



Denilson Costa da Silva <sup>(a)</sup>, Jorge de Araújo Ichihara <sup>(b)</sup>

(a) Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, Brasil/engcsdenilson@gmail.com

(b) Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil / jorge.ichihara@hotmail.com

## **BALANCEAMENTO DE LINHAS DE PRODUÇÃO DE UMA EMPRESA DE CERÂMICA VERMELHA DE SÃO MIGUEL DO GUAMÁ ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS**

### **RESUMO**

*O objetivo deste artigo é apresentar o balanceamento da linha de produção (BLP) em uma fábrica de cerâmica vermelha, pertencente ao polo cerâmico do município de São Miguel do Guamá / PA, a partir da utilização da simulação de eventos discretos (SED). Para tanto, utilizou-se como procedimento metodológico o estudo de caso. A proposta sistemática de modelagem e simulação seguida foi a de Chwif (1999), com uma adaptação na qual inclui um estudo de caracterização da linha de produção, entendendo a necessidade de levantar as características discretas da referida linha. Identificou-se o escopo do sistema que inclui indicadores, variáveis e o mapa do processo (modelo conceitual), suficientes para atingir o BLP e traduziu-se o modelo conceitual em um modelo computacional, sendo este último útil para geração das saídas de interesse da pesquisa. Construíram-se três cenários com diferentes configurações no tempo de setup da extrusora e os resultados satisfatórios indicaram 88% de taxa de utilização dos recursos (TUR) e uma taxa de produção diária (TPD) de 48.840 tijolos, uma melhoria de 1,96% e 2,97%, respectivamente. Ao final, concluiu-se que a SED tem grande utilidade para atingir o BLP neste tipo de segmento industrial.*

*Palavras-chave: Cerâmica vermelha. Balanceamento de linhas de produção. Simulação de eventos discretos.*

## **PRODUCTION LINES BALANCING IN A RED CERAMIC COMPANY OF SAO MIGUEL DO GUAMA THROUGH DISCRETE EVENT SIMULATION**

### **ABSTRACT**

*The objective of this article is to present the balancing of production line (BPL) in a red ceramic factory, belonging to the ceramic pole of Sao Miguel do Guama / PA, by means of the use of discrete event simulation (DES). To carry out the research, we used the case study as instrument. The modeling and simulation approach was that proposed by Chwif (1999), with an adaptation in which a characterization study of the production line is included, considering the need to enumerate the discrete characteristics of the referred line. We identified the scope of the system that includes indicators, variables and the process map (conceptual model), sufficient to reach the BPL and we translated the conceptual model into a computational one, the latter being useful for generating outputs of research interest. Three scenarios were constructed with different settings on the extruder setup time, and satisfactory results indicated 88% for the utilization rate of resources (URR) and a daily production rate (DPR) of 48,840 bricks, an improvement of 1.96 % and 2.97%, respectively. Finally, it was concluded that DES is very useful to achieve BPL in this type of industrial segment.*

*Keywords: Red ceramic. Balancing production lines. Computational simulation. Discrete event simulation.*

## 1. Introdução

Conforme o Anuário Brasileiro de Cerâmica Vermelha do Ministério de Minas e Energia – MME (2009), o macrossetor cerâmico no Brasil, envolvendo cerâmica vermelha, cerâmica branca, cerâmica de revestimento, isolantes térmicos, refratários, especiais (fritas e corantes), abrasivos, vidro, cimento e cal, tem uma grande importância econômica, com uma participação no Produto Interno Bruto (PIB) nacional da ordem de 1,0%, além de apresentar características de capilaridade no cenário da economia com a participação de micro, pequenas, médias e grandes empresas, estando presente em praticamente todos os estados, tanto no interior como nas regiões metropolitanas. O setor de cerâmica vermelha, por sua vez, responde por cerca de 0,4% do PIB do país, fato este que demonstra sua importância para a economia nacional.

Segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica – ANICER (2015), no Brasil existem 6.903 cerâmicas e olarias, sendo que 63% fabricam tijolos e blocos, 36% telhas e 1% tubos. As fábricas de tijolos e blocos são responsáveis por produzir cerca de 4 bilhões de peças/mês, consumindo aproximadamente 7.800.000 toneladas/mês de argila. Já as fábricas produtoras de telhas são responsáveis por produzir mais de 1 bilhão de peças/mês, com um consumo de 2.500 toneladas/mês de argila. As fábricas de tubos produzem em média cerca de 325,5 km peças/mês. A distribuição da mão de obra ocupada é formada por 293 mil empregos diretos, aproximadamente 900 mil empregos indiretos e um faturamento anual de R\$ 18 bilhões (4,8% do faturamento da indústria de construção civil).

O Estado do Pará é destaque neste segmento, possuindo o maior arranjo produtivo local (APL) cerâmico industrial do Norte do País (LASTRES *ET AL.* 2002), localizado no município de São Miguel do Guamá. Com 52 indústrias ceramistas, segundo o Sindicato dos Trabalhadores da Indústria de São Miguel do Guamá (SINTIMIG, 2013), o APL apresenta o volume de 27 milhões de peças mensais entre blocos de vedação, blocos estruturais, bloco de laje e telhas. Emprega em média 42 funcionários por empresa, se tornando a maior economia do município (SEBRAE, 2004).

O Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas – SEBRAE (2008), com base em um estudo de mercado em âmbito nacional, afirma que esse setor sofre com a falta de planejamento e de controle de processos

produtivos, possuindo fortes características artesanais em seus processos produtivos. Essa realidade é comprovada no estudo de Mafra (1999), em que foram identificados os seguintes problemas: falta de planejamento; desperdício de matéria-prima, energia e combustível; desconhecimento de normalização do produto final; inexistência de controle de qualidade e; processo tecnológico arcaico. Segundo Betini (2007), a escala de produção das fábricas oleiro-cerâmicas do município de São Miguel do Guamá não supre por completo o mercado interno, necessitando este ser suprido com produtos cerâmicos das regiões Nordeste e Centro-Oeste do país. Betini (2007) indica que uma das principais causas é o escasso processo de modernização destas fábricas, dificultando a introdução de processos e produtos competitivos em termos de preço e qualidade diante dos produtos oriundos dos estados do Nordeste e Centro-Oeste.

Com o aumento da oferta frente a crescente demanda do Estado do Pará faz-se necessário a preparação desses APLs de forma a aprimorar, a baixo custo, seu processo produtivo frente a sua demanda, ao mesmo tempo em que se exige rapidez na entrega do produto demandado e dentro de padrões de qualidades requeridos. Desta forma, o balanceamento da linha de produção (BLP) emerge como uma importante ferramenta para a obtenção de informações expressivas com vista às melhorias desse setor, tais como: tempo de ciclo; capacidade produtiva; taxa de utilização de recursos; grau de ociosidade de operários; dentre outros.

O BLP vem merecendo especial atenção de empreendedores e pesquisadores nos últimos anos, devido ao seu potencial de racionalização em ambientes de manufatura, seja sob uma ótica ampla, em que os benefícios extraídos desta técnica vão em favor da lógica que engloba as organizações de manufatura – produção ágil e flexível –, seja sob uma visão mais restrita, pois o balanceamento possibilita melhorias. Slack *et al.* (2009) afirmam que o BLP é de fundamental importância para a empresa não perder eficiência, produtividade e oportunidades de vendas, ou seja, não perder dinheiro.

Ao observar a enumeração das etapas tradicionais pode-se perceber que o BLP é algo que demanda tempo. Por isso, para que não seja inviável a prática do balanceamento, é necessário que haja meios de torná-la mais rápida. Sendo assim, essa pesquisa recorre à prática da simulação, pois a não intervenção no sistema real e o encaminhamento de soluções

rápidas são fatores importantes a serem considerados em projetos de melhorias de processo.

Das propostas metodológicas para resolver o problema do BLP, o método de simulação tem sido uma crescente. A exemplo disso, temos o fato do crescente número de publicações de trabalho apresentados, cujo tema abordado é sobre métodos de decisão (DRISCOLL E ABDEL-SHAFI, 1985; ROY E ALLCHURCH, 1996; MCMULLEN E FRAZIER, 1998; SANTORO E MORAES, 2000; SOUZA *ET AL.*, 2003)

Partindo destes princípios, o objetivo central deste artigo foi propor uma alternativa de BLP para uma empresa típica do arranjo oleiro-cerâmico de São Miguel do Guamá, interior do Estado do Pará, a partir da utilização da simulação de eventos discretos (SED). Utilizou-se o estudo de caso como método de pesquisa, incluindo uma adaptação das etapas de desenvolvimento de um modelo de simulação proposto por Chwif (1999) e o software Promodel® como ferramenta computacional.

Este artigo é produto de um projeto de dissertação pertencente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal do Pará.

