



Ordonnancement et gestion de l'énergie : état de l'art

TIGANE Meriem^{a,b}, BOUDHAR Mourad^b
et DAHANE Mohammed^c

^aEcole Supérieure en Sciences Appliquées, Alger, Algérie.

^bRECITS Laboratory, USTHB, BP 32 Bab-ezzouar, Algiers, Algeria.

^cUniversité de Lorraine, LGIPM, 1 Route d'Ars Laquenexy,
CS65820, 57078, Metz, France.

mtigane@usthb.dz, mboudhar@usthb.dz,
mohammed.dahane@univ-lorraine.fr

Abstract: In recent decades, growing concerns about climate change and declining fossil fuel resources have increased the importance of the issue on energy consumption. Its importance is due to the fact that its use is constantly growing, which has an impact on the environment and the availability of energy resources. We consider scheduling problems in which the energy consumption is either a constraint or a criterion of optimization.

Keywords: Ordonnancement, énergie.

Résumé : Au cours des dernières décennies, les préoccupations croissantes sur le changement climatique et la diminution des ressources en énergie fossile ont augmenté l'importance de la question sur la consommation énergétique. Son importance est due au fait que son utilisation est en constante croissance, ce qui a un impact sur l'environnement et la disponibilité des ressources énergétiques. Nous considérons les problèmes d'ordonnancement considérant la consommation énergétique comme objectif à minimiser ou une contrainte.

Mots clés : Scheduling, energy.

1 Introduction

Avec la diminution des ressources en énergie non renouvelables et la demande de plus en plus croissante en énergie et malgré l'émergence de nouvelles ressources en énergie renouvelables, ces derniers ne peuvent satisfaire la demande mondiale. Et d'après le rapport sur l'énergie établi par International Energy Agency [21], son utilisation continuera à augmenter vu l'augmentation des besoins de la population mondiale. L'intérêt pour la gestion de l'énergie est devenu crucial.

Il existe quatre secteurs principaux consommant de l'énergie :

- Industriel qui couvre la fabrication de produits finis, l'exploitation minière, extraction de matières premières et la construction. L'énergie consommée dans ce secteur représente plus de 40% de la consommation totale [21].
- Domestique : Chauffage, électronique, électroménager, etc.
- Transports.
- Services tels que l'éclairage public.

L'énergie provenant de sources non renouvelables contribue à l'émission de gaz à effets de serre responsable du changement climatique.

Avec la croissance de la demande en énergie et les préoccupations écologiques, utiliser l'énergie plus efficacement est devenu primordial.

Afin de gérer la consommation d'énergie dans le milieu industriel, une connaissance approfondie de la consommation effective lors de toute la phase de production doit être établie. Plusieurs recherches ont été faites dans ce sens (voir Hu et al. [20], Kant and Sangwan [23], Li et al. [26]). Différentes stratégies ont été développées dans l'industrie afin de diminuer la consommation énergétique Pechmann and Schöler [36] :

- Utilisation de machines plus économiques.
- Coupures d'énergie pour réduire la demande d'énergie maximale.
- Prévisions des charges de l'énergie pour réduire les coûts.

Mais ces méthodes ne sont pas assez efficaces car leur impact sur l'énergie totale consommée est minime. Pour y remédier, on opte pour des méthodes et approches pour gérer la consommation énergétique qui interviennent lors de la production par une organisation intelligente de la production Chan et al. [10].

Plusieurs stratégies se rapportant à la phase de production dans le but de gérer l'énergie ont été mises en place [10] :

- Considérer la consommation d'énergie comme objectif et la productivité en contrainte

ou la productivité en objectif et la consommation d'énergie en objectif, ou considérer l'optimisation bi-objectif consommation d'énergie et productivité.

- La volatilité et la disponibilité de l'énergie : Utilisation de modèles statistiques et probabilistes, outils de gestion de risques et analyse de données dans les modèles où le coût énergétique n'est pas simple à prédire.
- Modélisation de la consommation d'énergie en variant les vitesses et sur différents sous-systèmes.

Nous présentons dans ce qui suit un état de l'art sur la gestion de l'énergie dans le milieu industriel.

2 Une machine

Mouzon [33] présente un algorithme MOGA (multiobjective genetic algorithms et un algorithme GRASP (greedy randomized adaptive search procedure) et une combinaison des deux algorithmes pour la minimisation du makespan et de l'énergie pour le problème $1|r_i, d_i|C_{max}, TEC$. Mouzon and Yildirim [34] proposent un modèle basé sur GRASP pour le problème $1|r_i, d_i|TEC, T_{max}$. Liu and Huang [28] présentent des algorithmes basés sur les métaheuristiques AMGA, NSGA-II pour le problème $1|r_i, d_i, w_i|TEC, T_{max}$.

