



# ConBRepro

X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



02 a 04  
de dezembro 2020

## Shop Scheduling com Restrição de Recursos: Uma Revisão Sistemática da Literatura

**Matheus Bazo do Nascimento**

Grupo de Tecnologia Aplicada à Otimização (GTAO), Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia (PPGMNE) – UFPR

**Cassius Tadeu Scarpin**

Grupo de Tecnologia Aplicada à Otimização (GTAO), Departamento de Administração Geral e Aplicada (DAGA) – UFPR

**Resumo:** Desde o seminal artigo de Johnson em 1954, a Programação da Produção em *Shop Scheduling* tem se tornado uma área relevante dentro da Pesquisa Operacional. Dentre os artigos aqui citados tem-se aqueles que se dedicam à apresentação e síntese do estado da arte desse assunto, intitulados artigos de revisão. Quando tais artigos são elaborados a partir de um conjunto objetivo de critérios, relativos à categorização dos artigos selecionados, tem-se a Revisão Sistemática da Literatura (RSL). O presente trabalho faz uma RSL de artigos concernentes à temática da Programação da Produção com Restrição de Recursos (*Resource Constrained Shop Scheduling* – RCSS) publicados neste século em periódicos, congressos, simpósios e afins, à luz da integração entre sete métricas utilizadas na taxonomia do *Scheduling* Clássico àquelas provenientes da notação de Blazewicz, Lenstra e Rinnooy Kan (1983). Outrossim, outro ponto relevante desse estudo repousa na identificação de campos pouco explorados, de modo a colaborar com a pesquisa futura neste tomo.

**Palavras-chave:** *Resource Constrained Shop Scheduling*, Revisão Sistemática da Literatura, Taxonomia

## Resource-Constrained Shop Scheduling: A Systematic Literature Review

**Abstract:** Since Johnson's seminal article in 1954, Shop Scheduling in Production Scheduling has become a relevant area within Operational Research. Among the articles cited here are those dedicated to the presentation and synthesis of the state of the art of this subject, which are entitled review articles. When these articles are elaborated from an objective set of criteria, regarding the categorization of the selected articles, we have the Systematic Review of Literature (SLR). The present work performs a SLR in papers related to the Resource Constrained Shop Scheduling, published in this century in journals, symposiums, congress and akin, from the perspective of the integration of seven metrics applied to the taxonomy of Classic Scheduling to those from the Blazewicz, Lenstra and Rinnooy Kan's notation. Moreover, another relevant point of this study lies in the identification of less explored fields in order to collaborate with future research in this matter.

**Keywords:** Resource Constrained Shop Scheduling, Systematic Literature Review, Taxonomy

## 1. Introdução

A Programação da Produção é uma área de extrema importância para as empresas, posto que seu objetivo é tratar da alocação de recursos escassos às operações produtivas em determinado período com o objetivo de otimizar um ou mais indicadores de desempenho (LEUNG, 2004; PINEDO, 2012). Neste sentido, define-se em que momento os itens ou operações serão processados por uma ou mais estações de trabalho.

Esta área do conhecimento tem sido estudada desde o início do século passado, fruto do pioneiro trabalho de Henry L. Gantt. Contudo, foi apenas nos anos 1950, com o seminal trabalho de S.M Johnson (1954), que a área teve sua importância reconhecida dentro da Pesquisa Operacional (PO).

A partir de 1950, há uma grande quantidade de publicações correlatas à temática da Programação da Produção, nas quais diversos conceitos têm sido amplamente estudados e publicados em periódicos de alto impacto. Dentre esses conceitos, o principal é correlato ao ambiente fabril, isto é, sob que lógica produtiva e padrão de fluxo as tarefas serão processadas pelas máquinas.

Desse modo, quando estudado em sua forma pura, isto é, sem a hibridação entre dois tipos de configuração produtiva, são encontrados cinco tipos de configuração, a saber, a máquina única, máquinas paralelas, o *Flow Shop*, o *Job Shop* e o *Open Shop*. Estes três últimos, por apresentar estações de trabalho em mais de um estágio produtivo, compõem um subconjunto da Programação da Produção, o *Shop Scheduling*, objeto de estudo desse trabalho.

Dentro desse universo, há trabalhos que tratam de problemas em que se aborda a questão da não-infinitude dos recursos, ou seja, eles são finitos, no caso de mão de obra e, ou, capacitados, no caso das estações de trabalho. A essa classe de problemas dá-se o nome de *Shop Scheduling* com restrição de recursos (*Resource-Constrained Shop Scheduling*). Tais trabalhos são escassos na literatura, devido à sua elevada complexidade.

Trabalhos correlatos a essa temática são classificados à luz da taxonomia proposta em Blazewicz, Lenstra e Rinnooy Kan (1983), análogo ao que é feito em Graham *et al.* (1979), para problemas clássicos.

Dentre esses estudos, há aqueles dedicados à síntese do estudo dessa temática, por meio do resgate de publicações anteriores identificadas como as melhores e mais relevantes pelos seus autores. Tal tipo de estudo é denominado na seara acadêmica como artigo de revisão (*review article*).

