



# OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS PRODUTIVOS EM SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEL

---

**Projeto de Pesquisa enviado ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da  
Computação  
Universidade Federal de Ouro Preto**

---

## **Proponentes:**

---

Leonardo Cabral da Rocha Soares - leo@larback.com.br  
Candidato

---

Marco Antonio Moreira de Carvalho – mamc@ufop.edu.br  
Universidade Federal de Ouro Preto – Departamento de Computação

18 de janeiro de 2019

# 1 Introdução

Desde a década de 1980 as empresas de manufatura utilizam Sistemas de Manufatura Flexíveis (SMFs) para lidar com uma variedade maior de produtos e atender a requisitos de produção complexos e variáveis (Calmels, 2018). SMFs são utilizados em empresas de diversos segmentos, como indústrias siderúrgicas, metalúrgicas e automobilísticas entre outras. Segundo Zeballos (2010), existe uma tendência nas fábricas em avançar para sistemas de produção altamente flexíveis que podem responder rapidamente a mudanças na demanda e no processamento de uma grande variedade de produtos.

Para viabilizar este sistema de produção, SMFs são constituídos por uma rede de máquinas flexíveis interligadas por um sistema automático de manuseio de materiais, seja matéria-prima ou produtos semiacabados. De maneira genérica, as operações executadas sobre a matéria-prima ou produtos semiacabados por máquinas flexíveis são referidas como *processamento de tarefas* por máquinas flexíveis. Máquinas flexíveis são capazes de executar um grande número de tarefas diferentes como cortar, furar, lixar, entre outras (Zeballos, 2010) desde que as ferramentas necessárias para o processamento de tais tarefas sejam previamente carregadas no compartimento interno da máquina. Este compartimento, denominado *magazine*, tem capacidade limitada. Em geral, a capacidade do *magazine* é o suficiente para armazenar todas as ferramentas necessárias para o processamento de uma tarefa isolada. Em um SMF, as tarefas são processadas de forma sequencial. O processamento de diversas tarefas, em uma mesma máquina, pode exigir trocas de ferramentas no *magazine*. Para isso, a máquina deve ser parada, as ferramentas que serão inseridas precisam ser movidas do depósito até a máquina, havendo a necessidade de liberar espaço no *magazine*, deve-se selecionar quais ferramentas serão removidas, removê-las, inserir as novas ferramentas e então mover as ferramentas retiradas de volta ao depósito.

A Figura 1 apresenta uma representação esquemática de um SMF composto por três máquinas flexíveis, cada uma possuindo um *magazine* com capacidade para até cinco ferramentas e um *buffer* interno para a tarefa que está sendo processada, um sistema de manuseio de materiais e *buffers* para armazenar peças pré-processadas e finalizadas.

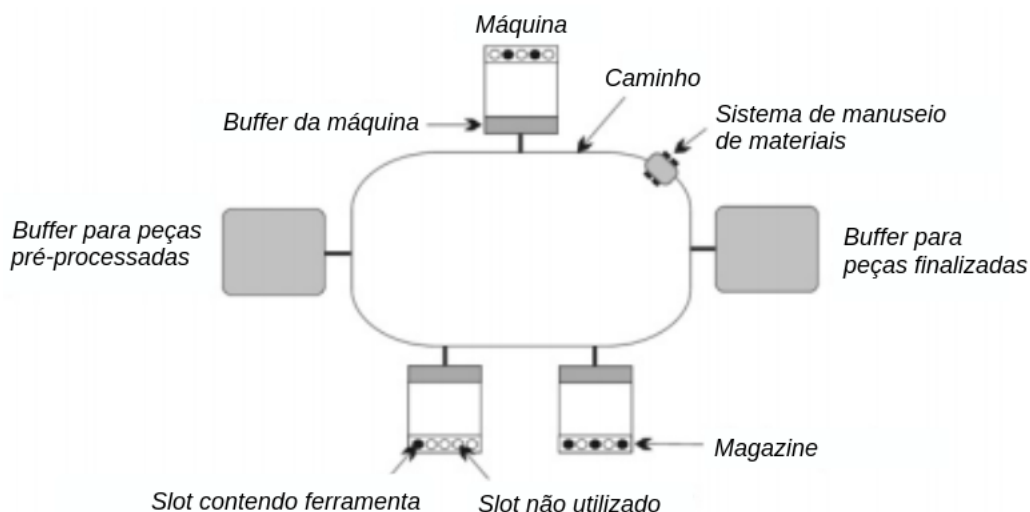


Figura 1: Sistema flexível de manufatura. Fonte: (Zeballos, 2010)

O problema de sequenciamento do processamento de tarefas em máquinas é um problema  $\mathcal{NP}$ -Difícil (Crama et al., 1994) que consiste em determinar a ordem de processamento de um dado conjunto de tarefas visando otimizar sua função objetivo. Conforme apresentado por Graham et al.

