



SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES APLICADA À MELHORIA OPERACIONAL DE PROCESSOS PRODUTIVOS DE INSUMOS PARA DIAGNÓSTICO

Andrei Ferreira Pinto*

*Pós-Graduação em Engenharia Biomédica, UTFPR, Curitiba, Brasil
Rua Sete de Setembro, 3165 - Rebouças - Curitiba/PR - Brasil - 80.230-901
andreifp@ibmp.org.br

Karina Kawka**

**Universidade Federal do Paraná - UFPR
Avenida Coronel Francisco H. dos Santos, 100 - Jardim das Américas - Curitiba/PR - Brasil
karinak@ibmp.org.br

Sergio Leandro Stebel*

*Pós-Graduação em Engenharia Biomédica, UTFPR, Curitiba, Brasil
Rua Sete de Setembro, 3165 - Rebouças - Curitiba/PR - Brasil
stebel@utfpr.edu.br

RESUMO

O acentuado crescimento do setor biofarmacêutico, impulsionado pelo desenvolvimento tecnológico atual, tem pressionado instituições em direção ao aumento de eficiências produtivas. O cenário econômico atual, no entanto, exige cautela na ampliação e remodelamento de suas estruturas de produção. Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo de caso sobre efeitos de estratégias de melhoria na linha de processamento do Instituto de Biologia Molecular do Paraná por meio da construção e variação de modelos de simulação computadorizada baseada em agentes. A análise de oito diferentes cenários simulados revelou a possibilidade de redução de até 13,65% do tempo atual de processamento apenas com a eliminação de uma operação unitária e adição de uma centrífuga. Adicionalmente, foram esclarecidas as influências de fatores como a realocação de operadores na processividade do sistema e a possibilidade de redução do número de operadores sem alterar significativamente o ritmo produtivo.

PALAVRAS CHAVE. Simulação baseada em agentes, Processos produtivos, Otimização.

ABSTRACT

The rapid growth of the biopharmaceutical industry, stimulated by the recent technological development, has been pushing companies toward the increase of their productive efficiencies. However, the current economic scenario requires prudence in expansion and remodelling of production facilities. In this context, this paper presents a case study regarding the effects of improvement strategies in the processing line of the Molecular Biology Institute of Paraná through the construction and modification of agent-based simulation models. The analysis of eight different scenarios revealed the possibility of a reduction of up to 13.65% in the total process time, just by eliminating a processing step and adding a centrifuge. Furthermore, this paper aims to enlighten the influence of some factors, such as operators relocation, in the processivity of the system and the possibility of reducing the number of operators without significantly impacting the production rate.

KEYWORDS. Agent-Based Simulation. Productive processes. Optimisation.



1. Introdução

Considerado um dos setores industriais em crescimento mais acentuado da atualidade e destaque entre os interesses dos grandes *players* da economia global, o setor biofarmacêutico tem taxa de crescimento média estimada para os próximos anos de 9,4% ao ano, mais do que o dobro do mercado farmacêutico convencional [Persistence Market Research 2015]. A constante inovação e os amplos investimentos realizados no setor, motores da atual expansão, têm contribuído de forma significativa para o desenvolvimento de novas tecnologias e produtos, oferecendo soluções sofisticadas e altamente eficientes para diversas preocupações da medicina moderna [Otto et al. 2014]. Este cenário, acrescido da balança comercial expressivamente negativa do Brasil neste campo, tem pressionado as instituições brasileiras a fortalecerem a indústria nacional na produção de insumos para a saúde a fim de nacionalizar suprimentos para o Sistema Único de Saúde.

Neste contexto, dados os grandes esforços públicos na implementação de estratégias de monitoramento e controle epidemiológicos, a indústria biotecnológica voltada à produção e ao desenvolvimento de insumos para diagnóstico tem papel de destaque na evolução do mercado nacional. A infraestrutura de produção necessária para o fortalecimento de tal cadeia de fornecimento, no entanto, é consideravelmente limitada devido ao alto custo de investimento necessário para o estabelecimento de áreas produtivas para estes fins.

Deste modo, o aproveitamento máximo das estruturas já existentes é imprescindível para que seja possível expandir a capacidade produtiva e atender as crescentes demandas sem grandes investimentos em momentos econômicos não favoráveis.

A utilização de ferramentas computacionais de simulação discreta é de grande valia nestes casos, já que permite a experimentação de novos cenários de manipulação de recursos pré-existentes em um ambiente de risco zero, possibilitando análises completas sobre novas configurações produtivas e efeitos de intervenções em estruturas já estabelecidas sem que haja necessidade de alterações em sistemas reais [Montevechi et al. 2017] [Harrel et al. 2004].

Assim, o presente trabalho tem por objetivo a apresentação de um estudo de caso sobre a utilização de ferramentas de simulação discreta computadorizada para avaliar efeitos de modificações operacionais em uma linha de produção de insumos biotecnológicos para saúde.

2. Descrição do Problema

A Planta de Produção e Desenvolvimento de Insumos para Diagnóstico do Instituto de Biologia Molecular do Paraná (IBMP) inclui salas de processamento destinadas, principalmente, à finalização de insumos para diagnóstico molecular dos vírus causadores da AIDS, hepatite B e hepatite C em todas as bolsas de sangue processadas pela hemorrede pública brasileira.

Por sua vez, a crescente demanda pela inclusão de novos produtos nas linhas de produção do IBMP, impulsionada pela constante inovação e por novas necessidades de monitoramento epidemiológico em nível nacional, torna essencial a ampliação das atividades produtivas do Instituto. A expansão física da estrutura de produção, no entanto, é de elevada complexidade, já que o *layout* bem definido segundo conceitos de Boas Práticas de Fabricação e a presença de áreas limpas tornam modificações estruturais custosas em âmbitos econômicos, técnicos e regulatórios. Desta forma, é de grande interesse a realização de estudos detalhados sobre efeitos de melhorias nos processos a partir da reorganização e pequenas alterações em fluxos de produção já existentes, de modo a otimizar a utilização da infraestrutura já existente.