Quando esse tipo de estudo é concebido à luz de um conjunto objetivo de critérios, sob os quais os estudos serão categorizados e comparados entre si, tem-se o que é denominado de revisão sistemática (*systematic review*). Tal tipo de estudo é frequentemente encontrado em trabalhos correlatos às Ciências da Saúde, mas sua aplicação é pouco observada no âmbito das Engenharias.

Em Nascimento (2017), faz-se um extenso trabalho de revisão sistemática da literatura para o *Shop Scheduling*. Nesse estudo, propôs-se sete métricas a serem utilizadas na classificação taxonômica de 560 artigos correlatos a esses ambientes fabris, em que se objetiva ampliar a notação de Graham *et al.* (1979).

O presente trabalho tem como objetivo fazer a classificação taxonômica de 42 artigos de *Resource-Constrained Shop Scheduling* (RCSS), pesquisados na base de dados Scopus, no período compreendido entre 2001 e 2019, incorporando as métricas atinentes aos problemas com Restrição de Recursos àquelas utilizadas no trabalho de Nascimento (2017). A partir da análise escrutinizada desses estudos, tem-se um segundo objetivo do artigo, que é a identificação de possíveis lacunas e campos pouco ou inexplorados

referentes a essa temática, que podem ser profícuas áreas tangentes à prospecção de trabalhos futuros.

O restante do artigo está apresentado da seguinte maneira: a Seção 2 faz uma breve revisão dos ambientes que compõem o *Shop Scheduling*, além de definir *Resource-Constrained Shop Scheduling* e suas métricas; a Seção 3 define o que é Revisão Sistemática de Literatura (RSL) e apresenta os critérios que serão utilizados na taxonomia dos 42 artigos supracitados; a Seção 4 faz a RSL dos artigos pesquisados; e, por fim, a seção 5 traz as conclusões da RSL, em que se discute as lacunas encontradas.

## **2. Revisão de Literatura**

### **2.1 Flow Shop**

Em geral, nos processos manufatureiros, para que se possa produzir um item são necessárias uma série de operações. Quando essas operações são realizadas seguindo uma mesma rota de processamento, da primeira à *j*-ésima máquina, tem-se o *Flow Shop* puro (PINEDO, 2012). Esse ambiente é considerado um tipo especial de *Job Shop*.

O estudo do *Flow Shop* tem como trabalho seminal o artigo de Johnson (1954), tido não apenas como o trabalho introdutório acerca dessa temática, mas também como o estudo que evidenciou a importância da Programação da Produção dentro da Pesquisa Operacional. Nesse estudo, o autor traz como principal contribuição ao *scheduling* um procedimento resolutivo que obtém o valor ótimo do *makespan*, quando da resolução de problemas de *Flow Shop* com duas máquinas, conhecido como Algoritmo de Johnson.

Esse ambiente possui duas características que o particulariza face aos demais ambientes fabris. Uma dessas características é o arranjo físico das estações de trabalho em linha (PINEDO, 2012). A outra característica distintiva do *Flow Shop* é o fluxo unidirecional, representado pela mesma ordem de processamento de todos os itens pelas estações de trabalho.

### **2.2 Job Shop**

O *Job Shop* é um ambiente fabril caracterizado por apresentar rotas de processamento fixas, mas não necessariamente as mesmas para todos os itens, ou seja, o fluxo dos itens a serem processados pelas máquinas é multidirecional (ESQUIROL; LOPEZ, 2008; PINEDO, 2012).

Na literatura de *scheduling*, encontram-se estudos acerca do *Job Shop* datados de 1916, com os trabalhos de Gantt. No entanto, os artigos de Akers e Friedman (1955) e de Jackson (1956), são considerados, de fato, os trabalhos introdutórios na temática do *Job Shop*. No estudo de Akers e Friedman, considerou-se a possibilidade de recirculação, isto é, a possibilidade de um item visitar uma ou mais máquinas. O trabalho de Jackson (1956) estende os resultados encontrados por Johnson (1954) para o problema do *Job Shop* com duas máquinas.

### **2.3 Open Shop**

O *Open shop* é o ambiente produtivo em que não há restrições respectivas à rota de processamento de cada item ao longo do processo de produção (PINEDO, 2012). Nesse caso, a construção desta é realizada ao longo da produção dos itens e, pode diferir entre

eles, sendo parte do processo decisório relativo ao sequenciamento (CHEN; POTTS; WOEGGINGER, 1998).

O trabalho seminal concernente a essa temática é atribuído a Gonzalez e Sahni (1976), que trata de problemas dessa natureza com considerações acerca da complexidade computacional. Este trata tanto dos casos em que existe a possibilidade da interrupção do processamento dos itens (*preemption*), como dos casos em que a interrupção não faz parte do escopo do problema.

Dentre os exemplos encontrados no cotidiano que podem ser considerados como modelos de *Open Shop* estão uma oficina mecânica, centros de controle de qualidade, tarefas escolares, entre outros.

