

Minimizando *makespan* e custo de energia em um problema de sequenciamento em máquinas paralelas não relacionadas

Julio Cesar Evaristo Moreira Pinto *
Luciano Perdigão Cota ** Frederico Gadelha Guimarães ***
Marcone Jamilson Freitas Souza ****

* Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale, MG, (e-mail: julio.pinto@aluno.ufop.edu.br)

** Instituto Tecnológico Vale, MG, (e-mail: luciano.p.cota@itv.org)

*** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, (e-mail: fredericoguimaraes@ufmg.br)

**** Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, (e-mail: marcone@ufop.edu.br)

Abstract: This paper addresses a variation on the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times. The problem addressed considers the existence of variable electricity tariffs along the planning horizon and the objective is to minimize the weighted sum of the normalized values of *makespan* and total energy cost. To solve it, a time-indexed mixed integer linear programming formulation was developed. To test it, instances were created with a maximum of 8 jobs and 4 machines and a planning horizon of 144 10-minute intervals totaling one day. The formulation was validated using the CPLEX solver with two different tariff modes.

Resumo: Este trabalho trata uma variação do problema de máquinas paralelas não relacionadas com tempos de preparação dependentes da sequência. No problema tratado considera-se a existência de tarifas de energia variáveis ao longo do horizonte de planejamento e o objetivo é minimizar a soma ponderada dos valores normalizados de *makespan* e do custo total de energia elétrica. Para resolvê-lo, foi desenvolvida uma formulação de programação linear inteira mista indexada no tempo. Para testá-lo, foram criadas instâncias com um máximo de 8 tarefas e 4 máquinas e um horizonte de planejamento de 144 intervalos de 10 minutos, totalizando um dia. A formulação foi validada utilizando-se o resolvidor CPLEX com duas modalidades tarifárias diferentes.

Keywords: Parallel machines; Scheduling; Mathematical programming; Time-indexed mathematical formulation.

Palavras-chaves: Máquinas paralelas; Sequenciamento; Formulação matemática indexada no tempo.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta uma formulação de programação matemática indexada no tempo para uma variação do problema de sequenciamento em máquinas paralelas com tempos de preparação dependentes da sequência (UPMSP-ST, das iniciais em inglês de *Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem with Sequence-Dependent Setup Times*). Na variante considerada, os custos de energia são variáveis ao longo do horizonte de planejamento e o objetivo é minimizar a soma ponderada do tempo de execução de todas as tarefas, chamado de *makespan*, e do custo total de energia.

De acordo com Pinedo (2008), problemas de sequenciamento buscam determinar a melhor forma de se alocar

recursos limitados ao longo de um horizonte de tempo. A grande importância deste problema no meio industrial se deve ao fato de sua solução impactar diretamente na melhor disposição dos recursos, como ocorre com a minimização do *makespan*, ou nos custos produtivos, como é feito pela minimização do custo total de energia. Em vista disso, este tipo de problema é encontrado nos mais diversos tipos de indústrias, como a química, de produção de objetos plásticos, de usinagem de peças e de carga e descarga de caminhões em operações do tipo *cross-docking* (Liao et al., 2014; Sinan Gurel, 2007; Song et al., 2015).

A minimização do custo total de energia justifica-se pelo fato de a energia ser um dos principais insumos produtivos nos sistemas industriais. Segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica, produzido pela EPE (2017), o setor

industrial é o maior consumidor setorial de energia elétrica do Brasil, sendo responsável por 35,5% do total de energia elétrica produzida. Nesse sentido, é de grande importância que a modelagem do problema considere o custo de energia variável ao longo do dia, pois os grandes consumidores recebem energia em média ou alta tensão e, geralmente, celebram contratos de fornecimento de energia em alguma modalidade horossazonal (ANEEL, 2010). A tarifação horossazonal caracteriza-se por apresentar tarifas diferentes para a época do ano e para o horário de ponta do sistema, período de 3 horas diárias consecutivas, exceto domingos e feriados, no qual se concentra a maior parte da carga demandada pelos consumidores. Este modo de tarifação tem como objetivo estimular o deslocamento de cargas para outros horários do dia, de forma a evitar a expansão desnecessária dos sistemas de geração, transmissão e distribuição.

