

Processo produtivo de cerveja artesanal caseira e sua análise através do Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrições de Recursos (PSPRR)

Brenda Fontes, Clarisse Da Silva Vieira

Resumo: A otimização de processos, atividades e do uso de recursos vem se destacando cada vez mais como ferramenta de suporte a tomada de decisão. Com esse contexto, surgiu a oportunidade de desenvolvimento de uma análise do processo produtivo da cerveja artesanal caseira através do Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrições de Recursos (PSPRR). O algoritmo utilizado foi modificado a partir do trabalho apresentado por Artigues, Michelon e Reusser (2003) - *Insertion techniques for static and dynamic resource-constrained project scheduling* e foi utilizado como ferramenta estratégica, modelando a alocação de recursos hoje disponíveis no processo estudado e como isso impacta no tempo de entrega de uma demanda preestabelecida. Foi feita também uma análise do desempenho computacional do modelo quando são alteradas as unidades de entrada dos dados e a organização do grafo do processo.

Palavras chave: Cerveja, Recurso, PSPRR, Desempenho.

Homemade craft beer production process analyzed through the Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)

Abstract: The optimization of processes, activities and the use of resources has been increasingly highlighted as a decision support tool. With this context, the opportunity arose to develop an analysis of the production process of homemade craft beer through the Resource Constrained Project Sequencing Problem (PSPRR). The algorithm used was modified from the work presented by Artigues, Michelon and Reusser (2003) - *Insertion techniques for static and dynamic resource-constrained project scheduling* and was used as a strategic tool, modeling the allocation of resources available today in the studied process and how that impacts the delivery time of a pre-established demand. An analysis of the computational performance of the model was also performed when the data input units and the organization of the process graph were changed.

Key-words: Beer, Resource, RCPSP, Performance.

1. Introdução

Conhecer o processo produtivo da cerveja é conhecer como uma das bebidas alcoólicas mais consumidas, no Brasil e no mundo, é produzida, seja por moldes artesanais, seja em escala industrial. A cerveja é descrita por (Hornsey, 2016) como uma bebida alcoólica essencialmente obtida pela fermentação de extratos ricos em açúcar oriundos de uma variedade de amidos vegetais. “Ela acompanhou o desenvolvimento da civilização, não só pela praticidade de fabricação e baixo custo se comparada a outras bebidas, mas também porque sempre foi considerada uma bebida socializante e nutritiva” (MORADO, 2009, p. 30).

Ainda segundo Morado (2009), foi a partir da década de 70, na Europa, que começou o movimento de retomada da cultura cervejeira. Ele foi impulsionado pela preocupação, por

parte de cervejeiros tradicionais ingleses, com a crescente padronização do produto que vinha acontecendo desde a Revolução Industrial.

O ressurgimento das cervejas artesanais na Europa e nos Estados Unidos já é uma revolução concreta. O mercado consumidor mudou, se tornou mais exigente, preocupado com a qualidade do produto e dos ingredientes, e agora busca por satisfação sensorial. Essa mudança nas exigências do consumidor vem fazendo com que a diversificação do setor cresça de maneira acelerada e ainda força as grandes corporações a buscarem maneiras de se reinventarem para não perder mercado.

No Brasil, o movimento chegou consolidado, promovendo mudanças muito rápidas no setor. Dados do MAPA indicam um crescimento de 23% no número de cervejarias registradas entre dezembro de 2017 e setembro de 2018. Segundo a Abracerva, sem considerar as cervejarias não registradas, o número saltou de 70 para mais de 700 em dez anos.

Os responsáveis por toda essa mudança são os pequenos produtores artesanais, que, na maioria das vezes, começam a produzir por hobby ou curiosidade e acabam se apaixonando pelo movimento. A produção caseira ou de fundo de quintal se transforma então em microcervejarias, e começam a chamar atenção por seus produtos únicos e de origem regional. São esses pequenos produtores que sofrem mais com o mercado que tem se tornado cada vez mais integrado e competitivo. Assim, torna-se necessária a implantação de ferramentas e estratégias que sejam capazes de ajudar a mitigar desvantagens competitivas como tributação e processos burocráticos. Desta forma, o foco desses empreendedores passa a ser voltado ao uso dessas estratégias para promover redução de custos e aumento de receitas.

Com esses objetivos a otimização de processos, atividades e do uso de recursos vem cada vez mais se destacando como ferramenta de suporte a tomada de decisão. É nesse contexto que surgiu a oportunidade de desenvolvimento do estudo apresentado, que tem como objetivo analisar a alocação de recursos no processo produtivo da cerveja artesanal caseira, afim de entender o impacto que sua quantidade tem no tempo de entrega de projetos.

Inicialmente será feita uma revisão bibliográfica sobre processo produtivo da cerveja artesanal caseira e o modelo matemático exato usado. Em sequência será apresentada a proposição do modelo, e para finalizar, como maneira de exemplificar o uso de ferramentas no suporte a formação de estratégias e tomada de decisão, um estudo de caso da aplicação do modelo matemático ao processo.

