

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP**  
**CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,**  
**ADMINISTRAÇÃO E ECONOMIA - DEPRO**

**LORENA VIEIRA REZENDE**

**MÉTODOS HEURÍSTICOS PARA A RESOLUÇÃO DO PROBLEMA**  
**INTEGRADO DE DIMENSIONAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE**  
**LOTES EM UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**

Ouro Preto

2021

Lorena Vieira Rezende

Métodos heurísticos para a resolução do problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes em uma indústria siderúrgica

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenharia de Produção.

Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Prof. Dr. Aloísio de Castro Gomes Júnior

Co-orientador: Prof. Dr. Helton Cristiano Gomes

Ouro Preto

2021

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R467m Rezende, Lorena Vieira .

Métodos heurísticos para a resolução do problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes em uma indústria siderúrgica. [manuscrito] / Lorena Vieira Rezende. - 2021.

40 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Aloísio de Castro Gomes Júnior.

Coorientador: Prof. Dr. Helton Cristiano Gomes.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Pesquisa Operacional. 2. Meta-heurística. 3. Siderurgia. I. Gomes, Helton Cristiano. II. Gomes Júnior, Aloísio de Castro. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Lorena Vieira Rezende**

**Métodos heurísticos para a resolução do problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes em uma indústria siderúrgica**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção

Aprovada em 09 de abril de 2021

### Membros da banca

[Doutor] - Aloísio de Castro Gomes Júnior - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
[Doutor] - Helton Cristiano Gomes - Co-Orientador - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
[Doutor] - Clarisse da Silva Vieira Camelo de Souza - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
[Mestranda] - Naiara Helena Vieira- (Universidade Federal de Ouro Preto)

Aloísio de Castro Gomes Júnior, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 09/04/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Aloísio de Castro Gomes Junior, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/04/2021, às 09:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Helton Cristiano Gomes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/04/2021, às 09:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0156889** e o código CRC **DE943C42**.

## **Agradecimentos**

Agradeço, primeiramente, à Deus e ao Padre Libério por serem meu ponto de amparo e por sempre renovarem as minhas energias e a minha fé.

Aos meus pais, Valéria e Harley, agradeço imensamente por todo amor, apoio, incentivo e oportunidades. Por serem o meu exemplo de simplicidade, bondade e por batalharem tanto para que eu pudesse concluir a graduação.

Aos meus irmãos, André e Henrique, por preencherem a minha vida e me acolherem sempre.

Aos meus tios, tias, primos, primas e avós por vibrarem todas as minhas conquistas, me ampararem e deixarem minha vida mais leve e feliz. Em especial, agradeço ao Kakil e à Kakal por todo carinho e por disponibilizarem tempo e cuidado nos trabalhos realizados na fábrica, e à Tia Andreza, pelo incentivo para a realização da matrícula.

Ao meu namorado Carlos, por ser sempre o meu ponto de equilíbrio, meu companheiro e meu incentivador. Por nunca medir esforços para me ver bem e por sempre acreditar que eu sou capaz.

Em especial, agradeço à Letícia, por ser a minha dupla e a melhor amiga que eu poderia ter encontrado durante a graduação. Obrigada pela amizade, por estar sempre ao meu lado e por todo o apoio na realização deste trabalho, você foi peça fundamental.

Agradeço, também, as minhas amigas Aline, Ana Laura, Isabela, Karina, Mari e Stela, vocês enchem a minha vida de alegria e foram essenciais nessa caminhada.

Por fim, sou grata à UFOP e a todos os professores que tanto me ensinaram durante a graduação, em especial, ao Aloísio e ao Helton, que me apresentaram a Pesquisa Operacional e fizeram possível a realização desta monografia. Agradeço por estarem sempre presentes, por todo incentivo, paciência e inspiração.

## Resumo

Esta monografia aborda o desenvolvimento de sistemas computacionais para a resolução do problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes em indústrias siderúrgicas. Com a resolução desse problema foi possível definir quais produtos devem ser produzidos, quando os mesmos deverão ser processados dentro do horizonte de planejamento e a ordem de produção nos recursos existentes. Propõe-se, assim, o desenvolvimento de sistemas computacionais em linguagem C baseados na meta-heurística VNS (*Variable Neighborhood Search*) e na meta-heurística ILS (*Iterated Local Search*). Os métodos desenvolvidos foram aplicados em uma empresa siderúrgica brasileira, mais especificamente na aciaria, setor responsável pela transformação do ferro gusa em aço. Os resultados gerados foram comparados com resultados obtidos por métodos já existentes na literatura e se mostraram satisfatórios, principalmente no que tange o tempo computacional despendido para a geração das soluções, viabilizando, assim, a aplicação dos métodos em cenários reais.

Palavras-chave: Pesquisa Operacional, Meta-heurística, Siderurgia, Agrupamento de pedidos, Sequenciamento de panelas

## **Abstract**

This monograph addresses the development of computer systems to solve the integrated problem of batch sizing and sequencing in steel industries. With the resolution of this problem it was possible to define which products should be produced, when they should be processed within the planning horizon and the order of production in the existing resources. Therefore, it is proposed the development of computational systems in C language based on the VNS (Variable Neighborhood Search) metaheuristic and ILS (Iterated Local Search) metaheuristic. The developed methods were applied in a Brazilian steel plant, more specifically in the melt shop, sector responsible for the transformation of pig iron in steel. The results were compared with results obtained by methods already existing in the literature and proved to be satisfactory, especially with regard to the computational time spent to generate the solutions, enabling the application of the methods in real-world scenarios.

Keywords: Operational Research, Metaheuristics, Steelmaking, Batching orders, Sequencing charges

## **Lista de abreviaturas e siglas**

PCP	Planejamento e Controle da Produção
PIDSL	Problema Integrado de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PSMU	Problema de Sequenciamento de Máquina Única
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i>
ILS	<i>Iterated Local Search</i>
IRACE	<i>Iterated Race</i>



## Índice de Ilustrações

Figura 1 - Processo simplificado da produção de aço em uma usina integrada .....	7
Figura 2 – Pseudocódigo VNS .....	17
Figura 3 - Pseudocódigo ILS.....	18
Figura 4 - Representação esquemática da solução do problema .....	23
Figura 5 - Realocação de painéis .....	24
Figura 6 - Realocação interna de pedidos.....	24
Figura 7 - Realocação externa de pedidos.....	25
Figura 8 - Troca externa de pedidos .....	25

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Produção de aço bruto por processo de aciaria e lingotamento (Unid.: $10^3$ t) .....	7
Tabela 2 - Produção siderúrgica brasileira 3º Trimestre / 2020 (Unid.: $10^3$ t).....	8
Tabela 3 - Resultados obtidos .....	31
Tabela 4 - Média e desvio-padrão do Tempo gasto (s) e do GAP (%).....	32
Tabela 5 - Média e Desvio-padrão das 20 soluções encontradas para cada instância por cada meta-heurística .....	33
Tabela 6 - Média e Desvio Padrão do tempo despendido para encontrar as 20 soluções para cada instância por cada meta-heurística .....	34

## Sumário

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Revisão de literatura .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Setor Siderúrgico.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Problema de sequenciamento da produção.....</b>	<b>8</b>
<b>2.3 Sequenciamento da produção na aciaria.....</b>	<b>10</b>
<b>2.4 Problema de dimensionamento de lotes .....</b>	<b>11</b>
<b>2.5 Problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes na aciaria .....</b>	<b>13</b>
<b>2.6 Meta-heurísticas .....</b>	<b>15</b>
<b>2.7 Modelo matemático para o PIDSL .....</b>	<b>18</b>
<b>3. Materiais e métodos.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Meta-heurística VNS.....</b>	<b>23</b>
<b>3.2 Meta-heurística ILS .....</b>	<b>26</b>
<b>4. Resultados e discussões .....</b>	<b>29</b>
<b>5. Conclusão .....</b>	<b>35</b>

## 1. Introdução

O planejamento e controle da produção (PCP) é uma das áreas de extrema importância dentro das organizações, visto que suas ações interferem tanto no fluxo produtivo e logístico quanto na qualidade final do produto e atendimento das expectativas dos clientes. Dessa maneira, o PCP preocupa-se em realizar uma gestão eficiente de estoques, de demanda e de capacidade produtiva, sequenciar os processos e emitir ordens de produção, reduzir os custos operacionais, o tempo de produção, os prazos de entrega e, conseqüentemente, obter um melhor custo-benefício para os clientes, aumentando a competitividade da empresa no mercado.

No planejamento e controle da produção é realizada a programação da interação homem-máquina para que todos operem com os níveis desejados de produção, cumprindo, assim, todos os prazos e metas e atendendo a todos os clientes, sendo estes internos ou externos. Uma das tarefas mais desafiadoras da área de PCP é justamente definir um plano de produção que atenda os clientes da melhor forma possível. Nesse contexto é que se insere o problema de dimensionamento e o de sequenciamento de lotes.

O problema de dimensionamento de lotes capacitados consiste em planejar, para um horizonte de tempo discretizado, as quantidades a serem produzidas em cada período, de forma a atender a demanda, minimizando os custos associados e respeitando as restrições de capacidade. Os custos considerados podem estar relacionados à preparação das máquinas (*setup*), à manutenção de estoques de um período para o outro, ou ao atraso no atendimento da demanda, por exemplo. Uma vez que as decisões de lotes foram tomadas, os lotes constituem ordens de produção a serem sequenciados dentro de cada período.

Já o problema de sequenciamento consiste em fazer a alocação e a programação das ordens de produção nas máquinas disponíveis, ou seja, decidir a seqüência nas quais as operações devem ser processadas e em que momento elas devem ser realizadas no horizonte de planejamento. O sequenciamento visa aumentar a capacidade produtiva, fazendo um melhor aproveitamento do tempo disponível e reduzir, por exemplo, a geração de materiais não conformes.

Considera-se, neste trabalho, o problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes (PIDSL), que consiste em definir lotes de produção de forma que haja um sequenciamento possível de ser realizado dentro da capacidade de cada período. O trabalho tem seu foco na indústria siderúrgica, um dos principais setores do estado de Minas Gerais e do Brasil. O enfoque principal do projeto é a etapa de produção do aço, ou seja, a aciaria, reconhecida por

vários autores, como Bellabdaoui e Teghem (2006), Missbauer *et al.* (2009), Li *et al.* (2012), Tang *et al.* (2002), como o gargalo na produção do aço.

Segundo Tang e Wang (2008), a aciaria é o gargalo no processo de obtenção do aço pois sua capacidade de produção é geralmente menor que as etapas de laminação à quente e laminação à frio, etapas subsequentes à aciaria. Ainda de acordo com esses autores, devem ser tomadas duas decisões em relação ao problema de planejamento e programação na aciaria: (i) a primeira diz respeito ao agrupamento das corridas, que compreende a junção de pedidos de diferentes clientes em uma panela (ou corrida), até que ela atinja sua capacidade; (ii) a segunda decisão se refere ao agrupamento de séries, que consiste no sequenciamento de corridas dentro de uma série (conjunto de corridas produzidas sem interrupção no processo para a troca do distribuidor) respeitando as restrições de propriedades metalúrgicas e largura das placas.

Cada panela possui um padrão, estabelecido a partir da composição química do aço e da largura da placa ao final do processamento da panela. Assim, pedidos com a mesma combinação de composição química do aço e largura das placas correspondem a um único padrão e podem ser processados na mesma panela. É possível, também, agrupar pedidos de diferentes composições químicas dentro da mesma panela, desde que essas composições sejam compatíveis. No entanto, a composição do pedido  $x$  sofrerá um *upgrade* para a composição do pedido  $y$ , fazendo com que o pedido  $x$  tenha todas as características do pedido  $y$ , uma vez que este possui qualidade superior, e acarretando um custo de *upgrade* no processo. Já quando duas panelas de padrões diferentes são sequenciadas uma imediatamente após a outra, gera-se a chamada placa de mistura. Para evitar a geração desta placa, pode-se optar pela realização de uma operação de *setup*.

Dessa maneira, deve-se tomar as decisões no que diz respeito ao planejamento e programação da produção de forma correta e eficiente, para que se maximize a utilização dos distribuidores na fase do lingotamento contínuo e se minimize o custo com adequações nas composições químicas do aço e geração de placas de mistura. Daí a importância do presente trabalho, que visou o dimensionamento e o sequenciamento dos lotes de uma indústria siderúrgica fazendo uso das meta-heurísticas VNS e ILS, capazes de resolver problemas robustos com um baixo tempo computacional, encontrando soluções próximas da solução ótima.

Gomes Júnior (2015) afirma que, em pesquisa realizada em quatro siderúrgicas, pôde-se verificar que nenhuma delas possuía algum *software* capaz de gerar e avaliar soluções, o que justifica o desenvolvimento de métodos para a resolução do problema integrado de

dimensionamento e sequenciamento de lotes (PIDSL) na produção de ferro e aço. É importante destacar ainda, que este trabalho possuiu um cunho interdisciplinar, visto que a implementação proposta para a resolução do PIDSL envolveu o domínio de conceitos da área de siderurgia, programação linear, otimização matemática, análise combinatória e implementação computacional de algoritmos.

Assim, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de sistemas computacionais, baseados nas meta-heurísticas VNS e ILS, para a resolução do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes no setor de lingotamento contínuo de uma empresa siderúrgica brasileira. Juntamente com a utilização de técnicas de otimização na resolução de problemas de PCP, pretendeu-se minimizar os custos de *setup*, de atraso, de estoque, de *upgrade* e de geração de placas de mistura. O sistema computacional foi validado através da utilização de um modelo de programação linear inteira mista proposto por Gomes Júnior (2015).

Para alcançar os objetivos aqui propostos, adota-se a seguinte estrutura: na seção dois são apresentados os problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes bem como os principais trabalhos que tratam de temas correlatos, o contexto siderúrgico abordado, a apresentação das meta-heurísticas utilizadas e o modelo de PLIM proposto por Gomes Júnior (2015); na terceira seção encontram-se os métodos utilizados para a implementação das meta-heurísticas; a quarta seção compreende a apresentação, discussão e comparação dos resultados obtidos; por fim, na quinta seção, encontra-se as considerações finais a respeito do desenvolvimento deste trabalho.

