

**Universidade Estadual Paulista - UNESP
Faculdade de Engenharia de Bauru - FEB
Departamento de Engenharia de Produção - DEP**

Matheus Artioli Leandrin

**PROBLEMA DE REDIMENSIONAMENTO LOTES PARA
MÁQUINAS PARALELAS EM AMBIENTES DE USINAGEM**

Bauru

2019

Universidade Estadual Paulista - UNESP
Faculdade de Engenharia de Bauru - FEB
Departamento de Engenharia de Produção - DEP

Matheus Artioli Leandrin

**PROBLEMA DE REDIMENSIONAMENTO DE LOTES
PARA MÁQUINAS PARALELAS EM AMBIENTES DE
USINAGEM**

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia de Bauru - FEB - da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Bauru

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Cristina Cherri

Co-Orientador: Dr. Luiz Henrique Cherri

Bauru
2019

L437p

Leandrin, Matheus Artioli

Problema de redimensionamento de lotes para máquinas paralelas em ambientes de usinagem / Matheus Artioli Leandrin. -- Bauru, 2019
70 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientadora: Adriana Cristina Cherri

Coorientador: Luiz Henrique Cherri

1. Problema de dimensionamento de lotes. 2. Programação inteira mista. 3. Múltiplos produtos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MATHEUS ARTIOLI LEANDRIN, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 05 dias do mês de julho do ano de 2019, às 13:00 horas, no(a) Anfiteatro do DTI da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof^a. Dr^a. ADRIANA CRISTINA CHERRI NICOLA - Orientador(a) do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, Prof. Dr. SILVIO ALEXANDRE DE ARAUJO do(a) Departamento de Matematica Aplicada / UNESP / Câmpus de São José do Rio Preto, Prof^a. Dr^a. SONIA CRISTINA POLTRONIERE SILVA do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MATHEUS ARTIOLI LEANDRIN, intitulada **PROBLEMA DE REDIMENSIONAMENTO DE LOTES PARA MÁQUINAS PARALELAS EM AMBIENTES DE USINAGEM**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof^a. Dr^a. ADRIANA CRISTINA CHERRI NICOLA *Adriana Cheri Nicola*

Prof. Dr. SILVIO ALEXANDRE DE ARAUJO *Pl. Silvio Alexandre de Araujo*

Prof^a. Dr^a. SONIA CRISTINA POLTRONIERE SILVA *Sônia Poltroniere Silva*

Aos meus amados pais,
À minha amada esposa, Patrícia,
À minha amada vó, Áurea,
Aos meus irmãos Rafael e Guilherme,
Aos meus queridos amigos.
Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus por ter me abençoado e agraciado durante esta jornada da minha vida, me fortalecendo em todos os momentos.

À minha esposa Patrícia, que sempre esteve do meu lado nos momentos mais difíceis, por todo carinho e companheirismo, por sua compreensão incondicional nos momentos que mais precisei.

Aos meus pais, Flávio e Ana, por todos os sacrifícios que fizeram desde minha infância, contribuindo para chegar onde cheguei, por todo amor que recebi e recebo até hoje, sou eternamente grato.

À minha avó Áurea, pela cumplicidade nos momentos de aflição, pelas orações e conselhos, pelo exemplo de fé, minha eterna admiração e amor.

Aos meus irmãos Rafael e Guilherme, que amo incondicionalmente.

Aos meus orientadores, Adriana e Henrique, que foram luz e fonte de conhecimento, por cada ensinamento, por toda a paciência durante estes dois anos de trabalho, pela amizade e compreensão, muito obrigado.

Aos meus amigos Arthur e Géssica, por toda a ajuda que recebi, por todo ensinamento, pelas várias horas que passamos estudando na salinha da pós, contribuindo para o meu crescimento intelectual.

Aos professores, pelos valiosos ensinamentos.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

RESUMO

Este trabalho aborda o Problema de Redimensionamento de Lotes (PRL) capacitado, com múltiplos produtos e máquinas paralelas. O redimensionamento de lotes é uma variação do problema de dimensionamento de lotes que pode ser identificado em sistemas produtivos com elevada taxa de interrupções, como quebras, refugos, entre outros, fazendo com que o plano de produção seja prejudicado, necessitando de atualizações a medida que ocorrem as interrupções. São considerados três parâmetros de interrupção: manutenção corretiva, mão de obra insuficiente e indisponibilidade de matéria-prima. É permitido o atendimento da demanda nos períodos com atrasos e utilização de hora extra. O problema tem por objetivo minimizar os custos de preparação, estoque, atraso e hora extra. Baseado em um modelo matemático proposto na literatura para resolver problemas de dimensionamento de lotes, um modelo matemático para representar o PRL foi proposto. O PRL foi formulado como um problema de programação linear inteira mista (PLIM) e resolvido através do método exato *branch and bound*. Testes computacionais foram realizados com exemplares adaptados da literatura e abrangem os três parâmetros de interrupção.

Palavras-chave: problema de dimensionamento de lotes, programação inteira mista, múltiplos produtos, hora extra, atraso.

ABSTRACT

This work approaches the capacitated Lot Resizing Problem (LRP) with multi-products and parallel machines. The lot resizing problem is a lot sizing problem variation which can be identified in productive systems with high rate of interruptions, as breaks, refuse, and others, impairing the planning production and making update needed as soon as interruptions happens. Three parameters for interruption were considered: corrective maintenance, insufficient man power and unavailability of raw material. Demand can be performed with back-orders and overtime requests. This work has the objective of minimize inventory holding costs, back-orders, setup and overtime costs. Based on a mathematical model proposed in the literature to solve the lot sizing problem, a mathematical model to represent the LRP was proposed. The LRP was formulated as a mixed integer problem and solved by branch and bound exact method. Computational experiments were performed with adapted literature instances embracing the three parameters of interruption.

Key-words: *lot sizing problem, mixed integer programming, multiple products, overtime, backorders.*

Lista de Figuras

3.1	Ambiente de usinagem.	24
3.2	Lote fracionado.	26
3.3	Solução do PRL após a interrupção por manutenção corretiva.	27
3.4	Solução do PRL após a interrupção por mão de obra insuficiente.	28
3.5	Solução do PRL após a interrupção por indisponibilidade de matéria-prima.	29
3.6	Fluxograma para as etapas da estratégia de solução.	32
4.1	Resultados do <i>gap da solução</i>	43
4.2	Resultados do tempo computacional.	44
4.3	Resultados da função objetivo.	44
4.4	Resultados da duração das interrupções.	45
4.5	Resultados da quantidade de hora extra.	45
4.6	Resultados do <i>gap da solução</i>	50
4.7	Resultados do tempo computacional.	51
4.8	Resultados da função objetivo.	51
4.9	Resultados da duração das interrupções.	52
4.10	Resultados da quantidade de hora extra.	52
4.11	Resultados do <i>gap da solução</i>	57
4.12	Resultados do tempo computacional.	58
4.13	Resultados da função objetivo.	58
4.14	Resultados da duração das interrupções.	59
4.15	Resultados da quantidade de hora extra.	59
5.1	Comparativo do <i>gap da solução</i> , tempo de resolução e função objetivo.	61
5.2	Comparativo entre o tempo de interrupção e a utilização de hora extra.	63
5.3	Comparativo entre os custos.	63

Lista de Tabelas

4.1	Intervalos utilizados	37
4.2	Cálculo da duração da interrupção para cada classe	37
4.3	Interrupções geradas para a instância G51 para $T = 15$ e $M = 4$	38
4.4	Resultados obtidos para as classes de instâncias G51-G55 e G56-G60 para interrupção por manutenção corretiva.	40
4.5	Resultados obtidos para as classes de instâncias G66-G70 e G71-G75 para interrupção por manutenção corretiva	41
4.6	Resultados obtidos para as classes de instâncias G51-G55 e G56-G60 para interrupção por mão de obra insuficiente.	47
4.7	Resultados obtidos para as classes de instâncias G66-G70 e G71-G75 para interrupção por mão de obra insuficiente.	48
4.8	Resultados obtidos para as classes de instâncias G51-G55 e G56-G60 para interrupção por indisponibilidade de matéria-prima.	54
4.9	Resultados obtidos para as classes de instâncias G66-G70 e G71-G75 para interrupção por indisponibilidade de matéria-prima.	55

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
2	O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES	15
2.1	PDL único produto e única máquina	17
2.2	PDL múltiplos produtos com restrição de capacidade	18
2.3	PDL múltiplos produtos e máquinas paralelas	20
3	O PROBLEMA DE REDIMENSIONAMENTO DE LOTES PARA AM- BIENTES DE USINAGEM	23
3.1	O problema de redimensionamento de lotes	24
3.2	Interrupções	25
3.2.1	Manutenção corretiva	26
3.2.2	Mão de obra insuficiente	27
3.2.3	Indisponibilidade de matéria-prima	28
3.3	Modelo Matemático	29
3.4	Estratégia de solução	31
3.4.1	Solução Inicial	32
3.4.2	Atualização	32
4	TESTES COMPUTACIONAIS	35
4.1	Instâncias utilizadas	35
4.1.1	Parâmetros utilizados	36
4.1.2	Geração de dados para as interrupções	37
4.2	PRL com interrupções por manutenção corretiva	39
4.3	PRL com interrupções por mão de obra insuficiente	46
4.4	PRL com interrupções por indisponibilidade de matéria-prima	53

5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	61
6	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O problema de dimensionamento de lotes (PDL) é comumente utilizado como uma ferramenta de planejamento, que auxilia no processo de tomada de decisão de sistemas produtivos, estabelecendo quais produtos, em quais quantidades e quando devem ser produzidos, otimizando os custos envolvidos durante a fabricação, considerando um horizonte de planejamento que pode ser de curto, médio ou longo prazo.

O termo dimensionamento de lotes (*lot sizing*) tornou-se conhecido por meio de pesquisas que abordaram o problema de lote econômico de produção, tradicionalmente chamado de *Economic Order Quantity* (EOQ). Os trabalhos pioneiros sobre PDL não consideravam a capacidade como restrição e eram aplicados à sistemas produtivos de um único produto. Entre os principais autores podemos citar Wagner e Whitin (1958) e Manne (1958).

Outras variações inerentes a este tipo de problema foram discutidas e apresentadas na literatura no decorrer dos anos. Consequentemente, diversas pesquisas de revisão literária foram realizadas, buscando reunir e classificar trabalhos que abordam desde o lote econômico de produção, até as versões mais contemporâneas do problema de dimensionamento de lotes. Entre os trabalhos mais recentes destacam-se Andriolo et al. (2014), Glock, Grosse e Ries (2014), Brahimi et al. (2006), Brahimi et al. (2017).

A principal característica levada em consideração para definição do PDL abordado neste trabalho, é a utilização de máquinas paralelas e a produção de múltiplos produtos, dentre alguns trabalhos podemos citar Fiorotto e Araujo (2014), Fiorotto, Araujo e Jans (2015), Tempelmeier e Hilger (2015), Yang et al. (2017), Neidigh e Harrison (2017). Assumir que um sistema produtivo é composto por máquinas paralelas idênticas, permite dizer, sem perda de generalidade, que todos os produtos podem ser produzidos em

qualquer máquina, desde que obedecem os limites de capacidade.

Trigeiro (1987) reforça que um PDL capacitado não deve considerar, na modelagem matemática, a soma dos tempos de fabricação dos produtos como único fator que consome a capacidade disponível no período, mas também a somatória dos tempos de preparação de máquina. Segundo Trigeiro, Thomas e McClain (1989), quando a soma de todos os tempos envolvidos na produção está muito próxima do limite de capacidade, o problema fica mais complexo, exigindo inclusive, um maior desempenho computacional.

Neste trabalho, é feita uma aplicação do PDL capacitado para múltiplos produtos e máquinas paralelas em um ambiente de usinagem, agregando parâmetros de interrupções que consomem a capacidade disponível por período. Segundo Chandar (2014), o ambiente de usinagem é caracterizado por interrupções como falhas, retrabalhos, quebras e manutenções corretivas. Segundo o autor, as interrupções não são levadas em consideração durante o processo de planejamento da produção, pois a fase de planejamento contempla um horizonte de produção futuro e, neste caso, os parâmetros de interrupção possuem valores nulos. Isso implica em dizer que se acontecer qualquer interrupção no período atual, o PDL deve ser atualizado a partir dos parâmetros de interrupção, sendo que o processo de atualizar o PDL sistematicamente é chamado de problema de redimensionamento de lotes (PRL).

Salameh e Jaber (1997) abordaram o problema de lote econômico de produção integrando a possibilidade de interrupções por manutenção preventiva. Jaber (2006) abordou um problema de lote econômico de produção utilizando na formulação matemática a possibilidade de retrabalhos e interrupções no processo produtivo por falta de qualidade nos produtos. Chakraborty, Giri e Chaudhuri (2008) abordaram o problema de lote econômico de produção com a possibilidade de interrupções por quebra de máquinas. Taleizadeh, Cárdenas-Barrón e Mohammadi (2014) abordaram um problema de lote econômico de produção com única máquina e restrição de capacidade. Os autores consideraram interrupções, retrabalhos e refugos na formulação do problema. Embora estes trabalhos estejam relacionados com a otimização da produção e associados a interrupções, nenhum deles faz alusão a uma estratégia que visa atualizar a solução obtida até o momento da interrupção e redimensionar os lotes ainda não produzidos.

Desta forma, este trabalho contribui com a literatura por propor uma estratégia de solução para o PRL, a qual está dividida em duas etapas. A primeira consiste na obtenção

da solução inicial através da resolução do problema original de dimensionamento de lotes. Na segunda etapa ocorre a atualização da solução, necessária sempre que uma interrupção acontece, sendo que a cada atualização, é obtida uma nova solução.

Para o ambiente de usinagem estudado, serão considerados três possíveis causas de interrupções que implicam na necessidade do redimensionamento de lotes, baseados em Chandar (2014): manutenção corretiva, mão de obra insuficiente e indisponibilidade de matéria-prima. Um modelo matemático para representar o PRL foi proposto e resolvido utilizando o Solver CPLEX. Testes computacionais foram realizados com as instâncias de Trigueiro, Thomas e McClain (1989).

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos, além desta introdução. O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, na qual são apresentados os principais trabalhos de dimensionamento de lotes. O Capítulo 3 descreve o ambiente de usinagem sob o viés do PRL e também dos parâmetros de interrupções. Também é apresentado neste capítulo o modelo utilizado para resolver o PRL, bem como a estratégia de solução. No Capítulo 4, são apresentados os testes computacionais e os principais resultados da implementação do PRL. O Capítulo 5 apresenta a discussão de resultados e no Capítulo 6, as conclusões e pesquisas futuras.

Capítulo 2

O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES

O Problema de Dimensionamento de Lotes (PDL) é estudado na literatura há mais de seis décadas. No final da segunda revolução industrial, houve uma busca por sistematizar o que produzir e o quanto produzir, portanto, dá-se início aos processos de tomadas de decisão envolvendo aspectos de planejamento da produção. Naturalmente, surgiram os modelos matemáticos de otimização para auxiliar no planejamento da produção. Os primeiros modelos tinham como objetivo atender a demanda ao menor custo possível e, até hoje, este conceito é utilizado em muitas modelagens matemáticas para o PDL, com a diferença de que foram surgindo variações do problema, tanto no que diz respeito aos custos envolvidos, quanto ao que diz respeito à demanda ou outros aspectos, como por exemplo, os aspectos levantados por Karimi, Ghomi e Wilson (2003):

- Produtos: o problema é classificado como único produto ou múltiplos produtos, dependendo da variedade dos produtos.
- Estágios: em problemas monoestágio, o produto é produzido de maneira direta, passando por somente um estágio de fabricação, ou seja, pode-se dizer que o produto é independente. Em problemas multi-estágio, um produto final, chamado de conjunto, é dependente da produção prévia de seus componentes, ou seja, a produção é feita em mais de um estágio.
- Demanda: um problema possui a demanda estática quando os valores de demanda dos produtos não mudam com o tempo, caso contrário, a demanda é dinâmica.

Quando um problema tem os valores de demanda conhecidos, tem-se uma demanda determinística, caso contrário, em previsões probabilísticas, tem-se a demanda estocástica.

- Horizonte de planejamento: é o intervalo de tempo considerado para o planejamento, podendo ser finito ou infinito.
- Capacidade: o problema é considerado capacitado quando existe um limite máximo para a quantidade de produção de produtos, e não capacitado caso contrário.
- Tempo e custo de preparo: o tempo e custo de preparo são considerados complexos quando são dependentes da sequência de produção, e também são classificados como simples caso contrário.
- Estoque: a quantidade produzida além da demanda é armazenada em estoque, recebendo portanto, um custo adicional.
- Atraso na entrega: é quando admite-se a possibilidade de postergar a entrega da demanda do período atual para um período futuro.

No que diz respeito a complexidade e dificuldade de resolução dos modelos matemáticos associados as variações do PDL, Florian, Lenstra e Kan (1980) investigaram a complexidade computacional para a classe de PDL único produto e com restrição de capacidade. Os autores provaram que um problema pertencente à classe P, ou seja, que pode ser resolvido em tempo computacional polinomial, tornou-se NP-difícil em função da variação dos custos de produção, preparação e estoque. Bitran e Yanasse (1982) apresentaram um trabalho que também analisou a complexidade do PDL. Os autores identificaram algoritmos polinomiais para a classe de problemas com único produto e restrição de capacidade e provaram que, ao incluir um segundo produto e utilizar preparações independentes, os problemas tornaram-se NP-difícil.

Como o dimensionamento de lotes é um tema amplamente estudado na literatura, esta dissertação restringe-se somente aos primeiros trabalhos que trazem cada variação do PDL. Desta forma, na Seção 2.1 estão classificados os trabalhos que abordam o PDL para único produto e única máquina. Na Seção 2.2, o PDL para múltiplos produtos com restrição de capacidade. Na Seção 2.3 encontram-se os trabalhos para o PDL com múltiplos produtos e máquinas paralelas.

2.1 PDL único produto e única máquina

Os primeiros modelos para o problema de dimensionamento de lotes não consideravam limitantes para a produção, por isso recebiam o nome de problema não capacitado, ou problema com capacidade de produção infinita. Para este tipo de problema, como a capacidade de produção não era considerada um obstáculo, o sistema produtivo teria capacidade suficiente para produzir tudo o que foi estabelecido pelo plano de produção.