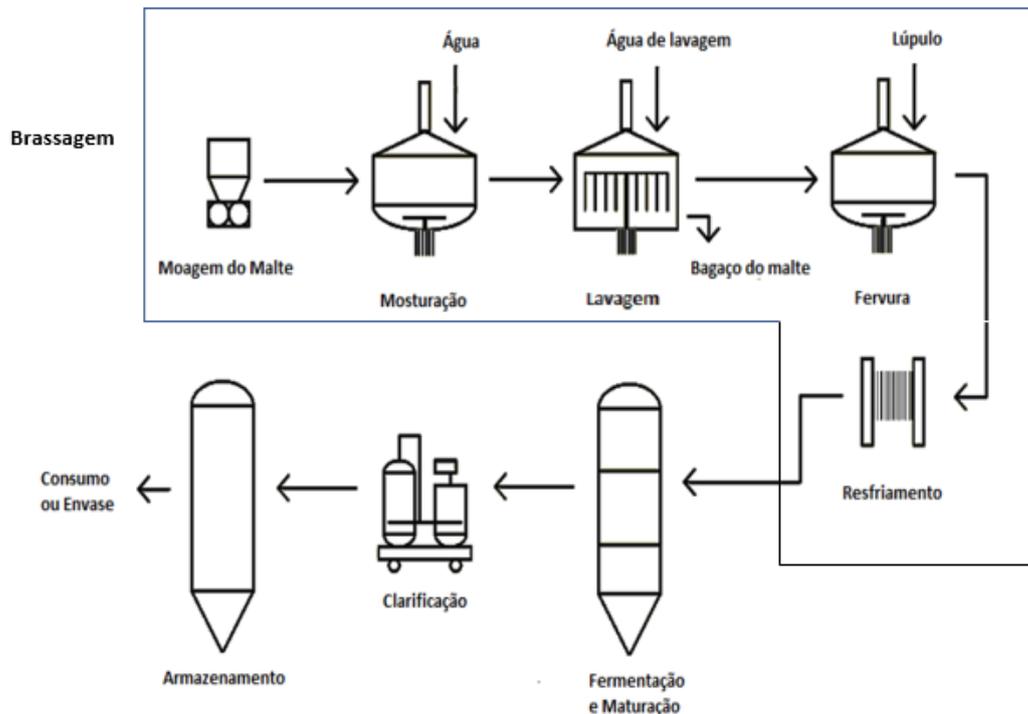
2. Referencial teórico

2.1 Processo produtivo

Grandes cervejarias geralmente tratam o processo de maneira um pouco diferente, uma vez que possuem etapas de filtração e pasteurização em grande escala, que são inviáveis para produtores artesanais, além de também terem os recursos para preparar o próprio malte. Com essas exceções o processo é similar, com as etapas padronizadas em brasagem, fermentação, maturação e acabamento.

No âmbito artesanal as nomenclaturas das etapas podem variar de acordo com o mestre cervejeiro, mas o processo em si não sofre alteração. São quatro macro-etapas: brasagem, fermentação/maturação, clarificação e carbonatação/envase. As variações que podem ocorrer durante o processo são referentes a temperaturas e tempos de processamento dependendo do estilo de cerveja que está sendo feito.

A brassagem é conhecida como o processo de cozimento da cerveja, e se trata de uma sequência de procedimentos que transformam o amido e as proteínas contidas no malte em uma solução de açúcares chamada de mosto. Inclui os seguintes processos: moagem, mostura, lavagem dos grãos, fervura, separação do *turb* e resfriamento.



Fonte: Fonte: (TOZETTO, 2017)

Figura 1 - Representação básica do processo produtivo da cerveja artesanal caseira

A moagem do malte é feita para expor o amido presente nos grãos de maneira a facilitar o processo de transformação dos mesmos em açúcares fermentáveis. A mostura consiste na mistura do malte moído a água já aquecida para formação dos açúcares fermentáveis. A lavagem dos grãos é feita no momento em que se está separando o líquido aquecido durante a mostura dos grãos de malte, sua finalidade é aumentar o rendimento de açúcares presentes no mosto. A fervura é uma etapa importantíssima para a cerveja porque é nela que acontece a esterilização do mosto pela alta temperatura, ajuste da concentração de açúcares, evaporação de substâncias indesejadas e a adição do lúpulo.

Dando sequência, a separação do *turb* consiste em movimentos circulares até a formação de um redemoinho no líquido ao fim da fervura. Seu intuito é facilitar a sedimentação de resíduos sólidos do malte fiquem ao fundo da panela para que possam ser separados do mosto. O resfriamento do mosto deve ser feito o mais rápido possível para prevenir contaminações, além disso é necessário para promover temperatura mínima aceitável para adição das leveduras.

Após o resfriamento está completa a etapa de cozimento da cerveja, os equipamentos utilizados são limpos aproveitando a água quente que sai da troca de calor do resfriamento e também para manter a organização do ambiente de produção caseira.