## 2. Revisão de literatura

Esta seção tem como objetivo contextualizar os assuntos abordados durante o trabalho. Dessa forma, primeiramente será apresentado as características do setor siderúrgico, elucidando as etapas de produção do aço e alguns dados numéricos importantes. Em seguida será abordado o conceito do problema de sequenciamento da produção, tanto de forma mais ampla, quanto voltado especialmente para o setor da aciaria, foco do presente estudo, apresentando, também, alguns autores que discutiram o tema. Posteriormente, é apresentada as características do problema de dimensionamento de lotes, para que, tendo em mente os dois problemas, possamos tratá-los de forma integrada. Assim, no quarto tópico dessa seção, é apresentado o problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes e alguns estudos já existentes na literatura acerca desse tema. Por fim, tem-se um pequeno referencial sobre a meta-heurística ILS (*Iterated Local Search*), utilizada para a resolução do PIDSL.

### 2.1 Setor Siderúrgico

Segundo o site [www.worldsteel.org](http://www.worldsteel.org), o aço é uma liga de ferro e carbono que contém cerca de 2% de carbono, 1% de manganês e pequenas quantidades de silício, fósforo, enxofre e oxigênio. Devido as variações em sua composição, existem mais de 3.500 tipos distintos de aço, cada qual com propriedades físicas, químicas e ambientais diferentes. Credita-se a invenção da primeira técnica de produção de aço em massa ao britânico Henry Bessemer, em meados da década de 1850, sendo as tecnologias utilizadas atualmente ainda baseadas nas técnicas de Bessemer de sopro de ar no ferro gusa líquido com o objetivo de causar sua oxidação e separação das impurezas.

O processo de produção do aço pode ser dividido em três etapas. A primeira é a produção do ferro gusa no alto forno, a segunda etapa é a produção do aço na aciaria, e, por último, ocorre o processo de laminação do aço, onde este é transformado em produtos siderúrgicos. Para a fabricação do aço, além de componentes como o ferro, o minério de ferro, o sinter e até mesmo aço reciclado, é utilizado o carvão mineral, e, em alguns casos, o carvão vegetal. De acordo com o Instituto Aço Brasil, antes de serem levados ao alto forno, o minério de ferro e o carvão são previamente preparados para melhoria do rendimento e economia do processo. O minério é transformado em pelotas e o carvão mineral é submetido ao processo de coqueificação para a produção do coque.

Ainda de acordo com o Instituto, nas indústrias siderúrgicas o carvão exerce um duplo papel na fabricação do aço. Ele desempenha o papel de combustível, permitindo o alcance de altas temperaturas necessárias à fusão do minério. E o papel de redutor, uma vez que, com o alcance das altas temperaturas, cerca de 1500°C, o oxigênio presente no minério se desprende do mesmo, associando-se ao carbono proveniente do carvão e purificando as pelotas de minério. Tal processo de remoção do oxigênio denomina-se redução, e ocorre dentro do alto forno.

Durante o processo de redução ocorre a liquefação do ferro, que recebe, a partir de agora, a denominação de ferro gusa. Além disso, é formada a escória, composta de impurezas como a sílica e o calcário. O ferro gusa e a escória se separam ainda dentro do alto forno devido à diferença de densidade entre eles, sendo o primeiro levado à aciaria para ser transformada em aço, e a escória destinada a outros processos industriais, como a fabricação de cimento.

Na aciaria o ferro gusa líquido recebido do alto forno é submetido a três etapas: refino primário, refino secundário e lingotamento contínuo. De acordo com Bretas (2013), no refino primário o ferro gusa passa pelo Convertedor LD, aumentando a concentração de ferro na mistura devido a injeção de oxigênio, que funciona como um catalisador, e já podendo ser chamado de aço. Em seguida, o aço passa pelo refino secundário, com o objetivo de ajustar sua temperatura e composições químicas. Tal processo pode ocorrer no forno básico à oxigênio, no forno elétrico a arco de fusão ou no desgaseificador a vácuo.

De acordo com Rizzo (2006 *apud* Gomes Júnior 2015) o forno à oxigênio é utilizado principalmente para ajustes de composição química, temperatura e melhoria dos aços. Já o forno panela (forno elétrico) é um processo de aquecimento através de energia elétrica e tem as mesmas finalidades do processo realizado pelo forno à oxigênio. No forno panela a energia elétrica pode ser suplementada com oxigênio caso necessário. Segundo Martins *et al.* (2015) no desgaseificador a vácuo

O tratamento é totalmente efetuado sob vácuo e permite a obtenção de teores ultrabaixos de carbono necessários para produção dos aços voltados para indústria automobilística por exemplo, pois altera a curva de equilíbrio entre o carbono e o oxigênio quando comparado ao tratamento sob pressão atmosférica.

Nesta etapa, os pedidos dos clientes a serem agrupados devem respeitar as restrições relacionadas às suas composições químicas e larguras desejadas. Embora seja possível agrupar pedidos de composições químicas diferentes, porém compatíveis, em uma mesma corrida, em alguns casos é gerado o custo de *upgrade*. Tal custo decorre da entrega de placas de aço de



melhor qualidade a um cliente que detinha especificações mais baixas, visto que seu pedido foi agrupado com o pedido de um cliente com especificações mais elevadas.

E, por último, ocorre o processo de lingotamento contínuo, onde o aço refinado é vazado a partir de um distribuidor até o molde, que faz parte da máquina de lingotamento contínuo. Ainda no molde, o aço já começa a receber um resfriamento a base de água, e, a medida que avança na linha de produção, vai de encontro aos rolos, que o transforma em placas. Em seguida, essas placas são cortadas nas especificações desejadas pelos clientes.

As placas de mistura são geradas quando as corridas sequenciadas no lingotamento contínuo possuem aços de diferentes padrões. Essas placas de mistura podem acarretar um custo para a produção da organização, uma vez que ou são descartadas como sucata, ou são vendidas como subproduto a um valor mais baixo. Com o intuito de não gerar as placas de mistura caso estejam sendo processados dois aços de composições diferentes em sequência, é possível fazer um *setup*, onde troca-se o material refratário que reveste o distribuidor da máquina de lingotamento contínuo.

Existe um *trade-off* entre a realização do *setup* ou a geração de placa de mistura, uma vez que existem custos tanto no processo de parada da produção para a troca do material refratário quanto na geração da placa, já que essa é aproveitada apenas como sucata ou subproduto do processo. Deve-se ter em mente, também, que o material refratário possui um tempo de vida útil, devendo ser obrigatoriamente trocado após o processamento de certa quantidade de placas. É nessa difícil decisão que se enquadrou o presente estudo, visto que os sistemas computacionais desenvolvidos tiveram como objetivo determinar o melhor agrupamento de pedidos dentro das placas e o melhor sequenciamento destas a fim de se minimizar os custos dispendidos com *setup*, geração de placa de mistura, *upgrade*, estoque e atraso.

É possível dizer que o processo de lingotamento contínuo revolucionou a etapa de solidificação do aço, visto que anteriormente utilizava-se o processo de lingotamento convencional, onde o aço era derramado diretamente nos moldes e aguardava ali até a sua solidificação. Bretas (2013) ressalta que com a adoção do processo de lingotamento contínuo foi possível alcançar maior rendimento, produtividade, qualidade e eficiência de custos, além da geração de produtos mais padronizados e com custos mais baixos. De acordo com o Instituto Aço Brasil a produção de aço bruto por processo de lingotamento em 2019 foi de 32,515 milhões de toneladas, sendo 598 mil toneladas por lingotamento convencional e 31,917 milhões de toneladas por lingotamento

contínuo. A Tabela 1 apresenta os dados referentes a produção de aço bruto por processo de aciaria e lingotamento para o terceiro trimestre de 2020.

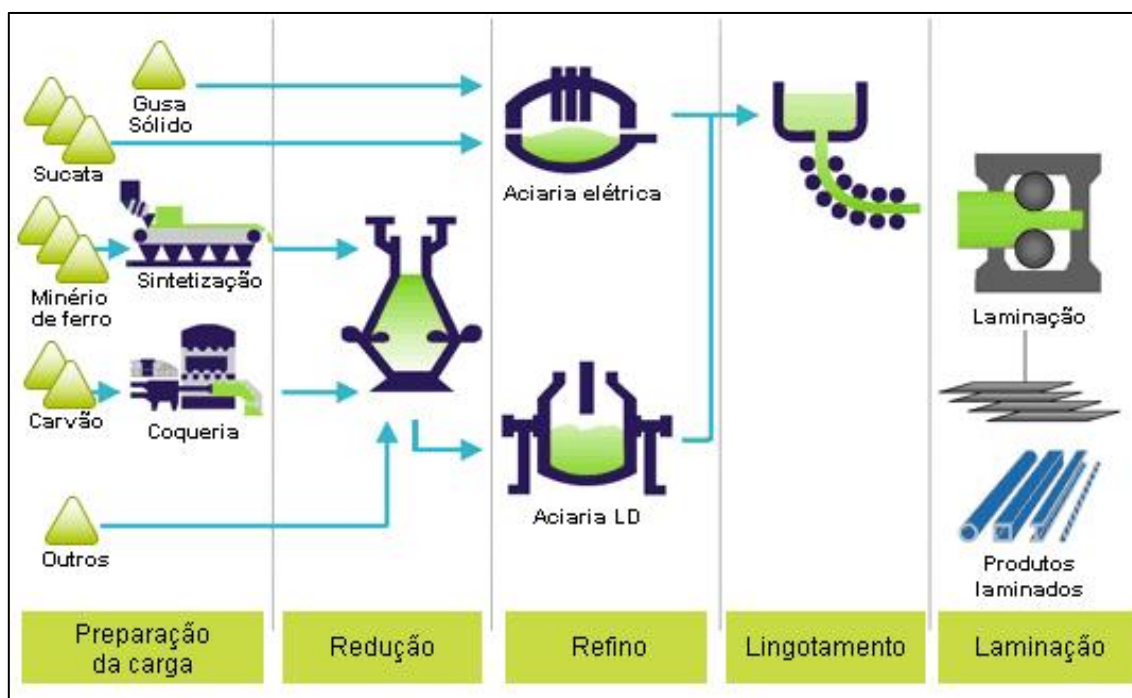
Tabela 1 - Produção de aço bruto por processo de aciaria e lingotamento (Unid.: 10<sup>3</sup> t)

Produto	3º Trimestre			Acumulado até o Trimestre			Participação 2020 (%)
	Julho	Agosto	Setembro	2020	2019	(%)	
<b>Aciaria</b>							
Oxigênio (LD)	1.931,10	2.078,40	1.921,00	17.124,20	18.984,70	-9,8	76,6
Elétrico	638,8	626,8	670,6	5.222,50	5.775,20	-9,6	23,4
<b>Total</b>	<b>2.570,00</b>	<b>2.705,10</b>	<b>2.591,70</b>	<b>22.346,70</b>	<b>24.759,90</b>	<b>-9,7</b>	<b>100</b>
<b>Lingotamento</b>							
Convencional	33,2	38,9	55,8	374,6	484,4	-22,7	1,7
Contínuo	2.532,40	2.662,10	2.531,30	21.942,20	24.230,90	-9,4	98,2
<b>Aço para fundição</b>	<b>4,3</b>	<b>4,1</b>	<b>4,5</b>	<b>29,9</b>	<b>44,6</b>	<b>-32,9</b>	<b>0,1</b>

Fonte: Instituto Aço Brasil

As usinas de aço classificam-se de acordo com seu processo produtivo em usinas integradas e usinas semi-integradas. As usinas integradas realizam todo o processo de fabricação do aço, desempenhando as fases de redução, refino e laminação. Já as usinas semi-integradas compram o ferro gusa já pronto de terceiros, realizando apenas as etapas de refino, transformando-o em aço, e laminação. A Figura 1 exemplifica o processo simplificado de produção do aço em uma usina integrada, como explanado anteriormente.

Figura 1 - Processo simplificado da produção de aço em uma usina integrada



Fonte: Instituto Aço Brasil

O aço é um produto altamente comercializado e se faz presente em praticamente todos os setores, representando cerca de 90% de todos os metais consumidos pelo ramo industrial. Como exemplo pode-se citar sua utilização no setor de transporte, estando presente em carros, caminhões, metrô e navios; no setor de energia, compondo as torres de transmissão, cabos elétricos, tubulações, dentre outros; e na construção civil, sendo matéria prima para vigas e estruturas, por exemplo. Segundo o Instituto Aço Brasil em 2019 a produção mundial de aço bruto foi de 1.875 milhões de toneladas, sendo o Brasil o nono maior produtor, atingindo a marca dos 32,6 milhões de toneladas. A Tabela 2 apresenta os dados da estatística da produção siderúrgica brasileira do terceiro trimestre de 2020 publicada pelo instituto.

Tabela 2 - Produção siderúrgica brasileira 3º Trimestre / 2020 (Unid.: 10<sup>3</sup> t)

Produto	3º Trimestre			Acumulado até o Trimestre			Últimos 12 meses
	Julho	Agosto	Setembro	2020	2019	(%)	
Aço Bruto	2.570,00	2.705,10	2.591,70	22.346,70	24.759,90	-9,7	30.155,80
Semiacabados para venda	779	744,9	648	6.566,40	8.279,30	-20,7	9.111,00
Placas	706,1	699	604,2	6.151,40	7.269,00	-15,4	8.465,70
Lingotes, Blocos e Tarugos	73	45,9	43,8	415	1.010,30	-58,9	645,3
Laminados	1.745,10	1.947,50	2.092,10	16.427,90	18.476,30	-11,1	21.901,60
Planos	938,5	1.121,50	1.237,90	9.712,80	11.362,90	-14,5	13.058,30
Longos	806,7	825,9	854,1	6.715,10	7.113,40	-5,6	8.843,40
Ferro-Gusa	1.990,30	2.121,50	1.990,20	17.713,30	19.674,70	-10	24.318,90

Fonte: Instituto Aço Brasil

## 2.2 Problema de sequenciamento da produção

O problema de programação da produção consiste em alocar determinadas tarefas a determinados recursos, especificando a ordem em que tais tarefas serão executadas no recurso disponibilizado e o seu tempo de início e término. A programação da produção deverá levar em conta a quantidade de recursos disponíveis, o tempo de início e término dos clientes internos das operações, o plano mestre de produção dentre outras características do processo em questão. Segundo Pinedo (2008) os recursos podem ser máquinas em uma oficina, pistas de um aeroporto, equipes em um canteiro de obras, dentre outros. Já as tarefas podem ser operações em um processo de produção, decolagens e aterrissagens de um aeroporto e estágios em um projeto de construção, por exemplo.

