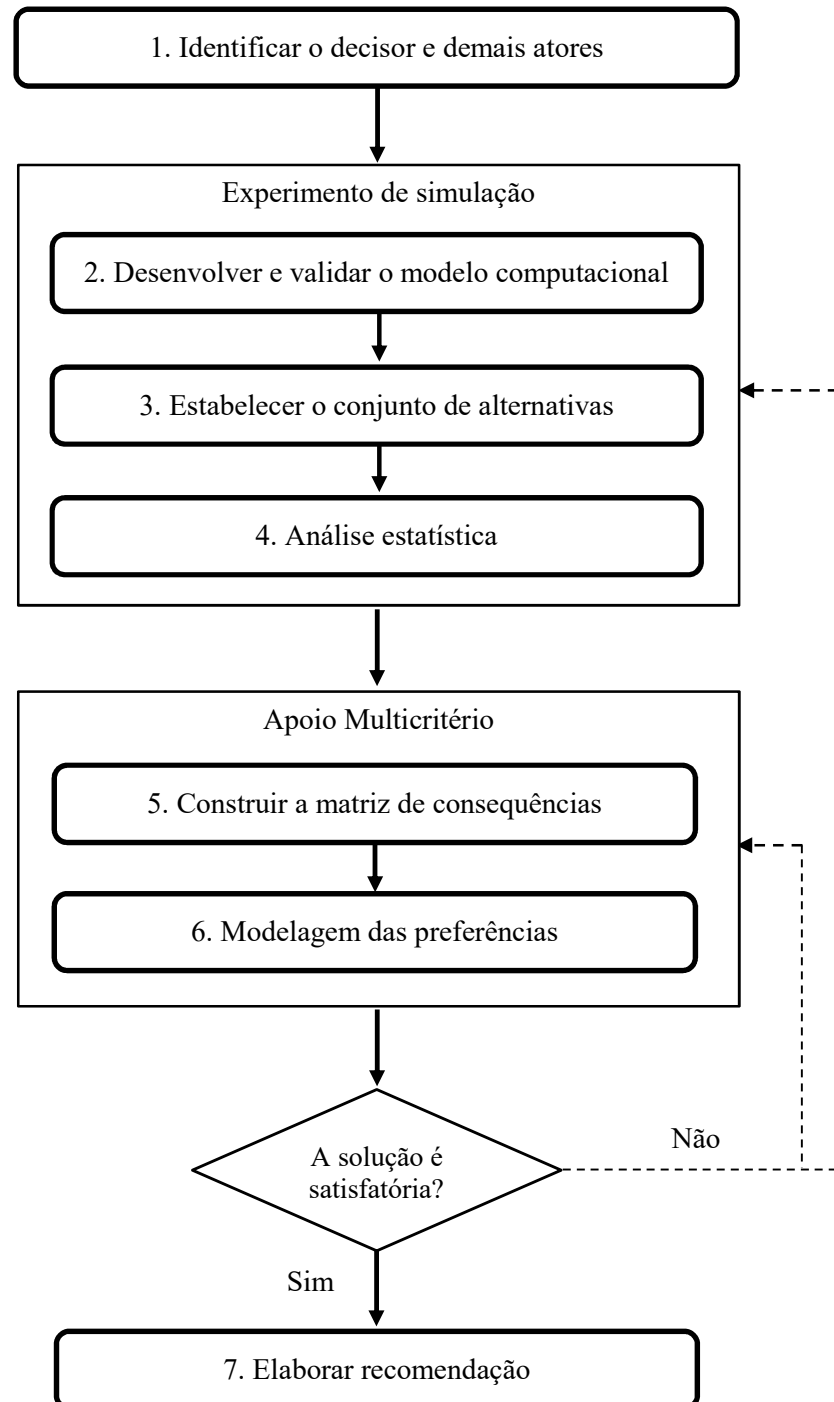
O modelo proposto considera um contexto de decisão associado a data de entrega, seleção e priorização de trabalhos, no qual uma alternativa a_i deve ser escolhida de um conjunto $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}$ com n potenciais combinações de regras WLC. Essas combinações são definidas para os três principais níveis de decisão da hierarquia WLC (ver Fig 2.1). Deste modo, a_i é um vetor decisão $\{d_i; r_i; s_i\}$ onde $d_i \in DDR$ representa a regra para cálculo da data de entrega, $r_i \in RR$ é a regra para seleção das ordens que estão aguardando liberação no *order pool* e $s_i \in SDR$ denota a regra de prioridade utilizada para seleção dos trabalhos que estão aguardando na fila de alguma estação de trabalho. O desempenho de $a_i = \{d_i; r_i; s_i\}$ será avaliado por um vetor de consequências constituído de m atributos de decisão, representado por $a_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{im}\}$.

As etapas do modelo de decisão e suas interconexões são apresentadas na Figura 3.1. A etapa 1 visa identificar o decisor e os demais atores envolvidos na decisão. O decisor é o ator principal, uma vez que ele/ela fornecerá as informações de preferência sobre consequências relacionadas aos múltiplos objetivos de desempenho. Os demais atores envolvidos no processo são o analista de decisão e os especialistas. O analista de decisão fornece o apoio metodológico necessário para implantar este modelo, enquanto que os especialistas proveem as informações técnicas para o analista de decisão.

A etapa subsequente inclui a modelagem conceitual e o ajuste das distribuições de probabilidade para as variáveis estocásticas. Após validação, o modelo conceitual e os dados coletados são inseridos em um simulador de eventos discretos. Rodadas piloto com o modelo computacional também devem ser feitas para fins de validação (Law, 2015). Considerando pesquisas recentes sobre WLC, os seguintes atributos são recomendados para este contexto de decisão: custo total (T_c) associado à implantação de a_i ; quantidade produzida (P_q) de todos os tipos de produtos durante a simulação; lead time total (TT_t); e atraso dos pedidos (T), que

caracteriza o período temporal entre a data de entrega efetiva da ordem do cliente e a data de entrega estimada.

Figura 3.1 – Etapas do modelo WLC.



Fonte: Essa Pesquisa (2017).

A etapa 3 consiste no desenvolvimento do conjunto de alternativas à escolha. Além disso, é necessário determinar os seguintes parâmetros de simulação: nível de significância, número de replicações e condições de inicialização do modelo computacional (Law, 2015). Em seguida, a significância dos resultados obtidos no experimento de simulação deve ser examinada por meio de técnicas estatísticas como a análise de variância (ANOVA) (Hair et al., 2010) ou teste de Kruskal-Wallis (Siegel e Castellan, 1988). Sendo verificada a significância do vetor $\{d_i; r_i; s_i\}$, a matriz de consequências pode ser desenvolvida para representar o desempenho médio x_{ij} , obtido para cada combinação de alternativa a_i dado j .

Passo 6 consiste a modelagem das preferências do decisor através do FITradeoff (de Almeida et al., 2016). Inicialmente, os principais conceitos relacionados a MAVT devem ser apresentados ao decisor, ressaltando a importância de pensar cuidadosamente sobre as preferências durante o processo de elicitación. Em seguida, o FITradeoff DSS é utilizado para formular perguntas de julgamento compensatório (trade-off), de modo que o decisor expresse sua preferência estrita para cada par de consequências avaliadas. A cada nova informação fornecida pelo decisor, o conjunto de alternativas potencialmente ótimas é atualizado através da resolução de problemas de programação linear. O método permite que o decisor visualize os resultados parciais obtidos em cada etapa graficamente. Caso os resultados não sejam satisfatórios, novas alternativas podem ser consideradas no processo, bem como executar alterações nos julgamentos feitos.

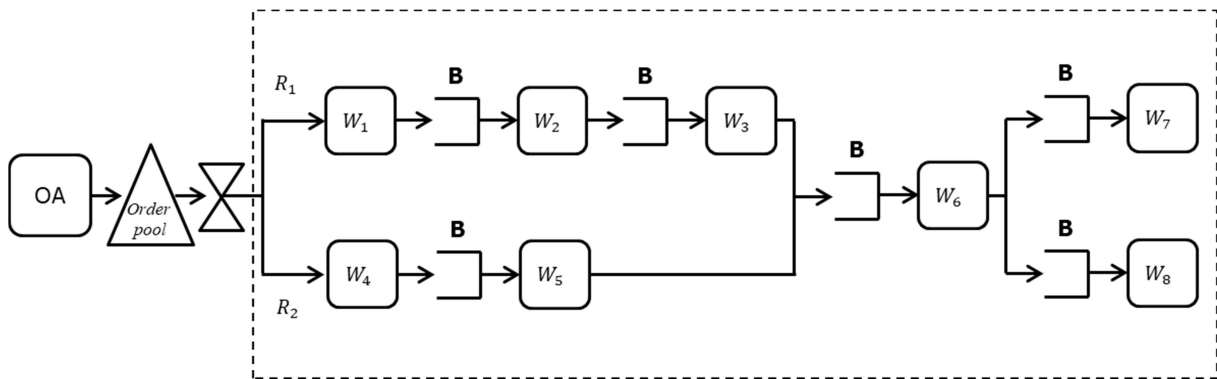
Na etapa 7 é apresentada a solução compromisso, destacando todos os detalhes do processo decisório.

3.2 APLICAÇÃO DO MODELO FITRADEOFF

O caso sob investigação é sistema MTO de uma empresa de médio porte que produz calçados femininos. Este sistema é formado por uma unidade de recebimento e atribuição de data de entrega (OA), uma unidade de liberação das ordens de produção, oito estações de trabalho e seis pontos de estocagem de material. Após recebimento e definição da data de entrega, as ordens aguardam no *order pool* a autorização para início de produção. As ordens são liberadas para produção em conformidade com o mecanismo de tempo contínuo. Uma estação de trabalho W_h é caracterizada por um número de processos envolvidos em um determinado estágio de produção, enquanto que um ponto de estocagem representa a carga direta de uma estação de trabalho ao longo do tempo.

Um total de treze tipos diferentes de ordens $o_k = \{o_1, o_2, \dots, o_k, \dots, o_{13}\}$, divididos em dois roteiros principais de produção $R_1 = \{o_1, o_2, \dots, o_8\}$ e $R_2 = \{o_9, o_{10}, \dots, o_{13}\}$ são considerados. Conforme apresentado na Figura 3.2, o roteiro de trabalho de $o_k \in R_1$ começa na estação W_1 ; caso contrário em W_4 . As especificações de qualidade das matérias primas necessárias para R_1 são verificadas em W_1 antes de serem enviadas para W_2 onde três processos são executados simultaneamente. O primeiro processo refere-se ao corte da taloneira em material sintético, de acordo com os cinco tamanhos exigidos; o segundo processo aplica a etiqueta da marca; e por fim, uma camada de cola é aplicada na superfície oposta àquela que obtém a etiqueta da marca.

Figura 3.2 – Diagrama do sistema de produção.



Fonte: Essa Pesquisa (2017).

Em seguida, as taloneiras são enviadas para W_3 , onde ocorre a produção do solado por meio do processo de moldagem por injeção. Nesta fase, o cloreto de polivinil (PVC) misturado a pigmentos, glitter e outros elementos é fundido à 120 graus Celsius e em seguida, injetado sob pressão para dentro do molde que dará formato ao solado. Os solados semiacabados são enviados para W_6 e W_7 , onde ocorre a pintura e montagem final, respectivamente.

A produção de $o_k \in R_2$ começa em W_4 com a moldagem por injeção do salto. Esse componente é utilizado em W_5 durante o processo de injeção do solado. O solado semiacabado de W_5 é enviado para W_6 , onde será estampada uma figura na superfície do solado e posteriormente será enviado para W_8 . Nas estações W_7 e W_8 , o solado é montado ao cabedal e a outros componentes que são fornecidos por terceiros. Após a execução das operações de montagem, os produtos acabados são expedidos para os clientes.

No que se refere à etapa 1 do modelo FITradeoff (Fig. 3.1), foi atribuído ao gerente de produção o papel de decisor, enquanto que os líderes operacionais de cada um dos setores,

bem como o analista de métodos e processos foram caracterizados como especialistas. O experimento de simulação foi desenvolvido através do software Micro Saint Sharp. O tipo de ordem é determinado segundo uma distribuição uniforme discreta [1, 13] e o tempo entre chegadas das ordens segue uma distribuição exponencial com média de 2,1 horas. Os tamanhos de lote de produção (em pares de calçados), bem como os tempos de processamento são apresentados na Tabela 3.1. Os setups são considerados independentes e incluídos no tempo da operação. A combinação de tempos de chegada-processamento gera uma taxa de utilização média de pelo menos 85%, para os recursos gargalo. Este processo apresenta um gargalo estável para cada roteiro de produção, sendo W_3 para R_1 , enquanto W_5 é o gargalo para R_2 .

Tabela 3.1 – Resumos dos tempos de processamento e tamanho dos lotes de produção.

Tempos de Processamento (horas)									
o_k	Lote de produção	W_1	W_2	W_3^b	W_4	W_5^b	W_6	W_7	W_8
		Exponencial	Gamma ^a	Lognormal ^a	Lognormal ^a	Lognormal ^a	Exponencial	Gamma ^a	Gamma ^a
1	900	(0,33)	(1,37; 0,60)	(15,96; 6,24)			(3,77)	(2,82; 1,15)	
2	900	(0,33)	(1,29; 0,70)	(13,38; 5,93)			(3,33)	(2,89; 1,17)	
3	720	(0,33)	(0,89; 0,33)	(10,10; 4,15)			(2,72)	(2,20; 1,18)	
4	720	(0,33)	(0,92; 0,36)	(9,97; 3,92)			(2,88)	(2,59; 1,10)	
5	900	(0,33)	(1,10; 0,40)	(10,03; 4,13)			(2,69)	(3,51; 1,72)	
6	900	(0,33)	(1,54; 0,64)	(16,10; 6,90)			(2,84)	(3,68; 1,55)	
7	900	(0,33)	(1,35; 0,58)	(11,46; 4,13)			(2,66)	(3,45; 1,45)	
8	720	(0,33)	(1,22; 0,49)	(9,48; 3,89)			(3,48)	(3,64; 1,48)	
9	720				(2,41; 1,18)	(12,2; 5,62)	(3,64)		(5,20; 1,54)
10	720				(2,22; 1,04)	(10,09; 4,32)	(3,45)		(4,50; 1,47)
11	600				(2,21; 1,06)	(7,95; 2,96)	(3,90)		(4,29; 1,26)
12	480				(2,57; 1,15)	(7,42; 2,65)	(4,14)		(3,14; 1,15)
13	360				(2,76; 1,49)	(5,57; 2,24)	(2,36)		(3,10; 1,23)

^a(Média Aritmética, Desvio Padrão)

^b(Recurso gargalo)

Fonte: Essa Pesquisa (2017).

A Tabela 3.2 apresenta uma breve descrição das características do sistema consideradas no experimento de simulação. Em relação à capacidade produtiva, cada estação de trabalho pode lidar com um número específico de ordens simultaneamente. Devido às restrições da

quantidade de moldes de injeção, a preempção é permitida apenas nas estações de trabalho W_3 e W_5 . Além disso, a capacidade de W_8 pode ser ajustada de acordo com o nível de *wip*.

Tabela 3.2 – Características das estações de trabalho simuladas.

W_h	Horário de trabalho		Capacidade		Parâmetros de confiabilidade (Horas)	
	(Horas/dia)	Dias/semana	Incremento	Número de ordens	MTBF	MTTR
1	16,3	5	Não	1	N/A	N/A
2	16,3	5	Não	1	Lognormal (419; 75)	Exponencial (2,5)
3	23,0	7	Não	4	Lognormal (337,3; 50)	Exponencial (4)
4	16,3	5	Não	1	N/A	N/A
5	23,0	7	Não	2	Lognormal (169,4; 28)	Exponencial (4)
6	16,3	5	Não	4	N/A	N/A
7	16,3	5	Não	2	N/A	N/A
8	16,3	5	Sim	1 (2)	N/A	N/A

Fonte: Essa Pesquisa (2017).

Para fins de validação do modelo computacional, quantidade total de produção no período simulado foi comparada de modo determinístico com os dados do sistema real. A adesão obtida foi igual a 96,1%. Na etapa 3 (Fig. 3.1), as regras WLC utilizadas para estabelecer o conjunto de alternativas são descritas na Tabela 3.3. Este conjunto inclui regras bem conhecidas que podem ser facilmente implantadas no sistema em estudo, sem exigir um complicado sistema computacional para a programação das ordens. Note que também seria possível utilizar a técnica tambor-tampão-corda (Goldratt e Cox, 1984, 1993), uma vez que gargalos do sistema são conhecidos.

Tabela 3.3 – Regras WLC avaliadas.

Função	Acrônimo	Nome da Regra	Referência
Definição da data de entrega	JIS	<i>Job in system</i>	Ahmed e Fisher (1992)
	IWIQ	<i>Imminent work in queue</i>	Thürer et al. (2013)
	JIQ	<i>Job in queue</i>	Ragatz e Mabert (1984)
Liberação das ordens para o chão de fábrica	IMM	<i>Immediate release</i>	-
	EDD-PA	<i>Earliest due date-Path Aggregation</i>	Fredendall et al. (2010)
	SJPT-PA	<i>Shortest job processing time-Path Aggregation</i>	
Priorização das ordens em cada W_h	FIFO	<i>First In First Out</i>	-
	ODD	<i>Operation due date</i>	Thürer et al. (2014 ^a)

Fonte: Essa Pesquisa (2017).

A regra JIS estima a data de entrega com base no tempo de processamento e o número de ordens (*jobs*) atualmente no sistema. A partir de dados históricos, a função JIS apresentada em (3.1) foi ajustada utilizando a técnica estatística de regressão linear (Hair et al., 2010).

$$DD_{o_k} = T_{o_k} + 0.97 + (0.00592 * JO) + (0.0652 * TPT_{o_k}) \quad (3.1)$$

Onde: DD_{o_k} é a data de entrega da ordem k ; T_{o_k} é o tempo de chegada; JO número de ordens atualmente no sistema; e TPT_{o_k} é o tempo total de processamento.