En considérant que la vitesse de la machine est une fonction du temps et que la fonction puissance est une fonction convexe croissante, l'énergie consommée étant l'intégrale de la puissance par rapport au temps, Yao et al. [37] proposent un algorithme hors-ligne *YDS* en temps $O(n^3)$ pour le problème $1|r_i, d_i, pmtn|TEC$ et est prouvé optimal par Bansal and Pruhs [4], LI et al. [25] proposent un algorithme en temps $O(n^2)$ améliorant *YDS*. Yao et al. [37] ont aussi proposé deux algorithmes en ligne : *AVR* et *Optimal available*. En considérant que la fonction puissance est $P(s) = s^\alpha$ où $\alpha > 1$, Bansal et al. [6] proposent une classe d'algorithme en-ligne appelée *qOA*, Bansal et al. [5] proposent un algorithme en temps polynomial en utilisant l'algorithme ellipsoïde. Ils proposent aussi un algorithme en ligne *BKP*.

En considérant que la machine varie sa vitesse dans un ensemble de d vitesses discrètes, Li and Yao [24] proposent un algorithme hors ligne en temps $O(dn \log n)$ pour la minimisation d'énergie et prouvent qu'il est optimal pour un nombre d fixe de vitesses.

3 Machines parallèles

Bunde [8] montre que le problème $R_m||TEC$ est NP-difficile si les tâches ont des tailles différentes et propose un algorithme basé sur *IncMerge* lorsque les tailles sont identiques. Chan et al. [10] présentent un algorithme en-ligne *WPOOL* pour le problème $R_m|r_i, w_i, online, sleep|F_w, TEC$. Mouzon [33] présente un algorithme MOGA pour le

problème $R_m|r_i, d_i|C_{max}, TEC$. Che et al. [11] proposent un modèle mathématique continu mixte en nombre entiers pour le problème $R_m||TEC, C_{max}$. Moon et al. [32] proposent une heuristique basée sur l'algorithme génétique pour le problème $R_m|d_i|C_{max} * cost + TEC$. Cheng et al. [12], Ding et al. [14] étudièrent le problème $R_m|C_{max} < B|TEC$. Li et al. [27] étudièrent le problème $R_m|r_i, d_i|TEC$. Le même problème a été traité par Nicolo et al. [35] en ajoutant des contraintes de temps d'installation. Ferrer et al. [19] ont traité le problème $R_m|r_i, st|T_w, TEC, \sum s_{ijk}$.

En considérant des machines parallèles uniformes, Cataldo et al. [9] présentent une technique MPC (model predictive control) pour le problème de minisation de la consommation énergétique totale et maximisation de la productivité et Fang and Lin [18] proposent une optimisation par essaim particulier (OEP) pour minimiser le coût de la consommation énergétique et la pénalité.

En considérant que la vitesse des machine est une fonction du temps et que la fonction puissance est une fonction convexe croissante, l'énergie consommée étant l'intégrale de la puissance par rapport au temps, Albers and Antoniadis [1] prouvent que le problème $Q_m|r_i, d_i, powerdown, pmtn|TEC$ est NP-difficile. Baptiste et al. [7] proposent un algorithme hors-ligne polynomial en temps $O(n^5)$ et $O(n^4)$ dans le cas où les tâches sont de tailles identiques, Antoniadis et al. [2] proposent un FPTAS. En considérant des fonctions puissance convexes telles que $\frac{P(s)}{s}$ est aussi convexe, Irani et al. [22] proposèrent un algorithme hors ligne basé sur YDS et un algorithme en ligne basé sur AVR . Bampis et al. [3] présentent un algorithme hors-ligne 2-approché pour le problème $Q_m|r_i, d_i, prec|$.

4 Machines spécialisées

Liu et al. [29] appliquent l'algorithme d'optimisation multi-objectif NSGA-II pour le problème $F_m|w_i|T_w, TEC$. May et al. [31] proposent un algorithme génétique basé sur NSGA-II et SPEA-II pour le problème $J_m|power - down|C_{max}, TEC$.

Dai et al. [13] proposent un algorithme génétique modifié pour minimiser la consommation d'énergie et le makespan.