As atividades de produção atualmente empregadas são baseadas em ambientes compactos e equipados com instrumentos de operação essencialmente manual, tornando a eficiência de produção altamente sensível à distribuição de operadores e à disponibilidade de instrumentos para o processamento eficiente. Embora de grande influência no ritmo de produção analisado, não há quaisquer estudos exatos e aprofundados sobre a modificação de tais parâmetros.

A conjuntura dos fatores apresentados, acrescidos de um momento econômico desfavorável a ações de risco elevado, convergem para a necessidade de maiores estudos a fim de esclarecer capacidades e reais possibilidades da linha de finalização em questão.



3. Metodologia e Modelo de Simulação

A modelagem e simulação baseada em agentes (MSBA) refere-se a uma categoria de modelos computacionais que envolvem ações dinâmicas, reações e protocolos de intercomunicação entre agentes em um ambiente compartilhado, possibilitando a avaliação de seus desempenhos e a realização de inferências a respeito de seus comportamentos e propriedades [Abar et al. 2016].

Altamente indicados para simulações computacionais de padrões dinâmicos de comportamento adaptativo [Auchincloss e Diez Roux 2008], os modelos de simulação baseada em agentes apresentam grande aplicabilidade na representação de situações reais [Bonabeau 2002], já que permitem interações mais complexas entre os componentes da simulação.

Neste cenário, a fim de realizar o estudo de caso proposto neste trabalho, foi adotada uma estratégia de MSBA tendo os operadores de processos como agentes inteligentes e independentes entre si, atuando de acordo com a disponibilidade dos recursos elencados para operação por cada agente. O *software* FlexSim® foi selecionado como plataforma virtual de experimentação e construção de modelos computadorizados de simulação de diferentes cenários a serem analisados na linha de finalização de insumos do IBMP. A lógica de coordenação dos agentes é estabelecida a partir de fluxogramas no módulo *Process Flow*, ferramenta integrada ao *software* que habilita a abordagem MSBA na plataforma e fundamenta o modelo utilizado.

3.1 Construção de Modelo de Simulação

Inicialmente, com o objetivo de obter um modelo-base de simulação para as análises pretendidas, foi realizado um mapeamento de todas as operações unitárias realizadas no processo de interesse com base em fluxogramas de produção (Figura 1) de um dos insumos produzidos pelo Instituto.

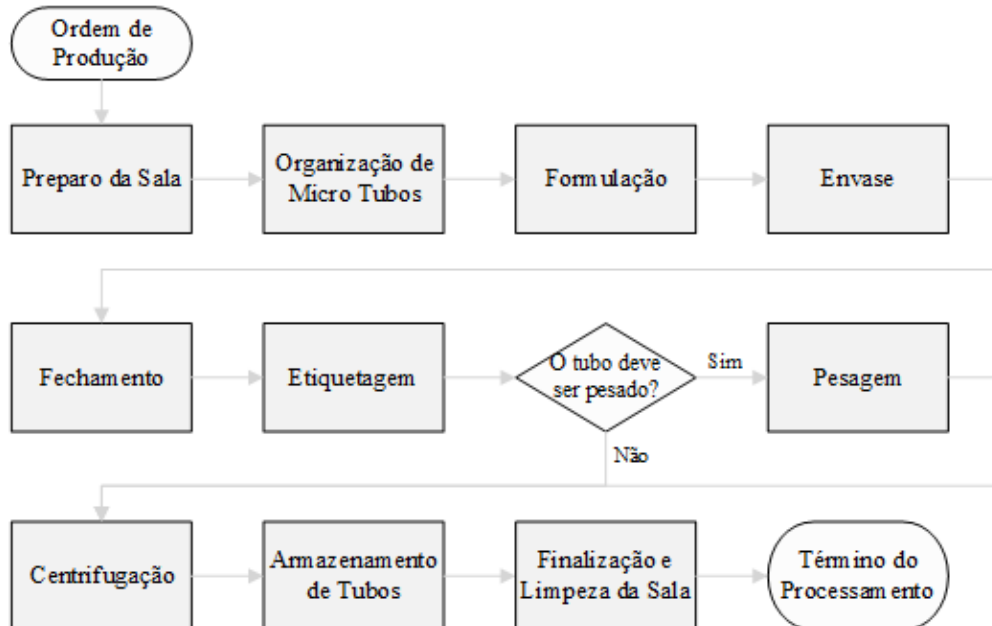


Figura 1. Fluxograma de operações unitárias básicas que compõem a finalização de insumos

A fim de tornar o modelo mais robusto e realista, as operações unitárias mais complexas envolvidas foram discretizadas em sub-operações, possibilitando abordagens particulares de cada fase de processamento, de acordo com a Tabela 1.



Tabela 1. Discretização de operações unitárias complexas

Operação Unitária	Sub-operação
Preparo da Sala	Limpeza da sala
	Verificação de Materiais e preenchimento de documentação
	Organização de materiais e <i>setup</i> da cabine
Organização de Micro Tubos	Organização de tubos, tampas e estantes
	Posicionamento de tubos
Envase	<i>Setup</i> do dispensador
	Dispensação
Fechamento	Posicionamento de tampas
	Rosqueamento de tampas
Centrifugação	<i>Setup</i> da centrífuga
	Centrifugação
	Retirada de tubos da centrífuga
Finalização e Limpeza da Sala	Conferência e conclusão de documento
	Limpeza e fechamento da sala

O modelo-base obtido apresenta como entradas planilhas de quantidades, que expressam dimensões de lotes produzidos e capacidades de objetos e instrumentos de processo, e planilhas de tempos, que expressam as durações de cada sub-operação considerada. Os dados de tempo empregados foram coletados a partir de cronoanálises da execução de 07 ordens de produção, possibilitando, por meio do *software* ExpertFit® a geração de curvas de distribuições probabilísticas para cada item processado nas diferentes atividades. Os parâmetros geradores de tais curvas foram utilizados como entradas para determinação da duração das operações unitárias envolvidas.

