

Um algoritmo *Simulated Annealing* aplicado a resolução do problema de sequenciamento de painelas no lingotamento contínuo

Aloísio de Castro Gomes Júnior
aloisio.unileste@gmail.com

Letícia Mayra Pereira
leticiamayra2001@hotmail.com

Mateus Cerqueira Pereira
mateusc.pereira@hotmail.com

Unileste – Centro Universitário do Leste de Minas Gerais
Avenida Tancredo Neves, 3500 – Bairro Universitário – Coronel Fabriciano/MG

RESUMO

Este trabalho aborda o problema de sequenciamento de painelas no setor de lingotamento contínuo de uma empresa siderúrgica brasileira. Procura-se neste problema determinar a melhor sequência de painelas no processo de lingotamento contínuo de tal forma que o custo de *setup* e de geração de placas de mistura seja minimizado. Para resolver este problema é utilizada a metaheurística *Simulated Annealing*, um método de resolução probabilístico que faz analogia com o processo de recozimento do aço e busca gerar boas soluções para o problema em um tempo hábil para a tomada de decisões. Apresenta-se no trabalho a estrutura do método utilizado e os resultados obtidos para 96 instâncias geradas a partir de relatórios gerenciais da empresa estudada. Os resultados são comparados com os resultados obtidos pela empresa e pela resolução de um modelo matemático existente na literatura.

PALAVRAS CHAVE. *Simulated Annealing*, Sequenciamento, Lingotamento Contínuo.

Tópicos: PO na indústria; Metaheurísticas.

ABSTRACT

This paper deals with Charge Scheduling problem in Continuous Casting of a Brazilian Steel Company. The resolution of this problem seeks to determine the best sequence of charges in the continuous casting process so that the setup cost and generation of mixing plates is minimized. To solve this problem, the Simulated Annealing method is used, a probabilistic resolution method that makes an analogy with the steel annealing process and seeks to generate good solutions to the problem in short times. The paper presents the structure of the method used and the results obtained for 96 instances generated from the management reports of the studied company. The results are compared with the results obtained by the company and the resolution of an existing mathematical model in the literature.

KEYWORDS. *Simulated Annealing*. Scheduling. Continuous Casting.

Paper topics: OR in industry; Metaheuristics.

1. Introdução

O problema de programação da produção consiste em definir o melhor sequenciamento das ordens de produção dentro de um horizonte de planejamento, previamente definido. Determinar o melhor sequenciamento dentro de qualquer setor produtivo implica em reduções significativas dos custos de produção. Além disso, gerenciar corretamente o planejamento da produção pode assegurar o cumprimento de prazos de entregas, a qualidade dos produtos, e a melhor utilização dos recursos produtivos.

Segundo [Lustosa *et al.* 2008], a programação da produção é uma atividade que está diretamente relacionada a questões ligadas ao desejo dos clientes e aos processos de produção, por este motivo se torna um processo primordial na perspectiva de evolução organizacional. Ainda segundo estes autores, um aspecto de suma importância para se propiciar desempenho satisfatório deste setor é o desenvolvimento de modelos computacionais que auxiliem na tomada de decisão, visando obter as melhores soluções de programação considerando cada problema específico em questão.

[Tang *et al.* 2001] afirmam que a indústria siderúrgica é básica para o desenvolvimento de diversos outros setores econômicos do país, portanto é de grande importância para o desenvolvimento da nação. Seus produtos finais tem aplicação como matéria-prima em diversos mercados, como automobilístico, construção civil, naval, aeronáutico, indústria de utensílios domésticos, entre outros.

[Pan *et al.* 2013] afirmam que para se manter em competitividade no mercado atual, é imprescindível que as siderúrgicas realizem de forma eficiente a programação da produção. [Bellabdaoui e Teghem 2006] complementam esta afirmativa indicando que muitas das grandes empresas internacionais de manufatura de ferro e aço, principalmente da China e Coreia do Sul, estão emprenhadas no objetivo de desenvolvimento de sistemas computacionais de manufatura integrada, para melhorar a sua programação e competição global.

Em função da presente crise, que afeta fortemente o setor siderúrgico brasileiro, e que é decorrente da demanda fraca no mercado interno e excedente de produção global, faz-se necessário adotar medidas que minimizem os impactos financeiros. Um fator considerável para se manter a empresa competitiva e minimizar os riscos de resultados financeiros negativos, é a redução dos custos de produção. Desta forma, torna-se útil a aplicação de ferramentas de Pesquisa Operacional, pois pode-se conseguir boas soluções operacionais que busquem maximizar os lucros ou minimizar os custos das empresas.

[Tang e Wang 2008], [Bellabdaoui e Teghem 2006] e vários outros autores ressaltam que a aciaria é reconhecida como o gargalo na produção de aço. e segundo [Tang e Wang 2008] isto se deve ao fato da capacidade de produção da aciaria ser geralmente menor que os processos de laminação à quente e laminação à frio (processos posteriores à aciaria).

O processo da aciaria é dividido em três grandes etapas: (i) refino primário (transformação do ferrogusa em aço); (ii) refino secundário (ajuste na composição química do aço) e (iii) lingotamento (solidificação do aço líquido e sua posterior transformação em placas).

[Atighehchian, *et al.* 2009] e [Tang e Wang 2008] definem que a atividade de planejamento e programação da produção na aciaria deve ser realizada em duas etapas: (i) agrupamento dos pedidos, transformando os em ordens de produção, observado as restrições das características de “famílias” de aços; (ii) define-se o sequenciamento destas ordens dentro do horizonte de planejamento, alocando-as aos recursos em função do roteiro de produção.