## **2.4 Resource-Constrained Shop Scheduling**

Dentre os trabalhos introdutórios deste tomo aquele de Blazewicz, Lenstra e Rinnooy Kan (1983) é o mais importante, pois nele faz-se a taxonomia dos problemas com restrição de recursos, análogo ao que é feito em Graham et al. (1979) para os problemas clássicos.

Na notação em 3 campos de Graham et al. (1979) ,  $\alpha/\beta/\gamma$ ,  $\alpha$  representa o ambiente fabril em que o processamento dos itens é executado;  $\beta$  alude às características do item, isto é, quais aspectos que o problema estudado diferem do modelo clássico; e  $\gamma$  é respectivo aos critérios de otimalidade.

A notação relativa à restrição de recursos é inserida no campo  $\beta$  da notação de Graham et al. (1979), sendo representada do seguinte modo:  $\alpha/res\lambda\sigma\rho,\beta/\gamma$ , em que  $\lambda$  é relativo ao número de recursos,  $\sigma$  é correlato ao tamanho do recurso e  $\rho$  é alusivo aos requisitos do recurso.  $\lambda$  recebe o valor 1 quando o número de recursos é constante e igual a  $\lambda$ . Também pode ser utilizado o  $\cdot$  quando o número de recursos é parte integrante do processo e, portanto, não é conhecido *à priori*.

A letra grega  $\sigma$ , tal qual  $\lambda$  pode assumir o valor 1, quando o tamanho do recurso é constante e igual a  $\sigma$  e  $\cdot$  quando este é parte do processo. Por fim,  $\rho$  tem valor 1 quando os requisitos do recurso têm um limite superior constante e recebe  $\cdot$  quando não há limite superior especificado.

## **3. Revisão Sistemática da Literatura**

A Revisão Sistemática da Literatura é definida como o processo de coleta, conhecimento, compreensão, análise, síntese e avaliação de um conjunto de artigos científicos a fim de criar um estado da arte acerca de um determinado tópico ou assunto examinado (LEVY; ELLIS, 2006).

Este tipo de procedimento é comumente encontrado em estudos respectivos à área médica, como observado no trabalho de Avouac, Gossec e Dougados (2006). Dentro desse contexto, a Colaboração Cochrane é referência internacional na construção e validação de revisões sistemáticas e o Cochrane *Handbook* é considerado para fazer RSL.

Em relação ao modo com que se utiliza esse procedimento, serão adotados seis dos sete passos recomendados pela Colaboração Cochrane. São eles:

- a) Formulação da pergunta: nesse ponto, quando a questão que orienta a pesquisa é bem formulada, tem-se clareza sobre o que deve ser incluído ou não na revisão a ser elaborada. No presente trabalho, o que norteará a revisão sistemática é a temática do *Resource-Constrained Shop Scheduling* e a pergunta a ser respondida nesse trabalho é alusiva às lacunas existentes na literatura a respeito do tema.

- b) Localização e seleção de estudos: nesse aspecto, deve-se investigar em diversas fontes de busca de estudos. No presente estudo, os artigos a serem escrutinados foram coletados a partir da base de dados Scopus, utilizando-se como palavra-chave o termo “*Resource-Constrained Shop Scheduling*”. Encontrou-se 42 artigos no período compreendido entre 2001 e 2019 atinentes a essa temática;
- c) Avaliação crítica dos estudos: nesse ponto, determina-se quais estudos serão utilizados na revisão. Neste trabalho, os quarenta e dois artigos serão avaliados à luz das seguintes métricas, apresentadas na Figura 1.

**Figura 1 – Métricas Utilizadas na RSL**

| Métrica                           | Descrição   |
|-----------------------------------|---|
| Ano                               |   |
| Tipo                              | Artigo, Artigo de Congresso, Estudo de Caso, Review e combinações                       |
| Classe da Programação da Produção | Off-line, on-line, on-line/off-line   |
| Modo de Chegada dos Itens         | Dinâmico, estático, estático/dinâmico   |
| Natureza dos Dados                | Determinístico, estocástico, determinístico/estocástico                                 |
| Características dos Itens         | Campo beta da notação de Graham combinada à notação de Blazewicz, Lenstra e Rinnooy Kan |
| Critério de Otimalidade           | Campo gama da notação de Graham   |

**Fonte: O Autor (2020)**

- d) Coleta de dados: nessa fase todas as variáveis estudadas devem ser observadas e resumidas, avaliando-se suas características. No presente trabalho, essa fase foi realizada em conjunto com a fase c;
- e) Análise e apresentação dos dados: a partir de um agrupamento de estudos fundamentado nas similaridades, faz-se a escolha da forma de apresentação, com o intuito de facilitar o entendimento da revisão elaborada. No presente trabalho, gráficos de colunas serão apresentados para cada métrica;
- f) Interpretação dos dados: é determinada a aplicabilidade dos resultados obtidos no que tange à obtenção da resposta ao problema de pesquisa proposto. Nesse estudo, após as análises realizadas na fase 5 serão tecidas considerações acerca de campos ou lacunas do estudo de RCSS.