En considérant un système flow shop à m machines avec capacité de stockage intermédiaire illimitée, Masmoudi et al. [30] proposent deux programmes linéaire et non linéaire en nombre entier mixte pour résoudre le problème de minimisation du coût de production, coût de consommation électrique, coût de stockage ainsi que le coût de démarrage et de puissance requise.

En considérant que la vitesse des machines est variable, Escamilla et al. [15] proposent un algorithme génétique pour résoudre le problème de minimisation d'énergie et de makespan. Lorsque la capacité de stockage est illimité, Fang et al. [16] ont donné deux modèles mathématiques du problème et ont prouvé qu'il existe toujours un ordonnancement optimal sans délai. En considérant que l'ensemble des vitesses est discret, deux machines et sans stockage intermédiaire, Fang et al. [16] prouvent que le problème peut être transformé

en un problème du voyageur de commerce asymétrique. En considérant que l'ensemble des vitesses est continue $S = [0, s_{max}]$, deux machines sans stockage intermédiaire. La consommation de puissance d'une machine en exécutant un tâche est s^α , $\alpha > 1$, Fang et al. [16] prouvent que ce problème est un cas spécial du problème du voyageur de commerce asymétrique. Fang et al. [17] donnent deux formulations mathématiques pour le problème $F_m|E|C_{max}$ et prouvent qu'il existe toujours un ordonnancement optimal sans délai.

Références

- [1] Susanne Albers and Antonios Antoniadis. Race to idle : New algorithms for speed scaling with a sleep state. *ACM Trans. Algorithms*, 10(2) :9 :1–9 :31, February 2014. ISSN 1549-6325.
- [2] Antonios Antoniadis, Chien-Chung Huang, and Sebastian Ott. A fully polynomial-time approximation scheme for speed scaling with sleep state. In *Proceedings of the Twenty-Sixth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, SODA '15*, pages 1102–1113, 2015.
- [3] Evripidis Bampis, Dimitrios Letsios, and Giorgio Lucarelli. A note on multiprocessor speed scaling with precedence constraints. In *Proceedings of the 26th ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures, SPAA '14*, pages 138–142, 2014.
- [4] Nikhil Bansal and Kirk Pruhs. Speed scaling to manage temperature. *Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science*, 3404 :460–471, 2005.
- [5] Nikhil Bansal, Tracy Kimbrel, and Kirk Pruhs. Speed scaling to manage energy and temperature. *J. ACM*, 54(1) :3 :1–3 :39, March 2007.
- [6] Nikhil Bansal, Ho-Leung Chan, Dmitriy Katz, and Kirk Pruhs. Improved bounds for speed scaling in devices obeying the cube-root rule. *Theory of Computing*, 8(9) : 209–229, 2012.
- [7] Philippe Baptiste, Marek Chrobak, and Christoph Dürr. Polynomial-time algorithms for minimum energy scheduling. *ACM Trans. Algorithms*, 8(3) :26 :1–26 :29, July 2012.
- [8] David P. Bunde. Power-aware scheduling for makespan and flow. In *Proceedings of the Eighteenth Annual ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures, SPAA '06*, pages 190–196, 2006.
- [9] Andrea Cataldo, Andrea Perizzato, and Riccardo Scattolini. Production scheduling of parallel machines with model predictive control. *Control Engineering Practice*, 42 :28 – 40, 2015.
- [10] Ho-Leung Chan, Sze-Hang Chan, Lam Tak-Wah, Lap-Ke Lee, Rongbin Li, and Chi-Man Liu. Competitive online algorithms for multiple-machine power management and weighted flow time. In *Theory of Computing 2013 (CATS 2013)*, volume 141 of *CRPIT*, pages 11–20, 2013.