[Tang *et al.* 2001], desenvolvem trabalho de revisão de literatura de diversos métodos para a resolução do problema de dimensionamento e sequenciamento da produção de forma sincronizada entre os setores de refino, lingotamento contínuo e laminação. Uma gama vasta de benefícios decorrentes da implantação de bons sistemas de gestão da programação da produção integrada é apresentada por [Tang *et al.* 2001], dentre eles pode-se citar: Economia de Energia; Aumento da qualidade, eficiência e eficácia nos planos de produção; Redução dos níveis de estoque de produto acabado e de sucata; Aumento da taxa de produtos entregues dentro do prazo; Melhoria dos lucros de produção.

[De Souza *et al.* 2016] propõem dois modelos matemáticos para a resolução do problema de sequenciamento de placas. O problema resolvido por estes autores é baseado em uma grande empresa siderúrgica brasileira.

Já [Gomes Júnior *et al.* 2014] apresentam modelos matemáticos para resolver separadamente e de forma integrada os problemas de agrupamento de pedidos e sequenciamento de placas.

Baseado neste cenário, o principal objetivo deste trabalho é apresentar métodos heurísticos que possam resolver de forma eficiente o problema de sequenciamento de placas no setor de lingotamento contínuo de uma empresa siderúrgica brasileira. A resolução deste problema busca reduzir os custos de *setup* e geração de placas de mistura. As placas de mistura são geradas quando duas placas contendo aços de composições químicas diferentes são processadas uma após a outra sem nenhuma interrupção no processo de lingotamento contínuo.

2. Contexto Siderúrgico Estudado

O trabalho foi desenvolvido em função de um problema de planejamento da produção decorrente de uma indústria do setor siderúrgico nacional. A Empresa Siderúrgica Brasileira (ESB), assim denominada para assegurar confidencialidade dos dados, é uma usina siderúrgica integrada, ou seja, a empresa realiza todos os processos de transformação do minério de ferro até a geração de produto acabado. Os macros processos podem ser diferenciados em três grandes etapas: produção do ferro-gusa nos altos-fornos, produção do aço na aciaria e laminação das placas, gerando produto plano acabado.

Na aciaria ocorre a transformação do ferro-gusa oriundo da redução do minério de ferro nos altos-fornos em aço líquido, que posteriormente é solidificado.

O processo de transformação de ferro-gusa em aço ocorre por meio de refinamentos. No Refino Primário o ferro-gusa líquido, que é oriundo dos altos-fornos, recebe um pré-tratamento de dessulfuração, em seguida o ferro-gusa pré-tratado é carregado em um convertedor do tipo LD juntamente com sucata sólida, inicia-se então o processo de sopro de oxigênio, para se reduzir o teor de carbono na liga, adiciona-se fundentes e elementos de liga. Após a conferência de composição química e finalização de sopro, a carga líquida assume a classificação de aço líquido, e é então vazada para uma panela que permite o transporte do material para o Refino Secundário.

A panela será processada nos equipamentos de refino secundário. No refino secundário realiza-se ajuste fino de composição química e temperatura, e após nova análise de composição química, a panela é liberada para seguir à torre da Máquina de Lingotamento Contínuo (MLC).

A panela é então colocada na torre da MLC, que gira e coloca a panela em condição de processamento, abre-se a válvula longa e inicia-se o preenchimento do distribuidor, em seguida abre-se as válvulas submersas, que distribui o aço para dois veios, ocorrendo processo de solidificação, por jatos de água, a partir dos moldes.

Após o material solidificado, ocorre o corte das placas no comprimento solicitado, este corte é feito por maçaricos especiais nas máquinas de corte.

Como o processo de lingotamento ocorre de forma contínua, sempre ao final do vazamento de uma panela há necessidade de uma tomada de decisão, (i) dar sequência ao processamento e gerar mistura de aços das duas placas, ou (ii) finalizar a série e realizar um *setup* para iniciar uma nova série. A mistura de aços das duas corridas pode trazer consequências negativas se as composições químicas não forem equivalentes, gerando um produto denominado “placa de mistura”, cujo valor de mercado não é atraente. Porém, ao se realizar *setup*, há custo associado aos materiais de preparação dos equipamentos, e custo do tempo ocioso dos equipamentos. No entanto, deve-se observar a vida útil do distribuidor, restrição que obrigatoriamente gera a necessidade de realização de *setup* para a troca de material refratário.

Pela característica de processo contínuo, antes que se termine o total vazamento de aço de uma panela, a panela subsequente deverá estar disponível na torre de lingotamento. Uma opção para se evitar finalização de séries, é diminuir o ritmo de processamento das máquinas, porém se o atraso for grande, a série será interrompida.

Os trabalhos que objetivam apoiar o sequenciamento em aciarias com lingotamento contínuo, geralmente classificam os *jobs* como as placas carregadas com aço líquido, e devem ser sequenciados entre os estágios do processo. Este tipo de trabalho é conhecido em literatura como SCC (*Steelmaking Continuous Casting*), e o último estágio deste processo, que é o lingotamento contínuo, é o que gera a necessidade de agrupamento das placas em séries de produção, pois apresenta característica de operação contínua por certo período de tempo. Este período de processamento contínuo é determinado pela vida útil do distribuidor. Por este motivo entre as séries é realizado o *setup* do equipamento para substituição do distribuidor e inicia-se o processamento de uma nova série de placas.