Ainda de acordo com este autor o objetivo do sequenciamento da produção pode ser a minimização do tempo de conclusão da última tarefa ou pode ser a minimização do número de tarefas concluídas após a suas respectivas datas de vencimento, por exemplo, dependendo, assim, das necessidades da organização. Os problemas de sequenciamento da produção podem

ser classificados em relação ao ambiente operacional no qual se inserem, em: máquina única, máquinas paralelas, *flow shop*, *flow shop* flexível, *job shop* e *job shop* flexível.

O problema de sequenciamento em máquina única (PSMU), como o próprio nome já diz, consiste no sequenciamento de tarefas em um único recurso destinado a esse fim, em uma única máquina, por exemplo. Gomes Júnior (2015) afirma que existem alguns critérios de otimização normalmente adotados para o PSMU e que dentre estes podemos destacar a minimização do tempo necessário para processar todos os *jobs* (*makespan*), a minimização do atraso total, a minimização do tempo de fluxo (*lead time*) médio e a minimização dos custos com antecipação e atraso da produção.

Já para o problema de sequenciamento em máquinas paralelas, Pinedo (2008) destaca que existem três possíveis classificações: máquinas paralelas idênticas, máquinas paralelas com diferentes velocidades e máquinas paralelas não relacionadas. Em máquinas paralelas idênticas existem vários recursos e as tarefas podem ser processadas em qualquer um destes recursos disponíveis, tendo em vista que todos eles possuem o mesmo desempenho e que as tarefas possuem apenas uma operação a ser realizada.

Já em máquinas paralelas com diferentes velocidades, há uma certa quantidade de máquinas em paralelo e cada uma delas possui uma velocidade de processamento, se as máquinas possuem velocidades iguais, voltamos ao tipo de máquina anterior. Para o último caso, o tempo de processamento de cada máquina em paralelo depende de sua velocidade para processar cada tarefa em específico, não existindo relação entre os tempos de processamento de cada máquina.

Por sua vez, o problema de sequenciamento em um ambiente *flow shop*, consiste na existência de máquinas em série, onde cada tarefa deve ser processada em cada uma das máquinas, seguindo a mesma sequência/fluxo de processamento. Após a conclusão em uma máquina, a tarefa entra na fila da próxima máquina. Segundo Pinedo (2008) o ambiente *flow shop* flexível é uma generalização do *flow shop*, sendo que agora as máquinas se encontram em paralelo. Nesse caso existem centros de trabalho, cada um deles equipados com a mesma quantidade de máquinas idênticas em paralelo, e cada tarefa deve ser processada primeiro no centro de trabalho um, depois no dois, e assim por diante.

Já no sistema *job shop* cada tarefa possui uma sequência pré-determinada de máquinas nas quais precisam ser processadas, não havendo a necessidade de processamento em todas as máquinas existentes e podendo, ainda, serem processadas mais de uma vez na mesma máquina. Segundo Previero (2016) no *job shop* cada máquina executa uma única operação das tarefas por vez, e o

seu processamento não pode ser interrompido após iniciado. Ainda segundo o autor, no *job shop* flexível, ao contrário do *job shop*, as máquinas possuem múltiplas funções, assim, diferentes máquinas processam uma ou várias operações que compõem cada tarefa.

Devido ao elevado número de combinações possíveis, a programação geralmente torna-se a atividade mais complexa do gerenciamento da produção (SLACK *et al.*, 1996). Dessa forma, visando obter um sequenciamento eficiente da produção, minimizando tanto o *lead time* médio, quanto os custos de atraso e de estoque e o *makespan* do processo, foram surgindo na literatura vários autores que propõe resoluções para os diversos problemas de sequenciamento. Para exemplificar tal afirmativa, na seção 2.3 encontram-se exemplos voltados para a resolução do problema de sequenciamento da aciaria, questão chave do projeto.

### **2.3 Sequenciamento da produção na aciaria**

Para a resolução do problema de sequenciamento na aciaria, atividade gargalo da produção do aço, podem ser utilizados mecanismos computacionais, como os modelos matemáticos, as heurísticas e as meta-heurísticas, para auxiliar no melhor sequenciamento das corridas e séries, desde a produção do aço até a etapa de lingotamento contínuo, setor que dita o ritmo da aciaria.

Existem trabalhos na literatura que fazem uso de algum desses três métodos, ou de uma combinação deles, para solucionar o problema de sequenciamentos das panelas nas aciarias, como exposto a seguir.

Tang *et al.* (2014b) propõem um modelo de programação linear inteira mista e desenvolvem um algoritmo de evolução diferencial para resolver o problema de sequenciamento da produção no setor de lingotamento contínuo. Os autores incorporam ao estudo, imprevistos que podem acontecer durante um dia de produção, classificando-os em imprevistos relacionados aos recursos e imprevistos relacionados ao trabalho. Os resultados obtidos com o algoritmo de evolução diferencial desenvolvido pelos autores demonstraram que este foi eficaz e poderia obter melhores soluções para o problema em comparação com o método manual utilizado na siderúrgica Baosteel.

Gomes Júnior *et al.* (2016) tiveram como objetivo resolver o problema de sequenciamento de panelas no setor de lingotamento contínuo de uma siderúrgica brasileira, e, para isso, apresentam uma heurística baseada na meta-heurística *Simulated Annealing*. Segundo os autores os resultados obtidos foram satisfatórios, pois, para todas as instâncias, a heurística apresentou solução igual ou inferior à apresentada pela empresa e pequenas diferenças

percentuais em relação à solução ótima obtida pela resolução de um modelo de programação linear inteira mista existente na literatura.

De Souza *et al.* (2016) utilizam dois modelos de programação linear inteira mista para solucionar o problema de sequenciamento de placas (corrida). Tais modelos consideram a geração de placas de mistura ou um *setup* entre duas placas consecutivas, e visam minimizar os custos com estes procedimentos. Comparando-se os resultados obtidos na execução dos modelos propostos em pacotes de otimização, com a situação real encontrada na empresa brasileira, fica claro a redução significativa dos custos.

Touil *et al.* (2016) apresentam uma meta-heurística híbrida baseada em algoritmo genético, combinada com *Simulated Annealing* e restrita por uma busca tabu, que visa otimizar o sequenciamento das placas de aço no setor de lingotamento contínuo para maximizar a produção e minimizar o tempo de processamento. Segundo os autores, com a abordagem proposta, foi possível reduzir o tempo de processamento se comparado com o tempo obtido pelo serviço logístico.

Cui e Luo (2017) apresentam um novo modelo matemático não-linear inteiro misto para o problema de escalonamento no processo de lingotamento contínuo na aciaria. Devido à sua complexidade, a abordagem de relaxação Lagrangeana é adotada para resolver esse problema. Relaxando as restrições complicadas, o problema pôde ser decomposto em três subproblemas usando o procedimento côncavo-convexo. Além disso, uma heurística é proposta para construir um cronograma viável usando as informações do problema relaxado.

Long *et al.* (2018) abordam um problema de sequenciamento realístico de *flow shop* híbrido com salto de fase e tempo de processamento ajustável no processo de lingotamento contínuo. Um modelo matemático para este problema foi construído com o objetivo de minimizar o *makespan*, o tempo de espera e o desvio do tempo de processamento de seu tempo de processamento padrão. Para resolver o modelo, propuseram um algoritmo genético aprimorado combinado com uma abordagem de melhoria de qualidade, uma estratégia elitista e uma estratégia de reinício.

#### **2.4 Problema de dimensionamento de lotes**

O problema de dimensionamento de lotes representa, juntamente com o sequenciamento, uma das tarefas mais árduas do planejamento e controle da produção, principalmente do plano mestre de produção. Este, é mais voltado para a operacionalização da produção, e, segundo

Tubino (2007), por ser um processo interativo, envolve todas as áreas que têm um contato direto com o processo de manufatura, como as finanças, o *marketing*, o setor de compras, a área de engenharia, de recursos humanos e de produção.

Ribeiro (2017) afirma que os problemas de dimensionamento de lotes “têm como desafio fornecer um plano de produção que atenda a demanda dos produtos durante um horizonte de planejamento, respeitando os recursos disponíveis e minimizando os custos envolvidos durante um horizonte de planejamento”. Tais custos envolvem aqueles dispendidos com a troca ou limpeza dos maquinários envolvidos no processo, com a geração de sucatas ou produtos refugados, com a manutenção do estoque, com o atendimento das especificações dos clientes, dentre outros.

O problema de dimensionamento de lotes pode ser separado em duas categorias no que diz respeito ao tempo de processamento analisado: modelos *big bucket* e modelos *small bucket*. Segundo Ferreira (2006) os modelos de dimensionamento do tipo *big bucket* possuem períodos de tempo maiores (semanas ou meses) onde vários itens podem ser produzidos, já os do tipo *small bucket*, possuem períodos de tempos menores (turnos ou dias), onde apenas um item é produzido por período.

Já no que tange a dependência dos itens a serem produzidos quanto a fabricação de outros itens, o problema de dimensionamento dos lotes pode ser dividido em monoestágio e multiestágio. O sistema de produção monoestágio se refere a independência dos itens a serem produzidos, ou seja, nenhum item depende da produção de outro item. Por sua vez, o sistema de produção multiestágio caracteriza a produção de itens que dependem da produção de outro item.

Araujo (1999) apresenta um estudo sobre os problemas de dimensionamento de lotes monoestágios com restrição de capacidade, que, segundo o autor, “consistem em determinar as quantidades de itens a serem produzidos em diferentes períodos de tempo, de modo a minimizar a soma dos custos de produção, preparação e estoque”. Para tanto, Araujo (1999) implementou um método heurístico já existente na literatura baseado em relaxação Lagrangeana, no método de otimização do subgradiente e em uma heurística de factibilização, e aplicou mudanças neste método, realizando a comparação entre os resultados.

Além disso, o autor ainda apresenta um método exato que se baseia em um procedimento de enumeração implícita, onde os limitantes inferiores são gerados por relaxação Lagrangeana e o limitante superior inicial por uma heurística. Por fim o autor conclui que as mudanças realizadas no primeiro método apresentado não apresentaram grandes diferenças em relação ao método

original, pois, segundo ele, o processo de factibilização, por si só, já produz uma solução muito boa.

Rocha Júnior *et al.* (2015) propõe um modelo matemático para resolver um problema de dimensionamento de lotes multiestágio com restrição de capacidade em uma indústria de móveis. Para tanto, o autor implementou o modelo no AMPL (*A Mathematical Programming Language*) e o resolveu com o solver CPLEX. O objetivo do estudo era estabelecer uma melhor relação entre os custos de estoque, os custos de preparação e o nível de serviço, e, realizando-se alguns testes computacionais a partir de dados reais fornecidos pela empresa, foi possível perceber que a minimização da função objetivo (minimização dos custos) tem uma relação direta com a capacidade disponível da empresa.

## **2.5 Problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes na aciaria**

Tendo em vista os conceitos dos problemas de dimensionamento e de sequenciamento separadamente, pode-se, agora, agrupá-los em um problema integrado. Segundo Toledo *et al.* (2007), o dimensionamento de lote e a programação da produção, com restrição de capacidade, é um problema de otimização NP - difícil. Segundo Paulo Feofiloff (2021), a complexidade de um problema computacional é o consumo de tempo (como função do tamanho das instâncias) do melhor algoritmo possível para o problema. Ainda segundo o autor, a classe NP (*nondeterministic polynomial*) de problemas é o conjunto dos problemas de decisão que são polinomialmente verificáveis, e um problema é NP-difícil se for no mínimo tão difícil quanto qualquer problema em NP.

Como no problema de sequenciamento, pode-se, também, fazer uso de métodos matemáticos, heurísticas e meta-heurísticas para solucionar o PIDSL. Uma pesquisa na literatura foi realizada e pôde-se encontrar alguns autores que tratam deste tipo de problema e os métodos utilizados por cada um deles.

Tang e Wang (2008) propõem modelos de Programação Linear Inteira Mista e métodos heurísticos para resolver o problema de agrupamento de corridas e de séries em uma siderúrgica chinesa, que resolvia tais problemas de forma manual antes da implantação do sistema proposto pelos autores. O problema de agrupamento das corridas (*Charge Batching Problem*), compreende a junção de pedidos de um, ou de diferentes clientes, em uma panela (corrida), até que ela atinja sua capacidade. Os pedidos a serem agrupados devem respeitar as restrições relacionadas às suas composições químicas e larguras.



O segundo problema apresentado por Tang e Wang (2008) é o problema de agrupamento de séries (*Cast Batching Problem*) que consiste no sequenciamento de corridas dentro de uma série respeitando as restrições de propriedades metalúrgicas e largura das placas. Uma série representa o conjunto de corridas processadas sem interrupção no processo para a troca do distribuidor, assim, espera-se maximizar a utilização deste e minimizar o custo com adequações nas composições químicas do aço. Os autores ressaltam que com a implementação do sistema proposto, o tempo gasto pela empresa para a resolução desses dois problemas diminuiu consideravelmente.

Tang *et al.* (2014a) tratam do problema integrado de agrupamento de corridas e séries com seleção de larguras na Baosteel, uma grande siderúrgica chinesa. Os autores classificam este problema como NP-difícil, propõem um algoritmo baseado em geração de colunas e utilizam um algoritmo *branch-and-price* para a resolução do problema. A siderúrgica Baosteel utilizava um método de planejamento manual que foi substituído pelo algoritmo desenvolvido pelos autores, resultando em uma economia anual de cerca de US\$ 1,6 milhões e um aumento anual na receita de cerca de US\$ 3,25 milhões, além de uma melhor utilização do distribuidor da máquina de lingotamento contínuo.