A construção do modelo inicial foi realizada por meio de duas abordagens distintas no *software* FlexSim®. A primeira consiste em um ambiente virtual 3D (Figura 2), utilizado para a representação gráfica de processos e execução de tarefas em cada operação unitária, possibilitando a geração de estatísticas de utilização de equipamentos e operadores. Já a segunda consiste no módulo *Process Flow*, responsável por organizar e coordenar a lógica de execução de tarefas utilizada pelo modelo 3D. Tal integração das duas abordagens permite customizar subprocessos complexos e interdependentes a partir da individualização de etapas de processamento.

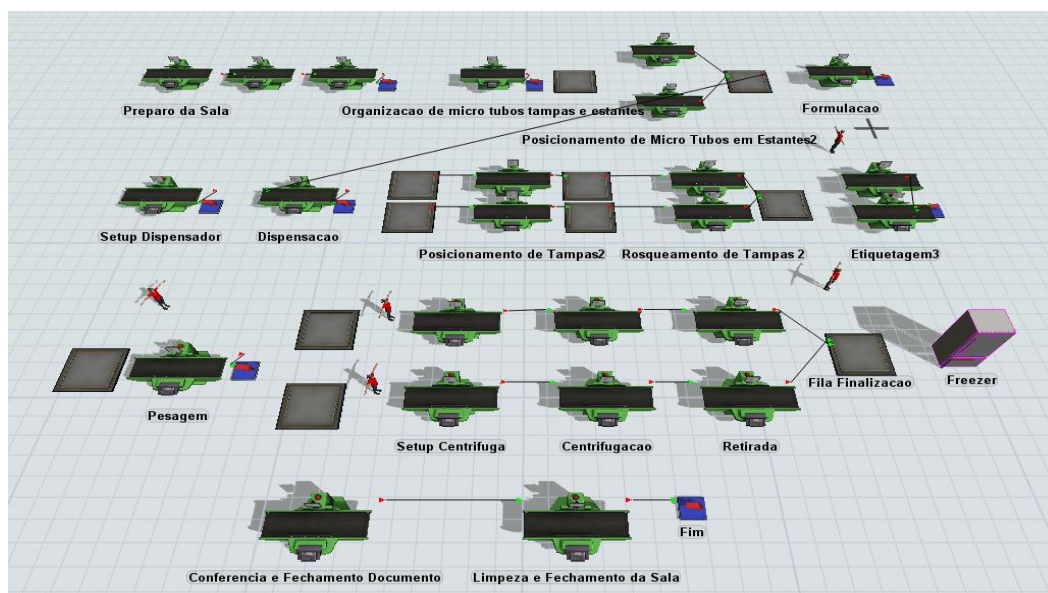


Figura 2. Ambiente virtual 3D para representação gráfica dos fluxos de processo.



A disposição de máquinas e operadores no modelo de simulação 3D é apenas ilustrativa, uma vez que boa parte dos processos ocorre no interior de uma cabine de biossegurança. Deste modo, a fim de evitar distorções cronológicas provocadas pela movimentação de operadores no modelo, o tempo de deslocamento dos operadores foi desconsiderado por meio da maximização da velocidade de deslocamento dos agentes. Tal ação permite a inferência da real percentagem de utilização dos operadores nas funções as quais são designados.

Dada a validade do modelo apresentado quanto à representação do funcionamento real da linha de processamento quando comparado com registros históricos não utilizados para a geração das curvas de distribuição, este foi utilizado como base para a realização de experimentos virtuais de melhorias e testes de cenários propostos.

A proposta de otimização das condições de processamento apresentada neste estudo de caso tem como foco a simulação de modificações simples e pontuais no modelo-base obtido, de forma a explicitar os efeitos das alterações quanto à eficiência da linha de produção. Desta forma, os parâmetros escolhidos para análise foram:

- **Número de operadores:** A redução do número de operadores pode disponibilizar pessoal para outras atividades da planta de produção. Deste modo, a avaliação das dimensões dos efeitos ocasionados por tal alteração é de grande interesse para a análise de viabilidade desta modificação.
- **Presença da etapa de pesagem:** A atual pesagem amostral de micro tubos pode ser substituída por outros métodos de controle de processo de modo a eliminar tal operação. A análise de cenários contendo ou não tal operação é de grande auxílio para mensurar as vantagens de tal modificação.
- **Número de estações de centrifugação:** A baixa capacidade de processamento da estação de centrifugação leva à formação de um aparente gargalo no modelo-base de simulação confeccionado. A adição de mais uma unidade de centrifugação é tomada como ação de implementação relativamente simples, sendo seus reais efeitos alvos de grande interesse para a análise da atratividade de tal modificação.

Baseado nos parâmetros acima descritos, outros 07 modelos de simulação independentes foram construídos seguindo um planejamento experimental fatorial completo com três fatores em dois níveis para a análise comparativa dos cenários apresentados pela Tabela 2. A modelagem dos demais cenários propostos foi realizada nos mesmos moldes do modelo-base (Cenário 5), não havendo quaisquer alterações das planilhas de entradas de dados.

Tabela 2. Relação dos cenários considerados para a construção dos demais modelos de simulação abordados.

Cenário	Número de Operadores	Número de Balanças	Número de Centrífugas
1	5	1	1
2	5	1	2
3	5	0	2
4	5	0	1
5	6	1	1
6	6	1	2
7	6	0	2
8	6	0	1



4. Resultados e Discussão

A fim de realizar a avaliação dos cenários construídos e possibilitar comparações de desempenho, foram extraídas dos modelos 04 informações principais: os perfis de utilização e os percentuais de ocupação dos operadores, os perfis de atividade das operações unitárias envolvidas e o tempo total de simulação para a conclusão do processamento de 1 lote.

A análise dos dados extraídos dos modelos mostrou a existência de períodos intermitentes de ociosidade em operadores em diferentes momentos dos processos envolvidos, explicitando a grande importância da distribuição da mão-de-obra entre os processos para a eficiência global.

A seguir, são apresentados diagramas de Gantt correspondentes a cada um dos cenários testados quanto à utilização de operadores e operações durante o processamento.