Pelas características de contexto inerentes aos processos da ESB, um problema que deve ser solucionado pela empresa é de definir boas sequências de programação da produção, uma vez que isto afeta diretamente nos custos operacionais. Atualmente a programação é feita com o auxílio de um *software* que apenas permite o programador escolher a máquina e montar a série de forma manual. O *software* utilizado não possui funcionalidades de comparação das possibilidades ou avaliação da programação proposta.

3. Problema de Sequenciamento de Placas

Nesta seção é apresentado o problema de sequenciamento de placas e o modelo de programação linear inteira mista (PLIM) apresentado por [Gomes Júnior et al. 2014] para resolvê-lo.

A resolução do problema de sequenciamento de placas definirá a melhor sequência de processamento das placas contendo aço líquido no setor de lingotamento contínuo, minimizando os custos de *setup* e de geração de placas de mistura. [Gomes Júnior et al. 2014] afirmam que o setor de lingotamento contínuo é considerado o processo mais crítico da aciaria, pois é sucedido de processo não contínuos e é o processo de lingotamento contínuo que dita o ritmo da aciaria. Segundo os autores as datas de início e término das atividades nas etapas anteriores são calculadas a partir das datas de início das atividades no processo de lingotamento contínuo, por isso considerou-se apenas este equipamento para fazer a programação.

Para a construção do modelo de PLIM, [Gomes Júnior et al. 2014] levam em consideração as seguintes características:

- (i) Um *job* corresponde a uma placa a ser vazada na máquina de lingotamento contínuo;
- (ii) Deve-se respeitar um intervalo de tempo máximo admissível entre dois *setups* consecutivos, pois depois do processamento de algumas placas ocorre desgaste do material refratário que compõe o distribuidor e o mesmo deve ser substituído;
- (iii) Deve-se respeitar o limite de variação máxima de largura entre o processamento de duas placas consecutivas;
- (iv) Diferentes tipos de aço exigem velocidades de lingotamento diferentes;
- (v) Caso haja o lingotamento seguido de dois tipos de aço diferentes, haverá a produção de placa de mistura, que pode não ser aproveitada para aqueles tipos de aço, para que esta mistura não aconteça pode ser realizado um *setup*.

Os autores consideram, sem perda de generalidade, o problema de sequenciamento de placas no setor de lingotamento contínuo como um problema de sequenciamento em uma máquina.

Os parâmetros do modelo apresentado por [Gomes Júnior et al. 2014] são:

- $N = \{1, \dots, n\}$: conjunto de *jobs* (corridas) a serem processados;
- l_m : intervalo de tempo máximo entre dois *setups* consecutivos;
- pr_i : tempo de processamento do *job* i
- s : tempo de *setup*
- f_{ij} : o custo da placa de mistura formada quando o *job* j é processado imediatamente após o *job* i ;
- h : custo de uma operação de *setup*

- $b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o job } j \text{ for processado imediatamente após o job } i; \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$;

- c_{ij} : correspondem ao custo de oportunidade se o job j é sequenciado logo após o job i ou ao custo de *setup* quando o job i ou j são ligados ao nó central, são definidos da seguinte forma:

$$c_{ij} = \begin{cases} f_{ij}, & \text{se } i \text{ e } j \neq 0 \text{ e } b_{ij} = 1; \\ \infty, & \text{se } i \text{ e } j \neq 0 \text{ e } b_{ij} = 0; \\ h, & \text{se } i = 0; \\ 0, & \text{se } j = 0. \end{cases}$$

As variáveis de decisão deste modelo são:

- $x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o job } j \text{ é sequenciado imediatamente após o job } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

- Φ_{ij} : variável auxiliar que corresponde ao fluxo de tempo enviado do nó i para o nó j .

O modelo proposto por [Gomes Júnior et al. 2014] é uma analogia entre o PSP e o problema de roteamento de veículos assimétrico capacitado, sem limitação do número de veículos. Desta forma, o modelo de PLIM para o PSP proposto pelos autores é apresentado a seguir:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij} - h \quad (1)$$

$$\text{sujeito à: } \sum_{i=0}^n x_{ik} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0j} + \sum_{i=1}^n x_{i0} = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^n \Phi_{ik} + \sum_{j=0}^n \Phi_{kj} = pr_k \quad \forall k = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$\Phi_{ij} - lm(x_{ij}) \leq 0 \quad \forall i, j = 0, \dots, n \quad (6)$$

$$x_{ij} \leq b_{ij} \quad \forall i, j = 0, \dots, n \quad (7)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j = 0, \dots, n \quad (8)$$

$$\Phi_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j = 0, \dots, n \quad (9)$$

Neste modelo, a equação (1) procura minimizar os custos com geração de placas de mistura e os custos de *setups*. O número de *setups* é sempre igual ao número de viagens ao nó central menos uma unidade, por isso desconta-se o valor de um *setup* na função objetivo. As restrições (2) e (3) garantem que cada job tenha somente um job sucessor e somente um job antecessor, respectivamente. As restrições (4) garantem que o número de arcos que saem do nó central e que chegam ao nó central sejam os mesmos. As restrições (5) garantem que o fluxo de tempo que chega no nó k menos o fluxo de tempo que sai deste mesmo nó é igual ao tempo de processamento do job k , desta forma evitando que sub-rotas sejam geradas. As restrições (6)

garantem que o fluxo de tempo nos arcos não seja superior ao tempo máximo permitido entre dois *setups* consecutivos. As restrições (7) a (9) definem o domínio das variáveis.