O objetivo da formulação desenvolvida neste trabalho é o de reduzir os custos produtivos juntamente com o tempo necessário para concluir as tarefas. A minimização do custo total de energia se justifica pelo fato de que a redução da quantidade de energia pode acarretar uma elevação dos custos de produção se as tarefas forem alocadas em um horário em que a tarifa de energia seja mais cara.

O restante deste trabalho está organizado como segue. Na Seção 2 o problema é caracterizado. Na Seção 3 é feita uma revisão bibliográfica acerca do problema de sequenciamento em máquinas paralelas não relacionadas com tempos de preparação dependentes da sequência. Na Seção 4 o modelo matemático proposto é apresentado e na Seção 5, os resultados computacionais dos testes realizados são apresentados e analisados. Finalmente, na Seção 6 o trabalho é concluído e são apresentadas perspectivas para trabalhos futuros.

2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de sequenciamento em máquinas paralelas não relacionadas com tempos de preparação dependentes da sequência (UPMSP-ST) tem as seguintes características:

- Há um conjunto N de n tarefas, um conjunto M de m máquinas e um conjunto L de o diferentes modos de operação. Cada modo de operação $l \in L$ implica em uma velocidade de processamento v_l e um consumo de energia;
- Cada máquina $i \in M$ é independente e paralela, ou seja, o tempo de processamento de cada tarefa é diferente para cada máquina, dependendo apenas do modo de operação escolhido;
- Existe um conjunto $H = \{0, \dots, hl\}$ de instantes de tempo em que cada tarefa pode ser inicializada;
- Todas as tarefas estão disponíveis para serem processadas no início do horizonte de planejamento $h = 0$;
- Cada tarefa $j \in N$ deve ser alocada a uma única máquina $i \in M$;
- O tempo para processar uma tarefa $j \in N$ em uma máquina $i \in M$ é chamado de p_{ij} ;
- Existe um tempo de preparação S_{ijk} para executar a tarefa $k \in N$ após a tarefa $j \in N$ na máquina $i \in M$;
- Cada máquina $i \in M$ tem uma potência π_i na velocidade nominal de operação;

- Para cada modo de operação $l \in L$, existe um fator multiplicador $1/v_l$ da velocidade, fazendo com que o tempo de processamento seja $\frac{1}{v_l}p_{ij}$;
- Para cada modo de operação $l \in L$, existe um fator multiplicador, λ_l , da potência da máquina. Esse fator é necessário para calcular a energia consumida pela máquina;
- Dentro do horizonte de tempo, existem dois instantes definidos para início e término do horário de ponta (*peak*), chamados $start_{op}$ e $finish_{op}$, respectivamente;
- Existe uma tarifa a ser aplicada para a energia elétrica consumida no horário fora de ponta, tax_{off} , e dentro do horário de ponta, tax_{on} ;
- C_{max} : define como objetivo do problema a minimização do *makespan*, que é o tempo de conclusão da última tarefa a ser processada;
- TEC: define como objetivo a minimização do custo total de energia (*Total Energy Cost*).

Seguindo a notação estabelecida por Graham et al. (1979), na qual os problemas de sequenciamento são descritos pela tripla $\alpha|\beta|\gamma$, em que α descreve o ambiente da máquina, β fornece características e detalhes do processamento das tarefas, e o campo γ descreve o objetivo a ser otimizado, o UPMSP-ST aqui tratado é descrito pela tripla $R_m|S_{ijk}|(C_{max}^{norm} + TEC^{norm})$. Nessa notação, R_m indica que as máquinas são paralelas e não relacionadas, S_{ijk} que há tempos de preparação entre as tarefas e $(C_{max}^{norm} + TEC^{norm})$ define que há um objetivo a ser atendido: a soma dos valores normalizados de *makespan* e do custo total de energia.