#### **4. Revisão Sistemática da Literatura de *Resource-Constrained Shop Scheduling***

Neste capítulo faz-se a RSL de RCSS. Ao todo, foram escrutinados quarenta e dois artigos, num estrato temporal compreendido entre 2001 e 2019. Estes são apresentados na Figura 2.

**Figura 2 – Rol dos artigos analisados de RCSS**

| Autor  | Título   | Journal/Evento                  |
|--|--|---------------------------------|
| ARTIGUES, C.; ROUBELLAT, F. (2001)                     | A Petri net model and a general method for on and off-line multi-resource shop floor scheduling with setup times | Int. Journal of Prod. Economics |
| CHEN, D.; LUH, P.B.; THAKUR, L.S.; MORENO JR, J.(2003) | Optimization-based manufacturing scheduling with multiple resources, setup requirements, and transfer lots       | IIE Transactions                |
| CHAN, F.T.S.; WONG, T.C.; CHAN, L.Y. (2006)            | Flexible job-shop scheduling problem under resource constraints  | Int. Journal of Prod. Research  |

|  |   |   |
|--|---|---|
| MATI, Y.; XIE, X.(2008)                                | A genetic-search-guided greedy algorithm for multi-resource shop scheduling with resource flexibility                                 | IIE Transactions  |
| WANG, H.Y.; ZHAO, Y.W.; XU, X.L.; WANG, W.L.(2008)     | A Batch Splitting Job Shop Scheduling Problem with bounded batch sizes under Multiple-resources Constraints using Genetic Algorithm   | 2008 IEEE CIS   |
| XI, X.; JIANG, L.; ZHANG, Q.(2009)                     | Optimization for Multi-resources-constrained Job Shop Scheduling based on Three-level Heuristic Algorithm                             | CAR 2009  |
| YAHYAOU, A.; FNAIECH, N.(2009)                         | New Shifting Method for Job Shop Scheduling Subject to Invariant Constraints of Resources Availability                                | 35th IECON  |
| LI, J.; SUN, S.; HUANG, Y.; WANG, N.(2010)             | A hybrid Algorithm for Scheduling of Dual-Resource Constrained Job Shop   | 2010 CCIE   |
| ZHOU, Y.; LI, B.; Y. J.; WANG, Q.(2010)                | Study on Modeling of Job Shop Scheduling with Multi-Resource Constraints  | 2010 AICI   |
| MATI, Y.; XIE, X.(2011)                                | Multiresource Shop Scheduling with Resource Flexibility and Blocking  | IEEE Transactions on Automation Science and Engineering |
| ODDI, A.; RASCONI, R.; CESTA, A.; SMITH, S.F.(2011)    | Applying Iterative Flattening Search to the Job Shop Scheduling Problem with Alternative Resources and Sequence Dependent Setup Times | COPLAS 2011   |
| LANG, M.; LI, H.(2011)                                 | Research on Dual-resource Multi-objective Flexible Job Shop Scheduling under Uncertainty  | 2011 2nd AIMSEC   |
| TIACCI, L.; SAETTA, S.(2011)                           | Simultaneous Scheduling of Machines and Operators in a Multi-Resource Constrained Job-Shop Scenario                                   | EMSS  |
| LIANG, D.; LIU, S.; TAO, Z.(2012)                      | Based on Petri Nets and Hybrid Genetic Tabu Search Approach to Scheduling Optimization for Dual Resource Constrained Job Shop         | EMEIT   |
| JIAO, Y.; WEI, X.; SAIFENG, C.(2012)                   | An Optimization Approach for Surgery Scheduling under Multi-Resource Constraints  | Applied Mechanics and Material                          |
| ZHANG, J.; WANG, W.; XU, X.; JIE, J.(2013)             | A Multi-objective Particle Swarm Optimization for Dual-Resource Constrained Shop Scheduling with Resource Flexibility                 | 2013 IEEE - CIES  |
| OULAMARA, A.; REBAINE, D.; SERAIRI, M.(2013)           | Scheduling the two-machine open shop problem under resource constraints for setting the jobs  | Annals of Operations Research                           |
| AGNETIS, A.; MURGIA, G.; SBIRILI, S.(2014)             | A job shop scheduling problem with human operators in handicraft production   | Int. Journal of Prod. Research                          |
| GUYON, O.; LEMAIRE, P.; PINSON, É.; RIVREAU, D. (2014) | Solving an integrated job-shop problem with human resource constraints  | Annals of Operations Research                           |
| KARTHIKEYAN, S.; ASOKAN, P.; NICKOLAS, S.(2014)        | A hybrid discrete firefly algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling problem with limited resource constraints        | Int. Journal of Adv. Manuf. Technology                  |