Cenário 1

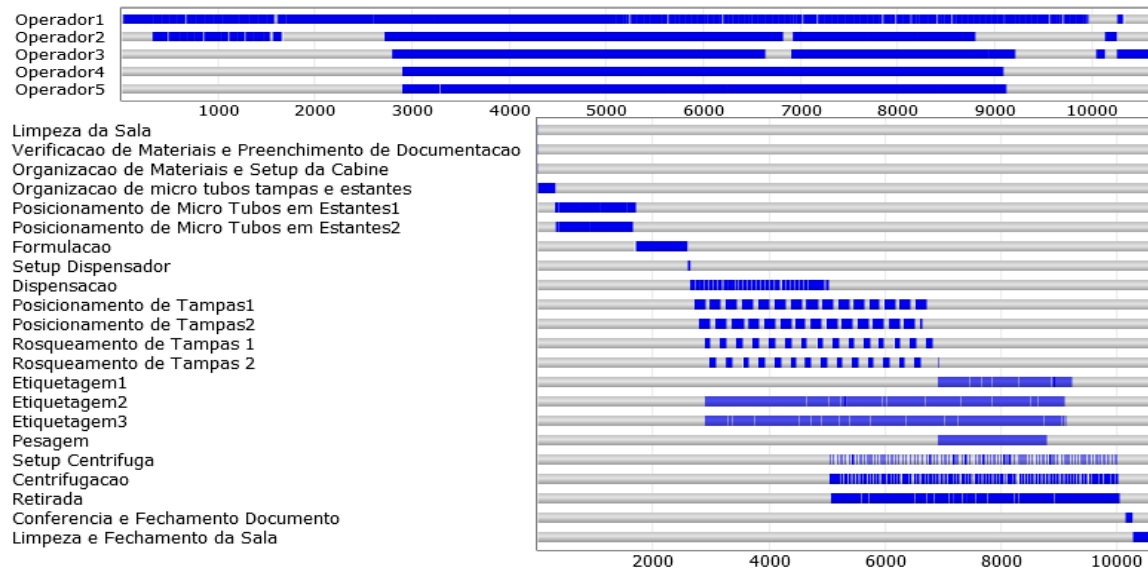


Figura 3. Gráfico de Gantt ilustrando o desempenho do sistema com configurações do Cenário 1, com 05 operadores, 01 estação de pesagem e 01 estação de centrifugação. Tempo em segundos.

Cenário 2

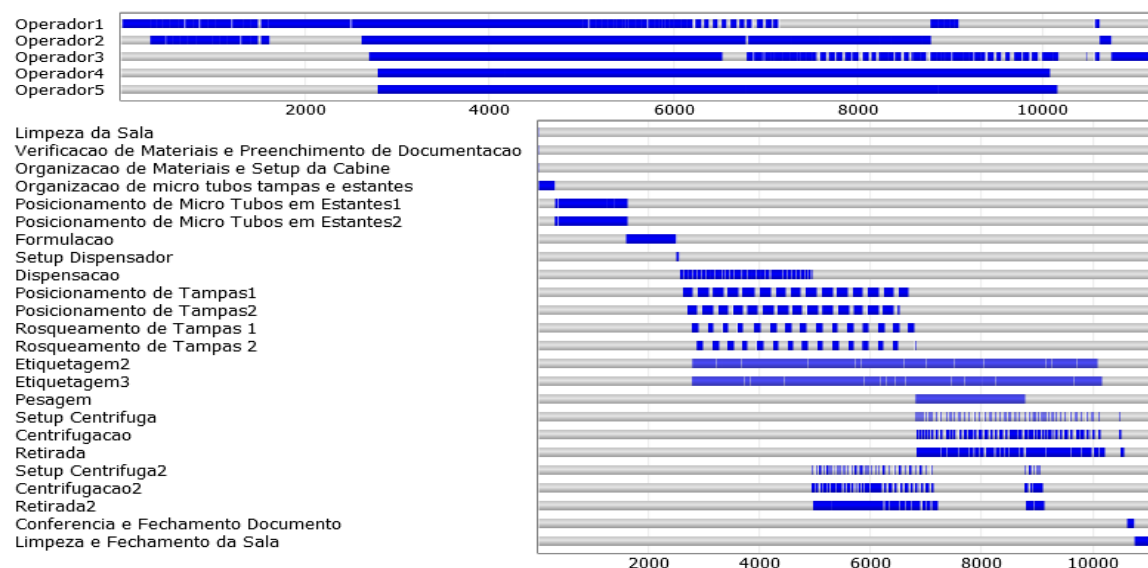


Figura 4. Gráfico de Gantt ilustrando o desempenho do sistema com configurações do Cenário 2, com 05 operadores, 01 estação de pesagem e 02 estações de centrifugação. Tempo em segundos.