A regra IWIQ determina a DD_{o_k} por meio soma dos tempos de processamento da ordem o_k e do tempo de processamento iminente das ordens que estão na fila e sendo processadas nas estações de trabalho que fazem parte do roteiro de produção de o_k . A DD_{o_k} de $o_k \in R_1$ é dada pela equação (3.2), caso contrário (3.3).

$$DD_{o_k R_1} = T_{o_k} + WL_{R_1} + TPT_{o_k} \quad (3.2)$$

$$DD_{o_k R_2} = T_{o_k} + WL_{R_2} + TPT_{o_k} \quad (3.3)$$

Onde: WL_{R_1} e WL_{R_2} representam a carga de trabalho no instante em que DD_{o_k} é determinada.

Os métodos de liberação de ordens são: IMM, EDD-PA e SJPT-PA. O método IMM libera imediatamente as ordens para o sistema produtivo. No EDD-PA, ordens são sequenciadas de acordo com a regra EDD e somente liberadas para produção, se carga de trabalho da ordem, somada com a carga direta e indireta de todas as estações de trabalho precedentes a W_6 não exceda o limite superior de carga. Através de rodadas piloto com o modelo de simulação, os limites máximos foram definidos como 205 e 98 horas de carga de trabalho para R_1 e R_2 respectivamente. Esses valores resultam em um nível de estoque em processo usualmente observado no sistema. Compete salientar que estas normas de carga de trabalho também foram aplicadas para SJPT-PA, que prioriza as ordens com menor tempo de processamento.

Para controlar o fluxo de trabalho no chão de fábrica, consideram-se duas regras de expedição: FIFO (*First In, First Out*) e ODD (*Operation Due Date*). A regra FIFO sequencia ordens de acordo com a chegada na fila de uma estação W_h . O índice de prioridade baseado na regra ODD é calculado através da Equação (3.4).

$$\text{Se } (DD_{o_k} - t_{o_k}^r) \geq 0; \delta_{o_k h} = t_{o_k}^r + h \frac{(DD_{o_k} - t_{o_k}^r)}{n_{o_k}^{RO}} \quad (3.4)$$

$$\text{Caso contrário } (DD_{o_k} - t_{o_k}^r) < 0; \delta_{o_k h} = t_{o_k}^r$$

Onde: $\delta_{o_k h}$ é o índice de prioridade para uma ordem k em W_h ; $t_{o_k}^r$ é a data de liberação para produção; e $n_{o_k}^{RO}$ representa o número de estações de trabalho pertencentes ao roteiro de produção de o_k .

Para cada combinação de regras WLC apresentadas na Tabela 3.3 foram executadas 30 replicações com o modelo de simulação e os resultados médios foram coletados sobre 1541 horas (67 dias de operações). O período de aquecimento foi de 161 horas. Compete observar que devido ao desempenho insatisfatório, as alternativas JIS-IMM-FIFO, FIFO-IWIQ-IMM e JIQ-IMM-FIFO foram excluídas da avaliação.

Em relação a etapa 4 do modelo FITradeoff, a suposição de homogeneidade da variância foi violada, assim, o teste de Kruskal-Wallis foi utilizado. Para um nível de significância de 5%, os resultados revelaram que as diferentes combinações de regras WLC causam um impacto significativo no desempenho de cada atributo (valor- $p=0,000$ para todos os experimentos). Posterior a etapa de análise estatística, a matriz de consequências obtida na etapa 5 é apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Matriz de consequências.

a_i	Vetor de decisão			Vetor das consequências			
	d_i	r_i	s_i	T_c	P_q	TT_t	T
1	JIS	IMM	ODD	\$39.161,54	487.172	85,61	2,17
2	JIS	EDD-PA	FIFO	\$32.759,59	477.506	95,09	1,22
3	JIS	SJPT-PA	FIFO	\$34.119,25	477.414	92,10	3,96
4	JIS	EDD-PA	ODD	\$35.068,70	485.824	97,28	1,18
5	JIS	SJPT-PA	ODD	\$36.584,38	477.510	92,44	3,43
6	IWIQ	IMM	ODD	\$35.664,28	484.550	88,36	1,42
7	IWIQ	EDD-PA	FIFO	\$38.241,48	477.908	93,31	1,31
8	IWIQ	SJPT-PA	FIFO	\$49.131,19	477.414	92,10	2,23
9	IWIQ	EDD-PA	ODD	\$44.160,91	480.194	97,70	1,18
10	IWIQ	SJPT-PA	ODD	\$48.291,06	488.308	93,66	2,00
11	JIQ	IMM	ODD	\$38.603,25	483.932	87,93	1,46
12	JIQ	EDD-PA	FIFO	\$40.560,83	483.632	99,18	1,47
13	JIQ	SJPT-PA	FIFO	\$46.580,93	477.414	92,10	2,26
14	JIQ	EDD-PA	ODD	\$39.271,26	475.912	91,52	1,42
15	JIQ	SJPT-PA	ODD	\$46.944,36	473.718	91,22	2,11

Fonte: Essa Pesquisa (2017).

Na etapa 6, o método FITradeoff (de Almeida et al., 2016) foi aplicado para apoiar à escolha de uma combinação de regras WLC que proporcione um desempenho satisfatório para T , Tc , Pq e TTt . Primeiramente, a matriz de consequências (Tabela 3.4) é inserida no FITradeoff DSS. A Figura 3.3 apresenta a tela após o *input* da matriz de consequências.

Figura 3.3 – Input matriz de consequências.

..... FITradeoff – Flexible and interactive Tradeoff elicitation procedure for choice additive model, code FU-T1ENO-CF4f

File Help

New Open Reset Exit

Presentation Input

Input Values:

Criteria	tardy	total cost	total throughput time	production quantity
0-ContMin; 1-ContMax; 2-DiscMin; 3-DiscMax	0	0	0	1
Weights				
type	1	1	1	1
a				
b				

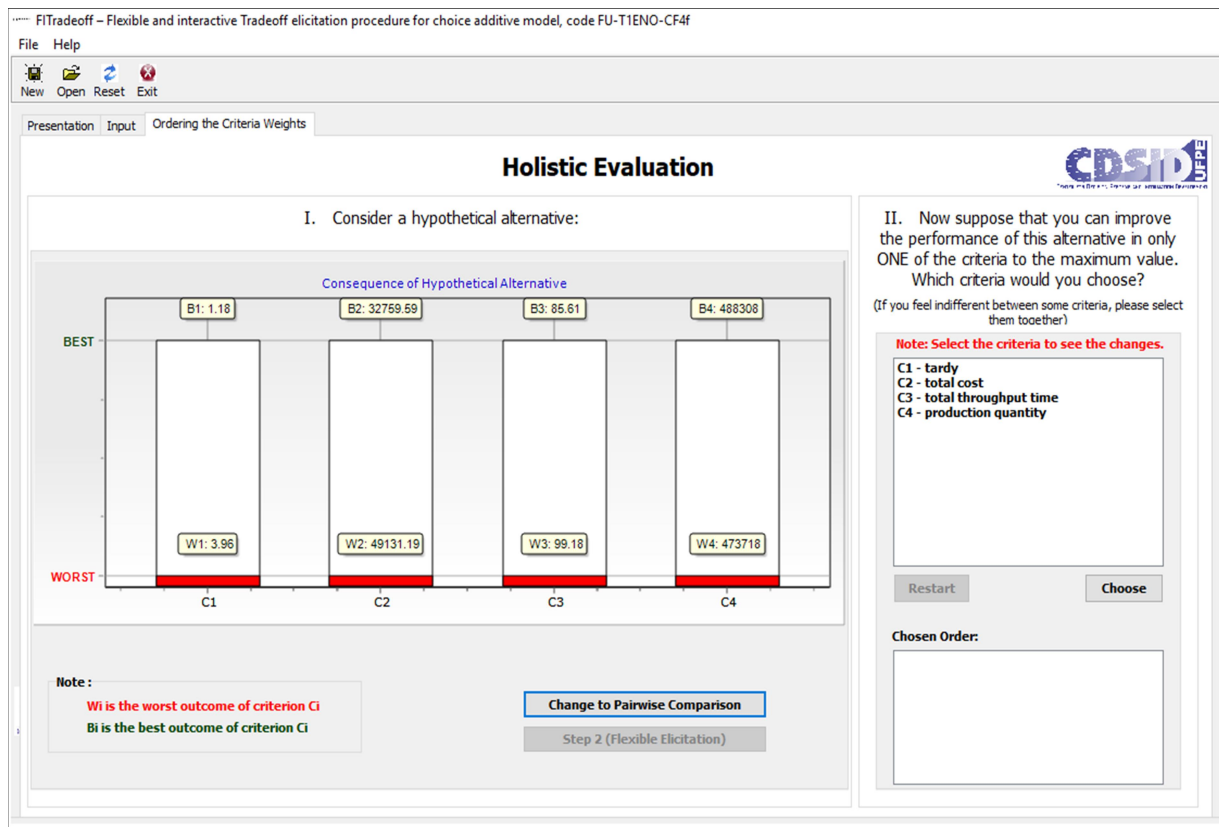
ALTERNATIVES **CONSEQUENCES MATRIX**

1	2.17	39161.54	85.61	487172
2	1.22	32759.59	95.09	477506
3	3.96	34119.25	92.1	477414
4	1.18	35068.7	97.28	485824
5	3.43	36584.38	92.44	477510
6	1.42	35664.28	88.36	484550
7	1.31	38241.48	93.31	477908
8	2.23	49131.19	92.1	477414
9	1.18	44160.91	97.7	480194
10	2	48291.06	93.66	488308
11	1.46	38603.25	87.93	483932
12	1.47	40560.83	99.18	483632
13	2.26	46580.93	92.1	477414

Fonte: Essa Pesquisa (2017).

Em seguida, ocorre a ordenação de λ_j com base nas preferências do decisor sobre as consequências (máximas e mínimas) de cada atributo. As questões utilizadas nesta fase da elicitação são ilustradas na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Ordenação dos atributos.



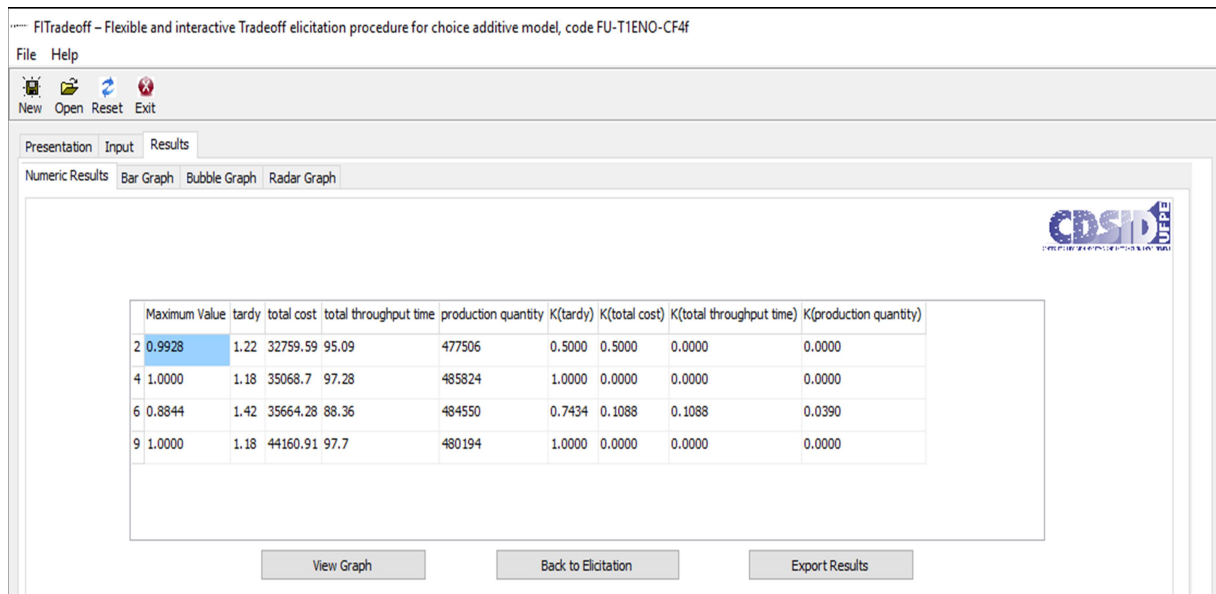
Fonte: Essa Pesquisa (2017).

Nesta aplicação, a ordem obtida é a seguinte:

$$\lambda_T > \lambda_{Tc} > \lambda_{TTt} > \lambda_{Pq} \quad (3.5)$$

A ordenação dos critérios em (3.5) foi incorporada ao modelo de LPP (Problema de Programação Linear) como uma restrição. Considerando apenas a ordenação (3.5), o método FITradeoff recomenda um conjunto formado por quatro alternativas potencialmente ótimas a_2 , a_4 , a_6 e a_9 , conforme demonstrado na Figura 3.5. Uma vez que o decisor está disposto a continuar o processo de eliciação, a comparação par a par das consequências é feita por meio de questões baseadas na preferência estrita e na indiferença (de Almeida et al., 2016). A Figura 3.6 mostra um exemplo de pergunta e as quatro possíveis respostas que são apresentadas ao decisor. O decisor precisa escolher entre as opções “Consequence A”, “Consequence B”, “Indifferent” ou “No Answer” e clicar em Ok. O DSS avisará caso alguma das respostas não seja consistente em relação às informações fornecidas anteriormente.

Figura 3.5 – Resultados Parciais.



Fonte: Essa Pesquisa (2017).

Figura 3.6 – Perguntas apresentadas ao decisor.

The screenshot shows the FITradeoff software interface in the 'Flexible Elicitation' tab. The question is 'Which consequence do you prefer?'. The user is asked to answer by choosing one option. The interface displays two consequences, A and B, with their respective values for four criteria: C1 (tardy), C2 (total cost), C3 (total throughput time), and C4 (production quantity). The values are as follows:

Criterion	Consequence A	Consequence B
C1 - tardy	X1: 2.57	W1: 3.96, B1: 1.18
C2 - total cost	W2: 49131.19	W2: 49131.19, B2: 32759.59
C3 - total throughput time	W3: 99.18	W3: 99.18, B3: 85.61
C4 - production quantity	W4: 473718	B4: 488308

A note at the bottom explains the color coding: W is the worst outcome of criterion Ci, X is an outcome in between best and worst of criterion Ci, and B is the best outcome of criterion Ci. On the right, there are options to choose between Consequence A, Consequence B, Indifferent, or No Answer, and buttons for 'OK', 'Show Current Results', and 'Number of Questions Answered: 0'.

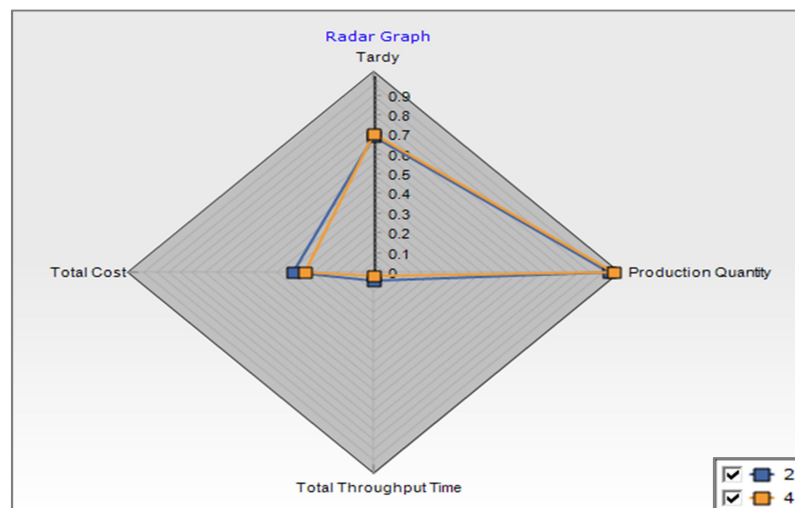
Fonte: Essa Pesquisa (2017).

A cada resposta dada pelo decisor, novas questões são apresentadas, visando identificar o valor de indiferença entre as consequência A e B. A medida que o decisor fornece novas

informações de preferência, novas restrições são adicionadas no modelo de LPP, contribuindo para a redução do espaço de pesos. Esta é a forma pela qual o processo iterativo explora somente a informação parcial disponível para encontrar a solução para o problema. Após cinco perguntas respondidas, o novo conjunto de alternativas potencialmente ótimas é: a_2 , a_4 e a_6 . Após nove perguntas respondidas, a_6 foi considerada dominada e, portanto, somente a_2 e a_4 permanecem como potenciais soluções para este problema.

O DSS fornece ao decisor diferentes tipos de gráficos que permitem analisar os resultados parciais. A Figura 3.7 mostra o desempenho normalizado entre 0 e 1 dessas duas alternativas para cada critério. Os critérios são ordenados no sentido anti-horário, em ordem decrescente de importância.

Figura 3.7 – Desempenho de a_2 e a_4 .



Fonte: Essa Pesquisa (2017).

O gráfico ilustrado na Figura 3.7 pode ser uma ferramenta útil para auxiliar na comparação entre a_2 e a_4 . Neste gráfico, quanto mais perto o quadrado que representa o desempenho da alternativa estiver do vértice do gráfico, melhor será esta alternativa para o respectivo critério. Assim, pode ser visto que a_2 e a_4 estão quase empatadas para P_q , contudo, a_2 fornece um custo total ligeiramente menor, enquanto que a_4 gera um melhor desempenho para o atraso médio dos pedidos. Esta análise demonstra que a_2 e a_4 oferecem uma solução apropriada para o problema de seleção de regras do WLC. Assim, o decisor poderia escolher uma alternativa sem a necessidade de responder perguntas adicionais, o que

possibilita reduzir o tempo e esforço cognitivo no processo de elicitação. No entanto, este decisor preferiu continuar o processo de elicitação e após duas perguntas respondidas foi encontrada a_4 como sendo a única solução.