4. Método Heurístico Desenvolvido

[Hillier e Lieberman 2006] definem métodos heurísticos como métodos que apresentam enorme possibilidade de encontrar uma excelente solução viável, não necessariamente a solução ótima, para o problema em questão. Segundo esses autores, um método heurístico bem elaborado, normalmente é capaz de apresentar soluções bem próximas da ótima ou deduzir a inexistência de uma solução viável, ainda que, não se pode afirmar sobre a qualidade da solução obtida.

Todas as ideias elaboradas nos métodos heurísticos, normalmente são simples e adaptadas para a solução daquele determinado modelo estudado, a evolução destas ideias heurísticas resultou em desenvolvimento de eficientes metaheurísticas [Hillier e Lieberman 2006]. Conforme [Hillier e Lieberman 2006], uma metaheurística é um conjunto de diretrizes e estratégias gerais para o desenvolvimento de um método de busca específico para a solução em um tipo de problema em particular.

O sistema computacional desenvolvido para a resolução do PSP foi baseado na metaheurística *Simulated Annealing*. A metaheurística *Simulated Annealing* é uma técnica de busca local probabilística, proposta originalmente por [Kirkpatrick *et al.*, 1983].

Segundo [Hillier e Lieberman 2006], a metaheurística *Simulated Annealing* estabelece uma conexão entre este comportamento termodinâmico e a busca pelo máximo/mínimo global de um problema de otimização discreto. Segundo esses autores, a cada iteração, a função objetivo gera valores para duas soluções, a atual e uma escolhida, que são comparadas. Soluções melhores que a atual são sempre aceitas, enquanto que uma fração das soluções piores que a atual são aceitas na esperança de se escapar de um mínimo/máximo local, na busca pelo mínimo/máximo global. Ainda, segundo [Hillier e Lieberman 2006], os parâmetros mais adequados para uma dada aplicação só podem ser obtidos por experimentação.

Conforme [Souza 2005], a metaheurística *Simulated Annealing* fundamenta-se em uma analogia com a termodinâmica, ao simular o resfriamento de um conjunto de átomos aquecidos, operação conhecida como recozimento. Um processo que consiste em aquecer um metal até o ponto de fusão e então resfriá-lo, lentamente, permitindo que as moléculas alcancem uma configuração de baixa energia e formem uma estrutura cristalina, livre de defeitos. Se o resfriamento for suficientemente lento, a configuração final resulta em um sólido com alta integridade estrutural.

[Souza 2005] relata que, esta técnica começa sua busca a partir de uma solução inicial qualquer. O procedimento principal consiste em um loop que gera aleatoriamente, em cada iteração, um único vizinho s' da solução corrente s . Considerando um problema de minimização, seja Δ a variação de valor da função objetivo ao mover-se para uma solução vizinha candidata, isto é, $\Delta = f(s') - f(s)$. O método aceita o movimento e a solução vizinha passa a ser a nova solução corrente se $\Delta < 0$. Caso $\Delta \geq 0$ a solução vizinha candidata também poder ser aceita, mas neste caso, com uma probabilidade $e^{-\Delta/T}$, onde T é um parâmetro do método, chamado de temperatura e que regula a probabilidade de se aceitar soluções de pior custo. A temperatura T assume, inicialmente, um valor elevado T_0 . Após um número fixo de iterações (o qual representa o número de iterações necessárias para o sistema atingir o equilíbrio térmico em uma dada temperatura), a temperatura é gradativamente diminuída por uma razão de resfriamento α , tal que $T_k \leftarrow \alpha \times T_{k-1}$, sendo $0 < \alpha < 1$.

A seguir é apresentada a estrutura adotada para a aplicação da metaheurística *Simulated Annealing* ao problema de sequenciamento de painéis. As estruturas utilizadas são baseadas no trabalho de [Gomes Júnior *et al.* 2005].

4.1. Representação de uma solução

Uma solução para o PSP é representada por um vetor de números inteiros. Neste vetor, os números inteiros positivos representam os *jobs* a serem processados e os números inteiros negativos representam o início de uma série e a realização de uma operação de *setup*. A ordem que os valores aparecem neste vetor representam a ordem de processamento dos *jobs* e os valores negativos representam o tempo máximo entre dois *setups* consecutivos. Por exemplo, na solução $S = \{-528, 2, 4, 5, 6, -528, 1, 3, 7\}$ há duas séries, cujo tempo máximo de processamento destas séries é 528, e a primeira série começa pelo processamento do *job* 2, depois o *job* 4 e assim sucessivamente.

4.2. Determinação da Solução Inicial

A solução inicial para o problema é obtida pela heurística das economias de Clarke e Wright. Adotou-se esta heurística para geração da solução inicial para o PSP, pela similaridade entre o PSP e o problema de roteamento de veículos.

A heurística de Clarke e Wright, também conhecida como heurística das economias tem como objetivo, segundo [Ballou 2006], minimizar a distância total percorrida por todos os veículos e indiretamente minimizar o número de veículos. Este método começa com um veículo atendendo um cliente e retornando ao depósito. Em seguida, são feitas todas as possíveis combinações entre duas rotas de modo que um veículo possa ser eliminado e o custo da viagem reduzido. Isto é, deve ser calculada a economia S_{ij} entre todos os pares (i, j) de clientes, onde i é um cliente de uma extremidade de uma rota e j é um cliente de uma extremidade de uma outra rota, conforme equação (10).

$$S_{ij} = c_{i0} + c_{j0} - c_{ij} \quad (10)$$

É importante observar que as combinações de rotas são feitas apenas entre os clientes das extremidades das rotas. Além disso, só podem ser combinadas rotas que atendam às restrições do problema. Calculadas todas as possíveis combinações (tarefa que é executada uma única vez), é realizada aquela combinação que produz a maior economia possível satisfazendo, naturalmente, as restrições estabelecidas.