Ressalta-se que a minimização dos valores de *makespan* e custo total de energia são conflitantes, uma vez que, segundo Cota et al. (2018), a redução do *makespan* demanda o uso de velocidades de processamento mais altas e uma diminuição do consumo de energia requer o uso de velocidades mais baixas.

Os fatores multiplicadores de velocidade ($1/v_l$) e potência (λ_l) se relacionam com a velocidade de operação do seguinte modo:

$$\left\{ \begin{array}{ll} v_l = 1 \text{ e } \lambda_l = 1, & \text{velocidade e potência} \\ & \text{nominais de operação.} \\ 0 < v_l < 1 \text{ e } 0 < \lambda_l < 1, & \text{velocidade e potência} \\ & \text{abaixo dos nominais.} \\ v_l > 1 \text{ e } \lambda_l > 1, & \text{velocidade e potência} \\ & \text{acima dos nominais.} \end{array} \right. \quad (1)$$

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O sequenciamento de tarefas é uma atividade de importância fundamental na indústria de manufatura e serviços, pois o cumprimento de prazos de entrega de produtos e a finalização de atividades são estabelecidos em contratos, tendo o potencial de gerar grandes perdas caso não sejam cumpridos. Outro fator fortemente afetado pela atividade de sequenciamento é o uso eficiente dos recursos produtivos, pois uma execução de tarefas de modo econômico, aproveitando ao máximo máquinas, ferramentas e mão de obra, é capaz de estimular uma melhor alocação de investimentos (Pinedo, 2008). Dessa forma, em um ambiente de negócios altamente acirrado, o sequenciamento de

tarefas pode ser o fator determinante para o sucesso de um empreendimento.

Neste sentido, desde o século passado, o sequenciamento de tarefas tem sido largamente estudado. Iniciando formalmente com os trabalhos de Henry Gantt, cujos famosos gráficos são ainda hoje utilizados para apresentar as decisões relativas ao sequenciamento, passando pelo estabelecimento do rigor matemático da pesquisa operacional estabelecido na década de 1950 com trabalhos como o de Johnson (1953), o sequenciamento de tarefas é hoje um campo do conhecimento que desperta o interesse de vários pesquisadores, dada sua importância e aplicabilidade.

Os trabalhos de Sousa and Wolsey (1992) e Dyer and Wolsey (1990) são ainda hoje as bases para o estudo do sequenciamento de máquinas com variáveis indexadas no tempo. Os primeiros desenvolveram uma formulação de programação matemática em uma única máquina com tarefas sem possibilidade de interrupção e com variáveis indexadas no tempo. Dyer and Wolsey (1990), por sua vez, estudaram o processamento de tarefas em uma máquina, considerando datas de entrega, apresentando formulação de programação linear a partir das relaxações elaboradas.

A formulação matemática indexada no tempo desenvolvida por Rosa and Souza (2009) foi a base para este trabalho. Em sua pesquisa, Rosa and Souza (2009) abordaram o sequenciamento em uma máquina com tempos de preparação dependentes da sequência e janelas de entrega das tarefas, sendo os atrasos e antecipações penalizados. Além de desenvolver a formulação matemática, os autores também aplicaram métodos meta-heurísticos GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) ou procedimento de busca adaptativa gulosa aleatória) e POP (Princípio da Otimalidade Próxima) para determinar o horizonte de planejamento, que é um dos dados de entrada do modelo.

Liao et al. (2014) desenvolveram cinco algoritmos meta-heurísticos, sendo três variações da Otimização por Colônia de Formigas e duas variações do *Simulated Annealing*. Os autores comparam o desempenho dos métodos em duas aplicações diferentes: no sequenciamento de máquinas paralelas não relacionadas e no sequenciamento de entrada de caminhões com tempos de preparação dependentes da sequência numa aplicação do tipo *cross docking*.