Gomes Júnior *et al.* (2014) apresentam dois modelos de programação linear inteira mista (PLIM) para resolver o problema de agrupamento de pedidos, um modelo de PLIM para a resolução do problema de sequenciamento de painelas e um modelo de PLIM que integra estes dois tipos de problemas. Tais modelos foram testados com instâncias testes baseadas na situação real de uma empresa siderúrgica brasileira. Segundo os autores os resultados obtidos com os modelos se mostraram satisfatórios, mas ainda se faz necessário a utilização de outros métodos para agilizar a obtenção de uma solução que sejam capazes de resolver instâncias maiores, principalmente em relação ao modelo integrado.

Gomes Júnior (2015) propõe em seu trabalho a utilização de modelos de programação linear inteira mista e heurísticas para resolver, de forma individual e integrada, os problemas de sequenciamento de painelas e agrupamento de pedidos na aciaria de uma empresa siderúrgica brasileira. O trabalho contextualiza de forma clara o ramo siderúrgico e apresenta uma ampla revisão bibliográfica acerca dos temas abordados.

Para a geração dos resultados, o autor utilizou instâncias-testes geradas a partir de relatórios gerenciais cedidos pela empresa. Visando a resolução do problema de sequenciamento de painelas, o autor faz uma analogia com o problema de roteamento de veículos assimétrico para

desenvolver os modelos de programação linear inteira mista e uma analogia com o problema de árvore geradora mínima capacitada para o desenvolvimento da heurística. Já para o problema de agrupamento de pedidos, a heurística incorpora as estratégias *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*.

De acordo com Gomes Júnior (2015) “Com a implantação dos métodos descritos neste trabalho, a empresa ganha: (i) agilidade na determinação do seu plano de produção, (ii) redução dos atrasos nas entregas dos pedidos e (iii) melhor aproveitamento dos seus recursos produtivos”.

Pan (2016) utiliza o algoritmo co-evolutivo cooperativo de Colônia Artificial de Abelhas para tratar de dois subproblemas do processo de fabricação de aço. O primeiro subproblema trata do escalonamento de corridas na etapa de fabricação e refino do aço e o segundo subproblema consiste no agrupamento de séries de corridas na etapa de lingotamento contínuo. De acordo com o autor, pode-se perceber que o algoritmo proposto, especialmente combinado com técnicas aprimoradas, foi eficaz na solução do problema no processo de lingotamento contínuo da fabricação de aço.

Mori e Mahalec (2017) propõem um algoritmo de dois níveis para resolver os problemas no setor de lingotamento contínuo. No nível superior do algoritmo, desenvolvem um modelo linear inteiro misto relaxado, que não leva em consideração a geração de placas de mistura, para determinar o número de placas por grau para cada período de planejamento. Já no nível inferior, empregam-se meta-heurísticas visando otimizar o sequenciamento de placas em séries, considerando as penalidades de sequência na máquina de lingotamento contínuo.

Conforme o exposto, verificou-se que em relação aos problemas apresentados anteriormente, os que mais se assemelham ao problema tratado neste trabalho, são os problemas propostos por Gomes Júnior (2015), Tang e Wang (2008) e Tang *et al.* (2014a). Assim, fez-se o uso de duas meta-heurísticas para a resolução do PIDSL em uma indústria siderúrgica a fim de comparar-se os resultados obtidos por elas e pelo modelo de PLIM proposto por Gomes Júnior (2015). Primeiramente desenvolveu-se a meta-heurística VNS e posteriormente a meta-heurística ILS, ambas descritas na sessão seguinte.

## **2.6 Meta-heurísticas**

Os modelos heurísticos utilizam procedimentos para solucionar problemas de grande porte, sem, necessariamente, encontrar a solução ótima. De acordo com Hillier e Lieberman (2006) “um método heurístico bem-elaborado geralmente é capaz de fornecer uma solução que se

encontra pelo menos próxima da ótima (ou concluir que tais soluções na realidade não existem)”. Por sua vez, as meta-heurísticas, de acordo com Glover e Kochenberger (2003), em sua definição original, são métodos de solução que coordenam procedimentos de busca locais com estratégias de mais alto nível para criar um processo capaz de escapar de mínimos locais e realizar uma busca robusta no espaço de soluções de um problema.

A meta-heurística VNS (*Variable Neighborhood Search*) ou Busca em Vizinhança Variável foi originalmente proposta no final da década de 90 por Mladenovic e Hansen (1997). Esta meta-heurística realiza perturbações sistêmicas na solução  $s$  corrente, fazendo isso a partir de estruturas de vizinhanças  $N^{(k)}(s)$  definidas com base nas necessidades do problema em questão.

Após o processo de perturbação, se a solução encontrada ( $s''$ : solução ótima local) for melhor que a solução atual ( $s$ : solução corrente), adota-se essa nova solução e o processo de buscas é reiniciado ( $N^{(1)}(s)$ ). Se a nova solução não for melhor que a solução corrente, o algoritmo prossegue a busca a partir da próxima estrutura de vizinhança ( $N^{(k+1)}(s)$ ). O procedimento é encerrado quando todas as estruturas de vizinhança tiverem sido percorridas ou quando o critério de parada estabelecido for atingido. A Figura 2 apresenta o pseudocódigo do algoritmo. A solução  $s'$  é gerada aleatoriamente no passo 7 para evitar ciclagem, situação que pode ocorrer se alguma regra determinística for usada.

Segundo Hansen e Mladenović (1997), a principal ideia da meta-heurística VNS é escapar de ótimos locais, e isso se dá através da exploração do espaço de soluções por meio de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhança. Dessa forma, para escapar dos ótimos locais, assim que uma solução corrente é substituída, retorna-se a uma estrutura de vizinhança escolhida a partir das características do problema. De acordo com Fidelis (2017) “este passo de reinício é chamado de *shaking* e é realizado utilizando diferentes vizinhanças de tamanhos crescente”.

Festa (2016) afirma que ao contrário de muitas meta-heurísticas baseadas em busca local, o VNS não permite a piora da função objetivo para realizar um movimento, apenas explora, a partir de uma solução inicial, uma sequência crescente de estruturas de vizinhanças, realizando movimentos até uma nova solução apenas se esta for melhor que a solução corrente.

Figura 2 – Pseudocódigo VNS

```

Procedimento VNS ()
1 Seja  $s_0$  uma solução inicial.
2 Seja  $r$  o número de estruturas diferentes de vizinhança;
3  $s \leftarrow s_0$ ; {Solução corrente}
4 Enquanto (Critério de parada não for satisfeito) Faça
5    $k \leftarrow 1$ ; {Tipo de estrutura de vizinhança corrente}
6   Enquanto ( $k \leq r$ ) Faça
7     Gere um vizinho qualquer  $s' \in N^{(k)}(s)$ ;
8      $s'' \leftarrow$  BuscaLocal( $s$ );
9     Se ( $f(s'') < f(s)$ ) então
10       $s \leftarrow s''$ ;
11       $k \leftarrow 1$ ;
12     Senão
13        $k \leftarrow k + 1$ ;
14     Fim Se;
15   Fim Enquanto;
16 Fim Enquanto;
17 Retorne  $s$ ;
Fim VNS;

```

Fonte: Souza (2011)

Já a meta-heurística ILS (*Iterated Local Search*) ou Busca Local Iterativa realiza perturbações na solução corrente com o intuito de gerar novas soluções de partida para o procedimento de busca local, tornando-se possível escapar do ótimo local e permitindo a exploração de diferentes regiões do espaço de soluções. Ela é composta basicamente por quatro procedimentos: geração da solução inicial, busca local, perturbação e critério de aceitação.

No primeiro momento, uma solução inicial  $s_0$  é gerada para o problema, em seguida, realiza-se a busca local, que retorna uma solução melhorada  $s$ . Enquanto o critério de parada estabelecido não for satisfeito, ocorre a perturbação, que modifica a solução corrente  $s$  e cria uma solução intermediária  $s'$ , e aplica-se o critério de aceitação, que define de qual solução partirá a próxima perturbação. Vale ressaltar que a perturbação deve ser forte o suficiente para escapar de um ótimo local e fraca o suficiente para preservar as características da solução corrente. A Figura 3 apresenta o pseudocódigo do algoritmo.

Segundo Souza (2011), o desempenho do ILS no que diz respeito à qualidade da solução final e a velocidade de convergência depende fortemente do método de busca local escolhido. Normalmente utiliza-se um método de descida / subida, mas também é possível aplicar algoritmos como Busca Tabu ou outras meta-heurísticas.

Ainda de acordo com Souza (2011), o critério de aceitação e a perturbação aplicada guiam a meta-heurística aos procedimentos de intensificação ou diversificação. “A intensificação consiste em permanecer na região do espaço onde a busca se encontra, procurando explorá-la de forma mais efetiva; enquanto a diversificação consiste em se deslocar para outras regiões do espaço de soluções.”

Figura 3 - Pseudocódigo ILS

<p><b>Procedimento ILS ()</b>  1 <math>s_0 \leftarrow \text{Gera Solução Inicial } ();</math>  2 <math>s \leftarrow \text{Realiza Busca Local } (s_0);</math>  3 <b>Enquanto</b> (Critérios de parada não estiverem satisfeitos) <b>Faça</b>  4     <math>s' \leftarrow \text{Perturbação } (\text{histórico}; s);</math>  5     <math>s'' \leftarrow \text{Busca Local } (s');</math>  6     <math>s \leftarrow \text{Critério de Aceitação } (s, s'', \text{histórico});</math>  7 <b>Fim Enquanto</b>;  <b>Fim ILS</b>;</p>
--

Fonte: Souza (2011)

## 2.7 Modelo matemático para o PIDSL

Os modelos matemáticos utilizam algoritmos para encontrarem uma solução ótima para o problema, exigindo, porém, um grande tempo de processamento e/ou de memória computacional devido a quantidade significativa de variáveis e restrições dos problemas. Segundo Arenales *et al.* (2011) “o modelo matemático é uma representação simplificada (abstração) do problema real. Ele deve ser suficientemente detalhado para captar elementos essenciais do problema, mas suficientemente tratável por métodos de resolução”.

O modelo de programação linear inteira mista (PLIM) proposto por Gomes Júnior (2015) foi utilizado como base para a construção e para a validação dos algoritmos. Tal validação fez-se através da comparação de seus resultados com os resultados obtidos pelos métodos implementados. O modelo de PLIM proposto por Gomes Júnior (2015) possui os seguintes parâmetros:

Sendo  $T = \{1, \dots, nt\}$  o conjunto de períodos,  $I = \{1, \dots, np\}$  o conjunto de pedidos,  $w_i$  a quantidade (em toneladas) de aço do pedido  $i$ ,  $q^t$  o tempo máximo disponível para o processamento das painéis no período  $t$ ,  $G_{max}$  a quantidade máxima de aço (em toneladas) que pode ser alocada a uma painela,  $G_{min}$  a quantidade mínima de aço (em toneladas) que deve ser alocada a uma painela e  $r_t$  a quantidade máxima de tempo que um período  $t$  pode utilizar de algum outro período  $t + 1$ .

Além disso,  $l_i^t$  é o custo de atrasar a entrega do pedido  $i$  para o período  $t$ ,  $e_i^t$  é o custo de manutenção de estoque do pedido  $i$  no período  $t$  (custo de adiantar o processamento do pedido),  $L_i$  é o custo incorrido pelo atraso na entrega completa do pedido  $i$ ,  $pr_i$  é o tempo necessário para o processamento de uma panela com a composição química predominante do pedido  $i$ ,  $vp_i$  é o custo de *upgrade* quando os pedidos  $p$  e  $i$  são agrupados em uma mesma panela, sendo que o pedido  $i$  passará a ter todas as características do pedido  $p$ , pois este tem qualidade superior e

$$a_{pi} = \begin{cases} 1, & \text{se os pedidos } i \text{ e } p \text{ possuem composição química e largura compatíveis} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Além das variáveis descritas anteriormente, tem-se, ainda, as seguintes variáveis de decisão:

$$\tau_i^t = \begin{cases} 1, & \text{se o pedido } i \text{ não foi completado até o período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$z_p^t = \begin{cases} 1, & \text{se é formada uma panela com as mesmas características do pedido } p \\ & \text{no período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$x_{ij}^t = \begin{cases} 1, & \text{se o pedido } j \text{ é sequenciado logo após o pedido } i \text{ no período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$\Phi_{ij}^t$  = fluxo de tempo enviado do nó que representa o pedido  $i$  para o nó que representa o pedido  $j$  no período  $t$  (variável auxiliar).

$y_{pi}^t$  = fração do pedido  $i$  que será processado na panela com características predominantes do pedido  $p$ , no período  $t$ .

