

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ANTÔNIO WILLIAM OTACIANO ROSÁRIO

**PROPOSTA DE SEQUENCIAMENTO E ALOCAÇÃO DE TAREFAS
EM UM CONTEXTO DE MÁQUINAS PARALELAS IDÊNTICAS PARA
A MINIMIZAÇÃO DO USO DE SOLVENTES QUÍMICOS: ESTUDO DE
CASO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2019

ANTÔNIO WILLIAM OTACIANO ROSÁRIO



**PROPOSTA DE SEQUENCIAMENTO E ALOCAÇÃO DE TAREFAS
EM UM CONTEXTO DE MÁQUINAS PARALELAS IDÊNTICAS PARA
A MINIMIZAÇÃO DO USO DE SOLVENTES QUÍMICOS: ESTUDO DE
CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia de Produção, do Departamento de Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fábio José Ceron Branco

PONTA GROSSA

2019

	<p style="text-align: center;">Ministério da Educação UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ CÂMPUS PONTA GROSSA Departamento Acadêmico de Engenharia de Produção</p>	
---	--	---

TERMO DE APROVAÇÃO DE TCC

**PROPOSTA DE SEQUENCIAMENTO E ALOCAÇÃO DE TAREFAS EM UM
CONTEXTO DE MÁQUINAS PARALELAS IDÊNTICAS PARA A MINIMIZAÇÃO
DO USO DE SOLVENTES QUÍMICOS: ESTUDO DE CASO**

por

Antônio William Otaciano Rosário

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 02 de dezembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção. O(A)(s) candidato(a)(s) foi(foram) arguido(a)(s) pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr(a). Fábio José Ceron Branco
Prof. Orientador(a)

Prof. Dr(a). Shih Yung Chin
Membro titular

Prof. Dr(a). Juan Carlos Claros Garcia
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me amparar nas horas mais difíceis.

À minha mãe Maria Célia, pela colaboração e pelo apoio incondicional.

Aos meus irmãos, tios e primos que me apoiaram mesmo que à distância.

Ao Professor Fábio Branco, pela orientação deste trabalho.

A todos aqueles, amigos, colegas e professores que contribuíram por toda a caminhada até esse trabalho.

RESUMO

OTACIANO, A. W. **PROPOSTA DE SEQUENCIAMENTO E ALOCAÇÃO DE TAREFAS EM UM CONTEXTO DE MÁQUINAS PARALELAS IDÊNTICAS PARA A MINIMIZAÇÃO DO USO DE SOLVENTES QUÍMICOS: ESTUDO DE CASO.** 2019. 52 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Os solventes químicos possuem diversas usabilidades no meio industrial, em especial a indústria de revestimento. Nesse meio tem como uso comum o auxílio na diluição das resinas e para a limpeza da produção de um lote para outro, sendo alguns solventes combatíveis com o outro ou não, logo a ordem de qual produto produzir primeiro torna-se de extrema importância para as definições dos custos com a limpeza dos equipamentos. Tais produtos podem ser de extrema periculosidade para as vidas humanas e ambientais, em especial os solventes orgânicos que podem contribuir para o aparecimento de irritações de pele e das vias aéreas, além de conterem agentes cancerígenos. Desse modo, este trabalho propõe, através do uso do *software* Lingo, utilizar de métodos exatos com a finalidade de contribuir para uma opção de redução do uso de solventes químicos, em um ambiente de máquinas paralelas. Após uma implementação computacional de 50 horas chegou-se a resultados de compatibilidade par-a-par de 32 (dado real) para 83 vezes (resultado da simulação), aumento de 160%, bem como reduzindo a média entre os tempos totais de produção de 698,14 para 622,00 minutos, propiciando uma redução de 12,2%. Portanto, o método de solução utilizado foi capaz de expor uma nova opção de sequenciamento e alocação das atividades nas máquinas de uma produção industrial química que oferece uma redução sobre o uso dos solventes, bem como, o custo.

Palavras-chave: Solventes, Minimização, Máquinas Paralelas.

ABSTRACT

OTACIANO, A. W. **PROPOSAL OF SCHEDULING AND ALLOCATION OF TASKS IN A CONTEXT OF IDENTICAL PARALLEL MACHINES FOR MINIMIZATION THE USE OF CHEMICAL SOLVENTS: CASE STUDY**. 2019. 52 p. Work of Conclusion Course (Graduation in Production Engineering – Federal University of Technology – Paraná. Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Chemical solvents have many uses in the industrial environment, especially the coating industry. In this medium has as common use the aid in the dilution of resins and for cleaning production from one batch to another. In this medium has as common use the aid in the dilution of resins and cleaning production from one batch to another, with some solvents being combatable with the other or not, so the order of which product to produce first becomes extremely important for the companies. definitions of equipment cleaning costs. Thus, this work proposes, using Lingo software, to use exact methods in order to contribute to an option to reduce the use of chemical solvents in a parallel machine environment. After a 50-hour computational implementation, peer-to-peer compatibility results were achieved from 32 (actual data) to 83 times (simulation result), an increase of 160%, as well as reducing the average between total production times. from 698.14 to 622.00 minutes, providing a reduction of 12.2%. Therefore, the solution method used was able to expose a new option of sequencing and allocation of activities in the machines of a chemical industrial production that offers a reduction on the use of solvents as well as the cost.

Keywords: Solvents. Scheduling. Minimization. Parallel Machines.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Dados históricos de compatibilidades.....	33
Figura 2 – Dados do algoritmo proposto de compatibilidade.....	33
Figura 3 – Makespan Proposto x Histórico.....	34
Quadro 1 – Propriedades físico-química dos solventes.....	155
Quadro 2 – Tipologias do problema de máquinas paralelas.....	19
Quadro 3 – Terminologia para o entendimento da otimização combinatória.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Compatibilidade entre produtos.....	30
Tabela 2 - Compatibilidade entre produtos por mês e o total de lotes produzidos.....	30
Tabela 3 - Tempos de processamento dos produtos por máquinas.....	31
Tabela 4 - Tempo de processamento total por máquina em cada mês e o valor do <i>makespan</i> de referência.....	31
Tabela 5 - Tempo de processamento por máquina e mês Proposto.....	34
Tabela 6 - Percentual de melhoria Proposto x Histórico.....	35
Tabela 7 – Exemplo ilustrativo Definição do número de lote, tempo de processamento e a tabela de compatibilidade dos produtos.....	36
Tabela 8 – Exemplo ilustrativo Definição do tempo de processamento e a tabela de compatibilidade das tarefas.....	36
Tabela 9 – Exemplo ilustrativo Definição do tempo de processamento das tarefas por máquina.....	37
Tabela 10 – Exemplo ilustrativo Matriz de compatibilidade.....	38
Tabela 11 – Exemplo ilustrativo Matriz das variáveis binárias.....	39
Tabela 12 – Exemplo ilustrativo Definição dos instantes de término a partir do resultado possível.....	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	11
1.2 JUSTIFICATIVA.....	11
1.3 OBJETIVO GERAL	12
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 SOLVENTES	13
2.1.1 Os Perigos De Sua Utilização.....	14
2.1.2 Indústria De Tintas.....	16
2.1.3 Gerenciamento de Solventes.....	17
2.2 SEQUENCIAMENTO DE MÁQUINAS	18
2.2.1 Máquinas Paralelas	19
2.3 MINIMIZAÇÃO/ OTIMIZAÇÃO.....	20
2.3.1 Métodos Exatos	20
2.3.2 Métodos Aproximados	21
2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROBLEMA ABORDADO	21
2.4.1 Apresentação do Algoritmo.....	22
3 METODOLOGIA DA PESQUISA	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 CONTEXTO GERAL DA EMPRESA.....	28
4.2 ANÁLISE DO MODELO	32
4.2.1 Exemplo do Modelo do Algoritmo	36
5 CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	45
APÊNDICE A – BASE DE DADOS HISTÓRICA	49
APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS	51

1 INTRODUÇÃO

Os solventes químicos possuem uso variado e amplo, desempenhando papel importante em vários tipos de indústrias, dentre elas, a alimentícia, farmacêutica, eletrônica e na indústria foco do atual estudo, a indústria química (SILLA, ARNAU, TUÑÓN, 2014).

Em especial, para este setor, os solventes são utilizados com dois objetivos, o primeiro é na própria formulação do produto, auxiliando na diluição da resina, e o segundo objetivo é com a necessidade de limpeza para a preparação da produção de um lote para o outro (SILLA, ARNAU, TUÑÓN, 2014). Muitos solventes não apresentam nenhum perigo aos humanos e nem ao meio ambiente, como a água, mas um grupo especial de solventes são extremamente perigosos para a vida, são os solventes orgânicos, comumente utilizados na indústria química, em especial na indústria de revestimento (NASCIMENTO, 2013).

Com o seu fácil manuseio e a possibilidade de múltiplas utilidades fazem com que esses produtos possam ser usados de maneira discriminada, tornando-se um perigo para os envolvidos (NAYAS, 2018).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019), a indústria química segue em constante crescimento desde 2009, com expectativa de mais crescimento do setor no parâmetro nacional, o que pode ser entendido como um possível aumento em quantidades de solventes utilizados.

Os perigos envolvendo o manuseio dessas substâncias à saúde humana incluem desde irritações de pele e das vias respiratórias, até a exposição a agentes cancerígenos e toxinas reprodutivas, além de apresentar riscos de inflamabilidade e explosão, o que expõe os colaboradores industriais ao perigo (Souza, 2009). Já o impacto ao meio ambiente pode ser observado através de seu potencial de criação de ozônio até a ecotoxicação aquática e terrestre, caso o tratamento dos seus resíduos não seja feito (JIMENEZ-GONZALEZ, 2019). Isto evidencia que há necessidade de redução desses materiais, ou uma opção de substituição menos agressiva.

Jimenez-Gonzalez (2019) expõe algumas alternativas para evitar e/ ou reduzir o uso desses materiais, são elas, as práticas em química verde, ou por meio de princípios de engenharia.

O presente trabalho pretende focar nessa segunda opção dado pelo autor, pretendo utilizar da pesquisa operacional para oferecer uma alternativa que contribua para a minimização desses materiais.