Cenário 3

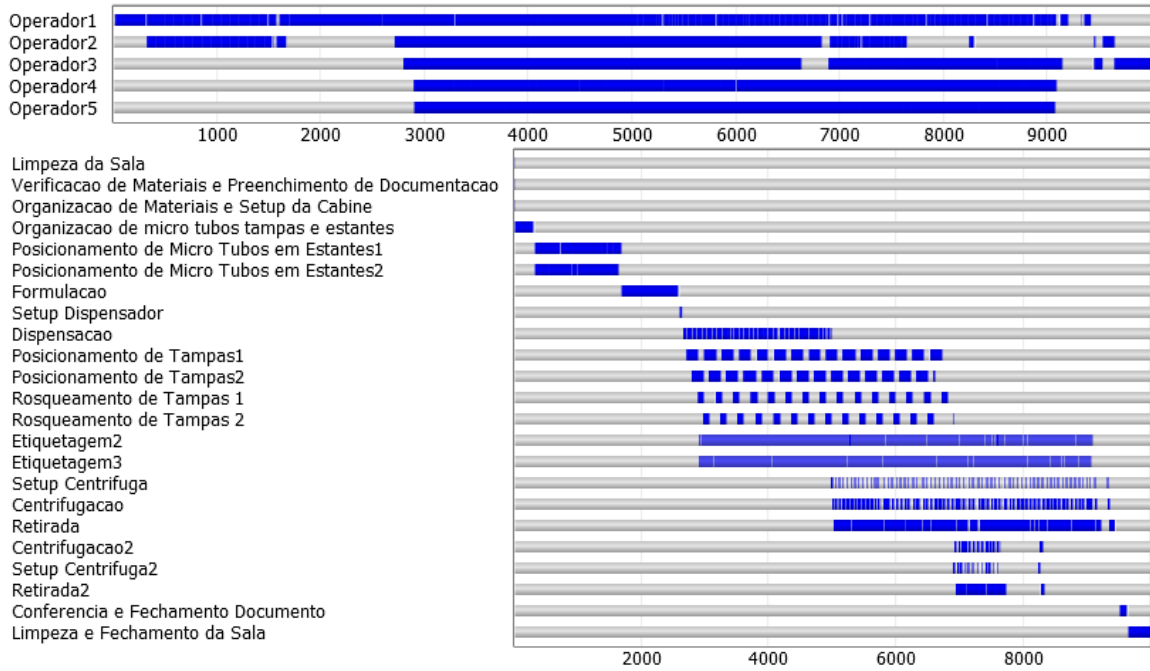


Figura 5. Gráfico de Gantt ilustrando o desempenho do sistema quando submetido as configurações do Cenário 3, com 05 operadores, ausência de pesagem e 02 estações de centrifugação. Tempo representado em segundos.

Cenário 4

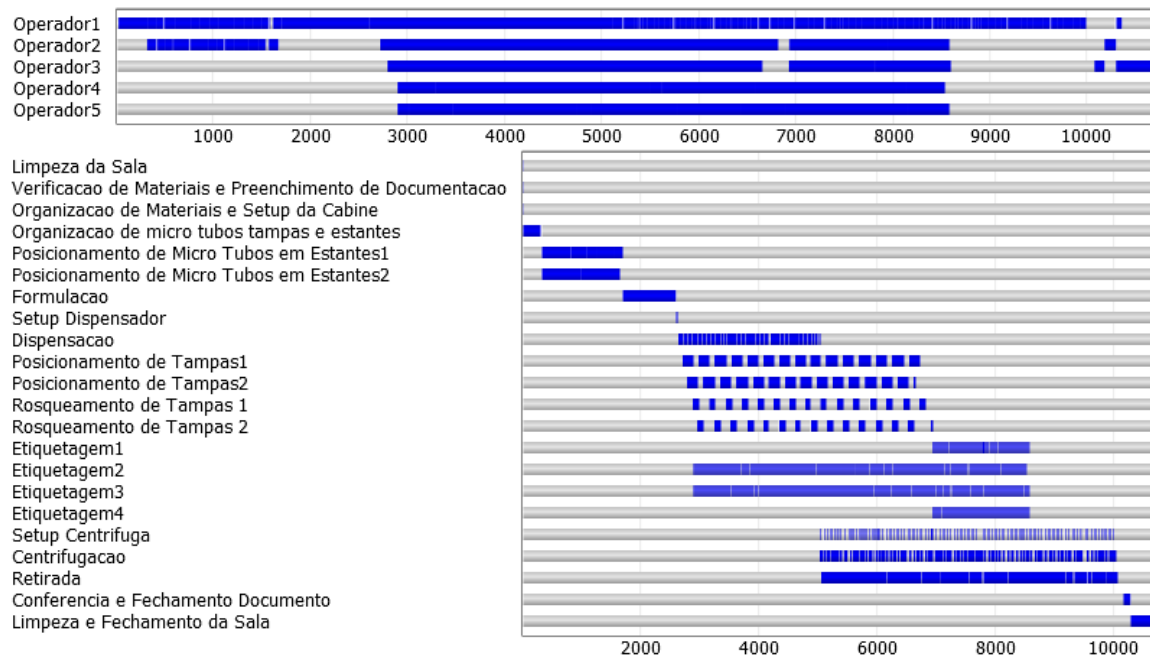


Figura 6. Gráfico de Gantt ilustrando o desempenho do sistema quando submetido as configurações do Cenário 4, com 05 operadores, ausência de pesagem e 01 estação de centrifugação. Tempo representado em segundos.



Cenário 5

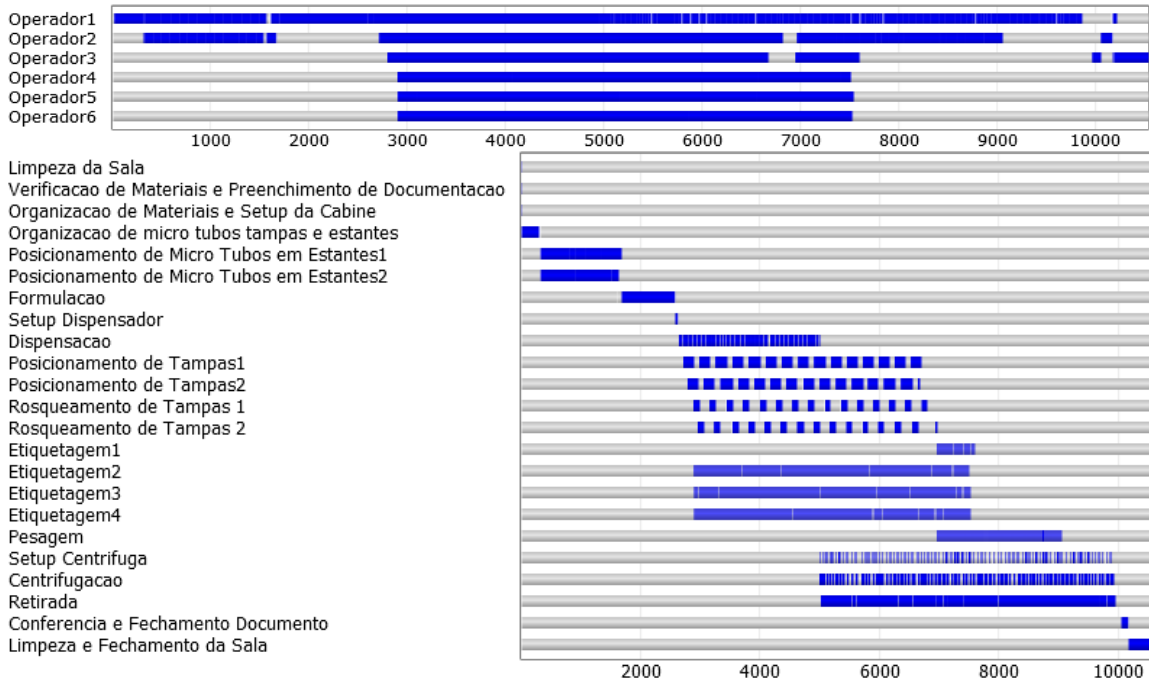


Figura 7. Gráfico de Gantt ilustrando o desempenho do sistema quando submetido as configurações do Cenário 5, com 06 operadores, 01 estação de pesagem e 01 estação de centrifugação. Tempo representado em segundos.

