

ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA COMBINANDO O *LEAN SIMULATION* E O PROJETO DE FÁBRICA

Luiz Gustavo de Souza¹

RESUMO

A simulação por eventos discretos é um importante instrumento utilizado para projetar uma realidade virtual, combinando técnicas tradicionais do *Lean Manufacturing* e a ciência de dados. Elas podem ser utilizadas em diferentes fases do ciclo de vida de um ativo físico, podendo identificar perdas e desperdícios como deslocamento, espera, superprocessamento, superprodução, estoques em processo, filas, defeitos e retrabalhos. Também pode identificar problemas de desbalanceamento no fluxo provocados pela presença de gargalos. As simulações computacionais podem ser agregadas e combinadas com outras metodologias, como os estudos de viabilidade econômica e financeira de um empreendimento, que tem como objetivo, avaliar os resultados projetados de uma iniciativa de investimento. Com as análises das métricas do *Lean Simulation* e melhorias no nivelamento dos recursos, foi possível evitar problemas de formação de gargalos e obter ganhos financeiros de mais de 36% na fase de viabilidade de um projeto de fábrica.

Palavras-chave: Projeto de Fábrica. Simulação Computacional. *Lean Manufacturing*. PCP.

1 INTRODUÇÃO

A simulação é uma importante ferramenta para construção de sistemas produtivos mais eficientes. Segundo Bateman (2013), a simulação pode ser entendida como a experimentação de um sistema real através de modelos.

Com o desenvolvimento e o aperfeiçoamento dos computadores, assim como a melhoria dos softwares de simulação, este recurso vem ganhando destaque no mundo da tecnologia sendo uma das ferramentas utilizadas na Indústria 4.0 (MUDULI et al, 2023, pg. 46).

¹ Master Black Belt Lean Six Sigma, Consultor Sênior e Graduando em Engenharia de Produção no Centro Universitário do Sul de Minas.

Existem várias possibilidades de realizar um projeto de simulação. Neste estudo, ele será iniciado na análise de viabilidade econômica e financeira, o EVEF, de uma fábrica de aquecedores solares. A partir da modelagem desta fábrica virtual, será possível projetar cenários, aos quais as modificações podem mostrar alternativas mais viáveis aos investidores. Aplicando as técnicas do *Lean Manufacturing* será possível observar a formação de gargalos, assim como propor a metodologia mais indicada para viabilizar as melhorias ainda no projeto de fábrica (ROSER, 2021). Esta combinação de técnicas dá origem ao *Lean Simulation*.

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Maximizar o potencial de retorno econômico e financeiro num projeto de fábrica, combinando técnicas do *Lean Manufacturing* e simulações de eventos discretos (*Lean Simulation*).

1.2 OBJETIVOS GERAIS

1. Avaliar o balanceamento do fluxo produtivo entre as estações de trabalho.
2. Identificar e eliminar gargalos e restrições ao fluxo produtivo.
3. Padronizar os tempos de produção para o planejamento e controle da produção.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Simulação Computacional

A simulação por eventos discretos foi criada para ser uma aliada computacional considerando os eventos de forma estocástica. Isto é fundamental para entender como a variação pode alterar a performance de um sistema produtivo (KELTON, SADOWSKI e SADOWSKI, 2001). Deste modo, possibilita mudanças nos modelos, projetando cenários para contribuição no processo decisório.

São várias as aplicações que podem ser simuladas num simulador de eventos discretos. Dentre elas pode-se citar sistemas logísticos, manufatura, mineração e siderurgia.

Estas foram as pioneiras em utilizar estas técnicas para modelar seus processos (PRADO, 2019). Segundo Filho (2008), a simulação de um sistema ou de um processo, busca repetir respostas reais numa sucessão de eventos no tempo, cujas variáveis, representem a mesma resposta dinâmica e estocástica que elas representam. No caso da simulação de processos produtivos, estes eventos estão relacionados ao fluxo de produção e variáveis como o processamento de matérias primas, movimentações entre estações de trabalho e disponibilidade de recursos. Todas estas variáveis podem se comportar de forma estocástica no tempo sendo modeladas por distribuições de probabilidades. Devido a estas interações e complexidade, as simulações de eventos produtivos são processadas computacionalmente podendo ocorrer em qualquer fase do ciclo de vida de um ativo físico.

A simulação de eventos discretos foi se popularizando e ganhando espaço em outros segmentos como serviços e hospitais (ALTIOK; MELAMED, 2007). Atualmente, o número de softwares disponíveis é grande e a linguagem de programação também varia. Existem produtos comerciais, assim como pacotes em linguagens como Python, que possui o código aberto facilitando a integração com diferentes sistemas. Algumas plataformas incorporam técnicas como simulação por agentes, além da utilização de recursos como algoritmos de *machine learning* (FILHO, 2008).

2.2 Estudo de Viabilidade Econômica e Financeira - EVEF

O EVEF é um trabalho especializado realizado para empreendedores que desejam iniciar um empreendimento de forma estruturada. Ele pode dar uma viabilidade positiva, ou seja, indicando que o empreendimento deve ser seguido, ou negativo, mostrando que a iniciativa é inviável ou que devem ser revisadas algumas premissas como a própria projeção de vendas (DORNELAS, 2018).

Após a elaboração de estrutura financeira e dos orçamentos relacionados aos custos, são projetadas as vendas em função do mix de produção. Neste momento, é fundamental o conhecimento do mercado consumidor que pode, inclusive, contar com pesquisas de campo. Estas projeções de vendas devem ter uma relação direta com a capacidade produtiva a ser instalada no caso de uma viabilidade positiva (CHIAVENATO, 2004).