Desde modo, o objetivo do trabalho é comparar os resultados da base histórica de produção com os resultados do algoritmo proposto pelo autor. Pretendendo oferecer uma melhor opção de sequenciamento e alocação de tarefas para o contexto de máquinas paralelas idênticas, utilizando o *software* Lingo.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Como solucionar um problema de máquinas paralelas idênticas dentro do contexto da programação linear exata com a finalidade de oferecer uma proposta de minimização do uso de solventes para limpeza em uma indústria química, definindo o melhor sequenciamento e alocação dos produtos pelas máquinas disponíveis?

1.2 JUSTIFICATIVA

Além do fato de que compostos químicos como alguns solventes podem ser tóxicos para a vida humana e para o meio ambiente e desse modo, deve ser discutido maneiras para a sua redução ou eliminação por completa, Jimenez-Gonzalez (2019) indaga sobre reduções por duas vias:

- Por práticas da química verde;
- Por princípios de engenharia.

Pela primeira via, a química verde, esse trabalho não tem a intenção de explanar sobre, mas sim pelas práticas em engenharia, para a redução sobre o uso, justificando a existência do trabalho dentro de um contexto global da saúde humana.

Além da saúde humana e da preservação do meio ambiente, outro fato de justificativa do trabalho e um ponto relevante para as empresas é a relação custo x benefício de seus processos, incluindo o processo de produção de seus produtos e manutenção do maquinário (Lustosa et al., 2011).

Logo, torna-se bem-vindo experimentos que possuem a proposta de gerar aumento de competitividade, qualidade, produtividade, e por consequência a lucratividade dessas empresas (Jimenez-Gonzalez, 2019).

Dessa maneira, o presente estudo pretende contribuir trazendo uma nova possibilidade para potencializar os pontos expostos acima com foco no sequenciamento e alocação de tarefas dos processos industriais, a fim de minimizar a necessidade da limpeza do maquinário entre a produção de produto para outro, e dessa forma, contribuindo para a redução de custos de fabricação.

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho concerne em elaborar um modelo de algoritmo que proponha a minimização do uso de solventes para a limpeza de maquinário em uma indústria química, através da melhor distribuição e alocação dos produtos pelas máquinas disponíveis, com a finalidade de diminuir o tempo de processamento dos produtos nos reatores.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Nesse tópico são apresentados os objetivos específicos a serem desenvolvidos no presente trabalho, com a finalidade de atingir o objetivo geral:

- i) Efetuar a revisão bibliográfica dos conceitos de destaque na literatura para solução em minimização e sequenciamento das tarefas (*schedulling*);
- ii) Implementar computacionalmente um dos modelos escolhidos para a solução do problema;
- iii) Comparar os resultados adquiridos com o da base histórica do problema nessa indústria química;
- iv) Analisar a eficiência dos resultados em minimizar o uso de solvente na indústria química, bem como o método escolhido para essa realização.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo pretende expor uma revisão sistemática de literatura para o entendimento sobre os temas relevantes do trabalho, tais como o entendimento sobre solventes químicos, sequenciamento de máquina e minimização/otimização, a partir de um levantamento bibliográfico sobre o tema.

2.1 SOLVENTES

Os solventes são componentes importantes para muitas indústrias, seja ela química, farmacêutica, têxtil, alimentícias ou outros tipos. Sendo usados em unidades de toneladas na própria produção de seus produtos, ou na limpeza em alguma parte do processo (SILLA, ARNAU, TUÑÓN, 2014).

Para a Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas (ABRAFATI) (2005) o conceito de solvente pode ser entendido como sendo de produtos que possuem a utilização de dissolver ou solubilizar outros materiais.

Nayas (2018) complementa descrevendo como solvente o componente em excesso em uma mistura. A água é considerada como o solvente mais barato e é a escolha para muitas aplicações.

Reichardt e Wypych (2014) descrevem as substâncias comumente chamadas de solventes como sendo materiais que possuem a capacidade de dissolver outros materiais com a finalidade de formar uma solução homogênea. Em que a substância em excesso, em maior quantidade, é chamada de solvente e a de menor quantidade, é chamada de soluto.

De maneira geral, a aplicação dos solventes é, em maioria, como formador de um ambiente propício para reações, separações, agentes catalisadores, produtos de limpezas ou como produtos inerentes de produtos químicos, como para a limpeza. Podendo ser bastante amplas as utilidades práticas desses materiais. Ainda, não se deve descartar que há vários tipos de solventes, que alguns desses materiais despertam uma preocupação quanto ao seu impacto com o meio ambiente, saúde e segurança como um todo (JIMENEZ-GONZALEZ, 2019).

O estado líquido em temperaturas ambientes é o estado mais encontrado para substâncias solventes, mas podendo ser encontrados em estado sólido ou gasosos.

Tendo um ponto máximo de ebulição de 250° C e são substâncias não reativas e sua interação com o soluto ocorre apenas por forças intermoleculares, sem alteração química durante o processo (REICHARDT e WYPYCH, 2014). Em complemento, Petrie (2011) diz que para um solvente realizar o seu papel, ele necessita ter características químicas próximas ao material em que há tentativa de dissolução.

Petrie (2011) e Lau e Koenig (2001) compartilham o mesmo critério de importâncias para certos fatores significantes para a seleção de um solvente. Sendo as propriedades físico-químicas o seu poder de solvência, taxa de evaporação, ponto de inflamação ou fulgor, cor, odor, toxicidade e viscosidade, além de características não controláveis como os custos com descarte e impactos sobre o meio ambiente (biodegradação).

Há uma breve descrição das características físico-químicas descritas no Quadro 1, contido na página seguinte.

Além dessas características descritas no Quadro 1, Silla, Arnau e Tuñón (2014) salientam que há por volta de cento e dez (110) propriedades diferentes para os solventes contidos nos bancos de dados da *ChemTec Publishing*, canal internacional especializado em publicações a respeito de compostos químicos, como polímeros, plásticos e borrachas.

Os solventes ainda podem ser diferenciados pela sua estrutura química, podendo ser um solvente de hidrocarbonetos, um solvente orgânico, clorados, dentre outros tipos mais específicos (Souza, 2009).

2.1.1 Os Perigos De Sua Utilização

Os perigos dos solventes químicos são evidentes em todas as suas aplicações. De acordo com o Instituto Nacional de Câncer do Ministério da Saúde (2019), um solvente em geral, é um material bastante volátil, evaporando-se de maneira natural em temperatura e pressão ambiente, e que por esse motivo tornam-se substâncias de fácil inalação, além de que muitos são inflamáveis.

Quadro 1 – Propriedades físico-químicas dos solventes

Propriedades	Características Principais
Poder de Solvência	Interação até a estabilização entre solvente e soluto ou entre solvente e grupos funcionais de materiais insolúveis.
Taxa de evaporação	Taxa de evaporação ou volatilidade é a taxa da tendência que um líquido tem para evaporar em condições normais de pressão e temperatura.
Ponto de Inflamabilidade	Ponto de Inflamabilidade ou somente inflamabilidade é o ponto limite de solventes voláteis inflamarem e entrarem em combustão.
Cor	A coloração ou índice de refração é a razão entre a velocidade da luz de um comprimento de onda especificado no ar e sua velocidade na substância examinada.
Odor	Análise através dos limiares de odor foram desenvolvidos para relacionam o sentido humano de cheiro à concentração das substâncias agressoras. Se a substância é tóxica, seu odor pode fornecer um alerta precoce ao perigo. Como há substâncias bastantes tóxicas, mas que não exalam odores, esse limiar é limitado.
Toxicidade	Para a medição da toxidade de um solvente as métricas utilizadas são as de dose letal, LD50 e concentração letal, CL50. Ou seja, a quantidade de substância administrados de uma só vez (oral, dérmica ou inalatória), necessários para matar 50% dos população em teste. A LD50 é relatada em miligramas de substância por quilograma de peso corporal causar a morte em 50% dos animais testados (a exceção é CL50, que é dada em ppm acima de geralmente o período de 4 horas para produzir o mesmo efeito). São essas as métricas que determinam o efeito de uma substância orgânica na ingestão, contato com a pele e inalação. Geralmente testada em ratos e/ou coelhos.
Viscosidade	Resistência da solução ao escoamento, esse índice tem uma relação com o ponto de ebulição.
Biodegradação	A taxa de biodegradação pode ser medida de várias maneiras como meia-vida de biodegradação. Sendo substâncias químicas biodegradáveis as capazes de serem decompostas pela ação de agentes biológicos, especialmente microrganismos como bactérias com o passar do tempo.

Fonte: adaptada de REICHARDT e WYPYCH, 2014 (2018)

Verifica-se em outras literaturas, autores que defendem consequências de perda auditiva e demais problemas à saúde dos colaboradores pela exposição a solventes orgânicos em indústria (MONT'ALVERNE *et al.*, 2013).

Sendo mais específico, em trabalho como de Tsai et al. (1997) há relatos de síndromes neurotóxicas resultantes da exposição a solventes orgânicos. Lemaster et al. (1999) vai mais além e relaciona a exposição em ambientes industriais com a queda na contagem e mobilidade dos espermatozoides dos colaboradores.

Além de riscos com a exposição a médio e longo prazo, verifica-se que no contato imediato com certos tipos de solventes pode ocasionar efeitos como irritação na pele, das vias respiratórias e dos olhos (Souza, 2009).

Outro complemento sobre a importância do cuidado no manuseio dessas substâncias é como relata Jimenez-Gonzalez (2019) que expõe o impacto de solvente ao meio ambiente, destacando os solventes como potenciais alterações climáticas de toxicidade terrestre ou aquática.

Uma análise sobre o ciclo de vida dessas substâncias deve ser realizada no processo de decisão sobre o uso ou não de um determinado solvente, sendo que esta análise deve incluir a matéria prima utilizada, fabricação, uso, reciclagem (caso seja possível) e tratamento final (JIMENEZ-GONZALEZ, 2019).

Ainda segundo Jimenez-Gonzalez (2019), as categorias de impactos envolvidas nessa análise devem avaliar fatores como a acidificação, ecotoxicidade, radiação ionizante, eutrofização, toxicidade direta sobre os humanos, uso da terra, biodiversidade, destruição do ozônio, material particulado, criação fotoquímica de ozônio, esgotamento de recursos, aquecimento global. Continuando, Jimenez-Gonzalez (2019) salienta a importância por práticas da química verde e princípios de engenharia para a redução de uso de solventes.