## 2. Balanceamento de Linhas de Produção

Para Davis, Aquilano e Chase (2001), uma linha de produção é constituída de um conjunto de postos de trabalho (estações de trabalho), locados de forma sequencial e interligados por algum meio de transporte, usualmente uma esteira transportadora. Tipicamente, os postos encontram-se dispostos para que os produtos transitem ao longo da linha, sendo neles executadas as operações necessárias em cada posto. Moreira (2011) acrescenta que a linha representa o caso clássico do fluxo de operações em um sistema contínuo, onde o produto (ou parte dele) é dividido em um certo número de operações (ou tarefas) que devem ser distribuídas em postos de trabalho. Sendo o posto de trabalho o espaço ocupado por uma ou mais pessoas nesse fluxo de operações.

Scholl (1999) classifica as linhas de produção em três categorias com base nos tipos de produtos a serem manufaturados. Em situações em que há a produção em massa de um único modelo de produto, tem-se o tipo de linha de produção de modelo (produto) único (SALB – Single model Assembly Line). A linha de produção mista (MMAL – Mixed Model

Assembly Line) é o caso em que há vários modelos de um produto básico e estes são manufaturados na mesma linha de produção, sem a necessidade de setup das máquinas (ou com tempo de setup pequeno) entre modelos. Isto acontece quando há grande similaridade entre os modelos e o produto básico. Em situações que existem diferenças significativas nos processos produtivos dos vários modelos, estes são produzidos por lotes para minimizar a ineficiência do tempo setup entre os modelos. Isto é, após finalizar a produção de um lote, realiza-se o setup e inicia-se a produção do lote de outro modelo. Surge aqui o problema de dimensionamento destes lotes, procurando-se um lote de produção mínimo que compense o tempo de setup, maximizando as quantidades produzidas. É o caso da linha de produção múltipla (MUAL – Multi-model Assembly Line).

Uma vez abordado sobre do que se trata uma linha de produção, introduz-se o conceito de balanceamento de linhas de produção. De acordo com Betts e Mahmoud (1989) e Krajewski e Ritzman (2004), o balanceamento de linha refere-se à alocação de tarefas em estações de trabalho para fazer um produto. Para McMullen e Frazier (1998) essa produção é em subgrupos, sendo que cada subgrupo possui sua própria célula de trabalho.

Na opinião de McMullen e Frazier (1998) as abordagens do BLP têm explorado comumente dois objetivos, sendo um objetivo minimizar a quantidade de trabalho exigido na linha dado um tempo de ciclo especificado e o outro objetivo o de minimizar o tempo de ciclo dado um determinado número de trabalhadores. Porém, na concepção de Moreira (2011) e Krajewski e Ritzman (2004), o balanceamento de linha deve a uma dada taxa de produção.

Boysen, Flidner e Scholl (2007) declaram outros objetivos: minimização do número de estações de trabalho, tendo em conta um determinado objetivo de produção planejada para determinado horizonte temporal; minimização do tempo de ciclo para um número de estações fixas, ou seja, maximizar a taxa de produção para um dado número de estações de trabalho; e maximização da taxa de utilização da linha de forma em que as restrições associadas à taxa de produção e/ou número de estações sejam respeitadas.

Uma das principais características de uma linha de produção refere-se ao tempo de execução das tarefas. Quando a variação existente entre os tempos de execução de uma determinada tarefa é relativamente pequena,

como em casos em que as tarefas são simples de serem realizadas ou há uma alta automação das estações de trabalho, os tempos de execução das tarefas são considerados determinísticos. Por outro lado, variações consideráveis nos tempos às quais são atribuídas à instabilidade dos trabalhadores em relação à taxa de trabalho e a motivação, assim como a falta de sensibilidade para processos complexos, requer a consideração de tempos estocásticos para a execução das mesmas. Além dos tempos de execução das tarefas, outras características podem ser atribuídas a uma linha de produção (BECKER E SCHOLL, 2003).

Boysen, Flidner e Scholl (2007) destacam a paralelização como ponto característico de uma linha de produção. Trata-se de paralelização quando mais de uma linha a ser balanceada é considerada, quando o número de linhas a serem instaladas constitui parte do problema de decisão, ou quando é considerado o uso de postos paralelos (assim como a sua capacidade é duplicada, as operações a si associadas podem ser desempenhadas alternadamente). É considerada também paralelização quando uma tarefa é executada em mais de um posto, adicionalmente às tarefas que lhe estão associadas (cada posto executa as operações paralelas, alternadamente), ou quando diversas operações são executadas na mesma peça de trabalho, simultaneamente sem que existam perturbações entre elas. Existe a possibilidade de não se considerar qualquer tipo de paralelização.

Outra característica, de acordo com Groover (2000), diz respeito ao sistema de transporte, normalmente utilizado para mover o produto ao longo da linha, ao passo que esse se transforma em produto acabado. Do ponto de vista de Merengo, Nava e Pozzetti (1999), os sistemas de transporte utilizados nas linhas de produção podem ser separados em três categorias: transporte contínuo, onde a velocidade da linha é constante; transporte sincronizado, em que o dispositivo transportador movimenta-se em intervalos de tempo pré-determinados e; transporte não sincronizado, no caso do dispositivo transportador se mover de acordo com a velocidade do trabalhador para realizar determinada tarefa.

Em função da movimentação de peças de trabalho, têm-se as linhas do tipo paced (tempo regulado), em que um tempo de ciclo limita o tempo de operação do posto. Nesse caso, ou o conteúdo médio de trabalho de cada posto por ciclo em relação ao total de peças de trabalho está limitado pelo tempo de ciclo ou o tempo de

ciclo é respeitado segundo uma determinada probabilidade ou proporção. Pode ainda existir o caso em que todos os postos e modelos devem respeitar um tempo de ciclo global ou em que são considerados tempos de ciclo locais, variando estes entrepostos de trabalho e modelo. Pode-se também considerar a existência de linhas unpaced (tempo não regulado), que não se encontram restritas a um tempo de ciclo. Em vez disso, o trabalho avança quando as operações anteriores são concluídas num movimento não sincronizado de peças de trabalho (assim que um posto termina uma operação, a peça de trabalho é movida para o próximo posto ou para um buffer), ou num movimento sincronizado de peças de trabalho em que o mesmo se faz de forma coordenada entre os postos (as peças de trabalho só passam para o posto seguinte quando todas as operações são concluídas em cada um dos postos) (BOYSEN, FLIEDNER E SCHOLL, 2007)

Ao analisar a classificação do problema de BLP bem como suas características, pode-se constatar que o problema em estudo é de produção do modelo misto (produção do lote de um produto, setup e produção do lote de outro produto), em linha unpaced (tempo de ciclo não regulado), com estações não paralelas e com restrições de associação cujos objetivos são maximizar tanto a taxa de produção para um dado número de postos de trabalho fixos, quanto a taxa de utilização da linha de forma que as restrições associadas à taxa de produção e/ou número de postos sejam respeitadas.

Conforme Becker e Scholl (2006), no problema de balanceamento de linhas de modelos mistos, o tempo de ciclo deixa de existir e passa a ser considerada a média dos tempos de operação em função de uma taxa de produção desejada.

### 3. Métodos de Simulação de Eventos Discretos para Solução do BLP

Para Bateman *et al.* (2013) um evento discreto corresponde a uma ação ocorrida a um instante no tempo. Sistemicamente, um sistema de evento discreto é um sistema que possui estados discretos, orientados a eventos, isto é, a evolução dos estados depende completamente da ocorrência de eventos discretos ao longo do tempo. A ocorrência desses eventos pode causar mudanças de estado no sistema (CASSANDRAS, 1993; BATEMAN ET AL., 2013).

Ainda em Bateman *et al.* (2013), tem-se o conceito de estado do sistema, que é um conjunto de variáveis determinísticas ou probabilísticas (estocásticas), sendo responsável por descrever um sistema em determinado instante através da informação contida.

Neste tipo de sistema ocorrem mudanças discretas, ou seja, os instantes discretos das mudanças podem ser estabelecidos de forma determinística ou probabilística, dependendo da natureza das entradas do modelo (BATEMAN *ET AL.*, 2013).

Cassandras (1993) cita a diferenciação entre dois tipos de sistemas de eventos discretos, os temporais e não temporais. Os sistemas de eventos temporais são caracterizados pelas variáveis de entrada que são especificadas como uma sequência de eventos definidas em um tempo específico. Os sistemas discretos não temporais, por sua vez, são caracterizados pelas variáveis de entrada que são especificadas como uma sequência de eventos sem qualquer informação sobre o tempo em que esses eventos ocorrem, isto é, não há dependência do tempo para a ocorrência de um evento.