3.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em comparação com outros métodos multicritério, o FITradeoff possibilita uma redução no esforço e tempo de modelagem (de Almeida et al., 2016). Durante a elicitação, é possível obter um gráfico de desempenho das alternativas, permitindo que o decisor opte por aceitar essa solução, ou continuar o processo fornecendo mais informações. Caso o decisor não esteja disposto a continuar, a flexibilidade do método permite que o decisor pare o processo, a qualquer momento, mantendo os resultados parciais.

Um total de onze perguntas foram necessárias para encontrar uma solução factível. Ao utilizar o procedimento de elicitação tradicional de Keeney e Raiffa (1976), nove perguntas seriam necessárias para encontrar a solução (de Almeida et al., 2016). Embora mais perguntas tenham sido necessárias, o FITradeoff DSS usa perguntas que são mais fáceis para o decisor responder do ponto de vista cognitivo. Ou seja, no procedimento de compensação tradicional, pelo menos três destas nove perguntas exigem que o decisor especifique diretamente o valor de indiferença entre duas consequências, podendo ocasionar inconsistências (Weber e Borchering, 1993). No FITradeoff, o decisor responde perguntas baseadas na preferência estrita, para qual esforço cognitivo é menor e portanto, menos inconsistências são esperadas (de Almeida et al., 2016).

Ao resolver este problema a partir de uma perspectiva unidimensional, a_2 , a_{10} , a_1 e a_4 fornecem o melhor desempenho médio para custo total, quantidade produzida, lead time total e atraso, respectivamente. Compete observar que a_9 fornece desempenho similar à a_4 para o atributo T . No entanto, essas alternativas também apresentam desvantagens em comparação à solução recomendada pelo modelo proposto. Por exemplo, a escolha de a_2 causa uma redução de 2% na quantidade total de calçados produzidos pela empresa, causando também um impacto negativo de 3% para o atributo atraso dos pedidos. Ainda, a_{10} e a_1 proporcionam um aumento de mais de \$ 4092,84 no atributo de custo total e reduzem a capacidade da empresa de cumprir prazos de entrega em pelo menos 40%. Uma vez que não há uma combinação de regras que forneça o melhor desempenho para todos os critérios, o uso de uma abordagem MCDM/A pode ser necessária para avaliar as vantagens e desvantagens das alternativas à

escolha, visando fornecer uma recomendação para este problema de seleção de regras operacionais do WLC.

Uma das características principais do modelo proposto em relação aos modelos WLC apresentados na literatura é o uso de uma abordagem compensatória. O MAVT permite realizar compensações entre vários critérios de desempenho de diferentes naturezas, tais como lead time total e atraso médio. Isto é particularmente relevante para subsidiar este processo de decisão, pois uma regra de controle pode ser muito eficaz para o atributo, mas fornecer um desempenho insatisfatório em outro atributo. Assim, aplicando o FITradeoff, o decisor pode fazer compensações entre critérios a fim de obter uma solução final que reflita aos objetivos que gostaria de alcançar.

Embora o modelo FITradeoff possibilite incorporar os julgamentos de trade-off do decisor na avaliação de diferentes regras WLC, sua aplicação está condicionada ao atendimento dos pressupostos relativos ao uso da MAVT. Deste modo, é necessário validar o pressuposto de independência em preferência (Keeney e Raiffa, 1976) entre os critérios utilizados, o qual exige que as preferências do decisor para um determinado atributo não são influenciadas por outro atributo. Além disso, o decisor deve estar disposto à compensar o baixo desempenho de um atributo, pela vantagem obtida em um outro atributo (racionalidade compensatória).

4 APOIO MULTICRITERIO PARA DETERMINAR OS PARÂMETROS OPERACIONAIS PARA SISTEMAS CONWIP/MTS

O modelo MAVT proposto no capítulo anterior permite que o decisor efetue compensações entre múltiplos atributos, considerando o desempenho médio das alternativas simuladas. Este capítulo apresenta um modelo de decisão baseado na MAUT que incorpora as incertezas inerentes ao sistema *conwip*/MTS nos julgamentos de trade-off. A melhor combinação de parâmetros operacionais é obtida através de uma função de utilidade esperada multiatributo, a qual representa as preferências e atitude de risco do decisor em relação à distribuição de probabilidade dos dados simulados. É também descrita uma aplicação numérica utilizando dados realísticos de uma linha de montagem de múltiplos tipos de produtos.

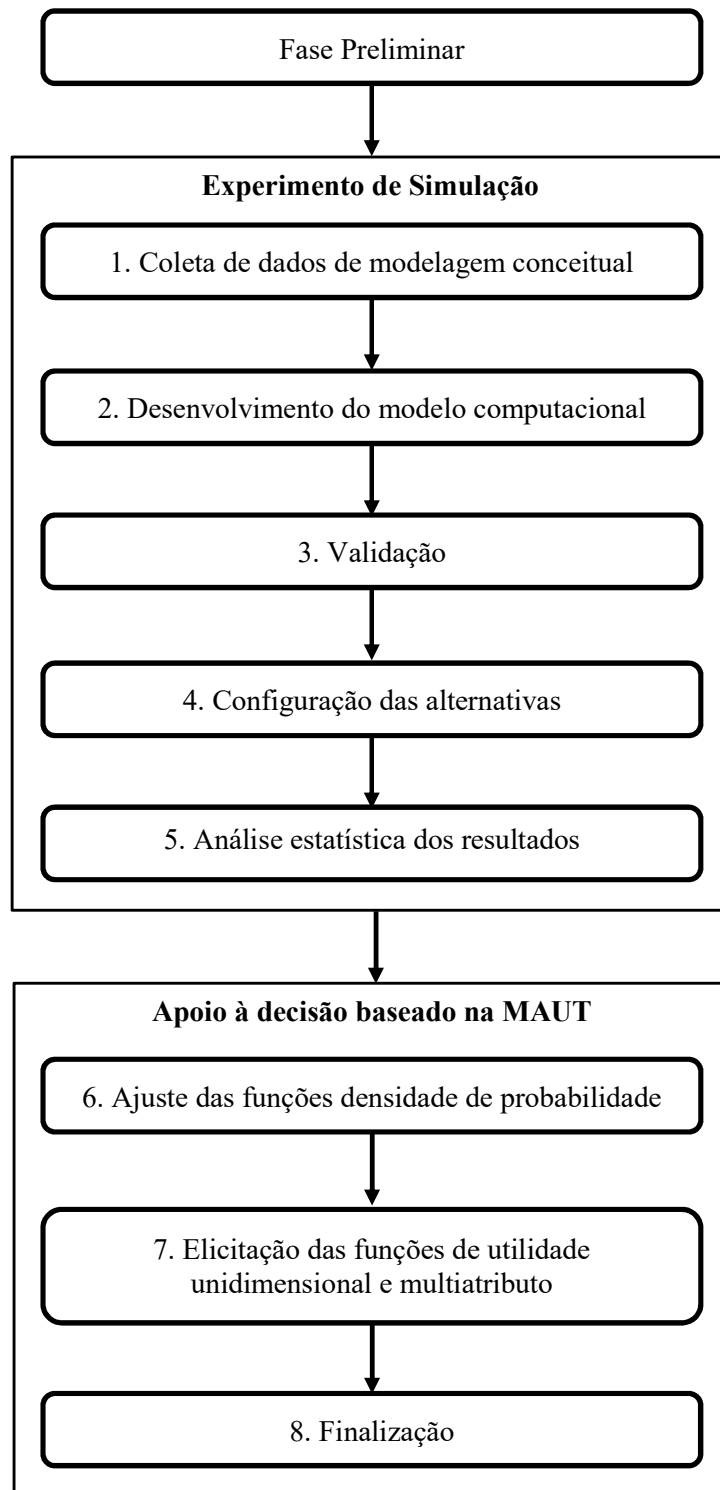
4.1 MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO SOB RISCO

O problema de decisão consiste em selecionar $a_i \in A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ de um conjunto com n opções, considerando as consequências de superestimar e as consequências de subestimar os níveis dos estoques em processo (*wip*) e de produtos prontos (*fg*). As consequências de subestimar estão associadas aos custos da falta de estoques (*SC*) ou a baixa taxa de produção efetiva (*TH*) do sistema *conwip*/MTS (Hopp e Spearman, 2013). As consequências de superestimar *wip* e *fg* estão relacionadas ao aumento de *CT* e a incrementos nos custos de manutenção de estoques (*HC*). Neste modelo, cada a_i representa uma quantidade de produtos acabados $fg_i(pr_t) \in FG = \{fg_1(pr_1), fg_2(pr_2), \dots, fg_n(pr_t)\}$ para o conjunto $PR = \{pr_1, pr_2, \dots, pr_t\}$ com t tipos de produtos e também, a um *wip* $wip_i(pr_t) \in WIP = \{wip_1(pr_t), wip_2(pr_t), \dots, wip_n(pr_t)\}$. A solução recomendada para o problema corresponde ao vetor $[fg_i(pr_t); wip_i(pr_t)]$ que maximize a função de utilidade esperada multiatributo, a qual é consistente com os julgamentos de trade-off do decisor em relação as incertezas de *CT*, *TH*, *SC* e *HC*.

A Figura 4.1 mostra as diferentes etapas do modelo proposto para este problema. Na fase preliminar, o decisor e os demais atores que estão envolvidos neste problema de decisão devem ser caracterizados. Após a identificação dos atores, é necessário apresentar os principais conceitos concernentes à simulação de eventos discretos (Law e Kelton, 2000; Pidd, 2009) e a teoria da utilidade multiatributo (Keeney e Raiffa, 1976). Além disso, as

etapas desse modelo de decisão também precisam ser esclarecidas para todos os envolvidos no projeto.

Figura 4.1 – Etapas do modelo de decisão MAUT.



Fonte: Essa Pesquisa (2017).

A etapa subsequente inclui a coleta de dados para modelagem conceitual e especificação das distribuições de probabilidade. Nesta pesquisa, as distribuições de estatísticas teóricas foram ajustadas por meio do software Minitab 17 à um nível de significância igual à 5%. Em seguida, o modelo conceitual e os parâmetros das distribuições de probabilidade são inseridos em um simulador de eventos discretos. É recomendado que as consequências de cada a_i sejam obtidas para os atributos CT , TH , SC e HC . Corridas piloto com o modelo devem ser executadas para fins de validação, conforme descrito em Law e Kelton (2000).

O conjunto A deve ser desenvolvido com base em $fg_i(pr_t)$ e $wip_i(pr_t)$. A previsão da demanda para cada tipo de produto pode ser utilizada como referência para estabelecer um conjunto de alternativas consistente com o planejamento de produção a curto prazo. Além disso, é necessário especificar as regras de aquecimento do modelo computacional e o número de replicações independentes (R_{model}). Os resultados obtidos no experimento de simulação devem ser avaliados por meio de técnicas como ANOVA (Hair et al., 2010) e o teste de Kruskal-Wallis teste (Siegel e Castellan, 1988). Se o vetor $[fg_i(pr_t); wip_i(pr_t)]$ apresentar um efeito significativo sobre cada atributo de desempenho considerando no modelo, então a abordagem MAUT é viável.

Neste estudo, o objetivo é escolher uma alternativa que forneça o maior valor para a função de utilidade esperada multiatributo. Essa função deve ser obtida através da utilidade unidimensional esperada de cada a_i dado j . Deste modo, a etapa 6 consiste em ajustar as funções de densidade de probabilidade, que serão empregadas na Equação 4.2. Assim, a função de densidade de probabilidade amostral $f(x_j)$ deve ser definida a partir das saídas do experimento de simulação x , produzidas sob $R_{model} = \gamma$ replicações com o modelo, dado j .

Depois de ajustar as funções $f(x_j)$, o valor da utilidade global de a_i pode ser obtido com base no desempenho de CT , TH , SC e HC . Para tanto, é necessário elicitar as funções de utilidade sobre o conjunto de atributos avaliados neste problema de decisão. Este processo inclui a obtenção de informações subjetivas da decisão à luz de um procedimento de elicitação, aplicado para ajustar uma função de utilidade unidimensional que reflita as preferências e perfil de risco do decisor (Keeney e Raiffa, 1976).

A função *conwip*/MTS de utilidade multiatributo pode ser representada como:

$$U_i(a_i) = \lambda_{CT}u_{CT}(a_i) + \lambda_{TH}u_{TH}(a_i) + \lambda_{HC}u_{HC}(a_i) + \lambda_{SC}u_{SC}(a_i) \quad (4.1)$$

Este modelo de decisão assume que a racionalidade do decisor é compensatória (de Almeida et al., 2015) e a função utilidade multiatributo em (4.1) é aditiva. O uso de uma

função de utilidade aditiva envolve a validação dos pressupostos de independência em utilidade e independência aditiva, para as preferências do decisor avaliadas sobre CT , TH , SC e HC . Ao validar esses pressupostos, a função de utilidade em (1) pode ser obtida através de λ_j e das funções de utilidade unidimensional $u_{CT}(a_i)$, $u_{TH}(a_i)$, $u_{HC}(a_i)$ e $u_{SC}(a_i)$. A determinação do valor de λ_j é feita por meio de protocolos de elicitacão envolvendo comparações de consequências probabilísticas, em que a seguinte propriedade é verificada: $\lambda_{CT} + \lambda_{TH} + \lambda_{HC} + \lambda_{SC} = 1$.

Para considerar o comportamento probabilístico das consequências simuladas na função (4.1), a utilidade de cada a_i dado j deve ser avaliada em termos de utilidade esperada $E[u_j(a_i)]$, como mostrado em (4.2):

$$E[u_j(a_i)] = \sum_{R_{model}=1}^{\gamma} u_j(x_{i,j})f(x_j) \quad (4.2)$$

Onde $x_{i,j}$ representa o conjunto de saídas de simulação obtidas em γ replicações de cada a_i sobre j ; $f(x_j)$ é a função de densidade de probabilidade amostral; e $u_j(x_{i,j})$ é a função utilidade unidimensional.

Considerando a incerteza de $x_{i,j}$, decisor deve selecionar uma alternativa que maximize o valor de utilidade esperada. Assumindo a função aditiva, as equações 4.2 e 4.1 geram a seguinte função de utilidade esperada do *conwip*/MTS multiatributo a ser maximizada (4.3):

$$\begin{aligned} MAX_{(a_i)} & \lambda_{CT} \left(\sum_{R_{model}=1}^{\gamma} u_{CT}(x_{i,CT})f(x_{CT}) \right) + \lambda_{TH} \left(\sum_{R_{model}=1}^{\gamma} u_{TH}(x_{i,TH})f(x_{TH}) \right) \\ & + \lambda_{HC} \left(\sum_{R_{model}=1}^{\gamma} u_{HC}(x_{i,HC})f(x_{HC}) \right) + \lambda_{SC} \left(\sum_{R_{model}=1}^{\gamma} u_{SC}(x_{i,SC})f(x_{SC}) \right) \end{aligned} \quad (4.3)$$

A escolha de a_i é influenciada pela natureza conflituosa dos atributos de decisão e a incerteza de $x_{i,j}$, conforme (4.3). Estudos anteriores indicam que o nível de *fg* influencia o trade-off entre o *HC* e *SC*, enquanto que o *wip* pode influenciar o desempenho de *CT* e *TH*, como descrito por Little (1961). Portanto, a solução recomendada para este problema

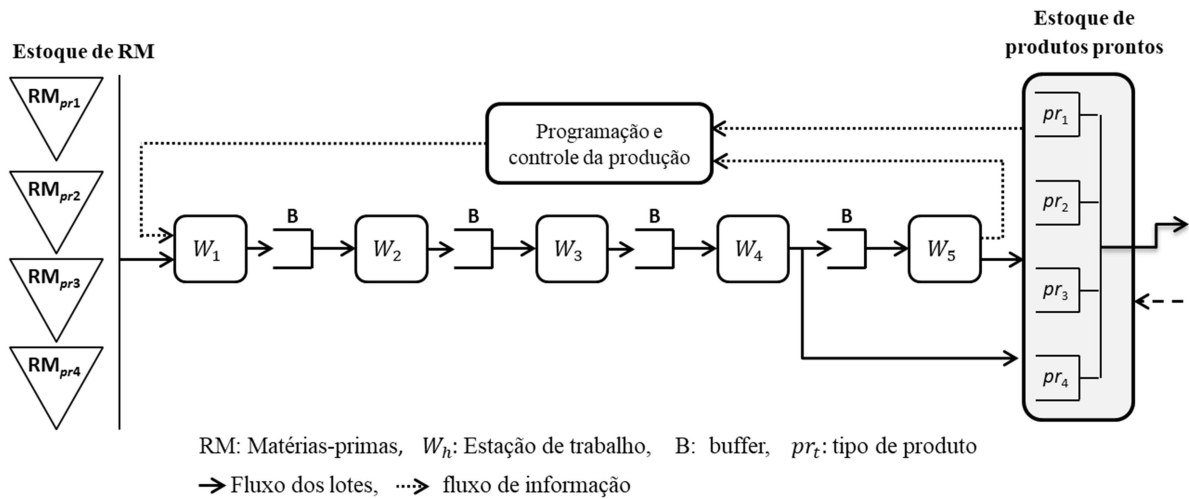
multiatributo é uma solução $[fg_i(pr_t); wip_i(pr_t)]$ que oferece o maior valor para (4.3) e considera as preferências e julgamentos de trade-off especificados pelo decisor.