Sendo assim, de acordo com o comentário anterior, há dois caminhos para a redução do uso desses compostos que podem ser perigosos. Sobre a química verde esse trabalho não tem a intenção de explanar sobre, mas sim sobre as práticas em engenharia para essa redução ao uso, importante dentro de um contexto global da saúde humana.

2.1.2 Indústria De Tintas

Para o processo de fabricação de revestimento, mais especificamente, esses compostos são utilizados como agentes mantenedores da homogeneidade da mistura, dissolvendo a resina para isso, tornando-se parte essencial para proporcionar a viscosidade adequada para o revestimento, além de ter contribuição na formação da película com a aplicação da mistura na superfície desejada (Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas, 2005).

A grande vantagem na fabricação de produtos à base de solventes na indústria de tintas é o seu baixo teor de enxofre, seu alto poder de solvência, além da segurança de manipulação por ter um ponto de inflamação e taxa de evaporação entre 38° a 45° C (NASCIMENTO, 2013).

Nessa indústria, a garantia de conformidade das misturas de resina e solvente na produção dos diferentes lotes de produtos, é garantida pela limpeza dos filtros, dos tubos conectores, dos reatores e do diluidor entre os lotes ou bateladas. Essa limpeza é realizada com um tipo de solvente compatível com a resina posterior de produção, tendo como resultado uma mistura de restos de resina com solvente. Operações de limpeza são as maiores geradoras de resíduos nessa indústria (NASCIMENTO, 2013).

Além dos resíduos dessa limpeza outro fator de importância é que segundo Porto e Sgarbossa (2017) há um perigo ao redor da manutenção de reatores ou também chamados de vasos de pressão, por se tratarem de tanques ou cilindros fechados utilizados para armazenagem de solventes líquidos ou gasosos que podem ser perigosos, podendo criar pressão no seu armazenamento.

2.1.3 Gerenciamento de Solventes

Esse tópico foi criado na intenção de esclarecer o contexto que o presente trabalho se encontra dentro de uma indústria. Para isso a *Association of British furniture manufactures*, em 1999, estabeleceu algumas técnicas para a análise e controle sobre o consumo de solventes, com foco na redução de gastos com a compra, bem como a redução dos impactos ambientais. As principais são:

- Identificação da quantidade consumida de solventes;
- Identificação de quais solventes serão gerenciados, o escopo do projeto;
- Identificação de como será o gerenciamento, bem como os responsáveis;
- Identificação de como será avaliado os planos de controles de práticas e o gerenciamento;
- Implementação dos planos de avaliação de impactos e falhas desse processo.

Dessa forma, o trabalho se enquadra no gerenciamento do solvente dentro do contexto da indústria de tintas.

2.2 SEQUENCIAMENTO DE MÁQUINAS

A Pesquisa Operacional é a área de pesquisa que pretende buscar o desenvolvimento de algoritmos ou modelos matemáticos aplicados na resolução de problemas de tomadas de decisão para problemas reais e, de certa forma, complexos (LOPES; RODRIGUES; STEINER,2013).

Dentre as diversas linhas de pesquisas dentro da Pesquisa Operacional encontra-se a otimização combinatória com os problemas de programação da produção ou também chamado de *scheduling*, problemas esses introduzidos por Henry Gantt em 1918, fundamentando em gráficos, cálculos e restrições de tempo, e que a partir de seus estudos esse tipo de problema ganhou expressividade (Lustosa et al., 2011).

São métodos resolutivos que pretendem otimizar o tempo total de produção de um determinado grupo de tarefas para um determinado grupo de máquinas, sobre diferentes parâmetros limitantes (Lustosa et al., 2011).

De maneira geral, esse tipo de problema busca concluir cada uma das atividades envolvidas o mais rápido possível, a respeito o tempo de início e de fim dos processos, procurando assim a otimização do problema (EBENLENDR; SGALL, 2015).

Para melhor esclarecimento sobre o que é o problema de *Scheduling*:

Nesse tipo de problema, existe um conjunto J de n tarefas ou também chamados de *jobs* e damos o nome de J_i ($i = 1, \dots, n$). E um conjunto M de m máquinas, definido como M_k ($k = 1, \dots, m$) (Brucker, 1998).

Cada tarefa ou *job* deverá ser processada em um subconjunto de m máquinas. O problema então visa encontrar a alocação de tarefas à(s) máquina(s), isso é decidir qual tarefa vai permanecer em cada máquina, bem como o sequenciamento destas tarefas nas máquinas, definindo qual tarefa será a anterior ou a posterior dentro daquela mesma máquina, de modo que determinado(s) objetivo(s) de produção seja(m) alcançado(s), normalmente o objetivo é a minimização de custos, tempo, atraso e outros, e as demais restrições associadas a ambos os conjuntos, de tarefas e de máquinas devem ser atendidas, um exemplo seria que a tarefa 1 e 5 devem ser iniciadas juntas (Brucker, 1998).

Há diversas variantes para essas situações, problemas de máquina simples, máquina paralela, o *flow-shop* e o *jobshop* (Brucker, 1998). Para o presente trabalho a variante a ser explorada é a de máquinas paralelas.

2.2.1 Máquinas Paralelas

O problema de máquinas paralelas é definido como sendo um conjunto de tarefas independentes que devem ser alocadas e sequenciadas em máquinas paralelas, em mais de uma máquina. São três (3) os pontos que dão mais complexidade ao problema: o critério a ser otimizado, a tipologia das máquinas e os diferentes recursos (RAVETTI, 2007).

Dentre a tipologia dos problemas de máquinas paralelas podem ser idênticas, uniformes ou independentes, como apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Tipologias do problema de máquinas paralelas

Tipologia do problema	Características principais
Máquinas idênticas	Os tempos de processamento de cada tarefa são independentes da máquina que processa isso. O tempo é o mesmo
Máquinas uniformes	Para cada máquina há uma velocidade diferente e o tempo de processamento necessário para realizar cada trabalho permanece proporcional a todos os trabalhos. Exemplo é são duas máquinas que processam os mesmos produtos só que uma a com metade do tempo da outra máquina.
Máquinas não relacionadas	Não há relação entre as máquinas. O tempo de processamento de cada trabalho não tem relação com o tempo de processamento do mesmo trabalho em nenhuma outra máquina.

Fonte: adaptada de Ravetti (2007)

Neste trabalho é utilizado o ambiente de máquinas paralelas idênticas, já que o tempo de processamento das tarefas nas máquinas são iguais. Mas salientando que o algoritmo utilizado pode se comportar na tipologia de máquinas paralelas não relacionadas, isso é caso seja do interesse, há possibilidade de alteração dos tempos de processamento das tarefas sem prejuízo ou alteração do algoritmo.

2.3 MINIMIZAÇÃO/ OTIMIZAÇÃO

Para um problema de programação da produção, os métodos de otimização combinatória são classificados em dois grupos: os métodos exatos e os métodos aproximados (Talbi, 2009).

2.3.1 Métodos Exatos

Os métodos exatos são aqueles que procuram a melhor solução para aquele problema, satisfazendo a todas as restrições (Talbi, 2009). Os algoritmos utilizados pelos métodos exatos resolvem o problema percorrendo o espaço de busca e subdividindo em problemas mais simples. Dentre os algoritmos desse tipo destacam-se o *branch-and-bound*, plano de cortes e *branch-and-cut*, sendo o algoritmo de *branch and bound* o modelo de busca utilizado pelo *software* Lingo, esse que será utilizado no trabalho, e é detalhado na sequência.

Mas antes de prosseguir como o estudo é necessário expor alguns termos característicos dentro da otimização combinatória. Segue o Quadro 3 com os termos encontrados na literatura.

Quadro 3 – Terminologia para o entendimento da otimização combinatória

Termo	Significado principal
Solução Viável	É entendida como sendo de uma solução que respeita todas as restrições do problema a ser resolvido.
Função Objetivo	Esse termo diz que a função objetivo f associa a cada solução s pertencente ao espaço de busca comum do problema um determinado valor, um número real indicando a sua qualidade.
Ótimo global	Para um valor ser dado como uma ótima global em um problema de minimização, essa solução s deve ser o menor valor dentre todas as possibilidades encontradas, de todas as soluções no espaço de busca. Ao passo que em um problema de maximização, essa solução s deve ser a maior dentre todas as encontradas.
Vizinhança	Entende-se esse termo ao considerar que duas (2) soluções s apresentam vizinhança se houver a possibilidade de determinar uma a partir da outra, realizando uma mínima alteração na solução no espaço de busca. Duas soluções são ditas vizinhas se, a partir de determinada alteração em uma solução, se alcança a outra.
Ótimo Local	Esse termo diz respeito a uma solução s , que dentro do espaço de solução assume a melhor solução objetivo dentre todas as soluções vizinhas.

Fonte: adaptada de Talbi (2009)

- *Branch-and-bound*: Trata-se de um método algorítmico que é especialmente utilizado para a resolução de problemas combinatórios e de sistemas discretos, esse método enumera as soluções viáveis nos problemas de otimização, comparando-as entre si. Seu modo de funcionamento segue utilizando dois critérios, o de ramificação e delimitação, processo no qual divide-se o problema em dois ou mais subproblemas excluídos mutuamente, não iguais, então calcula-se os limites inferiores de cada subproblema gerado, e com o valor que melhor se encaixa para o critério da função objetiva é recolhido e a partir dele são formados dois ou mais subproblemas e dessa forma em diante, até verificar-se o valor ótimo global (RAVETTI, 2007).

Talbi (2009) complementa com a analogia entre o problema e árvores e suas raízes, sendo as árvores as soluções, representam o problema a ser resolvido e as raízes dessas árvores são as soluções possíveis e as próximas raízes, são os subproblemas, sempre analisando dentro do espaço de solução possível, caracterizando as raízes da árvore como sendo soluções completas e validas e prováveis candidatas para ser os ótimos globais.