Não existe uma convergência sobre estimativa da capacidade produtiva de um sistema fabril (SLACK, CHAMBERS, et al., 2013). Estes números são calculados com base nas

experiências de fornecedores de máquinas e equipamentos, empresas especializadas em projetos de fábrica ou mesmo através de experiências acumuladas pelos próprios investidores. Portanto, torna-se um ponto de atenção no projeto, devendo ser analisada através da projeção de cenários pessimistas, realistas e otimistas (BESSANT; TIDD, 2019).

2.3 PERDAS E DESPERDÍCIOS NOS PROCESSOS PRODUTIVOS

Num sistema produtivo as perdas são diferentes dos desperdícios e devem ser estimadas no projeto de fábrica. Elas são inerentes aos processos mas podem ser otimizadas. São exemplos a sobra de materiais após o corte, perdas de calor por trocas térmicas, subprodutos de limpezas, pontas de ferramentas após o uso, dentre outros (SHINGO, 1996). As perdas também podem estar diretamente relacionadas ao tempo como esperas ou procedimentos obrigatórios.

Já os desperdícios devem ser eliminados já na fase de projeto. Taiichi Onho, considerado o Pai do Sistema Toyota de Produção, observou que existem Sete Grandes Desperdícios presentes em sistemas produtivos (PESSÔA; TRABASSO, 2017). Os Sete Grandes desperdícios podem ser representados por:

1. Superprodução: são itens produzidos para os quais não existe um pedido que gera excesso de pessoal, custos com transportes e excesso de estoque de produto acabado ou intermediário.

2. Desperdício provocado por tempo de espera: são caracterizados por trabalhadores que esperam máquinas automatizadas produzir enquanto ficam ociosos durante o ciclo.

3. Desperdício de transporte: ocorre devido a interligação entre estações de trabalho. Muitas vezes envolve longas distâncias ou a partir de transportes ineficientes.

4. Desperdício de processamento: o processamento ocorre em função de características inerentes ao processo. São atividades que não agregam valor como ferramentas inadequadas de má qualidade, falhas em projetos, operações em vazio, perda de velocidade, excesso no número de etapas para concluir um processo, falta de habilidade na operação.

5. Desperdício no gerenciamento dos estoques: podem ser identificados no excesso ou falta de otimização do armazenamento de matéria prima, produtos semi acabados, itens

em processamento e produto acabado. Também ocorrem por perdas por validade, obsolescência, custo excessivo de transporte além ocupação de espaços para estocagem.

6. Desperdício de movimentação: são provocados por qualquer tipo de movimentação como empilhamento de produtos, procuras em geral, dificuldade de acesso a prateleiras, além da típica caminhada durante o turno de trabalho.

7. Desperdício por defeitos: ocorrem pela presença de falhas ou erros que resultam em produtos defeituosos. Vale ressaltar que produtos fora dos limites da especificação também geram defeitos. Eles podem ocorrer durante qualquer atividade do processo e possuem uma relação direta com o número de etapas de cada processo. Portanto, quanto maior a sequência de etapas num processo, maior a probabilidade de gerar defeitos (GEORGE, 2004).

É importante salientar que estes desperdícios raramente ocorrem de maneira isolada. Num processo não enxuto, é comum encontrar uma série destes eventos simultaneamente. Esta é a razão pela qual, os simuladores contribuem para modelagem destes complexos sistemas, aos quais ocorrem perdas e desperdícios que irão comprometer a produção real em função da capacidade estimada.

3 METODOLOGIA

O ponto de partida para escolher uma fábrica para aplicar a simulação por eventos discretos, foi através de um estudo de caso de um Estudo de Viabilidade Econômica e Financeira já realizado. Isto permitiu uma aproximação da realidade de um sistema produtivo para discussão das possibilidades da combinação destas ferramentas como forma de aperfeiçoar um produto de consultoria e criar mais valor para os clientes deste serviço. Assim, foi estabelecida uma parceria entre uma empresa do ramo de consultoria e um de seus especialistas, o próprio autor.

3.1 Descrição da Empresa

Este estudo foi realizado numa empresa de consultoria em gestão empresarial sediada na cidade de Belo Horizonte em Minas Gerais. É uma microempresa que possui uma equipe

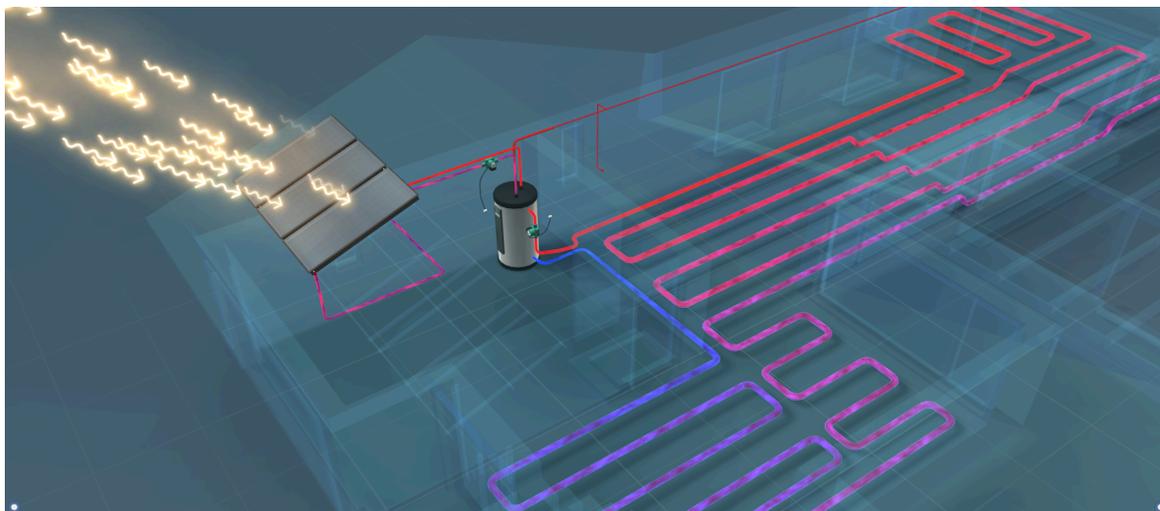
de aproximadamente 20 colaboradores. Isto inclui funcionários administrativos e especialistas em negócios que atendem projetos sob demanda.