O problema de sequenciamento em máquinas paralelas não relacionadas com tempos de preparação foi estudado por Avalos-Rosales et al. (2015), levando os autores a propor uma nova linearização para o *makespan*. Diversas formulações inteiras mistas foram desenvolvidas, bem como uma meta-heurística baseada no método *Multi-Start* para resolver instâncias de ordem média e grande.

Mansouri et al. (2016) estudaram o problema de sequenciamento em máquinas estabelecendo o critério explícito de minimização do consumo de energia. Na modelagem do problema, os autores consideraram a operação das máquinas em diferentes velocidades, levando a consumos de energia dependentes do modo de operação. Este trabalho pode ser considerado precursor no que se refere ao *green scheduling* – sequenciamento verde em tradução direta.

Ainda no contexto do *green scheduling*, Mansouri and Aktas (2016) aplicaram duas heurísticas construtivas e

um algoritmo genético multiobjetivo para o problema de *flowshop* no sequenciamento de duas máquinas com tempos de preparação dependentes da sequência. Os autores estabeleceram a minimização do consumo de energia como um critério de sustentabilidade e o de minimização do *makespan* como um critério de produtividade.

A pesquisa realizada por Cota et al. (2018) abordou o UPMSP-ST com os objetivos de minimizar simultaneamente o *makespan* e o consumo total de energia. Na modelagem do problema também foram utilizados modos de operação, conduzindo a diferentes consumos de energia. Além de utilizarem o método *Smart Pool* (Coelho et al., 2016) para encontrar soluções próximas à fronteira de Pareto.

4. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

A fim de possibilitar o cálculo e a minimização da soma ponderada dos valores normalizados do custo total de energia elétrica e do *makespan*, foi necessário determinar o custo de energia em cada instante de tempo ao longo do dia. Para tanto, tornou-se imperativo utilizar uma formulação matemática indexada no tempo, tendo como base o trabalho de Rosa and Souza (2009).

Os seguintes parâmetros foram utilizados para representar o problema, além daqueles apresentados na Seção 2:

- $Cost_{max}$: custo máximo de energia usado para normalização;
- Fator de multiplicação $\frac{10}{60}$: necessário para converter o valor de tempo (intervalos de 10 minutos) em horas.

Sejam as seguintes variáveis de decisão e auxiliares:

- x_{ijhl} : Variável binária que assume valor 1 se a tarefa j for alocada à máquina i no instante de tempo h e no modo de operação l , e valor 0, caso contrário;
- C_j : Tempo de conclusão da tarefa j ;
- PEC_{on} : Custo parcial de energia no horário de ponta - *Partial Energy Cost - on-peak*;
- PEC_{off} : Custo parcial de energia no horário fora de ponta - *Partial Energy Cost - off-peak*;

Assim, o problema pode ser modelado pelas Equações (2)-(8):

$$\min \left[\left(\frac{C_{max}}{h_l} \right) + \left(\frac{PEC_{on} + PEC_{off}}{Cost_{max}} \right) \right] \quad (2)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^o \sum_{h=0}^{hl - \lceil \frac{p_{ij}}{v_l} \rceil} x_{ijhl} = 1, \quad \forall j \in N \quad (3)$$

$$x_{ijhl} + \sum_{u=h}^{\min(h + \lceil \frac{p_{ij}}{v_l} \rceil + s_{ijk-1}, h_l)} \sum_{l_1=1}^o x_{ikul_1} \leq 1, \quad \forall i \in M, \quad (4)$$