4.3. Estrutura de Vizinhaça

A estrutura de vizinhaça adotada foi a mesma estrutura adotada por [Gomes Júnior et al. 2005]. Esta estrutura é apresentada no quadro 1. Nesse quadro, a primeira estrutura é definida pela troca de ordem de execução entre os *jobs* 2 e 6 (troca *inter* séries), a segunda estrutura é definida pela troca de ordem de execução entre os *jobs* 2 e 3 (troca *intra* séries), a terceira estrutura é definida pela mudança da posição do *job* 2 na primeira série (realocação *inter* séries) e a quarta estrutura é definida pela mudança da posição e da série do *job* 2 (realocação *intra* séries).

Quadro 1: Exemplos de Estruturas de Vizinhaça para o algoritmo *Simulated Annealing*

Movimento	Solução S	Solução S'
Troca <i>inter</i> séries	-528, 2, 4, 5, 6, -528, 1, 3, 7	-528, 6 , 4, 5, 2 , -528, 1, 3, 7
Troca <i>intra</i> séries	-528, 2, 4, 5, 6, -528, 1, 3, 7	-528, 3 , 4, 5, 6, -528, 1, 2 , 7
Realocação <i>inter</i> séries	-528, 2, 4, 5, 6, -528, 1, 3, 7	-528, 4, 5, 2 , 6, -528, 1, 3, 7
Realocação <i>intra</i> séries	-528, 2, 4, 5, 6, -528, 1, 3, 7	-528, 4, 5, 6, -528, 1, 2 , 3, 7

4.4. Função de Avaliação

A função de avaliação de uma solução S para o PSP é dada pela equação (11). Nesta equação, a primeira parcela representa a função objetivo para o PSP, $f_1(s)$ representa o tempo total que excedeu o limite de tempo máximo entre dois *setups* consecutivos e β representa um

fator de penalidade para o excesso de tempo para uma série. O valor de β foi determinado pelo somatório dos tempos de execução de todos os *jobs*.

$$f(s) = \left(\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij} - h \right) + \beta f_1(s) \quad (11)$$

4.5. Algoritmo *Simulated Annealing*

A figura 1 apresenta o algoritmo *Simulated Annealing* (SA) usado para resolver o PSP. Nessa figura, $N(s)$ representa os possíveis vizinhos da solução S . O procedimento descrito na figura 1 inicia com uma solução inicial, gerada conforme descrito na seção 4.2, e vai melhorando a solução a cada iteração. O procedimento finaliza quando a temperatura corrente T for igual a temperatura final T_f .

No início do método há uma chance maior para escapar de mínimos locais e, à medida que T aproxima-se de T_f , o algoritmo comporta-se como um método de descida, uma vez que diminui a probabilidade de se aceitar movimentos de piora, pois se $T \rightarrow 0$ implica que $e^{-\Delta/T} \rightarrow 0$. [Gomes Júnior *et al.* 2005]

```

Procedimento SA(f(.), N(.),  $\alpha$ , SAmax, T0, Tf, s)
1.  s* ← s;    { melhor solução obtida até então }
2.  IterT ← 0; { Número de iterações na temperatura T }
3.  T ← T0;  { Temperatura Corrente }
4.  enquanto (T > Tf) faça
5.      enquanto (IterT < SAmax) faça
6.          IterT ← IterT + 1;
7.          Gere um vizinho qualquer s' ∈ N(s);
8.          Δ = f(s') - f(s);
9.          se (Δ < 0)
10.             então
11.                 s ← s';
12.                 se (f(s') < f(s*)) então s* ← s';
13.             senão
14.                 Escolha x ∈ [0, 1];
15.                 se (x < e-Δ/T) então s ← s';
16.             fim-se;
17.         fim-enquanto;
18.         T ← α × T;
19.         IterT ← 0;
20.     fim-enquanto;
21.     s ← s*;
22.     Retorne s;
fim SA-A;
    
```

Figura 1: Algoritmo *Simulated Annealing*. Fonte: [Gomes Júnior *et al.* 2005]

Para aplicação do algoritmo faz-se necessário quatro parâmetros de controle: temperatura inicial (T_0); fator de redução da temperatura (α); número máximo de iterações sem melhora em uma dada temperatura (SA_{max}) e temperatura final (T_f).

Estes parâmetros de controle foram definidos experimentalmente. Dentre os diversos valores testados, os que apresentaram melhores resultados são apresentados na tabela 1 e serão utilizados nos testes computacionais da heurística.

5. Apresentação e Análise dos Resultados Computacionais

O sistema computacional proposto foi desenvolvido em linguagem C, utilizando o compilador Dev C++ versão 5.9.2, e executado em um computador Pentium(R) Dual-Core CPU E5500 @2.80GHz 2.80 GHz, com memória RAM de 3,00Gb, sob plataforma *Windows 7* de 64 bits.