O primeiro modelo que surgiu com o estudo do dimensionamento de lotes e também da análise de estoques foi proposto por Harris (1913). O problema continuou a ser estudado no decorrer dos anos e, por volta dos anos cinquenta, Wagner e Whitin (1958) apresentaram um modelo para único produto, compreendido em um processo de único estágio de produção e recursos com capacidade infinita. Uma mudança proposta pelos autores em relação ao primeiro modelo, foi considerar o horizonte de planejamento finito, dividido em períodos discretos, com a demanda dinâmica e determinística para cada período. O método exato de resolução utilizado pelos autores permitiu encontrar a solução ótima para o problema. O algoritmo utilizado em conjunto com a programação dinâmica possui complexidade quadrática em relação ao número de períodos. Para o mesmo problema de único produto e única máquina com complexidade $O(T \log(T))$, Aggarwal e Park (1993), Wagelmans, Hoesel e Kolen (1992) e Federgruen e Tzur (1991) desenvolveram técnicas de resolução similares.

Zangwill (1966) apresentou uma modelagem matemática parecida com a de Manne (1958), entretanto, considerou a possibilidade de cumprimento da demanda com atraso. O autor utilizou programação dinâmica para a resolução do problema de complexidade quadrática em função dos períodos. Zangwill (1969) fez uma análise de formulações matemáticas para o problema de único produto e múltiplos produtos, ambos considerando o atraso no cumprimento da demanda, além de utilizar programação dinâmica e a representação do problema como fluxo de redes.

Krarup e Bilde (1977) propuseram um modelo de otimização inteira com produção desagregada nos períodos. Apesar de aumentar o número de variáveis, a relaxação linear aproxima-se mais da envoltória convexa do problema. Outras modelagens para o problema, bem como diferentes métodos de resolução, podem ser encontradas nas revisões feitas por Wolsey (1995), Brahimi et al. (2006) e Brahimi et al. (2017).

2.2 PDL múltiplos produtos com restrição de capacidade

Barany, Roy e Wolsey (1984) propuseram um modelo para o PDL capacitado com custo de preparação. O método de solução foi desenvolvido em duas etapas: a primeira consiste em obter uma melhor aproximação da envoltória convexa do problema através do método de planos de corte. Na segunda é aplicado o método *branch-and-bound*. Eppen e Martin (1987) apresentaram uma nova formulação para o problema capacitado com múltiplos produtos baseada no problema de caminho mínimo. O modelo, assim como proposto por Krarup e Bilde (1977) possui uma relaxação linear mais próxima da envoltória convexa do problema quando comparada à relaxação linear das primeiras formulações propostas.

Para Trigeiro (1987), além de considerar o custo de preparação em problemas capacitados, o tempo de preparação de máquinas deve ser considerado, pois, problemas originalmente factíveis ao considerar somente o custo de preparação, podem tornar-se infactíveis ao considerar o tempo de preparação. Isso ocorre porque o tempo de preparação consome a capacidade disponível da máquina.

Trigeiro, Thomas e McClain (1989) desenvolveram um método heurístico que através da técnica de relaxação lagrangiana relaxam as restrições de capacidade, originando vários subproblemas, um para cada produto. Cada problema relaxado é resolvido pelo método ótimo de Wagner e Whitin (1958). A solução obtida para o problema relaxado é utilizada como limitante inferior para o problema original. Em seguida, pelo fato da solução relaxada ser normalmente infactível para o problema original, o método de solução utiliza uma heurística de factibilização que padeja a produção entre os períodos, com o intuito de obter uma solução factível. Na última etapa do método, os multiplicadores de Lagrange são atualizados através do método de otimização do subgradiente.

Diaby et al. (1992) consideraram a possibilidade de realização de horas extras, além do custo e tempo de preparação. Os autores propuseram um método *branch and bound* combinado com duas relaxações diferentes. A primeira consiste em relaxar a capacidade do problema, e a segunda em relaxar as restrições de demanda. Souza e Armentano (1994) também consideraram a possibilidade de utilização de horas extras, e propuseram um algoritmo ótimo de decomposição. Armentano e Ronconi (1999) propuseram um método *branch and bound* para resolver o problema baseado em fluxos em redes generalizado.

Hindi (1995) utilizou as instâncias de Eppen e Martin (1987) para testar um método proposto, o qual foi baseado no método *branch and bound*. O autor utilizou a geração de colunas e redefinição de variáveis para encontrar a solução do problema, conseguindo encontrar bons limitantes inferiores. Drexel e Kimms (1997) apresentaram um trabalho de revisão bibliográfica englobando métodos exatos e heurísticos, além de pesquisar sobre as variações do problema e ressaltar suas características.

Denizel e Süral (2006) apresentaram uma comparação entre as principais modelagens matemáticas para o problema, salientando aspectos positivos e negativos de cada formulação. Os autores analisaram as relaxações lineares e desenvolveram algumas heurísticas através do método *branch and bound* e a relaxação linear. Süral, Denizel e Wassenhove (2009) apresentaram uma heurística baseada na relaxação lagrangeana, em que as restrições de demanda eram dualizadas e, conseqüentemente, transformadas em subproblemas da mochila. A formulação utilizada pelos autores foi baseada em Krarup e Bilde (1977), e os testes foram feitos utilizando as instâncias de Trigeiro, Thomas e McClain (1989) adaptadas.

Muller, Spoorendonk e Pisinger (2012) propuseram uma heurística *Adaptive Large Neighborhood Search*. As instâncias utilizadas nos testes computacionais foram as mesmas propostas por Trigeiro, Thomas e McClain (1989) e adaptadas por Süral, Denizel e Wassenhove (2009), entretanto os autores consideraram um número maior de períodos para aumentar a complexidade do problema.

Carvalho e Nascimento (2016) apresentaram o problema de dimensionamento de lotes para múltiplas plantas. O problema envolve múltiplas plantas que produzem os mesmos tipos de produtos sendo que cada planta possui uma única máquina com restrição de capacidade. Os autores propuseram matheurísticas para resolver o problema, uma heurística lagrangeana e uma heurística lagrangeana com *path-relinking*.

Fiorotto, Jans e Araujo (2017) estudaram o PDL capacitado com a possibilidade de preparação *crossover*. Neste estudo, os autores realizaram testes computacionais comparando duas formulações feitas por Menezes, Clark e Almada-Lobo (2011) e Mohan et al. (2012). Através dos experimentos computacionais, os autores provaram que os resultados obtidos com a utilização da preparação *crossover* melhoram significativamente em relação à formulação clássica, principalmente para problemas que consideram a possibilidade de atraso no cumprimento da demanda e com alto custo de estoque.

Carvalho e Nascimento (2018) apresentaram o PDL para múltiplas plantas com a possibilidade de preparação *crossover*. Neste trabalho os autores utilizaram a matheurística *kernel search* para resolver o problema. Este tipo de matheurística está dividida na fase de inicialização, onde é resolvido o problema reduzido com variáveis promissoras chamadas de *kernel*, e na fase de extensão, as variáveis *kernel* aumentam iterativamente, possibilitando encontrar mais soluções factíveis.

Os autores Karimi, Ghomi e Wilson (2003), Quadts e Kuhn (2008), Tempelmeier e Buschkühl (2008), Jans e Degraeve (2007) e Buschkühl et al. (2010) apresentaram revisões de métodos para o PDL capacitado com tempo e custo de preparação.

2.3 PDL múltiplos produtos e máquinas paralelas

Um problema com máquinas paralelas distintas possui restrição na produção de um mesmo produto. Para um problema com máquinas paralelas idênticas, é possível dizer que tudo o que é produzido em uma máquina, pode ser produzido nas outras.

Lasdon e Terjung (1971) propuseram uma heurística para o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes em máquinas paralelas idênticas. Neste problema, somente um produto poderia ser produzido por máquina e por período. Além disso, os autores não consideraram tempo de preparação. O problema abordado por Sung (1986) não considerou tempo de preparação e restrição de capacidade. O autor utilizou um método baseado em programação dinâmica para resolvê-lo. Carreno (1990) apresentou uma heurística para o problema considerando máquinas paralelas idênticas com tempo de preparação, sendo que somente um produto poderia ser produzido por máquina e por período.

Özdamar e Birbil (1998) apresentaram uma heurística híbrida baseada em busca local, busca tabu e algoritmo genético para o problema de máquinas paralelas distintas com tempo de preparação e utilização de hora extra. Kang, Malik e Thomas (1999) propuseram um método que utilizou geração de colunas e o método *branch-and-bound* para resolver o problema de máquinas paralelas e custo de preparação dependente da sequência de produção. Pedroso e Kubo (2005) propuseram uma heurística híbrida baseada na busca tabu e na heurística *relax-and-fix*. O problema considerava máquinas paralelas, além de custo de produção, estoque, atraso e preparação, sendo permitido mais de uma preparação

por período. Os testes realizados mostraram que o método proposto converge em soluções a menos de 5,2% da otimalidade.

Toledo e Armentano (2006) propuseram um método heurístico baseado em relaxação lagrangeana e no método dos subgradientes. O método consiste em relaxar as restrições de capacidade e encontrar uma solução inicial, normalmente infactível e, após a aplicação do método dos subgradientes, encontrar uma solução factível ao menor custo. Os autores realizaram testes computacionais baseados nas instâncias de Trigeiro, Thomas e McClain (1989) adaptadas para o problema com até 6 máquinas, 50 tipos de produtos e 18 períodos.

Fiorotto e Araujo (2014) desenvolveram um método heurístico baseado na relaxação lagrangeana aplicada ao PDL com máquinas paralelas distintas. O método utiliza a relaxação lagrangeana aplicada às restrições de demanda para decompor o problema por período e por máquina. Os multiplicadores lagrangeanos são atualizados pelo método do subgradiente e uma heurística baseada na transferência de produção é utilizada para encontrar soluções factíveis. Através de testes computacionais que utilizaram instâncias da literatura, foi possível obter bons limitantes inferiores, demonstrando que o método é competitivo quando comparado a outros métodos da literatura.

Fiorotto, Araujo e Jans (2015) apresentaram métodos híbridos para resolver o problema de dimensionamento de lotes com máquinas paralelas distintas. Os autores utilizaram a decomposição de Dantzig-Wolfe para uma reformulação forte do problema. O problema principal é resolvido através de dois métodos de solução que combinam a relaxação lagrangeana e a decomposição de Dantzig-Wolfe de forma híbrida. Uma heurística primal baseada em transferência de quantidades de produção é utilizada para gerar soluções factíveis. Experimentos computacionais comprovaram que métodos híbridos produzem limitantes inferiores de excelente qualidade e limitantes superiores competitivos.

Embora existam muitos outros trabalhos que abordam o PDL, os trabalhos apresentados nesse capítulo foram utilizados como referência para o desenvolvimento desse estudo. Como variação do PDL, o redimensionamento dos lotes de produção foram considerados para este problema. O redimensionamento dos lotes se torna necessário sempre que ocorre uma interrupção no processo produtivo. A seguir, o problema de redimensionamento de lotes é apresentado.

Capítulo 3

O PROBLEMA DE REDIMENSIONAMENTO DE LOTES PARA AMBIENTES DE USINAGEM

Usinagem é o nome dado a um processo de fabricação. Resumidamente, todo produto palpável que encontra-se disponível para os consumidores, por exemplo, mesa, cadeiras, janelas, portões, carros, motos, etc. passam por processos de fabricação até chegar na forma de produto final. Um bloco de motor, por exemplo, precisa passar pelo processo de usinagem antes de iniciar a montagem dos componentes, pois somente desta forma é possível garantir que as superfícies deste bloco estejam geometricamente alinhadas, possibilitando a precisão na montagem. Porém gerenciar um sistema produtivo que contém o processo de usinagem não é uma tarefa trivial.

Sistemas produtivos que possuem o processo de usinagem estão longe da perfeição, principalmente devido à enorme taxa de falhas e interrupções no decorrer do cumprimento do plano de produção.

O PRL é definido de maneira similar ao PDL. Enquanto o PDL estabelece o que deve ser produzido, quando e em qual quantidade, otimizando custos com produção, preparação, estocagem, atraso e hora extra, o PRL estabelece o que deve ser produzido, quando e em qual quantidade depois de acontecer uma interrupção, considerando tudo o que já foi produzido, estocado e atrasado até o momento da interrupção. A Figura 3.1

ilustra a dinâmica do PRL para o ambiente de usinagem.

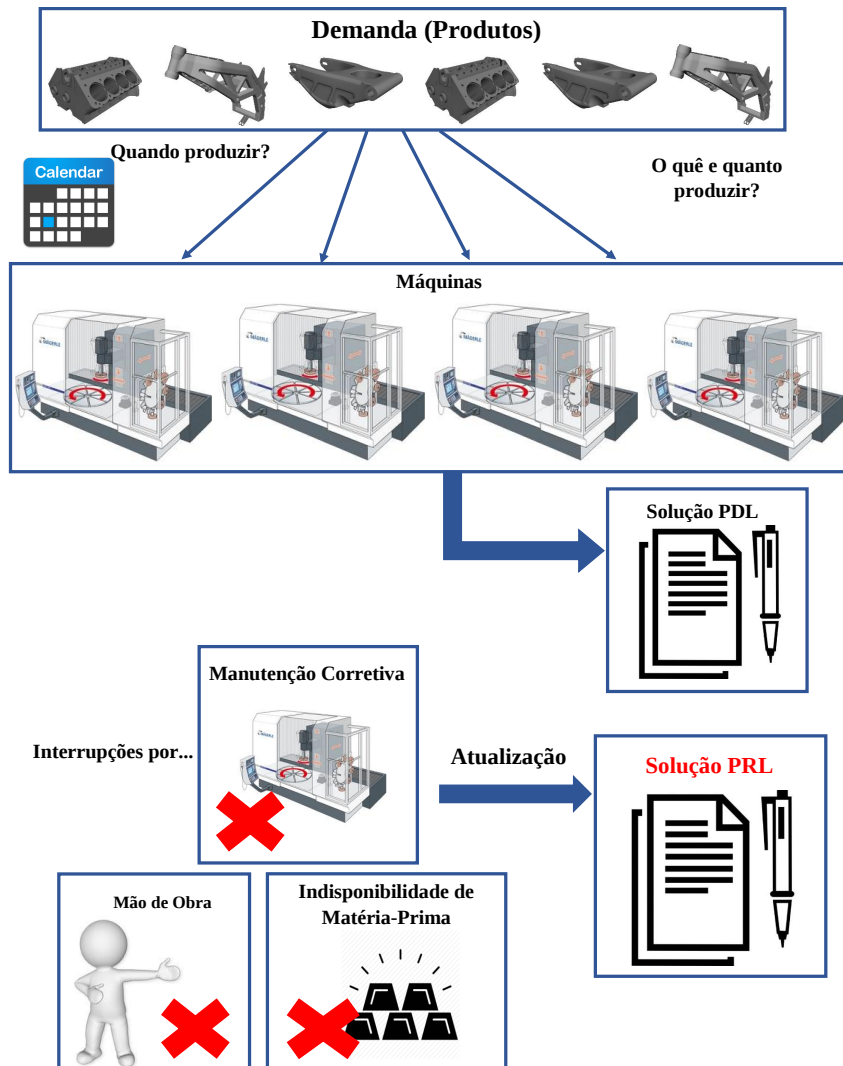


Figura 3.1: Ambiente de usinagem.

O objetivo do PRL é resolver de forma otimizada todas as alterações que ocorrerem no plano de produção. No ambiente de usinagem, estas alterações no plano de produção normalmente são feitas manualmente.

Alterar o plano de produção envolve decisões como, o uso de hora extra, geração de estoques e cumprimento da demanda com atrasos.

3.1 O problema de redimensionamento de lotes

O processo de usinagem envolve um único nível, ou seja, o sistema produtivo possui apenas um estágio de fabricação. Esta etapa do processo produtivo pode ser composto por máquinas paralelas idênticas, sendo que qualquer produto $i, i \in \{1, \dots, N\}$, pode

ser produzido em qualquer máquina $m, m \in \{1, \dots, M\}$. Antes de iniciar o processo produtivo, a máquina precisa ser preparada. O tempo de preparação da máquina *setup* será representado pelo parâmetro f_i , que terá o mesmo valor para todas as máquinas e todos os períodos. Além do tempo de preparação, o custo de preparação s_i , terá o valor igual para todas as máquinas e todos os períodos. Sempre que se inicia um novo lote de produtos diferentes do anterior, é necessário contabilizar o tempo e o custo de preparação.

Em ambientes de usinagem, considera-se um horizonte de planejamento discreto, dividido em períodos. Para cada período $t, t \in \{1, \dots, T\}$, é estipulado uma demanda de cada produtos i . Os valores da demanda d_{it} são conhecidos e variam a cada período. Portanto, para o ambiente de usinagem estudado, a demanda é dinâmica, por sofrer alterações no decorrer do tempo, e determinística, por possuir valores conhecidos. Este tipo de característica é predominante em sistemas produtivos MTO (*Make to Order*), ou seja, produção sob encomenda. Nesse sistema, os pedidos feitos pelos clientes compõem a demanda, desta forma, o horizonte de planejamento é definido como o intervalo entre o início de aceite de novos pedidos e o final de aceite de novos pedidos.

As máquinas utilizadas no processo produtivo possuem uma capacidade de produção C_{mt} , em unidades de tempo, para cada período.

Ainda, é permitido o cumprimento da demanda com atraso, que é penalizada pela função objetivo na forma de custo, sendo que o custo de atraso de um produto i é dado pelo parâmetro hb_i .

Devido às interrupções, o uso de horas extras pode ser necessário, e terá um custo unitário associado a cada máquina m e período t , sendo representado pelo parâmetro ov_{mt} . É possível adiantar a produção de alguns produtos demandados nos períodos futuros e estocá-los. O custo de estocar a produção do produto i é igual para todos os períodos e representado pelo parâmetro h_i .

3.2 Interrupções

Os elementos causadores de interrupções utilizados para o ambiente de usinagem foram baseados em Chandar (2014) e são apresentados a seguir.

3.2.1 Manutenção corretiva

A interrupção por manutenção corretiva está representada pelo parâmetro α_{mt} , $m \in \{1, \dots, M\}$, $t \in \{1, \dots, T\}$, em unidade de tempo, acontece sempre que qualquer máquina apresentar algum indício de mau funcionamento ou quebra. Neste caso, a máquina fica indisponível para a produção até que se conclua o reparo. Portanto, os lotes planejados até o final do período na máquina em que ocorreu a interrupção precisam ser redimensionados, considerando toda a produção que já foi concluída. Nesse trabalho, considerou-se a interrupção por manutenção corretiva durante a produção de um lote, segmentando-o numa fração de produtos já produzidos e produtos ainda não produzidos, como ilustrado na Figura 3.2.