A última etapa do modelo consiste em verificar a sensibilidade de $U(a_i)$ quanto à variações no valor de λ_j . Para este propósito, o teste estatístico não paramétrico de Kendall τ (Kendall, 1970) foi empregado para examinar a ocorrência de diferenças significativas entre o ranking de alternativas obtido com a aplicação da MAUT e cada ranking gerado através da simulação de diferentes valores de λ_j . Esta etapa também inclui um relatório final para o decisor, indicando a solução recomendada e as suposições sobre o modelo.

4.2 APLICAÇÃO DO MODELO MAUT

Esta seção apresenta uma aplicação numérica utilizando dados realísticos de uma empresa metal mecânica. O sistema sob investigação refere-se a uma linha de montagem de múltiplos tipos de produtos composta por cinco estações de trabalho (W_h), uma unidade de estoque de matérias-primas e uma unidade destinada a armazenagem de produtos prontos. O diagrama esquemático deste sistema é mostrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Diagrama do sistema conwip/MTS.



Fonte: Essa Pesquisa (2017).

Os tipos de produtos pr_1 , pr_2 , pr_3 e pr_4 entram no sistema pela estação de trabalho W_1 , a qual monta as matérias-primas em um dispositivo que é configurado conforme cada pr_t . Os produtos de W_1 são enviados para W_2 , para a execução do processo de soldagem. Operações

de usinagem e montagem são executadas nas estações de trabalho W_3 e W_4 , respectivamente. Para pr_1 e pr_2 , ocorre uma operação de retífica em W_5 . Os produtos prontos de W_4 (pr_3 e pr_4) e W_5 são enviados para o estoque de produtos prontos, sendo enviados para os clientes conforme a estratégia MTS.

Em relação ao funcionamento do *conwip*, a linha de montagem utiliza um sistema de informação MES (*manufacturing execution system*) que indica quando e quais tipos de produtos devem ser liberados para produção. Esta linha opera dois turnos de 7,5 horas por dia, cinco dias por semana.

Os dados estocásticos referentes a cada W_h são apresentados na Tabela 4.1. Para ajustar as distribuições de probabilidade foi utilizado teste de Anderson-Darling (Anderson e Darling, 1954). Vale observar que este teste também foi empregado para ajustar as funções $f(x_j)$.

Tabela 4.1 – Parâmetros estatísticos das estações de trabalho.

	Estações de trabalho W_h				
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
Tempo de processamento para pr_1	Lognormal (8,5; 1,8)	Lognormal (13,4; 0,9)	Lognormal (20,56; 3,126)	Lognormal (24,87; 11,126)	Normal (1,8; 0,25)
Tempo de processamento para pr_2	Lognormal (15,9; 3,27)	Lognormal (24,9; 1,21)	Normal (27,85; 1,2)	Lognormal (39,56; 27,126)	Exponencial (3)
Tempo de processamento para pr_3	Lognormal (19,456; 4,20)	Lognormal (27,909; 2,1)	Normal (23,85; 2,72)	Lognormal (30,56; 20,022)	
Tempo de processamento para pr_4	Lognormal (20,452; 2,4)	Lognormal (33,2; 5,7)	Lognormal (29,56; 3,63)	Lognormal (34,85; 16,022)	
MTBF	Lognormal (150; 2)		Lognormal (192; 22)		
MTTR	Exponencial (15)		Exponencial (30)		
Tempo de setup			Lognormal (6,5; 1,9)	Normal (9,2; 1,4)	
Tempo de retrabalho		Exponencial (3)			Exponencial (4)

(Media Aritmética, Desvio Padrão)

Dados em minutos por lote de produção

Fonte: Essa Pesquisa (2017).

O experimento de simulação foi desenvolvido por meio do software MicroSaint Sharp à luz das seguintes condições que ocorrem no sistema real:

- As matérias-primas estão disponíveis na quantidade e no momento necessário;
- Foi observado que o tempo de transferência de matérias-primas entre o almoxarifado e W_1 é igual a 1 minuto;
- O setup é considerado de sequência independente;
- O tamanho do lote de produção de cada pr_t foi determinado de modo a obter um melhor aproveitamento das matérias-primas e insumos.
- O tamanho do lote de pr_t permanece inalterado durante o experimento de simulação;
- Devido à proximidade entre as estações de trabalho, o tempo de transferência de materiais entre as estações foi considerado insignificante. O mesmo se aplica para a transferência dos produtos prontos para a área de estocagem;
- Estação W_4 é o gargalo da linha;
- Atualmente, o sistema utiliza a regra FIFO para sequenciar as ordens da lista de liberação planejada. A mesma regra também é utilizada para controlar o fluxo das ordens liberadas para a linha;
- Com base em dados históricos, a variação da demanda prevista foi modelada segundo uma distribuição uniforme, centralizada no valor de previsão com um intervalo igual a 15% e + 15% do valor nominal;
- Por causa das características deste tipo de mercado consumidor, as demandas insatisfeitas são consideradas pendentes. Ainda, os clientes não aceitam entregas parciais ou antecipadas.

Além disso, foi considerado na simulação o procedimento adotado pela empresa para quantificar o valor de SC e HC . Compete salientar que existem diferentes técnicas apresentadas na literatura para este propósito (Gupta et al., 2012; Luangkesorn et al., 2016). Este estudo adotou um $\gamma = 30$, o qual representa quatro semanas de trabalho (dois turnos). Para fins de validação do modelo computacional foi comparado de modo subjetivo a quantidade de lotes produzidos durante a simulação, com o valor proveniente do sistema real. Adesão obtida foi de 96,4%, considerando uma semana de produção e igual a 98,2% para quatro semanas de produção.

Vinte alternativas foram desenvolvidas para explorar as preferências e avaliações de trade-off do decisor em relação aos quatro atributos de desempenho modelados. A configuração de cada alternativa é apresentada na Tabela 4.2. Cada dimensão do vetor $fg_i[pr_1, pr_2, pr_3, pr_4]$ denota o valor do estoque de um tipo de produto finalizado e wip representa o nível máximo de estoque em processo admitido no sistema para pt_1 . Para os demais tipos de produtos, $wip_i(pr_t)$ é ajustado conforme a média do tempo de processamento de pr_t na estação de trabalho W_4 (ver Hopp e Spearman (2013) para detalhes deste procedimento). O número de replicações independentes para cada a_i foi definido com base no método apresentado por Law e Kelton (2000), considerando o desvio padrão de CT obtido para $\gamma = 30$. Como resultados, $\gamma = 26$ replicações aleatórias devem ser realizadas para cada alternativa.

Tabela 4.2 – Configuração das alternativas.

Alternativas	fg_i (Lotes)				$wip_i(pr_1)$ (Lotes)
	pr_1	pr_2	pr_3	pr_4	
a_1	6	8	9	8	2
a_2	6	8	9	8	3
a_3	6	8	9	8	4
a_4	6	8	9	8	5
a_5	6	8	9	8	6
a_6	5	7	8	7	2
a_7	5	7	8	7	3
a_8	5	7	8	7	4
a_9	5	7	8	7	5
a_{10}	5	7	8	7	6
a_{11}	4	6	7	6	2
a_{12}	4	6	7	6	3
a_{13}	4	6	7	6	4
a_{14}	4	6	7	6	5
a_{15}	4	6	7	6	6
a_{16}	3	5	6	5	2
a_{17}	3	5	6	5	3
a_{18}	3	5	6	5	4
a_{19}	3	5	6	5	5
a_{20}	3	5	6	5	6

Fonte: Essa Pesquisa (2017).

Referente à significância dos efeitos causados pelo vetor $[fg_i(pr_t); wip_i(pr_t)]$, os testes ANOVA e Kruskal-Wallis foram executados por meio do Minitab 17. Devido ao pressuposto de homogeneidade de variância (Hair et al., 2010), o teste de Kruskal-Wallis foi aplicado somente para o atributo CT . Os resultados indicam que este vetor tem um impacto significativo (valor- $p=0,000$) para todos os quatro atributos avaliados.

Após a examinar a significância dos efeitos de $[fg_i(pr_t); wip_i(pr_t)]$, é possível ajustar a função $f(x_j)$ para representar as incertezas do sistema de produção no modelo MAUT. Os melhores ajustes obtidos com o teste de Anderson-Darling foram os seguintes: Lognormal (AD: 6,221); Menor valor extremo (AD: 11,014); 3-parâmetro Lognormal (AD: 0,436); e para o caso de HC, o 3-parâmetro Lognormal (AD: 2,218).

Para elicitar as funções u_j , esta pesquisa utilizou o protocolo descrito por Keeney e Raiffa (1976). Para o atributo CT , que representa o lead time de produção de um lote de pr_t , os limites do espaço de consequências foram definidos com base em dados históricos coletados no MES. A partir destes dados, o decisor precisa declarar uma consequência x_{CT}^0 que seja apropriadamente elevada, de modo a representar um valor de utilidade igual a zero $u_{CT}(x_{CT}^0) = 0$. Também é necessário que o decisor expresse x_{CT}^* que seja suficientemente baixo para $u_{CT}(x_{CT}^*) = 1$. Em seguida, loterias que envolvem x_{CT}^r , x_{CT}^0 e x_{CT}^* dentro do intervalo $[x_{CT}^0; x_{CT}^*]$ são formuladas para encontrar o valor do equivalente certo $x_{CT}^{r'}$, para cada loteria elicitada. Essas respostas serão usadas no ajuste da função utilidade u_{CT} . O perfil de risco do decisor é definido considerando o equivalente certo e o valor esperado de cada loteria avaliada no intervalo $[x_{CT}^0; x_{CT}^*]$. Os valores de $x_{CT}^{r'}$ são plotados em um gráfico de dispersão e através do método de regressão não-linear, a função de utilidade unidimensional é ajustada. Verificações de consistência também foram realizadas por meio da comparação entre a função utilidade e a atitude de risco do decisor.

A função utilidade de CT é dada em (4.4). Esta função exponencial decrescente representa uma atitude conservadora do decisor em relação aos riscos associados as loterias que foram avaliadas para $[x_{CT}^0; x_{CT}^*]$.

$$u_{CT}(a_i) = 1,45104e^{-(0,394295x_{i,CT,\gamma})} \quad (4.4)$$

Para a elicitação da função utilidade da taxa efetiva de produção u_{TH} foram utilizados dados referentes ao takt-time e capacidade efetiva de produção para auxiliar no processo de elicitação. Ao ajustar os valores de $x_{TH}^{r'}$, uma função utilidade Weibull *Growth* monotonicamente crescente (4.5) foi obtida. Esta curva descreve um comportamento de

neutralidade de risco para uma pequena quantidade lotes produzidos por hora; no entanto, a aversão ao risco é observada por um elevado nível de TH .

$$u_{TH}(a_i) = 1,05646 - [1,01593e^{-2.37778(x_{i,TH,\gamma}^{2.22068})}] \quad (4.5)$$

A elicitación da função utilidade de HC utilizou dados referentes ao custo de manutenção de estoques que foram coletados e validados pelo profissional de logística da empresa. Como resultado, a função de utilidade exponencial monotonicamente decrescente (4.6) permite representar a aversão ao risco do decisor para as loterias são avaliadas dentro do intervalo $[x_{HC}^0; x_{HC}^*]$.

$$u_{HC}(a_i) = e^{[0.0180455 - (9.02994 \cdot 10^{-5} x_{i,HC,\gamma})]} \quad (4.6)$$

Para o atributo SC foram considerados os custos associados à falta de estoques para atendimento da demanda. A função exponencial decrescente (4.7) traduz uma aversão ao risco do decisor.

$$u_{SC}(a_i) = -0.424285 + [1.42192e^{(-0.00011124 x_{i,SC,\gamma})}] \quad (4.7)$$

Após a elicitación de u_j foram examinados os pressupostos relativos à independência em utilidade e independência aditiva. Em diferentes etapas do protocolo de elicitación de Keeney e Raiffa (1976), o decisor expressou suas preferências através de escolhas probabilísticas envolvendo loterias com quatro dimensões de consequências $[SC, HC, TH, CT]$. Este decisor teve que avaliar os melhores e piores resultados para cada atributo, de modo a expressar um valor de indiferença entre um par de loterias. Como resultados, a independência aditiva é observada e os valores de λ_j foram definidos como: $\lambda_{SC} = 0.34, \lambda_{HC} = 0.25, \lambda_{TH} = 0.23, \lambda_{CT} = 0.18$. A função de utilidade multiatributo em (4.3) foi estabelecida e os resultados para cada a_i são apresentados na Tabela 4.3.

A partir dos resultados apresentados pela Tabela 4.3, a alternativa a_{12} fornece a solução compromisso mais adequada considerando as avaliações de trade-off e a atitude de risco do decisor em relação as incertezas no desempenho de CT, TH, SC e HC . Deste modo, o vetor $fg_{12}[4,6,7,6]$ e $wip_{12}[3,5,4,4]$ é sugerido para o decisor como a solução final para este problema de decisão multiatributo sob risco, o qual proporciona o trade-off mais preferido entre os atributos e o mais alto valor de utilidade esperada para o conjunto de vinte opções á escolha.

Para verificar a sensibilidade da solução de compromisso recomendada pelo modelo, as constantes de escala λ_j foram individualmente ajustadas para seguir a uma distribuição de probabilidade uniforme, com parâmetros $0.8\lambda_j$ e $1.20\lambda_j$, respectivamente. Os valores estimados aleatoriamente de λ_j foram aplicados em (4.3), visando obter um novo ranking de alternativas. Através do Matlab software versão R2015a, o teste de Kendall τ foi aplicado para testar a seguinte hipótese nula: não há correlação entre o ranking original (apresentado na tabela 4.3) e cada ranking aleatoriamente gerado nesta análise de sensibilidade. Um total de 100.000 rankings independentes foram examinados.

Tabela 4.3 – Resultados do modelo de decisão MAUT

Alternativas	$E[u_{i,CT}]$	$E[u_{i,TH}]$	$E[u_{i,HC}]$	$E[u_{i,SC}]$	$U(a_i)$	Rank
a_1	0,925	0,740	0,220	0,689	0,626	13°
a_2	0,814	0,902	0,114	0,947	0,705	2°
a_3	0,568	0,911	0,103	0,969	0,667	5°
a_4	0,361	0,934	0,100	1,000	0,645	8°
a_5	0,200	0,937	0,098	1,000	0,616	14°
a_6	0,924	0,743	0,312	0,572	0,610	16°
a_7	0,822	0,895	0,160	0,727	0,641	10°
a_8	0,594	0,912	0,151	0,913	0,665	6°
a_9	0,361	0,934	0,143	0,959	0,642	9°
a_{10}	0,202	0,942	0,146	0,959	0,616	15°
a_{11}	0,924	0,757	0,472	0,364	0,582	18°
a_{12}	0,814	0,902	0,260	0,900	0,725	1°
a_{13}	0,568	0,911	0,226	0,917	0,680	4°
a_{14}	0,361	0,934	0,222	0,921	0,649	7°
a_{15}	0,199	0,936	0,220	0,958	0,632	12°
a_{16}	0,916	0,740	0,678	0,186	0,568	20°
a_{17}	0,822	0,911	0,383	0,714	0,696	3°
a_{18}	0,581	0,919	0,355	0,677	0,635	11°
a_{19}	0,361	0,934	0,337	0,720	0,609	17°
a_{20}	0,197	0,934	0,323	0,701	0,569	19°

Fonte: Essa Pesquisa (2017).

Para 86.9% dos rankings simulados, a estatística τ excede 0,800. O restante dos resultados apresentou um valor de τ entre 0,54 e 0,799. A hipótese nula foi rejeitada para o

valor- $p < 0,001$ em ambos os casos, sendo possível afirmar que há uma forte correlação os rankings avaliados. Assim, a solução recomendada a_{12} permanece invariante para o intervalo de 20% de variação no valor de λ_j , o que pode ser interpretado como uma indicação de robustez em relação as preferências decisor para o conjunto de alternativas.

4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO

O modelo MAUT proposto para o problema *conwip*/MTS assume que o decisor fornecerá toda a informação requisitada durante a elicitación da função de utilidade esperada multiatributo. Em relação as funções de utilidade unidimensional, é assumido que os dados históricos utilizados no protocolo de elicitación estão disponíveis e que o conhecimento dos especialistas possa ser explorado pelo analista da decisão, nos casos em que os dados estejam incompletos (falta de valores de atributo ou contêm apenas dados agregados) e ou inconsistente (contêm erros ou *outliers*).

Acerca dos resultados apresentados na tabela 4.3, a_{12} deve ser escolhida como solução deste problema, pois propicia o maior valor para a função multiatributo (4.3), $U(a_{12}) = 0.725$. Ao comparar o desempenho desta solução com a_2 , $U(a_2) = 0.705$, a_{12} proporciona um valor de utilidade esperada melhor para o atributo *HC*, enquanto que a_2 fornece um melhor desempenho para *SC*. Cabe observar que a_{12} e a_2 apresentam a mesma utilidade esperada para os demais atributos. Ao considerar o perfil de risco do decisor e suas avaliações de trade-off sobre os atributos *SC* e *HC*, este decisor está disposto a renunciar a vantagem que a_2 apresenta para *SC*, para obter a vantagem que a_{12} possui no atributo custo de manutenção de estoque de produtos prontos.

Melhorias no desempenho de *SC* e *TH* nem sempre compensam, para este decisor, uma menor utilidade esperada sobre o *HC* e *CT*. Neste contexto, ao avaliar o desempenho de a_{12} com relação à a_5 (14° posição no ranking das alternativas), $[fg_5(6,8,9,8); wip_5(6,10,7,8)]$ apresenta uma vantagem para *TH* e um dos melhores valores de utilidade esperada para o custo associado a falta de estoques, $E[u_{5,SC}] = 1$. No entanto, estes resultados não compensam, segundo as preferências deste decisor, o ganho oferecido por $[fg_{12}(4,6,7,6); wip_{12}(3,5,4,4)]$ para os atributos *HC* e *CT*.