O EVEF é um produto de consultoria desta empresa bem consolidado no mercado, com um bom nível de satisfação dos clientes que adquiriram este serviço. Dentro destes clientes, já foram realizados estes estudos para construção de hospitais, softwares houses, clínicas de atendimento médicos, fábricas, negócios de marketing, escolas, negócios funerários, dentre outros.

3.2 Estudo de Viabilidade Econômica e Financeira da Fábrica de Aquecedores Solares

A fábrica virtual a ser simulada, produzirá aquecedores solares com uma capacidade média anual estimada em mais de 1.400 produtos divididos entre aquecedores com capacidade de 600, 800, 1000 e 5000 litros. A Figura 1 mostra um esquema de um aquecedor solar em pleno funcionamento.

Figura 1: Sistema de um aquecedor solar



Fonte: o Autor

Basicamente, um aquecedor solar é composto por um painel solar, cuja função é captar a energia do sol, um boiler, no qual funciona como reservatório de água aquecida e tubulações que interligam os pontos de abastecimento de água fria e acesso a água quente

formando um circuito. Os clientes finais podem ser residências, comércios como hotéis e pousadas, hospitais, indústrias, dentre outros.

Para compor o produto final, partes destes itens como o painel solar e boiler, serão de fabricação própria. Componentes como conexões, válvulas, tubulações e miscelâneas, irão compor kits a serem montados.

3.3 Simulador Financeiro MakeMoney

Para realizar o EVEF da fábrica de aquecedores solares, serão considerados todos os custos diretos e indiretos para o empreendimento como a quantidade de funcionários, folha salarial, taxas e impostos, aluguéis, mobiliários, despesas com terceiros, insumos, matéria prima, assim como os recursos produtivos como máquinas e equipamentos. Também será composto o regime societário assim como será considerado o dinheiro no tempo, simbolizado pelo fluxo de caixa e demonstrativos de resultados financeiros. Para realizar as projeções financeiras, será utilizado o software MakeMoney 10®.

Para avaliar o resumo da performance financeira, será analisada a Taxa Interna de Retorno, o Valor Presente Líquido, Payback e o número de unidades vendidas em cada um dos cenários reproduzidos. A produção anual projetada será dada pelo Simulador Arena® estabelecendo a lógica de produção assim como seus padrões de tempo. Então o *Lean Simulation* irá considerar os cenários combinados nestes dois simuladores com funções distintas no projeto de fábrica.

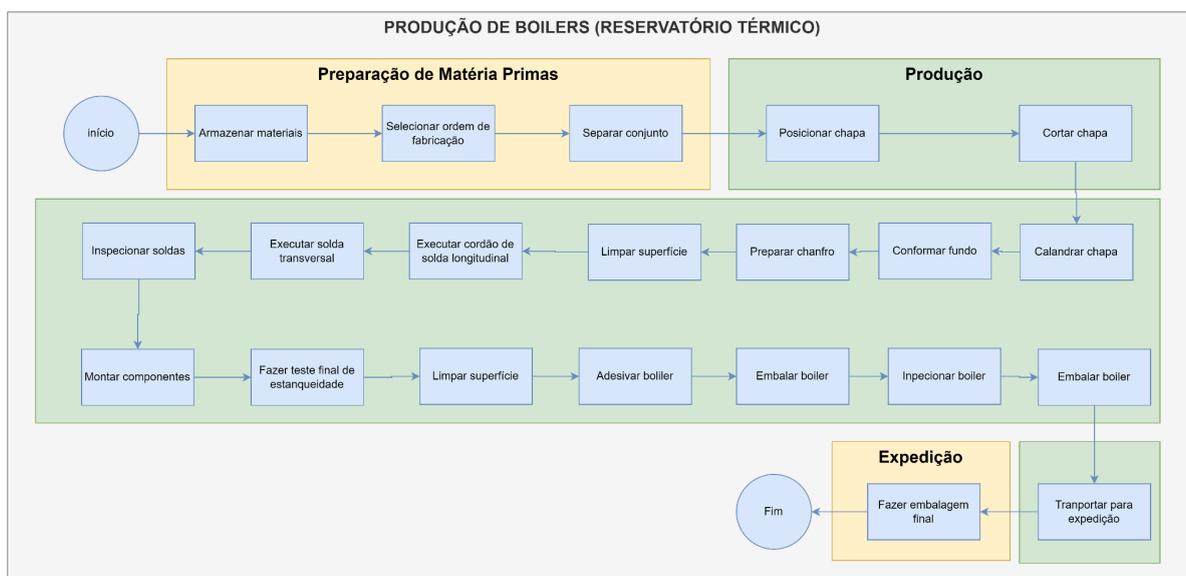
4. APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO POR EVENTOS DISCRETOS NO ARENA®

Após a análise detalhada do EVEF apresentado na Seção 3.2, será construído o fluxograma do processo para modelagem no simulador. Este fluxo envolverá as etapas produtivas necessárias para a fabricação e montagem dos aquecedores solares, assim como seus respectivos tempos padrão de produção.