A simulação de eventos discretos utiliza um modelo computadorizado (lógico / matemático) de um sistema físico com o objetivo de investigar as mudanças de estado em pontos precisos do tempo simulado (BATEMAN *ET AL.*, 2013).

Com estes conceitos, entende-se como SED, o método potencial para estudar o sistema que envolve a linha de produção cerâmica vermelha e extrair disso informações precisas e importantes para a tomada de decisão.

Driscoll e Abdel-Shafi (1985) apresentam um sistema de apoio a decisão que realiza o balanceamento de linhas de modelo simples e modelo misto, utilizando a heurística do peso posicional e considerando a variabilidade dos tempos de processamento. Os resultados de balanceamento obtidos com a simulação permitiram a avaliação de alguns fatores. São eles: as mudanças na velocidade da linha; estações de trabalhos abertas, ou seja, a possibilidade de os operadores se deslocarem para estações adjacentes e; variações no mix de produção. Além disso, o modelo simulado serviu de auxílio a programação da produção, em que os autores avaliaram a capacidade produtiva ao prazo de 5 anos.

Roy e Allchurch (1996) desenvolveram um sistema de balanceamento baseado no conhecimento do engenheiro industrial em produto e processo. O método é baseado na divisão das tarefas em várias categorias de

acordo com sua importância considerando restrições de zona de incompatibilidade e propõe melhorar o balanceamento da linha ao nível da utilização dos operadores através de trocas e transferências de tarefas. O modelo foi aplicado na indústria automobilística e resultou em uma taxa de utilização dos operadores de 92%.

McMullen e Frazier (1998) apresentaram um método chamado Análise Envolvória de Dados, que inclui o uso de 23 soluções heurísticas para fins de comparação de resultados diferentes de balanceamento de linhas e sendo aplicável em modelo simples e em modelo misto, e possibilita a formação de postos paralelos e com adoção de tempos estocásticos. As 23 soluções foram usadas no estudo de 7 problemas relacionados ao ciclo de produção. Os resultados permitiram aos autores avaliarem algumas medidas de desempenho da linha, tais como: o tempo médio de fluxo; o número de unidades produzidas; o custo médio unitário da mão de obra; a utilização do sistema e os tempos de ciclo obtidos.

Santoro e Moraes (2000) estudaram uma nova linha de montagem de motores da Ford do Brasil. O sistema foi desenvolvido em um simulador comercial e com os resultados, pôde-se avaliar a capacidade de produção de motores por dia e o tempo de fluxo a partir da variabilidade de operações manuais e o fator de disponibilidade. O estudo de operações manuais também possibilitou a análise da interação homem-máquina em condições dinâmicas e probabilísticas. Além disso, o modelo permitiu otimizar o número de pallets. Com a consideração do tempo de ciclo médio de teste, o sistema global apresentou uma eficiência de aproximadamente 98%.

Souza *et al.* (2003) analisaram a necessidade e alocação de mão de obra também no setor automobilístico, considerando diferentes configurações de cenários, em função do número de montadores, do arranjo dos montadores na linha, da forma de trabalho dos montadores, da utilização das relações de paralelismo entre as atividades e da forma de entrada dos motores na linha. Os resultados forneceram informações úteis à programação da produção, tais como: taxa média de ocupação em função do número de montadores; a quantidade de motores em função do número de dia para atender tanto à demanda da linha como ao estoque.

## 4. Metodologia

### 4.1. Abordagem

A abordagem da pesquisa adotada caracterizou-se como quantitativa, uma vez que os autores utilizaram relações entre as variáveis determinísticas e probabilísticas, visando à precisão e controle sobre o sistema explorado (MARCONI E LAKATOS, 2010).

### 4.2. Estratégia

A estratégia de pesquisa utilizada foi o estudo de caso. Entende-se este como apropriado quando se quer compreender em profundidade, fenômenos contemporâneos a fim de lidar com as condições contextuais do fenômeno a ser investigado (YIN, 2005). Ainda em Yin (2005), este método utiliza observação direta e uma série sistemática de entrevista, além de envolver uma ampla variedade de evidências obtidas a partir de documentos, artefatos, entrevistas e observações. Neste sentido, o estudo de caso é adequado e justificável, uma vez que a indústria cerâmica de São Miguel do Guamá dispõe de poucos dados úteis à pesquisa.

A seleção da empresa objeto do estudo obedeceu o critério da representatividade e da disponibilidade em atender aos anseios da pesquisa.

O estudo de campo foi executado pelos autores. Os meios de obtenção de informações foram por observação direta da linha de produção e entrevistas não estruturadas com o gerente de produção da empresa, o encarregado da produção, a auxiliar de escritório e mais alguns operários. As entrevistas livres possibilitaram extrair um volume maior de informações, de maneira a compor as várias hipóteses de trabalho e obter as suas confirmações ou negações. Tais entrevistas foram realizadas presencialmente na maior parte dos casos, embora em situações esporádicas e específicas tenha havido o uso de telefone e e-mail.

Fez parte da estratégia de pesquisa a escolha da sistemática que envolve o universo da modelagem e SED. Sistemática esta que direcionou as ações da pesquisa até o alcance de seu objetivo principal.

Com a compreensão da dinâmica envolvida na linha de produção, foi constatada a necessidade de realização de estudo de caracterização da mesma, pois é relevante levantar quanto: o tipo de produto a ser manufaturado (BECKER E SCHOLL, 2006); o

fator tempo, a adoção de tempos determinísticos e/ou estocásticos para a movimentação das peças (BECKER E SCHOLL, 2003); quanto ao tempo de movimentação das peças é regulado ou não regulado (BOYSEN, FLIEDNER E SCHOLL, 2007); quanto ao sistema de transporte utilizado para mover o produto ao longo da linha (MERENGO, NAVA E POZZETTI, 1999); (GROOVER, 2000).

A sistemática proposta por Chwif (1999) (Figura 1) foi escolhida para o direcionamento do estudo de simulação. Ressaltando que tal escolha não seguiu critérios para seleção, pois ao confrontá-la com as metodologias sugeridas por Law e Kelton (2000), Harrel *et al.* (2002) e Banks (2000), constatou-se que estas possuem etapas semelhantes de trabalho embora com denominações diferentes.

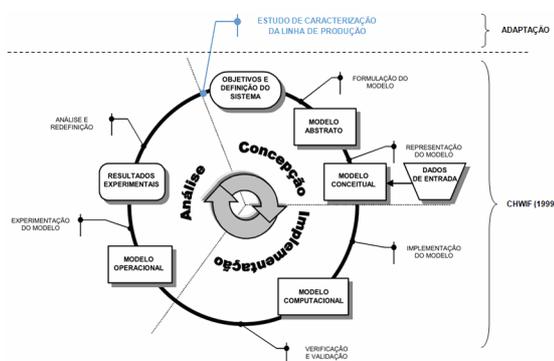


Figura 1: Sistemática de modelagem e simulação  
Fonte: ADAPTADO DE CHWIF, 1999.

Na etapa denominada de Concepção, procedeu-se inicialmente com o estudo de caracterização da linha de produção para então definir o sistema a ser modelado e simulado. A partir disso, foram coletados os dados de entrada seguido do tratamento dos mesmos. Dando sequência, fez-se uma abstração do modelo para então resultar num modelo conceitual.

Na etapa Implementação do modelo, realizou-se a construção do modelo computacional explorando um software de simulação comercial. No caso deste artigo, foi utilizado o Promodel®. O modelo computacional foi comparado frente ao modelo conceitual, objetivando avaliar se o modelo computacional estava condizente com o sistema real. Durante este procedimento foram realizadas validações (relativo ao modelo computacional frente ao sistema real) e verificações (relativo ao comportamento do modelo no computador).

Por fim, a etapa de Análise voltou-se para a construção do modelo experimental. Foram realizadas várias rodadas no simulador. Em alguns casos, procedeu-se ajustes no modelo,

seguido de novo teste e registro das informações. Após as análises dos resultados, foram registradas conclusões e recomendações a respeito da linha de produção.

### 4.3. Definição das Fontes

A definição das fontes da pesquisa contemplou a formação da base de conhecimento para atingir o objetivo. Nessa ótica, procurou-se reunir e analisar a base teórica de BLP e SED. A capacitação dos autores com relação ao software Promodel® também integra essa etapa. Além disso, considerou-se como fontes de informações: dados históricos da empresa, opiniões dos envolvidos no processo; opiniões de especialistas; dados disponibilizados por entidades do setor (SEBRAE, ANICER, SINTIMIG).

### 4.4. Espaço Amostral

As amostras foram selecionadas por critérios determinísticos, probabilísticos, tipicidade, representatividade e disponibilidade em número adequado. Toda amostra ou seleção das unidades de análise a ser investigadas obedece a certos limites, assim, o número de sujeitos foi definido por dois critérios básicos: (i) o tamanho do corpus de análise, que se muito grande inviabilizaria a análise; (ii) quando as respostas já não acrescentavam informações novas ou interessantes.