No que se refere ao trade-off entre *HC* e *TH*, os resultados da tabela 4.3 mostram que é possível aumentar o valor da utilidade esperada de *TH* através do *wip*. Contudo, a falta de sincronismo entre a capacidade produtiva e a demanda pode ocasionar um efeito negativo no atributo *HC*. Neste contexto, o uso da MAUT permite selecionar uma alternativa que forneça

um valor aceitável para HC e TH , considerando os julgamentos de trade-off e o perfil de risco do decisor. Para o caso dos atributos TH e CT , os resultados obtidos na elicitación demonstram que o tomador de decisão abre mão dos benefícios obtidos pela utilização máxima da capacidade produtiva, para alcançar melhorias concernentes ao fluxo de material e flexibilidade na produção. Como resultado, $[fg_{12}(4,6,7,6);wip_{12}(3,5,4,4)]$ reflete as preferências e julgamentos de trade-off do decisor sobre os possíveis impactos causados pelo vetor $[fg_i(pr_t);wip_i(pr_t)]$ no desempenho do sistema *conwip*/MTS.

A influência do perfil de risco do decisor (averso ao risco, neutro ao risco e propenso ao risco) é um dos fatores que afeta a escolha de $a_i \in A$. Atributos de desempenho não monetários como CT e TH também podem influenciar a avaliação subjetiva do decisor no que diz respeito ao *wip* e *fg*. Assim, uma abordagem multicritério para apoiar decisões em sistemas *conwip*/MTS pode ser relevante, especialmente quando as preferências do decisor sob atributos de diferentes naturezas devem ser consideradas.

Ao estimar os parâmetros operacionais por meio da Lei de Little, (Little 1961), o nível crítico de *wip* obtido a partir dos dados estocásticos descritos na Tabela 4.1 é igual a $[wip(3,3,3,3)]$. Esta solução proporciona um máximo rendimento para o TH com o mínimo de CT , podendo ser usada para nortear ações de melhorias no sistema produtivo. No entanto, ao considerar o tempo gasto na fila de processamento, a Lei de Little não fornece suporte para o processo de tomada de decisão, pois a escolha de $[wip_i(pr_t)]$ é afetada por objetivos conflitantes relacionados à TH e CT . Deste modo, informações adicionais podem ser necessárias para determinar esses dois parâmetros, tendo em conta o terceiro parâmetro (por exemplo, prever ambos TH e CT em função do $[wip_i(pr_t)]$). Para lidar com a ausência deste tipo de informação, o modelo proposto considera as preferências e julgamento de trade-off entre vários atributos de decisão, obtidas à luz da MAUT. Assim, o modelo de decisão *conwip*/MTS visa apoiar os planejadores em compreender os trade-offs e estabelecer esses parâmetros.

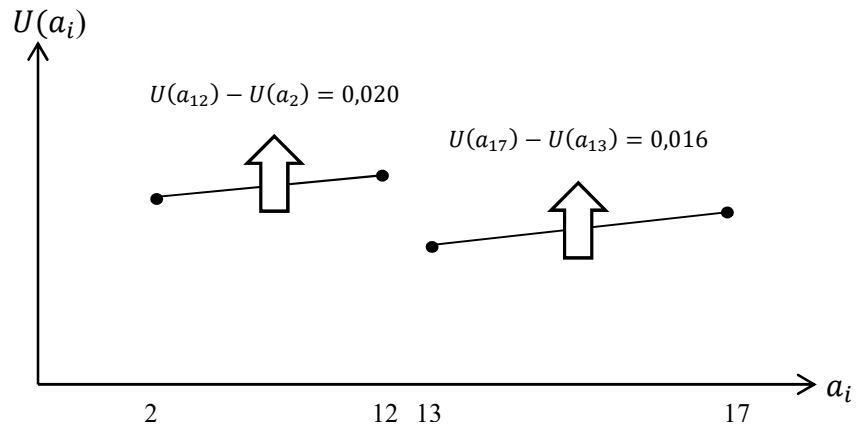
Devido à natureza compensatória (de Almeida et al., 2015) deste modelo de decisão multicritério, os valores de λ_j não podem ser interpretados simplesmente como o grau de importância (peso) dos atributos. A estrutura axiomática da MAUT permite traduzir as preferências do decisor e seu perfil de risco em um valor de trade-off entre múltiplos atributos. Esta é uma característica distintiva do modelo *conwip*/MTS em relação os modelos apresentados na literatura, que permite uma análise de trade-off entre atributos conflitantes de diferentes naturezas, tais como TH e CT .

A maioria das pesquisas frequentemente utilizam técnicas de otimização e metaheurísticas para abordar o problema *conwip*/MTS. Sob uma perspectiva multicritério, AHP, TOPSIS e a teoria dos conjuntos fuzzy tem sido integradas com a simulação para aprimorar o processo de avaliação das alternativas. Contudo, os estudos atuais não exploram diretamente a atitude de risco e as avaliações de trade-off do decisor em relação as incertezas associadas à múltiplos atributos de desempenho. Os métodos MCDM/A utilizados são baseados em consequências determinísticas, como é o caso do AHP e TOPSIS, não sendo adequados para problemas envolvendo atributos estocásticos. A integração da simulação por eventos discretos com MAUT permite a escolha de uma solução compromisso probabilisticamente associada com as saídas de simulação, maximizando a utilidade esperada do decisor (Berger, 1985; Belton e Stewart, 2002; de Almeida et al., 2015; de Almeida et al., 2015^b).

Não há uma solução compromisso que proporcione o melhor desempenho em todos os atributos do problema *conwip*/MTS. Por exemplo, a_1 é a melhor solução para o atributo CT , enquanto proporciona um valor baixo de desempenho para TH . Para o objetivo de maximizar TH , a solução recomendada seria a_{10} . Contudo, esta alternativa gera custos adicionais de HC em relação a solução compromisso. Os custos associados com a manutenção dos estoques são minimizados quando a_{16} é implementado. No entanto, devido ao seu desempenho no atributo de SC , esta alternativa pode causar vendas perdidas e insatisfação do cliente. Sob uma perspectiva multicritério, o modelo proposto procura maximizar a função de utilidade esperada do decisor sobre múltiplos objetivos conflitantes à luz da estrutura axiomática da MAUT. Deste modo, a solução recomendada para este problema de decisão compensa o baixo desempenho obtido em algum dos atributos pelo alto desempenho de outro atributo, tendo em conta as avaliações de trade-off do decisor sobre consequências probabilísticas.

Os valores de $U(a_i)$ apontados na tabela 4.3 não podem ser interpretados em termos de “intensidade das preferências”, visto que as utilidades foram elicitadas na escala numérica intervalar (Berger, 1985). Este tipo de escala permite comparar a intensidade da diferença entre pares de alternativas, uma vez que não há um ponto inicial de ausência de valor como na escala de razão. Deste modo, é possível afirmar que a preferência para $U(a_{12})$ em relação a $U(a_2)$ é 20% maior do que a preferência de $U(a_{17})$ para $U(a_{13})$. A Figura 4.3 apresenta a intensidade das preferências para essas alternativas. Portanto, a comparação de desempenho considerando $U(a_i)$ deve ser feita cuidadosamente devido ao tipo de escala numérica utilizada.

Figura 4.3 – Intensidade das Preferências.



Fonte: Essa Pesquisa (2017).

Embora os resultados obtidos na análise de sensibilidade demonstrem que a solução de compromisso não se altera para o intervalo de variação de λ_j igual a ($\pm 20\%$), o protocolo de eliciação de λ_j não pode ser aplicado sem a devida verificação da estrutura de preferência do decisor, bem como os pressupostos da MAUT, especialmente aqueles relacionados à forma aditiva. O teste de Kendall τ fornece apenas uma confiança estatisticamente plausível para a solução de compromisso, em termos de associação entre dois conjuntos de rankings. Deste modo, para obter uma solução de compromisso consistente com as preferências do decisor, o procedimento de eliciação deve ser cuidadosamente aplicado.

5 MODELO MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE REGRA DE PRIORIDADE EM AMBIENTES *JOB-SHOP*

O modelo MAUT proposto no capítulo anterior utiliza a teoria da utilidade esperada para avaliar o comportamento de risco do decisor. Este capítulo propõe um modelo de decisão sob risco que integra MAUT e RDU para apoiar a escolha de uma regra para priorização de ordens em sistemas *job-shop*. O modelo MRDU assume que o comportamento de risco do decisor é influenciado pela probabilidade de eventos raros que estão situados nos extremos do espaço amostral. Considerando os dados realísticos de uma empresa que fabrica acessórios para móveis também é ilustrada uma aplicação numérica deste modelo.

5.1 MODELO MRDU PROPOSTO

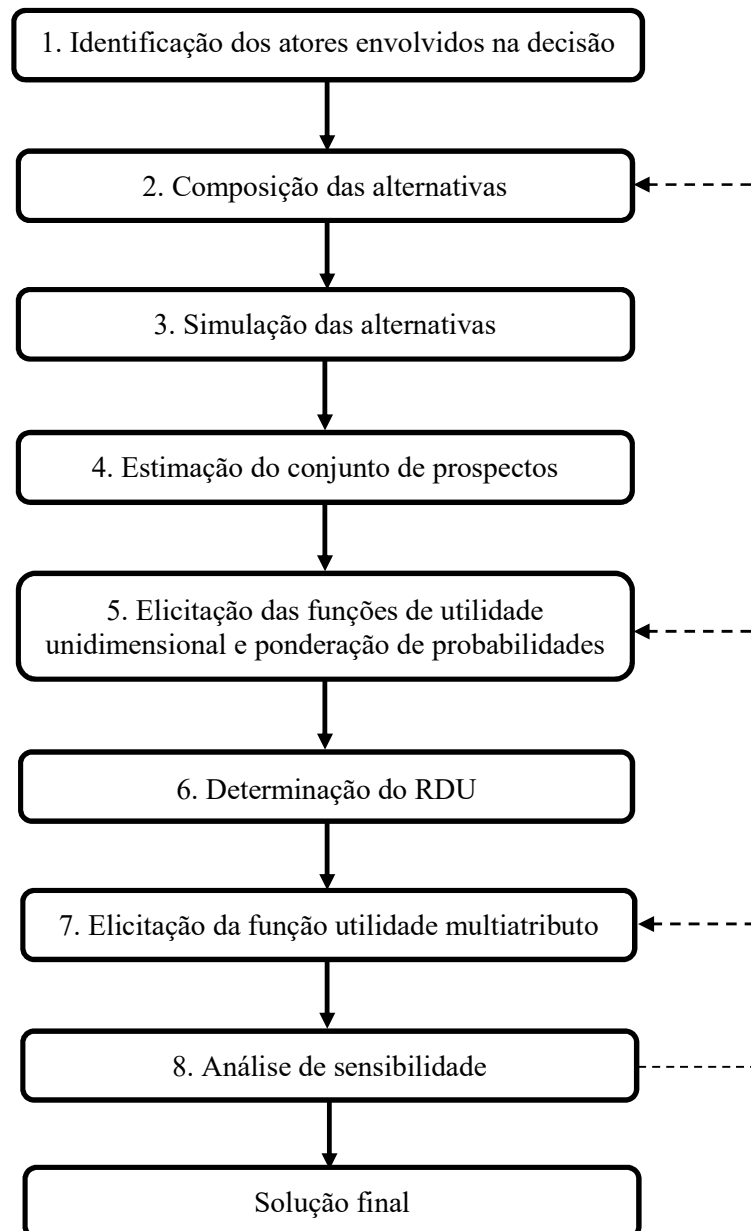
Seja $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}$ um conjunto discreto com n regras de prioridade usadas para controlar o fluxo de trabalho em sistemas *job-shop*. Cada a_i está associada à consequências probabilísticas que representam o desempenho do sistema em relação ao número de pedidos em atraso (NTJ), lead time total (TT_t) e atraso dos pedidos (T). Para incorporar essas incertezas no modelo de decisão, o prospecto discreto $q_{i,j} \in Q = \{x_{ij1}, p_{ij1}; x_{ij2}, p_{ij2}; \dots; x_{ijb}, p_{ijb}; \dots; x_{ij}, p_{ij}\}$ é estimado para cada combinação de a_i dado j , considerando as possíveis consequências x_{ijM} ordenadas da melhor para a pior e suas probabilidades de ocorrência p_{ijM} correspondentes. O modelo de decisão apresentado na Figura 5.1 integra as abordagens RDU e MAUT para identificar a opção que proporcione o maior valor para a função de utilidade não-esperada multiatributo (MRDU), assumindo que as preferências do decisor em relação à probabilidade de eventos raros (que estão nos extremos do espaço de consequências) não são lineares. Além disso, o valor multiatributo a_i de é decomposto em uma forma aditiva.

De modo similar aos modelos de decisão multicritério apresentados nos capítulos anteriores, a etapa 1 tem por objetivo identificar os atores envolvidos neste processo decisório. As regras de prioridade que farão parte do conjunto A são definidas na etapa 2. O desempenho de A para NTJ , TT_t e T é avaliado através de um experimento de simulação (Law, 2015). Com base nos resultados produzidos em γ replicações com o modelo computacional, o conjunto de prospectos discretos Q é desenvolvido na etapa 4. Cada $q_{i,j}$ é determinado através de um histograma dos dados simulados $his_{ij} \in HA$, em que o ponto

médio dos intervalos de classe e a frequência relativa de cada classe denotam x_{ijb} e p_{ijb} respectivamente.

Para lidar com as incertezas de $q_{i,j}$ através do RDU, é necessário primeiramente elicitar u_j e a função ponderação de probabilidade w_j (Etapa 5). Para tanto, dois procedimentos distintos foram aplicados neste estudo para elicitar u_j e w_j .

Figura 5.1 – Estrutura do modelo MRDU.



Fonte: Essa Pesquisa (2017).

Inicialmente foi utilizado método de trade-off (método-TO) proposto por Wakker e Deneffe (1996) para avaliar u_j . Este método não utiliza questões baseadas em mudanças de probabilidades para encontrar o valor de indiferença entre as loterias. Além disso, o método-TO também foi o ponto de partida de estudos não-paramétricos, tais como Munier (2016), Krawczyk (2015), Abdellaoui (2000) e Bleichrodt e Pinto (2000). Em seguida, as utilidades elicitadas são usadas no método *midweight* (Van de Kuilen e Wakker, 2011), que avalia as funções w_j sem quaisquer suposições prévias sobre o formato da distribuição. A função w_j aumenta estritamente, $w_j: [0,1] \rightarrow [0,1]$ e satisfaz $w_j(0) = 0$ e $w_j(1) = 1$.

O valor de RDU para um prospecto $q_{i,j}$, denotado por $V_{RDU_{i,j}}(q_{i,j})$, depende da função u_j e do *decision weight* π_b de cada x_{ijb} , ranqueado do melhor para a pior. $V_{RDU}(q_{i,j})$ pode ser obtido através de (5.1).

$$V_{RDU_{i,j}}(q_{i,j}) = \sum_{b=1}^M \pi_b u(x_b) \quad (5.1)$$

Onde, $\pi_b = w_j(p_b + p_{b+1} + \dots + p_M) - w_j(p_{b+1} + \dots + p_M)$, $b = 1, 2, \dots, M - 1$, e $\pi_M = w_j(p_M)$.

Depois de obter os valores de $V_{RDU_{i,j}}(q_{i,j})$, o próximo passo é incorporar os valores de $V_{RDU_{i,j}}(q_{i,j})$ e os julgamentos de trade-off do decisor em uma função de utilidade multiatributo (Etapa 7). Este processo inclui elicitação de λ_j em conformidade com algum protocolo de elicitação probabilístico. Supondo que a estrutura de preferência do decisor é consistente com as condições de independência em utilidade e independência aditiva (Keeney e Raiffa, 1976), a solução compromisso corresponde a alternativa a_i que maximiza o valor da função MRDU dado por (5.2). Na forma aditiva, a seguinte condição é observada $\lambda_{TT_t} + \lambda_T + \lambda_{NTJ} = 1$. Neste estudo, λ_j é elicitada por meio do protodolo de Keeney e Raiffa (1976).

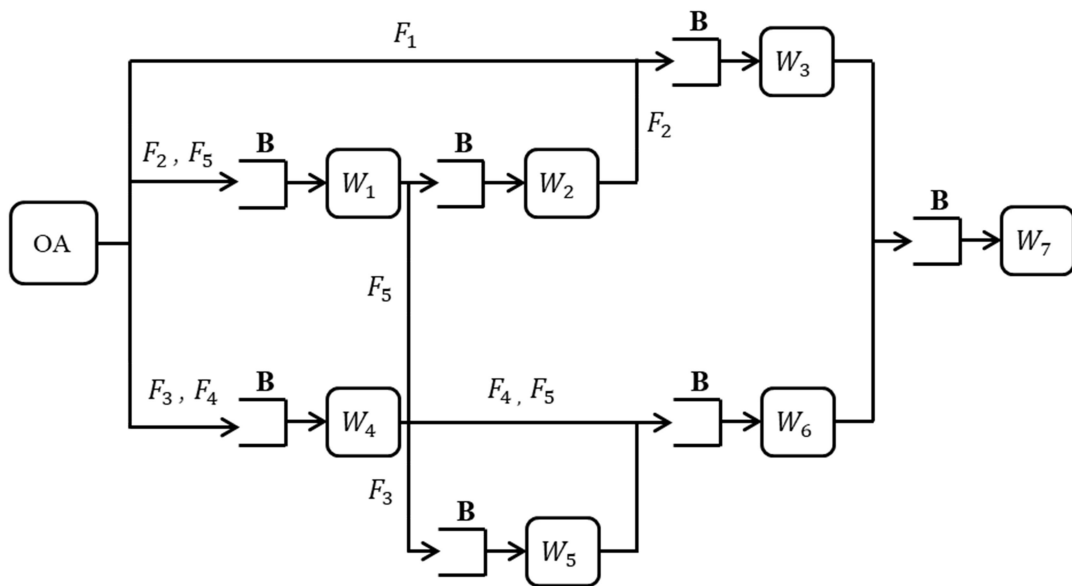
$$MRDU(a_i) = \left[\lambda_{\overline{FT}} V_{RDU_{i,TT_t}}(q_{i,TT_t}) + \lambda_T V_{RDU_{i,T}}(q_{i,T}) + \lambda_N V_{RDU_{i,NTJ}}(q_{i,NTJ}) \right] \quad (5.2)$$

A última etapa deste modelo de decisão consiste em examinar a sensibilidade da solução obtida quanto à variações propositais em λ_j . Para tanto, foi aplicado o teste não paramétrico de Kendall τ (Kendall, 1970) de modo análogo ao modelo MAUT descrito no capítulo anterior.