(1979), o problema de sequenciamento de tarefas em máquinas pode ser descrito pela notação  $\alpha|\beta|\gamma$ . O campo  $\alpha$  descreve o ambiente das máquinas e contém apenas uma entrada. O campo  $\beta$  provê detalhes sobre as características e restrições do processamento e pode conter nenhuma, uma ou várias entradas. O campo  $\gamma$  descreve o objetivo a ser minimizado e geralmente contém apenas uma entrada.

O sequenciamento do processamento de tarefas e a determinação do plano de trocas de ferramentas são dois problemas que compõem o problema combinatório conhecido na literatura como Problema de Minimização de Trocas de Ferramentas (ou *Minimization of Tool Switches Problem*, MTSP), cujo objetivo é determinar uma sequência de processamento para um dado conjunto de tarefas de forma que o número de trocas de ferramentas necessárias para o processamento das mesmas, seja minimizado. Após a definição da sequência de processamento das tarefas, o plano de trocas de ferramentas pode ser determinado em tempo determinístico polinomial utilizando-se a política de manter no *magazine* as ferramentas que serão utilizadas mais cedo, denominada *Keep Tool Needed Soonest* (KTNS) e introduzida por Tang e Denardo (1988). A grande diversidade de ambientes industriais e os diversos objetivos pretendidos dentro de cada fábrica, descritos pela notação  $\alpha|\beta|\gamma$ , acabaram por desenvolver diversas variações destes problemas. Por exemplo, alguns ambientes industriais podem impor as tarefas limitações de precedência, tempo de preparação dependente da sequência das tarefas, a existência de uma ou várias máquinas flexíveis etc. Allahverdi et al. (1999, 2008); Allahverdi (2015); Calmels (2018) apresentam *surveys* enumerando diversas variações e suas abordagens por diferentes autores desde a década de 1950.

O número acumulado de publicações por ano, considerando-se diversas variações do MTSP, é apresentado na Figura 2. Observa-se que, desde 1988, o número de publicações cresce consistentemente ao longo dos anos.

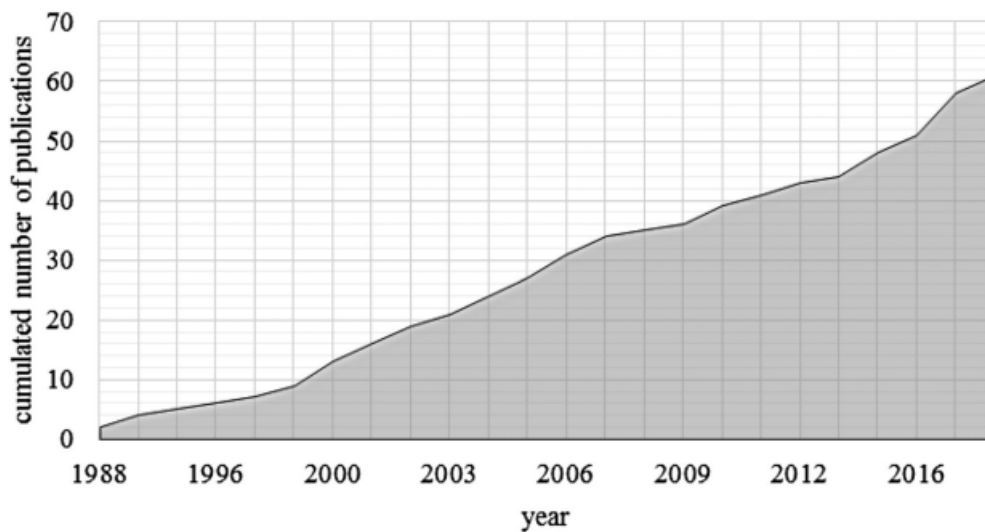


Figura 2: Publicações acumuladas por ano. Fonte: (Calmels, 2018)

O crescimento ininterrupto de publicações sobre o tema demonstra sua importância acadêmica e relevância no cenário industrial atual. Neste projeto, propõe-se a abordagem de três versões deste problema descritos em detalhe na Seção 2.