|   |  |   |
|---|--|---|
| FACCIO, M.; RIES, J.; SAGGIORNO, N.(2015)                                   | Simulated annealing approach to solve dual resource constrained job shop scheduling problems: layout impact analysis on solution quality | Int. Journal of Mathematics in Operational Research |
| ZHANG, J.; WANG, W.; XU, X.(2015)   | A hybrid discrete particle swarm optimization for dual-resource constrained job shop scheduling with resource flexibility                | Journal of Intelligent Manufacturing                |
| BORISSOVA, D.(2015)   | An Optimal Staffing and Scheduling Approach in Open Shop Environment   | Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences   |
| CIRO, G.C.; DUGARDIN, F.; YALAOUI, F.; KELLY, R.(2015)                      | A fuzzy ant colony optimization to solve an open shop scheduling with multi-skills resource constraint                                   | IFAC-Papers Online                                  |
| CIRO, G.C.; DUGARDIN, F.; YALAOUI, F.; KELLY, R.(2015)                      | Open shop scheduling problem with a multi-skills resource constraint: a genetic algorithm and an ant colony optimisation approach        | Int. Journal of Prod. Research                      |
| GAO, L.; PAN, Q-K.(2016)  | A shuffled multi-swarm micro-migrating birds optimizer for a multi-resource-constrained flexible job shop scheduling problem             | Information Sciences                                |
| LIN, R.; ZHOU, G.; LIU, A.; LU, H.; LI, T.(2016)                            | Impact of Personnel Flexibility on Job Shop Scheduling   | Scientific Programming                              |
| PAKSI, A.B.N.; MA'RUF, A.(2016)   | Flexible Job-Shop Scheduling with Dual-Resource Constraints to Minimize Tardiness Using Genetic Algorithm                                | IOP Conference Series                               |
| BA, L.; LI, Y.; YANG, M.S.; GAO, X.Q.; LIU, Y.(2016)                        | Modelling and Simulation of a Multi-Resource Flexible Job-Shop Scheduling  | Int. Journal of Simulation Modelling                |
| CIRO, G.C.; DUGARDIN, F.; YALAOUI, F.; KELLY, R. (2016)                     | A NSGA-II and NSGA-III comparison for solving an open shop scheduling with resource constraint   | IFAC-Papers Online                                  |
| GONG, X.; DENG, Q.; GONG, G.; LIU, W.; REN, Q. (2017)                       | A memetic algorithm for multi-objective flexible job-shop problem with worker flexibility  | Int. Journal of Prod. Research                      |
| GONG, G.; DENG, Q.; GONG, X.; LIU, W.; REN, Q. (2017)                       | A new double flexible job-shop scheduling problem integrating processing time, green production, and human factor indicators             | Journal of Cleaner Production                       |
| KALINOWSKI, K.; KRENCZYK, D.; PAPROCKA, I.; KEMPA, W.M.; GRABOWIK, C.(2017) | Ant colony optimisation for scheduling of flexible job shop with multi-resources requirements  | 21st IManE&E  |
| QIAO, L.; ZHANG, Z.; NAWAZ, M.N. (2017)                                     | Genetic algorithm based novel methodology of multi-constraint job scheduling   | 5th ES  |
| ZHONG, Y.; LI, J.M.; ZHU, S.Z. (2017)                                       | Research on the Multi-Objective Optimized Scheduling of the Flexible Job-Shop Considering Multi-Resource Allocation                      | Int. Journal of Simulation Modelling                |
| LIU, C.; CHEN, H.; XU, R.; WANG, Y.(2018)                                   | Minimizing the resource consumption of heterogeneous batch-processing machines using a copula-based estimation of distribution algorithm | Applied Soft Computing Journal                      |
| THÜRER, M.(2018)  | Dual Resource Constrained (DRC) Shops: Literature Review and Analysis  | IFIP  |

|   |  |                                      |
|---|--|--------------------------------------|
| DHIFLAOUI, M.; NOURI, H.E.;<br>DRISS, O.B. (2018)                 | Dual-Resource Constraints in Classical and Flexible Job Shop Problems: A State-of-the-Art Review   | 22 <sup>nd</sup> KES                 |
| PENG, C.; FANG, Y.; LOU, P.;<br>YAN, J. (2018)                    | Analysis of Double-Resource Flexible Job Shop Scheduling Problem Based on Genetic Algorithm  | 2018 IEEE 15th ICNSC                 |
| ZHONG, Q.; YANG, H.; TANG,<br>T. (2018)                           | Optimization Algorithm Simulation for Dual-Resource Constrained Job-Shop Scheduling  | Int. Journal of Simulation Modelling |
| WANG, Y.; CEN, H.J.; YANG,<br>O.(2018)                            | Optimal Configuration for Workshop Manufacturing System Under Dual Resource Constraints  | Int. Journal of Simulation Modelling |
| QIN, H.; FAN, P.;TANG,<br>H.;HUANG, P.;FANG, B.;PAN,<br>S. (2019) | An effective hybrid discrete grey wolf optimizer for the casting production scheduling problem with multi-objective and multi-constraint | Computers & Industrial Engineering   |

