

Otimização via Simulação Monte Carlo aplicada na melhoria do processo produtivo de placas de circuito impresso

Murilo Vieira Strongoli
murilo.strongoli@gmail.com
UNESP

Igor Makiyama de Souza Barbosa
igor_makysb@hotmail.com
UNESP

Aneirson Francisco da Silva
aneirson@gmail.com
UNESP

Fernando Augusto Silva Marins
fmarins@feg.unesp.br
UNESP

Resumo: Diante do progresso, dos avanços tecnológicos e da globalização, os métodos matemáticos e estatísticos evoluíram, tornando-se ferramentas importantes para o auxílio de gestores no suporte ao controle gerencial e operacional. Dentro dessa visão, o presente trabalho tem por objetivo analisar o processo de produção de Placas de Circuito Impresso – PCI, especificamente na etapa de soldagem. Foi aplicado o método de Simulação Monte Carlo - SMC para tomada de decisão nos ajustes dos parâmetros do forno de soldagem por onda de componentes por meio dos furos (Pin Through Hole - PTH) durante a montagem da PCI, para evitar o processo de retrabalho e aumentar a qualidade do produto final. A aplicação da SMC no processo de soldagem resultou em melhorias interessantes na produtividade, como a redução de peças retrabalhadas.

Palavras Chave: Soldagem por onda - Sim. Monte Carlo - Tomada de decisão - Forno de soldagem

-

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E QUESTÕES DA PESQUISA

Com o desenvolvimento industrial e tecnológico, a indústria vem passando, ao longo dos anos, por muitas transformações, principalmente aquelas que possuem área de atuação dentro da eletrônica, onde produtos de grande porte têm sido transformados em equipamentos pequenos, praticamente portáteis. Tudo isso é possível devido à tecnologia embarcada nestes equipamentos, a qual possibilita flexibilização e miniaturização dos mesmos (WEILER, 2015).

Os bens eletrônicos são essenciais para profusão de diversos serviços nas áreas de entretenimento, informação, telecomunicações, ambos centralizados na Internet. Nas últimas décadas países com Taiwan, Coréia do Sul e China, destacam-se no ramo industrial pelos seus avanços tecnológicos na área de eletrônica. Tais países são hoje grandes exportadores de produtos industrializados, com presença expressiva nos mercados internacionais da indústria de tecnologia da informação e de comunicações, como semicondutores, câmeras digitais, aparelhos celulares, computadores e periféricos, *softwares* e produtos eletroeletrônicos em geral, e de equipamentos da indústria aeronáutica (GALVÃO, 2007).

No Brasil, segundo Galvão (2007) a indústria eletrônica situa-se em uma posição de baixa expressividade, dentre os conjuntos de investimentos industriais, apesar de concentrar algumas das maiores empresas de eletrônicos na América Latina. No âmbito econômico, a legislação brasileira evidência altas tarifas para a importação de produtos eletrônicos, pois produtos importados são comercializados com altos preços, em relação aos fabricados nacionalmente, tendo dificuldades de competir nesse mercado.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica - ABINEE (2015), no ano de 2015, no ramo de eletrônicos obteve-se um faturamento de R\$ 148,3 bilhões, 4% abaixo do verificado em 2014 (R\$ 153,8 bilhões). As exportações sofreram retração de 11%, caindo de US\$ 6,6 bilhões, em 2014, para US\$ 5,8 bilhões (2015), as quedas ocorreram em todos os blocos econômicos mundiais.

Já as importações apresentaram uma redução de 19%, passando de US\$ 41,2 bilhões, em 2014, para US\$ 33,2 bilhões (2015). Dados do IBGE apresentaram uma retração de 20% em relação a 2014 na produção física do setor eletrônico. A ABINEE (2015) afirma que estes indicadores refletem a grave crise político-econômica no Brasil.

A industrialização de produtos eletrônicos talvez seja uma das atividades que se destacam pela utilização de inovação e tecnologia em sua produção (BAMPI, 2009). A obtenção de um produto eletrônico consiste na fabricação de placas de circuito impresso (PCI), que são montadas por meio de um processo constituído por um conjunto de máquinas de soldagem dotadas de alta tecnologia, dentre elas o Forno de Soldagem por Onda.