O estudo foi realizado em uma única empresa do Arranjo Produtivo Local de São Miguel do Guamá, a qual possui sistema produtivo considerado representativo das empresas desse APL. A empresa objeto de estudo desempenha atividade industrial de produção de minerais não metálicos e atua no segmento de produtos cerâmicos de vedação para construção civil. Foi fundada em 1995 e ao longo desses anos vem desempenhando atividades visando o desenvolvimento local, através da adoção de políticas voltadas para a preservação ambiental, como o programa de créditos de carbono bem como a adoção de parcerias com as universidades da região servindo de campo de pesquisa.

Atualmente, a empresa conta com 53 funcionários, sendo que 2 deles trabalham no escritório, 7 dedicados aos serviços gerais e 44 funcionários ligados diretamente na produção. Produz blocos de vedação (tijolo) para alvenaria, sendo 04 tipos: 9x14x19 – tijolo 6 furos; 9x19x19 – tijolo 8 furos; 9x19x29 – tijolo 8

furos e; o tijolo 11x23x23 – tijolo 8 furos. Atende o mercado da Capital do estado, Belém e da região nordeste do Pará. Sendo suas vendas direcionadas para empresas construtoras, para lojas de materiais de construção e consumidores de pequenas quantidades.

### 4.5. Coleta, Análise e Tratamento de Dados

Na coleta de dados foram utilizadas técnicas de cronoanálise e entrevistas não estruturadas. Além disso, fez-se análise de documentos e pesquisa bibliográficas.

Após o término do levantamento de dados, procedeu-se a tabulação e a análise dos mesmos. A fim de maximizar a confiabilidade dos dados, foram utilizadas formulações no Excel®, bem como estudo inferencial estatístico no software Stat:fit®. Este refere-se a um aplicativo do Promodel®.

## 5. Resultados

### 5.1. Estudo de Caracterização, Definição do Sistema e Modelo Conceitual

O processo produtivo cerâmico possui caracteres amplamente difundidos, conforme constam nos trabalhos de Macke (1999) e Medeiros (2006). Mesmo assim, fez-se necessário estudar as características da linha de produção a fim de diagnosticar a natureza dos sistemas, as variáveis componentes de cada sistema e estabelecer o escopo para modelagem conceitual e, conseqüentemente, computacional.

A fábrica possui arranjo físico por produto, isto é, todos os elementos cerâmicos passam pela mesma sequência de operações não possuindo assim rotas alternativas. Ao analisar a classificação de Scholl (1999), percebe-se que a linha de produção em questão é do tipo modelo misto. A mesma origina um único produto (tijolo), sendo que este produto possui 04 tipos de modelos, diferenciado pelas suas dimensões (9x14x19, 9x19x19, 9x19x29 e 11x23x23) e com tempo de setup (troca da boquilha da extrusora) relativamente pequeno. A referida linha possui 04 etapas em seu processo de produção, são elas: (i) preparação da massa; (ii) extrusão; (iii) secagem; (iv) sinterização. O Quadro 01 apresenta os processos e suas respectivas descrições.

Quadro 1 – Processos de manufatura cerâmica. (Fonte: Autor, 2015)

<b>I – Preparação da massa</b>	A empresa realiza o destorroamento e a moagem da argila para posterior beneficiamento da mesma (homogeneização no misturador e adensamento no laminador).
<b>II – Extrusão</b>	A massa plástica é compactada na extrusora (maromba) a partir da alta pressão em uma câmara a vácuo contra um molde chamado boquilha, onde a massa ganha o número de furos desejado. Posteriormente, a massa moldada passa pelo corte automatizado. Neste, existe um comando elétrico com temporizador, no qual regula os cortes dos elementos cerâmicos. A cortadora também possui escoras laterais que tem a função de definir o formato da peça quanto à largura e também possui uns finos cabos de aço que tem a função de cortar a peça na dimensão desejada quanto ao comprimento.
<b>III – Secagem</b>	A empresa realiza secagem em uma estufa estruturada por exaustores conectados ao forno paulista, o que proporciona o reaproveitamento do ar quente oriundo destes fornos. O secador também é estruturado por trilhos que permite o transporte dos vagonetes carregadas em seu interior. Existem ainda dispositivos de controle de temperatura interna, umidade e distribuição do ar quente.
<b>IV – Sinterização (queima)</b>	A empresa possui 2 tipos de fornos: um forno semicontínuo, denominado forno Hoffmann e o forno do tipo túnel, denominado forno Paulista. O forno Hoffmann possui 72 linhas, sendo que cada linha possui capacidade de 2.100 tijolos. Este forno utiliza como combustível, a lenha. Por outro lado, tem-se 3 fornos paulistas, sendo que cada forno possui duas câmaras e cada câmara tem capacidade de 24.500 tijolos. Esse tipo de forno possui um fluxo produtivo contínuo e ritmado e apresenta pouca variabilidade no tempo de queima.

Fonte: Os autores, 2015.

Após observação, pode-se fazer o seguinte diagnóstico: A etapa (i) preparação da massa possui caracteres contínuos. Por sua vez, (ii) extrusão, (iii) secagem e (iv) sinterização possuem caracteres discretos, sendo (ii) portadora de variável estocástica e (iii) e (iv), com variáveis determinísticas.

Portanto, o sistema modelado abrangeu a etapa de extrusão, secagem e sinterização. O escopo do modelo envolveu desde a saída do bloco da extrusora até a etapa de carregamento

do caminhão para expedição. Como detalhamento, o modelo considerou somente os recursos que integram as 03 etapas citadas, tais como: operadores; máquinas e dispositivos de transportes. As entidades, aquelas processadas ao longo da linha são: o tijolo 9x14x19 (tijolo 6 furos) e o tijolo 9x19x29 (tijolo 8 furos).

Nas Tabelas 1 e 2, têm-se as relações de indicadores, variáveis e os extratos estatísticos das variáveis, respectivamente.

Tabela 1 – Indicadores e variáveis de entrada e de saída.

Indicadores	Variáveis de Entrada	Variáveis de Saída
Taxa de produção da linha	Intervalo de chegadas de tijolos na esteira	Quantidade de tijolos 6F extrudados
	Intervalo de chegadas de tijolos na vagonete	Quantidade de tijolos 8F extrudados
	Tempo de retirada do tijolo da esteira	Quantidade de tijolos 6F enforados
	Tempo de depósito do tijolo na vagonete	Quantidade de tijolos 8F enforados
	Tempo de retirada do tijolo da vagonete	Quantidade de tijolos 6F desenforados
	Tempo de depósito do tijolo no carrinho de mão	Quantidade de tijolos 8F desenforados
Taxa de utilização dos recursos	Tempo de retirada do tijolo do carrinho de mão	Tempo de processamento
	Tempo de depósito do tijolo no caminhão	
	Tempo de secagem	
	Tempo do ciclo de queima do forno Hoffmann	
	Tempo do ciclo de queima do forno Paulista	
	Intervalo entre paradas da extrusora	
	Tempo de parada para manutenção da extrusora	
	Tempo de <i>setup</i> da extrusora	

Fonte: Os autores, 2015.

Tabela 2 – Distribuições de probabilidade obtidas.

Variáveis de Entrada	Média	Distribuição	Expressão
Intervalo de chegadas de tijolos na esteira	0,024	Normal	$N(2.46e-002, 3.29e-003)$
Intervalo de chegadas de tijolos na vagonete	0,043	Erlang	$ER(4.28e-002, 134)$
Tempo de retirada do tijolo da esteira	0,0026	Erlang	$ER(2.56e003, 22.)$
Tempo de depósito do tijolo na vagonete	0,004	Erlang	$ER(3.54e-003, 29.)$
Tempo de retirada do tijolo da vagonete	0,0026	Erlang	$ER(2.56e003, 22.)$
Tempo de depósito do tijolo no carrinho de mão	0,004	Erlang	$ER(3.54e-003, 29.)$
Tempo de retirada do tijolo do carrinho de mão	0,0026	Erlang	$ER(2.56e003, 22.)$
Tempo de depósito do tijolo no caminhão	0,004	Erlang	$ER(3.54e-003, 29.)$
Tempo de secagem	2760,7	*	*
Tempo do ciclo de queima do forno Hoffmann	744	*	*
Tempo do ciclo de queima do forno Paulista	1824	*	*
Intervalo entre paradas da extrusora	36,2	Weibull	$20.+W(2.32, 18.)$
Tempo de parada para manutenção da extrusora	8	Weibull	$3.+W(1.37, 9.)$
Tempo de <i>Setup</i> da extrusora	36,58	Gama	$29.+G(2.98, 2.42)$

Fonte: Os autores, 2015.