4.1 O Fluxo Produtivo

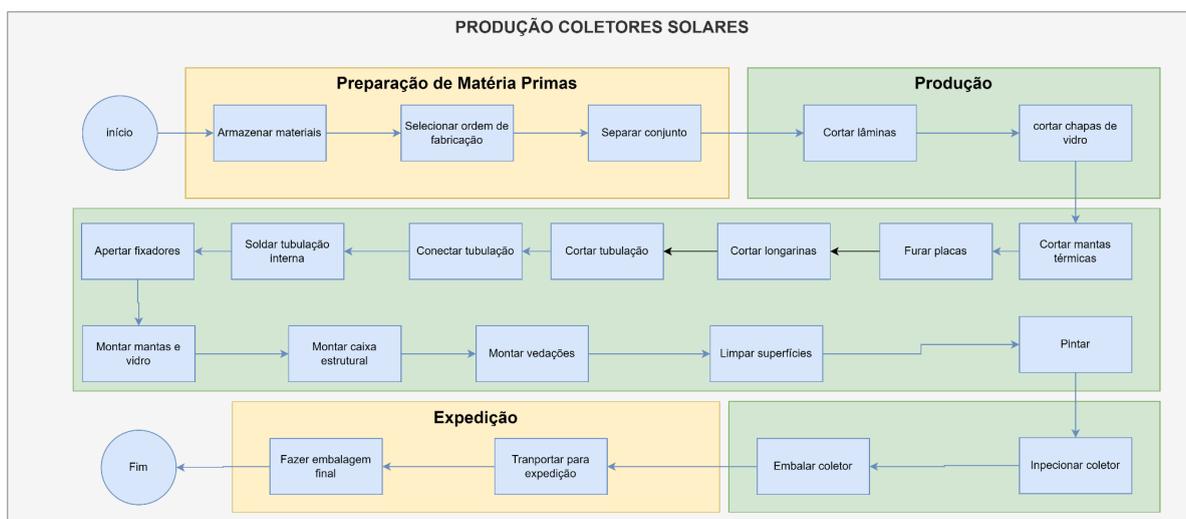
Para criar um fluxo produtivo, o processo de produção de aquecedores solares será dividido em duas grandes etapas, a produção do boiler e as etapas para montagem do coletor solar. Na Figura 2 e Figura 3, estão inseridos os fluxogramas detalhados do processo de produção dos aquecedores solares.

Figura 2: Fluxo produtivo para produção dos boilers



Fonte: o autor.

Figura 3: Fluxo produtivo para montagem de coletores solares



Fonte: o autor.

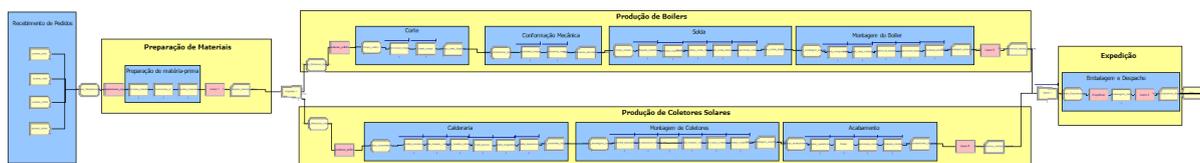
4.2 Programação Computacional no Simulador Arena 14®

O primeiro passo para criar a lógica de programação no simulador é entender o processo de chegada da entidade (pedidos dos clientes). Este termo é utilizado para descrever aquilo que será transformado em cada etapa do fluxo produtivo. Cada um dos tipos de aquecedores, 600, 800, 1.000 e 5.000 litros, se transformaram em entidades. Para cada um dos produtos, foi criado um intervalo de tempo entre chegadas baseados nas projeções de vendas do EVEF.

A programação do processo de chegada é realizada através do bloco *Create*. Para criar estações de trabalhos, nas quais serão realizadas as principais atividades produtivas, serão utilizados os blocos *Enter/Leave*. Serão criadas quatro estações de trabalhos que irão conter os processos e as atividades a serem realizadas para a produção dos aquecedores solares.

Dentro das estações de trabalho, foram criados os processos produtivos a partir da experiência do autor. Este nível de detalhamento é fundamental para reproduzir uma fábrica virtual. A Figura 4 mostra a lógica de programação utilizada para simular os cenários produtivos.

Figura 4: Modelagem da Fábrica Virtual de Coletores Solares



Fonte: o autor.

Para a modelagem do sistema, foram utilizados mais de 70 blocos de programação. Entre eles estão os blocos *Separate/Bacht*, que tem função, criar as estações de trabalho em paralelo, e o bloco *Process*, que irá considerar todos os processamentos das atividades pelos recursos, assim como o tempo de processamento. Para validar o modelo de acordo com o EVEF, foram feitas rodadas de simulação através da parametrização para 365 dias de

produção. Para simplificação do modelo, sem perder a precisão das análises, não foram considerados finais de semana, feriados e a produção é 24 horas ininterruptas. Nos demais cenários, esta condição será alterada para uma visão mais realista. Isto porque no EVEF sem o simulador Arena®, não tem operadores suficientes para rodar 24 horas de trabalho com turnos alternados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para alcançar os objetivos propostos, o Estudo de Viabilidade Econômica e Financeira, EVEF, será resumido nos itens que são referentes a produção e os resultados financeiros esperados pelas projeções. É importante salientar, que as etapas para sua construção, já estão bem consolidadas na Empresa de Consultoria e as avaliações dos clientes que receberam este produto é muito positiva. Contudo, com o objetivo de melhorar continuamente este produto, será avaliado o processo produtivo via simulação de eventos discretos. O EVEF atual contará apenas com a Simulação Financeira no MakeMoney®, ou seja, sem considerar o fluxo produtivo e os eventos com flutuações estatísticas (GOLDRATT, 1993). A Tabela 3 apresenta o resumo dos resultados do EVEF.