Este trabalho teve como objetivo geral aplicar a Otimização via Simulação Monte Carlo (OvSMC) para estabelecer os parâmetros ideais da temperatura do Forno de Refusão de componentes eletrônicos PTH em PCI.

Como justificativas para o desenvolvimento deste trabalho, Zatarim (2013) comenta que o desenvolvimento de produtos eletrônicos vem crescendo em um ritmo muito acelerado, e observa-se que esses produtos estão presentes nos mais diversos setores: desde aplicações militares, passando pelos mais modernos equipamentos médicos até os dispositivos de uso cotidiano, como computadores pessoais e celulares.

Silva (2013) ressalta que a falta da gestão dos processos em uma montadora de placas de circuito impresso pode causar perdas de tempo com retrabalhos, problemas com os produtos em campo e conseqüentemente, a perda de competitividade da empresa.

Hudson e Tilley (2014) afirmam que, neste contexto, para que haja a diminuição dos riscos do processo de soldagem, uma das ferramentas que pode ser aplicada para estabelecer parâmetros ideais ao forno de soldagem por onda é a Simulação Monte Carlo – SMC, que consiste em uma técnica que determina a possível distribuição dos resultados de um processo, a partir de valores selecionados aleatoriamente das variáveis de entrada. Geralmente as variáveis de entrada representam as variáveis de decisão ou opções que os gerentes têm a mão para verificar determinado resultado.

De acordo com Bertrand e Fransoo (2002), este trabalho pode ser classificado como sendo uma pesquisa aplicada, com objetivos empíricos descritivos, pois o modelo de simulação desenvolvido descreve as relações causais que podem existir na realidade, favorecendo a compreensão de processos reais. A forma de abordar o problema é quantitativa, sendo o método de pesquisa a modelagem e simulação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS MATEMÁTICOS

A modelagem consiste, essencialmente, na arte de transformar situações da realidade em problemas matemáticos cujas soluções devem ser interpretadas na linguagem usual (BASSANEZI, 2002).

Corrar (1998) afirma que, quanto ao propósito, o modelo pode ser de otimização ou descritivo. Modelos de otimização são usados na resolução de problemas administrativos que envolvem, por exemplo, maximização de lucros ou minimização de custos. Já os modelos descritivos têm o propósito de descrever o comportamento de um sistema sem se preocupar com a otimização. Os modelos de simulação são classificados como descritivos. Estes não visam a otimização diretamente.

Bassanezi (2002) propõe uma sequência de etapas para que se possa transformar as situações da realidade em problemas matemáticos. Dessa forma, deve-se partir do problema, no qual deve ser feita sua experimentação (onde se processa a obtenção de dados), passando para a abstração (procedimento que deve levar à obtenção dos modelos matemáticos), posteriormente, deve-se fazer a resolução do modelo matemático em questão (substitui-se a linguagem natural pela linguagem matemática coerente), chegando à validação e modificação (reformulação do problema caso a validação não seja satisfatória), e finalmente, podendo fazer sua aplicação.

Haiduck (2008) observa que a modelagem eficiente permite tomar decisões, fazer previsões, explicar e entender. Para que isso aconteça, é necessário obter modelos coerentes e úteis.

2.2 SIMULAÇÃO

A simulação é uma técnica utilizada tanto para projeto e avaliação de novos sistemas, como para reconfiguração física ou mudanças no controle e/ou regras de operação de sistemas existentes. As suas aplicações têm crescido em todas as áreas, auxiliando os gestores na tomada de decisão em problemas complexos e possibilitando um melhor conhecimento dos processos nas organizações (SAKURADA e MIYAKE, 2009).

As fases para realização de uma simulação compreendem: a Formulação do Problema; a Coleta de dados; a identificação das Variáveis aleatórias que serão simuladas e suas respectivas distribuições de probabilidades; a Formulação do Modelo; com a modelagem das relações entre as variáveis do problema; a avaliação do modelo e a realização dos experimentos de simulação (ANDRADE, 1989). Neste contexto, a simulação contínua modela sistemas em que suas variáveis mudam continuamente de valor. É utilizada em estudos que consideram os sistemas constituídos por um fluxo contínuo de informações ou itens. Já a simulação a eventos discretos tem como característica a saída do sistema ser discreta.