Este estudo estatístico possibilitou analisar o comportamento dos dados e a partir de então, serem inseridos no modelo computacional a fim de representar o real comportamento do sistema estudado.

O modelo conceitual (Figura 2) foi construído com base no método IDEF-SIM proposto por Leal *et al.* (2008). Neste modelo agregaram-se características relativas à linha de produção a uma linguagem de simulação. Com esta modelagem, obtiveram-se algumas informações importantes do funcionamento do sistema que facilitaram a construção do modelo computacional.

Neste modelo conceitual, as setas duplamente riscadas significam entradas do sistema. A entidade E1 e E2 representam a entrada do tijolo 6F e 8F, respectivamente. Essas entidades são seguidas pela junção “X”, que indica que somente uma das entidades pode estar em processo. Após a entidade passar pela extrusora em F1, a mesma percorre a esteira em F2. A existência da junção “X” indica que as entidades são carregadas tanto pelos operadores Op2 e Op3 em F3 (carga de vagonete 1), pelos Op4 e Op5 em F4 (carga de vagonete 2) como pelos operadores Op6 e Op7 na função F5 (carga de vagonete 2).

O carregamento das vagonetes ocorre da seguinte maneira: tanto em F4 como em F5 há o preenchimento de metade da capacidade da vagonete, sendo que a outra metade é preenchida em F3. A regra de prioridade indica que a adição ocorrerá com quem estiver mais próximo de F3. Passada estas etapas, a entidade assume a forma de E3 (vagonete carregada). Esta então é transportada ao secador F6 com o auxílio dos

recursos Op8, Op9 e mais a Balsa1. Em situações que o secador atingir sua capacidade, a mesma entidade é transportada a reserva do secador E7 e fica em espera até o secador ficar disponível. Após o regime de secagem, E3 é transportada pelos recursos Op10 e mais a balsa 2 até a área de descarga de vagonete F8.

Vale destacar, que em F8 começa o ciclo da enfora. Nesta etapa a entidade volta a forma de E1 ou E2. A entidade em F8 é descarregada por 8 recursos (Op11, 12, 13, 14,15, 16, 17 e Op18) e carregadas no recurso carrinho de mão (cada operador utiliza um carrinho de mão), estas são transportadas até as câmaras dos fornos. A existência da junção “&” indica as 2 destinações diferentes dadas a entidade, sendo o seguinte: os operadores Op11, 12 e Op13 transportam as entidades até as câmaras paulistas (F9, F10, F11, F12, F13 e F14) e as descarregam das referidas câmaras e; os operadores Op14, 15, 16, 17 e Op18, transportam até as câmaras do forno Hoffmann (F15, F16, 17, F18, F19, F20, F21, F22, F23 e F24) seguindo de descarregamento. A existência das junções “X” antes dos 2 tipos de câmaras indicam a forma alternada do transporte da entidade.

As atividades da etapa de desenfora são semelhantes a enfora. Os operadores Op19, 20, 21, 22, 23 e Op24 carregam seus respectivos carrinhos de mão com a entidade e as transportam para o caminhão, este último representado pela função F25. A partir de então, tem-se a bola preenchida que representa o fim do sistema.

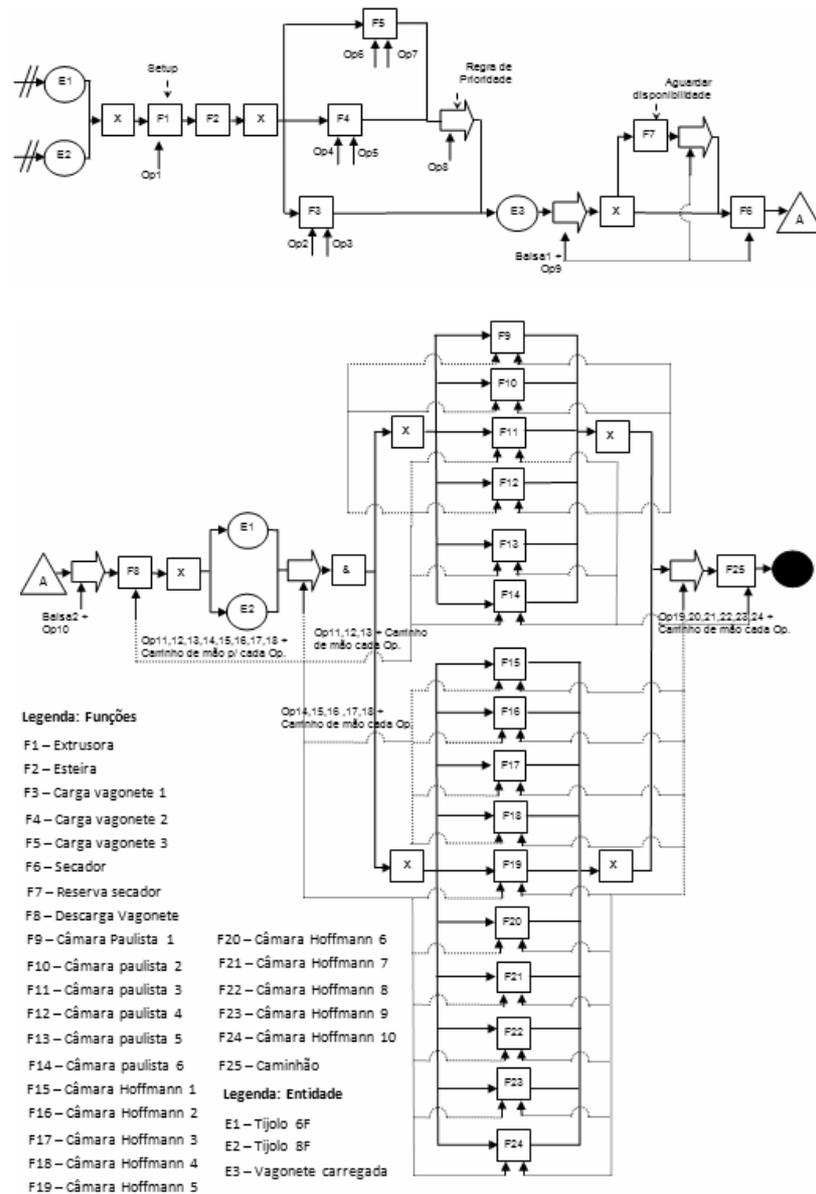


Figura 2 – Modelo conceitual.  
Fonte: Os autores, 2015.

A validação do modelo conceitual foi realizada através da consulta a um especialista. A escolha de tal especialista foi condicionada a sua experiência dentro das fábricas cerâmicas de São Miguel do Guamá, atuação esta que resultou em uma dissertação de mestrado (NEGRÃO 2009). Ocorreu uma reunião semiestruturada com o especialista, onde se fez uma breve apresentação da simbologia utilizada pela técnica IDEF-SIM e, posteriormente, fez-se a leitura detalhada do modelo conceitual, explicando cada etapa do mesmo para que o avaliador entendesse todos os detalhes da técnica e para que também pudesse associar cada etapa com a realidade. Após a leitura, o especialista

considerou que o modelo conceitual representava fielmente o funcionamento do sistema estudado. Portanto, o modelo conceitual foi validado.

## 5.2. Modelo Computacional, Verificação e Validação

A Figura 3, apresenta a interface do modelo computacional. Para a sua construção foi explorado o software Promodel® versão 8.6. Este foi modelado obedecendo à lógica descrita no modelo conceitual. Nesta etapa foram utilizados os seguintes elementos que compõem

o software: locais; entidades; recursos; redes de caminho; chegadas; variáveis; atributos; macros; turnos e processos. A modelagem iniciou de forma simples até o mais complexo e, à medida que os autores introduziam informações, procedia-se tanto com a depuração dos erros de

sintaxe e lógicas existentes no modelo, como o acionamento do recurso de animação gráfica do Promodel®, buscando assim, avaliar o fluxo das entidades e dos recursos indicados no roteiro de operações.