$F^t$  = variável livre que representa a quantidade de tempo que sobrou ou que foi utilizada a mais no período  $t$ .

$$\min \sum_{p \in P} \sum_{i \in I | a_{pi}=1} \sum_{t \in T} (v_{pi}y_{pi}^t + e_i^t y_{pi}^t) + \sum_{i \in I} L_i + \sum_{t \in T} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij}^t \quad (1)$$

s. à:

$$\sum_{p \in P | a_{pi}=1} \sum_{t \in T} y_{pi}^t \leq 1 \quad \forall_i \in P \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I | a_{pi}=1} w_i y_{pi}^t - G_{\max} z_p^t \leq 0 \quad \forall_p \in P, \forall_t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{i \in P \mid a_{pi}=1} w_i y_{pi}^t - G_{\min} z_p^t \geq 0 \quad \forall_p \in P, \forall_t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P} (pr_p) z_p^t + \left( \sum_{p \in P} x_{0p}^t \right) s + F^t - F^{t-1} = q^t \quad \forall_t \in T \quad (5)$$

$$\tau_i^t + \sum_{u=1}^t \sum_{p \in P \mid a_{pi}=1} y_{pi}^u \geq 1 \quad \forall_i \in P, t \in T \quad (6)$$

$$L_i - \tau_i^t l_i^{t+1} \geq 0 \quad \forall_i \in P, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ik}^t - z_k^t = 0 \quad \forall_k \in P, \forall_t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{kj}^t - z_k^t = 0 \quad \forall_k \in P, \forall_t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t \in T} x_{0j}^t - \sum_{i=1}^n \sum_{t \in T} x_{i0}^t = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{i=0}^n \Phi_{ik}^t - \sum_{j=0}^n \Phi_{kj}^t - pr_k(z_k^t) = 0 \quad \forall_k \in P, \forall_t \in T \quad (11)$$

$$\Phi_{ij}^t - l \cdot x_{ij}^t \leq 0 \quad \forall_{i,j} = 0, \dots, n, \forall_t \in T \quad (12)$$

$$x_{ij}^t \leq b_{ij} \quad \forall_{i,j} = 1, \dots, n, \forall_t \in T \quad (13)$$

$$y_{pi}^t, L_i \geq 0 \quad \forall_{p,i} \in P, \forall_t \in T \quad (14)$$

$$z_p^t \geq 0 \quad \forall_p \in P, \forall_t \in T \quad (15)$$

$$\tau_i^t \in \{0, 1\} \quad \forall_i \in P, \forall_t \in T \quad (16)$$

$$x_{ij}^t \in \{0, 1\} \quad \forall_{i,j} = 0, \dots, n, \forall_t \in T \quad (17)$$

$$\Phi_{ij}^t \geq 0 \quad \forall_{i,j} = 0, \dots, n, \forall_t \in T \quad (18)$$

$$F^t \in \mathbb{R} \quad \forall_t \in T \quad (19)$$

$$F^t \geq -r_t \quad \forall_t \in T \quad (20)$$

Dessa maneira, a função objetivo do modelo de programação linear inteira mista, representada pela equação (1), busca minimizar os custos de agrupamentos de pedidos em uma mesma panela, os custos de atraso e de estoque, os custos com geração de placas de mistura e os custos de *setups*. As restrições (2) garantem que o somatório das parcelas do pedido  $i$  entregues não seja superior a 1. As restrições (3) garantem que a capacidade máxima da panela não seja ultrapassada no que tange ao peso dos pedidos agrupados na mesma. Já as restrições (4) garantem que cada panela formada deve conter uma quantidade mínima de aço.

As restrições (5) garantem que o tempo de processamento das painelas sequenciadas em um período  $t$  mais o tempo utilizado para realização de *setups* não ultrapasse a quantidade máxima de tempo definida para aquele período. As restrições (6) definem em qual período o pedido  $i$  foi completamente finalizado. As restrições (7) definem o valor do custo de atraso associado a entrega completa do pedido  $i$ . As restrições (8) e (9) garantem que se a panela é feita em um determinado período  $t$ , ela terá somente uma panela sucessora e uma panela antecessora, respectivamente.

As restrições (10) garantem que o número de arcos que saem do nó central e o número de arcos que chegam ao nó central sejam os mesmos. As restrições (11) garantem que, em cada período, o tempo de processamento da panela  $k$  é igual ao fluxo de tempo que chega no nó  $k$  menos o fluxo de tempo que sai deste mesmo nó. Segundo Gomes Júnior (2015) “Tais restrições somente são válidas se o pedido  $k$  for definido para o período, caso contrário, o fluxo de tempo que chega no nó  $k$  menos o fluxo de tempo que sai deste mesmo nó deve ser igual 0”. As restrições (12) garantem que o tempo total de cada período não seja superior ao tempo máximo permitido entre dois *setups* consecutivos. As restrições (13) a (20) definem o domínio das variáveis.



### 3. Materiais e métodos

As meta-heurísticas VNS e ILS desenvolvidas para a resolução do PIDSL, foram implementadas em linguagem C, e, para isso, foi utilizado um computador Intel(R) Core(TM) i5-4210U CPU @ 1.70GHz com 4,0 GB de memória RAM. A construção da meta-heurística VNS foi realizada em cinco etapas, sendo elas: leitura dos dados iniciais, geração aleatória da solução inicial, cálculo da função objetivo, construção de quatro estruturas de vizinhança e estruturação do VNS. Já a construção da meta-heurística ILS foi realizada em seis etapas: leitura dos dados iniciais, geração da solução inicial, cálculo da função objetivo, utilização das estruturas de vizinhança que compõe a busca local, perturbação e definição do critério de aceitação.

A primeira etapa de ambos os métodos (leitura dos dados iniciais) foi realizada a partir de instâncias disponibilizadas por Gomes Júnior (2015). Tais instâncias possuem: a quantidade de períodos em que os pedidos deveriam ser alocados, a quantidade de pedidos a serem alocados, o número de padrões de aço, a capacidade máxima e mínima das painéis, o tempo máximo de processamento entre dois *setups*, o tempo e o custo da realização de *setups*, a quantidade de painéis e o tempo de processamento disponível para cada período, o peso (em toneladas) de cada pedido e o tempo de processamento de cada padrão. Além disso, as instâncias possuem, ainda, matrizes com o custo de atraso e de estoque, com o custo de agrupamentos de pedidos em uma painél de determinado padrão e com o custo de sequenciamento das painéis de acordo com o padrão que cada uma possui.

Para a realização da segunda etapa das meta-heurísticas foram consideradas as restrições do problema a fim de que fossem geradas soluções viáveis. Capacidade de peso das painéis, tempo de processamento entre dois *setups* consecutivos, período de processamento de cada pedido e compatibilidade entre pedidos e padrões foram algumas das restrições impostas à geração das soluções iniciais de cada um dos métodos. A Figura 4 representa, como exemplo, uma solução para a instância IAP001, que possui 20 pedidos (numerados de 1 a 20), 7 possibilidades de padrões (numerados de 1 a 7) e 2 períodos (numerados de 1 a 2) para o processamento total dos pedidos. Para a representação dos padrões das painéis adotou-se  $(-1) * \text{número do padrão}$  para que ele não se confunda com os números dos pedidos. Já para a representação dos *setups* adotou-se  $(-1) * (\text{número de padrões} + 1)$ , que no caso da IAP001 resultou em  $(-1) * (7 + 1) = -8$ . Tal forma de representação da solução do problema foi utilizada para todas as instâncias em ambos os métodos.

Figura 4 - Representação esquemática da solução do problema

-2	3	4	-2	1	2	-8	-5	9	10	-5	8	7	-3	6	5	-8
-5	19	20	-5	17	18	-8	-7	13	14	-7	15	12	-6	11	16	-8

Fonte: Autores

### 3.1 Meta-heurística VNS

A geração das soluções iniciais da meta-heurística VNS deu-se de forma aleatória através do sorteio do primeiro pedido de cada panela de acordo com sementes geradas a partir da data e hora computacional. Após a inserção viável, respeitando-se todas as restrições impostas ao problema, dos pedidos da instância dentro de painéis, a solução inicial é submetida ao cálculo de sua função de avaliação, que compreende o somatório do custo de *upgrade*, do custo de geração de placa de mistura, do custo de atraso na realização dos pedidos, do custo de manutenção de estoque de pedidos realizados antes da data de entrega, do custo de realização de *setup* para a troca do distribuidor e do custo de penalização das painéis que estiverem com o seu peso fora dos limites de capacidade.

Na quarta etapa do método construiu-se quatro estruturas a fim de se propor melhoras na solução inicial e reduzir os custos. A primeira foi chamada de realocação de painéis, e teve como objetivo a realocação das painéis em todas as posições possíveis para que se reduzissem os custos com geração de placas de mistura e com a realização de *setups*. A segunda estrutura de vizinhança, denominada realocação interna de pedidos, realoca, um pedido por vez, em todas as posições dentro de sua panela de origem. Para tanto, se faz possível a troca do padrão de cada panela quando a realocação interna do pedido e a troca do padrão geram uma solução viável e reduz o custo final. Já a terceira estrutura foi construída com base na realocação externa dos pedidos. Dessa vez, cada pedido pode ser alocado em todas as posições da lista, e não somente dentro de sua panela. Visando a geração de soluções viáveis e a redução dos custos do processo, nessa busca também é permitida a troca dos padrões das painéis. E, por fim, construiu-se a quarta estrutura de vizinhança, denominada de troca externa de pedidos. Nesta estrutura os pedidos não são apenas inseridos em outras posições da lista, como nas buscas anteriores, mas são trocados com os pedidos de todas as posições viáveis. Por exemplo, se iremos trocar o pedido da posição dois com o pedido da posição oito, o pedido da posição dois passa a ocupar a posição oito e o pedido da posição oito passa a ocupar a posição dois. Nessa

estrutura não é realizada a troca dos padrões, assim, os pedidos só podem ser trocados com pedidos cujas panelas possuem padrões compatíveis.

Figura 5 - Realocação de panelas



Fonte: Autores

Figura 6 - Realocação interna de pedidos



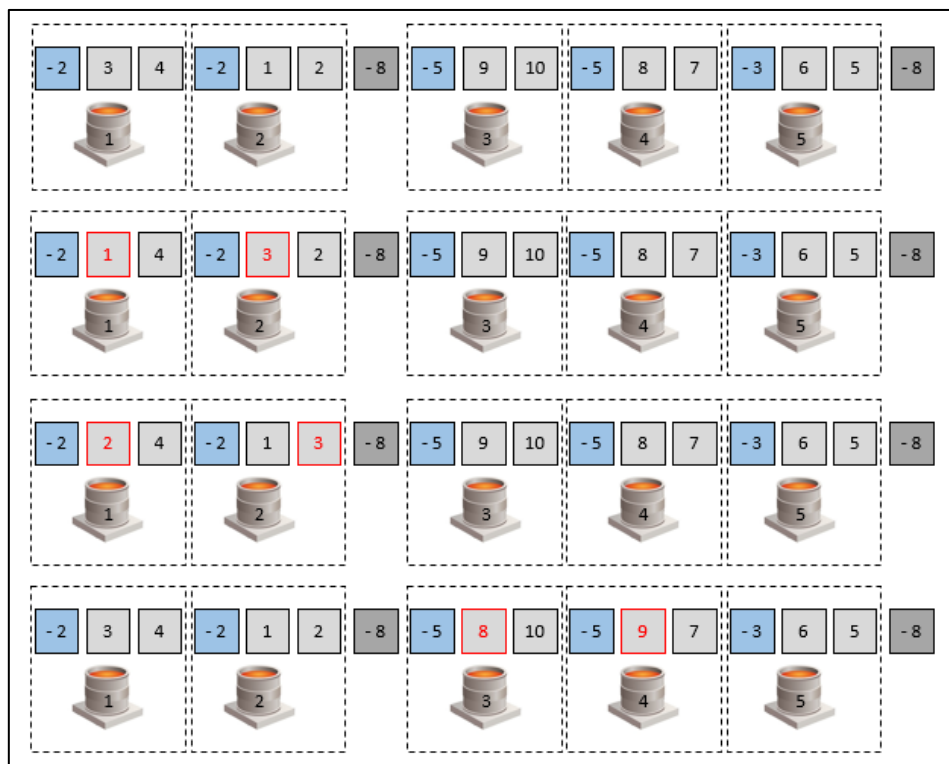
Fonte: Autores

Figura 7 - Realocação externa de pedidos



Fonte: Autores

Figura 8 - Troca externa de pedidos



Fonte: Autores

Após a construção das quatro estruturas de vizinhança, realizou-se a estruturação do VNS a partir do método de primeira de melhora, ou seja, assim que a solução ótima local for melhor que a melhor solução encontrada até o momento, atualiza-se a solução corrente e reinicia-se as estruturas de vizinhanças. Dessa forma, ao se realizar uma perturbação na solução corrente e a solução encontrada for melhor, o processo de buscas é reiniciado a partir da primeira estrutura de vizinhança. Se a solução encontrada for pior, o algoritmo prossegue a busca a partir da próxima estrutura de vizinhança. O processo segue assim até que sejam realizadas buscas em todas as estruturas de vizinhança e nenhuma melhora seja encontrada, resultando, assim, na solução final do problema.

### 3.2 Meta-heurística ILS

Já para a realização da segunda etapa da meta-heurística ILS considerou-se as restrições do problema a fim de que fossem geradas solução viáveis. De início foi realizada a geração de uma solução inicial aleatória, através do sorteio do primeiro pedido de cada panela. Porém, buscando-se um aperfeiçoamento do desempenho da meta-heurística, os resultados posteriores foram obtidos a partir de uma solução inicial gerada de acordo com o peso dos pedidos da instância. Para tanto, o procedimento agrupa os pedidos que devem ser realizados no período em vigência, e os ordena, de forma decrescente, de acordo com seu peso. Assim, as painelas geradas na solução inicial já possuem uma melhor utilização de sua capacidade e os pedidos já são alocados dentro de suas painelas de maneira mais ordenada.

Em seguida, a solução inicial segue para a estrutura de cálculo da função de avaliação, contendo o somatório do custo de geração de placa de mistura, de realização de *setup*, de *upgrade*, de atraso e de estoque, e da penalização para as painelas que estiverem com o seu peso abaixo ou acima dos limites estabelecidos de capacidade.

A quarta etapa é a estruturação da busca local, composta por três estruturas de vizinhança. Essas estruturas foram as mesmas utilizadas para a meta-heurística VNS, com exceção da realocação externa de pedidos, que devido ao aperfeiçoamento do código do ILS e, assim, as soluções iniciais não serem mais geradas de forma aleatória, não apresenta melhoras para a solução corrente. Assim, a primeira estrutura de vizinhança foi a realocação de painelas, a segunda a realocação interna e, por fim, a troca externa de pedidos.

Inicialmente, o critério de parada estabelecido para o ILS foi a quantidade de iterações consecutivas realizadas sem melhora da solução ótima local igual a quantidade de padrões de cada instância. Dessa forma, o procedimento se inicia com o critério de parada igual a 0, a cada

iteração realizada sem melhora esse valor sofre o acréscimo de uma unidade, e a cada iteração com melhora da solução o valor zera novamente. Assim, quando a quantidade de iterações consecutivas sem melhora atinge a quantidade de padrões da instância ocorre o fim do ILS.