$j \in N,$
 $k \in N,$
 $l \in L,$
 $j \neq k$

$$C_{\max} \geq x_{ijhl} \times \left[h + \left\lceil \frac{p_{ij}}{v_l} \right\rceil \right], \quad \forall i \in M, \quad (5)$$

$$j \in N, \\ h \in H, \\ l \in L$$

$$PEC_{on} \geq \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^o \frac{\lambda_i \times \pi_i \times 10}{60} \times tax_{on} \times \left\{ \sum_{h=0}^{start_{op}} x_{ijhl} \times \left[\max \left(0, \min \left(h + \frac{p_{ij}}{v_l} - 1, finish_{op} \right) - (start_{op} - 1) \right) \right] + \sum_{h=start_{op}}^{finish_{op}} x_{ijhl} \times \left[\min \left(h + \frac{p_{ij}}{v_l}, finish_{op} + 1 \right) - h \right] \right\} \quad (6)$$

$$PEC_{off} \geq \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^o \frac{\lambda_i \times \pi_i \times 10}{60} \times tax_{off} \times \left\{ \sum_{h=0}^{start_{op}} x_{ijhl} \times \left[\min \left(h + \frac{p_{ij}}{v_l}, start_{op} \right) - h + \max \left(0, h + \frac{p_{ij}}{v_l} - finish_{op} + 1 \right) \right] + \sum_{h=start_{op}}^{finish_{op}} x_{ijhl} \times \left[\max \left(0, h + \frac{p_{ij}}{v_l} - finish_{op} - 1 \right) \right] + \sum_{h=finish_{op}}^{hl} x_{ijhl} \times \left[\frac{p_{ij}}{v_l} \right] \right\} \quad (7)$$

$$x_{ijhl} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in M, j \in N, h \in H, \quad (8)$$

$$l \in L.$$

O objetivo do modelo desenvolvido é apresentado na Equação (2): a minimização da soma ponderada dos valores normalizados de *makespan* e custo total de energia elétrica. Neste modelo, cada tarefa pode ser alocada a apenas uma máquina, o que é garantido pelo conjunto de restrições (3). Cada máquina possui um conjunto de h_l intervalos de tempo em que as tarefas podem ser alocadas. As restrições (4) fazem com que o tempo de execução desta tarefa e o de preparação da tarefa posterior sejam reservados, não permitindo que nenhuma outra tarefa seja alocada nesse intervalo. É necessário ressaltar que esta restrição tem sua validade garantida apenas se os tempos de execução e de preparação respeitarem o critério da desigualdade triangular, conforme exposto por Rosa and Souza (2009). O valor do *makespan* é calculado por meio das restrições (5).

A Equação (6) calcula o custo da energia consumida no horário de ponta. Para esse cálculo, a equação pode ser dividida em duas partes. A primeira parte da equação calcula o custo de energia das tarefas que começam antes do início do horário de ponta e permanecem sendo executadas nesse intervalo. A segunda parte, por sua vez, calcula o custo da energia das tarefas que começam entre o início e o fim do horário de ponta e, portanto, são executadas em pelo menos parte desse intervalo.

O custo da energia no horário fora de ponta é calculado pela Equação 7, sendo dividida em três partes. A primeira delas calcula o custo da energia para tarefas que começam antes do início do horário de ponta. A segunda parte computa o custo das tarefas que se iniciam durante o horário de ponta e permanecem sendo executadas após seu término. Por fim, a terceira parte agrega o custo das tarefas que se iniciam após o fim do horário de ponta.

5. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Os experimentos computacionais foram realizados utilizando um computador com processador Intel Core i5, 3,10 GHz, 4 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 7. O modelo matemático foi resolvido com o uso do *software* IBM ILOG CPLEX, versão 12.5.

5.1 Geração de instâncias

Tendo em vista as peculiaridades do problema, foram criadas instâncias pequenas para testes com as seguintes características:

- Observância do critério da desigualdade triangular;
- Três modos de operação: rápido ($l = 1$), nominal ($l = 2$) e lento ($l = 3$);
- Horizonte de planejamento de um dia, dividido em 144 intervalos de 10 minutos, perfazendo os 1440 minutos;
- Número de máquinas igual a 4;
- Número de tarefas igual a 6 ou 8;
- Horário de ponta entre os intervalos de 108 minutos (18 horas) e 125 minutos (21 horas) – horário de ponta da região de concessão da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais).