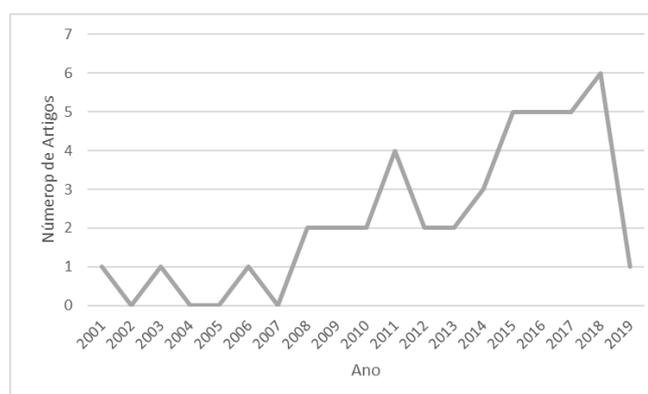
Fonte: O Autor (2020)

Dessa amostra, 34 dos 42 artigos abordam o *Job Shop*, seja ele na forma pura, como em Artigues e Roubellat (2001), seja suas variantes flexíveis e mais complexas, tanto em relação ao ambiente, como a utilização de um conjunto de máquinas paralelas em uma ou mais estações de trabalho, quanto sob a ótica de outros recursos, como a mão de obra, que pode ser multifacetada, como em *Ciro et al.* (2015). Os demais estudados aqui escrutinados versam sobre *Open Shop* (5), *Flow Shop* (1) e artigos de *Review* que tratam mais de um ambiente.

#### 4.1 Ano

A presente seção tem como ponto fulcral representar a evolução histórica, no que concerne à quantidade de artigos tangentes ao RCSS, ao longo dos dezenove anos analisados no trabalho. A Figura 3 apresenta graficamente, ano a ano, essa evolução.

Figura 3 – Evolução Histórica do RCSS no período analisado



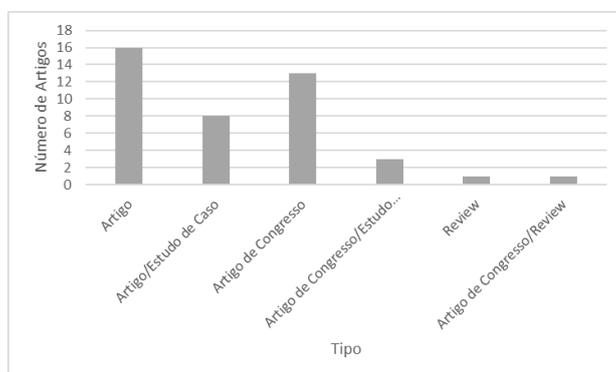
Fonte: O Autor (2020)

Se separarmos a análise em duas décadas, podemos observar que a temática vivencia um expressivo crescimento, posto que do período compreendido entre 2001 e 2010 há 9 artigos de RCSS, enquanto na segunda década ainda incompleta já foram publicados 33 estudos, mais do que triplicando a quantidade observada na década passada.

#### 4.2 Tipo

No que concerne ao tipo de artigo, foram utilizadas seis categorias para classificar os 42 artigos avaliados pela presente revisão. Estas categorias são apresentadas na Figura 4.

**Figura 4 – Classificação do RCSS quanto ao tipo**



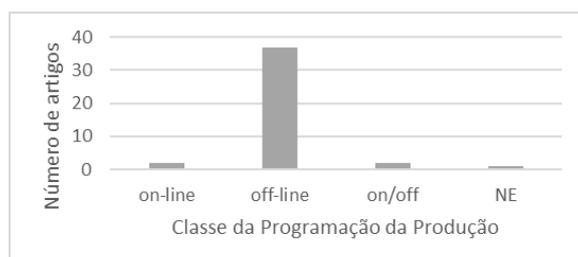
**Fonte: O Autor (2020)**

Pela figura, se pode observar dois pontos importantes: artigos de *Review* acerca do tema tem apenas uma publicação, o que mostra a relevância deste artigo. Outro ponto a se destacar repousa na quantidade de artigos de congresso sobre o tema (13). Isso significa que a pesquisa nessa área ainda é incipiente e que o campo é profícuo no tangente a trabalhos futuros. Normalmente, a RSL não considera em seu escopo artigos de congresso, mas se isso fosse feito a quantidade de trabalhos no período analisado seria insuficiente para a realização de um estudo dessa natureza.

#### **4.3 Classe da Programação da Produção, Modo de Chegada dos Itens e Natureza dos Dados**

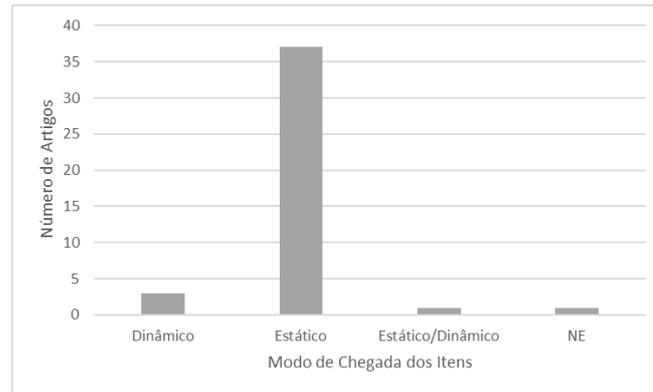
Por brevidade, essas três métricas serão apresentadas em conjunto. Uma característica inerente ao RCSS é a sua elevada complexidade do ponto de vista resolutivo. Sendo assim, a maioria dos trabalhos costuma utilizar aspectos simplificadores do problema. Sob esse prisma, tem-se que a maioria dos estudos é *off-line* (dados são conhecidos anteriormente); é estática (não são permitidas inserções e, ou, desistências de itens quando do início do processamento); e são determinísticas (dados como tempo de processamento, tempos de preparação não são obtidos a partir de distribuições de probabilidade). Portanto, explorar as variantes de cada uma dessas métricas, se por um lado complexo, por outro torna o problema estudado mais próximo de aplicações no mundo real. As Figuras 5, 6 e 7 sintetizam os resultados verificados.