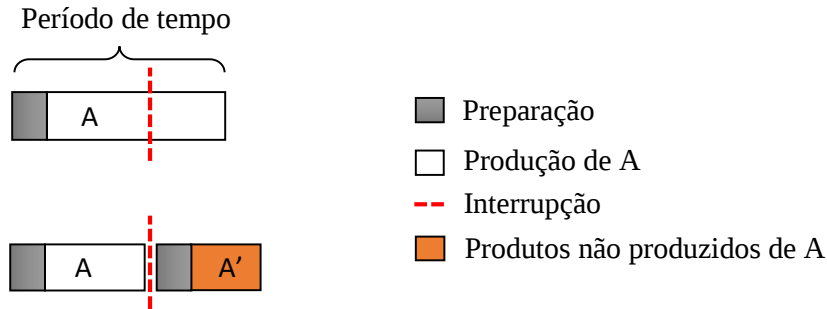


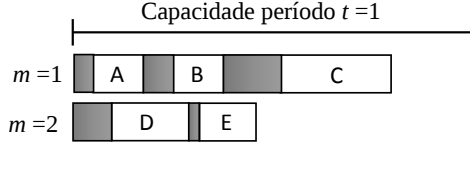
Figura 3.2: Lote fracionado.

O lote de produtos não produzidos poderá ser produzido em outras máquinas no mesmo período da interrupção, entretanto, não terá prioridade sob os demais, pois já existe um plano de produção estabelecido para as máquinas. Portanto, o plano de produção inicial para as outras máquinas mantêm-se inalterado, e o lote só será produzido se houver capacidade disponível ou pela utilização de hora extra. Caso não seja possível produzi-lo no mesmo período da interrupção, ele será produzido em períodos futuros em qualquer máquina, sendo penalizado na forma de custo com atraso. O custo e tempo de preparação para o lote de produtos não produzidos será contabilizado independentemente se for produzido no mesmo ou em outro período.

A Figura 3.3 ilustra uma solução para o PRL devido a interrupção por manutenção corretiva. São considerados cinco produtos, A, B, C, D e E, contabilizando o tempo de preparação e produção. A demanda é cumprida respeitando os limites de capacidade das máquinas $m = 1$ e $m = 2$ no período $t = 1$. A duração da interrupção, destacada em vermelho, é representada pelo parâmetro α_{11} . O lote C' representa os produtos não

produzidos de C. Neste exemplo, uma solução para o lote C', é produzi-lo no mesmo período na máquina $m = 2$.

Problema de Dimensionamento de Lotes (PDL)



Problema de Redimensionamento de Lotes (PRL) ($\alpha_{mt} > 0$)

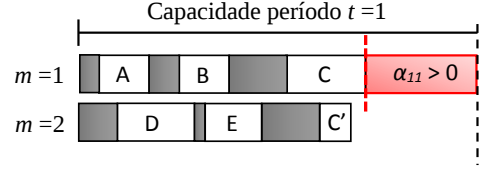


Figura 3.3: Solução do PRL após a interrupção por manutenção corretiva.

3.2.2 Mão de obra insuficiente

No processo de usinagem existe a necessidade de um operador para realizar procedimentos de preparação e acompanhar a produção dos produtos. O número mínimo de operadores deve ser equivalente ao número de máquinas. Se o número de operadores em um dado período for menor que o número de máquinas, o processo produtivo fica comprometido.

Na interrupção por mão de obra insuficiente representada pelo parâmetro $\beta_{mt}, m \in \{1, \dots, M\}, t \in \{1, \dots, T\}$, o número de operadores é menor do que o número de máquinas e, desta forma, nem todas as máquinas estarão em funcionamento.

A interrupção por mão de obra insuficiente, considera a ausência de somente um operador por período, durante todo o período. Nestes termos, quando ocorrer uma interrupção por mão de obra, uma das máquinas terá capacidade igual a zero.

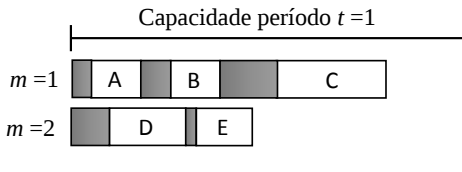
Como o problema considera máquinas paralelas, qualquer operador pode trabalhar em qualquer máquina.

A demanda na máquina interrompida poderá ser cumprida em outras máquinas no mesmo período, caso exista capacidade disponível ou através da utilização de hora extra, entretanto não terá prioridade sob os produtos previamente planejados nas outras máquinas. A demanda poderá ainda, ser cumprida em períodos futuros, sendo penalizada na forma de custo com atraso. O custo e tempo de preparação dos produtos não produzidos permanecerão os mesmos para todos os períodos.

A Figura 3.4 ilustra uma solução para o PRL considerando a interrupção por mão de obra. A duração da interrupção, destacada em vermelho, é representada pelo parâmetro

β_{21} e ocupa toda a capacidade disponível da máquina $m = 2$. Neste exemplo, o lote do produto E foi redimensionado para a máquina $m = 1$. Considerando os níveis de estoque iniciais iguais a zero, e a ausência de produção do lote D no período $t = 1$, o atraso do lote D é equivalente a própria demanda do período $t = 1$ e será cumprida nos períodos futuros. Outra possível solução seria atender a demanda de produtos D com a utilização de hora extra na máquina $m = 1$.

Problema de Dimensionamento de Lotes (PDL)



Problema de Redimensionamento de Lotes (PRL) ($\beta_{mt} > 0$)

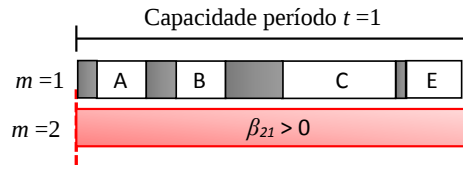


Figura 3.4: Solução do PRL após a interrupção por mão de obra insuficiente.

3.2.3 Indisponibilidade de matéria-prima

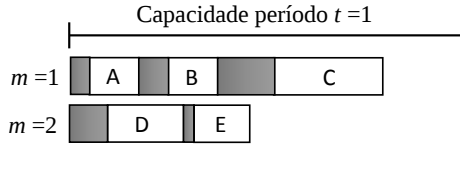
A interrupção por indisponibilidade de matéria-prima representada pelo parâmetro $\gamma_{mt}, m \in \{1, \dots, M\}, t \in \{1, \dots, T\}$, representa o tempo que a máquina fica parada aguardando a chegada da matéria-prima.

Este tipo de interrupção pode ocorrer devido ao abastecimento tardio da matéria-prima. Desta forma, embora o tempo de processamento b_i seja o mesmo, o término do lote i é postergado proporcionalmente ao tempo da interrupção, interferindo na produção dos outros lotes que foram planejados na máquina interrompida.

Considera-se que a interrupção acontece somente com o primeiro lote planejado. O término do lote deve ocorrer no mesmo período da interrupção. Sendo assim, o início da produção de i que foi interrompida, quando retomada, terá prioridade sob as demais, e a demanda dos outros produtos que foi planejada para a máquina interrompida, poderá ser cumprida na mesma máquina, ou em outras máquinas, caso possuam capacidade suficiente, ou pela utilização de hora extra. A demanda poderá ser cumprida em períodos futuros, sendo penalizada na forma de custo com atraso. O custo e tempo de preparação para os produtos que não foram produzidos, permanecerão os mesmos para todos os períodos.

A Figura 3.5 ilustra uma solução para o PRL considerando a interrupção por indisponibilidade de matéria-prima. Neste exemplo, a interrupção é causada pela indisponibilidade de matéria-prima para produção do produto A. A preparação é realizada, mas a produção inicia-se somente quando a matéria-prima estiver disponível. O tempo de interrupção destacado em vermelho e representado pelo parâmetro γ_{11} , acontece na máquina $m = 1$. Na solução ilustrada abaixo, após contabilizar o tempo de interrupção, o produto A é produzido prioritariamente, entretanto como não existe capacidade suficiente para a produção de todos os produtos planejados antes da interrupção, o produto C é replanejado na máquina $m = 2$.

Problema de Dimensionamento de Lotes (PDL)



Problema de Redimensionamento de Lotes (PRL) ($\gamma_{mt} > 0$)

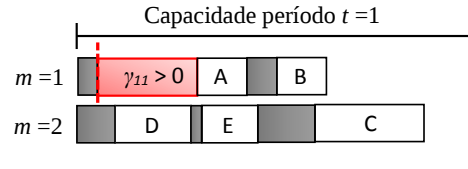


Figura 3.5: Solução do PRL após a interrupção por indisponibilidade de matéria-prima.

3.3 Modelo Matemático

A modelagem matemática utilizada na formulação do problema de redimensionamento de lotes baseia-se em Toledo e Armentano (2006). O modelo foi adaptado para um ambiente que possui máquinas paralelas idênticas, em que a demanda pode ser cumprida com atraso e a utilização de horas extras. Os índices, parâmetros e variáveis utilizados no modelo matemático são:

Índices:

- $i \in \{1, \dots, N\}$: produtos;
- $t \in \{1, \dots, T\}$: períodos de tempo;
- $m \in \{1, \dots, M\}$: máquinas.

Parâmetros:

- h_i : custo unitário de estoque do produto i ;

- hb_i : custo unitário de atraso do produto i ;
- s_i : custo de preparação do produto i ;
- ov_{mt} : custo de hora extra na máquina m no período t ;
- d_{it} : demanda do produto i no período t ;
- b_i : tempo de processamento do produto i ;
- f_i : tempo de preparação do produto i ;
- C_{mt} : capacidade de produção da máquina m no período t , em unidade de tempo;
- ls_{im} : limitante superior para a produção do produto i na máquina m , definido por (3.1):

$$ls_{im} = \min \left\{ \frac{C_{mt} - f_i}{b_i}, \sum_{t=1}^T d_{it} \right\}, \quad i \in N, m \in M, \quad (3.1)$$

- Max_{mt} : limitante superior para a quantidade de horas extras admissíveis na máquina m em cada período t , em unidade de tempo.

Variáveis:

- X_{imt} : quantidade produzida do produto i na máquina m e no período t ;
- Y_{imt} : variável binária que assume valor 1 se houver a produção do produto i na máquina m e no período t e 0, caso contrário;
- I_{it} : quantidade do produto i estocada no final do período t ;
- B_{it} : quantidade do produto i em atraso no final do período t ;
- O_{mt} : quantidade de horas extras realizadas na máquina m ao final do período t .

Modelo Matemático:

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (h_i I_{it} + hb_i B_{it}) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M s_i Y_{imt} + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M ov_{mt} O_{mt} \quad (3.2)$$

$$\text{s.a. } \sum_{m=1}^M X_{imt} + I_{i,t-1} - I_{it} - B_{i,t-1} + B_{it} = d_{it}, \quad i \in N, t \in T, \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^N (b_i X_{imt} + f_i Y_{imt}) \leq C_{mt} + O_{mt}, \quad m \in M, t \in T, \quad (3.4)$$

$$X_{imt} \leq ls_{im} Y_{imt}, \quad i \in N, m \in M, t \in T, \quad (3.5)$$

$$O_{mt} \leq Max_{mt}, \quad m \in M, t \in T, \quad (3.6)$$

$$I_{i0} = 0, B_{i0} = 0, B_{iT} = 0, \quad i \in N, t \in T, \quad (3.7)$$

$$I_{it}, B_{it} \in \mathbb{Z}^+, \quad i \in N, t \in T, \quad (3.8)$$

$$O_{mt} \in \mathbb{Z}^+, \quad m \in M, t \in T, \quad (3.9)$$

$$Y_{imt} \in \{0, 1\}, X_{imt} \in \mathbb{Z}^+, \quad i \in N, m \in M, t \in T. \quad (3.10)$$

No modelo (3.2) - (3.10), a função objetivo (3.2) minimiza os custos de estoque, atraso, preparação e hora extra, respectivamente. O custo com produção não é contabilizado na função objetivo, pois o modelo assume que tudo será produzido e que o custo de produção é sempre o mesmo para todos os produtos i , desta forma, $\sum_{i=1}^N c_i X_{imt}$ que representa a somatória do custo de produção, será sempre uma constante, fazendo com que esta parcela seja irrelevante para a função objetivo do ponto de vista da otimização. O conjunto de restrições (3.3) garante o atendimento da demanda para cada período através do balanceamento de estoque. As restrições (3.4) indicam que o problema é capacitado e que para cada máquina existe um limite de produção por período, com possibilidade de utilização de hora extra. As restrições (3.5) garantem a incidência do custo e tempo de preparação sempre que há produção do produto i na máquina m e no período t , ou seja, sempre que a variável de decisão X_{imt} for positiva, limitando-a superiormente pelo parâmetro ls_{im} . As restrições (3.6) limitam a quantidade máxima de hora extra permitida para cada máquina m e cada período t . As restrições (3.7) garantem que o estoque e atrasos inicial e final sejam nulos. As restrições (3.8), (3.9) e (3.10) representam o domínio das variáveis utilizadas.

3.4 Estratégia de solução

Para resolver o PRL, um modelo de programação linear inteira mista foi proposto e resolvido através do pacote computacional CPLEX 12.8, que utiliza técnicas como o

branch-and-bound e algoritmos de corte para resolução de problemas de programação inteira mista.

A estratégia de solução divide-se em duas etapas. A primeira consiste na obtenção da solução inicial através da resolução do problema original de dimensionamento de lotes. Na segunda etapa ocorre a atualização da solução, necessária sempre que uma interrupção acontece, sendo que a cada atualização, é obtida uma nova solução. A Figura 3.6 demonstra o fluxograma para as etapas da estratégia de solução.

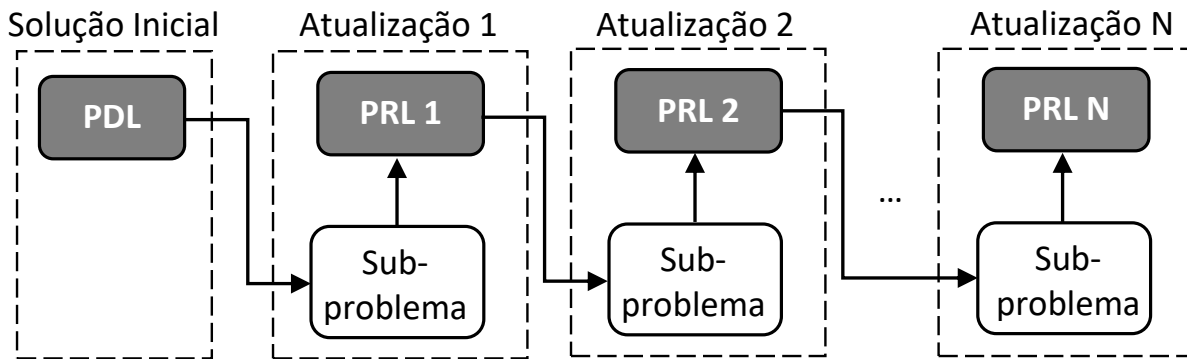


Figura 3.6: Fluxograma para as etapas da estratégia de solução.

A solução final é obtida ao resolver a última atualização, ou seja, quando não houver mais interrupções. A seguir, a estratégia de solução é explicada em detalhes.

3.4.1 Solução Inicial

A solução inicial é obtida pela resolução do problema original de dimensionamento de lotes formulado matematicamente em (3.2)-(3.10). Nesta etapa, não existe a incidência de interrupções. A resolução é interrompida quando encontrar a solução ótima ou, então, quando esgotar-se o tempo limite estabelecido para a resolução do problema.

3.4.2 Atualização

O objetivo da etapa de atualização é resolver novamente o modelo (3.2)-(3.10) considerando tudo o que já foi produzido, estocado e atrasado até o exato momento da interrupção. Para que isso seja possível, as variáveis do problema são divididas em variáveis fixas e variáveis livres.

Cada etapa de atualização possui um subproblema que tem como objetivo fixar as variáveis livres até o exato momento da interrupção. Os valores utilizados no subproblema

são obtidos da solução anterior. Essa solução será utilizada para fixar as variáveis livres no valor da própria solução inicial para a etapa de atualização para o PRL 1, bem como, a solução obtida no PRL 1 será utilizada no subproblema para fixar as variáveis livres na etapa de atualização para o PRL 2 com o valor da própria solução do PRL 1. Este procedimento é repetido até que todas as atualizações possíveis sejam realizadas.

Subproblema para interrupção por manutenção corretiva

Sejam os parâmetros de entrada para resolver o subproblema, o período interrompido $t', t' \in \{1, \dots, T\}$ e a máquina interrompida $m', m' \in \{1, \dots, M\}$. Temos que as variáveis de produção (X_{imt}), preparação (Y_{imt}), estoque (I_{it}) atraso (B_{it}) e hora extra (O_{mt}) que inicialmente encontram-se livres, são fixadas no valor da solução anterior, do período $t = 1$ até o período que antecede a interrupção.

A capacidade de produção C_{mt} é atualizada de acordo com a duração da interrupção por manutenção corretiva. Os lotes produzidos são fixados até o exato momento da interrupção.

Com o intuito de garantir que os produtos não produzidos na máquina interrompida m' possam ser produzidos em outras máquinas ainda no período t' , as variáveis de produção X_{imt} e Y_{imt} são parcialmente fixadas, ou seja, para as máquinas não interrompidas, X_{imt} e Y_{imt} têm somente seus limitantes inferiores fixados no valor da solução anterior, garantindo que os produtos planejados para estas máquinas sejam de fato produzidos prioritariamente, e ao deixar o limitante superior livre, garante que caso exista capacidade, os produtos não produzidos em m' , poderão ser produzidos nas máquinas não interrompidas.

Subproblema para interrupção por mão de obra insuficiente

Sejam os parâmetros de entrada para resolver o subproblema, o período interrompido $t', t' \in \{1, \dots, T\}$ e a máquina interrompida $m', m' \in \{1, \dots, M\}$. As variáveis de produção, preparação, estoque, atraso e hora extra que inicialmente encontram-se livres, são fixadas no valor da solução anterior, do período $t = 1$ até o período que antecede a interrupção. Para o período t' e máquina m' interrompidos, as variáveis de produção X_{imt} e Y_{imt} são fixadas em zero, satisfazendo a condição de que nenhum produto seja produzido em m' . Para garantir que os lotes não produzidos em m' sejam produzidos em outras máquinas

no mesmo período t' , as variáveis de produção X_{imt} e Y_{imt} têm somente seus limitantes inferiores fixados no valor da solução anterior. Desta forma, os produtos planejados para estas máquinas serão produzidos prioritariamente, e ao deixar o limitante superior livre, garante que caso exista capacidade, os produtos não produzidos em m' , poderão ser produzidos em outras máquinas.