5.2 APLICAÇÃO DO MODELO MRDU

Um sistema *job-shop* que fabrica kits de acessórios para móveis sob a estratégia MTO foi modelado (ver Figura 5.2). Este sistema é composto por sete estações de trabalho W_h ($h = 1, \dots, 7$) e por uma unidade de recebimento e atribuição de data de entrega (OA). São considerados quinze tipos de pedidos de clientes, categorizados em cinco famílias de produtos principais ($F_1, F_2, \dots, F_l, \dots, F_5$) com três tipos de kits k_{lt} ($t = 1, 2, 3$) em cada F_l .

Figura 5.2 – Diagrama do sistema de produção.



W_h : Estação de trabalho h , F_l : Família de produtos tipo l , **B**: Fila

Fonte: Essa Pesquisa (2017).

A Figura 5.2 mostra que o roteiro de produção de F_1 começa em W_3 , com a mistura dos materiais e moldagem por injeção dos componentes. A estação W_7 é uma unidade de montagem, onde os componentes de W_3 são embalados em kits com outros componentes fornecidos por terceiros. Após a inspeção de qualidade, os kits são expedidos para os clientes. Os kits pertencentes a F_2 entram no sistema em W_1 , que é uma unidade de usinagem, em que as matérias-primas são cortadas, rebarbadas e depois transferidas para W_2 , para soldagem dos componentes, formando assim um inserto. Em W_3 , o inserto é colocado dentro no molde de injeção e posicionado por meio de guias. Em seguida, o termoplástico fundido é injetado sob

pressão para dentro do molde, dando o formato ao componente. Posteriormente, as peças são transferidas para W_7 para montagem final.

A produção de F_3 começa com o processo de estamparia de chapas em W_4 . Nesta fase, ferramentas progressivas são usadas para produzir os componentes, sem quaisquer operações secundárias. Os componentes estampados de W_4 são transferidos para W_5 , W_6 , e W_7 , para usinagem da rosca, acabamento superficial por meio do processo galvânico e montagem final respectivamente. O roteiro de trabalho de F_4 e F_5 inicia em W_4 e W_1 , respectivamente. e ambas as famílias requerem operações em W_6 e W_7 .

Tendo por objetivo avaliar o desempenho deste sistema de produção sob diferentes regras de prioridade foi desenvolvido um modelo de simulação por meio do software Micro Saint Sharp. O experimento está baseado nas seguintes condições que foram observadas no sistema real: (i) as matérias-primas estão disponíveis na quantidade e no momento necessário; (ii) dentro da composição de um kit completo, cada k_{lt} requer apenas um único tipo de componente produzido em cada W_h ; (iii) cada ordem representa um tipo de k_{lt} ; (iv) para fins de aproveitamento de matérias-primas e redução do número de setups, k_{lt} é produzido em lotes de tamanho padrão; (v) os tempos de transferência entre duas estações de trabalho não foram considerados; (vi) uma vez que esse sistema emprega a troca rápida de ferramentas (Shingo, 2000), os tempos de setup de sequência independente foram incluídos nos tempos de processamento; e (vii) afim de representar as características deste mercado consumidor, não são admitidas entregas parciais ou antecipadas para os clientes.

O tempo entre chegada das ordens dos clientes é modelado por uma distribuição exponencial com média igual à 0,753 horas e o tipo de ordem de cliente é determinada segundo uma distribuição uniforme [1, 15]. Os tempos de processamento e tamanhos de lote padrão (em unidades de kits acabados) estão resumidos na Tabela 5.1. Esses tempos de chegada e de processamento resultam em uma utilização das estações de trabalho global igual à 0,85.

A data de entrega de cada k_{lt} é determinada de acordo com o método de Baker e Bertrand (1981), apresentado em (5.3).

$$DD_{k_{lt}} = T_{k_{lt}} + (\theta * TPT_{k_{lt}}) \quad (5.3)$$

Onde $DD_{k_{lt}}$ é a data de entrega de k_{lt} ; $TPT_{k_{lt}}$ representa o tempo total de processamento; $T_{k_{lt}}$ é o tempo de chegada; e θ é o fator de aperto de amplitude data de entrega. Nesta aplicação, θ

foi definido para atingir aproximadamente 28,6% ordens em atraso, quando a regra FIFO é usada para priorizar as ordens que estão na fila de W_h .

Tabela 5.1 – Resumos dos tempos de processamento e tamanho dos lotes de produção.

k_{lt}	Lote de produção (unidades)	Tempos de Processamento (horas)						
		W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7
k_{11}	1000			Lognormal (4,7; 1,1)				Gamma (1,8; 0,4)
k_{12}	1500			Lognormal (5,5; 1,5)				Gamma (1,7; 0,4)
k_{13}	3000			Lognormal (6,1; 1,9)				Gamma (2,4; 0,8)
k_{21}	200	Lognormal (2,8; 0,9)	Lognormal (1,5; 0,5)	Lognormal (3,3; 0,98)				Gamma (2,0; 0,5)
k_{22}	250	Lognormal (4,2; 1,3)	Lognormal (1,9; 0,5)	Lognormal (5,0; 1,0)				Gamma (2,1; 0,5)
k_{23}	350	Lognormal (3,5; 1,1)	Lognormal (2,4; 0,5)	Lognormal (7,5; 1,8)				Gamma (1,1; 0,4)
k_{31}	6000				Normal (3,0; 1,2)	Normal (0,8; 0,3)	Lognormal (2,9; 0,9)	Gamma (2,2; 0,5)
k_{32}	16000				Normal (3,3; 1,3)	Normal (1,7; 0,8)	Lognormal (3,0; 1,5)	Gamma (2,7; 0,9)
k_{33}	6500				Normal (2,8; 0,9)	Normal (0,9; 0,5)	Lognormal (1,9; 0,7)	Gamma (1,3; 0,4)
k_{41}	25000				Normal (2,0; 0,9)		Lognormal (4,2; 1,7)	Gamma (3,5; 1,1)
k_{42}	25000				Normal (2,5; 1,0)		Lognormal (2,8; 0,8)	Gamma (3,1; 1,1)
k_{43}	25000				Normal (3,1; 1,2)		Lognormal (3,3; 1,3)	Gamma (1,2; 0,9)
k_{51}	200	Lognormal (1,8; 0,5)					Lognormal (3,1; 1,2)	Gamma (0,9; 0,2)
k_{52}	200	Lognormal (2,8; 0,8)					Lognormal (2,1; 0,9)	Gamma (1,9; 0,8)
k_{53}	200	Lognormal (4,2; 1,8)					Lognormal (3,1; 1,3)	Gamma (2,1; 0,9)

(Media Aritmética, Desvio Padrão)

Fonte: Essa Pesquisa (2017).

Em relação à capacidade do sistema em estudo, cada W_h pode lidar com um número máximo de ordens simultaneamente, conforme mostrado na Tabela 5.2. A produção opera em

dois turnos diários de 8,5 horas cada e sua capacidade permanece constante. No final de cada turno, 30 minutos são gastos com limpeza e outras atividades.

Tabela 5.2 – Características das estações de trabalho simuladas.

W_h	Horário de trabalho	Capacidade	
	(Horas/dia)	Incremento	Número de ordens
1			2
2			1
3			3
4	16	Não	2
5			1
6			3
7			3

Fonte: Essa Pesquisa (2017).

A Tabela 5.3 apresenta as regras de prioridade consideradas no experimento de simulação, bem como o procedimento de cálculo do índice de prioridade I_{k_{lt}, W_h} , para cada k_{lt} , aguardando processamento em W_h . Este conjunto inclui regras bem conhecidas que podem ser facilmente implementadas no sistema sob estudo. Na tabela 5.3, PT , TS , RT e K denotam o tempo de processamento, a tempo atual do sistema, a soma do tempo de processamento restante e o fator de escala respectivamente.

Cada regra de prioridade apresentada na Tabela 5.3 foi replicada 30 vezes e o sistema é observado até a conclusão de 2000 ordens. O período de aquecimento é de 48 horas. Além disso, os valores de K iguais a 1, 1.3, 1.5 e 1.7 foram utilizados para as regras ATC e o COVERT. A partir dos resultados obtidos no experimento de simulação, o conjunto de prospectos Q pode ser estabelecido através do procedimento descrito na etapa 4 (Figura. 5.1).

Posteriormente, as funções u_j foram avaliadas por meio do método-TO (Wakker e Deneffe, 1996). A elicitación de um conjunto de consequências igualmente espaçadas em termos de utilidade começa pela definição das consequências de referência $y_r < Y_r$ e pela consequência inicial x_0 . Posteriormente, o decisor deve expressar um valor x_1 que propicie a condição de indiferença entre $(x_1, p; y_r, 1 - p)$ e $(x_0, p; Y_r, 1 - p)$, para um dado valor constante de p . Após a elicitación de x_1 , a consequência x_2 que faz o decisor indiferente entre as loterias $(x_2, p; y_r, 1 - p)$ e $(x_1, p; Y_r, 1 - p)$ é avaliado. As indiferenças estabelecidas pelo

método-TO implicam em $u(x_2) - u(x_1) = u(x_1) - u(x_0)$. Este procedimento pode ser repetido até que x_0 seja igual ao valor no qual $u(x^*) = 1$. Nesta aplicação, p foi definido como 0,5 e 16 valores de indiferenças foram elicitados para cada atributo.

Tabela 5.3 – Regras de prioridade avaliadas.

Regras	Índice de prioridade I_{k_{lt}, w_h}	Referências
FIFO	$I_{k_{lt}, w_h} = \min(T)$	
EDD	$I_{k_{lt}, w_h} = \min(DD)$	Pinedo (2016); Bauer et al. (1994); Blackstone et al. (1982); Kutz (2015)
STP	$I_{k_{lt}, w_h} = \min(PT)$	
MSLACK	$I_{k_{lt}, w_h} = \min(DD - TS - RT)$	
LWKR	$I_{k_{lt}, w_h} = \min(RT)$	
MINSLK	$I_{k_{lt}, w_h} = \min(DD - PT)$	Parthanadee e Buddhakulsomsiri (2010)
MDD	$I_{k_{lt}, w_h} = \min(\max(DD, TS + PT))$	Baker e Bertrand (1982)
ATC	$I_{k_{lt}, w_h} = \max\left(\frac{1}{PT} \exp\left(-\left(\frac{\max(0, (DD - TS - RT + PT))}{K \times RT}\right)\right)\right)$	Vepsalainen e Morton (1987)
COVERT	$I_{k_{lt}, w_h} = \max\left(\frac{1}{PT} \max\left(0, \left(1 - \left(\frac{\max(0, (DD - TS - RT))}{K \times RT}\right)\right)\right)\right)$	Carroll (1965)

FIFO: *first-in- first-out*; EDD: *earliest due date*; STP: *shortest processing time*; MSLACK: *minimum slack time*; LWKR: *Least work remaining*; MINSLK: *minimum slack*; MDD: *modified due date*; ATC: *apparent tardiness cost*; e COVERT: *cost over time*.

Fonte: Essa Pesquisa (2017).

Para o atributo TT_t , os parâmetros iniciais da elicitación foram $y_r = 9$, $Y_r = 9.5$ e $x_0 = 10$. A função exponencial monotonicamente decrescente (5.4) foi ajustada sobre os pontos de indiferença elicitados. Esta função mostra a atitude conservadora do decisor em relação aos riscos que estão associados às loterias avaliadas dentro do espaço de consequência $cs_{TT_t} = [10; 50]$ horas.

$$u_{TT_t} = 3.19249e^{-(0.130448x_{ijM})} \quad (5.4)$$

Em relação à NTJ , a função de utilidade exponencial monotonicamente decrescente (5.5) representa a atitude de aversão ao risco do decisor para as loterias envolvendo $y_r = 70$, $Y_r = 85$, $x_0 = 100$, e $cs_{NTJ} = [100; 1200]$ ordens.

$$u_{NTJ} = 1.25483e^{-(0.00219468x_{ijM})} \quad (5.5)$$

As utilidades elicitadas para T refletem uma atitude de aversão ao risco modelada por meio de (5.6), em que valores menores para o atributo T são consideravelmente mais desejáveis do que valores mais elevados. Essa função exponencial foi obtida considerando $y_r = 0$, $Y_r = 0.4$, $x_0 = 0.8$, e $cs_T = [0.9; 90]$ horas.

$$u_T = 0.990507e^{-(0.0420056x_{ijM})} \quad (5.6)$$

Aplicando o método *midweight* (Van de Kuilen e Wakker, 2011) a probabilidade correspondente a cada um dos cinco pesos, $w_j^{-1}(0.125)$, $w_j^{-1}(0.25)$, $w_j^{-1}(0.5)$, $w_j^{-1}(0.75)$, e $w_j^{-1}(0.875)$ foi avaliada. Ao iniciar por $w_j^{-1}(0.5)$, o decisor é solicitado à especificar um valor de $p \in [0,1]$ que retrate a indiferença entre $x_1 \sim (x_2, p; x_0, 1 - p)$, onde x_1 é o ponto médio de utilidade de x_2 e x_0 . Tendo obtido $w_j^{-1}(0.5) = p$, $w_j^{-1}(0.25) = p'$ é eliciada para $p' \in [0, p]$ baseado nas loterias $(x_1, p; x_0, 1 - p) \sim (x_2, p'; x_0, 1 - p')$. Nesta aplicação, a sequência de elicitação foi $w_j^{-1}(0.25)$, $w_j^{-1}(0.125)$, $w_j^{-1}(0.75)$ e $w_j^{-1}(0.875)$. Para traduzir a percepção subjetiva do decisor em relação às probabilidades avaliadas, a função ponderação de probabilidade Prelec com dois parâmetros (Prelec, 1998) foi ajustada em (5.7).

$$w_j(p) = e^{-\beta(-\ln p)^\alpha} \quad (5.7)$$

Para T , uma função convexa monotonicamente crescente com $\alpha = 0.69$ e $\beta = 1.55$ traduz a aversão ao risco do decisor para eventos com baixa chance de ocorrência. No que concerne ao atributo NTJ , a curva *s-shape* inversa ($\alpha = 0.38$ e $\beta = 0.93$) reflete uma combinação de pessimismo e excessida ponderação para valores baixos de probabilidades. Equivalente a T (aversão ao risco do decisor), uma função convexa foi ajustada com $\alpha = 0.73$ e $\beta = 1.93$ para consequências probabilísticas relativas ao TT_t .

Após elicitar as funções u_j e w_j , o valor de utilidade não-esperada para cada prospecto $q_{i,j} \in Q$ pode ser determinado através de (5.1). Os valores de $V_{RDU_{i,j}}(q_{i,j})$ obtidos nesta etapa são apresentados na Tabela 5.4. Em seguida, os valores de λ_j foram determinados de acordo com o protocolo de Keeney e Raiffa (1976). Este processo consiste em obter o valor de indiferença entre as loterias envolvendo consequências probabilísticas tridimensionais para $[NTJ, T, TT_t]$. Em diferentes estágios do protocolo de elicitação, essas loterias também foram

usadas para verificar os pressupostos de independência em utilidade e independência aditiva, previamente à definição de λ_j . Como resultados, a independência aditiva foi validada e os valores avaliados foram $\lambda_{NTJ} = 0.498$, $\lambda_T = 0.371$ e $\lambda_{TT_t} = 0.131$. A avaliação global de cada a_i obtido através da função MRDU (5.2) é mostrado na Tabela 5.4.

Os resultados na Tabela 5.4 mostram que a heurística COVERT com $K=1,7$ oferece o valor mais alto de utilidade não-esperada entre o conjunto de regras de prioridade simuladas, $MRDU(a_{15}) = 0.558$. Essa solução foi encontrada considerando preferências e perfil de risco do decisor sobre o comportamento estocástico dos atributos NTJ , T e TT_t .

Tabela 5.4 – Resultados do modelo MRDU.

a_i	Regras	$V_{RDU_{i,TT_t}}(q_{i,TT_t})$	$V_{RDU_{i,NTJ}}(q_{i,NTJ})$	$V_{RDU_{i,T}}(q_{i,T})$	$MRDU(a_i)$	Rank
1	FIFO	0,2151	0,4039	0,5452	0,432	15 °
2	EDD	0,2630	0,4847	0,6295	0,509	6 °
3	SPT	0,2861	0,6883	0,3690	0,517	4 °
4	LWKR	0,2690	0,6981	0,2675	0,482	11 °
5	MINSLK	0,2285	0,4537	0,5292	0,452	13 °
6	MSLACK	0,2349	0,4494	0,5697	0,466	12 °
7	MDD	0,2510	0,4980	0,5993	0,503	9 °
8	ATC $K=1,0$	0,2308	0,3966	0,5814	0,443	14 °
9	ATC $K=1,3$	0,2464	0,5233	0,5919	0,512	5 °
10	ATC $K=1,5$	0,2575	0,4897	0,6174	0,507	7 °
11	ATC $K=1,7$	0,2957	0,4771	0,6573	0,520	3 °
12	COVERT $K=1,0$	0,2627	0,4976	0,5981	0,504	8 °
13	COVERT $K=1,3$	0,2378	0,5425	0,5297	0,498	10 °
14	COVERT $K=1,5$	0,2712	0,5817	0,5653	0,535	2 °
15	COVERT $K=1,7$	0,2822	0,6451	0,5379	0,558	1 °

Fonte: Essa Pesquisa (2017).