Tabela 3: Resultados do Estudo de Viabilidade Econômica Financeira sem Flutuações Estatísticas

EVEF Atual (Projeção para 5 anos)			Características
Item	Valor	Unidades de medida	EVEF sem Lean Simulation
Mão de obra direta	10	Nº	
Volume de Vendas Anual	1440	Unidades	
Pay back - Tempo de Retorno	2	anos	
Valor Presente Líquido - VPL	R\$ 13.567.886,85		
Taxa de Retorno - TIR	44%		

Fonte: o autor.

Nesta simulação financeira, os resultados são absolutamente favoráveis. Tem-se um Payback em torno de 2 anos com uma Taxa Interna de Retorno de 44%. Isto representa um retorno financeiro aos acionistas, ao longo de 5 anos, com valores de R\$13.567.886,85, apresentando viabilidade econômica e financeira.

Um sistema produtivo não ter flutuações estatísticas é o mesmo que dizer que não existem variações e eventos não programados. Predominam os eventos determinísticos e não são utilizados modelos probabilísticos. Evidentemente, esta não é uma boa prática, especialmente para fazer projeções de médio e longo prazo. Por isso, os simuladores de eventos discretos são fundamentais para a consideração de incertezas.

5.1 Validação do Modelo no Simulador de Eventos Discretos Arena®

Os resultados obtidos no simulador foram parecidos aos do EVEF. Isto significa que a produção anual estimada foi alcançada ao considerar os tempos padrão e o mix de produto. É importante ressaltar, que o grande diferencial do simulador é considerar a variação dos tempos de produção, em cada etapa do processo de forma estocástica. Isto envolve considerar no projeto de fábrica, a interação entre recursos, processos, lógica e espaço com o tempo.

5.1 Cenário 1 - Realista

Uma das características do simulador computacional é permitir a projeção de diferentes cenários para o processo decisório. Estas técnicas são de origem de um ramo específico da ciência de dados chamado de estatística prescritiva (DAVENPORT, 2014). Os cenários devem ser construídos a partir de premissas. O Cenário 1, tem como objetivo, rodar a fábrica virtual de produção de aquecedores solares, com o mínimo de suposições para o modelo. Como descrito anteriormente, o EVEF não conta com simulações discretas para sua elaboração. Desta forma, a lógica de produção, assim como as estimativas de tempo, foram desenvolvidas a partir deste trabalho. O Cenário 1 será chamado de realista, porque não serão consideradas nenhum tipo de melhoria visando reduzir a variabilidade ou nivelar a produção (*Heijunka*). Este cenário tem as seguintes premissas:

- a. O intervalo de chegada entre os pedidos são considerados constantes
- b. Os 4 tipos de produtos seguem o mesmo fluxo de trabalho com tempos iguais
- c. Os tempos padrão de produção são constantes
- d. Os recursos como máquinas e equipamentos não apresentam falha e nem entram em manutenção
- e. Não existem perdas como defeitos ou retrabalhos

- f. As máquinas produtivas críticas como calandras, guilhotinas e soldas são operadas manualmente por um operador
- g. Nunca falta matéria prima para ser processada
- h. Não existe nenhum tipo de setup para troca de insumos ou mudança de tipo para ajuste do mix de produção
- i. Um único colaborador pode desenvolver várias atividades
- j. Não existem reuniões de trabalho que impactam em produção
- k. Não existem normas ou exigências de segurança que impactem no tempo de trabalho
- l. Não existem equipamento para movimentação de cargas entre as estações de trabalho
- m. Serão 10 colaboradores produtivos em um turno de trabalho de 8 horas
- n. A simulação será rodada para 12 meses de produção para projetar o fluxo de vendas

As suposições acima não são razoáveis num cenário produtivo mas é a prática do mercado. Após a execução da simulação, diversas métricas pode ser analisadas como produção total, fluxo de valor, formação de filas, tempo de espera, tempo em processo, número de produtos sendo processado, número de produtos aguardando para serem processados, taxa de utilização dos recursos, desbalanceamento das estações de trabalho entre outras métricas que podem ser programadas através da criação de variáveis com os blocos *Assign* e *Record*. A Tabela 4 apresenta a síntese dos resultados.

Tabela 4: Síntese dos resultados do Cenário 1 - Realista

Cenário 1 - Otimista (Projeção para 5 anos) - Lean Simulation			Características
Item	Valor	Unidades de medida	Lean Simulation com Tempo Padrão,
Mão de obra direta	10	Nº	
Volume de Vendas Anual	1310	Unidades	
Pay back - Tempo de Retorno	2	anos	
Valor Presente Líquido - VPL	R\$ 10.240.853,02		
Taxa de Retorno - TIR	23%		

Fonte: o autor

Os resultados mostram que a produção anual caiu para 1.310 unidades no Cenário 1 contra 1.440 unidades no EVEF com simulação apenas financeira. Ocorreu uma perda de receita projetada de R\$3.327.033,83 o que fez que a Taxa Interna de Retorno recuasse de 44% para 23%. Isto quase inviabiliza o investimento, devido às expectativas dos investidores, através da Taxa Mínima de Atratividade que é de 20% ao ano. Destaca-se que as perdas estão

diretamente relacionadas com a falta de capacidade produtiva. Não há espaço para a criação de mais turnos de trabalho devido ao pequeno número de operadores e nem são previstas horas extras. As perdas estão ligadas a formação de filas e competição de recursos. Sem um simulador de eventos discretos, é praticamente impossível enxergar estas perdas.