Subproblema para interrupção por indisponibilidade de matéria-prima

Sejam os parâmetros de entrada para resolver o subproblema, o período interrompido $t', t' \in \{1, \dots, T\}$ e a máquina interrompida $m', m' \in \{1, \dots, M\}$. As variáveis envolvidas na resolução do problema que inicialmente encontram-se livres, são fixadas no valor da solução anterior, do período $t = 1$ até o período que antecede a interrupção.

O momento da interrupção é representado pela diferença entre a capacidade C_{mt} e a duração da interrupção por indisponibilidade de matéria-prima. A interrupção por indisponibilidade de matéria-prima acontece somente com o primeiro lote planejado na máquina m' . Portanto, para o primeiro produto planejado em m' na etapa anterior, as variáveis de produção X_{imt} e Y_{imt} são fixadas no valor da solução da etapa anterior.

Após fixar o primeiro lote, inicia-se o processo de fixação dos lotes seguintes, de maneira ordenada segundo a solução da etapa anterior, de $i = 1$ até $i = N$.

Para a interrupção por indisponibilidade de matéria-prima, não se considera a possibilidade de produzir lotes fracionados.

Capítulo 4

TESTES COMPUTACIONAIS

Nesse capítulo, são apresentados os testes computacionais realizados para avaliar o desempenho do PRL sob as três classes de interrupções descritas. Toda a programação foi desenvolvida em linguagem C/C++ e os testes foram realizados através do pacote computacional CPLEX 12.8 em um computador com processador Intel Dual Core 2.10GHz com 4.0 Gb de memória e sistema operacional Windows 10 (64 bits). O tempo computacional para resolução de cada problema foi limitado em 1800 segundos. Este limite de tempo é baseado no trabalho de Fiorotto, Jans e Araujo (2017), que também resolveram as instâncias de Trigeiro, Thomas e McClain (1989), utilizadas neste trabalho.

Os testes foram realizados a partir das instâncias de Trigeiro, Thomas e McClain (1989), cujo adaptações são descritas na Seção 4.1. Para avaliar os resultados obtidos para cada classe de interrupção, foram utilizados: o *gap* da solução, que tem por objetivo avaliar a qualidade da solução obtida no PRL em relação ao limitante inferior; o tempo computacional de resolução, cujo objetivo é avaliar o desempenho da solução; a função objetivo, que tem por objetivo analisar o comportamento dos custos envolvidos no problema. A duração da interrupção e a quantidade de hora extra também são levadas em consideração na análise dos resultados.

4.1 Instâncias utilizadas

As instâncias de Trigeiro, Thomas e McClain (1989) utilizadas nos testes pertencem à Classe G. Segundo Belvaux e Wolsey (2000), entre todas as instâncias criadas pelos autores, as pertencentes a essa classe são mais complexas. As instâncias que contemplam

a produção de apenas 6 produtos foram descartadas, resultando num total de 20 instâncias distribuídas igualmente em quatro grupos com as seguintes características:

- G51-G55: instâncias com 12 produtos e 15 períodos;
- G56-G60: instâncias com 24 produtos e 15 períodos;
- G66-G70: instâncias com 12 produtos e 30 períodos;
- G71-G75: instâncias com 24 produtos e 30 períodos.

As 20 instâncias de Trigeiro, Thomas e McClain (1989), utilizadas para resolver o PDL, foram adotadas como referência para criar 450 novas instâncias que incorporam as interrupções e são utilizadas para resolver o PRL. As instâncias foram geradas de acordo com o número de períodos, por exemplo, a instância G51 de Trigeiro, Thomas e McClain (1989) que possui 15 períodos, deu origem a 15 novas instâncias, cada qual com uma interrupção acontecendo em um período diferente. O mesmo ocorre para cada uma das 20 instâncias originais de Trigeiro, Thomas e McClain (1989), contabilizando portanto, um total de 470 instâncias utilizadas para realizar os testes computacionais.

As características sobre o número de produtos e o número de períodos foram mantidas. Entretanto, as instâncias originais que utilizavam apenas uma máquina, foram adaptadas para utilizarem quatro máquinas paralelas idênticas.

Os parâmetros, apresentados na Seção 4.1.1, foram modificados ou criados para contemplar a utilização de hora extra e a possibilidade de atraso no cumprimento da demanda.

4.1.1 Parâmetros utilizados

Os parâmetros utilizados nos testes foram gerados aleatoriamente. A Tabela 4.1 apresenta os intervalos de variação de cada parâmetro.

A capacidade C_{mt} foi gerada segundo uma média lote-por-lote, ou seja, para cada período t calcula-se a quantidade de horas necessárias para produzir exatamente os produtos demandados. Soma-se a quantidade de horas necessárias para todos os períodos e divide-se pelo número total de períodos T , assim como representado em (4.1):

$$C_{mt} = \frac{\sum_{t=1}^T [\sum_{i=1}^N (b_i d_{it} + f_i)]}{T} \quad (4.1)$$

Tabela 4.1: Intervalos utilizados

Parâmetro	Variações
Custo de preparação (s_i)	[200,1000]
Custo de estoque (h_i)	[1,5]
Custo de atraso (hb_i)	[1,5 h_i]
Custo de hora-extra (ov_{mt}), $\forall m, t$	2
Tempo de processamento (b_i)	1
Tempo de preparação (f_i)	[10,50]
Demanda (d_{it}), $\forall i, t$	[0,180]
Capacidade (C_{mt}), $\forall m, t$	C_1 e C_2

Trigeiro, Thomas e McClain (1989) consideram três níveis de capacidade: folgada ($C_{mt}/0,75$), normal ($C_{mt}/1$) e apertada ($C_{mt}/1,10$). Os testes realizados neste trabalho utilizou somente a capacidade folgada e apertada, calculadas levando em consideração o número de máquinas, e recebem o nome de C_1 e C_2 , em que $C_1 = (C_{mt}/0,75)/M$ e $C_2 = (C_{mt}/1,10)/M$.

4.1.2 Geração de dados para as interrupções

Para cada classe, foi calculada a duração da interrupção, assim como mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Cálculo da duração da interrupção para cada classe

Tipo de Interrupção	Duração (min)
Manutenção corretiva	$((C_{mt}/0,75)/M) \times \delta$
Mão de obra insuficiente	$(C_{mt}/0,75)/M$
Indisponibilidade de matéria-prima	$((C_{mt}/0,75)/M) \times \sigma$

Para a interrupção por manutenção corretiva, o valor de δ foi determinado aleatoriamente no intervalo [0,25, 0,40], ou seja, a duração da interrupção pode variar de 25% a 40% da capacidade da máquina. Para a interrupção por mão de obra insuficiente, a duração da interrupção foi equivalente a toda capacidade da máquina, já que para este tipo de interrupção a máquina fica interrompida durante todo o período. Para a interrupção por indisponibilidade de matéria-prima, o valor de σ foi gerado aleatoriamente no intervalo [0,15, 0,25], ou seja, a duração da interrupção pode variar de 15% a 25% da capacidade da máquina. Os valores de δ e σ são baseados em situações reais no ambiente de usinagem.

A seleção do período interrompido t' ocorre de forma crescente, do primeiro até o último período, contabilizando uma interrupção por período. A escolha da máquina interrompida m' foi feita aleatoriamente, segundo uma distribuição de probabilidade uniforme. Por exemplo, a instância G51 dos autores Trigeiro, Thomas e McClain (1989), que pertence à Classe G51-G55 com 12 tipos de produtos diferentes e um total de 15 períodos, originou 15 instâncias adaptadas para a interrupção por manutenção corretiva com as seguintes durações (minutos): $\alpha_{4,1}=192$; $\alpha_{4,2}=148$; $\alpha_{3,3}=123$; $\alpha_{4,4}=148$; $\alpha_{3,5}=182$; $\alpha_{4,6}=157$; $\alpha_{1,7}=167$; $\alpha_{3,8}=177$; $\alpha_{1,9}=187$; $\alpha_{2,10}=162$; $\alpha_{2,11}=123$; $\alpha_{4,12}=182$; $\alpha_{2,13}=167$; $\alpha_{1,14}=153$; $\alpha_{1,15}=133$. Outras 15 instâncias para a classe mão de obra insuficiente e 15 para a classe de indisponibilidade de matéria-prima. A Tabela 4.3 mostra os parâmetros das interrupções gerados para a instância G51.

Tabela 4.3: Interrupções geradas para a instância G51 para $T = 15$ e $M = 4$

Tipo (α_{mt})	Duração (min)	Tipo (β_{mt})	Duração (min)	Tipo (γ_{mt})	Duração (min)
$\alpha_{4,1}$	192	$\beta_{1,1}$	491	$\gamma_{4,1}$	113
$\alpha_{4,2}$	148	$\beta_{1,2}$	491	$\gamma_{4,2}$	79
$\alpha_{3,3}$	123	$\beta_{4,3}$	491	$\gamma_{3,3}$	74
$\alpha_{4,4}$	148	$\beta_{4,4}$	491	$\gamma_{1,4}$	113
$\alpha_{3,5}$	182	$\beta_{3,5}$	491	$\gamma_{1,5}$	113
$\alpha_{4,6}$	157	$\beta_{3,6}$	491	$\gamma_{4,6}$	108
$\alpha_{1,7}$	167	$\beta_{3,7}$	491	$\gamma_{2,7}$	113
$\alpha_{3,8}$	177	$\beta_{1,8}$	491	$\gamma_{2,8}$	104
$\alpha_{1,9}$	187	$\beta_{4,9}$	491	$\gamma_{1,9}$	108
$\alpha_{2,10}$	162	$\beta_{1,10}$	491	$\gamma_{4,10}$	118
$\alpha_{2,11}$	123	$\beta_{2,11}$	491	$\gamma_{1,11}$	113
$\alpha_{4,12}$	182	$\beta_{1,12}$	491	$\gamma_{1,12}$	79
$\alpha_{2,13}$	167	$\beta_{2,13}$	491	$\gamma_{1,13}$	84
$\alpha_{1,14}$	153	$\beta_{3,14}$	491	$\gamma_{2,14}$	89
$\alpha_{1,15}$	133	$\beta_{3,15}$	491	$\gamma_{1,15}$	89

As seções a seguir mostram os resultados obtidos a partir dos testes realizados com as 470 instâncias, 20 delas referente ao PDL e 450 referente ao PRL, sendo que todas são resolvidas uma vez utilizando a capacidade C_1 e uma segunda vez com a capacidade C_2 , totalizando 940 testes para cada tipo de interrupção.

4.2 PRL com interrupções por manutenção corretiva

A Tabela 4.4 apresenta uma média dos resultados obtidos para o PRL com interrupções por manutenção corretiva. São apresentados o *gap da solução*, tempo computacional, função objetivo, duração da interrupção e quantidade de hora extra para as classes G51-G55 e G56-G60. Nas instâncias que pertencem à estas classes, tem-se um total de 15 interrupções, uma em cada período, sendo que a cada interrupção, uma nova solução para o PRL é gerada, de forma que os resultados para cada PRL estão dispostos nas colunas da Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Resultados obtidos para as classes de instâncias
G51-G55 e G56-G60 para interrupção por manutenção corre-
tiva.

Instância	Classe G51-G55					Classe G56-G60				
	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)
PDL	1.34%	67187.3	1470.6	0	540.8	1.68%	142136.1	1128.4	0	388.6
PRL1	1.02%	67266.4	1180.6	152.6	590.2	1.30%	142135.5	1074.4	325.6	380.5
PRL2	1.00%	67824.5	1053.1	151.2	593.5	1.52%	143038.4	1000.5	285.4	477.2
PRL3	0.81%	67934.7	1096.1	146.4	650.4	1.02%	142607.5	963.4	269.2	454.8
PRL4	0.72%	68416.2	1101.2	159	709.4	0.87%	142848.0	1024.1	330.8	547.7
PRL5	0.55%	68711.6	950.2	173.6	753.6	0.46%	142937.5	1021.3	345	667.4
PRL6	0.37%	68978.9	926.4	166.6	799.2	0.34%	143363.3	924.4	295.6	785.5
PRL7	0.24%	69234.4	932.9	166.4	845.4	0.17%	143671.4	913.0	298.6	892.4
PRL8	0.14%	69685.9	780.1	168.8	916.3	0.17%	144168.8	911.0	273.6	1017.1
PRL9	0.03%	70024.1	419.3	155.4	1011.7	0.11%	144765.9	910.4	310.4	1139.8
PRL10	0.02%	70468.3	243.7	161.8	1074.5	0.05%	145262.4	905.7	344.8	1302
PRL11	0.01%	70851.0	198.6	123.2	1123	0.02%	145934.8	903.5	325.8	1393.1
PRL12	0.00%	71152.3	12.7	160	1178.4	0.01%	146668.6	466.4	312.4	1533.2
PRL13	0.00%	71633.7	3.0	151.2	1221.5	0.00%	147323.3	49.7	294.8	1650.1
PRL14	0.00%	72165.7	0.4	153.8	1274.7	0.00%	148238.5	1.2	297.2	1849.3
PRL15	0.00%	72435.7	0.0	148.4	1329.7	0.00%	148627.1	0.1	325.2	2003.6

Tabela 4.5: Resultados obtidos para as classes de instâncias
G66-G70 e G71-G75 para interrupção por manutenção corre-
tiva

Instância	Classe G66-G70					Classe G71-G75				
	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)
PDL	2.30%	143386.2	1530.2	0.0	1088.2	5.80%	276111.6	1166.8	0.0	1280.2
PRL1	2.77%	144347.3	1566.4	152.2	1285.4	5.45%	277232.8	1142.8	323.6	1474.2
PRL2	2.59%	144516.9	1535.4	175.8	1212.1	5.62%	276960.4	1293.0	328.2	1410.2
PRL3	2.77%	145085.4	1495.2	169.6	1387.5	5.06%	277928.1	1142.6	312.6	1417.3
PRL4	2.03%	144491.2	1519.0	178.6	1373.4	5.07%	278753.0	1163.8	320.0	1641.8
PRL5	2.02%	144860.8	1517.1	182.8	1303.9	3.96%	278835.5	1062.6	366.6	1655.2
PRL6	2.05%	145382.3	1486.5	151.8	1244.7	3.79%	279033.8	1087.4	300.4	1931.6
PRL7	1.79%	145204.3	1487.0	156.2	1354.7	3.45%	279008.6	1043.9	350.2	1994.0
PRL8	1.66%	145496.2	1376.9	172.4	1452.0	2.87%	278413.0	1067.8	284.4	1917.7
PRL9	1.54%	145715.0	1270.5	167.6	1520.5	2.04%	276650.2	1023.8	314.0	2053.7
PRL10	1.20%	145679.7	1242.0	154.2	1385.5	2.18%	277888.7	1005.5	302.8	2012.2
PRL11	1.32%	146273.6	1371.1	165.6	1576.0	2.36%	279402.3	1000.0	310.6	2326.7
PRL12	1.21%	146617.2	1339.0	147.2	1636.8	1.66%	278379.8	995.5	314.8	2331.0
PRL13	1.03%	146978.2	1244.2	170.4	1642.5	1.44%	278780.3	992.3	348.6	2522.6
PRL14	0.84%	147079.6	1208.8	176.8	1721.1	1.39%	279542.5	967.8	317.8	2586.1
PRL15	0.81%	147341.6	1161.9	177.6	1759.9	1.16%	279846.2	954.5	339.6	2726.5
PRL16	0.68%	147726.6	1139.8	154.2	1785.3	1.11%	280607.1	956.0	316.2	2862.2
PRL17	0.62%	148022.2	1019.6	155.6	1829.4	0.71%	280093	942.6	376.8	2952.8
PRL18	0.50%	148317.3	1135.7	184.4	1851.5	0.50%	280116.2	937.0	322.2	2964.3
PRL19	0.35%	148531.1	1143.9	182.4	1956.3	0.51%	280869.9	943.3	362.6	3110
PRL20	0.28%	148977.9	953.2	169.4	1983.9	0.37%	281297.8	927.9	281.2	3249.2

Continuação na próxima página

Tabela 4.5 – Continuação da página anterior

Instância	Classe G66-G70					Classe G71-G75				
	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)
PRL21	0.20%	149339	935.4	160.2	2075.4	0.22%	281521.1	920.2	334.4	3336.4
PRL22	0.15%	149831.6	924.0	175	2113.5	0.12%	281772.3	914.3	334.4	3461.6
PRL23	0.06%	150018.5	868.9	148.2	2165.2	0.10%	282294	912.2	319.8	3605.2
PRL24	0.03%	150442.9	602.4	164	2229.9	0.05%	282608.9	910.3	338.4	3700
PRL25	0.01%	150864.1	488.5	183.8	2307.1	0.02%	283263.1	905.7	330.2	3826.2
PRL26	0.00%	151238.9	45.9	152.4	2369.5	0.01%	283605	868.2	306.2	3947.9
PRL27	0.00%	151723	6.2	163.8	2404	0.00%	284088.4	227.8	354.6	4088.9
PRL28	0.00%	152180.1	0.9	152	2444.5	0.00%	284639.4	18.7	280.2	4148.6
PRL29	0.00%	152923.2	0.2	162.8	2484.1	0.00%	285452	0.9	328.2	4273
PRL30	0.00%	153173	0.0	157.2	2529	0.00%	285840.6	0.0	292.6	4397.3

A Tabela 4.5 possui as mesmas definições apresentadas para a Tabela 4.4, porém com os resultados das classes G66-G70 e G71-G75 que possuem instâncias com 30 períodos, portanto ao considerar uma interrupção por período, temos 30 soluções diferentes para o PRL.

Para a Classe G51-G55 o maior *gap da solução* foi encontrado na primeira solução do PRL, com o valor de 1,34%, o mesmo acontecendo com a Classe G56-G60 e G71-G75, com um *gap da solução* de 1,68% e 5,80%, respectivamente. A otimalidade foi obtida a partir do PRL12 para a Classe G51-G55 e do PRL13 para a Classe G56-G60. Para a Classe G71-G75 a otimalidade foi obtida a partir do PRL27.