## 2 Qualificação dos principais problemas abordados

Conforme mencionado na Seção 1, o MTSP possui diversas variações. A seção a seguir descreve três destas variações, sendo a primeira gerada por alterações no campo  $\alpha$  e as duas últimas por

alterações no campo  $\beta$ .

## 2.1 Múltiplas máquinas

Em sua abordagem padrão, o MTSP considera um ambiente contendo apenas uma máquina flexível (1), entretanto, Pinedo (2008) apresenta diversos cenários alternativos. Para diversas máquinas em paralelo pode-se ter máquinas idênticas paralelas ( $P_m$ ), máquinas paralelas com velocidades diferentes ( $Q_m$ ) e máquinas não relacionadas em paralelo ( $R_m$ ). Considerando-se máquinas em série, pode-se ter um *Flow shop* ( $F_m$ ) onde todas as tarefas tem que ser processadas por todas as máquinas na mesma ordem, um *Job shop* ( $J_m$ ) onde cada tarefa tem uma rota predeterminada a seguir, entre outros. Cada variação de ambiente resulta em uma nova versão do problema. Segundo Calmels (2018) ambientes com várias máquinas oferecem excelente fonte de pesquisa pois apenas os casos mais básicos têm sido abordados. Ambientes com diversas máquinas podem ainda conter compartilhamento de recursos, como ferramentas, locais de armazenamento, sistemas de transporte etc, características essas pouco exploradas na literatura.

## 2.2 Variações de tamanho das ferramentas e capacidade do *magazine*

No caso geral do MTSP, a capacidade do *magazine* das máquinas é o suficiente para armazenar todas as ferramentas necessárias para o processamento de uma tarefa específica e cada ferramenta ocupa apenas um *slot* no *magazine*. Entretanto, estas características podem ser relaxadas para retratar ambientes específicos. Alguns autores têm abordado essas relaxações (Rupe e Kuo, 1997; Matzliach e Tzur, 2000; Tzur e Altman, 2004; Van Hop, 2005; Hirvikorpi et al., 2006; Crama et al., 2007) e políticas similares ao KTNS foram propostas. Rupe e Kuo (1997) apresentam a política *Get Tool Needed Soonest* (GTNS) para o caso em que uma tarefa pode necessitar de mais ferramentas do que o suportado pelo *magazine* e, Tzur e Altman (2004) propõem o *Keep Smallest Tool Needed Soonest* (KSTNS) para os casos em que o número de *slots* necessários por cada ferramenta não são obrigatoriamente igual a um. Entretanto, o pequeno número de publicações abordando estas variações demonstram o quão pouco explorado é este segmento na literatura.

## 2.3 Desgaste de ferramentas

A abordagem padrão do MTSP prevê trocas de ferramentas apenas devido a requisitos de tarefas. Abordagens considerando o desgaste das ferramentas atribuem a cada ferramenta um tempo de vida determinístico (Hirvikorpi et al., 2006; Dadashi et al., 2016; Mauergauz, 2017) ou estocástico (Hirvikorpi et al., 2007; Farughi et al., 2017). Assim, além das trocas de ferramentas devido aos requisitos das tarefas, as ferramentas deverão ser trocadas sempre que seu tempo de vida útil for atingido. Embora ainda pouco explorado na literatura, a retomada desta variação por publicações recentes (Dadashi et al., 2016; Mauergauz, 2017; Farughi et al., 2017) demonstra o interesse acadêmico sobre o tema e o qualifica como área de interesse para novos trabalhos.

## 3 Objetivos geral e específicos

De maneira geral, este projeto tem por objetivo contribuir com a otimização das operações em sistemas de manufatura flexíveis e seus diversos subproblemas abordando áreas pouco exploradas e fornecendo implementações inéditas para problemas já tratados.