5.2 Cenário 2 - Pessimista

O Cenário 2 será considerado pessimista. Isto porque irá se aproximar muito da realidade de um sistema produtivo. Deste modo, ele inclui a variação tanto nas entradas dos pedidos, quanto na variação da duração das atividades de trabalho. É possível inferir que quanto maior a intervenção humana numa atividade produtiva, maior a variação. A interação homem máquina é característica de um sistema de manufatura, e deve ser controlada de forma sistêmica pelos setores de planejamento e controle da produção. Estas perdas com consequências na variação são bem conhecidas no *Lean Manufacturing*. A maior parte das premissas do EVEF inicial, serão mantidas e as principais mudanças de premissas desta projeção são:

- a. Não haverá entrada de novos recursos (mão de obra e máquinas)
- b. As entradas de pedidos passam a ter uma distribuição de probabilidade de Poisson
- c. As atividades dentro dos processos produtivos terão distribuição de probabilidade Triangular cuja Moda (valor mais ocorre) será o tempo padrão de produção estimado
- d. Os tempos mínimos da distribuição de probabilidade Triangular será menor em 10% do tempo padrão de produção
- e. Os tempos máximos da distribuição de probabilidade Triangular será maior em 30% do tempo padrão de produção

Estas são premissas razoáveis em modelagem para simulação de eventos discretos. Neste momento não haverá balanceamento do fluxo produtivo (*Heijunka*). De forma sintética, quanto maior a variabilidade, pior o desempenho dos processos. A Tabela 5 mostra o resultado das simulações neste cenário.

Tabela 5: Síntese dos resultados do Cenário 2 - Pessimista

Cenário 2 - Realista (Projeção para 5 anos)			Características
Item	Valor	Unidades de medida	
Mão de obra direta	10	Nº	Lean Simulation com intervalos entre chegadas com Distribuição de Probabilidade de Poisson e tempos de processamento Triangular,
Volume de Vendas Anual	1023	Unidades	
Pay back - Tempo de Retorno	3	anos	
Valor Presente Líquido - VPL	R\$ 5.225.987,61		
Taxa de Retorno - TIR	-13%		

Fonte: o autor

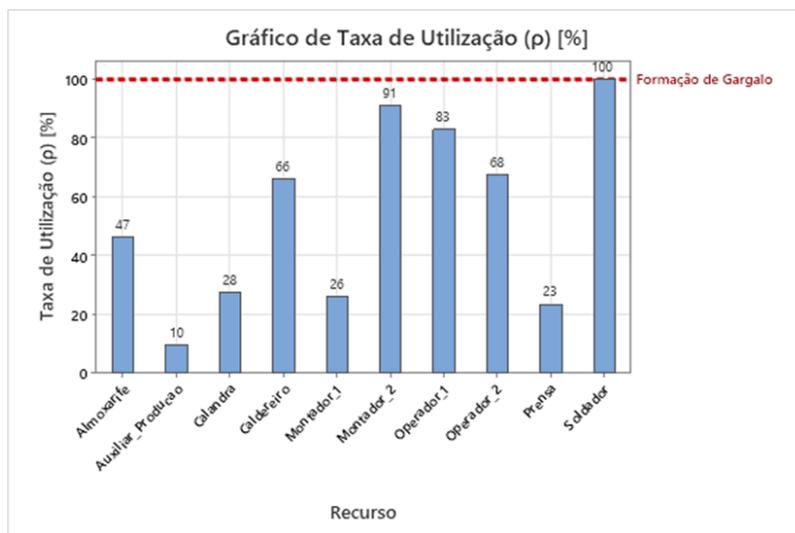
O impacto da variabilidade nos resultados financeiros foi enorme. A formação de fila nos gargalos produtivos provocou perdas diretas nos resultados do sistema. O volume de produção caiu ainda mais, com relação ao Cenário 1, totalizando 1.023 unidades de aquecedores solares produzidos anualmente. O Valor Presente Líquido saiu de R\$13.567.886,85 no EVEF inicial, para R\$5.225.987,61, uma redução de aproximadamente 39%. Isto fez com que a Taxa Interna de Retorno se tornasse negativa em -13%. Assim, o investimento passa a ser inviável, dado que os investidores esperavam uma Taxa Mínima de Atratividade de 20%. Com uma Taxa Interna de Retorno de -13%, como apresentada neste cenário, associada aos riscos do investimento, muitos empresários preferem investir em ativos financeiros mais seguros como títulos da dívida pública ou ações de empresas, inviabilizando o empreendimento. O Payback também vai para mais de 3 anos, contra o de 2 anos, como apresentado no EVEF inicial e Cenário 1.

5.3 Cenário 3 - Otimista

Os investidores buscam maximizar os retornos sobre seus investimentos. Para isto, muitas vezes, propor cenários que aumentem o investimento mas que mostram um melhor custo x benefício, pode ser a opção mais atrativa. Neste sentido, promover melhorias ainda no projeto de fábrica, é uma excelente alternativa para maximização do retorno financeiro.