O comportamento e a tendência dos resultados após cada nova solução do PRL é apresentado nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, que representam os gráficos para o *gap da solução*, tempo computacional, função objetivo, duração da interrupção e quantidade de hora extra, respectivamente.

Para a Classe G66-G70 o maior *gap da solução* foi obtido no PRL1 e PRL3, ambos com 2,77%.

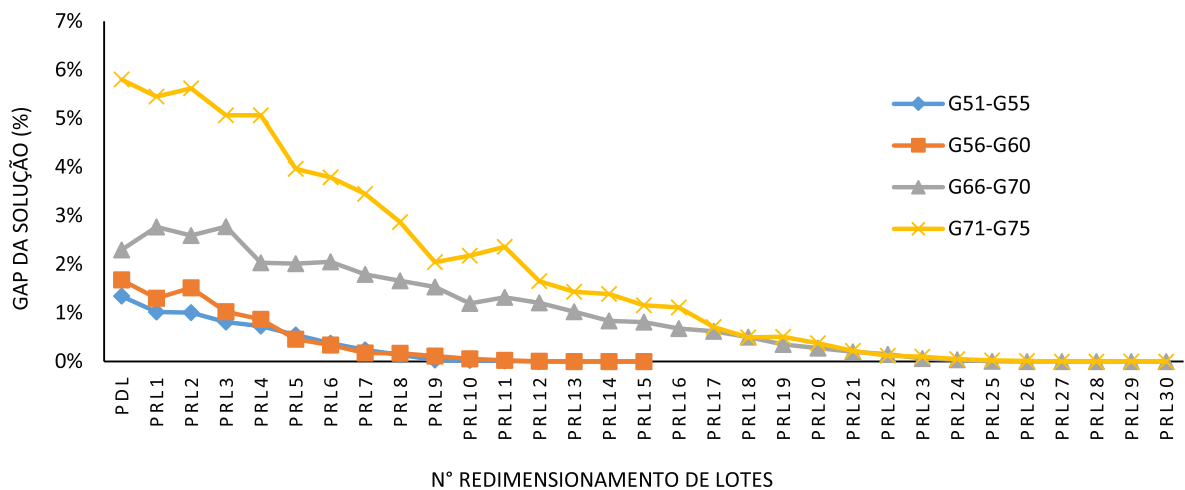


Figura 4.1: Resultados do *gap da solução*.

Como pode ser visto na Figura 4.2, a Classe G66-G70 obteve o pior desempenho computacional dentre as quatro classes analisadas, sendo que o PRL1 possui a maior média de tempo computacional com 1566 segundos. De forma geral, as quatro instâncias têm uma queda abrupta no tempo computacional, para a Classe G51-G55. Isso ocorre a partir do PRL8, enquanto que para as classes G56-G60, G66-G70, G71-G75, ocorre no PRL12, PRL24 e PRL27, respectivamente.

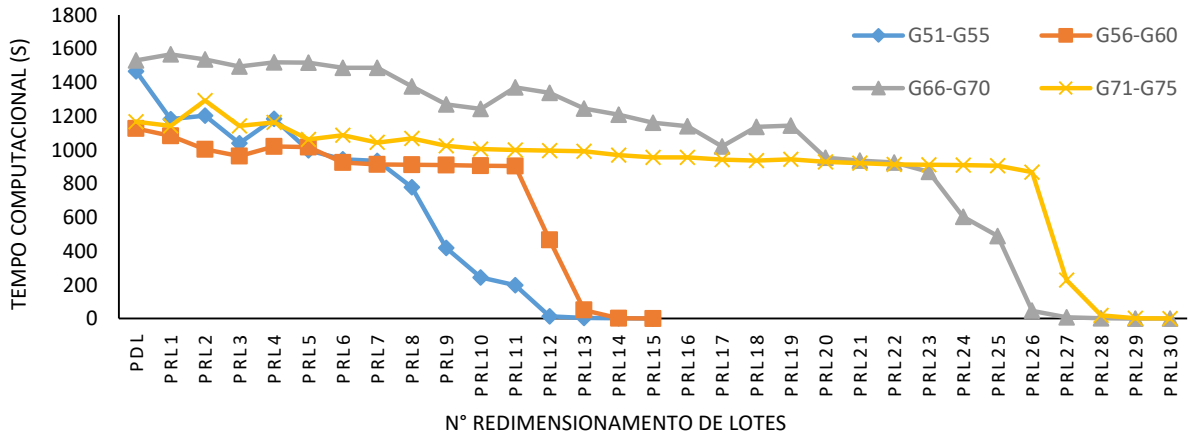


Figura 4.2: Resultados do tempo computacional.

O valor da função objetivo manteve-se crescente para todas as classes de instâncias. A Classe G51-G55 iniciou com um custo total de R\$ 67.266,00 e para o último PRL o valor foi de R\$ 72.436,00. A Classe G56-G60 iniciou com R\$ 142.136,00 e terminou com R\$ 148.627,00. A Classe G66-G70 iniciou com R\$ 144.347,00 e terminou com R\$153.173,00. A Classe G71-G75 iniciou com um custo de R\$ 277.233,00 e terminou com R\$285.841,00.

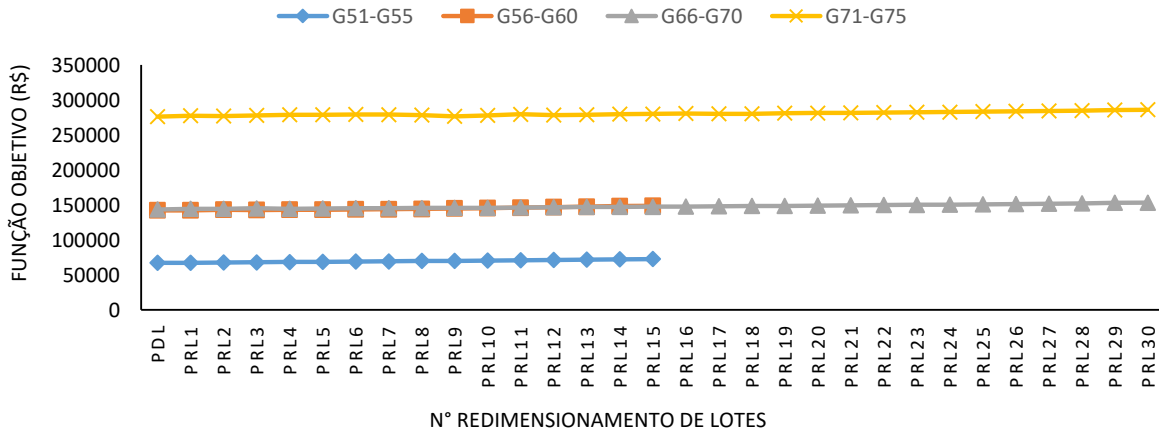


Figura 4.3: Resultados da função objetivo.

Na Figura 4.4 é possível observar a duração da interrupção α_{mt} para cada PRL, dentro do intervalo de valores definidos na Seção 4.2.1, em que para as classes G51-G55 e G66-G70 os valores estão entre 123,20 e 184,4 minutos, e para as classes G56-G60 e G71-G75 os valores estão entre 269,20 e 376,80 minutos.

Pela Figura 4.5, é possível observar que a quantidade de hora extra manteve-se crescente para as quatro classes. Entretanto, quando analisado a cada PRL, alguns valores atuais são menores que os valores anteriores a eles. Por exemplo do PRL5 ao PRL6 para

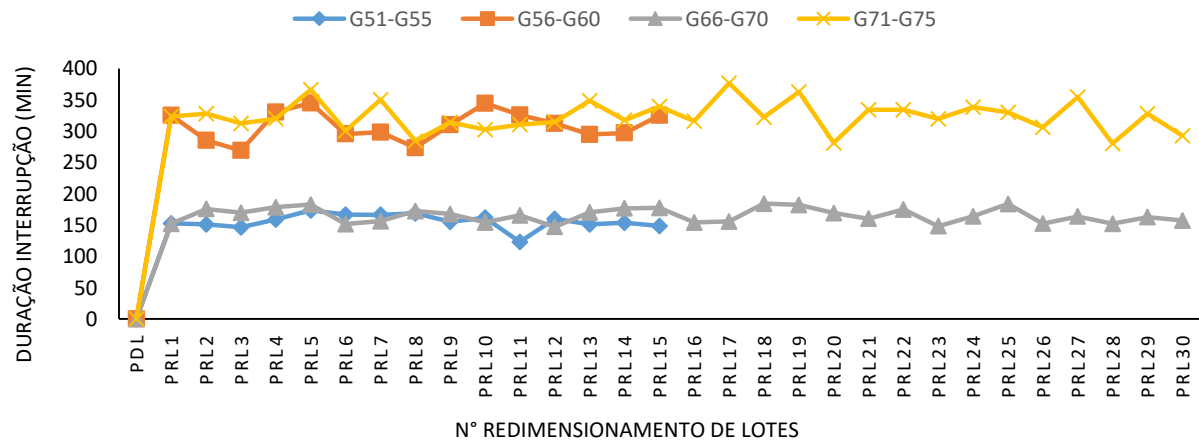


Figura 4.4: Resultados da duração das interrupções.

a Classe G66-G70, que contabiliza 182 minutos no PRL5 e 151 minutos no PRL6.

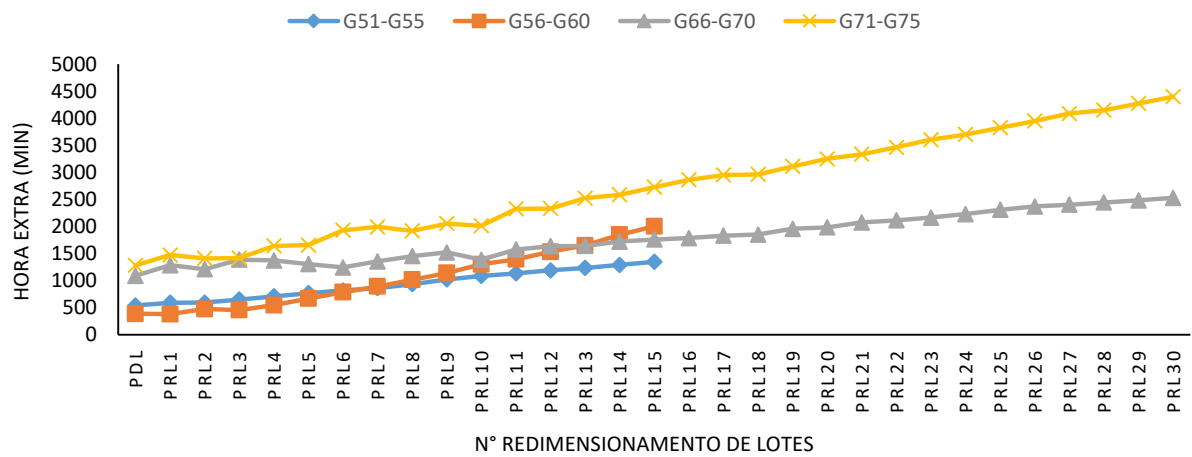


Figura 4.5: Resultados da quantidade de hora extra.

Para a interrupção por manutenção corretiva, observa-se que tanto para as instâncias de 15 períodos, quanto para as instâncias de 30 períodos, o *gap da solução* é maior entre as primeiras soluções, e a solução ótima obtida sempre nos últimos PRL. Isso ocorre porque, a medida que o método de solução avança, menos variáveis devem ser definidas na resolução do modelo. Observa-se também que, de modo geral, as instâncias com 15 períodos são resolvidas mais rapidamente, com uma queda abrupta nos últimos PRL.

4.3 PRL com interrupções por mão de obra insuficiente

Nesta etapa foram realizados 940 testes. A Tabela 4.6 apresenta uma média dos resultados obtidos para o *gap da solução*, tempo computacional, função objetivo, duração da interrupção e quantidade de hora extra para as classes G51-G55 e G56-G60, enquanto que a Tabela 4.7 apresenta os resultados para as classes G66-G70 e G71-G75.

Tabela 4.6: Resultados obtidos para as classes de instâncias G51-G55 e G56-G60 para interrupção por mão de obra insuficiente.

Instância	Classe G51-G55					Classe G56-G60				
	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)
PDL	1.39%	67218.6	1470.4	0.0	552.2	1.66%	142121.6	1128.0	0.0	350.7
PRL1	1.06%	67257.3	1244.5	483.4	662.3	1.41%	142077.4	1023.3	967.6	511.6
PRL2	0.90%	67688.7	1142.0	483.4	787.6	1.42%	142715.8	1116.5	967.6	642.8
PRL3	0.85%	67874.7	1122.1	483.4	886.3	1.05%	142836.1	1032.4	967.6	832.8
PRL4	0.56%	67990.8	1005.9	483.4	991.2	0.60%	142878.9	957.0	967.6	1122.8
PRL5	0.46%	68420.7	941.2	483.4	1198.6	0.42%	143569.2	1091.3	967.6	1474.7
PRL6	0.34%	68834.2	939.4	483.4	1351.5	0.28%	144423.9	945.6	967.6	1859.2
PRL7	0.29%	69238.9	918.8	483.4	1535.7	0.16%	145000.0	920.3	967.6	2145.5
PRL8	0.14%	69583.3	838.9	483.4	1687.2	0.13%	145727.4	915.2	967.6	2483.2
PRL9	0.09%	69979.6	496.0	483.4	1852.6	0.10%	146452.0	917.0	967.6	2754.8
PRL10	0.00%	70359.7	313.8	483.4	2015.7	0.05%	147338.3	918.7	967.6	3105.4
PRL11	0.01%	70722.8	261.9	483.4	2190.7	0.01%	148040.4	615.2	967.6	3422.2
PRL12	0.00%	71102.1	24.8	483.4	2364.0	0.01%	148924.2	383.6	967.6	3766.1
PRL13	0.00%	71570.3	1.5	483.4	2505.4	0.00%	149725.1	93.9	967.6	4107.0
PRL14	0.00%	72234.8	0.3	483.4	2801.5	0.00%	150948.7	1.1	967.6	4535.5
PRL15	0.00%	72473.4	0.1	483.4	2920.8	0.00%	151570.5	0.1	967.6	4846.4

Tabela 4.7: Resultados obtidos para as classes de instâncias
G66-G70 e G71-G75 para interrupção por mão de obra insu-
ficiente.

Instância	Classe G66-G70					Classe G71-G75				
	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)
PDL	2.32%	143421.6	1532.2	0.0	1163.6	5.88%	276360.2	1197.3	0.0	1257.1
PRL1	3.13%	144866.8	1577.6	509.2	1331.7	5.68%	276377.8	1192.4	1005.8	1407.9
PRL2	2.78%	144523.5	1516.5	509.2	1320.8	4.79%	276228.8	1127.5	1005.8	1525.2
PRL3	2.78%	144798.2	1519.2	509.2	1518.9	4.72%	277142.7	1114.3	1005.8	1753.7
PRL4	2.19%	144327.3	1515.0	509.2	1399.8	4.39%	277733.4	1109.7	1005.8	1879.5
PRL5	2.71%	145608.9	1733.0	509.2	1700.8	4.58%	279502.8	1099.6	1005.8	2465.8
PRL6	2.01%	145116.5	1683.6	509.2	1783.1	3.99%	279683.4	1147.8	1005.8	2664.2
PRL7	1.83%	145297.5	1561.2	509.2	1849.4	3.69%	279993.7	1107.4	1005.8	3021.3
PRL8	1.56%	145339.9	1448.6	509.2	1963.3	3.14%	280028.5	1104.7	1005.8	3125.9
PRL9	1.49%	145656.1	1480.2	509.2	2074.8	2.34%	278153.3	1048.0	1005.8	3485.5
PRL10	1.22%	145712.6	1527.3	509.2	2115.1	2.04%	278164.6	1053.7	1005.8	3595.7
PRL11	1.12%	146087.4	1438.0	509.2	2377.0	1.92%	279260.1	1005.7	1005.8	3925.8
PRL12	1.20%	146597.7	1383.7	509.2	2456.1	2.11%	281147.3	996.7	1005.8	4240.0
PRL13	0.99%	146790.2	1285.1	509.2	2630.1	1.70%	280730.2	1003.4	1005.8	4544.9
PRL14	0.84%	147132.7	1091.5	509.2	2753.6	1.53%	281007.4	996.3	1005.8	4695.5
PRL15	0.75%	147475.0	1194.1	509.2	2895.3	1.31%	281466.8	968.2	1005.8	4991.9
PRL16	0.65%	147860.5	1183.4	509.2	3103.1	1.12%	281894.6	962.9	1005.8	5400.4
PRL17	0.65%	148425.9	1183.5	509.2	3256.6	0.83%	281815.4	948.8	1005.8	5559.8
PRL18	0.47%	148614.8	980.8	509.2	3347.1	0.44%	281504.4	942.4	1005.8	5799.3
PRL19	0.38%	148929.3	1027.4	509.2	3459.8	0.44%	282360.5	935.3	1005.8	6102
PRL20	0.28%	149286.5	935.5	509.2	3635.2	0.35%	283014.8	934.4	1005.8	6426.4

Continuação na próxima página

Tabela 4.7 – Continuação da página anterior

Instância	Classe G66-G70					Classe G71-G75				
	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)
PRL21	0.21%	149653.5	926.0	509.2	3810.8	0.23%	283465.5	923.4	1005.8	6721.6
PRL22	0.16%	150101.6	913.7	509.2	4005.1	0.16%	284155.6	919.6	1005.8	7056.9
PRL23	0.09%	150457.4	886.1	509.2	4152.4	0.11%	284852.4	914.9	1005.8	7361.9
PRL24	0.04%	150866.1	609.5	509.2	4307.3	0.07%	285549.2	913.6	1005.8	7681.1
PRL25	0.00%	151268.7	289.5	509.2	4430.5	0.04%	286248.4	910.1	1005.8	7972.6
PRL26	0.00%	151649.8	24.3	509.2	4608.5	0.02%	286945.7	907.6	1005.8	8296.2
PRL27	0.00%	152015.5	6.8	509.2	4755.4	0.00%	287639.6	341.4	1005.8	8573.2
PRL28	0.00%	152450.9	1.2	509.2	4894.8	0.00%	288365.1	142.2	1005.8	8743
PRL29	0.00%	153079.4	0.2	509.2	5089.4	0.00%	289638.1	1.2	1005.8	9223.8
PRL30	0.00%	153271	0.04	509.2	5185.2	0.00%	290289.7	0.09	1005.8	9549.6

O comportamento e a tendência dos resultados após cada nova solução do PRL é apresentado nas Figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, que representam os gráficos para o *gap da solução*, tempo computacional, função objetivo, duração da interrupção e quantidade de hora extra, respectivamente.