A fermentação é acontece através do consumo dos açúcares fermentáveis pelas leveduras, e como produto desse processo são liberados álcool e dióxido de carbono. A maturação é considerada por muitos cervejeiros como fermentação secundária. Ao fim da fermentação,

quando já não existem açúcares fermentáveis a temperatura é elevada entre $2 \sim 4^{\circ}\text{C}$ e isso dá uma reanimada em algumas leveduras que consomem produtos indesejados produzidos por elas próprias no começo da fermentação.

Ao fim da fermentação/maturação é feita uma trasfega entre recipientes como maneira de recuperar as leveduras, que podem ser utilizadas novamente, e também eliminar resíduos sólidos que assentam durante a fermentação. A clarificação é a diminuição da temperatura para entre $1 \sim 2^{\circ}\text{C}$ com finalidade de forçar a sedimentação de qualquer resíduo sólido que ainda possa estar presente. É uma etapa importante para garantir a limpidez da cerveja.

O envase pode ser feito em barris de chopp, que é o caso do processo analisado neste trabalho, ou em garrafas de vidro e a carbonatação é utilizada como maneira de complementar a quantidade de dióxido de carbono presente na cerveja, que após a fermentação pode não atingir os níveis esperados.

2.2 Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrições de Recursos (PSPRR)

Artigues *et al.* (2003) apresentam o Problema de Sequenciamento de Projetos com Restrições de Recursos (PSPRR) como sendo constituído de um conjunto de atividades $V = \{1, 2, \dots, n\}$, e um conjunto de recursos renováveis $R = \{1, 2, \dots, m\}$. Cada recurso $k \in R$ tem uma capacidade constante processamento R_k . As restrições de precedência entre as atividades são definidas por um conjunto de arcos E , de modo que $(i, j) \in E$. De maneira que a atividade j só pode ser iniciada quando a atividade i estiver finalizada. Cada atividade $i \in V$ requer uma quantidade não negativa r_{ik} de cada recurso $k \in R$ e possui um tempo de processamento p_i . O problema de sequenciamento é caracterizado através do conjunto $S = \{S_1, \dots, S_n\}$, e tem como objetivo determinar a data de início S_i de cada atividade do projeto, de forma que a quantidade de cada tipo de recurso utilizado, durante um determinado período de execução, seja menor ou igual à quantidade total disponível deste recurso, minimizando por fim o tempo total de duração do projeto (makespan), que é caracterizado por C_{max} .

Artigues *et al.* (2003) ainda aponta o PSPRR como derivado do modelo matemático clássico do Job Shop, o enquadrando à classe NP-hard de otimização combinatória. O que significa, segundo Da Cunha *et al.* (2002), que possui ordem de complexidade exponencial, ou seja, que o esforço computacional para a sua resolução cresce exponencialmente com o tamanho do problema. No caso do PSPRR essa situação acontece com o aumento do número de atividades do projeto.

Além de minimizar o makespan, um segundo objetivo abordado pela modelagem do PSPRR é o gerenciamento de custos apresentados em trabalhos como os de (PATTERSON & TALBOT, 1990) e (YANG *et al.*, 2001).

Por tratar do sequenciamento de atividades o PSPRR pode ser aplicado a uma vasta gama de projetos e processos. Desta maneira, diversas variações do problema foram surgindo ao longo dos anos. Segundo Jourdan *et al.* (2009) métodos exatos encontram a solução ótima, caso ela exista, e avaliam sua otimização. “Um dos maiores inconvenientes é que o número de variáveis do modelo cresce muito rapidamente com o tamanho do problema, o que possibilita que apenas problemas de pequena e média instância, com até trinta atividades, possam ser resolvidos de maneira satisfatória” (VIEIRA *et al.*, 2007, p. 3).

“Quando o número de instâncias se torna muito grande para ser tratado por métodos exatos a alternativa é a utilização de métodos heurísticos e metaheurísticos, eles buscam uma

solução satisfatória para o problema, podendo ou não ser a solução ótima” (JOURDAN *et al.*, 2009, p. 124).

O trecho a seguir trata das diferentes abordagens heurísticas para o PSPRR:

A maior parte das abordagens heurísticas para o RCPSP consiste em dois elementos: uma regra de prioridade (Priority Rule) para determinar a prioridade de cada atividade baseada em critérios pré-definidos e um esquema de geração de cronograma (Schedule Generation Scheme) para criar um cronograma usando a lista de atividades priorizadas. Alguns dos métodos heurísticos mais utilizados são: Busca Local (Local Search), Algoritmos Gulosos (Greedy Algorithms), Métodos Truncados de Derivação e Limitação, métodos baseados em arcos disjuntivos e algoritmos baseados em sequenciamento por blocos (VIEIRA *et al.*, 2017, p. 4-5 *apud* MORILLO *et al.*, 2015).