**Figura 5 – Taxonomia do RCSS quanto á classe da programação**



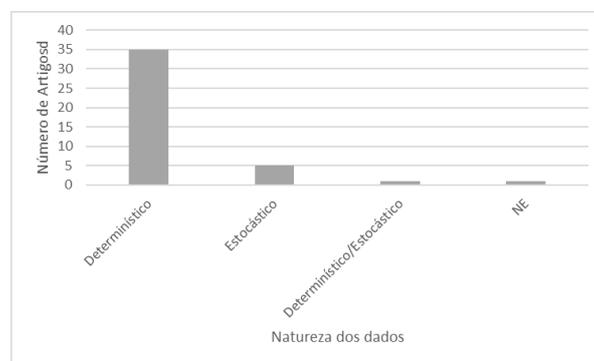
**Fonte: O Autor (2020)**

**Figura 6 – Taxonomia do RCSS quanto ao modo de chegada dos itens**



Fonte: O Autor (2020)

**Figura 7 – Taxonomia do RCSS quanto à natureza dos dados**



Fonte: O Autor (2020)

#### 4.4 Características dos itens

Em relação a essa métrica, tem-se duas classificações a considerar: no tangente à notação de Graham *et al.*(1979), 8 dos 42 trabalhos analisados tratam da temática dos ambientes flexíveis (*Flexible Shop Scheduling*). Nesse contexto em uma ou mais estações há um conjunto de máquinas paralelas destinadas a realizar o processamento dos itens. Um exemplo de estudo que contempla essa temática é aquele de Oddi *et al.* (2011).

Sob outra ótica alusiva à notação de Blazewicz, Lenstra e Rinnooy Kan (1983), 18 dos 42 estudos se propõem a abordar problemas com dois recursos (*Dual-Resource*). Esses recursos são majoritariamente mão de obra e máquinas. Estudos como o de Ciro *et al.* (2015) abordam a questão da mão de obra flexível. 14 dos 42 estudos trabalham com *Multi-Resource* (mais de dois recursos). Nesses estudos, abordam-se recursos outros que não a mão de obra e a estação de trabalho propriamente ditas, mas aspectos acessórios à consecução das operações, como o estudo de Mati e Xie (2011), em que se consideram ferramentas (*tools*) que podem ser intercambiáveis, o que acrescenta a faceta do *setup* dependente da sequência. Outro trabalho de destaque nesse sentido é aquele de Tiacci e Saetta (2011), em que há duas classes de mão de obra: o *equipper*, que prepara as estações de trabalho e o *operator*, que executa as operações de processamento dos itens. Há trabalhos que também abordam a temática do *Single Resource*, que na maioria das vezes é a mão de obra, como em Borissova (2015), em que considerações acerca da melhor escala de trabalho (*staff scheduling*) são contempladas.

Relativa às quantidades do recurso, 25 dos 42 estudos trabalham com quantidades fixas do recurso, enquanto os demais utilizam quantidades variáveis de recursos.

## 4.5 Critério de Otimalidade

Em relação a essa métrica tem-se o *makespan* – instante de término máximo –, que deve ser minimizado como o principal objetivo estudado, posto que 30 dos 42 trabalhos abordam-no como critério único de otimalidade ou um dos objetivos a serem otimizados, quando de uma abordagem multiobjetivo. Em relação aos demais objetivos tratados, merece destaque o trabalho de Lang e Li (2011), que em seu artigo abordam um *Job Shop* Flexível com a finalidade de satisfazer a data de entrega ao cliente, a minimização do custo de produção e a redução do consumo de energia e da poluição sonora.

## 4.6 Síntese da RSL

Conforme supracitado, um dos objetivos principais de uma Revisão Sistemática da Literatura é apontar caminhos de pesquisa pouco ou inexplorados. À luz das métricas abordadas, aponta-se a carência de trabalhos que abordem ambiente fabril diverso do *Job Shop*, que tratem de ambientes dinâmicos, *on-line* e cuja natureza dos dados seja estocástica. Sob o ponto de vista dos recursos, há um grande campo a se investigar, notadamente aquele que trata de maneira conjunta as variantes encontradas no RCSS com as demais características de itens encontradas na clássica notação de Graham *et al.* (1979), como trabalhos com a possibilidade de recirculação, *no-wait*, entre outros. Outro ponto a se considerar é abordar objetivos diversos do *makespan*. Artigos que tratam do RCSS são mais complexos e, portanto, a adição de uma dessas variantes aqui arroladas já pode tornar o estudo realizado original e com alto impacto de publicação.