2.3.2 Métodos Aproximados

Os métodos aproximados possuem como finalidade encontrar uma solução para problemas complexos. São realizados para os tipos de problemas em que uma solução de boa qualidade já é suficiente, não sendo necessário que a solução ótima global seja encontrada. Os algoritmos de métodos aproximados possuem duas classes: os chamados somente de algoritmos aproximativos, e os algoritmos heurísticos. Os métodos aproximados não serão mais explorados já que não é o foco do trabalho.

2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROBLEMA ABORDADO

O problema de pesquisa consiste em processar todas as tarefas em máquinas paralelas idênticas, levando em consideração que para o processamento da tarefa atual há um peso “x” embutido dentro da relação dela com a tarefa anterior, que é uma relação que representa o custo de produção com o uso do solvente entre as duas tarefas, isso é, qual seria o custo de manutenção/limpeza pelo uso do solvente que o

processo terá se for produzido a tarefa j depois da i . Logo, a posição de uma tarefa dentro do sequenciamento poderá implicar um aumento no valor do custo.

O objetivo é minimizar o tempo de processamento, multiplicado com o peso, representando o custo com o uso de solvente dado pela relação entre a atividade atual e a anterior. Para a resolução desse problema foi elaborado um modelo matemático para o *software* Lingo, que utilizará o método de conversão de *branch-and-bound*.

Antes de apresentar o algoritmo é necessário esclarecer duas decisões importantes:

- Primeiro, foi permitido o turno de vinte e quatro horas, não há restrição de tempo de funcionamento das máquinas. Caso essa condição não tivesse sido estimada teríamos tarefas terminada no meio do processo, descaracterizando o problema de máquinas paralelas idênticas.
- O segundo é sobre a função objetivo. O que é bem divulgado na otimização combinatória é a possibilidade de escolha de vários critérios na função objetivo que podem ser usados com diferentes propósitos (RAVETTI, 2007). Logo, para aproximar o nosso estudo da realidade, em que não se analisa somente um critério, justificando o uso da combinação de diferentes objetivos. De maneira geral, foi decidido por utilizar um algoritmo que tem por objetivo minimizar a multiplicação entre o *makespan*, isso é, o instante em que a última máquina encerrar o seu processamento e a soma dos pesos, entre a relação da tarefa atual com a posterior. Esses pesos são de suma importância para o trabalho, já que relacionam as tarefas com o custo com o uso de solventes.

2.4.1 Apresentação do Algoritmo

O modelo de algoritmo utilizado nesse trabalho é uma adaptação de Ruiz-Torres et al. (2013), e é definido da seguinte forma:

- I. Absolutamente todas as tarefas estão disponíveis para começar no tempo zero, e não havendo possibilidade para interrupção uma vez da

tarefa iniciada. Além do mais, cada tarefa deve ser executada apenas uma única vez.

- II. Quanto as máquinas, cada uma somente pode executar uma tarefa de cada vez e não pode ficar disponível até que a tarefa for completamente executada. Lembrando que são máquinas paralelas idênticas, dando como característica o fato de que para cada tarefa há apenas um tempo de processamento idêntico em cada uma das máquinas.
- III. Há n tarefas, estabelecendo o conjunto $N = \{1, \dots, i, j, \dots, h, \dots, n\}$, sendo i uma tarefa qualquer, j a próxima tarefa imediata e h uma tarefa imediatamente sucessora diferente de i e j , para serem processadas em m máquinas paralelas idênticas, formando o conjunto $M = \{1, \dots, k, \dots, m\}$.
- IV. A representação do tempo de processamento da tarefa $i \in N$ na máquina $k \in M$ é igual a P_{ik} .
- V. O peso dado pela relação do custo com o uso de solvente após término da tarefa i e início da próxima tarefa j é representado por S_{ij} .
- VI. Para representar a maior soma dos pesos da relação tarefa-tarefa nas máquinas, o valor de total dos pesos, usou-se S_{max} .
- VII. Para auxiliar o nosso algoritmo adota-se G para designar um número muito grande, para o programa representando 9999.
- VIII. Para representar o instante de término do processamento da tarefa i na máquina k , usou-se C_{ik} .
- IX. Para representar a maior soma dos instantes de término das tarefas nas máquinas, o valor de *makespan*, usa-se C_{max} .
- X. Usou-se X_{ijk} como variável binária, que assume 1 se a tarefa i é a precedente instantânea da tarefa j na máquina k e assume 0, caso contrário.
- XI. Para garantir que cada tarefa i tenha apenas uma predecessora, usou-se a restrição a seguir: $\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ijk} = 1$ para $j \in N$.
- XII. Para garantir que cada máquina tenha apenas uma sequência e que a primeira e a última variável do processo seja a i igual a n , sendo a última variável utilizada como auxiliar para designar o apontamento. Usou-se:

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} \leq 1 \text{ para } i \text{ igual ao número total de variáveis e } k \in M.$$

- XIII. Para a garantia que cada tarefa tenha apenas uma sucessora, exceto quando i igual a 0, que seria uma representação da nossa variável auxiliar, a variável de apontamento, determinou:

$$\sum_{i=0; i \neq h}^n x_{ihk} - \sum_{j=0; j \neq h}^n x_{hjk} = 0, \text{ para } h \in N \text{ e } k \in M.$$

- XIV. $C_{jk} \geq C_{ik} - G + (P_{jk} + G) * X_{ijk}$, para $i \in \{0, \dots, n\}$, $j \in N$ e $k \in M$ é utilizado para prover a garantia de que os instantes de término a cada nova tarefa alocada sejam adequados, garante que o tempo de processamento da nova tarefa alocada seja somada aos tempos de processamento das atividades anteriores.

- XV. Para garantir que todas as tarefas sejam executadas, usou-se:

$$X_{ijk} \leq P_{jk} \text{ para } i \in \{0, \dots, n\}, j \in N \text{ e } k \in M.$$

- XVI. Garante que os instantes seja maior que 0, sejam positivos, usou-se:

$$C_{ik} \geq 0, \text{ para } i \in \{0, \dots, n\} \text{ e } k \in M.$$

- XVII. Para a correta determinação do *makespan*, utilizou-se:

$$C_{max} \geq C_{ik} \text{ para } i \in N \text{ e } k \in M.$$

- XVIII. Para que seja feita a correta soma dos pesos dado ao uso ou não de solvente, usou-se:

$$S_{max} \geq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{hj} * x_{ijk} \text{ para } k \in M.$$

- XIX. E a função objetivo é $Total = C_{max} * S_{max}$, função essa que foi minimizada.

Deste modo, ao solucionar esse problema as perguntas respondidas são quatro:

1. Quais tarefas serão alocadas em quais máquinas, será feito a alocação por máquina;
2. Qual tarefa será a predecessora e sucessora de qual tarefa, dentro de cada máquina, será feito o sequenciamento por máquina;
3. Qual será o valor do *makespan*;
4. Qual será o valor da soma dos pesos do uso dos solventes, de modo a sabermos a quantidade exata de *setups* necessários.

Explicado os pontos da modelagem matemática do problema, o próximo tópico pretende entrar no contexto na metodologia que foi utilizada na pesquisa.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia apresenta o que foi desenvolvido nesse trabalho de conclusão de curso. Segundo Andrade (2010), a metodologia é o conjunto de caminhos e métodos que são seguidos com o objetivo de buscar por um conhecimento. Lakatos e Marconi (1991) definem a metodologia como sendo um conjunto de atividades racionais e sistemáticas que permitem o alcance dos objetivos específicos, através de conhecimentos válidos e verdadeiros, traçando o caminho a ser seguido.

De modo a enriquecer o trabalho, Gil (2010) propõe que as monografias tenham uma classificação de pesquisa, podendo ser classificada de diferentes maneiras. Para o presente trabalho apresenta-se como foi definida a classificação da pesquisa como sendo do ponto de vista de sua abordagem do problema, do ponto de vista de seus objetivos, e quanto à forma de sua natureza segundo Silva e Menezes (2005, p.20).

1) Do ponto de vista de sua abordagem do problema:

O presente estudo é caracterizado como sendo uma pesquisa quantitativa, uma vez que se pretende exprimir de dados e constatações numéricas, opiniões e informações para poder classificá-las e analisá-las. De maneira geral, a análise será realizada a partir de experimentação computacional da solução do problema, a análise será com base nos resultados de um algoritmo.

2) Do ponto de vista de sua natureza:

De maneira geral, do ponto de vista de sua natureza pode ser classificada em pesquisa básica ou aplicada. Dessa forma a pesquisa atual se classificará em pesquisa aplicada, uma vez que se pretende gerar conhecimento para uma aplicação prática e direcionada à solução de um problema.

3) Do ponto de vista de seus objetivos:

Do ponto de vista de seus objetivos Gil (2010) diz que pode se apresentar como sendo uma pesquisa explorativa, descritiva ou explicativa, mas podendo ser um ou mais tipos. Quanto ao presente trabalho se caracteriza como sendo uma pesquisa descritiva e explicativa, já que pretende realizar um método experimental

computacional para a extração do conhecimento e com a geração de dados.

4) Do ponto de vista dos procedimentos técnicos:

Sobre esse ponto de vista, Gil (2010) diz que pode ser dividido em pesquisa bibliográfica, documental, experimental, levantamento, estudo de caso, pesquisa *ex-post-facto*, pesquisa-ação e pesquisa participante. E quanto ao estudo atual, pode ser caracterizado como sendo advindos de várias abordagens. Trata-se de uma pesquisa bibliográfica, já que se baseou em materiais já publicados; documental, já que se baseou de materiais que não foram realizadas as devidas análises analíticas; estudo de caso, já que se trata de um estudo detalhado de um ou mais objetos para a busca de um conhecimento maior do mesmo.

Desse modo, o presente trabalho, se apoiará em pesquisas expostas a partir da revisão bibliográfica dos materiais já publicados sobre o tema. E seguirá com as etapas seguintes para a sua elaboração:

- a) Desenvolvimento do modelo matemático para o problema de máquinas paralelas idênticas, apoiando em métodos exatos como o *branch-and-bound*, método de conversão utilizada pelo *software* Lingo.
- b) Implementação e resolução do modelo em pequena escala, para análise e validação do modelo.
- c) Aplicação do modelo proposto através da realização de um estudo de caso, seguido de uma análise dos resultados obtidos.
- d) Por último, elaboração das conclusões, bem como uma proposta para trabalhos futuros.