3. Proposição do modelo de programação linear inteira mista utilizado

O modelo proposto abaixo foi desenvolvido através da proposição de alterações no modelo desenvolvido por Artigues *et al.* (2003).

$$\min t_t \quad (1)$$

s.a.

$$y_{ij} = 1 \quad \forall (i,j) \in E \quad (2)$$

$$y_{ji} = 0 \quad \forall (i,j) \in E \quad (3)$$

$$t_j - t_i - y_{ij} \sum_{i \in V} p_i \geq p_i - \sum_{i \in V} p_i \quad \forall i \in V \cup \{s\}, \forall j \in V \cup \{t\}, i \neq j \quad (4)$$

$$f_{ijk} - (\max\{q_{ik}\})y_{ij} \leq 0 \quad \forall i \in V \cup \{s\}, \forall j \in V \cup \{t\}, \forall k \in R, i \neq j \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V \cup \{t\}} f_{ijk} = q_{ik} \quad \forall i \in V \cup \{s\}, \forall k \in R, i \neq j \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V \cup \{s\}} f_{ijk} = q_{jk} \quad \forall j \in V \cup \{t\}, \forall k \in R, i \neq j \quad (7)$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall i \in V \cup \{s\} \cup \{t\} \quad (8)$$

$$f_{ijk} \geq 0 \quad \forall i \in V \cup \{s\}, \forall j \in V \cup \{t\}, \forall k \in R \quad (9)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V \cup \{s\}, \forall j \in V \cup \{t\} \quad (10)$$

Onde:

V = {1, 2, ..., n}: conjunto das n atividades do projeto;

R = {1, 2, ..., m}: conjunto dos m recursos renováveis;

E: conjunto das atividades cuja relação de precedência é conhecida a priori, ou seja, a atividade j só será iniciada após a conclusão da atividade i;

s e t: atividades fictícias que representam, respectivamente, o início e o fim do projeto;

q_{ik}: quantidade do recurso renovável k que a atividade i necessita para ser executada;

p_i: tempo de processamento da atividade i;

f_{ijk}: fluxo do recurso k da atividade i para a atividade j;

y_{ij}: variável binária que estabelece se a atividade i precede j;

t_i: data de início da atividade i;

t_t: data de início da atividade fictícia final t;

A função objetivo (1) minimiza a data de início da atividade fictícia final t . A restrição (2) assegura as relações de precedência estabelecidas a priori. A restrição (3) fixa os valores das variáveis y_{ji} quando a relação de precedência é preestabelecida. A (4) representa as relações de sequenciamento entre as atividades. A restrição (5) define a possibilidade de fluxo de um tipo de recurso entre duas atividades. As restrições (6) e (7) representam a conservação da quantidade de recursos utilizada por cada atividade. Por fim, as restrições (8), (9) e (10) representam os respectivos domínios das variáveis de decisão.

As alterações em relação à Artigues *et al.* (2003) foram que a função objetivo agora é minimizar t_t , que é a atividade fictícia final e, minimizando essa data, a duração do projeto é minimizada. A definição das variáveis y_{ji} como 0 impede que o modelo precise conferir a possibilidade de o caminho ji existir, e por fim, os parâmetros M e N passaram a ser calculados e deixaram de ser atribuídos aleatoriamente. Tais modificações garantem a otimização em questão de tempo e memória de processamento, que são importantes para problemas mais complexos e com maior quantidade de atividades como o apresentado neste estudo.

4 Descrição do problema

O processo produtivo estudado é de uma produção informal caseira, a princípio feita como hobby e por interesse em aprofundar os conhecimentos sobre o processo, que vem ganhando popularidade pela qualidade e apontando grande potencial de vendas.

Será feito um estudo desse processo com uma visão macro, em que a etapa de brassagem não é detalhada em seus processos menores (de moagem ao resfriamento, de acordo com a Figura 1). Foi proposto um projeto em que o objetivo é entregar uma demanda fictícia de 260L, que representam quatro lotes de 65L de acordo com a capacidade instalada no momento da coleta de dados.

O PSPRR será aplicado com finalidade de analisar a alocação dos recursos geladeiras, e o impacto que sua quantidade tem no tempo de entrega. Os recursos renováveis considerados serão a mão de obra e as geladeiras, sendo que o primeiro não sofrerá variação de quantidade para ilustrar a situação real em que o produtor trabalha sozinho. Os recursos não renováveis não serão considerados, sendo eles os insumos água, malte, lúpulo, leveduras, energia térmica e elétrica.

O grafo da Figura 2 representa o projeto de produção de 260L de cerveja Belgian Blonde Ale, suas atividades e a ordem de precedência entre elas.

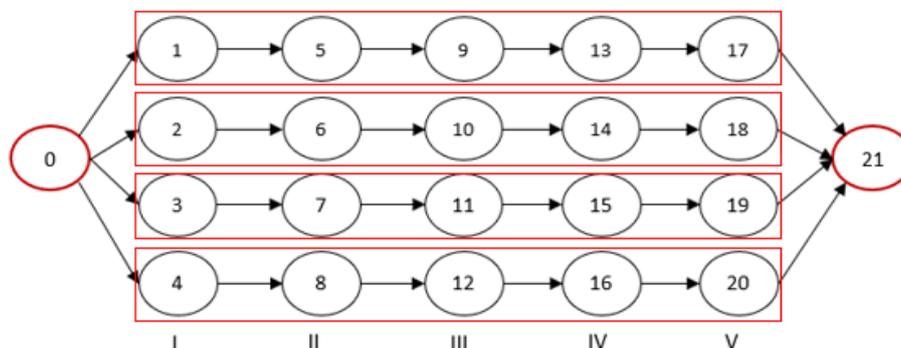


Figura 2 - Grafo do projeto estudado

As atividades 0 e 21 são fictícias e marcam o início e fim do projeto.