A divisão do intervalo do dia em 144 intervalos de 10 minutos foi adotada devido ao elevado custo computacional para resolução do problema via a formulação de programação matemática. Nos testes realizados, foram consideradas a aplicação de duas modalidades tarifárias diferentes: a tarifa horossazonal azul e a verde.

5.2 Resultados do modelo na tarifa horossazonal azul

A tarifa horossazonal azul caracteriza-se por apresentar valores distintos para a energia consumida e para a potência demandada em horário de ponta e fora dele. Neste trabalho, somente a parcela de consumo de energia foi analisada. Assim, para os testes realizados na modalidade tarifária horossazonal azul, foram utilizados os valores da concessionária CEMIG no mês de abril de 2019, com os valores de R\$0,45959/kWh (horário de ponta) e R\$0,30488/kWh (horário fora de ponta).

Para esta modalidade tarifária, foram realizados testes com a minimização das seguintes grandezas: *makespan*, quantidade total de energia (TAE - *total amount of energy*), custo total de energia (TEC - *total energy cost* e soma ponderada dos valores normalizados de *makespan* e custo total de energia.

Na Figura 1 são apresentados os valores do custo total de energia para as quatro grandezas minimizadas. Pela análise do gráfico, percebe-se que a minimização do *makespan*

gera os maiores valores de custo de energia, uma vez que esta estratégia exige o uso de velocidades mais elevadas que aumentam o consumo de energia. A minimização do custo total de energia representa o limite inferior desta análise. Quando comparados os valores para a minimização do TEC e da soma ponderada dos valores normalizados, é possível verificar que a minimização da soma normalizada é capaz de levar o custo total de energia a valores próximos ao limite inferior sem penalizar o *makespan*. Também é importante notar que, para esta análise, a estratégia de minimização do TAE foi capaz de aproximar o custo de energia do seu valor mínimo, devido à relativa proximidade das tarifas de energia desta modalidade.

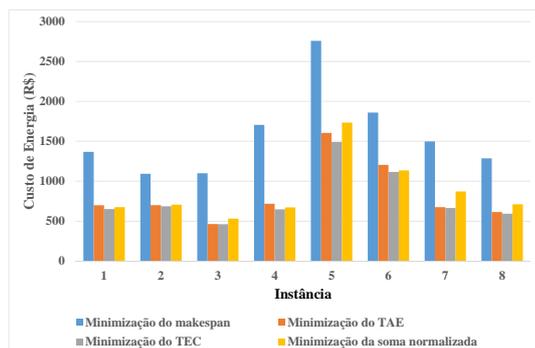


Figura 1. Comparação dos custos totais de energia elétrica para diferentes estratégias de minimização na modalidade tarifária horossazonal azul.

A análise do gráfico da Figura 2 evidencia o benefício causado pela estratégia de minimização da soma ponderada dos valores normalizados, pois quando se minimiza apenas os valores de TAE e TEC, o *makespan* alcança os valores máximos iguais ao fim do horizonte de planejamento - $C_{max} = 144$. Por outro lado, a minimização da soma normalizada é capaz de levar o custo total de energia para valores próximos do seu limite inferior sem aumentar demasiadamente o tempo total de execução das tarefas.

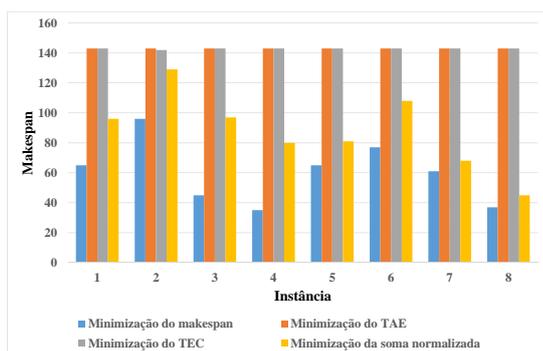


Figura 2. Comparação dos valores de *makespan* para diferentes estratégias de minimização na modalidade tarifária horossazonal azul.