Os modelos de programação linear dos problemas considerados, foram resolvidos usando o *software* LINGO, versão 17.0 e a presente técnica mostrou ser muito eficaz e eficiente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Essa seção pretende expor os dados históricos da empresa, os resultados dados pelo algoritmo proposto, bem como as comparações com a base histórica da empresa.

4.1 CONTEXTO GERAL DA EMPRESA

Utilizando da base histórica de produção de vinte e cinco produtos em 4 reatores diferentes (máquinas), considerados idênticos por possuírem a mesma capacidade de produção, pertinentes aos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, junho e julho do ano de 2018.

Esse estudo tem como objetivo a comparação entre os dados históricos da produção já realizado e o resultado do modelo de simulação, para a tomada de decisão de qual o correto sequenciamento deve ser levado em consideração a compatibilidade entre a resina de diluição do produto anterior com a resina de diluição do produto posterior, uma análise par-a-par.

De maneira geral, para a produção dos produtos, a empresa utiliza-se de diferentes tipos de resinas de diluição e que entre esses compostos há um certo nível de compatibilidade, indo de compatíveis, parcialmente incompatíveis, para totalmente incompatíveis, e os valores de 0, 5 e 10 estão intimamente relacionados ao custo de utilização do solvente. Para melhor entendimento e para a formação da matriz de compatibilidade (Tabela 1), separou-se a relação par-a-par em três grupos:

- O primeiro grupo são enquadrados os produtos em que suas resinas são compatíveis, logo para esses casos, demos como peso zero e avalia que para a produção desses lotes de produtos não haverá gastos adicionais, custos com o uso de solventes para o *setup*.
- O segundo grupo são enquadrados os produtos que para a produção sequencial deles é necessária a limpeza intermediária, isso é, torna-se necessário um breve uso do solvente de diluição do produto anterior no reator, antes de iniciar o próximo lote do produto posterior. Sendo mais custoso e demorado em comparação com os produtos do grupo

anterior, mas ainda é uma situação de compatibilidade intermediária. Damos o peso “5” na matriz de compatibilidade entre produtos.

- Quanto ao terceiro grupo, a compatibilidade entre as resinas desses pares de produtos não existe, logo é necessária uma limpeza completa com o solvente de diluição da resina do produto anterior, em alguns casos, uso de soda caustica para depois limpeza com o solvente de diluição do produto posterior. Logo encarecendo o processo de produção e impactando o meio ambiente pelos riscos que esse tipo de limpeza significa, como já discutido em tópicos acima. Para esse grupo, totalmente incompatíveis, damos o peso “10” na matriz de compatibilidade entre produtos.

De maneira geral, quanto maior o valor na Tabela 1, maior é o impacto econômico para a empresa, sendo os produtos ditos como incompatíveis representando maior custo em *setup* para a produção.

Para evitar que seja necessário produzir os produtos que, sequencialmente, se encaixariam no grupo três, que o trabalho tem a sua finalidade.

Do ponto de vista da conformidade e qualidade geral dos produtos, a limpeza inadequada dos equipamentos envolvidos no processo de produção pode acarretar perdas ao lote seguinte, gerando custos adicionais.

Conforme o histórico mensal de produção, os produtos fabricados foram agrupados mês a mês, como exposto na Tabela 2.

Essa é a quantidade de produção de produtos de acordo com a sua compatibilidade, em análise par-a-par. De maneira geral, analisando os dados referentes ao mês de janeiro, dos 23 lotes fabricados, houve um lote de par de produtos compatíveis produzidos em sequência, nove lotes de pares de produtos produzidos com a compatibilidade parcial e treze lotes de pares de produtos incompatíveis.

Quanto aos dados sobre o tempo de processamento, em minutos, de cada uma das tarefas, segue contido na Tabela 3. Logo, para todas as máquinas o produto tem o mesmo tempo de processamento.

Na Tabela 4 seguem os valores históricos dos tempos de processamento em cada um dos meses em cada uma das máquinas, bem como o *makespan* daquele mês, valores em minutos.

Tabela 1 – Compatibilidade entre produtos

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
A	0	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5	10	5	10	5	5	5	5	5	5	10	10	5	5	5
B	5	0	5	5	5	5	10	5	5	5	5	10	5	10	5	5	5	5	5	5	10	10	5	5	5
C	10	10	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
D	5	5	5	0	5	5	10	5	5	5	5	10	5	10	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5
E	5	5	5	5	0	0	10	5	5	5	5	10	5	10	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5
F	5	5	5	5	0	0	10	5	5	5	5	10	5	10	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5
G	10	10	10	10	10	10	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
H	5	5	5	5	5	5	10	0	5	5	5	10	5	10	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5
I	5	5	5	5	5	5	10	5	0	5	5	10	5	10	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5
J	5	5	5	5	5	5	10	5	5	0	5	10	5	10	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5
K	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	0	0	5	0	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5
L	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	0	0	5	0	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5
M	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5	10	0	10	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5
N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0	10	0	10	10	10	10	10	10	5	10	10	10	10
O	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5	10	5	10	0	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5
P	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5	10	5	10	5	0	5	5	5	5	10	5	5	5	5
Q	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	10	0	10	10	10	10	10	10
R	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5	10	5	10	5	5	5	0	5	5	10	5	5	5	5
S	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	10	0	10	10	10	10	10	10
T	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
U	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	10	10	10	10	10	10	0	10	10	10	10
V	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	10	10	10
W	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0	10
X	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0	10
Y	5	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5	10	5	10	5	5	5	5	5	5	10	10	5	5	0

Fonte: adaptado base histórica (2018)

Tabela 2 – Compatibilidade entre produtos por mês e o total de lotes produzidos

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho
Compatível	1	9	9	6	1	6
Parcialmente compatível	9	13	11	9	12	7
Incompatível	13	9	7	10	7	8
Total de Lotes	23	31	27	25	20	21

Fonte: adaptado base histórica (2018)

Tabela 3 – Tempos de processamento dos produtos por máquinas

	Máquina 1.1	Máquina 1.2	Máquina 1.3	Máquina 1.4
A	0	63,39	63,39	63,39
B	0	61,90	61,90	61,90
C	0	89,32	89,32	89,32
D	0	40,07	0	0
E	0	61,92	61,92	61,92
F	0	74,42	74,42	74,42
G	0	66,01	0	0
H	0	66,10	66,10	66,10
I	0	39,75	39,75	39,75
J	0	38,00	38,00	38,00
K	0	99,77	99,77	99,77
L	0	85,34	85,34	85,34
M	0	75,65	75,65	75,65
N	0	90,62	90,62	90,62
O	0	73,30	73,30	73,30
P	0	46,73	46,73	46,73
Q	0	76,88	76,88	76,88
R	0	72,35	72,35	72,35
S	0	102,24	102,24	102,24
T	36,52	0	0	0
U	0	96,67	96,67	96,67
V	0	0	118,33	0
W	0	0	49,15	0
X	0	0	55,90	0
Y	0	98,97	98,97	98,97

Fonte: adaptado base histórica (2018)

Tabela 4 – Tempo de processamento total por máquina em cada mês e o valor do *makespan* de referência | Histórico

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho
Máquina 1.1	0,00	0,00	0,00	0,00	36,52	0,00
Máquina 1.2	600,03	551,15	617,71	386,06	356,44	473,25
Máquina 1.3	512,06	903,28	441,62	793,02	461,10	437,03
Máquina 1.4	524,58	726,64	763,88	640,90	595,82	532,84
Makespan	600,03	903,28	763,88	793,02	595,82	532,84

Fonte: adaptado base histórica (2018)

Explicado o contexto que o nosso estudo está inserido dentro no universo da empresa química, com os valores históricos, segue o próximo tópico com as comparações entre os resultados históricos e do algoritmo proposto.

4.2 ANÁLISE DO MODELO

Conforme o histórico mensal de produção disponibilizados pela empresa, os produtos fabricados mês a mês foram agrupados e foi elaborado um modelo e algoritmo que o foco foi em a minimização da multiplicação do valor do *makespan* com os pesos da matriz de compatibilidade, representando o custo com a limpeza do solvente de diluição.

Dessa forma, ao avaliar par-a-par os produtos, o algoritmo pretende nos dar um resultado exato, indicando qual seria a melhor alocação para cada tarefa em cada máquina, bem como qual o melhor sequenciamento, a fim de reduzir a necessidade de limpeza e logo o custo sobre o consumo de solventes.

Os resultados da pesquisa foram gerados através do microcomputador com processador Intel Core i-3 6006U 2.00 GHz, com memória RAM de 4Gb, sistema operacional Windows 10, em que ficou rodando por 50 horas para cada mês.

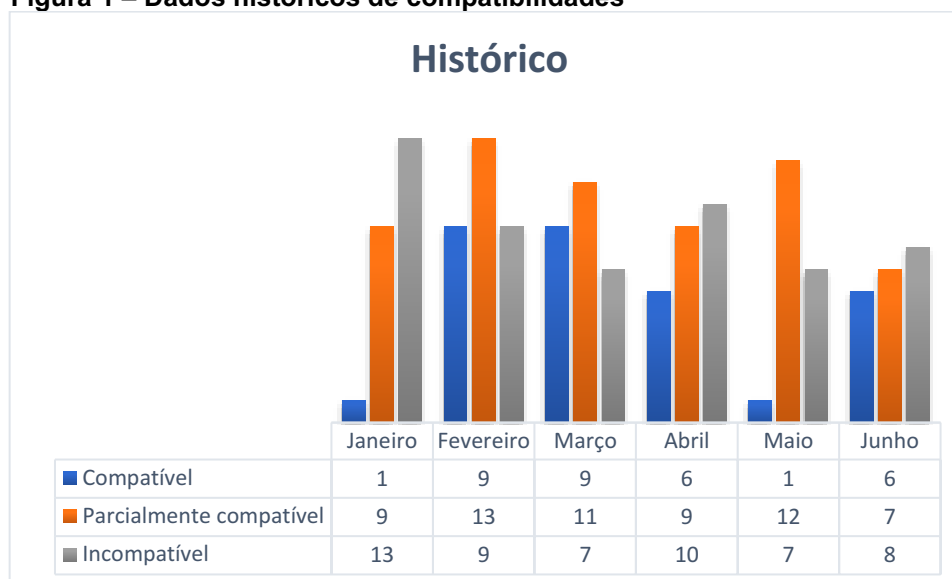
Para melhor entendimento sobre a análise de comparação entre os resultados da base histórica e os dados gerados pelo *software* Lingo 17.0 foi montado gráficos expondo os dois pontos.