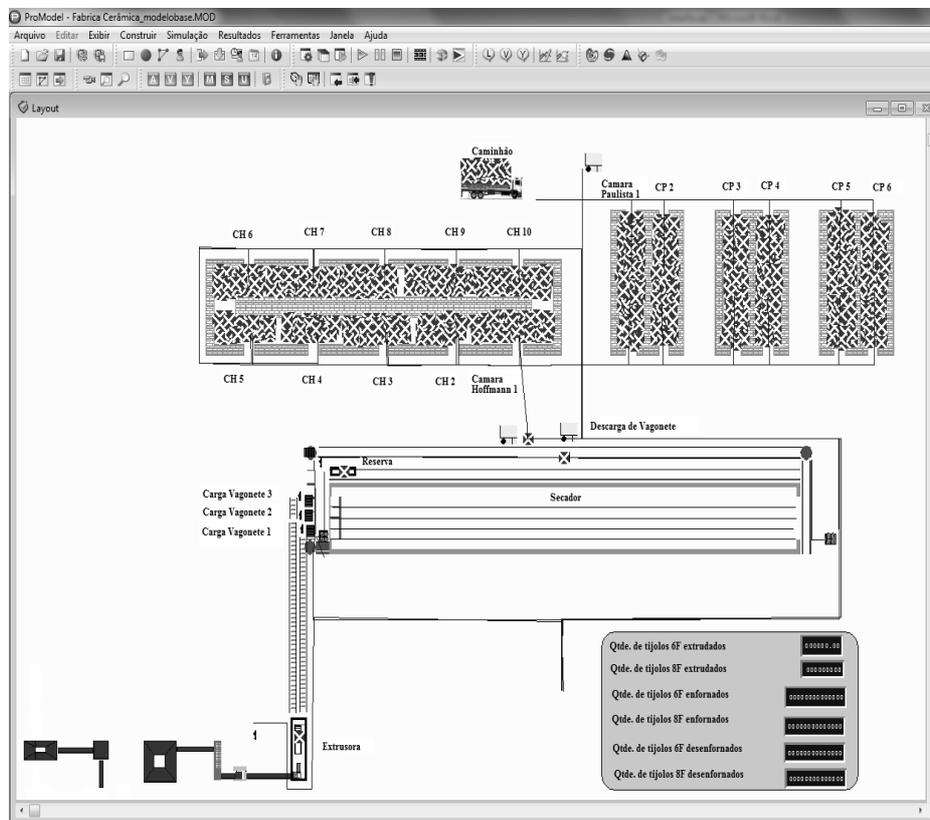


Figura 3 – Modelo computacional.

Fonte: os autores, 2015.

Com relação a etapa de verificação, testou-se a sensibilidade do modelo (análise de sensibilidade). Tendo como referência  $N(2.46)$  como o dado de entrada do intervalo de chegadas de tijolos na esteira e as saídas da desenforma de 1.143.682 de tijolos 6F produzidos e 61.185 do tipo tijolo 8F. Os autores efetuaram pequenas alterações nos dados de entrada, a saber:  $N(2.45)$  e  $N(2.47)$ . E após uma replicação para cada mudança verificou que os dados de saída também tiveram sensíveis modificações. Posteriormente, foram realizadas modificações acentuadas no intervalo de chegadas do modelo:  $N(2.0)$  e  $N(3.0)$ . E após as devidas replicações, constatou-se que os resultados também sofreram modificações acentuadas. Nas duas situações, observou-se que para cada dado de entrada gerava-se uma saída inversamente proporcional.

A respeito da validação, comparou-se a taxa de produção real da empresa com a taxa de produção simulada. Os quantitativos de produtos acabados em cada mês foram tabulados, onde o quociente entre o produto acabado e o número de dias trabalhados em um mês (26 dias), possibilitou a obtenção da TPD para os 2 tipos de tijolos de cada mês. A taxa de produção simulada, 47.891 tijolos por dia, correspondente a TPD da linha, foi obtida a partir da média entre as taxas de produção diária de cada mês. Confrontando com o sistema real, com uma taxa de produção de 46.502 tijolos por dia, esta apresentou inferioridade com relação a taxa de produção simulada, sendo que as mesmas apresentaram uma diferença de 2,9%, valor considerado aceitável.

As Tabelas 3 e 4 mostram os resultados de verificação e validação, respectivamente.

Tabela 3 – Resultados do teste de análise de sensibilidade.

Intervalo de chegadas de tijolos na esteira	Desenforna	
	Dados de saída	
Dados de entrada	Tijolo 6F	Tijolo 8F
N(2.46)	1.143.682	61.185
N(2.45)	1.143.699	61.196
N(2.47)	1.143.671	61.176
N(2.0)	1.143.747	61.225
N(3.0)	1.143.534	61.135

Fonte: Os autores, 2015.

Tabela 4 – Taxa de produção do modelo base.

Mês	Taxa de Produção		Taxa de Produção Simulado	Taxa de Produção Real	Diferença
	Diária				
	Tijolo 6F	Tijolo 8F			
Jan	43.988	2.353			
Fev	45.296	2.973			
Mar	45.277	2.974	47.891	46.502	2,9%
Abr	45.299	3.004			
Mai	45.280	3.008			

Fonte: Os autores, 2015.

### 5.3. Análises

Ao analisar a linha de produção da fábrica, percebe-se que o estado natural é iniciar o primeiro dia de trabalho em uma condição vazia (entidade tijolo), e ao final do dia a entidade continuar em processo. Logo, os dias sequenciais de trabalho iniciam em uma condição não-vazia. Desta forma, caracteriza-se esse sistema como não-terminante. Chwif e Medina (2010) afirmam que neste tipo de sistema os dados de saída devem ser obrigatoriamente coletados durante o estado de regime permanente, o que requer a determinação do período de aquecimento (warm-up).

O estudo do período de aquecimento foi realizado a partir da simulação do modelo base com o tempo de 120 horas com 5 replicações (número mínimo de replicações). O tempo de processo foi escolhido para ser o indicativo da estabilização do sistema, pois ela indica o estado dos últimos recursos da linha (desenforna).

Foram simuladas 15 replicações do modelo base com inclusão do tempo de aquecimento de 120 minutos.

O cálculo do número de replicações foi realizado com base na técnica Amostra Piloto, descrita por (CHWIF E MEDINA, 2010). Consiste em rodar uma amostra com um número de replicações pré-determinados e calcular a precisão (metade do intervalo de confiança) da rodada pela fórmula:

$$h = t_{n-1, \alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (1.0)$$

onde  $h$  é a metade do tamanho do intervalo de confiança (precisão);  $1-\alpha/2$  é o percentil da distribuição  $t$  de Student com  $n - 1$  graus de liberdade;  $S$  é o desvio padrão amostral e;  $n$  é o número de replicações da amostra.

Em seguida, de acordo com a técnica Amostra Piloto, pode-se encontrar o tamanho do número de replicações para a precisão desejada pela equação:

$$n^* = \left\lceil n \left( \frac{h}{h^*} \right)^2 \right\rceil \quad (2.0)$$

onde  $n^*$  é o número de replicações para a precisão desejada;  $n$  o número de replicações da amostra piloto;  $h^*$  a precisão desejada e;  $h$  a precisão da amostra piloto.

O período de simulação foi 960 horas, ou seja, 5 meses, conforme o calendário designado. Os resultados nortearam novas possibilidades de configuração do modelo da linha produtiva em termos de variação de parâmetros de entrada para que fossem alcançados os objetivos deste artigo.

A Tabela 5 apresenta as variáveis de saída (tijolo de 6 e de 8 furos) das etapas de extrusão, enforna e desenforna nos 5 meses em estudo. Para a etapa de extrusão, foram fabricados em média, 1.219.400 tijolos de 6 furos e 75.388 tijolos de 8 furos. A média de saídas da etapa de

enforna, foram de 1.212.298 para o tijolo 6F e 72.874 para o tijolo 8F. Na etapa de desenforna, que corresponde à saída de produtos acabados, obtiveram-se em média, 1.212.298 e 72.874 saídas de tijolos de 6F e de 8F, respectivamente.

Efetuada-se uma somatória dos produtos acabados, obteve-se um volume de produção de 6.225.817 tijolos.

Tabela 5 – Variáveis de saídas do modelo base.

Mês	Extrusora		Enforna		Desenforna	
	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F
Janeiro	1.220.154	76.051	1.184.536	63.376	1.143.690	61.190
Fevereiro	1.218.252	74.651	1.218.545	75.118	1.177.699	77.303
Março	1.219.578	75.142	1.219.228	74.745	1.177.209	77.335
Abril	1.219.751	75.591	1.219.826	75.523	1.177.784	78.101
Maio	1.219.267	75.503	1.219.355	75.607	1.177.292	78.214
Qtde. Média Produzida	1.219.400	75.388	1.212.298	72.874	1.170.735	74.429
Total de Tijolos Produzidos						6.225.817

Fonte: Os autores, 2015.

Tabela 6 – Estado dos Recursos do modelo base.