Tabela 1: Valores Definidos para Parâmetros Iniciais

Parâmetros	Valores Definidos Após a Análise Estatística
Temperatura Inicial	1000
Fator de Redução	0,999
Número máximo de Iterações sem melhora	$10 \times n$
Temperatura Final	0,005

As instâncias-testes utilizadas no sistema computacional desenvolvido foram gentilmente cedidas por [De Souza *et al.* 2016]. Foram utilizadas 96 instâncias nos testes computacionais. Estas instâncias foram geradas a partir do problema de sequenciamento encontrado pela ESB. Das 96 instâncias, 48 instâncias contêm de 11 a 24 *jobs* a serem processadas e as outras 48 instâncias contêm de 54 a 72 *jobs* a serem processadas. As instâncias menores correspondem de meio dia a um dia de produção e as instâncias maiores correspondem de dois a três dias de produção. Para mais detalhes de como as instâncias foram elaboradas ver [De Souza *et al.* 2016].

Cada uma das 96 instâncias foi executada 20 vezes, utilizando-se diferentes sementes para a geração de números aleatórios.

As soluções obtidas pela heurística SA foram comparadas com os resultados obtidos pela empresa e com os resultados obtidos pela resolução do modelo de PLIM apresentado na seção 3. Para resolver o modelo matemático utilizou-se o *software* de otimização CPLEX 12.6 em sua configuração padrão. Estipulou-se um tempo de 7200 segundo para obtenção da solução ótima pelo CPLEX.

A tabela 2 apresenta os resultados para as instâncias menores (IRM01 a IRM48). A primeira coluna desta tabela apresenta a instância resolvida, a segunda coluna o número presente na instância, a terceira coluna (CE) o custo da empresa, a quarta coluna (CM) o custo encontrado pela resolução do modelo de PLIM, a quinta coluna (TMM) o tempo necessário para obtenção da solução ótima pelo modelo de PLIM (em segundos), a sexta coluna (CH) apresenta a melhor solução encontrada pela heurística SA dentro das vinte execuções, a sétima coluna (TMH) o tempo computacional médio para obtenção da solução pela heurística SA, e as duas últimas colunas apresentam a diferença percentual entre a solução gerada pela heurística e as soluções apresentadas pela empresa (d_1) e pelo modelo de PLIM (d_2), respectivamente. As diferenças percentuais são calculadas pelas equações (12) e (13), respectivamente.

$$d_1 = \frac{(CE - CH)}{CE} \times 100 \quad (12)$$

$$d_2 = \frac{(CM - CH)}{CM} \times 100 \quad (13)$$

Observando a tabela 2, nota-se que há muita possibilidade de melhora no processo manual adotado pela ESB. Foi possível reduções de até 97,39% dos custos nas instâncias testadas. Em relação ao custo apresentado pela empresa, apenas 6 das 48 instâncias apresentaram reduções inferiores a 10%. Em 50% das instâncias (24 instâncias) a redução foi acima de 50%. O tempo médio para execução da heurística SA foi de 14,3 segundos com desvio padrão de 7,4 segundos. Em apenas duas instâncias (IRM29 e IRM40), a heurística SA não conseguiu encontrar a solução ótima. Apesar disto, a diferença percentual foi bem pequena (0,16 e 0,17%, respectivamente).

A tabela 3 apresenta os resultados da heurística SA para as instâncias maiores (IR01 a IR48). Sua estrutura é idêntica à da tabela 2. Em três das 48 instâncias (IR03, IR30 e IR45) testadas não foi possível obter a solução ótima pelo CPLEX, pois não houve memória suficiente para obtenção desta solução.

Tabela 2: Resultados das instâncias reais menores com o método heurístico

Instância	Nº Jobs	CE	CM	TMM (s)	CH	TMH(s)	d ₁ (%)	d ₂ (%)
IRM01	12	6.280	6.280	1,00	6.280	5,43	0	0,00
IRM02	12	6.554	6.554	0,00	6.554	5,41	0	0,00
IRM03	12	27.708	6.306	0,00	6.306	5,41	-77,24	0,00
IRM04	12	27.178	12.336	0,00	12.336	5,4	-54,61	0,00
IRM05	11	37.026	16.691	0,00	16.691	4,49	-54,92	0,00
IRM06	11	46.500	18.464	1,00	18.464	4,52	-60,29	0,00
IRM07	12	50.929	18.587	0,00	18.587	5,53	-63,5	0,00
IRM08	11	20.486	9.324	0,00	9.324	4,48	-54,49	0,00
IRM09	12	15.260	12.711	0,00	12.711	5,43	-16,7	0,00
IRM10	12	6.218	162	1,00	162	5,44	-97,39	0,00
IRM11	12	13.020	9.684	0,00	9.684	5,43	-25,62	0,00
IRM12	12	11.051	6.290	0,00	6.290	5,4	-43,08	0,00
IRM13	20	39.262	18.438	0,00	18.438	17,38	-53,04	0,00
IRM14	24	61.018	15.368	1,00	15.368	27,04	-74,81	0,00
IRM15	22	17.392	13.331	1,00	13.331	22,17	-23,35	0,00
IRM16	21	7.714	6.192	0,00	6.192	19,98	-19,73	0,00
IRM17	18	38.152	16.635	1,00	16.635	13,71	-56,4	0,00
IRM18	20	55.467	23.832	0,00	23.832	17,42	-57,03	0,00
IRM19	11	4.199	1.804	0,00	1.804	4,48	-57,04	0,00
IRM20	19	22.297	12.057	1,00	12.057	15,43	-45,93	0,00
IRM21	11	37.870	24.536	0,00	24.536	4,49	-35,21	0,00
IRM22	23	37.669	21.746	0,00	21.746	24,27	-42,27	0,00
IRM23	17	43.209	22.874	1,00	22.874	11,81	-47,06	0,00
IRM24	12	6.554	6.554	0,00	6.554	5,4	0	0,00
IRM25	24	14.439	14.439	0,00	14.439	27,17	0	0,00
IRM26	16	28.703	24.199	1,00	24.199	11,2	-15,69	0,00
IRM27	19	20.024	19.906	0,00	19.906	15,43	-0,59	0,00
IRM28	17	32.164	17.433	0,00	17.433	11,76	-45,8	0,00
IRM29	21	33.956	12.438	1,00	12.458	20,25	-63,31	0,16
IRM30	18	23.662	22.533	0,00	22.533	13,86	-4,77	0,00
IRM31	21	72.003	29.028	0,00	29.028	19,69	-59,69	0,00
IRM32	19	29.474	25.015	1,00	25.015	15,7	-15,13	0,00
IRM33	19	33.297	22.300	0,00	22.300	15,43	-33,03	0,00
IRM34	22	54.465	26.376	0,00	26.376	21,93	-51,57	0,00
IRM35	21	28.900	22.192	1,00	22.192	19,83	-23,21	0,00
IRM36	21	70.425	31.791	0,00	31.791	19,52	-54,86	0,00
IRM37	20	30.562	21.680	0,00	21.680	17,54	-29,06	0,00
IRM38	23	103.968	36.589	0,00	36.589	24,53	-64,81	0,00
IRM39	20	99.229	47.901	1,00	47.901	17,61	-51,73	0,00
IRM40	24	32.051	18.716	0,00	18.747	27,49	-41,51	0,17
IRM41	24	51.986	24.399	2,00	24.399	27,21	-53,07	0,00
IRM42	20	60.527	25.507	0,00	25.507	17,63	-57,86	0,00
IRM43	21	20.136	14.459	1,00	14.459	19,69	-28,19	0,00
IRM44	21	92.011	38.020	0,00	38.020	19,8	-58,68	0,00
IRM45	19	43.386	23.474	0,00	23.474	15,44	-45,89	0,00
IRM46	22	41.130	16.880	1,00	16.880	21,98	-58,96	0,00
IRM47	17	23.981	9.206	0,00	9.206	11,9	-61,61	0,00
IRM48	14	56.808	24.683	1,00	24.683	7,83	-56,55	0,00