A Figura 1 mostra a quantidade de vezes que houve compatibilidade ou não entre produtos, no contexto histórico. Separou-se de acordo com os três grupos já citados: produtos compatíveis, parcialmente compatíveis e incompatíveis.

A Figura 2 expõe os dados resultantes do modelo proposto, o sequenciamento de produção foi refeito e contou-se o número de compatibilidade, compatibilidade parcial e incompatibilidade. Seguindo a mesma métrica do Figura 1.

Ao analisarmos a quantidade de par-a-par de compatibilidade, o algoritmo proposto resultou em quantidades superiores que ao histórico em todos os meses. Ao compararmos com a soma nos seis meses analisado o resultado é 32 vezes, em comparação a 83 vezes que houve compatibilidade no resultado proposto. A grande finalidade do presente trabalho é minimizar ao máximo o uso de solventes para a limpeza dos materiais envolvidos na fabricação, logo o foco foi nos produtos incompatíveis, comparando a soma do número de produtos incompatíveis do resultado histórico com o resultado com o algoritmo proposto, resultou em 54 em relação a 14, verificando o bom desempenho do método implementado.

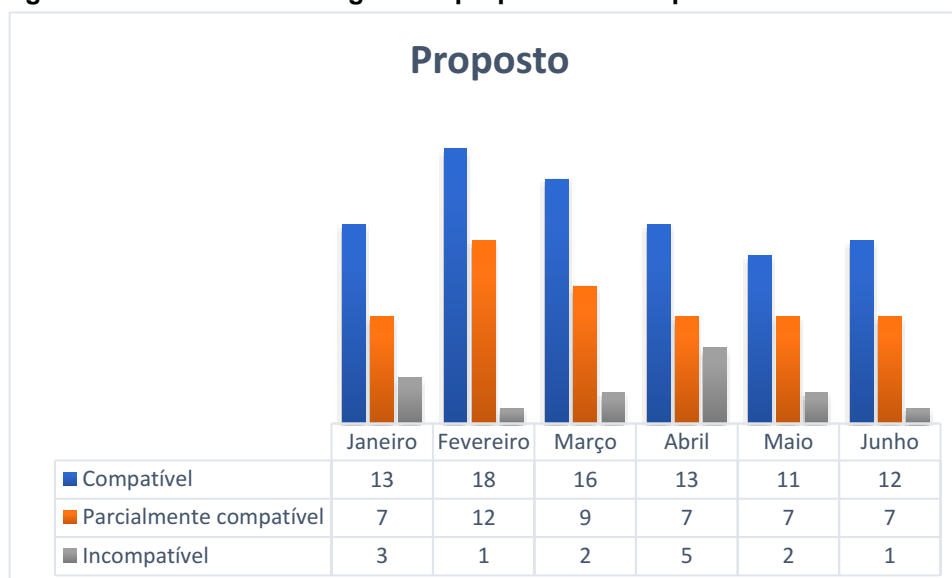
Figura 1 – Dados históricos de compatibilidades



Fonte: adaptado base histórica (2018)

Sendo o total dos 6 meses de produtos compatíveis, parcialmente compatíveis e incompatíveis, respectivamente, iguais a 32, 61 e 54 produtos.

Figura 2 – Resultados do algoritmo proposto de compatibilidades



Fonte: adaptado do resultado do software utilizado (2019)

Já analisando os valores totais dos 6 meses dos produtos compatíveis, parcialmente compatíveis e incompatíveis, respectivamente, iguais a 83, 49 e 14 produtos.

Passando para a mesma comparação quanto ao *makespan* os resultados foram os apresentados na Tabela 5.

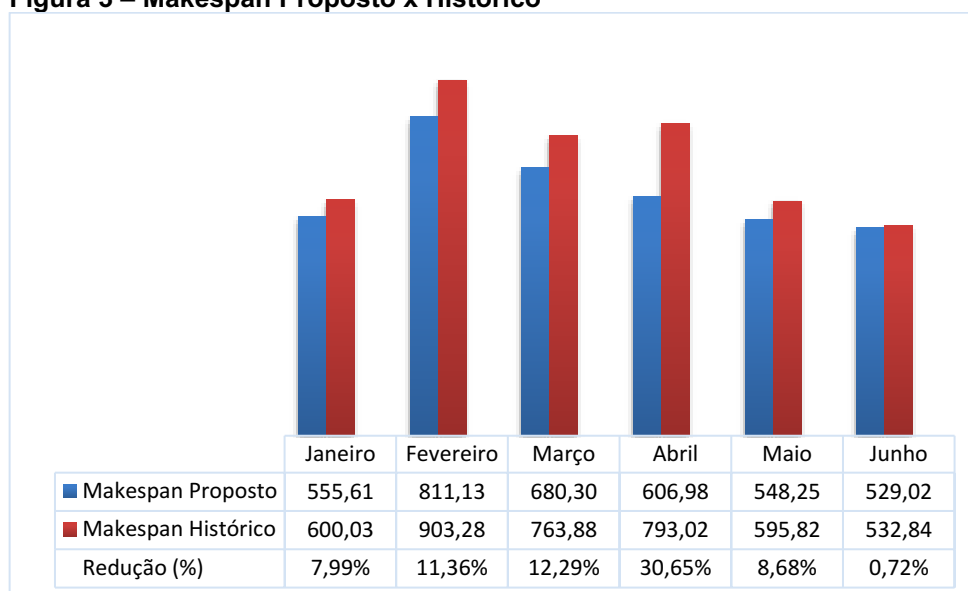
Tabela 5 – Tempo de processamento por máquina e mês | Proposto

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho
Máquina 1.1	0,00	0,00	0,00	0,00	36,52	0,00
Máquina 1.2	526,95	704,14	477,29	606,79	329,51	529,02
Máquina 1.3	554,11	593,44	680,30	606,98	548,25	442,65
Máquina 1.4	555,61	811,13	655,62	606,21	472,21	415,55
Makespan	555,61	811,13	680,30	606,98	548,25	529,02

Fonte: adaptado do resultado do software utilizado (2019)

Para melhor compreensão, segue o Figura 3, que pretende expor a comparação entre os resultados da base histórica com os resultados do algoritmo proposto.

Figura 3 – Makespan Proposto x Histórico



Fonte: adaptado do resultado do software utilizado (2019) e dados históricos

Mais uma vez o algoritmo proposto possui melhor desempenho ao minimizar o *makespan*. Quando trata-se de *makespan*, quanto menor o valor melhor é o

desempenho nas máquinas, ao reduzir osciosidades ou sobrecarga dos equipamentos.

Em comparação de como era realizada a limpeza, o número de sequenciamento com produtos compatíveis foi otimizado e o número de limpezas que requerem a utilização de solventes foi minimizado, fazendo com que o desperdício, tempo gasto e custo fossem diminuídos.

Fica evidente assim, a diminuição durante os meses na utilização de diluentes e solventes e o aumento no número de resinas compatíveis, fazendo com a limpeza não fosse mais necessária, e logo uma economia de custo seja evidenciado.

A Tabela 6 apresenta o percentual de melhorias após a minimização do uso de solventes.

Tabela 6 – Percentual de melhoria | Proposto x Histórico

	Compatível			Parcialmente compatível			Incompatível		
	Histórico	Proposto	%	Histórico	Proposto	%	Histórico	Proposto	%
JAN	1	13	1300%	9	7	78%	13	3	23%
FEV	9	18	200%	13	12	92%	9	1	11%
MAR	9	16	178%	11	9	82%	7	2	29%
ABR	6	13	217%	9	7	78%	10	5	50%
MAI	1	11	1100%	12	7	58%	7	2	29%
JUN	6	12	200%	7	7	100%	8	1	13%

Fonte: adaptado do resultado do software utilizado (2019) e dados históricos

Sendo os meses em que o percentual minimizado apresentou como sendo maior que 100%, os pontos em quem o algoritmo proposto apresentou um valor superior ao da base histórico. E os meses que o percentual minimizado apresentou como sendo menor que 100%, os pontos em quem o algoritmo proposto apresentou um valor inferior ao da base histórico. E os meses que o percentual minimizado apresentou o valor igual a 100%, os pontos em quem o algoritmo proposto não apresentou diferenças em relação à base histórico.

Conforme explicitado na Tabela 6, o melhoramento proposto pelos resultados da simulação é bastante significativo, tendo pontos de progresso como o do mês de janeiro e maio, por exemplo, que teve um aumento de 1300% e 1100%, respectivamente, de melhoria nos produtos compatíveis. Com esse aumento dos produtos compatíveis, não haveria a necessidade de utilizar o solvente, o que acarreta

num menor custo de produção ou com o uso desses produtos tóxicos. O mesmo acontece com os outros meses, sempre havendo um aumento na quantidade de produtos compatíveis e decréscimo dos produtos incompatíveis.

4.2.1 Exemplo do Modelo do Algoritmo

Esse capítulo tem a intenção de exemplificar o funcionamento do algoritmo, para tanto será utilizado exemplos de variáveis genéricas, mas que seguirá, estruturadamente, as condições do problema apresentado em todo o trabalho.