Cenário 6

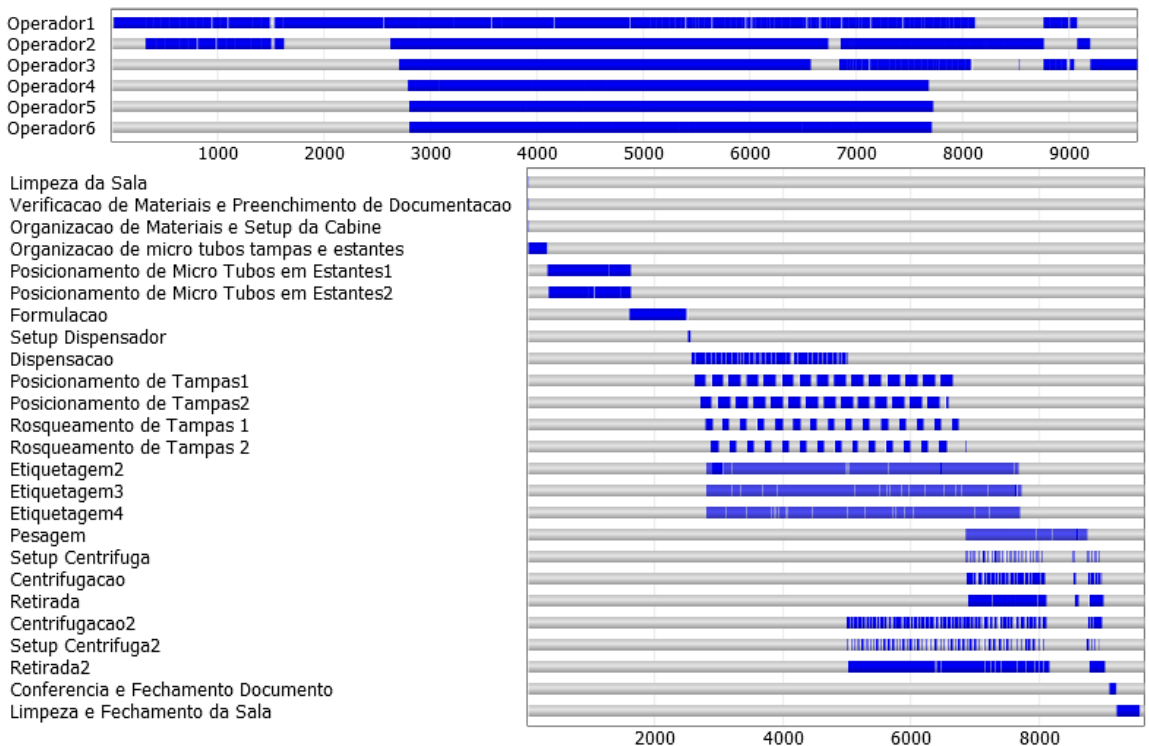


Figura 8. Gráfico de Gantt ilustrando o desempenho do sistema quando submetido as configurações do Cenário 6, com 05 operadores, 01 estação de pesagem e 02 estações de centrifugação. Tempo representado em segundos.



Cenário 7

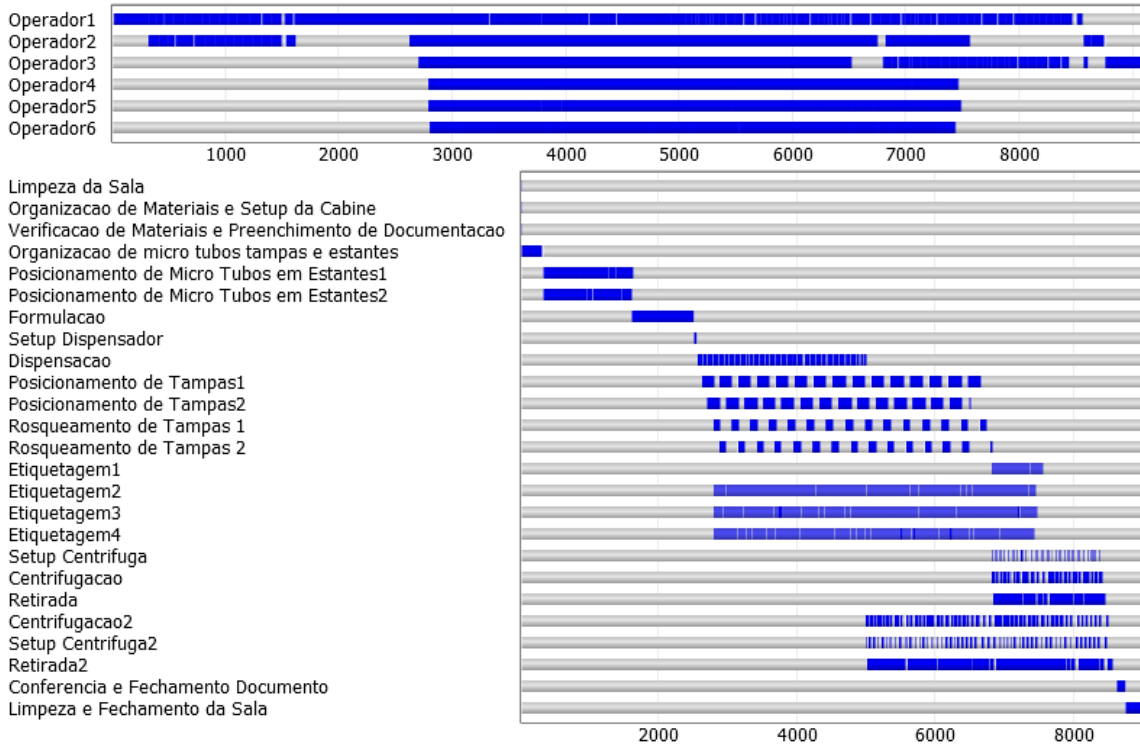


Figura 9. Gráfico de Gantt ilustrando o desempenho do sistema quando submetido as configurações do Cenário 7, com 06 operadores, ausência de pesagem e 02 estações de centrifugação. Tempo representado em segundos.