Cenário	Nome	% Em uso	% Movimentação		% Ocioso	% Parada Não-Planejada
			Para Uso	Para Parada		
Cenário Base	Op 1.1	75,46	0,00	0,00	15,23	9,31
Cenário Base	Op 1.2	75,46	0,00	0,00	15,23	9,31
Cenário Base	Op 2.1	72,08	0,00	0,00	21,21	6,72
Cenário Base	Op 2.2	72,08	0,00	0,00	21,21	6,72
Cenário Base	Op 3.1	72,08	0,00	0,00	18,61	9,31
Cenário Base	Op 3.2	72,08	0,00	0,00	18,61	9,31
Cenário Base	Carrinho de mão 1.1	82,23	9,41	4,87	0,00	3,49
Cenário Base	Carrinho de mão 1.2	82,23	9,41	4,87	0,00	3,49
Cenário Base	Carrinho de mão 1.3	82,23	9,41	4,87	0,00	3,49
Cenário Base	Carrinho de mão 2.1	88,79	5,66	1,16	0,00	4,39
Cenário Base	Carrinho de mão 2.2	88,79	5,66	1,16	0,00	4,39
Cenário Base	Carrinho de mão 2.3	88,79	5,66	1,16	0,00	4,39
Cenário Base	Carrinho de mão 2.4	85,72	5,50	1,32	3,07	4,39
Cenário Base	Carrinho de mão 2.5	86,99	5,66	1,32	1,64	4,39
Cenário Base	Carrinho de mão 3.1	82,60	11,32	1,69	0,00	4,39
Cenário Base	Carrinho de mão 3.2	82,60	11,32	1,69	0,00	4,39
Cenário Base	Carrinho de mão 3.3	82,92	11,00	1,69	0,00	4,39
Cenário Base	Carrinho de mão 3.4	86,60	11,32	1,69	0,00	4,39
Cenário Base	Carrinho de mão 3.5	83,61	10,31	1,69	0,00	4,39
Cenário Base	Carrinho de mão 3.6	83,29	10,63	1,69	0,00	4,39

Fonte: Os autores, 2015.

Com relação à TUR (Tabela 6), é apresentado o relatório de estado dos recursos. O relatório considera como utilização o tempo de operação do recurso (em uso) e o movimento do mesmo para a operação (movimento para uso). A média geral de utilização é de 87,24%, sendo que 73,20% representam os recursos responsáveis pelo carregamento das vagonetes, indicando assim, a etapa de extrusão como operação gargalo da linha. Os recursos responsáveis pela enforna apresentaram 92,76% de utilização e a TUR dos recursos dedicados a desenforna é de 93,91%. Alguns recursos foram

suprimidos da análise, a saber: o operador dedicado a extrusora (Op5); o operador coringa (Op4) e as balsas destinadas a depósito e retirada das entidades no secador. Embora estes recursos sejam indispensáveis ao processo, há pouco acionamento dos mesmos, o que comprometeria na análise geral da taxa de utilização dos recursos. O relatório mostra ainda um percentual de aproximadamente 9% de paradas não planejadas, o que equivale a 43 minutos diários inoperáveis. Enquanto a etapa de enforna apresentou um percentual de 4,05% e a etapa de desenforna, 4,38%.

A respeito da etapa de extrusão, as causas destas paradas estão relacionadas a questão da má qualidade de preparação da massa o que acarreta na entrada de pedra e/ou raízes influenciando a formação de tijolos defeituosos. Também causam paradas no processo de extrusão a quebra de equipamentos antecedentes a extrusão e falta de argila no caixão alimentador. Além disso, a falta de programação da produção acarreta mudanças inesperadas no tipo de tijolo, ocasionando mais paradas na produção em função da troca da boquilha da extrusora (setup), bem como na alteração do espaçamento dos cabos de aço da cortadora que determinam a dimensão do comprimento do tijolo (vide Tabela 6).

Ao analisar os fatores intervenientes na operação gargalo, decidiu-se testar a variável de entrada do tempo de setup da extrusora. É válido considerar que não foram sugeridos outros

cenários considerando as etapas de enforma e desenforma devido ao fato dos autores entenderem como somente a operação gargalo ser crítica ao BLP. Assim como, dentro da operação gargalo, entendeu-se como inviável a alteração do número de operadores e/ou alteração no número de algum equipamento existente.

A coluna configurações presente na Tabela 7, mostra os tempos determinísticos de setup da extrusora considerados para cada cenário testado. Estes tempos substituíram o tempo de setup original, representado pela distribuição de probabilidade  $29.+G(2.98, 2.42)$  (distribuição apresentada na Tabela 2). É válido ressaltar, que os tempos determinísticos adotados nos três cenários estão compreendidos dentro da distribuição mencionada.

Tabela 7 – Configurações dos novos cenários e resultados.

	Configurações		Resultados			
	Setup da extrusora	Total de tijolos produzidos	Taxa de produção	Taxa de utilização dos recursos	Paradas não planejadas	Diferença
Cenário 01	33 min	6.349.249	48.840	88,0%	8,0%	1,94%
Cenário 02	30 min	6.410.965	49.315	89,2%	7,0%	2,89%
Cenário 03	27 min	6.472.681	51.792	92,0%	6,0%	7,53%

Fonte: os autores, 2015.

Ainda com base na Tabela 7, os resultados mostram que o cenário 1 gerou um volume de tijolos produzidos de 6.349.249 unidades; o cenário 2 com um total 6.410.965 tijolos produzidos e o número de tijolos desenformados; com o cenário 3 foram 6.410.965 unidades. O que refletiu proporcionalmente na TPD, onde o cenário 3 apresentou o maior quantitativo, 51.792 tijolos por dia. Além disso, a taxa de produção se mostrou diretamente proporcional a crescente da taxa de utilização dos recursos, logo, a produção atingiu a sua maior taxa com o cenário 03.

Com relação a TUR: o cenário 1, apresentou uma média de 88%; o cenário 2, por sua vez, 89,2% e; o cenário 3, correspondeu a 92%. A diminuição do tempo de setup da extrusora implica na diminuição do percentual de paradas não planejadas, o que contribui também para o aumento da TUR.

Em termos gerais, o cenário ideal para o BLP seria o terceiro, com 92% de TUR e uma TPD de 51.972 tijolos. Porém, levando-se em consideração o critério factibilidade, o cenário 1 representa o BLP com 88% de TUR e TPD de

48.840 tijolos, uma vez que o tempo determinístico de 33 minutos de setup da extrusora é o mais próximo da média 36,58 minutos (média apresentada na Tabela 2), ou seja, para tornar factível, necessitaria de uma redução de aproximadamente 10%, dado este mais realista ao comparar os 18% de redução exigida pelo cenário 2 e de 30% pelo cenário 3.

Ao comparar os índices da TUR e da TPD com o sistema real da linha de produção, obteve-se uma melhoria de 1,96% e 2,97%, respectivamente.

Conforme citado anteriormente, as características do local de trabalho da extrusora permite somente um operador e a adição de mais uma extrusora implica na aquisição de mais equipamentos auxiliares, o que eleva bastante os custos para empresa. Uma alternativa seria a melhoria no arranjo físico do local de trabalho em questão, buscando potencializar as atividades de conversão e diminuição das atividades de fluxo. Cursos de capacitação para o operador da extrusora seriam adequados com fins de melhoria de desempenho produtivo.

## 6. Conclusões

O objetivo geral deste artigo foi atingido uma vez que o cenário 1 forneceu os resultados relevantes para o setor e, sobretudo, atingíveis. Este modelo propiciou o BLP da linha estudada com 88% de TUR e uma TPD de 48.840 tijolos.

A taxa de utilização dos recursos foi considerada satisfatória, tanto em uma análise comparativa com a taxa de utilização obtida com o modelo base, tanto ao considerar este percentual significativo, uma vez que há o uso intensivo da mão de obra dentro do chão de fábrica. Além disso, a TUR de 88% implicou no alcance de uma TPD expressiva para as condições da linha da empresa estudo de caso.

No âmbito da revisão de literatura, a revisão do sistema de eventos discretos foi de suma importância para os autores se familiarizarem com os termos e conceitos que fazem parte do universo da simulação computacional. Por outro lado, a revisão do assunto balanceamento de linhas possibilitou investigar as melhores práticas de resolução do balanceamento pela seara da simulação. As características bastante peculiares do sistema produtivo da fábrica cerâmica exigiu uma investigação aprofundada para aquisição de conhecimento, a ponto de definir as variáveis e indicadores necessários para definir o sistema a ser modelado, programar a coleta de dados no chão de fábrica, bem como avaliar a linha de produção. A revisão dos conceitos de modelagem e simulação possibilitou adquirir conhecimentos quanto aos métodos de condução de um projeto de simulação, as vantagens e desvantagens envolvidas, as práticas de verificação e validação de modelos e as formas de tratamentos estatísticos dos resultados. E, por fim, constatou-se o baixo número de trabalhos acadêmicos explorando o conceito de balanceamento de linhas de produção de modelo misto à luz da simulação computacional, tornando-se, portanto, um campo vasto a ser pesquisado.