Definiu-se os produtos genéricos, bem como o número de lotes, o tempo de processamento em minutos e a tabela de compatibilidade, como mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 – Exemplo ilustrativo | Definição do número de lote, tempo de processamento e a tabela de compatibilidade dos produtos

Produtos	Número de lote	Tempo de Processamento
A	2	10
B	1	05
C	1	05

	A	B	C
A	0	5	5
B	5	0	5
C	10	10	0

Fonte: exemplo ilustrativo (2019)

Para o modelo de algoritmo proposto, as tarefas são definidas por lote, logo, o modelo teria 4 tarefas e não 3, já que o produto A deve ser produzido duas vezes, logo o produto A, é duas tarefas (1 e 2) e o produto B é a tarefa 3 e o produto C é a tarefa 4, a nova tabela, Tabela 8, fica da seguinte forma:

Tabela 8 – Exemplo ilustrativo | Definição do tempo de processamento e a tabela de compatibilidade das tarefas

Tarefas	Tempo de Processamento
1	10
2	10
3	05
4	05

	1	2	3	4
1	0	0	5	5
2	0	0	5	5
3	5	5	0	5
4	10	10	10	0

Fonte: exemplo ilustrativo (2019)

Está definido os dados de entrada do programa, junto com G igual a 9999. A partir desse ponto será exemplificado quais seriam as ações do *software* Lingo. Minimizaremos a multiplicação entre o maior instante de término obtidos dentre todas as máquinas e a soma dos pesos das máquinas. Logo a função objetivo é $Total = Cmax * Smax$.

Escrevendo de outra forma, há 4 tarefas, estabelecendo o conjunto $N = \{1, 2, 3, 4\}$, para serem processadas em 2 máquinas paralelas idênticas, formando o conjunto $M = \{1, 2\}$. Sendo a função objetivo, minimizar $Total = Cmax * Smax$.

A representação do tempo de processamento da tarefa $i \in N$ na máquina $k \in M$ é igual a P_{ik} . Logo temos a Tabela 9 de tempo de processamento em minutos:

Tabela 9 – Exemplo ilustrativo | Definição do tempo de processamento das tarefas por máquina

	Tempo de Processamento
P_{11}	10
P_{12}	10
P_{21}	10
P_{22}	10
P_{31}	05
P_{32}	05
P_{41}	05
P_{42}	05

Fonte: exemplo ilustrativo (2019)

O peso dado pela relação do custo com o uso de solvente após término da tarefa i e início da próxima tarefa j é representado por S_{ij} , está exemplificado na Tabela 10.

Resultado possível: Para melhor compreensão das variáveis que seguem, será considerado um resultado possível para o exemplo, tarefas um e dois está alocadas na máquina um e tarefas três e quatro na máquina dois, respectivamente. Logo, $N = \{1, 2\} \in M = \{1\}$ e $N = \{3, 4\} \in M = \{2\}$.

Tabela 10 – Exemplo ilustrativo | Matriz de compatibilidade

	Matriz de Compatibilidade
S_{11}	0
S_{12}	0
S_{13}	5
S_{14}	5
S_{21}	0
S_{22}	0
S_{23}	5
S_{24}	5
S_{31}	5
S_{32}	5
S_{33}	0
S_{34}	05
S_{41}	10
S_{42}	10
S_{43}	10
S_{44}	0

Fonte: exemplo ilustrativo (2019)

Observação importante, para auxiliar na resolução uma variável chamada de 0 é incorporada ao programa, é uma tarefa auxiliar e que não agrega em tempo de processamento e nem em peso da relação tarefa-tarefa, é apenas para apontar qual tarefa inicia na máquina corresponde e qual tarefa é a última na máquina corresponde.

A variável que exemplifica essa relação entre tarefa-tarefa e máquina é X_{ijk} que é um a variável binária, que assume 1 se a tarefa i é a precedente instantânea da tarefa j na máquina k e assume 0, caso contrário. A Tabela 11 pretende expor os valores de X_{ijk} caso o resultado fosse o resultado possível estimado. Para entendimento quando i assume 0, indica aquela tarefa é a primeira naquela máquina. Analisando o resultado possível da máquina um, agora incluindo a tarefa auxiliar 0. A primeira tarefa é a tarefa um, logo X_{011} assume valor 1, a próxima é a tarefa dois, logo X_{121} , assume valor 1, e a última tarefa é a tarefa dois, logo X_{201} , assume valor 1.

Tabela 11 – Exemplo ilustrativo | Matriz das variáveis binárias

Variável Binárias	Valor do resultado possível
X_{011}	1
X_{021}	0
X_{031}	0
X_{041}	0
X_{121}	1
X_{131}	0
X_{141}	0
X_{101}	0
X_{211}	0
X_{231}	0
X_{241}	0
X_{201}	1
X_{311}	0
X_{321}	0
X_{341}	1
X_{301}	0
X_{411}	0
X_{421}	0
X_{431}	0
X_{401}	0
X_{012}	0
X_{022}	0
X_{032}	1
X_{042}	0
X_{122}	0
X_{132}	0
X_{142}	0
X_{102}	0
X_{212}	0
X_{232}	0
X_{242}	0
X_{202}	0
X_{312}	0

X_{322}	0
X_{342}	0
X_{302}	0
X_{412}	0
X_{422}	0
X_{432}	0
X_{402}	1

Fonte: exemplo ilustrativo (2019)

Para representar o instante de término do processamento da tarefa i na máquina k , usou-se C_{ik} , os resultados que a variável C_{ik} teria seguem na Tabela 12.

Tabela 12 – Exemplo ilustrativo | Definição dos instantes de término a partir do resultado possível

	Instante de término
C_{11}	10
C_{12}	0
C_{21}	20
C_{22}	0
C_{31}	0
C_{32}	05
C_{41}	0
C_{42}	10

Fonte: exemplo ilustrativo (2019)

Para representar a maior soma dos instantes de término das tarefas na nas máquinas, o valor de *makespan*, usa-se C_{max} . Com base no resultado possível estipulado o C_{max} da máquina um terá o valor igual a 20 minutos e da máquina 2 terá o valor de 10 minutos.

Para representar a maior soma dos pesos da relação tarefa-tarefa nas máquinas, o valor de total dos pesos, usou-se S_{max} . No resultado possível, o valor de S_{max} . Assume o valor de 5. Já que para produzir a tarefa dois após a tarefa um o peso é de 0, enquanto para produzir a tarefa quatro após a tarefa três o peso é assume valor de 5, sendo esse o maior.

Para garantir que cada tarefa i tenha apenas uma predecessora, usou-se a restrição a seguir: $\sum_{k=1}^2 \sum_{i=0}^4 x_{ijk} = 1$ para $j \in N$. É justamente essa restrição que

garante que tenha somente um X_{ijk} apontando para outra tarefa, impedindo que X_{ijk} tenha outros valores afirmativos, igual a um.

Para garantir que cada máquina tenha apenas uma sequência e que a primeira e a última variável do processo seja a i igual a n , sendo a última variável utilizada como auxiliar para designar o apontamento. Usou-se: $\sum_{j=1}^N x_{ijk} \leq 1$ para i igual ao número total de variáveis e $k \in M$. Para entender essa restrição, voltamos ao resultado possível para essa solução, essa restrição assume os valores de $\sum_{j=1}^4 x_{5jk} \leq 1$. De maneira geral, percebe-se que para cada valor de $k \in M$ o último valor 0, deve assumir o valor um.

Para a garantia que cada tarefa tenha apenas uma sucessora, exceto quando i igual a 0, que seria uma representação da nossa variável auxiliar, a variável de apontamento, determinou: $\sum_{i=0; i \neq h}^n x_{ihk} - \sum_{j=0; j \neq h}^n x_{hjk} = 0$, para $h \in N$ e $k \in M$. Restrição que garante que somente a tarefa 0 aponte mais de uma vez para outras, já que ela deve aponta para uma tarefa diferente para cada uma das máquina.

Garante que os instantes de término de cada nova tarefa alocada sejam adequados, garante que o tempo de processamento da nova tarefa alocada seja somada aos tempos de processamento das atividades anteriores: $C_{jk} \geq C_{ik} - G + (P_{jk} + G) * X_{ijk}$, para $i \in \{0, \dots, n\}$, $j \in N$ e $k \in M$. Analisando a máquina uma do resultado possível, essa restrição se comportaria da seguinte maneira: $C_{11} \geq C_{01} - G + (P_{11} + G) * X_{011}$, resultando em $C_{11} \geq 0 - 9999 + (10 + 9999) * 1$, que será $C_{11} \geq 5$. Ao próximo passo que $C_{21} \geq C_{11} - G + (P_{21} + G) * X_{121}$, resultando em $C_{21} \geq 10 - 9999 + (10 + 9999) * 1$, que será $C_{21} \geq 20$. Chegando na última tarefa zero que $C_{01} \geq C_{21} - G + (P_{01} + G) * X_{201}$, resultando em $C_{01} \geq 20 - 9999 + (0 + 9999) * 1$, que será $C_{01} \geq 20$. Que será o tempo de término final daquela máquina.

Para garantir que todas as tarefas sejam executadas, usou-se: $X_{ijk} \leq P_{jk}$ para $i \in \{0, \dots, n\}$, $j \in N$ e $k \in M$. Essa variável apenas faz com que todas as tarefas sejam consideradas. No resultado possível da máquina um, para $X_{011} \leq P_{11}$, resultando em $1 \leq 10$, o que está correto.

Garante que os instantes de término sejam maiores que 0, que sejam positivos, usou-se: $C_{ik} \geq 0$, para $i \in \{0, \dots, n\}$ e $k \in M$. Essa restrição é necessária a partir do momento que é o algoritmo é de minimização e que pode ter a tendência de

resultar em 0, o menor valor válido, para que o valor resultado, função objetivo seja o menor possível.

Para a correta determinação do *makespan*, utilizou-se: $C_{max} \geq C_{ik}$ para $i \in N$ e $k \in M$. Restrição que garante que C_{max} tenha o maior valor do instante de término de cada máquina. Do ponto de vista do resultado possível da máquina um, o C_{ik} assumirá o maior valor em C_{01} que é igual a 20 minutos, será esse o valor pego.

Para que seja feita a correta soma dos pesos dado ao uso ou não de solvente, usou-se: $S_{max} \geq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{hj} * x_{ijk}$ para $k \in M$. Essa restrição é próxima a restrição acima, realizará a soma dos pesos.

A título de curiosidade, o valor de resultado que minimizará o *Total* para o exemplo feito nesse subcapítulo é o contendo na máquina 1: tarefa 1 e tarefa 4 e na máquina 2: tarefa 3 e tarefa 2. Logo *Total* assume o valor de 75, sendo o C_{max} igual a 15 minutos e S_{max} igual a 5.