A Figura 4.6 ilustra o comportamento do *gap da solução* para as quatro classes de instâncias. A Classe G71-G75 que representa as instâncias com 24 produtos e 30 períodos, possui o maior *gap da solução* dentre as classes analisadas para todos os PRLs, com exceção do PRL18 onde o *gap da solução* para a Classe G66-G70 é de 0,47% e para a Classe G71-G75 é de 0,44%. A otimalidade para a Classe G51-G55 é obtida a partir do PRL12, enquanto que para as classes G56-G60, G66-G70, G71-G75 a otimalidade é obtida no PRL13, PRL25 e PRL28 respectivamente.

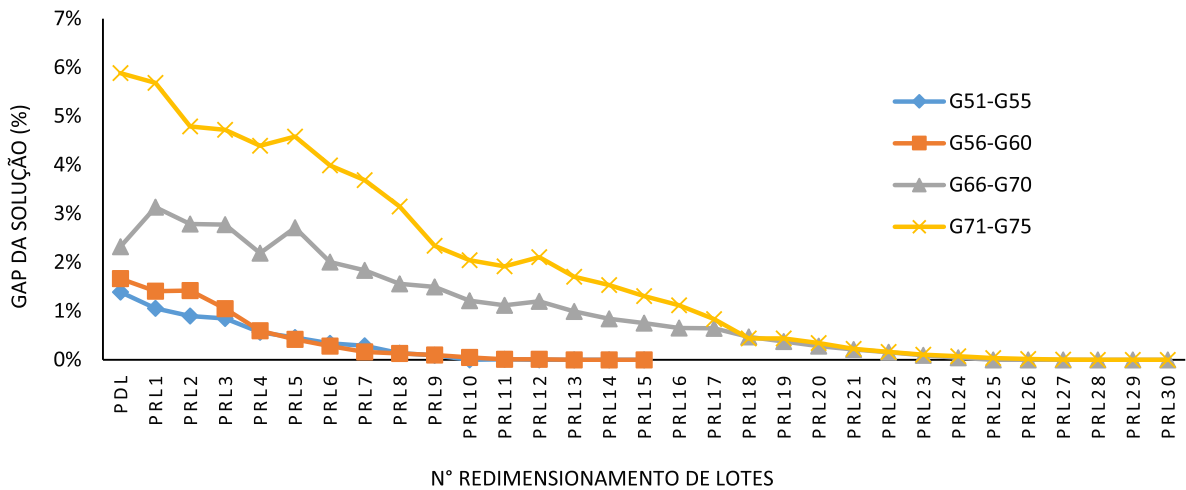


Figura 4.6: Resultados do *gap da solução*.

Na Figura 4.7, observa-se que o tempo computacional para a Classe G51-G55 inicia-se com a média de 1470 segundos, sendo que para os três últimos PRLs, o tempo médio de resolução é inferior a dois segundos. Para a Classe G56-G60 o tempo médio de resolução do primeiro PRL é de 1128 segundos e para o PRL14 e 15, o tempo é inferior a dois segundos. Para a Classe G66-G70 temos um tempo inicial médio de 1532 segundos, com os quatro últimos PRLs resolvidos a menos de 10 segundos. A Classe G71-G75 inicia com um tempo médio de 1197 segundos e o PRL29 e 30 foram resolvidos com menos de dois segundos.

O valor da função objetivo manteve-se crescente para todas classes de instâncias. A Figura 4.8 mostra que Classe G51-G55 iniciou com um custo total de R\$ 62.729,00 e para

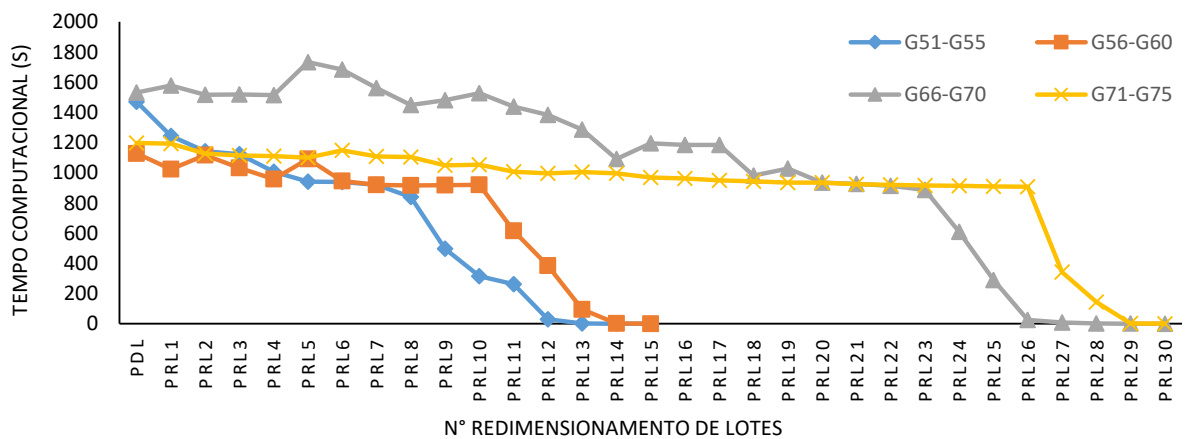


Figura 4.7: Resultados do tempo computacional.

o último PRL o valor foi de R\$ 72.473,00. A Classe G56-G60 iniciou com R\$ 142.122,00 e terminou com R\$ 151.571,00. A Classe G66-G70 iniciou com R\$ 143.422,00 e terminou com R\$ 153.271,00. A Classe G71-G75 iniciou com um custo de R\$ 276.360,00 e terminou com R\$ 290.290,00.

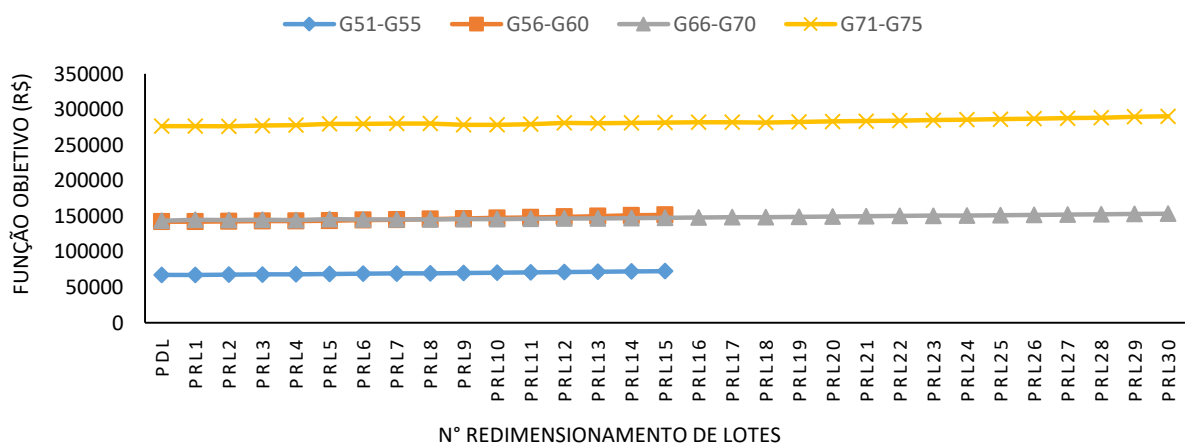


Figura 4.8: Resultados da função objetivo.

Na Figura 4.9, observa-se que não existe variação na duração da interrupção entre os PRLs. Esta é uma condição particular da interrupção por mão de obra insuficiente que define que a duração da interrupção é equivalente a própria capacidade da máquina interrompida. Para a Classe G51-G55 o tempo médio de interrupção foi de 483,40 minutos, enquanto que para as classes G56-G60, G66-G70 e G71-G75 o tempo médio da duração da interrupção foi de 967,60, 509,20 e 1005,80 minutos respectivamente.

A Figura 4.10 demonstra o comportamento da utilização de hora extra para cada classe e para cada PRL. É possível perceber que para todas as classes, a partir do PRL4,

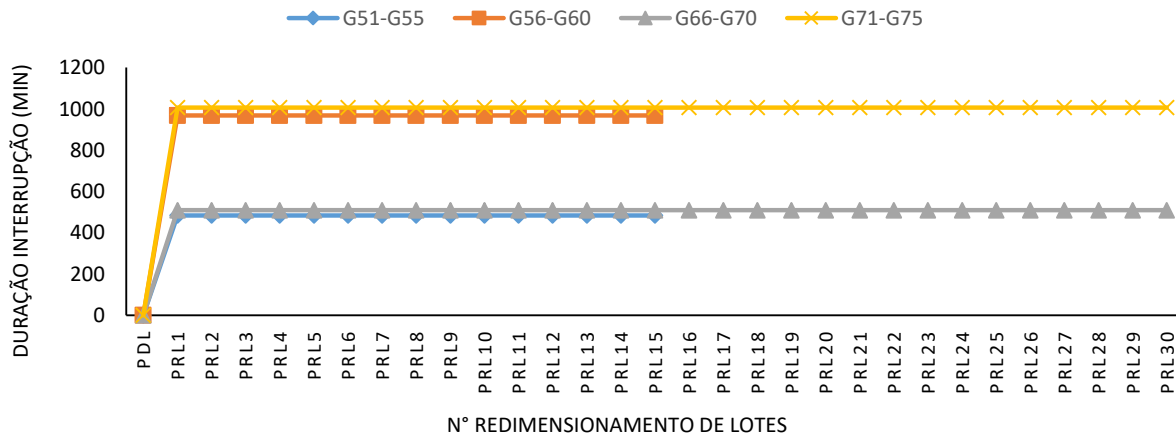


Figura 4.9: Resultados da duração das interrupções.

a utilização de hora extra pelas classes com 24 produtos, G56-G60 e G71-G75, torna-se mais acentuada. A quantidade total de hora extra utilizada pela Classe G51-G55 foi uma média de 2920,80 minutos, para a Classe G56-G60 uma média de 4846,40 minutos, para a Classe G66-G70 uma média de 5185,20 minutos e para a Classe G71-G75 uma média de 9549,60 minutos.

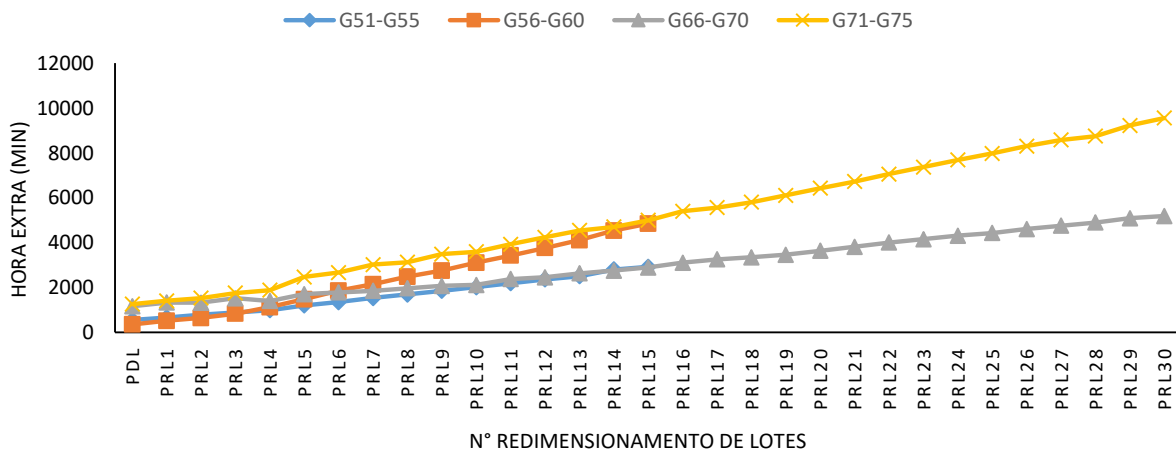


Figura 4.10: Resultados da quantidade de hora extra.

De forma geral, quando analisado o comportamento do *gap da solução* e do tempo de solução para cada PRL, para as interrupções que ocorreram nos primeiros períodos, tanto o *gap da solução* quanto o tempo de solução são maiores. Na estratégia de solução, ao resolver o subproblema na etapa de atualização, o número de variáveis fixadas nos últimos períodos é maior, logo, o número de variáveis livres diminui.

4.4 PRL com interrupções por indisponibilidade de matéria-prima

Foram realizados 940 testes utilizando interrupções por indisponibilidade de matéria-prima. A Tabela 4.8 apresenta uma média dos resultados obtidos para o *gap da solução*, tempo computacional, função objetivo, duração da interrupção e quantidade de hora extra para as classes G51-G55 e G56-G60, enquanto que a Tabela 4.9 apresenta os resultados para as classes G66-G70 e G71-G75.

Tabela 4.8: Resultados obtidos para as classes de instâncias
G51-G55 e G56-G60 para interrupção por indisponibilidade
de matéria-prima.

Instância	Classe G51-G55					Classe G56-G60				
	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)
PDL	1.27%	67133.8	1467.8	0.0	577.3	1.70%	142175.4	1127.8	0.0	363.1
PRL1	1.03%	67148.7	1294.3	108.0	639.2	1.77%	142441.8	1078.8	189.8	467.5
PRL2	0.88%	67245.6	1123.8	93.4	710.4	1.52%	142333.1	963.3	201.6	433.3
PRL3	0.73%	67212.7	1135.0	80.8	665.4	0.78%	141509.4	1000.6	198.2	338.5
PRL4	0.69%	67342.3	967.8	111.8	753.4	0.77%	141771.3	1021.0	223.0	470.6
PRL5	0.49%	67378.3	946.9	92.4	774.7	0.59%	141807.6	941.7	180.0	543.9
PRL6	0.39%	67484.8	928.0	106.8	812.8	0.51%	141926.8	945.1	213.4	619.4
PRL7	0.22%	67514.0	924.6	92.4	816.7	0.25%	141850.8	923.5	201.6	659.7
PRL8	0.12%	67601.0	856.3	94.4	867.3	0.18%	141950.2	916.1	188.2	718.0
PRL9	0.04%	67734.1	357.5	93.2	923.2	0.10%	142106.3	921.8	198.4	798.6
PRL10	0.01%	67819.8	225.2	114.4	970.3	0.07%	142301.5	910.9	223.0	879.9
PRL11	0.00%	67907.4	149.5	88.6	1013.8	0.02%	142447.6	814.2	183.8	942.8
PRL12	0.00%	67973.4	7.1	85.6	1044.4	0.01%	142621.0	392.9	176.4	1017.0
PRL13	0.00%	68104.7	2.0	98.2	1105.7	0.00%	142796.6	15.9	173.2	1083.0
PRL14	0.00%	68245.4	0.2	103.2	1174.2	0.00%	142998.0	0.7	163.2	1158.2
PRL15	0.00%	68299.6	0.0	97.0	1201.3	0.00%	143151.8	0.1	205.2	1235.1

Tabela 4.9: Resultados obtidos para as classes de instâncias
G66-G70 e G71-G75 para interrupção por indisponibilidade
de matéria-prima.

Instância	Classe G66-G70					Classe G71-G75				
	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)
PDL	2.61%	143876.5	1529.6	0.0	1211.2	5.85%	276248.0	1163.2	0.0	1272.3
PRL1	2.71%	144123.2	1562.5	93.2	1295.2	5.81%	276868.8	1154.3	157.4	1459.9
PRL2	2.64%	144169.7	1538.5	103.0	1300.9	4.83%	276653.1	1148.1	189.6	1419.9
PRL3	3.31%	145322.0	1546.8	99.6	1534.5	4.57%	276343.1	1169.6	203.4	1305.7
PRL4	2.54%	144372.7	1496.8	105.2	1381.6	4.67%	277959.8	1081.2	201.2	1636.0
PRL5	1.83%	143516.6	1488.7	106.4	1204.5	4.53%	277163.1	1117.5	201.4	1703.2
PRL6	1.83%	143758.4	1460.2	92.0	1222.3	3.90%	277475.8	1097.5	211.6	1730.4
PRL7	1.64%	143619.9	1342.3	103.2	1331.6	3.93%	278690.5	1063.3	213.2	1842.2
PRL8	1.77%	144026.1	1299.6	99.4	1350.6	3.34%	277348.5	1034.1	197.2	1886.0
PRL9	1.44%	143772.4	1297.1	97.4	1383.6	2.53%	275732.1	1029.6	207.2	1886.8
PRL10	1.44%	143950.5	1282.5	98.2	1355.8	2.65%	276750.4	1016.1	205.2	1951.2
PRL11	1.25%	143893.4	1243.7	77.0	1404.8	2.27%	276038.6	1006.2	159.4	1993.5
PRL12	1.10%	143886.8	1199.6	105.6	1468.7	1.97%	275952.2	993.8	167.6	2041.4
PRL13	1.11%	144124.7	1155.6	99.2	1546.3	2.05%	276760.4	977.8	215.8	2114.0
PRL14	1.04%	144191.9	1140.0	102.0	1575.4	1.60%	275998.2	966.0	195.6	2149.1
PRL15	0.85%	144155.6	1127.7	96.4	1638.5	1.25%	275524.3	953.3	197.2	2143.2
PRL16	0.74%	144211.3	1133.6	105.4	1662.2	1.11%	275575.8	949.4	188	2366.4
PRL17	0.62%	144174.3	1125.5	95.2	1622.4	0.76%	274909.2	947.0	179.2	2231.6
PRL18	0.48%	144166	1106.1	105.6	1697.7	0.73%	275195.8	937.2	199.6	2262.5
PRL19	0.42%	144253	1106.2	95.2	1676.2	0.50%	274910.1	930.6	201.8	2296.4
PRL20	0.31%	144294.7	937.2	98.2	1764.9	0.42%	274963	934.2	213.2	2437

Continuação na próxima página

Tabela 4.9 – Continuação da página anterior

Instância	Classe G66-G70					Classe G71-G75				
	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)	GAP (%)	Função Objetivo	Tempo Sol. (s)	Interr. (min)	Hr.Ext. (min)
PRL21	0.25%	144375.7	920.4	101.2	1761.3	0.29%	274884	924.1	189.8	2479.2
PRL22	0.16%	144461.3	914.2	105.4	1796.5	0.20%	274966.6	923.6	199.4	2538.7
PRL23	0.09%	144512.9	912.0	96	1821	0.11%	275062	912.0	213.8	2648.5
PRL24	0.04%	144611.1	616.1	90.2	1861.1	0.05%	275076.6	913.2	189.4	2656
PRL25	0.00%	144715.7	318.3	104.4	1911.7	0.03%	275266	906.7	223.8	2750.7
PRL26	0.00%	144809.4	101.2	94.2	1961.3	0.02%	275459.4	904.6	207.2	2837.3
PRL27	0.00%	144912.7	4.2	101.6	2009.3	0.00%	275624.1	465.5	181.8	2910.4
PRL28	0.00%	145007.9	0.5	103.2	2052.4	0.00%	275801.1	18.5	195.8	2962.4
PRL29	0.00%	145121.9	0.1	93.4	2088.9	0.00%	276061.4	0.5	195.8	3038.7
PRL30	0.00%	145137.7	0.0	96.2	2096.8	0.00%	276093.2	0.1	195.6	3054.6

O comportamento e a tendência dos resultados após cada nova solução do PRL é apresentado nas Figuras 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15, que representam os gráficos para o *gap da solução*, tempo computacional, função objetivo, duração da interrupção e quantidade de hora extra, respectivamente.