No intuito de verificar a robustez da solução proposta por meio do teste de Kendall τ (Kendall, 1970). Para tanto, 1,000,000 rankings de alternativas independentes foram gerados segundo uma distribuição uniforme com parâmetros $[0.75\lambda_j; 1.25\lambda_j]$, onde λ_j é o valor de escala avaliado previamente no processo de elicitación. A hipótese nula testada propõe que não existe uma correlação significativa entre o ranking apresentado na Tabela 5.4, e cada ranking aleatório obtido nesta análise de sensibilidade.

86,42% dos rankings gerados aleatoriamente, a estatística τ excede 0,800, enquanto que 13,58% apresentam um τ entre 0,71 e 0.799. A hipótese nula foi rejeitada como o valor- $p < 0,001$ em ambos os casos, indicando que a_{15} permanece invariável dentro do intervalo $[0.75\lambda_j; 1.25\lambda_j]$ avaliado para NTJ , T e TT_t .

5.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O modelo proposto para este problema de decisão identifica a regra de prioridade mais adequada para o sistema *job-shop* tendo em conta as avaliações de trade-off sobre as consequências probabilísticas associadas à NTJ , T e TT_t . Ao comparar a solução recomendada com a_{14} , $MRDU(a_{14}) = 0.535$, o decisor renuncia a vantagem proporcionada por a_{14} sobre T , para obter ganhos em termos de redução nos atributos TT_t e NTJ . A Tabela 5.4 mostra que a_{11} , ranqueada na terceira posição possibilita um melhor resultado para o atributo T . Além disso, o tempo médio no sistema de uma ordem de cliente é menor do que as alternativas a_{15} e a_{14} ($V_{RDU_{11,TT_t}} = 0.2957$ em contraste com $V_{RDU_{15,TT_t}} = 0.2822$ e $V_{RDU_{14,TT_t}} = 0.2712$). Contudo, esses valores não são compensados, segundo as informações de preferências modeladas em (5.2), pelo desempenho superior de a_{15} em relação à NTJ .

Quando a regra de prioridade é escolhida segundo uma perspectiva mono-atributo, a_{11} , a_4 , e a_{11} fornecem os melhores desempenhos para TT_t , NTJ e T respectivamente. No entanto, essas alternativas também apresentam impactos negativos no desempenho do sistema. Por exemplo, a_{11} reduz em 26% a utilidade do atributo NTJ e a_4 gera um impacto negativo de 50% sobre T . Um vez que não há nenhuma regra de prioridade que produza o melhor desempenho em todos os atributos de decisão, para todos os sistemas produtivos *job-shop*, o uso da MAUT possibilita a tradução das preferências do decisor em uma taxa de substituição (Keeney e Raiffa, 1976) representado nesta aplicação por λ_j . Deste modo, os valores de λ_j elicitados através de perguntas que envolvem escolhas probabilísticas não podem ser interpretadas como o grau relativo de importância de cada atributo. Embora o teste de Kendall τ demonstra que a solução a_{15} permanece invariável no intervalo $[0.75\lambda_j; 1.25\lambda_j]$, é necessário uma análise cuidadosa dos pressupostos da MAUT, particularmente aqueles exigidos pelo forma aditiva, para obter função de utilidade multiatributo que seja fidedigna à estrutura de preferências do decisor.

Embora o problema de seleção de regras de prioridade em sistemas *job-shop* possua uma natureza multidimensional, não há muitas pesquisas baseadas em métodos múlticrério

compensatórios. Vários estudos tem utilizado a análise de Pareto, teoria dos conjuntos fuzzy e abordagens ponderadas para lidar com múltiplos objetivos de desempenho, que em muitos casos podem ser conflitantes. No entanto, essas técnicas não levam em consideração as preferências do decisor e sua percepção não-linear em relação a probabilidade das consequências que estão nos extremos do cs_j . Para problemas de decisão envolvendo consequências probabilísticas, em que a racionalidade compensatória do decisor é verificada, o modelo de decisão MRDU permite uma análise dos trade-offs entre os atributos de desempenho, de modo a recomendar uma regra de prioridade que reflita as preferências e perfil de risco do decisor. Além disso, é possível avaliar um grande grupo de alternativas, uma vez que as preferências do decisor são eliciadas sobre cs_j .

Supondo que a percepção subjetiva do decisor sobre a avaliação das probabilidades seja um dos fatores que afeta a escolha de uma regra de prioridade, o uso do RDU permite a consideração dos desvios da utilidade esperada como explicado pelo paradoxo de Allais (Allais, 1953). No RDU, as funções u_j e w_j formam os parâmetros subjetivos que caracterizam a atitude de risco do decisor. w_j pode ser considerado adequado para incorporar na avaliação de cada prospecto, o comportamento humano de atribuir um peso excessivo para probabilidades extremamente altas ou baixas. Com base nas funções elicitadas de u_j e w_j , pode-se observar que as preferências do decisor são dependentes do valor da probabilidade de se obter um x_{ijM} . Quando este problema de decisão é modelado usando a Teoria da Utilidade Esperada, onde $w_j(p) = p$ para todo $p \in (0,1)$, o ranking obtido das alternativas tem uma correlação moderada ($\tau = 0,7$; valor- $p < 0,001$) em relação àquele mostrado na Tabela 5.4. Embora a_{15} e a_{14} permaneceram na posição superior, a_9 é classificado na terceira posição (em vez de a_{11}) e os melhores resultados unidimensionais para TT_t , NTJ e T são observados em a_3 , a_4 e a_2 , respectivamente.

6 CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

Este capítulo apresenta as conclusões principais e sugestões de futuros trabalhos para cada um dos modelos de decisão multicritério propostos por este estudo.

6.1 CONCLUSÕES

6.1.1 Modelo FITradeoff aplicado problema de seleção de regras WLC

Este modelo aborda a interação entre os três níveis da hierarquia WLC, que incluem a atribuição da data de entrega, seleção e priorização de ordens. Pesquisas anteriores sobre WLC identificam as melhores regras de controle sem avaliar os julgamentos de preferência do decisor para múltiplos atributos conflitantes. Por meio da integração da simulação por eventos discretos com a abordagem compensatória MAVT, o modelo de decisão sob certeza apresentado neste trabalho determina a solução que propicia o melhor trade-off entre os múltiplos atributos de desempenho à luz das preferências do decisor.

No que se refere ao uso do método FITradeoff para elicitare constantes de escala, este método oferece um processo flexível que exige menos esforço cognitivo do decisor durante a elicitacão das preferências, podendo contribuir para a reduçãõ de inconsistências. A flexibilidade do FITradeoff pode também diminuir o tempo gasto no processo decisório, uma vez que esse método avalia sistematicamente a possibilidade de encontrar uma soluçãõ compromisso a cada nova informacão fornecida pelo decisor. Ainda, permite que o decisor pare o processo a qualquer momento.

Uma vez implantado este modelo, o decisor pode examinar outras combinações de regras WLC usadas para: (i) determinar a data de entrega; (ii) selecionar as ordens que estãõ no *order pool* aguardando autorizacão para início de produçãõ; (iii) e priorizacão das ordens nas estações de trabalho. Além disso, é possível analisar o desempenho do sistema *job-shop* considerando cenários alternativos para o tempo entre chegadas de ordens no sistema, tempos de processamento, mix de produtos, entre outros fatores.

6.1.2 Modelo MAUT para identificacão dos parâmetros operacionais *conwip*/MTS

A escolha inadequada dos parâmetros operacionais *CT*, *TH*, *SC* e *HC* pode impactar negativamente na competitividade da organizacão, visto que geram custos adicionais de manutençãõ dos estoques ou custos relacionados a falta de estoques no curto prazo. Para este

problema de decisão sob risco, o modelo proposto utiliza simulação por eventos discretos e a MAUT para identificar a solução mais apropriada, com base nos julgamentos de trade-off e o perfil de risco do decisor sobre as consequências probabilísticas associadas à CT , TH , SC e HC . Essas consequências foram obtidas através do experimento de simulação à luz de diferentes níveis de wip e fg .

Uma aplicação numérica foi realizada para ilustrar a aplicação do modelo e para demonstrar a sua utilidade prática em sistemas *conwip*/MTS. Apesar da possibilidade de adaptar o modelo MAUT para outras indústrias, os pressupostos relacionados ao uso da função de utilidade multiatributo aditiva devem ser verificados, tais como a condição de independência em utilidade e independência aditiva. Cabe observar que este estudo difere-se das pesquisas anteriores sobre *conwip* ao considerar as preferências e perfil de risco do decisor para encontrar a solução de melhor trade-off entre os múltiplos atributos conflitantes.

Embora a aplicação deste modelo possa exigir um tempo excessivo de modelagem, é possível ainda avaliar cenários futuros sem perturbar o sistema real. O modelo MAUT fornece uma sólida base teórica que possibilita incorporar as incertezas do sistema *conwip*/MTS e as preferências do decisor em uma função de utilidade esperada multiatributo, a qual conduz o processo de tomada de decisão.

6.1.3 Modelo MRDU para seleção de regra de prioridade em sistemas *job-shop*

Este modelo integra a simulação, MAUT e RDU para identificar a mais adequada regra de prioridade para sistemas *job-shop* à luz dos atributos NTJ , T e TT_t . Uma aplicação numérica utilizando dados realísticos de uma empresa fabricantes de acessórios para móveis foi desenvolvida para demonstrar como implantar as etapas deste modelo de utilidade não-esperada. A alternativa a_{15} (COVERT com $K=1,7$) foi a solução compromisso recomendada para o problema modelado. Ao considerar as preferências deste decisor sob a estrutura axiomática da MAUT e RDU, a_{15} proporciona o trade-off mais satisfatório entre múltiplos atributos, fornecendo o valor mais alto de utilidade não-esperada multiatributo $MRDU(a_{15}) = 0.558$ do conjunto A formado por quinze regras de prioridade. No modelo MRDU, as preferências são traduzidas por meio de uma função de utilidade não-esperado multiatributo aditiva.

O uso do RDU e MAUT permite incorporar no problema de seleção de regra de prioridade, os julgamentos de trade-off e o perfil de risco do decisor, que neste contexto podem ser influenciados pela probabilidade de eventos raros que podem impactar

negativamente o desempenho do sistema quando ocorrem. Para modelar o comportamento humano que atribui uma importância (peso) excessiva para probabilidades extremamente altas ou baixas, a elicitação de uma função ponderação de probabilidade w_j foi executada à luz do procedimento proposto por Van de Kuilen e Wakker (2011). Esta função é utilizada no cálculo do *decision weight* de cada consequência do prospecto, que posteriormente é agregado na função MRDU dada pela Equação 5.2. Esta é uma das características distintivas do modelo MRDU em relação aos estudos sobre regras de prioridade anteriores.

Após a implantação, é possível examinar o desempenho de outros conjuntos de regras de prioridade, por meio de experimentos que envolvem: (i) tempos entre chegadas; (ii) métodos de determinação da data de entrega; e (iii) tempos de processamento. Além disso, o modelo MRDU pode ser adaptado para lidar com sistemas *job-shop* de diferentes indústrias e também, para avaliar o desempenho de regras de prioridade em relação a outros atributos. Contudo, é necessário verificar alguns pressupostos relacionados a estrutura de preferências do decisor, os quais são exigidos pela MAUT.

6.2 LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho está limitado à proposição de modelos multicritério compensatórios para três tipos de sistemas produtivos: *job-shop* controlados pelo WLC, sistemas *conwip*/MTS e *job-shop* puros. A aplicação numérica dos modelos MAVT, MAUT e MRDU foi realizada com base em dados coletados em empresas do segmento calçadista e metal-mecânico. Além disso, a solução recomendada para cada problema de decisão está condicionada a um conjunto de pressupostos que visam simplificar alguns aspectos operacionais intrínsecos aos sistemas produtivos em estudo.

No que diz respeito aos requisitos de aplicação dos métodos multicritério que sustentam este trabalho, ressalta-se a racionalidade compensatória do decisor e os pressupostos relacionados ao uso da função aditiva (Keeney e Raiffa, 1976; de Almeida et al., 2015). Especificamente para o modelo MRDU, é necessário que o decisor possua um perfil de risco não linear em relação à probabilidade de eventos raros. A validação desses pressupostos pode ser considerada uma das possíveis dificuldades para a implantação dos modelos de decisão compensatórios propostos por esta tese.

Sob esta perspectiva, é necessário desenvolver futuras pesquisas visando aprimorar e validar a utilidade prática dos modelos propostos, como ferramentas de apoio à gestão da

produção. Futuros trabalhos envolvendo o modelo FITradeoff pode contemplar os seguintes pontos:

- Testar o modelo FITradeoff no contexto da Manufatura 4.0;
- Utilizar novos atributos de desempenho para avaliação das consequências;
- Avaliar os efeitos causados pelo tempo de setup dependente;
- Realizar a aplicação deste modelo de decisão em outros tipos de empresas;
- Considerar diferentes normas para o controle da carga de trabalho direta e indireta.

Para o modelo de decisão MAUT, algumas sugestões de estudos futuros são:

- Realizar a aplicação do modelo MAUT em outros tipos de indústrias que admitem o uso do *conwip* e da política MTS;
- Utilizar o modelo MAUT para subsidiar decisões no âmbito da Manufatura 4.0;
- Considerar diferentes regras de priorização das ordens no sistema;
- Incorporar no modelo as preferências de múltiplos decisores;
- Inserir no modelo MAUT os efeitos causados pela falta de matéria-prima e pela variação do tamanho do lote de produção e de transferência.

Estudos posteriores envolvendo o modelo de decisão MRDU podem examinar os seguintes aspectos:

- Inserir os efeitos causados pelo tempo de setup dependente;
- Realizar a aplicação do modelo MRDU em outros tipos de empresas;
- Aplicar o modelo MRDU no âmbito da Manufatura 4.0;
- Considerar outros atributos de desempenho;
- Utilizar outros método de elicitação das funções w_j e u_j .

REFERÊNCIAS

- Abd, K., Abhary, K., Marian, R. *Multi-objective optimisation of dynamic scheduling in robotic flexible assembly cells via fuzzy-based Taguchi approach*. Computers & Industrial Engineering, v. 99, p. 250-259, 2016.
- ABICALÇADOS – Associação Brasileira das Indústrias de Calçados. Disponível em <<http://www.abicalcados.com.br>>. Acessado em: setembro de 2017.
- ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. Disponível em <<http://www.abinee.org.br>> Acessado em: setembro de 2017.
- Abdellaoui, M. *Parameter-free elicitation of utility and probability weighting functions*. Management Science, v. 46, p. 1497-1512, 2000.
- Aqlan, F., Ahmed, A., Ashour, O., Shamsan, A., Hamasha. M.M. *An approach for rush order acceptance decisions using simulation and multi-attribute utility theory*. European Journal of Industrial Engineering, v. 11, n. 5, p. 613-630, 2017.
- Ahmed, I., and Fisher, W. W. *Due date assignment, job order release and sequencing interaction in job-shop scheduling*. Decision Science, v. 23, p. 633-647, 1992.
- Akillioglu, H., Dias-Ferreira J., Onori M. *Characterization of continuous precise workload control and analysis of idleness penalty*. Computers & Industrial Engineering, v. 102, p. 351-358, 2016.
- Alion Science and Technology. Micro Saint Sharp, versão 3.0. Alion Science and Technology, Boulder, CO, 2008.
- Allais, M. *Le Comportement de l'Homme Rationnel devant le Risque: Critique des Postulats et Axiomes de l'Ecole Américaine*. Econometrica, v. 21, p. 503-546, 1953.
- Anderson, T.W., Darling, D.A. *"A Test of Goodness-of-Fit"*. Journal of the American Statistical Association, v. 49, p. 765-769, 1954.
- ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Disponível em <<http://www.anfavea.com.br>>. Acessado em: setembro de 2017.
- Antunes, J., Alvarez, R., Klippel, M., Bortolotto, P., Pellegrin, I. *Sistemas de Produção: Conceitos e Práticas para Projeto e Gestão da Produção Enxuta*. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- Asadi, H., 2017. *Apply Fuzzy Learning Effect with Fuzzy Processing Times for Single Machine Scheduling Problems*. Journal of Manufacturing Systems, v. 42, p. 244-261, 2017.
- Azadeh, A., Seifoory M., Abbasi M. *Integration of simulation and fuzzy multi-attribute decision making for modelling and assessment of fuzzy parameters*. International Journal of Industrial and Systems Engineering, v. 6, p. 483-502, 2010.
- Bahaji, H., Casta, J. *Employee stock option-implied risk attitude under Rank-Dependent Expected Utility*. Economic Modelling, v. 52, p. 144-154, 2016.
- Baker, K. R., Bertrand, J. W. M. *A comparison of due-date selection rules*. AIIE Transactions, v. 13, p. 123-131, 1981.
- Baker, K. R., Bertrand, J. W. M. *A dynamic priority rule for scheduling against due-dates*. Journal of Operations Management, v. 3, p. 37-42, 1982.