-
- [11] Ada Che, Shibohua Zhang, and Xueqi Wu. Energy-conscious unrelated parallel machine scheduling under time-of-use electricity tariffs. *Journal of Cleaner Production*, 156 :688 – 697, 2017.
- [12] J. Cheng, F. Chu, and M. Zhou. An improved model for parallel machine scheduling under time-of-use electricity price. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, PP(99) :1–4, 2017.
- [13] M. Dai, D. Tang, Y. Xu, and W. D. Li. Energy-aware integrated process planning and scheduling for job shops. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 229(1) :13–26, 2014.
- [14] Jian-Ya Ding, Shiji Song, Rui Zhang, Raymond Chiong, and Cheng Wu. Parallel machine scheduling under time-of-use electricity prices : New models and optimization approaches. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(2) : 1138–1154, 2016.
- [15] J. Escamilla, M. A. Salido, A. Giret, and F. Barber. A metaheuristic technique for energy-efficiency in job shop scheduling. *Constraint Satisfaction Techniques for Planning and Scheduling*, 24, 2014.
- [16] K. Fang, N. A. Uhan, F. Zhao, and J. W. Sutherland. Flow shop scheduling with peak power consumption constraints. *Annals of Operations Research*, 206(1) :115–145, 2013.
- [17] Kan Fang, Nelson A. Uhan, Fu Zhao, and John W. Sutherland. Flow shop scheduling with peak power consumption constraints. *Annals of Operations Research*, 206(1) : 115–145, 2013.
- [18] Kuei-Tang Fang and Bertrand MT Lin. Particle swarm optimization for scheduling to minimize tardiness penalty and power cost. *Proceedings of the 41st International Conference on Computers and Industrial Engineering*, 2010.
- [19] S. Ferrer, G. Nicolò, M. A. Salido, A. Giret, and F. Barber. Dynamic rescheduling in energy-aware unrelated parallel machine problems. In *Proceedings of the 13th Workshop on Constraint Satisfaction Techniques for Planning and Scheduling*, pages 73–81, 2018.
- [20] Shaohua Hu, Fei Liu, Yan He, and Tong Hu. An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools. *Journal of Cleaner Production*, 27 :133 – 140, 2012.
- [21] IEA International Energy Agency. Key world energy statistics 2016, 2016.
- [22] Sandy Irani, Sandeep Shukla, and Rajesh Gupta. Algorithms for power savings. *ACM Trans. Algorithms*, 3(4), November 2007.
- [23] Girish Kant and Kuldip Sigh Sangwan. Predictive modeling for power consumption in machining using artificial intelligence techniques. *Procedia CIRP*, 26 :403 – 407, 2015.
- [24] Minming Li and Frances F. Yao. An efficient algorithm for computing optimal discrete voltage schedules. *SIAM J. Comput.*, 35(3) :658–671, September 2005.

- [25] Minming LI, Frances F. Yao, and Hao Huan. An $o(n^2)$ algorithm for computing optimal continuous voltage schedules. ArXiv, 2014.
- [26] Wen Li, André Zein, Sami Kara, and Christoph Herrmann. *An Investigation into Fixed Energy Consumption of Machine Tools*, chapter Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, pages 268–273. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [27] Z. Li, H. Yang, S. Zhang, and G. Liu. Unrelated parallel machine scheduling problem with energy and tardiness cost. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016.
- [28] C.H. Liu and D.H. Huang. Reduction of power consumption and carbon footprints by applying multi-objective optimisation via genetic algorithms. *International Journal of Production Research*, 52(2) :337–352, 2014.
- [29] Y. Liu, H. Dong, N. Lohsr, S. Petrovic, and N. Gindy. An investigation into minimizing total energy consumption and total weighted tardiness in job shops. *Journal of Cleaner Production*, 65 :87–96, 2014.
- [30] O. Masmoudi, A. Yalaoui, Y. Ouazene, and H. Chehade. Lot-sizing in flow-shop with energy consideration for sustainable manufacturing systems. *IFAC-Papers OnLine*, 48(3) :727–732, 2015.
- [31] Gokan May, Bojan Stahl, Marco Taisch, and Vittal Prahbu. Multi-objective genetic algorithm for energy-efficient job shop scheduling. *International Journal of Production Research*, 53(23) :7071–7089, 2015.
- [32] J.Y. Moon, K. Shin, and J. Park. Optimization of production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost for industrial energy efficiency. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013.
- [33] Gilles Mouzon. *Operational methods and models for minimization of energy consumption in manufacturing environment*. PhD thesis, Wichita State University, May 2008.
- [34] Gilles C. Mouzon and Mehmet B. Yildirim. A framework to minimize total energy consumption and total tardiness on a single machine. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(2) :105–116, 2008.
- [35] G. Nicolo, M.A. Salido, S. Ferrer, A.Giret, and F. Barber. A multi-agent approach using dynamic constraints to solve energy-aware unrelated parallel machine scheduling problem with energy-dependent and sequence-dependent setup time. In *COPLAS'2017*, pages 31–37, 2017.
- [36] Agnes Pechmann and Ilka Schöler. *Optimizing Energy Costs by Intelligent Production Scheduling*, chapter Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, pages 293–298. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [37] F. Yao, A. Demers, and S. Shenker. A scheduling model for reduced cpu energy. In *Proceedings of the 36th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, FOCS '95, pages 374–, 1995.