### 3.1 Objetivos Específicos

1. Mapear e caracterizar formalmente alguns dos processos produtivos de indústrias no contexto de escalonamento de tarefas, especificamente aqueles que possam ser caracterizados como problemas de minimização de trocas de ferramentas;
2. Elaborar métodos heurísticos e metaheurísticos consistentes e robustos que possam ser utilizadas em contextos reais que permitam a obtenção rápida de soluções próximas da solução ótima sem que se perca a vantagem da busca sistemática – inicialmente considerando problemas específicos, mas com uma possibilidade de generalização;
3. Desenvolver métodos paralelos e distribuídos para um melhor aproveitamento da tecnologia atual na resolução dos problemas tratados;
4. Desenvolver métodos exatos para a resolução dos problemas abordados e propor novas implementações para modelos matemáticos existentes mas com resultados pouco expressivos;
5. Avaliar o comportamento de diferentes formulações para os problemas abordados;
6. Pesquisar técnicas para refinamento de soluções obtidas por heurísticas e metaheurísticas;
7. Buscar a aplicação prática dos métodos desenvolvidos em contextos reais, a fim de que também seja constituído um avanço para as indústrias;
8. Propor novos conjuntos de instâncias *benchmark* para os problemas tratados;
9. Publicar os resultados deste trabalho de pesquisa em periódicos e eventos nacionais e internacionais.

## 4 Metodologia proposta

A etapa inicial do trabalho de pesquisa se dará por uma pesquisa em campo junto a unidades industriais relacionadas ao tema do projeto para coleta de dados e mapeamento do cenário industrial atual. Estes processos industriais serão agrupados e caracterizados como problemas computacionais abstrato. Dada esta caracterização, será realizado o levantamento bibliográfico a respeito dos problemas caracterizados e correlatos, a fim de se obter a fundamentação teórica necessária e determinar o estado da arte em questão. O levantamento bibliográfico consistirá na análise e classificação de todos os trabalhos relacionados, concentrando-se nas publicações minimamente referenciadas e que representem uma contribuição para evolução do estado da arte. Tais publicações serão pesquisadas em bases bibliográficas acadêmicas e também nos sites de pesquisadores. A atualização dos dados coletados será mantida por meio de ferramentas que permitem criar alertas para novos resultados incluindo palavras-chaves relacionadas ao tema da pesquisa.

Após a determinação do estado da arte relacionado aos temas da pesquisa, os problemas caracterizados serão especificados formal e detalhadamente, abrangendo aspectos particulares da indústria. Em seguida, serão avaliadas as representações computacionais existentes para os problemas especificados, levando em consideração quais características podem ser exploradas e aprimoradas. Novas representações podem eventualmente ser propostas. Com base nas estruturas definidas, o problema será modelado e detalhado. Os modelos escolhidos serão avaliados e validados quanto à sua aplicabilidade e eficácia. Posteriormente serão pesquisados métodos utilizados para modelos equivalentes ou correlatos, a fim de se obter maior embasamento para o projeto das abordagens a serem desenvolvidas.

Métodos iniciais para o tratamento dos problemas serão propostos, implementados e analisados, aprimorando-se as estratégias utilizadas. Em paralelo, serão realizadas validações da consistência dos métodos implementados e também testes preliminares que embasarão análises sobre o desempenho e a efetividade das estratégias empregadas.

Serão utilizados conjuntos de dados disponíveis na literatura para realização de *benchmarking* e também conjuntos de dados reais advindos da indústria. O *benchmarking* permitirá a comparação entre os métodos desenvolvidos e métodos que compõem o estado da arte dos problemas estudados. Os métodos desenvolvidos serão também analisados qualitativamente a respeito de sua complexidade e de sua eficiência de acordo com diferentes critérios estatísticos. A partir de tais dados será possível determinar o avanço obtido em relação ao estado da arte.

Os métodos desenvolvidos serão analisados e aprimorados até que se atinja um nível satisfatório de desempenho. Uma vez concluídos os aprimoramentos e implementações, os métodos serão novamente validados e serão submetidos a experimentos computacionais extensivos com maior carga de dados, e também à comparações com métodos disponíveis na literatura. Serão analisadas e discutidas a relação entre o desempenho dos métodos propostos e as propriedades de cada solução obtida.