Neste Cenário, considerado otimista, será aplicada a técnica *Heijunka* que consiste no balanceamento da produção através do nivelamento dos recursos. Balancear a produção pode ter vários sentidos. O objetivo principal é remover os gargalos fazendo com que os recursos estejam no mesmo ritmo. Deste modo, será utilizada a taxa de utilização dos recursos calculada pelo simulador Arena ®. A Figura 5, mostra o gráfico com os valores das taxas de utilização, de todos os recursos da Fábrica de Aquecedores Solares.

Figura 5: Taxa de utilização dos recursos sem Heijunka

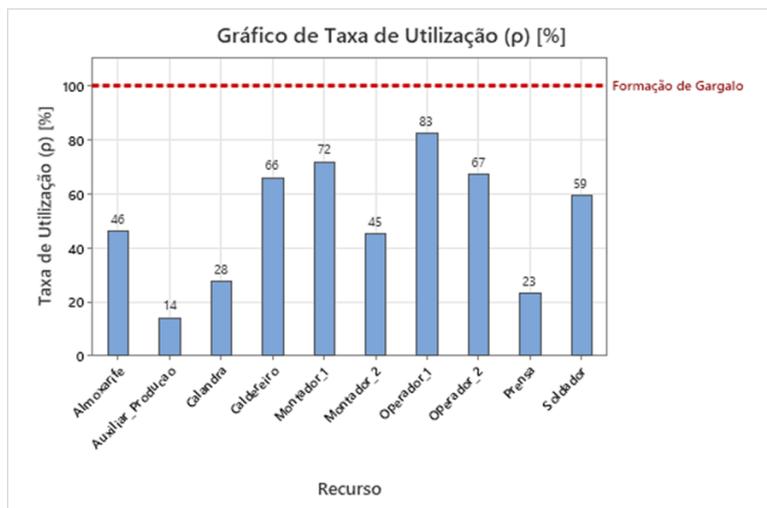


Fonte: O autor

Pelas taxas de utilização dos recursos é possível verificar que o sistema encontra-se desbalanceado. O ideal é que todos os recursos estivessem o mais homogêneo possível, ou seja, as barras dos gráficos deveriam estar o mais equalizadas possível. É impossível um sistema estar exatamente igual em termos de taxa de utilização, porém, buscar o equilíbrio é função básica da engenharia de produção.

Para melhorar o nivelamento da produção, é necessário a introdução de melhorias que eliminem os gargalos, removendo as barreiras ao fluxo contínuo. Na Figura 5, pode-se verificar que as operações envolvendo o soldador e o montador de coletores solares, estão formando gargalos no sistema. Suas taxas de utilização são 100% e 91% respectivamente. Sendo assim, o soldador está saturado, sendo o gargalo do sistema (SPROULL, 2019), e o montador está quase saturado. Neste sentido, após várias alternativas buscando um melhor nivelamento com custos acessíveis, será proposto o aumento de mais dois soldadores e mais um montador de coletores solares. Após esta entrada de novos recursos, será feita uma nova rodada de simulações para analisar o gráfico do balanceamento. A Figura 6 mostra os resultados em relação às taxas de utilização com a entrada dos novos recursos.

Figura 6: Taxa de utilização dos recursos com Heijunka



Fonte: O autor

O gráfico da Figura 6 mostra uma melhoria significativa em termos de nivelamento da produção. Ele está bem mais equalizado, com as taxas de utilização abaixo de 90%, que é interessante em nível de desempenho. Este índice possui uma relação direta com o tempo de espera na fila e números de elementos aguardando para serem processados (tamanho da fila). Então existe um valor ótimo para a taxa de utilização operar, para que não gere fadigas no sistema e que não seja tão dessaturado. Sendo assim, o número de operadores diretamente ligados à produção, saiu de 10, para 13 colaboradores. Evidentemente, haverá um impacto financeiro com relação ao custo envolvendo salários e encargos que deverão ser considerados na simulação financeira no MakeMoney®. A Tabela 6 mostra o resumo da simulação financeira envolvendo o Cenário 3.

Tabela 6: Síntese dos resultados do Cenário 3 - Otimista

Cenário 3 - Otimista (Projeção para 5 anos)			Características
Item	Valor	Unidades de medida	
Mão de obra direta	13	Nº	Lean Simulation com nivelamento de produção - Heijunka, Entra mais 2 soldadores e 1 montador de coletores solares nos gargalos,
Volume de Vendas Anual	1498	Unidades	
Pay back - Tempo de Retorno	2	anos	
Valor Presente Líquido - VPL	R\$ 12.300.839,51		
Taxa de Retorno - TIR	36%		

Fonte: O autor

Com a remoção dos gargalos produtivos, a produção anual saltou de 1.023 para 1.438 unidades, trazendo um resultado financeiro de R\$12.300.839,51. Isto representa uma margem de 36%, sendo superior aos 20% de Taxa de Atratividade Mínima. Com um Payback de aproximadamente 2 anos, o investimento se torna viável.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O *Lean Manufacturing* é uma poderosa metodologia para melhorar processos. Ficou evidente que seus conceitos envolvem não só a melhoria contínua, mas também o projeto de fábrica. A simulação computacional por eventos discretos, permite criar uma realidade virtual, viabilizando a projeção de cenários que auxiliam na identificação de gargalos produtivos, permitindo encontrar alternativas para a otimização das métricas do sistema. Combinar elementos da Indústria 4.0 com técnicas de engenharia econômica, potencializa a projeção de novos investimentos aumentando a assertividade de projetos de viabilidade econômica e financeira.