5.3 Resultados do modelo na tarifa horossazonal verde

Esta seção apresenta os resultados da aplicação das tarifas da modalidade tarifária horossazonal verde. Novamente, foram aplicados os valores da concessionária CEMIG no mês de abril de 2019, cujos valores foram R\$1,54333/kWh no horário de ponta e R\$0,32282/kWh no horário fora de

ponta. Como é possível perceber pelos valores das tarifas, esta modalidade caracteriza-se por apresentar uma maior discrepância entre os valores quando comparados com os da tarifa horossazonal azul. As mesmas grandezas que foram minimizadas no teste da tarifa horossazonal azul também foram minimizadas neste experimento.

A Figura 3 apresenta os resultados da aplicação desta modalidade tarifária para as diferentes grandezas minimizadas. De forma geral, percebe-se um comportamento semelhante ao analisado no experimento anterior: a minimização da soma ponderada dos valores normalizados é capaz de levar o custo total de energia para valores próximos do seu limite inferior. Entretanto, quando comparados os valores da minimização do TAE e da soma normalizada, chega-se a uma economia de 43% para a quinta instância.

A significativa economia observada foi alcançada sem aumentar sobremaneira o *makespan*, assim como no teste anterior. O resultado obtido mostra que a abordagem desenvolvida neste trabalho torna-se mais relevante quando a diferença entre as tarifas dentro e fora do horário de ponta são maiores.

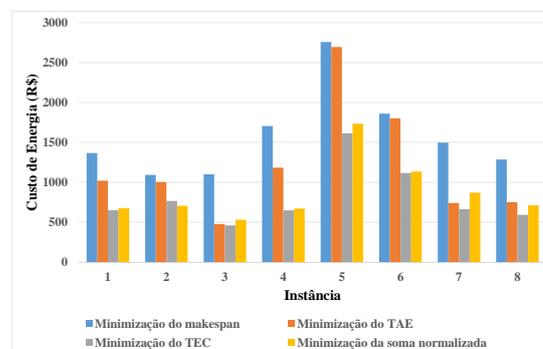


Figura 3. Comparação dos custos totais de energia elétrica para diferentes estratégias de minimização na modalidade tarifária horossazonal verde.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho tratou o problema de máquinas paralelas não relacionadas com tempos de preparação dependentes da sequência, com o objetivo de minimizar simultaneamente o *makespan* e o custo total de energia elétrica com tarifas variáveis ao longo do dia. Para resolvê-lo, foi desenvolvido um modelo de programação matemática indexado no tempo e foram criadas instâncias de pequeno porte com 4 máquinas e 6 ou 8 tarefas para serem realizadas ao longo de um horizonte de planejamento de 1 dia, com 144 intervalos de 10 minutos.

Foram realizados testes com duas modalidades tarifárias diferentes: horossazonal azul e verde. Em cada uma das modalidades tarifárias, 4 estratégias de minimização foram adotadas: do *makespan*, do TAE, do TEC e da soma ponderada dos valores normalizados de *makespan* e TEC.

Nos testes realizados com as tarifas da modalidade azul, foi observado que a estratégia de minimização da soma normalizada foi capaz de levar o custo total de energia para valores próximos do seu limite inferior sem provocar um grande impacto no *makespan*. Devido a esta modalidade apresentar uma menor diferença entre os valores

das tarifas, o resultado da economia, quando comparado com a estratégia de minimização do TAE, não foi muito significativa.

Por outro lado, quando da aplicação da modalidade tarifária horossazonal verde, cuja discrepância entre as tarifas é maior, foi observada uma significativa economia quando comparados os valores de custo total de energia para as estratégias de minimização do TAE e da soma normalizada, chegando a uma economia de 43%. Tal economia foi alcançada sem um aumento significativo do *makespan*, tornando claro o benefício desta abordagem para casos em que as tarifas apresentem grande diferença.