As colunas enumeradas correspondem a um grupo de atividades similares, ou seja, as atividades 1, 2, 3 e 4 indicam o início de produção de cada lote. Sendo assim, as etapas de produção são: I - Brassagem de cada lote; II – Fermentação e Maturação de cada lote; III – Trásfega de cada lote; IV – Clarificação de cada lote; V – Envase e Carbonatação de cada lote.

Como é possível observar no grafo a situação inicial não estipula uma obrigatoriedade na ordem de produção dos lotes, deixando livre para o modelo decidir. É importante destacar que a necessidade de armazenamento de produto pronto refrigerado é desconsiderada na modelagem, considerando uma situação de estoque zero. Desta maneira, assim que concluídas todas as etapas do processamento de cada lote, o produto seria entregue ao cliente final. Essa condição não representa a situação real do produtor, que hoje tem disponível oito geladeiras. Algumas são sim utilizadas para armazenagem de produto pronto, o que faz com que o número de recursos geladeira disponíveis para produção de fato seja variável. Daí se justifica o problema apresentado até o momento, em que é preciso avaliar a disponibilidade de geladeiras para processamento, e programar com quanto tempo de antecedência seria necessário dar início ao projeto que visa entregar uma quantidade X de cerveja.

Em seguida a Tabela 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra todas as atividades consideradas no projeto, com seus respectivos tempos duração e a quantidade de recursos necessário para suas realizações. Os dados foram coletados durante quatro dias de visitas a produção, em que foi possível medir as durações e acompanhar de perto cada etapa.

Atividade	Duração (h)	Mão de Obra	Geladeiras
1 – Brassagem Lote 1	5,5	1	
2 – Brassagem Lote 2	5,5	1	
3 – Brassagem Lote 3	5,5	1	
4 – Brassagem Lote 4	5,5	1	
5 – Fermentação/Maturação Lote 1	96		1
6 – Fermentação/Maturação Lote 2	96		1
7 – Fermentação/Maturação Lote 3	96		1
8 – Fermentação/Maturação Lote 4	96		1
9 – Trásfega Lote 1	0,42	1	
10 – Trásfega Lote 2	0,42	1	
11 – Trásfega Lote 3	0,42	1	
12 – Trásfega Lote 4	0,42	1	
13 – Clarificação Lote 1	96		1
14 – Clarificação Lote 2	96		1
15 – Clarificação Lote 3	96		1
16 – Clarificação Lote 4	96		1
17 – Envase/Carbonatação Lote 1	0,64	1	
18 – Envase/Carbonatação Lote 2	0,64	1	
19 – Envase/Carbonatação Lote 3	0,64	1	
20 – Envase/Carbonatação Lote 4	0,64	1	

Fonte: Autores (2019)

Tabela 1 - Duração e recursos utilizados pelas atividades

Em um segundo momento, será feita uma situação considerando o dobro da produção inicial, tendo a produção de 520L, a fim de simular uma situação hipotética em que a demanda aumente. Mudando os dados de entrada é possível fazer diversos cenários em que a produção total fosse múltipla da capacidade instalada por lote.

Será utilizado o mesmo grafo apresentado na Figura 2, considerando duas bateladas por lote, ou seja, 130L. Foi a maneira encontrada de manter a organização do projeto sem aumentar o número de atividades, que na modelagem exata é um fator limitante. O tempo de processamento das atividades que dependem do recurso mão de obra será dobrado, desconsiderando o tempo de setup entre as bateladas. Já as atividades que dependem do recurso geladeira terão suas durações mantidas enquanto a utilização do recurso por lote dobra.

Utilizando os dados gerados a fim de definir a melhor representatividade do processo cervejeiro surgiu a oportunidade de fazer uma análise do desempenho computacional quando variando a organização do grafo e as unidades de entrada dos dados. Sendo esse o terceiro e último momento.

Abaixo são apresentadas as versões do projeto utilizadas a fim de comparação:

Unidade de entrada	Versão 1	Versão 2
Horas	V1h	V2h
Dias	V1d	V2d

Fonte: Autores (2019)

Tabela 2 - Situações consideradas para análise de desempenho

A Versão 1 traz a organização do projeto como foi representado na Figura 2, e a Versão 2 apresenta uma nova organização representada pelo grafo da Figura 3. As atividades das colunas III e V foram agrupadas em uma única, somando suas durações. Isso implica que todas as atividades das colunas antecessoras (II e IV) devem estar completas para que o projeto possa prosseguir.