Verifica-se que também nas instâncias maiores, houve uma considerável redução de custos. Em 11 das 48 instâncias, houve uma melhora acima de 50% em relação à soluções obtidas pela empresa, sendo que em 47 das 48 instâncias houve melhora superior a 10%. O tempo computacional médio para resolução do PSP pela heurística SA foi de 304,0 segundos com desvio padrão de 54,9 segundos. O desvio percentual médio em relação à solução obtida pelo de PLIM foi de 0,90% com desvio padrão de 1,4%. Em 16 das 48 instâncias a solução ótima foi encontrada. O maior desvio percentual em relação à solução ótima foi de 6,72%. Apenas em 3 instâncias o desvio percentual em relação à solução ótima foi superior a 3%.

Pode-se perceber que a heurística SA apresentou bons resultados em relação à solução ótima e à solução da empresa em ambos os conjuntos de instância. Isto comprova que a heurística

desenvolvida é bastante eficiente, apresentando bons resultados em tempo computacionais hábeis ao processo de tomada de decisão, desta forma podendo ser facilmente aplicada na prática.

Tabela 3: Resultados das instâncias reais maiores com o método heurístico

Instância	Nº Jobs	CE	CM	TMM (s)	CH	TMH(s)	d ₁ (%)	d ₂ (%)
IR01	56	68.254	44.079	26	44.808	224,86	-34,35	1,65
IR02	56	75.018	27.771	114	27.771	224,97	-62,98	0,00
IR03	67	31.707	-	-	28.316	361,3	-10,69	-
IR04	57	98.422	54.950	25	55.563	235,15	-43,55	1,12
IR05	54	39.647	31.495	2	31.679	204,32	-20,10	0,58
IR06	57	72.525	48.115	5	48.349	234,94	-33,33	0,49
IR07	66	66.043	46.163	8	46.163	345	-30,10	0,00
IR08	65	94.119	66.019	417	66.293	330,99	-29,56	0,42
IR09	65	76.538	48.968	9	49.447	331,09	-35,40	0,98
IR10	65	78.880	64.378	5	64.770	331,4	-17,89	0,61
IR11	59	39.444	32.738	40	32.738	257,28	-17,00	0,00
IR12	65	104.264	55.174	19	57.410	331,52	-44,94	4,05
IR13	63	58.885	40.895	10	40.895	305,03	-30,55	0,00
IR14	60	87.026	42.270	9	42.270	270,01	-51,43	0,00
IR15	68	65.315	43.793	970	43.793	374,35	-32,95	0,00
IR16	62	58.844	54.917	219	55.101	293,26	-6,36	0,34
IR17	59	169.461	64.401	5	64.401	261,67	-62,00	0,00
IR18	56	69.196	37.413	9	37.413	223,57	-45,93	0,00
IR19	66	89.619	53.233	5	53.310	344,55	-40,51	0,14
IR20	68	110.386	66.899	18	67.103	373,25	-39,21	0,30
IR21	66	102.335	48.965	25	49.065	344,46	-52,05	0,20
IR22	66	85.356	62.171	119	63.118	351,75	-26,05	1,52
IR23	65	228.973	99.339	5	103.709	330,55	-54,71	4,40
IR24	63	73.715	51.398	5	51.702	304,11	-29,86	0,59
IR25	59	194.953	89.718	10	89.935	259,01	-53,87	0,24
IR26	59	144.340	89.750	3	90.687	258,15	-37,17	1,04
IR27	63	74.543	42.117	46	42.159	304,7	-43,44	0,10
IR28	58	117.023	48.752	8	48.865	244,83	-58,24	0,23
IR29	64	75.232	39.370	772	39.934	318,22	-46,92	1,43
IR30	72	132.626	-	-	48.662	437,68	-63,31	-
IR31	67	67.331	51.732	32	51.748	359,18	-23,14	0,03
IR32	70	183.146	91.316	4	97.448	403	-46,79	6,72
IR33	63	156.766	81.093	10	81.784	304,78	-47,83	0,85
IR34	55	54.315	48.076	5	48.076	214,18	-11,49	0,00
IR35	64	82.450	50.621	77	51.066	318,13	-38,06	0,88
IR36	64	117.992	57.051	12	59.258	317,84	-49,78	3,87
IR37	68	118.610	62.833	5	62.833	375	-47,03	0,00
IR38	60	117.113	61.039	2	61.039	267,76	-47,88	0,00
IR39	68	164.466	83.750	19	86.010	375,04	-47,70	2,70
IR40	66	162.261	89.378	233	89.915	345,23	-44,59	0,60
IR41	63	79.541	60.228	6	60.228	304,67	-24,28	0,00
IR42	66	77.821	45.076	317	46.017	344,95	-40,87	2,09
IR43	66	97.360	42.716	18	42.771	344,68	-56,07	0,13
IR44	61	138.622	50.131	18	50.502	283,55	-63,57	0,74
IR45	61	70.412	-	-	32.660	281,28	-53,62	-
IR46	60	53.000	45.384	15	45.384	267,98	-14,37	0,00
IR47	54	47.522	36.930	136	37.396	203,35	-21,31	1,26
IR48	60	99.794	50.889	4	51.003	268,32	-48,89	0,22