Os métodos desenvolvidos serão também analisados qualitativamente a respeito de sua complexidade computacional e de sua eficácia de acordo com os valores obtidos para o solução média e tempo de execução médio, entre outros critérios estatísticos. A partir de tais dados será possível determinar o avanço obtido em relação ao estado da arte dos problemas tratados. Após a validação dos resultados obtidos, será realizada uma avaliação crítica a respeito do trabalho desenvolvido, abrangendo todas as estruturas e estratégias de solução empregadas, para analisar o desempenho individual de cada qual.

Será realizada uma avaliação crítica a respeito do trabalho desenvolvido, abrangendo todas as estruturas e estratégias empregadas. Por fim, a contribuição gerada e a relevância dos resultados obtidos também serão alvo de uma análise crítica, a qual abordará, além destes aspectos, a aplicabilidade dos métodos desenvolvidos. Cada etapa do trabalho será devidamente registrada para fins de elaboração de relatórios técnicos e artigos. Resultados iniciais relevantes serão compilados em forma de artigos e serão submetidos à periódicos e eventos de áreas relativas ao tema.

## **5 Etapas de execução do projeto e cronograma de atividades**

As atividades deste projeto são elencadas pela lista abaixo. Como o projeto aborda diferentes problemas de planejamento de produção, algumas atividades são subdivididas em etapas independentes, que consistem em realizar a mesma atividade com temas diferentes. Por exemplo, a atividade “Fundamentação Teórica” é realizada em três etapas independentes, uma vez que os processos industriais, e eventualmente as unidades industriais, serão diferentes entre si. São as atividades:

### **1. Fundamentação Teórica**

- 1.1. Visitas técnicas a unidades industriais para mapeamento de processos e coleta de dados;
- 1.2. Estudo e classificação dos principais métodos de resolução apresentados na literatura como de sucesso para a resolução dos problemas considerados e correlatos.

### **2. Especificação dos Problemas**

- 2.1. Definição clara e inambígua dos problemas abordados, seus objetivos e restrições, considerando as variações encontradas na literatura, porém, concentrando-se na aplicação prática dos problemas.

### **3. Definição de Estruturas e Modelagem**

- 3.1. Avaliação de técnicas e estruturas de inteligência computacional promissoras que não foram ainda consideradas na literatura para os problemas abordados.
4. Implementações Iniciais
  - 4.1. Projeto e análise experimental de algoritmos construtivos;
  - 4.2. Projeto e análise experimental de algoritmos de busca local;
  - 4.3. Implementação das técnicas heurísticas e metaheurísticas consideradas mais promissoras para a resolução dos problemas.
5. Validação e Testes
  - 5.1. Verificação da viabilidade das soluções geradas pelos métodos implementados e testes preliminares considerando conjuntos de instâncias da literatura e dados reais.
6. Aprimoramento das Implementações
  - 6.1. Reavaliação das estruturas e modelagem utilizadas, propostas de alterações de modo a melhorar o desempenho dos métodos propostos;
  - 6.2. Projeto, análise e implementação de técnicas para melhoria fina de soluções (*polishing*).
7. Realização de Experimentos Computacionais Extensivos
  - 7.1. Avaliação estatística das implementações por meio da realização de *benchmarking* utilizando bases de dados disponíveis na literatura e dados reais advindos da indústria.
8. Realização de Estudos Comparativos
  - 8.1. Comparação do desempenho dos métodos propostos e os métodos que compõem o estado da arte em relação aos problemas tratados;
  - 8.2. Comparação do desempenho dos métodos propostos e os métodos empregados na prática em indústrias;
  - 8.3. Análise qualitativa a respeito da complexidade computacional e da eficiência de acordo com os valores obtidos para solução média, tempo de execução médio, convergência e robustez, entre outros critérios.
9. Elaboração de Publicações
  - 9.1. Escrita e submissão de artigos científicos e registro de relatórios técnicos.
10. Participação em eventos científicos
  - 10.1. Participação em simpósios e congressos nacionais, para manutenção de contato com a comunidade acadêmica e o estado da arte relacionado aos temas abordados, além apresentação do trabalho de pesquisa em seus diversos estágios, quando adequado.

O gráfico de *Gantt* da Figura 3 apresenta o cronograma de execução do projeto de pesquisa, indicando cada uma de suas etapas. Por se tratar de um projeto com execução de três anos, o período de tempo é discretizado em trimestres, indicando a duração aproximada para determinada tarefa ou etapa.