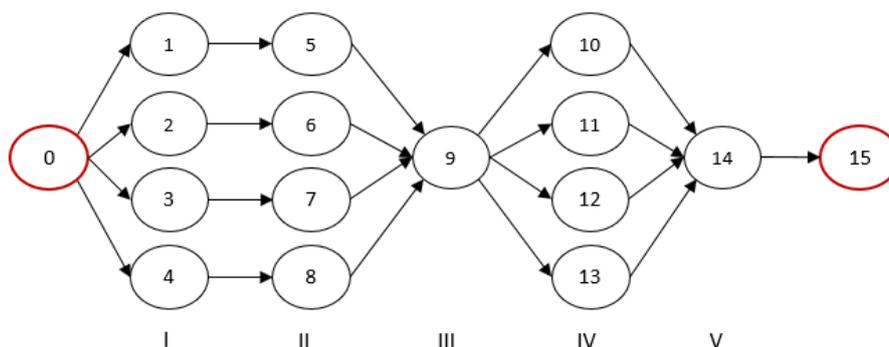


Figura 3 - Grafo do projeto na Versão 2

A adoção das durações em dias será utilizada como maneira de testar se essa mudança facilita os cálculos para o modelo, que passa a trabalhar com números inteiros. O sequenciamento obtido será utilizado para voltar o *makespan* total para horas, com o uso do Microsoft Project, a fim de conferir se são correspondentes aos apresentados inicialmente.

Com os resultados será feita a comparação do desempenho computacional entre os pares de versões V1h – V1d e V2h – V2d, quando variando a unidade de entrada dos dados. E também entre os pares V1h – V2h e V1d – V2d, em que serão comparados os tempos e memórias utilizadas quando variando a organização do grafo.

4.1 Resultados e análise

A implementação computacional foi feita com o otimizador GLPK 4.34 (*GNU Language Program Kit*) que é um pacote livre de otimização para problemas de programação linear em larga escala, programação inteira mista e outros problemas relacionados. O computador utilizado possui a seguinte configuração: sistema operacional *Windows 10 Home Single Language*, processador *Intel Core i7*, 2.4 GHz e memória RAM instalada de 8 Gb.

O otimizador não foi capaz de encontrar resultado com a organização do problema apresentado na Figura 2. Foi então feita uma modificação no grafo em que foi definida uma ordem de precedência entre as atividades da coluna I, de maneira que a atividade 2 só pode ser feita depois que a 1 é finalizada e assim sucessivamente quando temos apenas um recurso mão de obra disponível.

Em sequência temos a apresentação dos resultados com relação ao *makespan* obtido em cada situação, e sua redução em porcentagem com o acréscimo de geladeiras.

Quantidade de Geladeiras	<i>Makespan</i> (H)	Redução no <i>makespan</i> (%)
1	775,7	-
2	390,5	49,7
3	299,6	23,3
4	215	28,3
5	215	0
6	215	0

Fonte: Autores (2019)

Tabela 3 - Resultados variando a quantidade de geladeiras disponíveis

A modelagem com apenas uma geladeira deixou o problema muito restrito, não sendo possível encontrar uma solução com as configurações computacionais disponíveis. Neste caso, o *makespan* foi calculado com o Microsoft Project, tratando todo o projeto como sequencial e considerando as mesmas restrições de precedência e de uso de recursos.

Foi observada uma redução significativa no *makespan* se considerarmos que o investimento no tipo de geladeiras utilizado é baixo. Até então o produtor recolhe geladeiras que seriam descartadas por amigos ou as compra em ferros velhos, fazendo ele mesmo os concertos e adaptações necessárias para o uso.

Na situação apresentada o tempo mínimo para entrega dos quatro lotes são de 9 dias no caso com quatro geladeiras disponíveis, podendo chegar a 32 dias se tivermos apenas uma.

A seguir temos a Tabela 4 demonstrando os resultados obtidos no segundo momento, considerando o dobro da produção inicial.

Quantidade de Geladeiras	<i>Makespan</i> (H)	Redução no <i>makespan</i> (%)
1	X	X
2	820	-
3	820	0
4	407,2	50,3
5	407,2	0
6	311,2	23,6
7	311,2	0
8	238	23,5

Fonte: Autores (2019)

Tabela 4 - Resultados variando a quantidade de geladeiras disponíveis no segundo momento

Seria preciso começar a produção 34 dias antes quando utilizando duas geladeiras, chegando a 10 dias com oito. A duração das atividades de fermentação e clarificação são relativamente longas se as compararmos com as outras, com isso já era esperado que o problema apresentasse a linearidade de que dobrando a quantidade produzida teríamos a necessidade do dobro de tempo para conclusão do projeto.

Já era esperado que as reduções no *makespan* quando aumentando a quantidade do recurso geladeira apresentassem tendências similares. Além disso, é importante ressaltar que a modelagem foi feita considerando a livre disponibilidade do recurso mão de obra para manter o processo. Em caso de indisponibilidade do recurso em algum momento, devem ser considerados acréscimos no *makespan* total do projeto.