Cenário 8

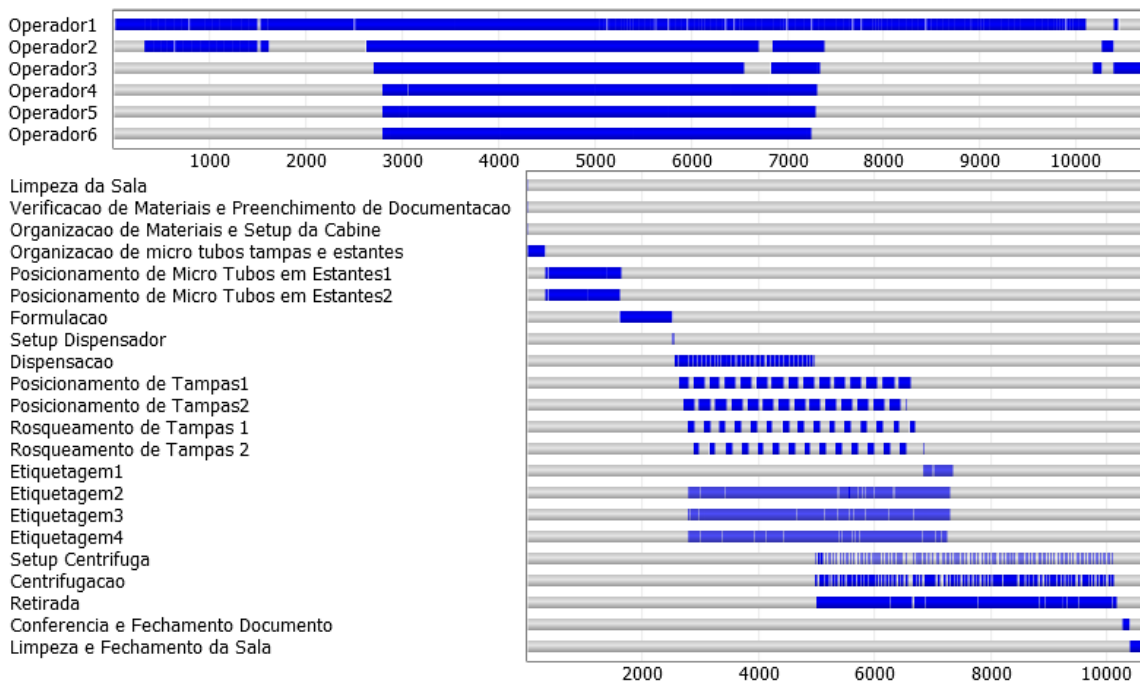


Figura 10. Gráfico de Gantt ilustrando o desempenho do sistema quando submetido as configurações do Cenário 8, com 06 operadores, ausência de pesagem e 01 estação de centrifugação. Tempo representado em segundos.



Os gráficos de Gantt apresentados para cada um dos 08 cenários analisados permitiram a observação do comportamento e utilização de recursos durante todo o ciclo de processamento considerado. Por sua vez, os resultados quanto ao tempo total de processamento e o percentual de ocupação dos operadores estão expressos na Tabela 3.

Tabela 3. Tempo total de simulação e percentual de ocupação dos operadores para cada cenário analisado.

Cenário	Número de Operadores	Pesagem	Número de Centrífugas	Tempo Total de Simulação		Ocupação de Operadores						
				s	h	1	2	3	4	5	6	Média
1	5	1	1	10630	2.95	94%	71%	61%	58%	58%	-	68%
2	5	1	2	11114	3.09	66%	68%	63%	65%	63%	-	65%
3	5	0	2	10014	2.78	90%	64%	66%	62%	61%	-	68%
4	5	0	1	10659	2.96	94%	67%	56%	53%	53%	-	65%
5	6	1	1	10540	2.93	94%	72%	48%	44%	44%	44%	57%
6	6	1	2	9648	2.68	86%	76%	60%	50%	50%	50%	62%
7	6	0	2	9117	2.53	92%	69%	64%	50%	50%	50%	63%
8	6	0	1	10753	2.99	94%	57%	45%	42%	41%	42%	53%

O cruzamento dos resultados gerados pelos modelos permite inferências sobre os efeitos gerais ocasionados por cada uma das modalidades de alteração realizadas.

O melhor cenário obtido para otimização nas condições propostas é o Cenário 7, com a eliminação da etapa de pesagem e a ampliação do número de centrífugas disponíveis para processamento, já que reduziu o tempo total de simulação em 13,65% (de 2,93 h nas condições atuais para 2,53 h). Tal configuração também gerou um aumento de 5% no percentual de ocupação dos operadores, em relação ao cenário atual, aumentando a eficiência global da linha de processamento.

4.1 Efeito do Número de Operadores

Entre os cenários estudados, a ampliação do número de operadores de 5 para 6 na linha de processamento reduziu significativamente o tempo total de simulação em 3 das 4 comparações possíveis deste parâmetro de forma isolada, com o máximo de redução de 0,41 horas quando os cenários 2 e 6 são confrontados. Esta situação, no entanto, não é verdadeira quando os cenários 4 e 8 são comparados, já que há um aumento de 0,04 horas no tempo de processamento quando 1 operador é adicionado ao processo. Tal projeção se deve à redistribuição de atividades com a ampliação do número de operadores, priorizando não críticas e reduzindo a processividade da linha. A média do percentual de ocupação dos operadores, por sua vez, sofre queda de 67% para 59% quando os conjuntos de cenários com 5 e 6 operadores são comparados, apontando para redução na eficiência global da linha quanto a utilização da mão-de-obra disponível.