Pode-se concluir que o modelo conceitual IDEF-SIM se tornou um facilitador da modelagem computacional devido à sua lógica de construção ser voltada para modelos computacionais. O modelo trouxe a representação dos locais de trabalho, das regras envolvendo a movimentação, do uso dos recursos, além das transformações de entidades, detalhes estes que possibilitam a representação de um modelo mais próximo das exigências de um modelo computacional.

Com a prática da simulação, comprovaram-se ainda algumas vantagens de seu uso antes evidenciado somente na literatura. Destaca-se a obtenção de resultados significativos sem a necessidade de intervir no sistema real, eliminando assim um alto risco de desperdício de tempo e de custo. Indo mais além, estes resultados representam um ponto de análise que está vinculado ao problema deste artigo, podendo ser ampliado a partir de um objeto de estudo mais complexo da linha de produção, utilizando outros indicadores e testando outros cenários.

Outrossim, com a simulação pode-se avaliar o desempenho da linha de produção, o que permite considerar o modelo como uma ferramenta de diagnóstico que pode auxiliar os decisores tanto na tarefa de programação da produção, quanto nas realizações de mudanças de condições de operação do sistema, tendo por exemplo, a implementação de melhorias na linha através de plano de ataque à operação gargalo.

Por fim, tem-se como as principais contribuições deste trabalho o fato de trazer para dentro da universidade a experiência da aplicação prática da simulação envolvendo uma indústria cerâmica vermelha de São Miguel do Guamá, entendendo que este setor tem carência de tecnologias de processo, sendo um campo robusto a ser explorado por pesquisas. Vislumbra-se desta forma, proporcionar vantagens competitivas em termos de mercado ao setor. Neste sentido, o modelo computacional construído pode ser utilizado por outras empresas cerâmicas, sendo porém necessário adaptar a configuração do modelo às diversas culturas empresariais. Portanto, a técnica de modelagem computacional pode ser considerada genérica, uma vez que é passível de aplicação a outros casos empresariais.

## 7. Agradecimentos

À CAPES, pela bolsa concedida e ao CNPq pelos recursos necessários para viabilização deste projeto.

## 8. Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA – ANICER, 2015. Disponível em: <<http://www.anicer.com.br/index.asp?pg=agenda.asp>>. Acesso em: 20 de março de 2015.

BANKS, J. **Introduction to simulation**. Proceedings of the Winter Simulation Conference. Atlanta, 2000.

- BATEMAN, R. E.; BOWDEN, R. O.; GOGG, T. J.; HARRELL, C. R.; MOTT, J. R. A.; MONTEVECHI, J. A. B. **Simulação de Sistemas: aprimorando processos de Logística, Serviços e Manufatura**. 1ª Ed. Editora Elsevier, Rio de Janeiro, 2013. 200p.
- BETINI, D. G. **Inovação na tecnologia de produtos de cerâmica vermelha com uso de chamote em São Miguel do Guamá**. 2007.113p. (Dissertação de Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.
- BETTS, J.; MAHMOUD, K. I. A Method for Assembly Line Balancing. **Engineering Costs and Production Economics**, vol. 18, p.55-64, 1989.
- BECKER, C.; SCHOLL, A. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, 168(3):666–693, February, 2006.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. **Jena Research Papers in Business and Economics - Working and Discussion Papers, Friedrich-Schiller-University Jena, School of Economics and Business Administration**, 02/ 2007).
- CASSANDRAS, C. G. **Discrete-Event Systems: Modeling and Performance Analysis**. Ed. Irwin, 1993.
- CHWIF, L. **Redução de Modelos de Simulação de Eventos Discretos na sua Concepção: Uma Abordagem Causal**. 1999.139p. (Tese de doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- DAVIS, M. M.; AQUILANO, N. J.; CHASE, R. B. **Fundamentos da Administração da Produção**. 3 ed. Editora Bookman, Porto Alegre, 2001. 598p.
- DRISCOLL, J.; ABDEL-SHAFI, A. A. A Simulation Approach to Evaluating Assembly Line Balancing Solutions. **International Journal of Production Research**, 23, 975-985, 1985.
- GROOVER, M. P. **Automation, production, and computer-integrated manufacturing**. 2ª ad. Prentice Hall. New Jersey, 2000.
- HARRELL, C., MOTT, J., BATEMAN, R., BOWDEN, R e GOGG T. **Simulação: otimizando os sistemas**. Editora IMAM, São Paulo-SP, 2002. 134p.
- KRAJEWSKI, L. J.; RITZMAN, L. P. **Administração da Produção e Operações**. São Paulo: Prentice Hill, 2004. 431p.
- LAW, A.; KELTON, D. **Simulation modeling and analysis**. New York, McGraw-Hill, 2000.
- LASTRES, H. M. M.; CASSIOLATO, J. E.; ALBAGLI, S.; MACIEL, M. L.; LEGEY, L. R.; LEMOS, C; SZAPIRO, M. **Interagir para competir: promoção de arranjos produtivos e inovativos no Brasil**. Brasília: SEBRAE, 2002.
- LEAL, F.; ALMEIDA, D. A.; MONTEVECHI, J. A. B. **Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de elementos do IDEF**. In: Anais do XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, João Pessoa, PB, 2008.
- MACKE, J. **Desenvolvimento de um modelo de intervenção baseado no Sistema Toyota de Produção e na Teoria das Restrições: a utilização da pesquisa-ação em uma indústria de cerâmica vermelha de pequeno porte da região metropolitana de Porto**. 1999, 281p. (Dissertação de Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- MAFRA, A. T. **Proposta de indicadores de desempenho para a indústria de cerâmica vermelha**. 1999, 126p. (Dissertação de Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos da Metodologia Científica**. 7.ed. São Paulo: Atlas, 2010. 297p.
- MCMULLEN, P. R.; FRAZIER, G. V. A Heuristic for Solving Mixed-Model Line Balancing Problems with Stochastic Task Durations and Parallel Stations. **International Journal of Production Economics**, 51, 177-190, 1997.
- MCMULLEN, P. R.; FRAZIER, G. V. Using Simulated Annealing to solve a Multiobjective Line Balancing Problem with Parallel Workstations. **International Journal of Production Research**, 36, 2717-2741, 1998.
- MCMULLEN, P. R.; FRAZIER, G. V. Using Simulation and Data Envelopment Analysis to Compare Assembly Line Balancing Solutions. **Journal of Productivity Analysis**, 11, 149-168, 1998.
- MEDEIROS, E. N. M. **Sistema de Gestão da Qualidade na Indústria Cerâmica Vermelha. Estudo de Caso de uma indústria que abastece o mercado de Brasília**. 2006, 190p. (Dissertação de Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- MERENGO, C.; NAVA, F.; POZZETTI, A. Balancing and Sequencing Manual Mixed-Model Assembly Lines. **International Journal of Production Research**, 37, 2835-2860, 1999.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Anuário 2009 – Cerâmica Vermelha, 2009.
- MOREIRA, D. A. **Administração da Produção e Operações**. 2ª. Ed: Cengage Learning, 2011. 624p.
- NEGRÃO, L, L, L. **Utilização da Opção de Diferimento na Avaliação de Implantação de Projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**

**em uma Empresa de Cerâmica Vermelha.** Belém: UFPA, 2008.113p. (Dissertação de Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

ROY, R.; ALLCHURCH, M. J. Development of a Knowledge-Based System for Balancing Complex Mixed Model Assembly Lines. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 9, 205-216, 1996.

SANTORO, M. C.; MORAES, L. H. Simulação de uma linha de montagem de motores. **Gestão & Produção**, 7(3), 338-351, 2000.

SCHOLL, A. Balancing and Sequencing of Assembly Lines. **Heidelberg: Physica-Verlag**, 1999.

SERVIÇO BRASILEIRO APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS DO PARÁ - SEBRAE/PA. **Projeto APL de São Miguel do Guamá.** Relatório Final Descritivo do Pólo Oleiro-Cerâmico de São Miguel do Guamá. Belém. 2004.

SERVIÇO BRASILEIRO APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS-SEBRAE: **Estudos de Mercado: Empresas de cerâmica vermelha e seus principais problemas**, 2008.

SINDICATO DOS TRABALHADORES DA INDÚSTRIA DE SÃO MIGUEL DO GUAMÁ - **SINTIMIG**, 2013.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção.** 3 ed. São Paulo: Editora Atlas S.A. 2009. 728p.

SOUZA, M. C. F.; YAMADA, M. C.; PORTO, A. J. V.; GONÇALVES FILHO, E. V. Análise da alocação de mão-de-obra em linhas de multimodelos de produtos com demanda variável através do uso da simulação: um estudo de caso. **Produção**, 13(3), 63-77, 2003.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 212 p.