Portanto, a estratégia de minimização da soma ponderada dos valores normalizados de custo total de energia elétrica e *makespan* é uma alternativa a ser considerada, principalmente quando há uma discrepância grande entre os valores das tarifas, como é o caso da tarifa horossazonal verde. Assim, o modelo desenvolvido mostrou-se capaz de reduzir os custos produtivos, bem como de ajudar no planejamento operacional dos sistemas produtivos.

Como trabalhos futuros, propõe-se desenvolver um algoritmo heurístico, baseado em uma meta-heurística, para tratar instâncias de grande porte do problema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto, ao Instituto Tecnológico Vale e às agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG, pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANEEL (2010). Resolução normativa número 414. URL <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>.
- Avalos-Rosales, O., Angel-Bello, F., and Alvarez, A. (2015). Efficient metaheuristic algorithm and reformulations for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence and machine-dependent setup times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(9-12), 1705–1718.
- Coelho, V.N., Coelho, I.M., Coelho, B.N., Cohen, M.W., Reis, A.J., Silva, S.M., Souza, M.J., Fleming, P.J., and Guimarães, F.G. (2016). Multi-objective energy storage power dispatching using plug-in vehicles in a smart-microgrid. *Renewable Energy*, 89, 730–742.
- Cota, L.P., Coelho, V.N., Guimarães, F.G., and Souza, M.J.F. (2018). Bi-criteria formulation for green scheduling with unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times. *International Transactions in Operational Research*, 00, 1–22. doi:10.1111/itor.12566.
- Dyer, M.E. and Wolsey, L.A. (1990). Formulating the single machine sequencing problem with release dates as a mixed integer program. *Discrete Applied Mathematics*, 26(2-3), 255–270.
- EPE (2017). Anuário Estatístico de Energia Elétrica. Technical report, Ministério de Minas e Energia, Brasília.
- Graham, R.L., Lawler, E.L., Lenstra, J.K., and Rinnooy-Kan, A.H.G. (1979). Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: a Survey. In *Analys of Discrete Mathematics*, volume 5, 287–326.
- Johnson, S.M. (1953). Optimal Two - and Three-Stage Production Schedules with Setup Times Included. *Naval Research Logistics*, 10.
- Liao, T.W., Chang, P.C., Kuo, R.J., and Liao, C.J. (2014). A comparison of five hybrid metaheuristic algorithms for unrelated parallel-machine scheduling and inbound trucks sequencing in multi-door cross docking systems. *Applied Soft Computing Journal*, 21, 180–193.
- Mansouri, S.A. and Aktas, E. (2016). Minimizing energy consumption and makespan in a two-machine flowshop scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*, 67(9), 1135–1145.
- Mansouri, S.A., Aktas, E., and Besikci, U. (2016). Green scheduling of a two-machine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption. *European Journal of Operational Research*, 248(3), 772–788.
- Pinedo, M.L. (2008). *Scheduling*. Springer, New York, NY, 3 edition.
- Rosa, B.F. and Souza, M.J.F. (2009). Uma nova formulação de programação matemática indexada no tempo para uma classe de problemas de sequenciamento em uma máquina. In *Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2898–2909. Porto Seguro.
- Sinan Gurel, M.S.A. (2007). Scheduling parallel CNC machines with time/cost trade-off considerations. *Computers and Operations Research*, 34(9), 2774–2789.
- Song, Z., Schunnesson, H., Rinne, M., and Sturgul, J. (2015). Intelligent scheduling for underground mobile mining equipment. *PLoS ONE*, 10(6), 1–21.
- Sousa, J.P. and Wolsey, L.A. (1992). A time indexed formulation of non-preemptive single machine scheduling problems. *Mathematical Programming*, 54(1-3), 353–367.