Com os resultados apresentados, o recurso que representa a capacidade de refrigeração se reafirma como limitante. Por se tratar de um produto artesanal, com foco na qualidade e sem uso de produtos químicos que visam aumentar seu tempo validade, a capacidade de manter um estoque mínimo refrigerado passa a ser um diferencial competitivo para o produtor. Além disso, a capacidade de atender flutuações de demanda é um fator importante para ele, que empreende no setor de construção civil e venda de hardwares, e tem a produção de cerveja como uma ocupação paralela. Muitas vezes existe demanda não suprida por não ter tempo hábil para produzir, tanto por depender de brechas em seu trabalho formal, quanto pelo tempo de produção que a cerveja exige.

Com tudo apresentado até o momento, temos que o próximo passo para o aumento da capacidade produtiva nas situações estabelecidas seria o investimento em uma câmara fria. Uma maior capacidade de armazenamento garantiria um fluxo mínimo de produto pronto, dando ao produtor maior controle sob a programação da produção.

Em relação à análise de desempenho, os dados foram tratados pelo *Microsoft Excel*, e o *Minitab* foi utilizado para definição do coeficiente de Pearson e montagem dos gráficos. O coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado para analisar a intensidade e a direção da relação linear entre a variação do número de geladeiras e o tempo e memória utilizados para resolução do problema pelo PSPRR.

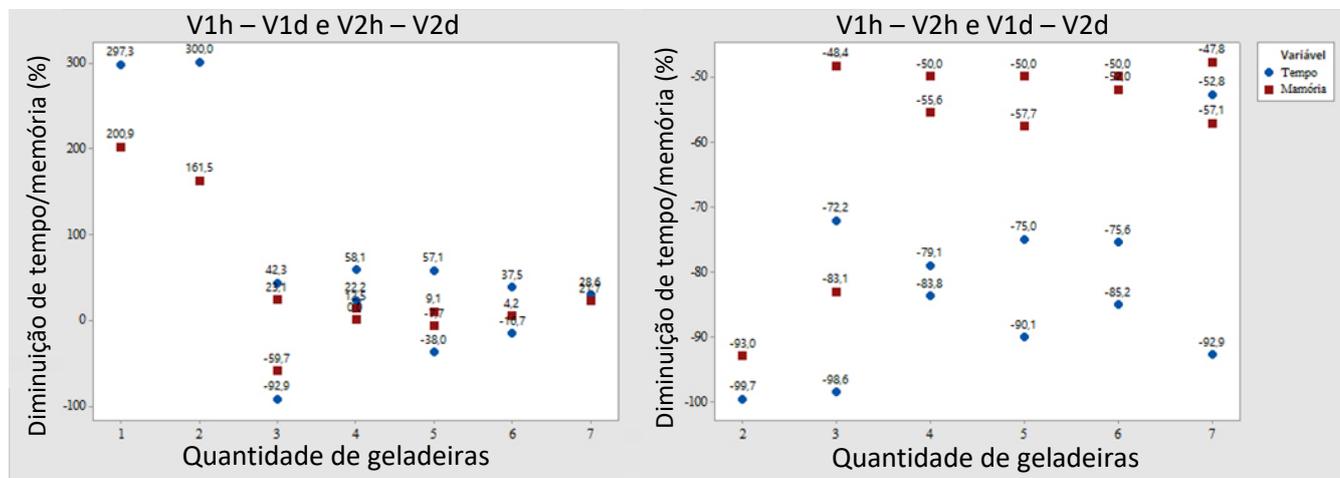


Figura 4 - Desempenho computacional entre os pares de versões

O primeiro gráfico da Figura 4 traz os valores da variação de tempo e de memória, em porcentagem, utilizados pelo modelo para encontrar as soluções quando mudando a unidade de entrada dos dados de horas para dias. O tempo e memórias apresentaram o coeficiente de Pearson iguais a $-0,621$ e $-0,617$ respectivamente. Indicando correlações de sinal decrescente, que significa que aumentando o número de geladeiras temos a tendência de diminuição do tempo/memória de modelagem.

Em questão do valor absoluto, temos a indicação de uma correlação moderada, segundo Hinkle & Wiersma (2003), em ambos os casos. Porém, quando feita a observação qualitativa dos dados foi notada uma falta de linearidade quanto ao comportamento das variáveis tempo e memória utilizados. Existindo situações em que elas diminuía, e em outras aumentavam. Não foi possível identificar o que causou esse comportamento.

Com relação à mudança de organização do grafo, o segundo gráfico da Figura 4 traz também a variação de tempo e de memória de processamento. O coeficiente de Pearson foi de $0,460$ em relação ao tempo, e $0,630$ em relação a memória.

Nesse caso temos as correlações com valores positivos devido ao fato de a escala ter englobado apenas valores negativos. Então ter os coeficientes de Pearson com sinais positivos indica que aumentando a quantidade de geladeiras temos a tendência de ter uma variação menor entre o tempo e a memória de processamento utilizados entre os dois momentos analisados.