O padrão de processo e uma operação padronizada é essencial para direcionamento das atividades de planejamento e controle de produção. Contudo, estes padrões devem ser considerados no projeto de fábrica, prevendo uma variação inerente aos processos produtivos. Além disso, a interdependência das estações de trabalho, assim como a competição de recursos, devem fazer parte das análises do projeto para que tenha uma operação estável e com um mínimo de previsibilidade.

A variação nos tempos de processos deve ser considerada em qualquer atividade produtiva. Considerando a variação nas simulações, ficou claro que o sistema chegou a piorar em mais de 30% impactando diretamente na Taxa Interna de Retorno - TIR - inviabilizando o investimento. Uma baixa variabilidade, significa estabilidade nos processos contribuindo para um bom balanceamento do fluxo.

A falta de capacidade produtiva pode ser resolvida com técnicas tradicionais do *Lean Manufacturing* como o *Heijunka*, eliminação de atividades que não agregam valor (VSM), SMED (Troca Rápida de Ferramentas) e trabalho padrão. Estas técnicas podem ser combinadas dando mais velocidade e ritmo aos processos produtivos, especialmente melhorando a eficiência dos gargalos. Ficou claro que a formação de gargalos possui uma componente dinâmica no tempo e que a abordagem estocástica é fundamental para sua

identificação. Por isto, a utilização de simuladores computacionais é uma das principais ferramentas que conseguem enxergar o comportamento dinâmico de um sistema considerando o tempo, lógica e interdependência entre as estações de trabalho.

A engenharia de produção evoluiu com relação à disponibilidade de recursos e ferramentas utilizadas desde o projeto, passando pela execução e operação de um empreendimento. Um planejamento adequado, assim como um conjunto de métricas que permitam avaliar o resultado de uma operação, é fundamental para garantir a maximização dos resultados e o retorno do investimento esperado pelos acionistas.

TÍTULO: ECONOMIC AND FINANCIAL FEASIBILITY STUDY COMBINING LEAN SIMULATION AND FACTORY PROJECT

ABSTRACT

Discrete event simulation is an important instrument used to design virtual reality, combining traditional Lean Manufacturing techniques and data science. They can be used in different phases of the life cycle of a physical asset, being able to identify losses and waste such as displacement, waiting, overprocessing, overproduction, in-process stocks, queues, defects and rework. It can also identify flow imbalance problems caused by the presence of bottlenecks. Computer simulations can be aggregated and combined with other methodologies, such as economic and financial viability studies of an enterprise, which aim to evaluate the projected results of an investment initiative. With the analysis of Lean Simulation metrics and improvements in resource leveling, it was possible to avoid bottleneck problems and obtain financial gains of more than 36% in the feasibility phase of a factory project.

Palavras-chave: Factory Project. Computational Simulation. Lean Manufacturing. PCP.

REFERÊNCIAS

ALTIOK, Tayfur; MELAMED, Benjamin. **Simulation Modeling and Analysis with Arena**. 1. ed. San Diego: Elsevier Inc, 2007.

BATEMAN, Robert E. et al. **Simulação de Sistemas: aprimorando processos de logística, serviços e manufatura. organização Belge Engenharia e Sistemas**; tradução Alain de Norman et d'Audenhove et al. 1. ed. Rio de Janeiro : Elsevier, 2013. 200 p.

BESSANT, J.; TIDD, J. **Inovação e empreendedorismo**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2019. 512 p.

CHIAVENATO, Idalberto. **Empreendedorismo dando Asas ao Espírito Empreendedor**. 2ª. ed. São Paulo: Saraiva, 2004.

DAVENPORT, Thomas. **Dados Demais!: como desenvolver habilidades analíticas para resolver problemas complexos, reduzir riscos e decidir melhor**. Tradução Afonso Celso da Cunha. – 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

DORNELAS, José. **Empreendedorismo: transformando ideias em negócios**. 7ª. ed. São Paulo: Empreende, 2018.

FILHO, Paulo José de Freitas. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena**. 2. ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.

GEORGE, Michael L. **Lean Seis Sigma para Serviços**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2004.

GOLDRATT, Eliyahu M; COX, Jeff. **A meta: um processo de aprimoramento contínuo**. 3. ed. São Paulo: Educador, 1993.

KELTON, David W.; SADOWSKI, Randall; SADOWSKI, Deborah. **Simulation with Arena**. New York: McGraw-Hill Publishing Co., 2001.

MUDULI, Kamalakanta et al. **Intelligent Manufacturing Management Systems**. 1. ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2023.

PESSÔA, Marcus Vinicius Pereira. TRABASSO, Luís Gonzaga. **The Lean Product Design and Development Journey**. 1. ed. Gewerbestrasse: Springer International Publishing, 2017.

PRADO, Darci Santos do. **Teoria das Filas e da Simulação**. 2ª ed. Nova Lima: INDG, 2004.

PRADO, Darci Santos do. **Usando o Arena em Simulação**. 6ª ed. Nova Lima: Falconi, 2019.

ROSER, Christoph. **All About Pull Production**. Luxembourg: Amazon, 2021.

SLACK, Nigel et al. **Gerenciamento de Operações e de Processos**. 2ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

SHINGO, Shigeo, **O Sistema Toyota de Produção (do ponto de vista da Engenharia de Produção)**. 2ª ed, Porto Alegre: Editora Bookman, 1996.

SPROULL, Robert. **Theory of constraints, lean, and six sigma improvement methodology :making the case for integration**. New York : Taylor & Francis, 2019.