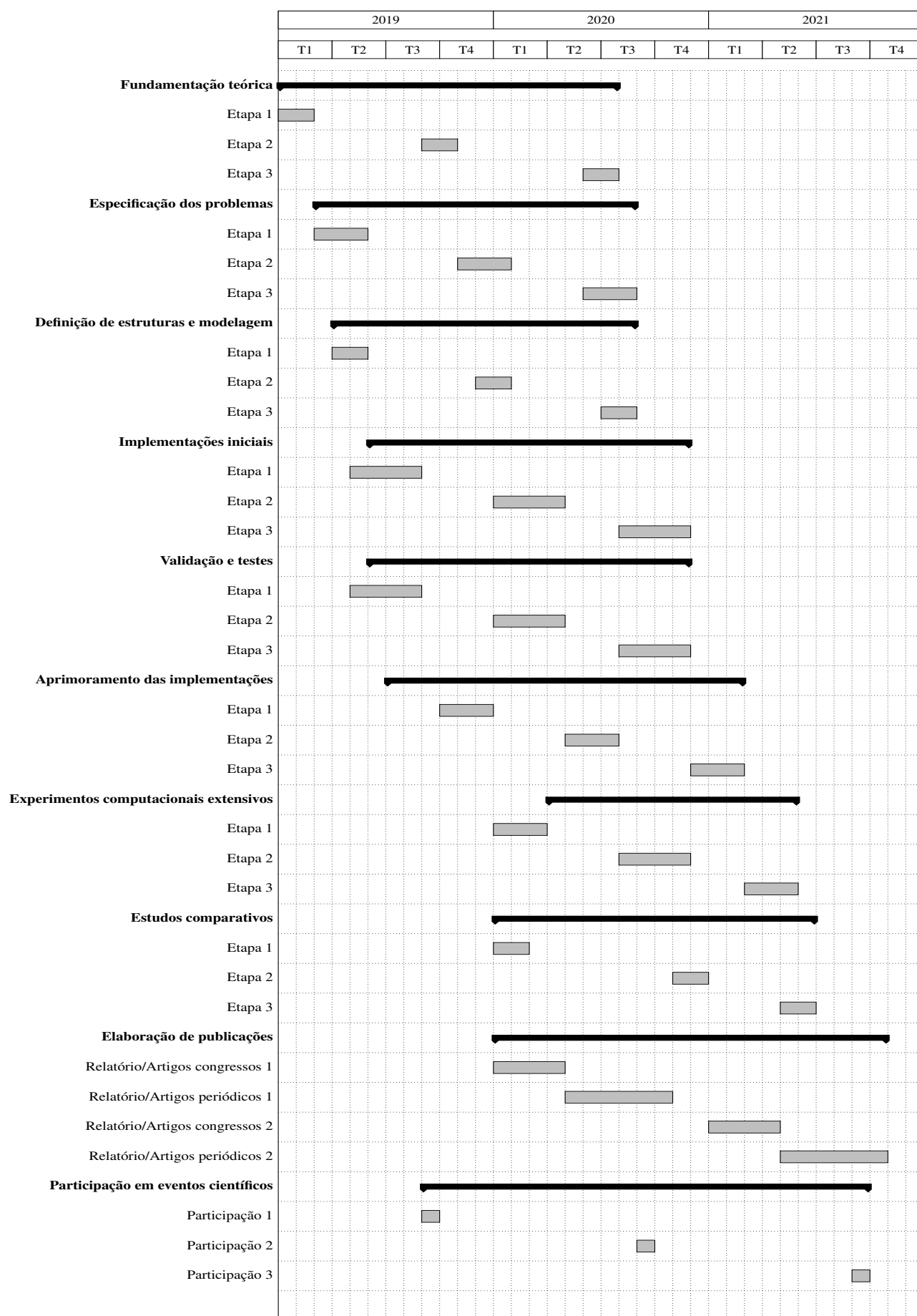


Figura 3: Cronograma de execução das atividades.