6. Conclusões

Este trabalho apresentou uma heurística eficiente, baseado na metaheurística *Simulated Annealing*, para resolver o problema de sequenciamento de painelas no setor de lingotamento contínuo de uma siderúrgica.

O método apresentado busca auxiliar no processo de tomada de decisão. O método foi aplicado para resolver 96 instâncias-teste, geradas a partir de relatórios gerenciais de uma

empresa siderúrgica brasileira. Em pesquisa feita nas empresas siderúrgicas da região, não existem *softwares* que são capazes de avaliar as soluções propostas, visto isso, este trabalho trata-se de uma importante ferramenta para que as tomadas de decisões sobre a programação da produção na aciaria sejam mais adequadas, reduzindo assim os custos da programação.

Os resultados obtidos com o modelo se mostraram satisfatórios. Para todas as instâncias o sistema computacional apresentou solução igual ou inferior à solução apresentada pela empresa e pequenas diferenças percentuais em relação à solução ótima obtida pela resolução de um modelo de PLIM. Portanto, é possível perceber como a definição de um bom sequenciamento das pannels na máquina de lingotamento contínuo, gera um ganho significativo para a empresa.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer aos autores que cederam as instâncias utilizadas e à FAPEMIG pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Atighehchian, A., Bijari, M. e Tarkesh, H.** (2009). A novel hybrid algorithm for scheduling steel-making continuous casting production, *Computers & Operations Research*, 36(8), 2450–2461.
- Ballou, R.** (2006) *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Planejamento, Organização e Logística Empresarial*. Bookman, São Paulo.
- Bellabdaoui, A. e Teghem, J.** (2006). A mixed-integer linear programming model for the continuous casting planning. *International Journal of Production Economics*, 104(2), 260-270.
- De Souza, M. C., Gomes Júnior, A. C., Bretas, A. M. C. e Ravetti, M. G.** (2016). Models for scheduling charges in continuous casting: application to a Brazilian steel plant. *Optimization Letters*, 10, 667-683.
- Gomes Jr., A. C., Souza, M. C., Bretas, A. M. C., Ravetti, M. G.** (2014). Modelos de Programação Linear Inteira Mista para o problema de agrupamento de pedidos e sequenciamento de pannels na aciaria: um estudo de caso em uma siderúrgica brasileira. In *Anais do XLVI SBPO*, p. 1472-1483, Salvador-BA.
- Gomes Jr., A. C., Souza, M. J. e Martins, A. X.** (2005). Algoritmos Simulated Annealing eficientes para resolução do problema de roteamento de veículos com janela de tempo. In *Anais do XXXVII SBPO*, p. 1270-1281, Gramado-RS.
- Hillier, F. S., Lieberman, G. J.** (2006). *Introdução à pesquisa operacional*. McGraw-Hill, São Paulo.
- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr., C. D., Vecchi, M. P.** (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, v. 220, n. 4598, p. 671-680.
- Lustosa, L.J., De Mesquita, M. A., Oliveira, R. J., Quelhas, O.** (2008). *Planejamento e controle da produção*. Elsevier Brasil. Rio de Janeiro.
- Pan, Q., Wang, L., Mao, K., Zhao, J., Zhang, M.** (2013). An effective artificial bee colony algorithm for a real-world hybrid flowshop problem in steelmaking process. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, p. 307–322.
- Souza, M. J. F.** (2005). Inteligência Computacional para Otimização. Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional>. Acessado: 2016-04-14.
- Tang, L. X. e Wang, G. S.** (2008). Decision support system for the batching problems of steelmaking and continuous-casting production. *Omega*, 36, 976-991.
- Tang, L., Liu, J., Rong, A. e Yang, Z.** (2001). A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production. *European Journal of Operational Research*, 133, 1-20.