4.2 Eliminação da Etapa de Pesagem

A eliminação da etapa de pesagem mostrou-se eficaz na redução do tempo total de processamento somente em cenários em que existem 02 unidades de centrifugação, gerando redução de até 10% no tempo total de processamento quando os cenários 2 e 3 são comparados.

Tal redução no tempo de processamento não é observada nos cenários com apenas 01 centrífuga devido ao deslocamento do operador responsável pela pesagem para a atividade de etiquetagem. Assim como é possível observar nos gráficos de Gantt apresentados pelas Figuras 3, 6, 7 e 10, o gargalo na etapa de centrifugação torna indiferente o aumento da processividade na etapa de etiquetagem, fazendo com que a eliminação da pesagem não possua efeito nesses casos.



4.3 Adição de uma Nova Unidade de Centrifugação

A adição de uma nova centrífuga na linha de processamento reduz significativamente o tempo total de simulação quando este parâmetro é analisado isoladamente em 75% dos casos, provocando redução de até 15,38% na duração do ciclo de processamento quando os cenários 7 e 8 são comparados.

4.4 Aspectos Gerais

Embora as variações dos parâmetros apresentem grande influência nas eficiências da linha de processamento estudada, a alocação dos operadores diante das alterações realizadas é de grande importância para o desempenho global da linha. A comparação entre os gráficos de Gantt gerados mostra a não linearidade na resposta do sistema as modificações realizadas entre os modelos, já que as diferentes localizações e a dinamicidade dos gargalos entre modelos tornam não eficazes a ampliação no número de recursos disponíveis em parte considerável das comparações possíveis.

Exemplo de tal fato é a indiferença da presença de um sexto operador quando se considera a existência de pesagem e somente 01 centrífuga (cenários 1 e 5). Nesta comparação, suportada pelos gráficos apresentados pelas Figuras 3 e 7, a existência de um gargalo na etapa de centrifugação torna pouco útil a alocação de um operador adicional na etapa de etiquetagem, sendo a variação mostrada na Tabela 03 resultante apenas de oscilações ocasionadas pelas distribuições de probabilidades utilizadas na geração dos modelos. Deste modo, a linha de produção poderia sofrer a redução de 01 operador sem grandes perdas no tempo total do ciclo, liberando mão-de-obra para outros procedimentos necessários na planta.

Outro fato que merece destaque na análise realizada neste trabalho é o menor efeito da disponibilização de recursos e/ou eliminação de operações unitárias em cenários que apresentam menor quantidade de operadores. Nos casos em que há menos operadores, a necessidade de realocação constante de mão-de-obra entre as diferentes atividades torna menos eficiente a disponibilização de recursos, já que a maior dificuldade de funcionamento simultâneo das operações torna mais evidentes os gargalos existentes em cada um dos cenários.

5 Conclusão

A construção de um modelo de simulação baseada em agentes para representar parte da linha de processamento de insumos do Instituto de Biologia Molecular do Paraná (IBMP) mostrou-se de grande valia para a análise de diferentes cenários de funcionamento da linha em questão. Obtido a partir do mapeamento, discretização e cronoanálise das operações de produção realizadas, a variação do modelo inicial permitiu o estudo do efeito de alterações de simples implementação na planta de produção do IBMP, entre elas a reformulação da quantidade de recursos empregados e a eliminação de operações unitárias atualmente utilizadas. A análise dos resultados obtidos demonstrou a possibilidade de redução de até 13,65% no tempo total de processamento com a eliminação da etapa de pesagem e a adição de uma nova estação de centrifugação, em comparação as condições atuais. O modelo revelou, também, a possibilidade de redução de 01 operador nas condições de processamento atuais sem que haja aumento no tempo total de processamento, aumentando a disponibilidade de mão-de-obra para outros processos na planta.

O grande volume de resultados gerados pelos modelos de simulação torna incontáveis as abordagens passíveis de análise, sendo de grande ajuda para a tomada de decisões de reformulação do processo produtivo sem que haja riscos práticos de falha, assim como demonstrado pela discussão dos resultados experimentais obtidos neste trabalho.



Agradecimentos

Os autores agradecem à UTFPR, ao IBMP e à FlexSim pelo apoio técnico e institucional prestados durante o desenvolvimento do trabalho aqui apresentado.

Referências

Abar, S., Theodoropoulos, G. K., Lemarinier, P., Hare, G. M. P. (2016). Agent Based Modelling and Simulation Tools: A review of the state-of-the-art software. *Computer Science Review*, <http://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001>

Auchincloss, A. H., Roux, A. V. D. (2008). A New Tool for Epidemiology: The Usefulness of Dynamic-Agent Models in Understanding Place Effects on Health. *American Journal of Epidemiology*, 168:1-8.

Bonabeau, E. (2002). Agent-Based Modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *The Procedures of the National Academy of Sciences USA*, 99:7280-7287.

Global Market Study on Biopharmaceuticals: Asia to Witness Highest Growth by 2020. Persistence Market Research, 2015.

Harrel, C. R., Ghosh, B. K., Bowden, R. (2004) Simulation Using Promodel. 2 ed. McGraw-Hill, Nova Iorque, NY, EUA.

Montevechi, J. A. B., Pinho, A. F., Leal, F., Marins, F. A. S. (2007). Application of design of experiments on the simulation of a process in na automotive industry. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Washington, DC, EUA.

Otto, R., Santagostino, A., Schrader, U. (2014). Rapid Growth in Biopharma: Challenges and Opportunities. *McKinsey & Company*.

Prado, D. S. (2010) Usando o Arena em Simulação. 4 ed. INDG Tecnologia e Serviços Ltda., Belo Horizonte, MG, Brasil.