Enquanto o critério de parada não for satisfeito inicia-se uma sequência de procedimentos dentro do método. Primeiramente é realizada a perturbação, um processo que a cada iteração sofre um aumento em seu nível. Neste trabalho, a perturbação escolhida foi a estrutura de realocação de painelas, assim, a cada iteração mais uma panela sofre uma realocação. O nível de perturbação inicial estabelecido primeiramente, foi 1 para todas as instâncias. Assim, na primeira perturbação é realizada a realocação de uma panela, na segunda perturbação são realocadas duas painelas, e assim por diante.

Posteriormente, para determinar o valor do critério de parada e o nível de perturbação inicial do método de forma mais assertiva foi utilizado o *Iterated Race* (IRACE), um pacote da linguagem R que realiza a configuração automática de algoritmos com o intuito de encontrar os valores de determinados parâmetros e melhorar o seu desempenho. O IRACE parte de um conjunto de possíveis valores, realizando diversas combinações entre eles até encontrar a configuração que otimize o desempenho das instâncias.

López-Ibáñez *et al.* (2011), descrevem um pacote IRACE que implementa um procedimento geral de corrida iterada. A corrida iterada é um método de configuração automática e consiste em três etapas que se repetem até que um critério de parada seja atendido: (1) amostragem de novas configurações de acordo com uma distribuição particular, (2) seleção das melhores configurações dos recém-amostrados por meio de corrida, e (3) atualização da distribuição de amostragem a fim de direcioná-la para as melhores configurações.

Para a meta-heurística ILS aqui proposta, o IRACE partiu de um conjunto de possíveis valores para cada um dos parâmetros determinados, sendo eles: Critério de parada = (10, 15, 20, 25, 30, 35) e Nível de perturbação inicial = (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10). Com isso, chegou-se em 3 combinações de valores para os parâmetros: (1) Critério de parada = 30 e o Nível de perturbação inicial = 3, (2) Critério de parada = 20 e o Nível de perturbação inicial = 6, (3) Critério de parada = 15 e o Nível de perturbação inicial = 7. Escolheu-se a segunda opção e, assim, enquanto o critério de parada não for satisfeito, ou seja, enquanto a quantidade de iterações consecutivas realizadas sem melhora na solução ótima local for menor que 20, inicia-se uma sequência de procedimentos. Como dito anteriormente, primeiramente é realizada a perturbação, que com a utilização do IRACE passou a ter seu nível inicial igual a 6, assim, na primeira perturbação é

realizada a realocação de seis painéis, na segunda perturbação, ou seja, na segunda iteração, são realocadas sete painéis, e assim por diante.

Na sequência, após o mecanismo de perturbação, realiza-se mais uma vez a busca local e, logo em seguida, é feita a análise da solução a partir do critério de aceitação, que neste caso foi a função de avaliação, composta pela função objetivo e pela penalização por peso da célula. Assim, se a função de avaliação gerada for menor que a função de avaliação da solução corrente, esta solução é aceita e o programa a utiliza para realizar a próxima perturbação. Quando o critério de parada é satisfeito ocorre o fim do ILS, e, assim, é gerada uma lista com todos os pedidos da instância dentro de suas respectivas células. Essa lista também é composta pelo padrão de aço de cada célula e pelos *setups* realizados dentro do sequenciamento da produção.

Após a criação das duas meta-heurísticas explanadas anteriormente e a geração de soluções viáveis para 30 instâncias com ambos os métodos, foi realizada a comparação e validação dos resultados com os resultados obtidos pelo modelo de PLIM proposto por Gomes Júnior (2015).

#### 4. Resultados e discussões

As instâncias utilizadas no trabalho foram rodadas 20 vezes para cada meta-heurística no computador AMD Ryzen 7 1800X Eight-Core Processor 3.60 GHz com 48,0 GB de memória RAM, e o melhor resultado encontrado para cada uma delas, assim como o tempo computacional despendido, encontra-se na Tabela 3. Cabe ressaltar que foi estipulado um tempo máximo de uma hora para cada rodada, assim, quando a resolução de uma instância atinge o tempo de processamento de uma hora, o método conclui a iteração em que se encontra e finaliza. Na Tabela 3 temos que:

Instância = nome da instância

Nº Pedidos = quantidade de pedidos

Nº Padrões = quantidade de padrões

Nº Períodos = quantidade de períodos

Melhor solução VNS (A) = Melhor solução encontrada com a meta-heurística VNS

Melhor solução ILS (sol. Inicial aleatória) (B) = Melhor solução encontrada com a meta-heurística ILS (geração da solução inicial de forma aleatória)

Melhor solução ILS (C) = Melhor solução encontrada com a meta-heurística ILS (geração ordenada da solução inicial, critério de parada igual a quantidade de padrões da instância e nível de perturbação inicial igual a 1)

Melhor solução ILS com IRACE (D) = Melhor solução encontrada com a meta-heurística ILS (geração ordenada da solução inicial, critério de parada igual a 20 e nível de perturbação inicial igual a 6)

Solução ótima (MPLIM) (E) = Solução ótima encontrada com o modelo de PLIM

VNS (A) = tempo gasto para encontrar a melhor solução com a meta-heurística VNS

ILS (B) = tempo gasto para encontrar a melhor solução com a meta-heurística ILS (sol. Inicial aleatória) (B)

ILS (C) = tempo gasto para encontrar a melhor solução com a meta-heurística ILS (C)

ILS (D) = tempo gasto para encontrar a melhor solução com a meta-heurística ILS com IRACE (D)



MPLIM (E) = tempo gasto para encontrar a solução ótima com o modelo de PLIM

$$GAP (\%) VNS (A) = \left( \frac{\text{solução metaheurística VNS} - \text{solução ótima}}{\text{solução ótima}} \right) * 100$$

$$GAP (\%) ILS(B) = \left( \frac{\text{solução metaheurística ILS (B)} - \text{solução ótima}}{\text{solução ótima}} \right) * 100$$

$$GAP (\%) ILS(C) = \left( \frac{\text{solução metaheurística ILS (C)} - \text{solução ótima}}{\text{solução ótima}} \right) * 100$$

$$GAP (\%) ILS IRACE (D) = \left( \frac{\text{solução metaheurística ILS (D)} - \text{solução ótima}}{\text{solução ótima}} \right) * 100$$

$GAP (\%) CPLEX (E)$  =  $GAP$  de otimalidade apresentado pelo CPLEX em termos percentuais

Como dito no Capítulo 3, inicialmente, a meta-heurística ILS gerava as soluções iniciais de forma aleatória (B) e, posteriormente, em função do aprimoramento do método, essa geração sofreu algumas modificações e deixou de ser aleatória (C). Com isso, foi possível analisar as soluções geradas por ambos os métodos de geração da solução inicial, e pôde-se afirmar que a modificação foi eficaz, uma vez que apenas as instâncias 2, 3, 5, 14, 18, 19 e 22 apresentaram melhores soluções com a geração aleatória da solução inicial.

A partir dos resultados pode-se perceber que apesar de ter-se encontrado a solução ótima apenas para a primeira instância, os *gaps* dos resultados encontrados pela meta-heurística ILS (C) foram menores se comparados aos *gaps* dos resultados encontrados pela meta-heurística VNS (A), com exceção das instâncias 2, 3 e 18. Na tabela, pode-se analisar ainda que as soluções encontradas com as instâncias 5, 7, 12, 13, 15, 20, 23, 29 e 30 apresentaram grandes melhoras em relação as soluções encontrados pela meta-heurística VNS.

As melhores soluções encontradas utilizando-se a meta-heurística ILS (C) para a resolução das instâncias 6, 8, 11 e 12 apresentaram um custo menor que as soluções ótimas entregues pelo modelo de PLIM (E). Aqui cabe ressaltar que o modelo de PLIM é baseado nos pedidos das instâncias enquanto as meta-heurísticas VNS e ILS são baseadas nos padrões. Assim, o modelo matemático não considera os padrões das painéis para estabelecer o agrupamento dos pedidos, enquanto as meta-heurísticas consideram essa questão. Tal fato não inviabiliza nenhum dos métodos e nem a comparação das soluções encontradas, uma vez que essas são viáveis e respeitam as restrições do problema, e explica a ocorrência de soluções melhores que a solução ótima com a utilização das meta-heurísticas.

Tabela 3 - Resultados obtidos

Instância	N° Pedidos	N° Padrões	N° Períodos	Melhor solução VNS (A)	Melhor solução ILS (sol. Inicial aleatória) (B)	Melhor solução ILS (C)	Melhor solução ILS com IRACE (D)	Solução ótima (MPLIM) (E)	Tempo gasto (s)					GAP (%) VNS (A)	GAP (%) ILS (B)	GAP (%) ILS (C)	GAP (%) ILS IRACE (D)	GAP (%) ILS CPLEX (E)
									VNS (A)	ILS (B)	ILS (C)	ILS (D)	MPLIM (E)					
IAP001	20	7	2	R\$ 90.481,00	R\$ 90.481,00	R\$ 90.481,00	R\$ 90.481,00	R\$ 90.481,00	0,12	0,11	0,09	0,20	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000
IAP002	25	14	3	R\$ 111.822,00	R\$ 111.822,00	R\$ 111.936,00	R\$ 111.936,00	R\$ 110.406,00	0,22	0,47	0,36	0,42	1,00	1,28	1,28	1,39	1,39	0,00000
IAP003	30	15	3	R\$ 60.400,00	R\$ 60.400,00	R\$ 90.237,00	R\$ 90.237,00	R\$ 60.650,00	0,92	3,03	1,17	1,99	0,00	-0,41	-0,41	48,78	48,78	0,00000
IAP004	30	13	4	R\$ 176.220,00	R\$ 175.440,00	R\$ 152.495,00	R\$ 152.495,00	R\$ 144.487,00	0,30	1,98	1,25	2,28	8,00	21,96	21,42	5,54	5,54	0,00008
IAP005	40	17	3	R\$ 165.005,00	R\$ 113.265,00	R\$ 114.084,00	R\$ 114.084,00	R\$ 112.635,00	2,83	10,27	5,25	7,32	123,00	46,50	0,56	1,29	1,29	0,00010
IAP006	40	28	4	R\$ 180.247,00	R\$ 180.021,00	R\$ 175.139,00	R\$ 175.139,00	R\$ 180.964,00	0,95	7,16	4,64	4,57	2,00	-0,40	-0,52	-3,22	-3,22	0,00000
IAP007	40	21	5	R\$ 10.797.370,00	R\$ 10.797.370,00	R\$ 534.794,00	R\$ 534.794,00	R\$ 369.543,00	1,21	9,27	3,50	3,91	5,00	>100	>100	44,72	44,72	0,00000
IAP008	40	27	6	R\$ 150.516,00	R\$ 145.375,00	R\$ 135.013,00	R\$ 135.013,00	R\$ 135.593,00	2,39	21,66	9,77	8,99	2,00	11,01	7,21	-0,43	-0,43	0,00000
IAP009	45	23	3	R\$ 85.752,00	R\$ 84.895,00	R\$ 84.895,00	R\$ 84.895,00	R\$ 84.111,00	1,16	17,52	10,11	9,26	2,00	1,95	0,93	0,93	0,93	0,00000
IAP010	45	20	4	R\$ 134.026,00	R\$ 133.383,00	R\$ 133.383,00	R\$ 133.383,00	R\$ 129.919,00	0,27	11,85	6,66	8,13	2,00	3,16	2,67	2,67	2,67	0,00000
IAP011	45	28	5	R\$ 129.233,00	R\$ 128.385,00	R\$ 119.776,00	R\$ 119.776,00	R\$ 124.886,00	3,56	29,30	19,81	14,15	15,00	3,48	2,80	-4,09	-4,09	0,00000
IAP012	45	21	6	R\$ 247.438,00	R\$ 140.364,00	R\$ 125.680,00	R\$ 125.680,00	R\$ 128.572,00	8,91	38,50	15,86	15,86	17,00	92,45	9,17	-2,25	-2,25	0,00010
IAP013	50	21	3	R\$ 610.688,00	R\$ 291.164,00	R\$ 106.687,00	R\$ 106.687,00	R\$ 89.694,00	1,63	4,33	6,03	7,57	5,00	>100	>100	18,95	18,95	0,00000
IAP014	50	25	4	R\$ 143.900,00	R\$ 143.018,00	R\$ 143.096,00	R\$ 143.096,00	R\$ 136.827,00	13,11	49,09	23,13	14,45	1,00	5,17	4,52	4,58	4,58	0,00008
IAP015	50	27	5	R\$ 249.114,00	R\$ 180.678,00	R\$ 175.939,00	R\$ 175.939,00	R\$ 172.442,00	6,61	54,61	23,94	21,91	14,00	44,46	4,78	2,03	2,03	0,00000
IAP016	50	25	6	R\$ 156.456,00	R\$ 142.590,00	R\$ 137.849,00	R\$ 135.849,00	R\$ 137.094,00	12,78	106,28	62,33	61,94	3,00	14,12	4,01	0,55	-0,91	0,00001
IAP017	100	26	3	R\$ 5.993.514,00	R\$ 5.965.812,00	R\$ 259.285,00	R\$ 259.285,00	R\$ 353.581,00	1,02	2,74	139,67	102,95	3600,00	>100	>100	-26,67	-26,67	0,63450
IAP018	100	37	4	R\$ 3.283.263,00	R\$ 1.419.280,00	R\$ 5.967.942,00	R\$ 5.967.942,00	R\$ 323.083,00	160,97	1,20	230,17	95,74	3603,00	>100	>100	>100	>100	0,05448
IAP019	100	34	5	R\$ 239.654,00	R\$ 238.125,00	R\$ 238.416,00	R\$ 238.416,00	R\$ 225.568,00	246,47	5098,18	2213,62	1126,33	3600,00	6,24	5,57	5,70	5,70	0,01638
IAP020	100	32	6	R\$ 333.532,00	R\$ 186.385,00	R\$ 158.546,00	R\$ 163.398,00	R\$ 176.809,00	582,78	3649,36	3613,95	2462,49	3600,00	88,64	5,42	-10,33	-7,59	0,03026
IAP021	100	49	7	R\$ 7.789.566,00	R\$ 6.928.718,00	R\$ 4.253.937,00	R\$ 4.258.062,00	R\$ 405.801,00	516,98	3740,88	3521,02	1168,74	3600,00	>100	>100	>100	>100	0,01645
IAP022	100	46	8	R\$ 1.959.959,00	R\$ 375.985,00	R\$ 403.722,00	R\$ 402.851,00	R\$ 345.270,00	595,12	3683,22	3610,21	1121,81	3601,00	>100	8,90	16,93	16,68	0,03319
IAP023	100	49	9	R\$ 2.890.557,00	R\$ 520.472,00	R\$ 277.084,00	R\$ 277.084,00	R\$ 290.524,00	110,16	198,41	1838,25	549,45	3601,00	>100	79,15	-4,63	-4,63	0,00186
IAP024	100	47	10	R\$ 428.862,00	R\$ 374.450,00	R\$ 374.450,00	R\$ 374.450,00	R\$ 300.244,00	0,11	3613,35	3627,45	1147,68	3601,00	42,84	24,72	24,72	24,72	0,01902
IAP025	212	51	5	R\$ 144.346.603,00	R\$ 130.653.161,00	R\$ 2.652.645,00	R\$ 2.657.222,00	R\$ -	3957,84	3999,46	3622,36	3655,06	3604,00	-	-	-	-	Infinito
IAP026	220	59	5	R\$ 728.639.137,00	R\$ 712.072.326,00	R\$ 1.844.607,00	R\$ 1.844.607,00	R\$ 12.927.604,00	3648,76	8015,66	3487,04	1148,44	3603,00	>100	>100	-85,73	-85,73	0,01173
IAP027	219	50	5	R\$ 276.811.526,00	R\$ 219.992.751,00	R\$ 2.360.589,00	R\$ 2.360.349,00	R\$ -	3754,35	3832,56	3860,63	3607,47	3601,00	-	-	-	-	Infinito
IAP028	228	51	5	R\$ 1.501.210,00	R\$ 1.900.880,00	R\$ 399.027,00	R\$ 395.011,00	R\$ 160.098,00	3678,41	3615,54	4503,45	4078,43	3603,00	>100	>100	>100	>100	0,02680
IAP029	226	75	5	R\$ 3.123.479,00	R\$ 2.371.464,00	R\$ 206.557,00	R\$ 205.428,00	R\$ 167.576,00	3613,57	3820,54	3702,57	3838,05	3602,00	>100	>100	23,26	22,59	0,01310
IAP030	260	58	5	R\$ 2.782.093,00	R\$ 3.404.082,00	R\$ 205.629,00	R\$ 218.765,00	R\$ 118.749,00	3680,79	3602,24	3796,95	3695,90	3603,00	>100	>100	73,16	84,22	0,06139