Pela Figura 4.11, é possível observar que o *gap da solução* para as classes G56-G60, G66-G70 e G71-G75 não segue um comportamento uniforme. De modo geral, o *gap da solução* dos primeiros PRLs são maiores quando comparados com os últimos, entretanto quando analisamos solução a solução, nem sempre a solução nova será melhor que a anterior. Esta condição pode ser observada no *gap da solução* para a Classe G56-G60 na transição do PDL para o PRL1 (de 1,70% para 1,77%), na Classe G66-G70 na transição do PDL para o PRL1 (de 2,60% para 2,71%), e na transição do PRL2 para o PRL3 (de 2,63% para 3,31%) e na Classe G71-G75 na transição do PRL3 para o PRL4 (de 4,56% para 4,66%), PRL6 para o PRL7 (de 3,89% para 2,93%), PRL9 para o PRL10 (de 2,53% para 2,65%) e do PRL12 para o PRL13 (de 1,96% para 2,05%).

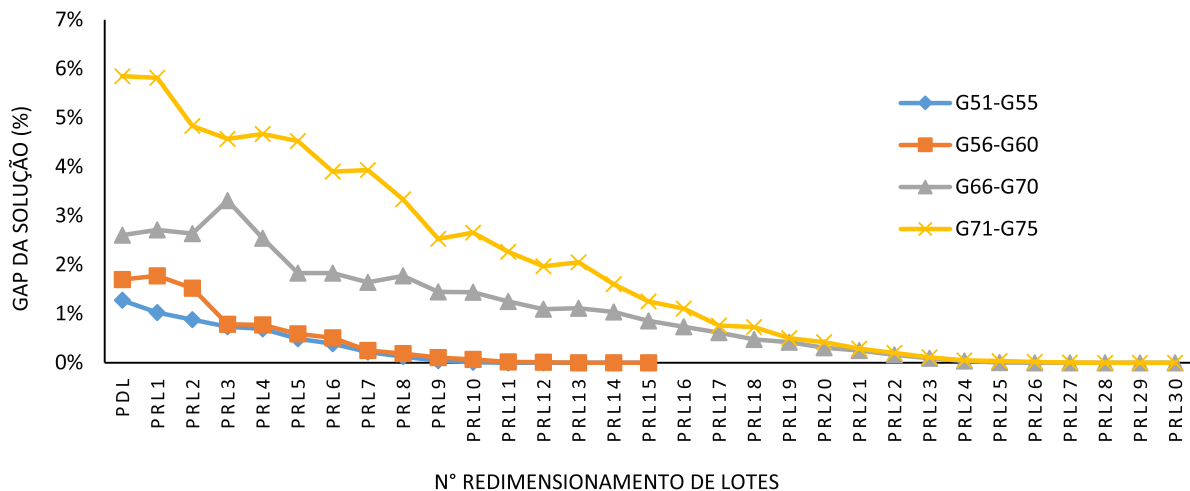


Figura 4.11: Resultados do *gap da solução*.

Na Figura 4.12, observa-se que o tempo computacional para a Classe G51-G55 inicia-se com a média de 1467,80 segundos, sendo que para os quatro últimos PRLs, o tempo médio de resolução é inferior a dez segundos. Para a Classe G56-G60 o tempo médio de resolução do primeiro PRL é de 1127,82 segundos e para o PRL14 e 15, o tempo é inferior a dois segundos. Para a Classe G66-G70 temos um tempo inicial médio de 1529,61 segundos, com os quatro últimos PRLs resolvidos a menos de cinco segundos. A Classe G71-G75 inicia com um tempo médio de 1163,24 segundos e o PRL29 e 30 foram resolvidos com

menos de dois segundos.

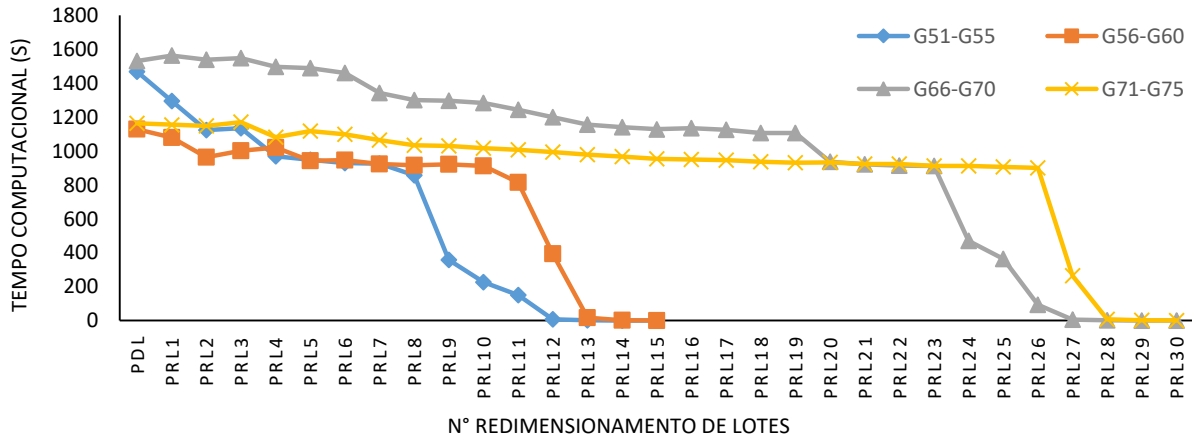


Figura 4.12: Resultados do tempo computacional.

O valor da função objetivo manteve-se crescente para todas classes de instâncias. A Classe G51-G55 iniciou com um custo total de R\$ 67.134,00 e para o último PRL o valor foi de R\$ 68.300,00. A Classe G56-G60 iniciou com R\$ 142.175,00 e terminou com R\$ 143.152,00. A Classe G66-G70 iniciou com R\$ 143.877,00 e terminou com R\$ 145.138,00. A Classe G71-G75 iniciou com um custo de R\$ 276.248,00 e terminou com R\$ 276.093,00.

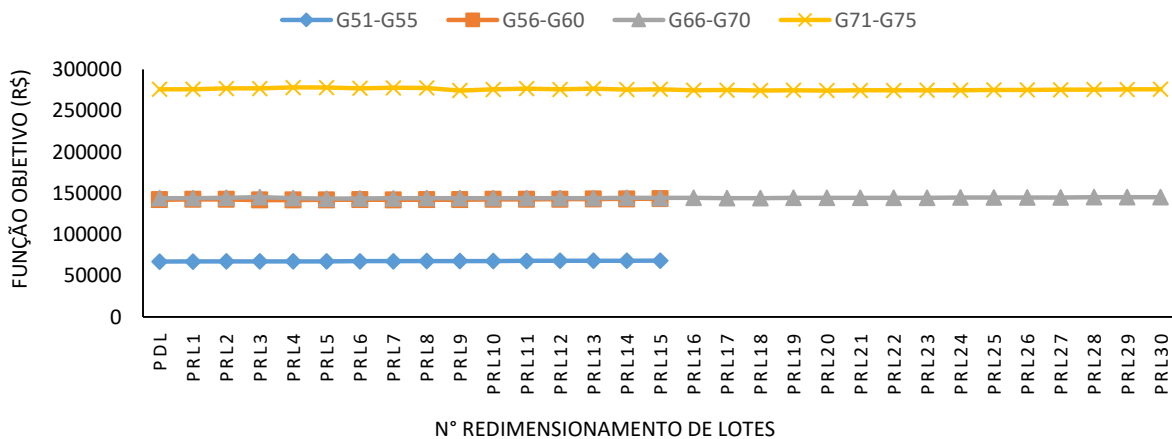


Figura 4.13: Resultados da função objetivo.

Na Figura 4.14 é possível observar a duração da interrupção para cada PRL, dentro do intervalo de valores definidos na seção 4.2.1, onde para as classes G51-G55 e G66-G70 os valores estão entre 114,40 e 80,80 minutos, e para as classes G56-G60 e G71-G75 os valores estão entre 223 e 157,40 minutos. Vale a pena ressaltar que para a solução inicial do PRL, que é a própria resolução do PDL, não existe interrupção, portanto a duração da interrupção será nula para todas as classes.

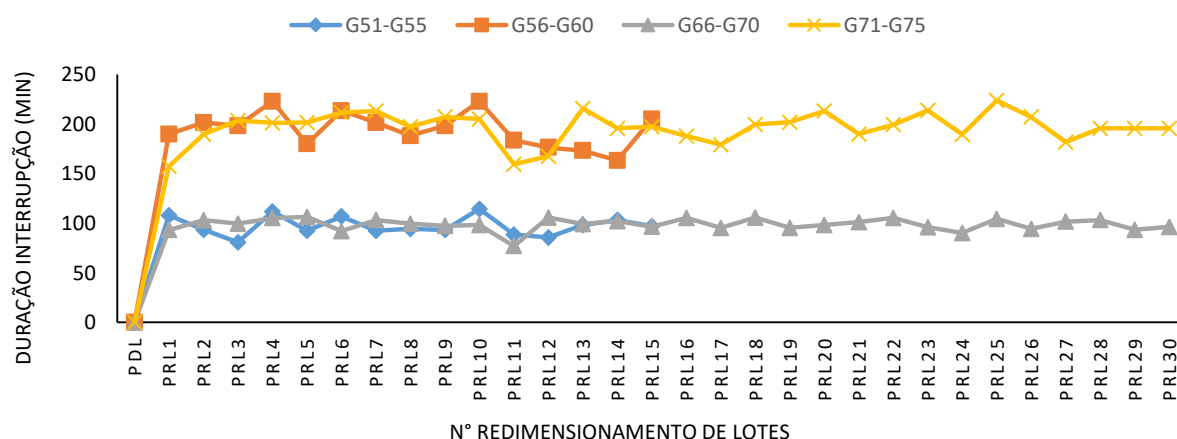


Figura 4.14: Resultados da duração das interrupções.

Na Figura 4.15, observa-se a crescente tendência de utilização de hora extra para todas as instâncias. Para a Classe G51-G55 a média inicial de utilização de hora extra é de 577,30 minutos, já a média final é de 1201,30 minutos. Para a Classe G56-G60 a média inicial de utilização de hora extra é de 363,10 minutos, já a média final é de 1235,10 minutos. Para a Classe G66-G70 a média inicial de utilização de hora extra é de 1211,20 minutos, já a média final é de 2096,80 minutos. Para a Classe G71-G75 a média inicial de utilização de hora extra é de 1272,30 minutos, já a média final é de 3054,60 minutos.

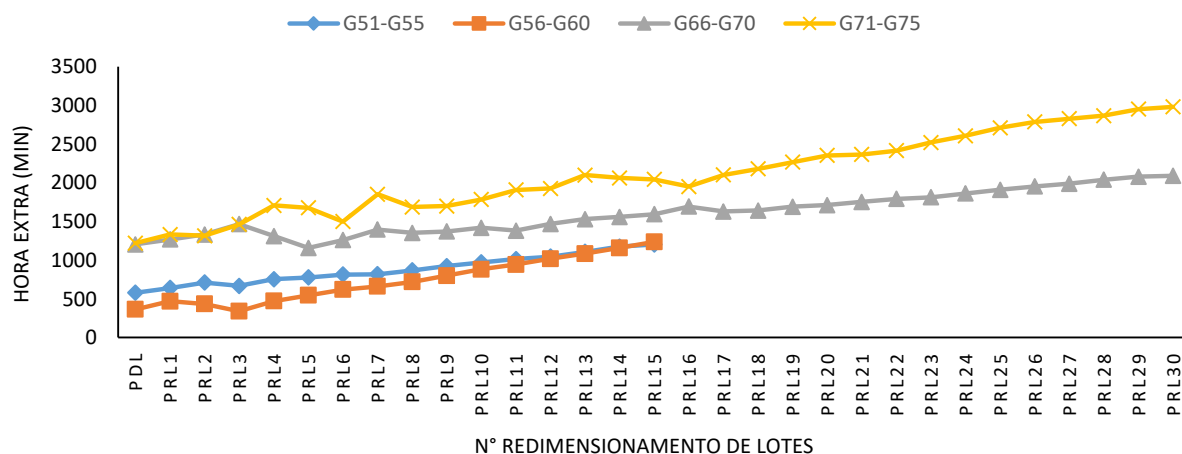


Figura 4.15: Resultados da quantidade de hora extra.

Capítulo 5

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos, este capítulo tem como objetivo realizar algumas considerações importantes acerca do tema redimensionamento de lotes e como cada uma das três interrupções interagem com o problema.

A Figura 5.1 mostra o comportamento de cada interrupção, quando analisado o *gap da solução*, o tempo de solução e a função objetivo.

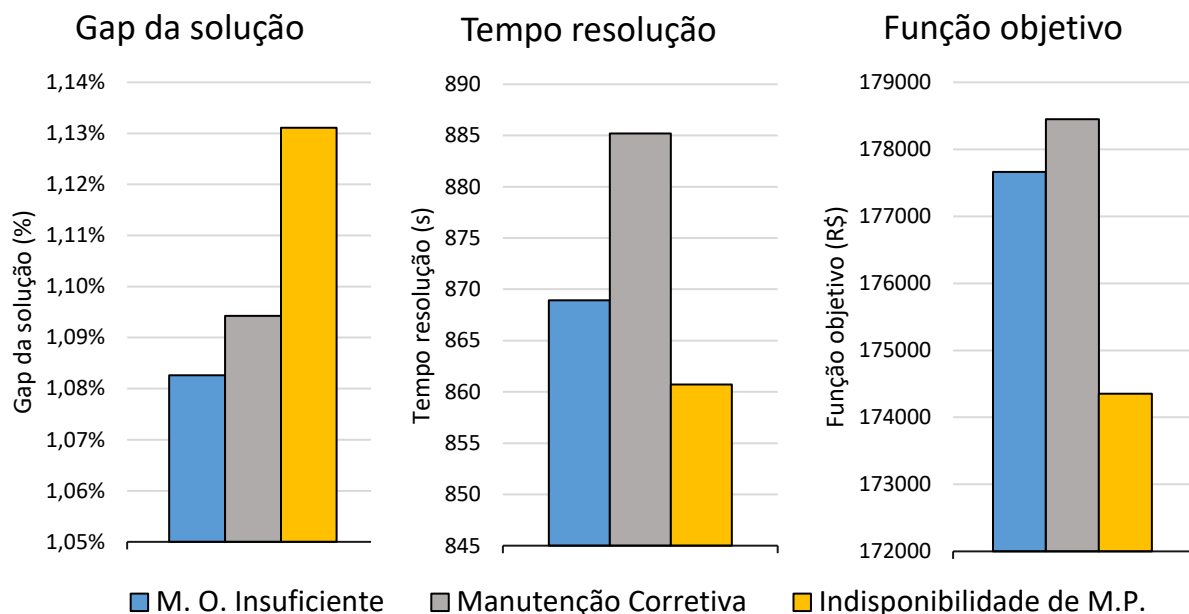


Figura 5.1: Comparativo do *gap da solução*, tempo de resolução e função objetivo.

A interrupção por mão de obra insuficiente, apresenta maior tempo computacional quando comparada com as demais. Isso ocorreu, pois, a duração da interrupção é sempre equivalente a toda capacidade disponível da máquina no período. A duração da interrupção para as classes de manutenção corretiva e indisponibilidade de matéria-prima

foram definidas como uma fração da capacidade, em proporções diferentes segundo $\delta \in [0,25, 0,40]$ e $\sigma \in [0,15, 0,25]$ da capacidade, respectivamente. Essa relação manteve-se quando analisado o tempo computacional de resolução. Um tempo de interrupção muito elevado, impacta diretamente na diminuição sistemática da capacidade C_{mt} , já que ela sempre é atualizada na mesma proporção da duração da interrupção para os três tipos de interrupções, tornando o problema mais restritivo, por isso pode-se afirmar a forte relação entre a duração da interrupção e o tempo computacional de resolução do PRL.

Pode-se afirmar que a duração da interrupção também impactou os resultados para a função objetivo. Quando o problema torna-se mais restritivo sob o ponto de vista da capacidade, é natural que a estratégia de solução busque pela utilização de hora extra, estoque ou atraso de alguns produtos, e isso faz com que os custos aumentem. Já para problemas menos restritivos, obtém-se melhores limitantes inferiores, a exemplo da interrupção por indisponibilidade de matéria-prima quando comparada com as demais. Ao analisar os gráficos de Tempo de resolução e Função objetivo na Figura 5.1, independente da unidade de medida nas escalas, observa-se que as proporções para interrupção por mão de obra insuficiente e indisponibilidade de matéria-prima mantiveram-se praticamente as mesmas em ambos os gráficos, com exceção da interrupção por manutenção corretiva. Para este caso, a proporção foi diferente, pois ocorre um número de preparações maiores quando comparado com as outras classes de interrupção. A classe de interrupção por manutenção corretiva admite o fracionamento do lote quando este é interrompido durante a produção, desta forma, é contabilizado custo e tempo de preparação para a produção do lote fracionado, acarretando portanto mais custos na função objetivo.

A Figura 5.2 mostra a relação entre a duração da interrupção de maneira geral para cada tipo de interrupção, e o comportamento da quantidade de hora extra utilizada para determinar a solução do problema. Os valores são uma média de todos os testes realizados para todas as instâncias.