Quanto aos valores absolutos, segundo Hinkle & Wiersma (2003), temos uma correlação fraca em relação ao tempo, e moderada em relação a memória. Quando feita a análise qualitativa dos dados, diferente do resultado apresentado quando mudando a unidade de entrada dos dados, temos uma linearidade clara da tendência de diminuição das variáveis observadas.

Com esses resultados podemos concluir que, se tratando da situação em que temos a mudança da organização do grafo do projeto, foi possível comprovar a melhoria no desempenho geral do modelo com média de redução de $82,3\%$ em relação ao tempo e $58,6\%$ a memória.

Analisado o desempenho computacional do modelo utilizado, ficaram muito claras algumas limitações da utilização de um modelo exato. A principal delas é como o grau de complexidade do problema pode crescer com facilidade, dificultando para que o método possa encontrar resultados em tempo hábil. É importante ressaltar que, mesmo apresentando limitações em relação à aplicação do método exato, à modelagem matemática é uma alternativa muito significativa para o processo de tomada de decisão. Pois, foi possível a análise e compreensão do processo produtivo bem como a definição do sequenciamento das atividades associada à alocação de recursos.

5. Conclusão

O processo produtivo estudado considerou um projeto de entrega de uma demanda pré-estabelecida no menor tempo possível de acordo com os recursos disponíveis, fazendo-se então a modelagem de com quantos dias antes seria necessário dar início ao projeto para que o produto fosse entregue na data firmada. O aumento na quantidade do recurso geladeira disponível proporcionou diminuições significativas no *makespan*, reafirmando sua disponibilidade como fator limitante ao aumento da capacidade produtiva.

Com esse cenário, apenas aumentos unitários na quantidade de geladeiras disponíveis não se mostra como a melhor abordagem. O espaço físico que as geladeiras ocupariam pode se tornar um problema, não apenas de organização do espaço, como também no que diz respeito a higiene, controle, manutenção, e podendo também interferir na produtividade e funcionalidade do ambiente de trabalho. Com isso, a melhor alternativa para o processo, nas condições analisadas, seria o investimento em uma câmara fria. Que seria capaz de prover uma maior capacidade de armazenamento, garantindo um fluxo mínimo de produto pronto e dando ao produtor maior controle sob a programação da produção.

Para finalizar foi feita uma análise de desempenho do modelo quando variando as unidades de entrada utilizadas e a organização das atividades do projeto. Nessa análise foi possível observar que o desempenho computacional tem alta correlação com a maneira que o problema é organizado no momento de *input* ao modelo. Com relação a variação na unidade de entrada dos dados o resultado apontou necessidade de aprofundamento da pesquisa.

Referências

- ABRACERVA. Número de cervejarias artesanais no Brasil cresce 37,7% em 2017. **ABRACERVA**, 2018.
- ARTIGUES, C.; MICHELON, P.; REUSSER, S. Insertion techniques for static and dynamic resource-constrained project scheduling. **European Journal of Operational Research**, p. 249-267, 2003. ISSN 149.
- DA CUNHA, C. B.; BONASSER, U. D. O.; ABRAHÃO, F. T. M. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS COM HEURÍSTICAS DE MELHORIAS PARA O PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE. **XVI Congresso da Anpet – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 2002.
- HINKLE, D. E.; WIERSMA, W. **Applied Statistics for the**. 5ª. ed. Boston: Houghton Mifflin, 2003.
- JOURDAN, L.; BASSEUR, M.; TALBI, E. -G. Hybridizing exact methods and metaheuristics: A taxonomy. **European Journal of Operational Research** **199**, p. 620-629, 2009.
- KLEIN, R.; SCHOLL, A. Computing Lower Bounds by Destructive Improvement: An Application to Resource-Constrained Project Scheduling Problems. **European Journal of Operational Research**, p. 1693-1703, 1999. ISSN 41.
- MAPA. Anuário da cerveja no Brasil - Edição 2018. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, 2018.
- MORADO, R. **Larousse da cerveja**. São Paulo: Lafontes Ltda., 2009.
- MORILLO, D.; MORENO, L.; SERNA, F. A branch and bound hybrid algorithm with four deterministic heuristics for the resource constrained project scheduling problem (RCPSP). **DYNA**, **82**, 2015.
- TOZETTO, L. M. **Produção e caracterização de cerveja artesanal adicionada de gengibre (Zingiber officinale)**. Dissertação (Mestrado em engenharia de produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa. 2017.
- VIEIRA, C. D. S. et al. Modelagem matemática no sequenciamento de projetos com restrição de recursos: um estudo de caso. **XLIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Blumenau - SC, 27 a 30 Agosto 2017.
- VIEIRA, C. D. S.; DE CARVALHO, C. R. V.; PINTO, R. L. **Um modelo de sequenciamento de atividades e alocação de recursos limitados em projetos**. XXXIX SBPO - A pesquisa Operacional e o Desenvolvimento Sustentável. Fortaleza, CE. 2007.
- YANG, B.; GEUNES, J.; O'BRIEN, W. J. **Resource-Constrained Project Scheduling: Past Work and New Directions**. Department of Industrial and Systems Engineering, University of Florida. Gainesville, p. Research Report 2001-6. 2001.