Fonte: Autores

Vale lembrar que o modelo de PLIM não garante que as soluções ótimas foram encontradas a partir da instância 17, pois foi atingido o tempo limite de processamento. Dessa forma, com um menor tempo de processamento, a meta-heurística ILS (C) conseguiu alcançar melhores soluções que o modelo para as instâncias 17, 23 e 26. Pode-se ressaltar, ainda, que o modelo matemático não conseguiu encontrar soluções viáveis dentro do tempo limite estabelecido para as instâncias 25 e 27.

Comparando-se agora as soluções encontradas pela meta-heurística ILS utilizando os parâmetros estabelecidos pelo IRACE (D), com a meta-heurística ILS (C), pode-se perceber que apesar de ter-se encontrado uma solução com custo menor apenas para as instâncias 16, 22, 28 e 29 e com o mesmo custo para as demais, com exceção das instâncias 20, 21 e 30, o tempo computacional gasto pelo método que utilizou os parâmetros do IRACE foram consideravelmente menores para 67% das instâncias analisadas. A eficiência do IRACE pode ser destacada analisando-se os resultados encontrados na instância 23, ainda que com a utilização dos parâmetros o método tenha encontrado a mesma solução se comparado ao método (C), o tempo computacional despendido foi cerca de 70% menor.

Observando-se, ainda, os dados da Tabela 3, tem-se a média e o desvio-padrão tanto para o Tempo gasto (s) quanto para o *GAP* (%) dos métodos desenvolvidos, conforme apresentado na Tabela 4. Vale ressaltar que esses dados são referentes as melhores soluções encontradas para as instâncias utilizando-se as meta-heurísticas e o modelo matemático, e que para os cálculos desconsiderou-se os *GAPS* (%) maiores que 100. Assim, percebe-se que a partir da mudança do código do ILS para a geração de soluções iniciais não aleatórias, o tempo médio gasto para a resolução das instâncias e o desvio-padrão desses tempos foram menores.

Tabela 4 - Média e desvio-padrão do Tempo gasto (s) e do *GAP* (%)

	Tempo gasto (s)					GAP (%)	GAP (%)	GAP (%)	GAP (%) ILS	GAP (%)
	VNS (A)	ILS (B)	ILS (C)	ILS (D)	MPLIM (E)	VNS (A)	ILS (B)	ILS (C)	IRACE (D)	CPLEX (E)
MÉDIA	820,14	1574,63	1398,71	932,72	1687,43	22,50	9,59	5,51	5,97	0,03
DESVIO-PADRÃO	1461,63	2169,35	1731,17	1393,06	1790,64	29,38	17,68	27,63	28,71	0,12

Fonte: Autores

Visto que as instâncias foram rodadas 20 vezes para cada um dos métodos, a Tabela 5 apresenta a média e o desvio padrão, por instância e por meta-heurística, de todas as soluções encontradas. Como esperado, constata-se que a maioria das soluções geradas com as meta-heurísticas ILS (C) e ILS (D) apresentaram desvios-padrões inferiores aos demais métodos, uma vez que os conjuntos de soluções são mais homogêneos devido a geração da solução inicial de forma não aleatória.

Tabela 5 - Média e Desvio-padrão das 20 soluções encontradas para cada instância por cada meta-heurística

Instância	N° Pedidos	N° Padrões	N° Períodos	Média das 20 soluções encontradas para cada instância				Desvio-padrão das 20 soluções encontradas para cada instância			
				VNS (A)	ILS (B)	ILS (C)	ILS (D)	VNS (A)	ILS (B)	ILS (C)	ILS (D)
IAP001	20	7	2	R\$ 91.221,85	R\$ 90.481,10	R\$ 90.481,00	R\$ 90.481,55	R\$ 1.763,58	R\$ 0,30	R\$ -	R\$ 0,50
IAP002	25	14	3	R\$ 121.012,95	R\$ 8.354.645,50	R\$ 111.936,00	R\$ 111.936,00	R\$ 14.990,54	R\$ 7.452.854,85	R\$ -	R\$ -
IAP003	30	15	3	R\$ 93.486,05	R\$ 73.826,75	R\$ 90.239,40	R\$ 90.238,20	R\$ 51.562,16	R\$ 14.843,63	R\$ 3,67	R\$ 2,86
IAP004	30	13	4	R\$ 179.471,80	R\$ 175.813,30	R\$ 152.717,20	R\$ 152.495,00	R\$ 2.578,94	R\$ 258,34	R\$ 444,40	R\$ -
IAP005	40	17	3	R\$ 5.644.935,35	R\$ 3.053.093,05	R\$ 114.647,70	R\$ 114.366,65	R\$ 5.301.240,63	R\$ 3.604.849,87	R\$ 740,09	R\$ 556,04
IAP006	40	28	4	R\$ 8.404.619,30	R\$ 1.269.400,60	R\$ 175.139,00	R\$ 175.139,00	R\$ 5.840.818,85	R\$ 879.572,56	R\$ -	R\$ -
IAP007	40	21	5	R\$ 10.973.567,05	R\$ 10.797.426,45	R\$ 534.794,00	R\$ 534.794,00	R\$ 142.538,55	R\$ 91,31	R\$ -	R\$ -
IAP008	40	27	6	R\$ 13.857.857,00	R\$ 673.220,75	R\$ 135.013,00	R\$ 135.013,00	R\$ 8.537.598,82	R\$ 2.292.690,93	R\$ -	R\$ -
IAP009	45	23	3	R\$ 8.272.638,00	R\$ 4.631.920,75	R\$ 85.044,15	R\$ 85.020,60	R\$ 4.455.667,15	R\$ 4.558.204,71	R\$ 34,22	R\$ 62,80
IAP010	45	20	4	R\$ 2.103.492,70	R\$ 9.754.626,25	R\$ 133.516,35	R\$ 133.427,45	R\$ 3.673.184,93	R\$ 6.816.190,21	R\$ 317,44	R\$ 193,75
IAP011	45	28	5	R\$ 7.919.061,05	R\$ 2.774.555,95	R\$ 119.892,85	R\$ 119.874,40	R\$ 5.689.652,41	R\$ 4.585.714,08	R\$ 26,81	R\$ 49,20
IAP012	45	21	6	R\$ 2.999.133,40	R\$ 1.118.221,25	R\$ 125.680,60	R\$ 125.680,00	R\$ 3.095.854,21	R\$ 878.467,31	R\$ 2,62	R\$ -
IAP013	50	21	3	R\$ 10.010.929,80	R\$ 7.265.082,70	R\$ 106.687,00	R\$ 106.687,00	R\$ 5.823.189,49	R\$ 6.377.520,76	R\$ -	R\$ -
IAP014	50	25	4	R\$ 4.049.965,05	R\$ 1.618.916,10	R\$ 143.096,00	R\$ 143.096,00	R\$ 4.228.013,17	R\$ 2.487.804,78	R\$ -	R\$ -
IAP015	50	27	5	R\$ 10.240.262,85	R\$ 7.096.260,80	R\$ 175.939,00	R\$ 175.939,00	R\$ 9.372.761,21	R\$ 6.957.940,42	R\$ -	R\$ -
IAP016	50	25	6	R\$ 174.142,85	R\$ 156.887,35	R\$ 141.352,70	R\$ 141.152,70	R\$ 54.745,05	R\$ 4.771,44	R\$ 1.167,90	R\$ 1.767,90
IAP017	100	26	3	R\$ 29.587.009,50	R\$ 20.106.613,90	R\$ 259.589,65	R\$ 260.179,15	R\$ 13.672.489,05	R\$ 11.247.076,64	R\$ 399,48	R\$ 1.719,19
IAP018	100	37	4	R\$ 22.639.851,40	R\$ 19.914.503,80	R\$ 5.967.942,00	R\$ 5.968.242,00	R\$ 12.225.794,44	R\$ 11.164.395,87	R\$ -	R\$ 1.307,67
IAP019	100	34	5	R\$ 3.443.667,30	R\$ 1.013.022,90	R\$ 241.811,65	R\$ 245.345,90	R\$ 3.538.376,42	R\$ 1.081.727,13	R\$ 2.856,69	R\$ 4.085,35
IAP020	100	32	6	R\$ 6.019.384,95	R\$ 4.158.109,00	R\$ 167.576,70	R\$ 169.897,35	R\$ 6.727.379,51	R\$ 4.444.239,12	R\$ 4.832,07	R\$ 4.750,11
IAP021	100	49	7	R\$ 11.940.883,75	R\$ 14.081.441,65	R\$ 4.259.404,85	R\$ 4.261.652,75	R\$ 6.193.887,83	R\$ 6.061.784,31	R\$ 2.318,21	R\$ 1.357,60
IAP022	100	46	8	R\$ 4.948.272,80	R\$ 2.370.772,80	R\$ 415.334,65	R\$ 417.607,65	R\$ 4.333.516,27	R\$ 3.567.133,36	R\$ 5.586,83	R\$ 3.422,58
IAP023	100	49	9	R\$ 15.134.229,60	R\$ 11.466.033,60	R\$ 277.136,60	R\$ 279.387,60	R\$ 10.755.199,65	R\$ 7.302.638,30	R\$ 90,88	R\$ 2.950,10
IAP024	100	47	10	R\$ 8.213.688,55	R\$ 6.777.505,10	R\$ 387.279,60	R\$ 387.279,60	R\$ 5.729.606,67	R\$ 5.271.690,46	R\$ 19.272,58	R\$ 19.272,58
IAP025	212	51	5	R\$ 144.898.644,00	R\$ 145.855.222,80	R\$ 2.665.161,80	R\$ 2.664.348,35	R\$ 469.973,96	R\$ 9.762.788,72	R\$ 5.434,01	R\$ 5.430,61
IAP026	220	59	5	R\$ 733.505.049,00	R\$ 726.703.313,08	R\$ 1.846.744,50	R\$ 1.849.097,05	R\$ 6.242.693,87	R\$ 10.514.194,94	R\$ 1.835,11	R\$ 3.263,48
IAP027	219	50	5	R\$ 279.580.943,00	R\$ 248.080.297,00	R\$ 2.370.161,45	R\$ 2.368.749,75	R\$ 1.767.676,61	R\$ 13.365.268,73	R\$ 4.491,18	R\$ 5.201,10
IAP028	228	51	5	R\$ 4.271.058,10	R\$ 2.016.057,70	R\$ 413.541,10	R\$ 416.007,68	R\$ 5.488.157,08	R\$ 49.039,99	R\$ 18.601,72	R\$ 20.420,21
IAP029	226	75	5	R\$ 9.847.568,20	R\$ 4.362.560,70	R\$ 218.225,30	R\$ 245.846,30	R\$ 11.264.398,52	R\$ 2.843.347,24	R\$ 16.673,30	R\$ 33.010,79
IAP030	260	58	5	R\$ 5.828.154,50	R\$ 3.490.017,90	R\$ 246.078,65	R\$ 360.978,55	R\$ 4.613.020,32	R\$ 112.633,08	R\$ 43.939,66	R\$ 321.417,69

Fonte: Autores

Já a Tabela 6 apresenta a média e o desvio-padrão, por instância e por meta-heurística, de todos os tempos, em segundos, despendidos para encontrar cada uma das soluções, e, com isso, confirma a eficiência da utilização dos parâmetros estabelecidos pelo IRACE quanto a redução do tempo computacional gasto para a resolução das instâncias.