## 5. Conclusão

O presente trabalho fez uma Revisão Sistemática da Literatura dos artigos que abordam a temática do *Resource Constrained Shop Scheduling* (RCSS). Para tal, 42 artigos publicados nos últimos 19 anos foram escrutinados à luz de sete métricas, propostas em Nascimento (2017). Além disso, a taxonomia aqui apresentada integrou essas métricas àquelas provenientes do estudo de RCSS, presentes na notação de Blazewicz, Lenstra e Rinnooy Kan (1983). Outro ponto abordado neste estudo foi a apresentação de lacunas ou campos inexplorados quando estudo do RCSS. Como sugestão a trabalhos futuros, tem-se a atualização desta revisão, contemplando os métodos resolutivos pelos autores desses estudos empregados.

## Referências

- AKERS Jr, S.B; FRIEDMAN, J. A non-numerical approach to production scheduling problems. **Operations Research**, v. 3, p. 429-442, 1955.
- ARTIGUES, C.; ROUBELLAT, F. A Petri net model and a general method for on and off-line multi-resource shop floor scheduling with setup times. **International Journal of Production Economics**, v. 74, n. 1-3, p. 63-75, 2001.
- AVOUAC, J.; GOSSEC, L.; DOUGADOS, M. Diagnostic and predictive value of anti-cyclic citrullinated protein antibodies in rheumatoid arthritis: a systematic literature review. **Annals of Rheumatic Diseases**, v. 65, n. 7, p. 845-851, 2006.
- BLAZEWICZ, J.; LENSTRA, J.K.; RINNOOY KAN, A.H.G. Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity. **Discrete Applied Mathematics**, v. 5, p. 11-24, 1983.
- BORISSOVA, D. An Optimal Staffing and Scheduling Approach in Open Shop Environment. **Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences**, v. 60, n. 10, p. 1295-1300, 2015.

CHEN, B.; POTTS, C.N.; WOEGINGER, G.J. A review of machine scheduling: Complexity, algorithms and Applications. In: DU, D-Z.; PARDALOS, P.M. (org.). **Handbook of Combinatorial Optimization**. Dordrecht: Kluwer, 1998. p. 21-169.

CIRO, G.C.; DUGARDIN, F.; YALAOUI, F.; KELLY, R. Open shop scheduling problem with a multi-skills resource constraint: a genetic algorithm and an ant colony optimisation approach. **International Journal of Production Research**, p. 1-29, 2015.

ESQUIROL, P.; LOPEZ, P. Basic Concepts and Methods in Production Scheduling. In: LOPEZ, P.; ROUBELLAT, F. (org). **Production Scheduling**. New York: Wiley, 2008. p. 5-32.

GONZALEZ, T.; SAHNI, S. Open Shop Scheduling to Minimize Finish Time. **Journal of the ACM**, v. 23, n. 4, p. 665–679, 1976.

GRAHAM, R.L.; E.L. LAWLER.; LENSTRA, J.K.; RINNOOY KAN, A.H.G. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey. **Annals of Discrete Mathematics**, v. 5, p. 287-326, 1979.

JACKSON, J.R. An extension of Johnson's result on job lot scheduling. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 3, p. 201-203, 1956.

JOHNSON, S. M. Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 1, n. 1, p. 61–68, 1954.

LANG, M.; LI, H. Research on Dual-resource Multi-objective Flexible Job Shop Scheduling under Uncertainty. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, MANAGEMENT SCIENCE AND ELECTRONIC COMMERCE, 2, Zhengzhou. **Proceedings**, 2011, p. 1022-1025.

LEUNG, J Y-T. **Handbook of Scheduling**: Algorithms, Models and Performance Analysis. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2004.

LEVY, Y.; ELLIS, T.J. A system approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. **Informing Science Journal**, v. 9, p. 181-212, 2006.

MATI, Y.; XIE, X. Multiresource Shop Scheduling with Resource Flexibility and Blocking. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v.8, n.1, p. 175-189, 2011.

NASCIMENTO, M.B. **Sessenta Anos de Shop Scheduling: Uma Revisão Sistemática da Literatura**. Curitiba, 489p., 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

ODDI, A.; RASCONI, R.; CESTA, A.; SMITH, S.F. Applying Iterative Flattening Search to the Job Shop Scheduling Problem with Alternative Resources and Sequence Dependent Setup Times. In: COPLAS 2011, Freiburg. **Proceedings of the Workshop on Constraint Satisfaction Techniques for Planning and Scheduling**, 2011, p. 15-22.

PIÑEDO, M. **Scheduling**: Theory, Algorithms and Systems. 4. ed. New York: Springer, 2012.

TIACCI, L.; SAETTA, S. Simultaneous Scheduling of Machines and Operators in a Multi-Resource Constrained Job-Shop Scenario. In: EUROPEAN MODELLING AND SIMULATION SYMPOSIUM, 23, Roma. **Proceedings**, 2011, p. 166-175.