Pelo gráfico apresentado na Figura 5.2 é possível concluir que a duração da interrupção não é o único motivo pelo qual ocorre a utilização de hora extra. Pelas proporções apresentadas no gráfico, as interrupções podem ser consideradas um motivo adjacente na utilização de hora extra, o motivo principal é a própria restrição de capacidade. Caso não fosse considerada a possibilidade de utilização de hora extra, possivelmente as instâncias com mais restrição de capacidade seriam infactíveis. Devido a interrupção por mão de

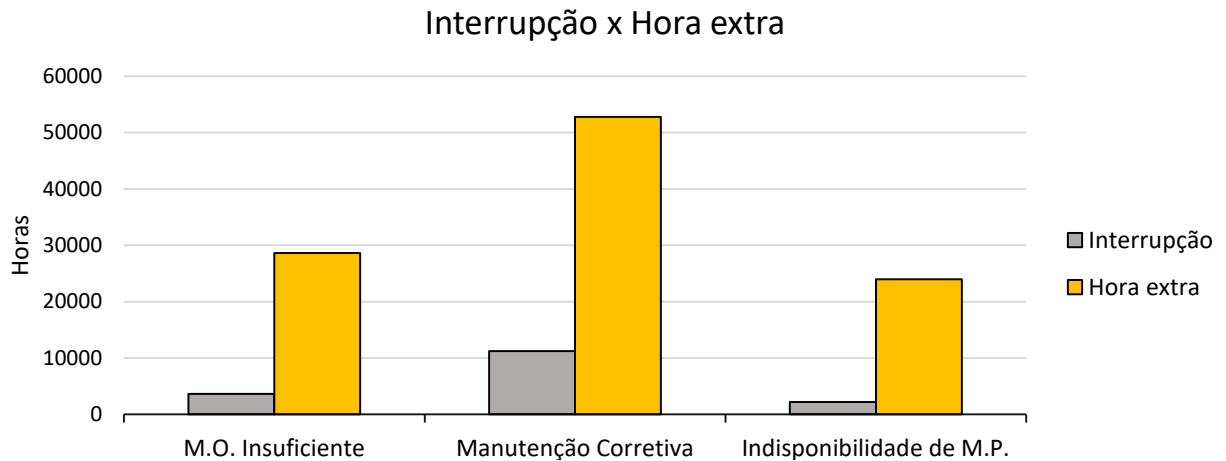


Figura 5.2: Comparativo entre o tempo de interrupção e a utilização de hora extra.

obra insuficiente contabilizar o maior tempo de interrupções, esta interrupção utilizou mais hora extra.

A Figura 5.3 apresenta o comportamento de todos os custos envolvidos no problema de acordo com cada classe de interrupção.

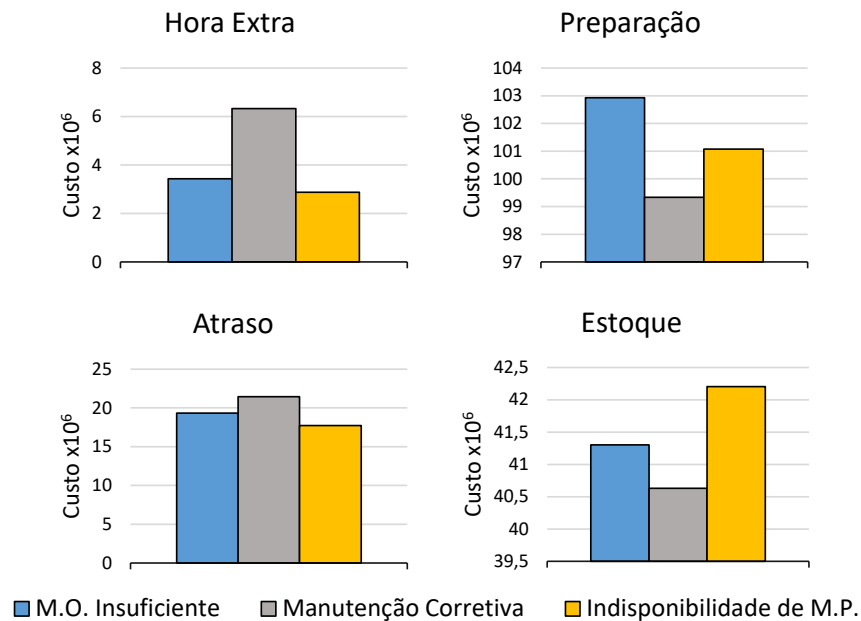


Figura 5.3: Comparativo entre os custos.

Os custos possuem pesos diferentes, por exemplo, o custo com preparação é superior ao custo com hora extra, além do mais, alguns custos são variáveis enquanto outros custos são fixos, entretanto, o objetivo não é analisá-los de maneira isolada, ou qual custo teria uma representatividade maior ou qual é mais elevado, mas sim analisar a variação de cada custo de acordo com cada classe de interrupção.

O custo com hora extra foi maior para a classe de interrupção por mão de obra insuficiente, contabilizando também o maior tempo com interrupções. A interrupção por manutenção corretiva obteve o maior custo com preparações devido esta classe de interrupção contabilizar o custo e tempo de preparação para os lotes fracionados no momento da interrupção. Através da análise dos custos com atraso, é possível concluir que a variação do custo entre as três interrupções é mínima, ou seja, exerce pouca influência quando o objetivo é analisar somente as classes entre si. A classe de interrupção por indisponibilidade de matéria-prima possui o maior custo com estoque por ser o tipo de interrupção que contabiliza o menor tempo de interrupção. Com um tempo de interrupção menor, a capacidade torna-se menos restritiva quando comparada com os outros tipos de interrupção, logo, é possível adiantar a produção de alguns produtos enquanto houver capacidade disponível, com isso, o custo com estoque aumenta.

Capítulo 6

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um estudo referente ao Problema de Redimensionamento de Lotes (PRL) capacitado, com múltiplos produtos e máquinas paralelas. Este problema é uma variação do problema de dimensionamento de lotes, e aparece quando há interrupções no processo produtivo. A estratégia do PRL é reformular o plano de produção de maneira otimizada, contabilizando tudo o que foi produzido, estocado e atrasado até o momento da interrupção, inclusive os lotes que foram parcialmente produzidos, e a demanda dos períodos futuros. Foram consideradas interrupções por manutenção corretiva, mão de obra insuficiente, e indisponibilidade de matéria-prima. Em cada período do problema, apenas um tipo de interrupção pode acontecer. O problema teve por objetivo minimizar os custos de estoque, atraso, preparação e hora extra. O PRL foi formulado como um problema de programação linear inteira mista e resolvido através do método exato *branch and bound*.

Testes computacionais foram realizados com exemplares da literatura, adaptados para o PRL. Com os resultados obtidos foi possível verificar que a interrupção por mão de obra insuficiente provoca maior impacto quando analisado a média de todos os custos envolvidos no problema.

A interrupção por manutenção corretiva, por possuir número de preparações mais elevados, e por admitir o fracionamento do lote quando este é interrompido durante a produção, ocasiona custo e tempo de preparação adicionais.

Quando analisado os resultados do PRL, solução a solução, após cada interrupção, foi possível concluir que o tempo computacional e o *gap da solução* foram maiores para as interrupções que ocorreram nos primeiros períodos e decresceram gradativamente até as

últimas interrupções. Já quando analisamos o custo da função objetivo e a utilização de hora extra, o resultado foi o oposto, com maiores custos e incidência de hora extra nos últimos períodos interrompidos.

Para trabalhos futuros, pode-se abordar o problema considerando múltiplas interrupções em um mesmo período, outros tipos de interrupções e a proposta de um procedimento heurístico para problemas mais complexos.

Referências Bibliográficas

- AGGARWAL, A.; PARK, J. K. Improved algorithms for economic lot size problems. *Operations research*, INFORMS, v. 41, n. 3, p. 549–571, 1993.
- ANDRIOLO, A.; BATTINI, D.; GRUBBSTRÖM, R. W.; PERSONA, A.; SGARBOSSA, F. A century of evolution from harris s basic lot size model: Survey and research agenda. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 155, p. 16–38, 2014.
- ARMENTANO, V. A.; RONCONI, D. P. Tabu search for total tardiness minimization in flowshop scheduling problems. *Computers & operations research*, Elsevier, v. 26, n. 3, p. 219–235, 1999.
- BARANY, I.; ROY, T. J. V.; WOLSEY, L. A. Strong formulations for multi-item capacitated lot sizing. *Management Science*, INFORMS, v. 30, n. 10, p. 1255–1261, 1984.
- BELVAUX, G.; WOLSEY, L. A. bc—prod: A specialized branch-and-cut system for lot-sizing problems. *Management Science*, INFORMS, v. 46, n. 5, p. 724–738, 2000.
- BITRAN, G. R.; YANASSE, H. H. Computational complexity of the capacitated lot size problem. *Management Science*, INFORMS, v. 28, n. 10, p. 1174–1186, 1982.
- BRAHIMI, N.; ABSI, N.; DAUZÈRE-PÉRÈS, S.; NORDLI, A. Single-item dynamic lot-sizing problems: An updated survey. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 263, n. 3, p. 838–863, 2017.
- BRAHIMI, N.; DAUZERE-PERES, S.; NAJID, N. M.; NORDLI, A. Single item lot sizing problems. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 168, n. 1, p. 1–16, 2006.
- BUSCHKÜHL, L.; SAHLING, F.; HELBER, S.; TEMPELMEIER, H. Dynamic capacitated lot-sizing problems: a classification and review of solution approaches. *Or Spectrum*, Springer, v. 32, n. 2, p. 231–261, 2010.
- CARRENO, J. J. Economic lot scheduling for multiple products on parallel identical processors. *Management Science*, INFORMS, v. 36, n. 3, p. 348–358, 1990.
- CARVALHO, D. M.; NASCIMENTO, M. C. Lagrangian heuristics for the capacitated multi-plant lot sizing problem with multiple periods and items. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 71, p. 137–148, 2016.
- CARVALHO, D. M.; NASCIMENTO, M. C. A kernel search to the multi-plant capacitated lot sizing problem with setup carry-over. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 100, p. 43–53, 2018.

- CHAKRABORTY, T.; GIRI, B. C.; CHAUDHURI, K. Production lot sizing with process deterioration and machine breakdown. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 185, n. 2, p. 606–618, 2008.
- CHANDAR, A. S. *Optimizing lot sizing and establishing supermarkets in a multi-part, limited-capacity manufacturing system*. 89 p. Dissertação (Mestrado) — Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, EUA, 2014.
- DENIZEL, M.; SÜRAL, H. On alternative mixed integer programming formulations and lp-based heuristics for lot-sizing with setup times. *Journal of the Operational Research Society*, Taylor & Francis, v. 57, n. 4, p. 389–399, 2006.
- DIABY, M.; BAHL, H.; KARWAN, M.; ZIONTS, S. Capacitated lot-sizing and scheduling by lagrangean relaxation. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 59, n. 3, p. 444–458, 1992.
- DREXL, A.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling—survey and extensions. *European Journal of operational research*, Elsevier, v. 99, n. 2, p. 221–235, 1997.
- EPPEN, G. D.; MARTIN, R. K. Solving multi-item capacitated lot-sizing problems using variable redefinition. *Operations Research*, INFORMS, v. 35, n. 6, p. 832–848, 1987.
- FEDERGRUEN, A.; TZUR, M. A simple forward algorithm to solve general dynamic lot sizing models with n periods in $O(n \log n)$ or $O(n)$ time. *Management Science*, INFORMS, v. 37, n. 8, p. 909–925, 1991.
- FIOROTTO, D. J.; ARAUJO, S. A. de. Reformulation and a lagrangian heuristic for lot sizing problem on parallel machines. *Annals of Operations Research*, Springer, v. 217, n. 1, p. 213–231, 2014.
- FIOROTTO, D. J.; ARAUJO, S. A. de; JANS, R. Hybrid methods for lot sizing on parallel machines. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 63, p. 136–148, 2015.
- FIOROTTO, D. J.; JANS, R.; ARAUJO, S. A. D. An analysis of formulations for the capacitated lot sizing problem with setup crossover. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 106, p. 338–350, 2017.
- FLORIAN, M.; LENSTRA, J. K.; KAN, A. R. Deterministic production planning: Algorithms and complexity. *Management science*, INFORMS, v. 26, n. 7, p. 669–679, 1980.
- GLOCK, C. H.; GROSSE, E. H.; RIES, J. M. The lot sizing problem: A tertiary study. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 155, p. 39–51, 2014.
- HARRIS, F. H. How many parts to make at once. *The Magazine of Management*, v. 10, p. 135–136, 1913.
- HINDI, K. Computationally efficient solution of the multi-item, capacitated lot-sizing problem. *Computers & industrial engineering*, Elsevier, v. 28, n. 4, p. 709–719, 1995.
- JABER, M. Y. Lot sizing for an imperfect production process with quality corrective interruptions and improvements, and reduction in setups. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 51, n. 4, p. 781–790, 2006.

- JANS, R.; DEGRAEVE, Z. Meta-heuristics for dynamic lot sizing: A review and comparison of solution approaches. *European journal of operational research*, Elsevier, v. 177, n. 3, p. 1855–1875, 2007.
- KANG, S.; MALIK, K.; THOMAS, L. J. Lotsizing and scheduling on parallel machines with sequence-dependent setup costs. *Management science*, INFORMS, v. 45, n. 2, p. 273–289, 1999.
- KARIMI, B.; GHOMI, S. F.; WILSON, J. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega*, Elsevier, v. 31, n. 5, p. 365–378, 2003.
- KRARUP, J.; BILDE, O. Plant location, set covering and economic lot size: An 0 (mn)-algorithm for structured problems. In: *Numerische Methoden bei Optimierungsaufgaben Band 3*. [S.l.]: Springer, 1977. p. 155–180.
- LASDON, L. S.; TERJUNG, R. An efficient algorithm for multi-item scheduling. *Operations research*, INFORMS, v. 19, n. 4, p. 946–969, 1971.
- MANNE, A. S. Programming of economic lot sizes. *Management Science*, v. 4, p. 115–135, 1958.
- MENEZES, A. A.; CLARK, A.; ALMADA-LOBO, B. Capacitated lot-sizing and scheduling with sequence-dependent, period-overlapping and non-triangular setups. *Journal of Scheduling*, Springer, v. 14, n. 2, p. 209–219, 2011.
- MOHAN, S.; GOPALAKRISHNAN, M.; MARATHE, R.; RAJAN, A. A note on modelling the capacitated lot-sizing problem with set-up carryover and set-up splitting. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 50, n. 19, p. 5538–5543, 2012.
- MULLER, L. F.; SPOORENDONK, S.; PISINGER, D. A hybrid adaptive large neighborhood search heuristic for lot-sizing with setup times. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 218, n. 3, p. 614–623, 2012.
- NEIDIGH, R. O.; HARRISON, T. P. Optimising lot sizing with nonlinear production rates in a multi-product multi-machine environment. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 55, n. 4, p. 939–959, 2017.
- ÖZDAMAR, L.; BIRBIL, Ş. I. Hybrid heuristics for the capacitated lot sizing and loading problem with setup times and overtime decisions. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 110, n. 3, p. 525–547, 1998.
- PEDROSO, J. P.; KUBO, M. Hybrid tabu search for lot sizing problems. In: SPRINGER. *International Workshop on Hybrid Metaheuristics*. [S.l.], 2005. p. 66–77.
- QUADT, D.; KUHN, H. Capacitated lot-sizing with extensions: a review. *4OR*, Springer, v. 6, n. 1, p. 61–83, 2008.
- SALAMEH, M. K.; JABER, M. Y. Optimal lot sizing with regular maintenance interruptions. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, v. 21, n. 2, p. 85–90, 1997.
- SOUZA, K. X. D.; ARMENTANO, V. A. Multi-item capacitated lot-sizing by a cross decomposition based algorithm. *Annals of Operations Research*, Springer, v. 50, n. 1, p. 557–574, 1994.

- SUNG, C. S. A single-product parallel-facilities production-planning model. *International Journal of Systems Science*, Taylor & Francis, v. 17, n. 7, p. 983–989, 1986.
- SÜRAL, H.; DENIZEL, M.; WASSENHOVE, L. N. V. Lagrangean relaxation based heuristics for lot sizing with setup times. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 194, n. 1, p. 51–63, 2009.
- TALEIZADEH, A. A.; CÁRDENAS-BARRÓN, L. E.; MOHAMMADI, B. A deterministic multi product single machine epq model with backordering, scraped products, rework and interruption in manufacturing process. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 150, p. 9–27, 2014.
- TEMPELMEIER, H.; BUSCHKÜHL, L. Dynamic multi-machine lotsizing and sequencing with simultaneous scheduling of a common setup resource. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 113, n. 1, p. 401–412, 2008.
- TEMPELMEIER, H.; HILGER, T. Linear programming models for a stochastic dynamic capacitated lot sizing problem. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 59, p. 119–125, 2015.
- TOLEDO, F. M. B.; ARMENTANO, V. A. A lagrangian-based heuristic for the capacitated lot-sizing problem in parallel machines. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 175, n. 2, p. 1070–1083, 2006.
- TRIGEIRO, W. W. A dual-cost heuristic for the capacitated lot sizing problem. *IIE transactions*, Taylor & Francis, v. 19, n. 1, p. 67–72, 1987.
- TRIGEIRO, W. W.; THOMAS, L. J.; MCCLAIN, J. O. Capacitated lot sizing with setup times. *Management science*, INFORMS, v. 35, n. 3, p. 353–366, 1989.
- WAGELMANS, A.; HOESEL, S. V.; KOLEN, A. Economic lot sizing: an $O(n \log n)$ algorithm that runs in linear time in the wagner-whitin case. *Operations Research*, INFORMS, v. 40, n. 1-supplement-1, p. S145–S156, 1992.
- WAGNER, H.; WHITIN, T. Dynamic version of the economic lot size model. *Management Science*, v. 5, p. 89–96, 1958.
- WOLSEY, L. A. Progress with single-item lot-sizing. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 86, n. 3, p. 395–401, 1995.
- YANG, H.; LOW, V.; ZHANG, C.; ZHENG, L.; MIAO, L. Behaviour perception-based disruption models for the parallel machine capacitated lot-sizing and scheduling problem. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 55, n. 11, p. 3058–3072, 2017.
- ZANGWILL, W. I. A deterministic multi-period production scheduling model with backlogging. *Management Science*, INFORMS, v. 13, n. 1, p. 105–119, 1966.
- ZANGWILL, W. I. A backlogging model and a multi-echelon model of a dynamic economic lot size production system—a network approach. *Management Science*, INFORMS, v. 15, n. 9, p. 506–527, 1969.