Tabela 6 - Média e Desvio Padrão do tempo despendido para encontrar as 20 soluções para cada instância por cada meta-heurística

Instância	N° Pedidos	N° Padrões	N° Períodos	Média do tempo gasto (s) para as 20 soluções encontradas para cada instância				Desvio-padrão do tempo gasto (s) para as 20 soluções encontradas para cada instância			
				VNS (A)	ILS (B)	ILS (C)	ILS (D)	VNS (A)	ILS (B)	ILS (C)	ILS (D)
IAP001	20	7	2	0,17	0,14	0,11	0,25	0,03	0,03	0,01	0,05
IAP002	25	14	3	0,27	0,78	0,48	0,69	0,04	0,20	0,09	0,13
IAP003	30	15	3	1,06	3,57	1,67	2,72	0,19	0,67	0,36	0,64
IAP004	30	13	4	0,34	2,88	1,73	3,49	0,07	0,76	0,42	0,62
IAP005	40	17	3	3,03	11,48	6,84	10,83	1,05	3,67	2,36	3,92
IAP006	40	28	4	1,57	8,94	5,44	5,31	0,42	1,35	0,34	0,42
IAP007	40	21	5	1,72	15,82	4,43	5,10	0,76	4,18	0,47	0,47
IAP008	40	27	6	3,24	19,98	11,27	10,56	0,70	3,56	0,94	0,79
IAP009	45	23	3	3,09	21,92	10,41	10,52	0,84	6,12	2,47	1,54
IAP010	45	20	4	3,04	17,43	7,83	10,43	1,08	5,15	1,63	2,01
IAP011	45	28	5	3,24	38,75	17,86	15,55	0,71	10,20	1,56	1,21
IAP012	45	21	6	2,54	23,23	22,50	19,95	3,43	22,43	5,05	2,51
IAP013	50	21	3	10,27	21,94	8,45	8,50	4,88	13,96	1,31	0,69
IAP014	50	25	4	8,77	47,97	26,96	22,38	2,91	15,40	2,42	4,12
IAP015	50	27	5	4,69	63,53	34,03	25,78	2,89	19,24	6,86	2,22
IAP016	50	25	6	8,73	106,25	74,17	64,04	2,61	23,13	14,21	13,20
IAP017	100	26	3	123,41	545,80	183,01	149,20	70,31	463,48	31,30	48,27
IAP018	100	37	4	186,02	1384,94	276,33	128,15	85,62	939,84	46,55	22,64
IAP019	100	34	5	243,16	3571,76	2599,71	929,18	79,52	1043,58	642,67	281,25
IAP020	100	32	6	445,53	4134,06	3547,00	1661,39	240,94	1225,93	226,21	611,22
IAP021	100	49	7	418,52	3671,59	3430,46	1106,02	187,20	45,99	302,08	507,41
IAP022	100	46	8	379,25	3691,15	3422,76	1073,15	154,51	51,68	270,78	254,43
IAP023	100	49	9	205,33	2273,07	2432,74	794,52	271,26	1410,46	529,93	244,35
IAP024	100	47	10	141,09	3620,08	3723,65	1836,70	101,25	51,73	113,87	98,76
IAP025	212	51	5	3734,22	5431,47	3728,05	3729,22	158,49	7193,54	108,28	72,59
IAP026	220	59	5	9387,52	9677,82	2784,16	805,11	2615,85	4523,77	690,61	270,52
IAP027	219	50	5	6135,47	4853,49	3703,00	3589,72	681,12	793,79	86,57	236,75
IAP028	228	51	5	3678,41	3688,86	3819,83	3923,98	82,47	78,83	206,97	250,79
IAP029	226	75	5	3613,57	3704,97	3760,81	3834,10	79,13	123,09	117,67	188,64
IAP030	260	58	5	3680,79	3672,60	3889,57	4181,79	81,46	69,05	186,66	405,45

Fonte: Autores

## 5. Conclusão

Conforme explanado, neste trabalho foi abordado o problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes (PIDSL), que consiste em definir lotes de produção de forma que haja um sequenciamento possível de ser realizado dentro da capacidade de cada período. O estudo teve seu foco na indústria siderúrgica, mais especificamente na etapa de lingotamento contínuo na aciaria, conhecida como o gargalo na produção do aço.

O objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de sistemas computacionais, baseados nas meta-heurísticas *Variable Neighborhood Search* (VNS) e *Iterated Local Search* (ILS), para a resolução do PIDSL de forma que os custos envolvidos no processo fossem minimizados. Os sistemas desenvolvidos foram validados através da utilização de um modelo de programação linear inteira mista (PLIM) proposto por Gomes Júnior (2015). A dissertação foi composta por quatro etapas principais: levantamento bibliográfico, desenvolvimento da meta-heurística VNS, desenvolvimento da meta-heurística ILS e testes computacionais com os métodos desenvolvidos.

Com a utilização da meta-heurística VNS, os tempos computacionais foram baixos se comparados aos demais, porém, as soluções encontradas com este método possuem os maiores *gaps* em relação às soluções entregues pelo modelo de PLIM. Aqui vale destacar a solução encontrada para a instância IAP002, que obteve um resultado melhor, e com um baixo tempo computacional, se comparado ao resultado obtido com a meta-heurística ILS com a utilização do IRACE.

Conclui-se, também, que a meta-heurística ILS com a geração da solução inicial de forma ordenada e anterior a aplicação do IRACE, deu-se de forma eficiente, resultando na solução ótima, como observado para a instância IAP001, em soluções melhores com um menor tempo de processamento, se comparadas às soluções do modelo PLIM, para as instâncias 17, 23 e 26. Além disso, o modelo matemático não conseguiu encontrar soluções viáveis dentro do tempo de processamento especificado pelo método para as instâncias 25 e 27, já a meta-heurística ILS, também limitada por esse tempo, foi capaz de encontrar soluções viáveis para tais instâncias.

E por fim, constata-se que a utilização do IRACE foi de suma importância para o trabalho, pois além de alimentar a meta-heurística ILS com parâmetros confiáveis configurados para a estrutura do problema, reduziu significativamente o tempo de resolução do problema, o que caracteriza um importante ganho para o setor de lingotamento contínuo.

Conforme o exposto, pode-se observar o quão importante é a realização deste trabalho, tanto para o aprimoramento de conhecimentos e desenvolvimento de sistemas computacionais, quanto para o planejamento, controle e gestão da produção de aço. Com a utilização de heurísticas e meta-heurísticas, torna-se possível a redução de tempo e custo nas siderúrgicas, dois quesitos cruciais para o desenvolvimento e para a manutenção das organizações no mercado atual.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se o desenvolvimento de métodos para a resolução do PIDSL que visem melhorar a qualidade das soluções finais, fazendo-se possível a obtenção de soluções ótimas com um baixo tempo computacional para as demais instâncias. Um exemplo seria a aplicação de heurísticas e meta-heurísticas que definam qual a melhor quantidade de cada pedido a ser processada em cada panela, tornando-se possível a partição dos pedidos dos clientes para reduzir a função de avaliação.

## Referências bibliográficas

ARAUJO, S. A. *Estudos de Problemas de Dimensionamento de Lotes Monoestágio com Restrição de Capacidade*. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (USP), 1999.

ARENALES, M. *et al. Pesquisa Operacional*. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2011.

BELLABDAOUI, A.; TEGHEM, J. *A mixed-integer linear programming model for the continuous casting planning*. *International Journal of Production Economics*, v. 104, n. 2, p. 260 - 270, 2006.

BRETAS, A. M. C. *Modelagem do Sequenciamento no Processo de Lingotamento Contínuo por Métodos Exatos e Heurísticos*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

CUI, H.; LUO, X. "An improved Lagrangian relaxation approach to scheduling steelmaking-continuous casting process". *Computers and Chemical Engineering*, 106, p. 133-146, 2017.

FEOFILOFF, P. *Complexidade e problemas NP-completos, Notas de aula, 17/01/2021*. Disponível em: <[www.ime.usp.br/~pf/analise\\_de\\_algoritmos/aulas/NPcompleto.html](http://www.ime.usp.br/~pf/analise_de_algoritmos/aulas/NPcompleto.html)>, Acesso em: 02 abr. 2021.

FERREIRA, D. *Abordagens para o problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes da produção de bebidas*. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, 2006.

FESTA, E. L. *Aplicação da Meta-heurística Variable Neighborhood Search na otimização de escalas de motoristas de transporte público urbano*. Dissertação (Bacharel) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

FIDELIS, M. B. *Meta-heurísticas para o problema de sequenciamento de lotes de tarefas em máquinas paralelas*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Viçosa, 2017.

GLOVER, F. e KOCHENBERGER, G. A. *Handbook of Metaheuristics*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.



GOMES JÚNIOR, A. C. *Modelos e Algoritmos de Otimização para Agrupamento de Pedidos e Sequenciamento de Painelas em Lingotamento Contínuo*. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

GOMES JÚNIOR, A. C.; SOUZA, M. C.; BRETAS, A. M. C.; RAVETTI, M. G. *Modelos de Programação Linear Inteira Mista para o problema de agrupamento de pedidos e sequenciamento de painelas na aciaria: um estudo de caso em uma siderúrgica brasileira*. Anais do XLVI SBPO, p. 1472-1483, 2014.

GOMES JÚNIOR, A. C.; PEREIRA, L. M.; PEREIRA, M. C. *Um algoritmo Simulated Annealing aplicado a resolução do problema de sequenciamento de painelas no lingotamento contínuo*. Anais do XLVIII SBPO, p. 1340-1351, 2016.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introdução à Pesquisa Operacional*. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

INSTITUTO AÇO BRASIL. *Página institucional*. Disponível em: <[www.acobrasil.org.br](http://www.acobrasil.org.br)>, Acesso em: 31 ago. 2018.

LI, J.; XIAO, X.; TANG, Q.; FLOUDAS, C. A. *Production scheduling of a large-scale steelmaking continuous casting process via unit-specific event-based continuous time models: Short-term and medium-term scheduling*. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 51, p. 7300-7319, 2012.

LONG, J.; ZHENG, Z.; GAO, X.; PARDALOS, P. M. *Scheduling a realistic hybrid flow shop with stage skipping and adjustable processing time in steel plants*. Applied Soft Computing, 64, p. 536-549, 2018.

LÓPEZ-IBÁÑEZ, M.; DUBOIS-LACOSTE, J.; STÜTZLE, T.; BIRATTARI, M. *The Irace Package, Iterated Race for Automatic Algorithm Configuration*. Technical Report Series, 2011.

MARTINS, A. L. M. *et al. Disponibilidade do desgaseificador à vácuo rh*. 19º Seminário de Automação e TI Industrial, p. 29-33, 2015.

MISSBAUER, H.; HAUBER, W.; STADLER, W. *A scheduling system for the steelmaking continuous casting process: A case study from the steel-making industry*. International Journal of Production Research, v. 47, n. 15, p. 4147-4172, 2009.

MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. *Variable neighborhood search*. Computers and Operations Research, v. 24, p. 1097-1100, 1997.

- MORI, J.; MAHALEC, V. *Planning and scheduling of steel plates production. Part II: Scheduling of continuous casting*. Computers and Chemical Engineering, 101, p. 312-325, 2017.
- PAN, Q. “An effective co-evolutionary artificial bee colony algorithm for steelmaking-continuous casting scheduling”. European Journal of Operational Research, 250, p. 702-714, 2016.
- PINEDO, M. L. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. 3. ed. New York: Springer, 2008.
- PREVIERO, W. D. *Estratégias de resolução para o problema de job-shop flexível*. Tese (Doutorado) – Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo, 2016.
- RIBEIRO, R. S. *Problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes em linhas paralelas: uma aplicação em uma indústria de alimentos*. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (USP), 2017.
- ROCHA JUNIOR, W. R.; CHERRI, A. C.; ARAUJO, S. A. de. *Problema de dimensionamento de lotes multiestágio com limitação de capacidade em uma indústria de móveis*. p. 1-12, 2015.
- SLACK, N. *et al. Administração da produção*. 1º ed. São Paulo: Atlas, 1996.
- SOUZA, M. C.; GOMES Jr., A. C.; BRETAS, A. M. C.; RAVETTI, M. G. *Models for scheduling charges in continuous casting: application to a Brazilian steel plant*. Optimization Letters, 10, p. 667-683, 2016.
- SOUZA, M. J. F. *Inteligência Computacional para Otimização, Notas de aula, 2011/1*. Disponível em: <[www.decom.ufop.br/prof/marcone/Disciplinas/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional.pdf](http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Disciplinas/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional.pdf)>, Acesso em: 15 set. 2020.
- TANG, L. *et al. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production*. European Journal of Operational Research, v. 133, p. 1-20, 2001.
- TANG, L.; WANG, G. *Decision support system for the batching problems of steelmaking and continuous-casting production*. Omega, v. 36, p. 976–991, 2008.
- TANG, L.; WANG, G.; CHEN, Z. L. *Integrated charge batching and casting width selection at Baosteel*. Oper. Res., v. 62, p. 772–787, 2014a.

TANG, L.; ZHAO, Y.; LIU, J. *An improved differential evolution algorithm for practical dynamic scheduling in steelmaking continuous casting production*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, v. 18, p. 209–225, 2014b.

TOLEDO, C. F. M. *et al. Um modelo de otimização para o problema integrado de dimensionamento de lotes e programação da produção em fabricas de refrigerantes*. Pesquisa Operacional, v. 27, p. 155-186, 2007.

TOUIL, A.; ECHCHTABI, A.; BELLABDAOUI, A.; CHARKAOUI, A. “A hybrid metaheuristic method to optimize the order of the sequences in continuous-casting”. International Journal of Industrial Engineering Computations, 7, p. 385-398, 2016.

TUBINO, Dalvio Ferrari. Manual de Planejamento e Controle da Produção. São Paulo: Atlas, 2007.

WORLD STEEL ASSOCIATION. Disponível em: < [www.worldsteel.org](http://www.worldsteel.org)>, Acesso em: 07 jul. 2019.