- Baker, K. R. The effects of input control on the performance of a simple scheduling model. *Journal of Operations Management*, v. 4, p. 99-112, 1984.
- Bauer, A., Browne, J., Bowden, R., Duggan, J. *Shop Floor Control Systems: From design to implementation*. London: Chapman & Hall, 1994.
- Belton, V., Stewart T. *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- Berger, J. O. *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis*. New York: Springer, 1985.
- Blackstone, J. H., Philips, D. T., Hogg, G. L. *A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations*. *International Journal of Production Research*, v. 20, p. 27-45, 1982.
- Bleichrodt, H., Pinto, J. L. *A Parameter-Free Elicitation of the Probability Weighting Function in Medical Decision Analysis*. *Management Science*, v. 46, p. 1485-1496, 2000.
- Breithaupt, J., Land, M., Nyhuis, P. *The workload control concept: Theory and practical extensions of load oriented order release*. *Production Planning and Control*, v. 13, p. 625-638, 2002.
- Brito, A. J. M., de Almeida A. T. *Modeling a multi-attribute utility newsvendor with partial backlogging*. *European Journal of Operational Research*, v. 220, p. 820-30, 2012.
- Carroll, D. C., 1965. *Heuristic Sequencing of Single and Multiple Component Jobs*. Ph.D. Thesis, Sloan School of Management, M.I.T., Cambridge, MA.
- Cassel, R. A., 1996. *Desenvolvimento de uma abordagem para a Divulgação da Simulação no Setor Calçadista Gaúcho*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Chase, R. B., Jacobs, F. R., Aquilano, N. J. *Administração da produção para a vantagem competitiva*. 10 ed. Porto Alegre: Bookman; 2006.
- Chung, Y. H., Lee, S., Park, S. C. *Dispatching for order-driven FABs with backward pegging*. *Cogent Engineering*, v. 3, n.1, 2016^a. <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1226460>.
- Chung, Y. H., Seo, J. C., Kim, C. M., Kim, B. H., Park, S. C. *Reservation-based dispatching rule for make-to-order wafer FAB with high-priority lots*. *Concurrent Engineering: Research and Applications*, v. 25, p. 68-80, 2016^b.
- Corrêa, H. L., Ganesi, I. G.N., Caon, M. *Planejamento, programação e controle da produção*. São Paulo: Atlas, 2001.
- de Almeida, A. T., Almeida, J. A., Costa, A. P. C. S., Almeida-Filho, A. T. *A New Method for Elicitation of Criteria Weights in Additive Models: Flexible and Interactive Tradeoff*. *European Journal of Operational Research*, v. 250, p. 179-191, 2016.
- de Almeida, A. T., Cavalcante, C. A. V., Alencar, M. H., Ferreira, R. J. P., de Almeida-Filho, A. T., Garcez T. V. *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis*. *International Series in Operations Research & Management Science*. Vol 231. New York: Springer, 2015.
- de Almeida, A.T., Ferreira R. J. P., Cavalcante C. A. V. *A review of multicriteria and multi-objective models in maintenance and reliability problems*. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 26, p. 249-271, 2015^b.

- Drouhin, N. *A rank-dependent utility model of uncertain lifetime*. Journal of Economic Dynamics and Control, 53, 208-224, 2015.
- Dyer, J. Mutiattribute utility theory. In: Figueira, J., Greco S., Ehrgott, M. (Org.). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Boston: Springer Science + Business Media, 2005.
- El Bouri, A., Amin, G. R. *A combined OWA–DEA method for dispatching rule selection*. Computers & Industrial Engineering, v. 88, p. 470-478, 2015.
- Fernandes, N. O., Thürer, M., Silva, C., Carmo-Silva, S. *Improving workload control order release: Incorporating a starvation avoidance trigger into continuous release*. International Journal of Production Economics, v. 27, p. 181-189, 2016.
- Fernandes, N. O., Silva, C., Carmo-Silva, S. *Order release in the hybrid MTO–FTO production*. International Journal of Production Economics, v. 170, p. 513-520, 2015.
- Foroozesh, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mousavi, S. M., Vahdani, B. *Dispatching Rule Evaluation in Flexible Manufacturing Systems by a New Fuzzy Decision Model with Possibilistic-Statistical Uncertainties*. Arabian Journal for Science and Engineering, v. 42, p. 2947-2960, 2017.
- Fredendall, L. D., Ojha, D., and Patterson, J. W. *Concerning the theory of workload control*. European Journal of Operational Research, v. 201, p. 99-111, 2010.
- Gaither, N., Frazier, G. *Administração da produção e operações*. 8 ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2002.
- Gogg, T. J., Mott, J.R. *Improve Quality and Productivity with simulation*. Estados Unidos: JMI consulting Group, 1992.
- Goldratt, E. M., Cox, J. *The Goal*. Croton-on-Hudson, New York: North River Press, 1984, 1993.
- Gomes, L. F. A. M., Gomes, C. F. S., de Almeida, A. T. *Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério*. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2006.
- Groover, M. P. *Automation Production Systems and Computer-Integrated Manufacturing*. New Jersey. Prentice – Hall, 2001.
- Gupta, M, Andersen S. *Revisiting local TOC measures in an internal supply chain: A note*. International Journal of Production Research, v. 50, p. 5363-5371, 2012.
- Hair, J. F., Black W. C., Babin B., Anderson R. E. *Multivariate Data Analysis*. 7 ed. Upper Sadle River: Prentice Hall, 2010.
- Hamzaday, A., Yildiz, G. *Hybrid strategy based complete rescheduling approaches for dynamic m identical parallel machines scheduling problem with a common server*. Simulation Modelling Practice and Theory, v. 63, p. 104-132, 2016.
- Haskose, A., Kingsman, B. G., Worthington, D. *Performance analysis of make-to-order manufacturing systems under different workload control regimes*. International Journal of Production Economics, v. 90, p. 169-186, 2004.
- He, Y., Stecke, K. E., Smith, M. L. *Robot and machine scheduling with statedependent part input sequencing in flexible manufacturing systems*. International Journal of Production Research, v. 54, p. 6736-6746, 2016.

- 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, p. 6812-6824, 2016.
- Hendry, L.C., Kingsman, B.G. *Production planning systems and their applicability to make to order companies*. European Journal of Operational Research, v. 40, p. 1-15, 1989.
- Hillier, F. S., Lieberman, G., J. *Introdução à Pesquisa Operacional*. 9 ed.. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- Hopp, W. J., Spearman, M. L.. *A Ciência da Fábrica*. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- Huang, J., Süer, G. A. *A dispatching rule-based genetic algorithm for multi-objective job shop scheduling using fuzzy satisfaction levels*. Computers & Industrial Engineering, v. 86, p. 29-42, 2015.
- Jia, S., Bard, J. F., Chacon, R., Stuber, J. *Improving performance of dispatch rules for daily scheduling of assembly and test operations*. Computers & Industrial Engineering, v. 90, p. 86-106, 2015.
- Keeney, R. L., Raiffa H. *Decision Making with multiples objectives, Preferences, and Value Tradeoffs*. New York: John Wiley & Sonns, 1976.
- Kendall, M. G. *Rank Correlation Methods*. 4th ed. London: Griffin, 1970.
- Kendal, G. I. *Visão Viável – Transformando Faturamento em Lucro Líquido*. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.
- Kingsman, B.; Hendry, L. *The relative contributions of input and output controls on the performance of a workload control system in make-to-order companies*. Production Planning and Control, v.13, p. 579-590, 2002.
- Krawczyk, M. *Probability weighting in different domains: The role of affect, fungibility, and stakes*. Journal of Economic Psychology, v. 51, p. 1-15, 2015
- Krajewski, L., Ritzman, L., Malhotra, M. *Administração de Produção e Operações*. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- Kutz, M. *Mechanical Engineers' Handbook*. 3 ed. Manufacturing and Management. New Jersey, John Wiley & Sons, Ins, 2015.
- Land, M. J., Gaalman, G. J. C. *Production planning and control in SMEs: time for change*. Production Planning & Control, v. 20, p. 548-558, 2009.
- Law, A.M. *Simulation Modeling and Analysis*. 5 ed. WCB/McGraw-Hill, 2015.
- Law, A. M., Kelton, W. D. *Simulation modeling and analysis*. 3. ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.
- Little, J. D. C. *A proof for the queuing formula: $L = \lambda W$* . Operations Research, v. 9, n. 3, p. 383-387, 1961.
- Lu, H. L., Huang G. Q., Yang H. D. *Integrating order review/release and dispatching rules for assembly job shop scheduling using a simulation approach*. International Journal of Production Research, v. 49, n. 3, p. 647-669, 2011.
- Luangkesorn, K. L, Klein G., Bidanda B. *Analysis of production systems with potential for severe disruptions*. International Journal of Production Economics, v. 171, p. 478-86, 2016.
- Machina, M. J. *Expected utility analysis without the independence axiom*. Econometrica, v. 50, p. 277-323, 1982.

MathWorks. Matlab versão R2015a. MathWorks Inc., Natick, MA, 2015.

Minitab. Minitab versão 17. Minitab Inc., State College, PA, 2015.

Moreira, M. R. A., Alves, R. A. F. S. *A methodology for planning and controlling workload in a job-shop: a four-way decision-making problem*. International Journal of Production Research, v. 47, p. 2805-2821, 2009.

MOVERGS – Associação das Indústrias de Móveis do Rio Grande do Sul. Disponível em <<http://www.movergs.com.br>>. Acessado em: setembro de 2017.

Munier, B. R., 2016. *On Bespoke Decision-Aid under Risk: The Engineering behind preference Elicitation*. IMA Journal of Management Mathematics. <https://doi.org/10.1093/imaman/dpw018>.

Nelson, B.L., Swann, J., Goldsman, D., Song, W. *Simple procedures for selecting the best simulated system when the number of alternatives is large*. Operations Research, v. 49, p. 950-963, 2001.

Onyeocha, C. E. *Effect of product mix on multi-product pull control*. Simulation Modelling Practice and Theory, v. 56, p. 16-35, 2015.

Onyeocha, C. E., Khoury J., Geraghty J. *Evaluation of multi-product lean manufacturing systems with setup and erratic demand*. Computers & Industrial Engineering, v. 87, p. 465-80, 2015.

Parthanadee, P., Buddhakulsomsiri J. *Simulation modeling and analysis for production scheduling using real-time dispatching rules: A case study in canned fruit industry*, Computers and Electronics in Agriculture, v. 70, p. 245-255, 2010.

Pergher, I., Vaccaro, G. L. R. *Work in process level definition: a method based on computer simulation and Electre Tri*. Produção, v. 24, p. 536-547, 2014.

Pergher, I., de Almeida, A.T. *A multi-attribute decision model for setting production planning parameters*. Journal of Manufacturing Systems, v. 42, p. 224-232, 2017.

Pergher, I., de Almeida, A.T. *A multi-attribute, rank-dependent utility model for selecting dispatching rules*. Journal of Manufacturing Systems, v. 46, p. 264-271, 2018.

Pidd, M. *Tools for Thinking: Modelling in Management Science*. 3 ed. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2009.

Pinedo, M. *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*. 2 ed. Springer, New York, 2009.

Pinedo, M. *Scheduling – Theory, Algorithms, and Systems*. 5 ed. New York: Springer, 2016.

Prelec, D. *The probability weighting function*. Econometrica, v. 66, n. 3, p. 497-527, 1998.

Pristker, A. A. B, Sigal, C. E., Hammesfahr, R. D. J. *Modeling and simulation process*. Estados Unidos, SLAM II Network Models for Decision Support, Prentice Hall, 1989.

Pürgstaller, P., Missbauer H. *Rule-based vs. optimisation-based order release in workload control: A simulation study of a MTO manufacturer*. International Journal of Production Economics, v. 140, p. 670-680, 2012.

Quiggin, J. *Risk perception and risk aversion among Australian farmers*. Australian Journal of Agricultural Economics, v. 25, p. 160-169, 1981.

Quiggin, J.. *Theory of anticipated utility*. Journal of Economic Behavior and Organization, v. 3, p. 323-343, 1982.

- Ragatz, G. L., Mabert, V. A. *An evaluation of order release mechanisms in a jobshop environment*. Decision Sciences, v. 19, p. 167-189, 1988.
- Rahmani, D., Ramezani, R. *A stable reactive approach in dynamic flexible flow shop scheduling with unexpected disruptions: A case study*. Computers & Industrial Engineering, v. 98, p. 360-372, 2016.
- Sabuncuoglu, I., Karapinar, H.Y. *Analysis of order review/release problems in production systems*. International Journal of Production Economics, v. 62, p. 259-279, 1999.
- Sharma, P., Jain A. *Performance analysis of dispatching rules in a stochastic dynamic job shop manufacturing system with sequence-dependent setup times: Simulation approach*, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 10, p. 110-119, 2015.
- Sharma, P., Jain, A. *New setup-oriented dispatching rules for a stochastic dynamic job shop manufacturing system with sequence-dependent setup times*. Concurrent Engineering: Research and Applications, v. 24, p. 58-68, 2016.
- Shingo, S. *Sistema de troca rápida de ferramenta*. Porto Alegre: Bookman, 2000.
- Siegel, S., Castellan J. *Nonparametric Statistics for The Behavior Sciences*. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1988.
- Slack, N., Chambers, S., Johnston, R. *Administração da produção*. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- Su, H., Pinedo, M., Wan, G. *Parallel Machine Scheduling with Eligibility Constraints: A Composite Dispatching Rule to Minimize Total Weighted Tardiness*. Naval Research Logistics, v. 64, p. 249-267, 2017.
- Thürer, M., Stevenson M., Silva C., Land M. *Towards an Integrated Workload Control (WLC) Concept: The Performance of Due Date Setting Rules in Job Shops with Contingent Orders*. International Journal of Production Research, v. 51, p. 4502-4516, 2013.
- Thürer, M., Qu T, Stevenson M., Maschek T., Godinho Filho M. *Continuous workload control order release revisited: an assessment by simulation*. International Journal of Production Research, v. 52, p. 6664-6680, 2014^a.
- Thürer, M., Silva, C., Stevenson M., Land, M. J. *Controlled order release: a performance assessment in job shops with sequence-dependent set-up times*. Production Planning & Control, v. 25, p. 603-615, 2014^b.
- Thürer, M., Stevenson M., Qu, T. *Job sequencing and selection within workload control order release: an assessment by simulation*. International Journal of Production Research, v. 54, p. 1061-1075, 2015^a.
- Thürer, M., Land M. J., Stevenson M., Fredendall L.D., Godinho Filho M. *Concerning Workload Control and Order Release: The Pre-Shop Pool Sequencing Decision*. Production and Operations Management Society, v. 24, p. 1179-1192, 2015^b.
- Thürer, M., Stevenson, M., Land, M. J. *On the integration of input and output control: Workload Control order release*. International Journal of Production Economics, v. 174, p. 43-53, 2016.
- Thürer, M., Stevenson, M. *Workload control in job shops with re-entrant flows: an assessment by simulation*. International Journal of Production Research, v. 54, p. 5136-5150, 2016.

- Thürer, M., Land, M. J., Stevenson, M., Fredendall L. D. *On the integration of due date setting and order release control*. Production Planning & Control, v. 28, p. 420-430, 2017^a.
- Thürer, M., Stevenson, M., Silva C., Qu, T. *Drum-buffer-rope and workload control in High-variety flow and job shops with bottlenecks: An assessment by simulation*. International Journal of Production Economics, v. 188, p. 116-127, 2017^b.
- Thürer, M., Fernandes, N. O., Stevenson, M., Qu, T. *On the backlog-sequencing decision for extending the applicability of ConWIP to high-variety contexts: an assessment by simulation*. International Journal of Production Research, v. 55, p. 4695-4711, 2017^c.
- van de Kuilen, G., Wakker, P. P. *The midweight method to measure attitudes toward risk and ambiguity*. Management Science, v. 57, p. 582-598, 2011.
- Vepsäläinen, A. and Morton, T. *Priority rules for job shops with weighted tardiness costs*. Management Science, v. 33, p. 1035-1047, 1987.
- Xanthopoulos, A. S., Koulouriotis D. E. *Multi-objective optimization of production control mechanisms for multi-stage serial manufacturing-inventory systems*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 74, p. 1507-19, 2014.
- Xanthopoulos, A. S., Koulouriotis D. E., Gasteratos, A. *Adaptive card-based production control policies*. Computers & Industrial Engineering, v. 103, p. 131-144, 2017.
- Xiong, H., Fan, H., Jiang, G., Li, G. *A simulation-based study of dispatching rules in a dynamic job shop scheduling problem with batch release and extended technical precedence constraints*. European Journal of Operational Research, v. 257, p. 13-24, 2017.
- Yan, H., Stevenson M., Hendry L. C., Land M. J. *Load-Oriented Order Release (LOOR) revisited: bringing it back to the state of the art*. Production Planning & Control, v. 27, p. 1078-1091, 2016.
- Yang, Z., Ma, Z., Wu, S. *Optimized flowshop scheduling of multiple production lines for precast production*. Automation in Construction, v. 72, p. 321-329, 2016.
- Yoon, S. W., Cho, Y. J., & Jeong, S. J. *Combination effects analysis of bottleneck-load order review/release and the dispatching rule: Application to a printed circuit board manufacturing line with multiple bottlenecks*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, v. 15, p. 1725-1732, 2014.
- Wakker, P. P. *Prospect theory for risk and ambiguity*. United Kingdom: Cambridge University Press, 2010.
- Wakker, P., D., Deneffe., 1996. *Eliciting von Neumann-Morgenstern utilities when probabilities are distorted or unknown*. Management Science, v. 42, p. 1131-1150, 1996.
- Weber, M., Borcherding, K. *Behavioral influences on weight judgments in multiattribute decision making*. European Journal of Operational Research, v. 67, p. 1-12, 1993.
- Weng, M. X., Wu, Z., QI, G., ZHENG, L. *Multi-agent-based workload control for make-to-order manufacturing*. International Journal of Production Research, v. 46, p. 2197-221, 2008.
- Zäpfel, G., Missbauer, H. *New concepts for production planning and control*. European Journal of Operational Research, v. 67, p. 297-320, 1993.