5 CONCLUSÃO

Conforme dito em todo o trabalho solventes são bastante conhecidos por poderem ser bastantes agressivos a vida humana e ambiental e ter o seu uso reduzido ou evitado é o ideal. Desse modo o trabalho propôs um método que contribuía para a sua redução e economia quanto ao custo, por meio da descoberta da alocação e sequenciamento ideais, com base em dados históricos, para a sua redução.

Para tanto realizou-se uma revisão bibliográfica sobre o tema, elaboração e implementação computacional do algoritmo proposto e comparou-se com as bases históricas disponíveis.

Resgatando brevemente os resultados numéricos do trabalho, quanto a comparações par-a-par da incompatibilidade entre os lotes de tarefa, o algoritmo proposto resultou em um número três vezes menor que o resultado dos dados históricos, sendo 14 o número de incompatibilidade encontrada em relação à 54 o número de lotes incompatíveis dos dados históricos, isso quer dizer que resultou em uma economia de custos, significativa. Já que quanto maior o número de lotes incompatíveis, maiores são os custos em *setups*.

Quando se fala do aproveitamento quanto ao *makespan*, dá-se a entender que quanto menor o *makespan*, maior é o nível de serviço dado ao cliente, já que a produção será terminada mais rápida, bem como as máquinas disponíveis serão mais bem aproveitadas, evitando assim, uma sobrecarga ou ociosidade. Em todos os meses foi apresentado uma redução quanto a esse ponto.

Podemos concluir que o nosso objetivo em possibilitar uma opção para a redução do uso e do custo com os solventes foi alcançada, mesmo não possuindo a certeza de que são as melhores soluções, já que para problemas muito complexos os métodos exatos possuem certa limitação de resolução, podendo levar um tempo indeterminado para resolver por completo (TALBI, 2009). Logo, o método de conversão, utilizado pelo *software* Lingo, o *Branch-and-Bound*, é considerado pela literatura como sendo um método exato, mas devido a limitações computacionais, de tempo ou por outras razões, o algoritmo não obteve a conversão necessária para assumir a certeza de que os resultados obtidos são os melhores dentre todas as possibilidades. Para o nosso problema, para cada um dos meses, o algoritmo ficou

em funcionamento durante 50 horas ininterruptas e mesmo assim não chegando ao resultado final, logo esse presente trabalho pode ser feito com bases nos métodos aproximados, como heurísticas, por exemplo (RAVETTI, 2007).

Uma outra limitação do trabalho é não explorar a outra opção dada pelo Jimenez-Gonzalez (2019) em que propõe a redução através de práticas em química verde. Ayas (2018) complementa que existem os chamados “solventes verdes”, materiais que contribuem para o ganho sustentável das soluções químicas, como os líquidos iônicos e fluidos supercríticos, abrindo espaço para propor uma redução ao uso e custos de solvente por esse viés.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Maria Margarida de. **Introdução à Metodologia do Trabalho Científico**. 10ª ed. São Paulo: Atlas, 2010.

Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas (ABRAFATI), **Tintas e Vernizes-Ciencia e Tecnologia**, J.M., Diniz, F. D., 3ª Edição, São Paulo, SP, Brasil, 2005.

Association of British Furniture Manufacturers. National Environmental Technology Centre Reducing solvent use in the furniture industry. Environmental Techology Best practice program, UK. 1999.

AYAS, N. **Comprehesive Energy Systems**, Volume 2. *Anadolu University, Turkey*, 2018.

BRUCKER, P. **Parallel machines. Em Scheduling Algorithms**, pp. 101--144. *Springer*. 1998.

EBENLENDR, T.; SGALL, J. **A Lower Bound on Deterministic Online Algorithms for Scheduling on Related Machines Without Preemption**, *Theory of Computing Systems*, 56(1), 73–81, 2015.

GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 5ª ed. São Paulo: Atlas, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: <<https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=8&op=0&vcodigo=PIG22&t=valor-bruto-producao-industrial-segundo-secoes>>. Acesso em: Out/2019.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER, MINISTERIO DA SAÚDE. Disponível em <<https://www.inca.gov.br/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/solventes>>. Acesso em: Nov/2019.

JIMENEZ-GONZALEZ, C. ***Life Cycle Considerations of Solvents, Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry***. 2019.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Metodologia científica**. 2. Ed. São Paulo: Atlas, 231 p. 1991.

LAU, W., KOENIG, A. **Management, Disposal and Recycling os Waste Industrial Organic Solvents In Hong Kong**. *Chemosphere*. V. 44, p. 9-15, 2001.

LEMASTER, G. K.; OLSEN, D. M.; YIIN, J. H.; LOCKE, Y, J. E.; SHUKLA,R; SELECAN, S. G.; SHRADER, S. M.; TOTH, G. P.; EVENSON, D. P; HUSZAR, G. B.; ***Male Reproductive Effects os Solvents and Fuel Exposure Durring Aircraft Maintenance. Reproductive Toxilogy***, V. 13, p. 155-166, 1999.

LOPES, H. S.; RODRIGUES, L. C. A. & STEINER, M. T. A. **Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional**. Omnipax, Curitiba, PR, 1 edição. 2013.

LUSTOSA, L.; MESQUITA, M. A.; QUELHAS, O. & OLIVEIRA, R. **Planejamento e Controle da Produção (PCP)**. Elsevier Brasil. 2011.

MONT'ALVERNE, L. R.; CORONA, A. P.; RÊGO, M. A. V. Perda auditiva associada à exposição ocupacional a solventes orgânicos: uma revisão sistemática. **Rev. Bras. Saúde Ocup**, 2016.

NASCIMENTO, F. C. **Tratamento de efluentes da produção de tintas industriais, automotivas e de repintura por irradiação com feixe de elétrons**. 2013. 121 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2013.

PETRIE, E. M. ***The Evolution of Bio-Based Green Solvents. Metal Finishing***, 109(5), 33–36, 2011.

PORTO, F. S.; SGARBOSSA, C.K. **Desenvolvimento de um Plano de Manutenção Preventiva para reatores de uma indústria química de Ponta Grossa-PR**. Anais... VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa, Paraná. 2017.

RAVETTI, M. G.; **Algoritmo para o Problema de Sequência com Máquinas Paralelas e Tempos de preparação Dependentes da Sequencia**. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Minas gerais, Belo Horizonte, 2007.

REICHARDT, C. & WYPYCH G.; ***Production Methods, Properties, and Main Applications***. Fachbereich Chemie, Philipps-Universität, Marburg, Germany ChemTec Laboratories, Toronto, Canada. 2014.

RUIZ-TORRES, A.; PALETTA, G. & PÉREZ, E. ***Parallel machine scheduling to minimize the makespan with sequence dependent deteriorating effects***. *Computers & Operations Research*, 2051—2061, 2013.

SANTOS, V. L. A.; ARROYO, J. E. C. **Sequenciamento de tarefas em máquinas paralelas considerando desgastes dependentes da sequência**. XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Anais... Porto de Galinhas, Pernambuco, 2015.

SILLA, E.; ARNAU, A.; TUÑÓN, I. ***Fundamental Principles Governing Solvents Use. 2.1 Solvent Effects On Chemical Systems***. Department of Physical Chemistry, 11–77, University of Valencia, 2019.

SILVA, E. L. MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. Florianópolis, 4ª edição revisada e atualizada. 2005.

SOUZA, P. A. F., **Recuperação Do Solvent Dos Resíduos Do Processo De Pintura Na Indústria Moveleira**, Manuscrito, 2009.

TALBI, E. ***Metaheuristics: From Design to Implementation***. Wiley Series on Parallel and Distributed Computing. Wiley. 2009.

TSAI, S-Y; CHEN, J-D; CHAO, W-Y; WANG, J-D. ***Neurobehavioral effects of occupational Exposure to low level organic solvents among Taiwanese workers in paint factories.*** *Environmental Reseachs*, v.73, p. 146-155, 1997.

APÊNDICE A – BASE DE DADOS HISTÓRICA

Distribuição das atividades por máquinas

DADOS HISTÓRICOS				
Mês	Máquinas			
	1.1	1.2	1.3	1.4
Janeiro		A	W	N
		B	X	Y
		H	V	B
		G	N	R
		A	W	P
		B	K	N
		E	W	A
		C		
		H		
Fevereiro		G	R	L
		I	F	Q
		I	R	A
		I	R	K
		I	W	N
		H	W	M
		B	N	K
		H	R	O
		G	R	E
		G	S	
			L	
			N	
Março		I	M	K
		I	W	L
		H	W	N
		A	G	Q
		A	B	N
		B	W	L
		I	N	N
		I		R
		H		R
		F		
		A		

Abril		W	E	E
		B	K	O
		G	N	Q
		A	S	L
		H	K	L
		I	B	N
		I	R	N
			R	Q
			H	
			G	
Maio		B	W	K
		A	V	O
		H	M	H
	T	A	S	K
		I	D	M
		B	M	N
				N
Junho		G	X	J
		A	W	K
		B	R	L
		H	R	F
		I	N	N
		I	U	R
		E		R
		F		

APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS

Distribuição das atividades por máquinas

RESULTADO PROPOSTO				
Mês	Máquinas			
	1.1	1.2	1.3	1.4
Janeiro		G	B	R
		C	B	Y
		N	B	A
		N	P	A
		K	V	A
		N	W	E
			W	H
			X	H
			W	
	1.1	1.2	1.3	1.4
Fevereiro		G	M	A
		G	E	B
		G	F	O
		N	H	K
		N	R	N
		K	R	L
		I	R	K
		I	R	R
		I	W	S
		I	W	Q
		H		
	1.1	1.2	1.3	1.4
Março		L	H	A
		R	H	I
		R	A	I
		N	A	Q
		N	M	N
		G	F	N
			B	L
			B	K
			W	I
			W	I
			W	
	1.1	1.2	1.3	1.4
Abril		G	B	R

		G	B	O
		I	I	R
		A	W	Q
		N	E	S
		N	E	Q
		K	K	H
		N	L	H
			L	
	1.1	1.2	1.3	1.4
Maio		D	N	I
		B	K	O
		B	N	H
	T	A	K	H
		A	V	M
		S	W	M
				M
	1.1	1.2	1.3	1.4
Junho		G	R	I
		U	R	I
		N	R	F
		K	R	E
		N	J	F
		L	H	A
			W	B