## 6 Produtos esperados

Em decorrência da execução deste projeto são esperados a apresentação de três *softwares* de inteligência computacional desenvolvidos para a abordagem dos problemas de planejamento de produção elencados neste projeto, seis submissões de trabalhos completos a congressos científicos nacionais, participação em seis congressos científicos nacionais com possibilidade de apresentação oral de trabalhos completos, submissão de três artigos completos em periódicos especializados e, produção de seis relatórios técnicos referentes as etapas de desenvolvimento das ferramentas de inteligência computacional.

## 7 Colaborações e infraestrutura

A Universidade Federal de Ouro Preto está localizada próximo a pólos industriais importantes de Minas Gerais, e já há tratativas iniciais para realização de visitas técnicas a algumas destas unidades industriais mineiras relacionadas ao tema do projeto para mapeamento de processos e coleta de dados, incluindo eventualmente conjuntos de instâncias reais. Os termos de eventuais colaborações entre universidade e indústria serão formalizados por meio do Núcleo de Inovação Tecnológica e Empreendedorismo (NITE) da Universidade Federal de Ouro Preto.

## Referências

- A. Allahverdi. The third comprehensive survey on scheduling problems with setup times/costs. *European Journal of Operational Research*, 246(2):345–378, 2015.
- A. Allahverdi, J. Gupta, e T. Aldowaisan. A review of scheduling research involving setup considerations. *Omega*, 27(2):219–239, 1999. doi: 10.1016/S0305-0483(98)00042-5.
- A. Allahverdi, C. Ng, T. E. Cheng, e M. Y. Kovalyov. A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European journal of operational research*, 187(3):985–1032, 2008.
- D. Calmels. The job sequencing and tool switching problem: state-of-the-art literature review, classification, and trends. *International Journal of Production Research*, pages 1–21, 2018.
- Y. Crama, A. W. J. Kolen, A. G. Oerlemans, e F. C. R. Spieksma. Minimizing the number of tool switches on a flexible machine. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 6(1): 33–54, 1994. ISSN 0920-6299, 1572-9370. doi: 10.1007/BF01324874.
- Y. Crama, L. S. Moonen, F. C. Spieksma, e E. Talloen. The tool switching problem revisited. *European Journal of Operational Research*, 182(2):952–957, 2007.
- H. Dadashi, S. Moslemi, e A. Mirzazadeh. Optimization of a new tool switching problem in flexible manufacturing systems with a tool life by a genetic algorithm. 2016.
- H. Farughi, M. Dolatabadiazadeh, V. Moradi, S. Mostafayi, et al. Minimizing the number of tool switches in flexible manufacturing cells subject to tools reliability using genetic algorithm. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10:17–33, 2017.
- R. L. Graham, E. L. Lawler, J. K. Lenstra, e A. R. Kan. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey. In *Annals of discrete mathematics*, volume 5, pages 287–326. Elsevier, 1979.

- M. Hirvikorpi, K. Salonen, T. Knuutila, e O. S. Nevalainen. The general two-level storage management problem: A reconsideration of the ktms-rule. *European journal of operational research*, 171(1):189–207, 2006.
- M. Hirvikorpi, T. Knuutila, T. Leipälä, e O. S. Nevalainen. Job scheduling and management of wearing tools with stochastic tool lifetimes. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 19(4):443–462, 2007.
- B. Matzliach e M. Tzur. Storage management of items in two levels of availability. *European Journal of Operational Research*, 121(2):363–379, 2000.
- Y. Mauergauz. Job and tool group scheduling for a machining center. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 12(4):280–287, 2017.
- M. Pinedo. Scheduling: theory, and systems, 2008.
- J. Rupe e W. Kuo. Solutions to a modified tool loading problem for a single fmm. *International Journal of Production Research*, 35(8):2253–2268, 1997.
- C. S. Tang e E. V. Denardo. Models arising from a flexible manufacturing machine, part i: minimization of the number of tool switches. *Operations research*, 36(5):767–777, 1988.
- M. Tzur e A. Altman. Minimization of tool switches for a flexible manufacturing machine with slot assignment of different tool sizes. *IIE Transactions*, 36(2):95–110, 2004.
- N. Van Hop. The tool-switching problem with magazine capacity and tool size constraints. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 35(5):617–628, 2005.
- L. Zeballos. A constraint programming approach to tool allocation and production scheduling in flexible manufacturing systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(6):725–743, 2010.