Segundo Gagliardi, Renaud e Ruiz (2014), a modelagem de sistemas reais é complexa para ser avaliada apenas por modelos analíticos. Para superar essa barreira, analistas assumem simplificações da realidade. No entanto, o fato da maioria destes sistemas serem estocásticos, faz com que a utilização de modelos puramente analíticos seja um grande problema. Nestes casos, os autores recomendam o uso da simulação.

2.3 SIMULAÇÃO MONTE CARLO

A simulação Monte Carlo (SMC) tem este nome devido à famosa roleta de Monte Carlo, no Principado de Mônaco. Seu nome, bem como o desenvolvimento sistemático do método, data de 1944, durante a Segunda Guerra Mundial, período em que foi ferramenta de pesquisa para o desenvolvimento da bomba nuclear (GARCIA, LUSTOSA e BARROS, 2010).

O fundamento da SMC é gerar valores para as variáveis que compõem o modelo a ser estudado, por meio de números aleatórios. Existem muitas variáveis nos sistemas reais que são estocásticas por natureza, como, por exemplo, tempo das atividades de um projeto, número de empregados ausentes ao trabalho cada dia, volume de vendas, preço da matéria-prima, custo de produtos, viabilidade econômica, dentre outros (SILVA, SILVA e MARINS, 2014).

Ressalte-se que as populações analisadas devem ter certos parâmetros, como média e desvio padrão, e podem ser modeladas por distribuições de probabilidade, como Normal, Exponencial e Uniforme. As amostras obtidas devem ser aleatórias, para isso, é preciso obter uma sequência de números aleatórios. Computacionalmente, esta sequência é facilmente obtida, utilizando-se um gerador de números aleatórios. (OLIVEIRA, BARROS e DOS REIS, 2007).

Referente às vantagens desta ferramenta de análise quantitativa de risco, destacam-se as de que o método é exato, na medida em que a curva de distribuição de probabilidade das variáveis dependentes do evento em questão se estabilize. Entretanto, como principais desvantagens, estes autores citam o conhecimento das distribuições de probabilidade dos dados de entrada (variáveis aleatórias e independentes) e o grande esforço computacional exigido para o processamento dos dados (ASSIS, FRANCIS e RABECHINI, 2013).

2.3.1 MODELO GENÉRICO DA OVSMC

Em muitos problemas práticos do contexto industrial e empresarial, o decisor deve otimizar problemas, levando em consideração a incerteza nos coeficientes da função objetivo e das restrições.

Shahinidis (2004) comenta que a otimização estocástica é aplicada em diversas áreas do conhecimento, como, por exemplo, no planejamento da produção, gestão de recursos naturais e em finanças. Uma das vantagens é a possibilidade de extrair um conjunto de informações relevantes relacionadas ao problema em questão, e desta forma, possibilitar a análise de

diferentes cenários (ABDELAZIZ; AOUNI E EL FAYEDH, 2007; AOUNI; ABDELAZIZ E MARTEL, 2005; DEB, 2001).

Uma formulação genérica para otimização estocástica foi proposta por Abdelaziz, Aouni e El Fayedh (2007):

$$\text{Max} \quad \sum_{j=1}^n \tilde{C}_j x_j \quad (2)$$

S.a:

$$\sum_{j=1}^n \tilde{A}_{ij} x_j \leq \tilde{b}_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$x \in X, X \text{ é o conjunto de soluções viáveis} \quad (4)$$

sendo $\tilde{C}_j, \tilde{A}_{ij}$ matrizes aleatórias e \tilde{b}_i um recurso aleatório estocástico.

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

3.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA EM ESTUDO

A empresa escolhida para execução do estudo trata-se de uma empresa localizada no vale do Paraíba, que fornece serviços de manufatura eletrônica, focada nos segmentos de informática, telecomunicações, área médica, automação comercial, automotiva, aeroespacial, energia e construção civil. Contando com equipamentos de última geração de montagem, testes e inspeção, possui pessoal de gestão formados nas maiores empresas do ramo e um sistema de controle desenvolvido especificamente para a realidade do mercado eletrônico.

3.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO

A seqüência de um processo produtivo de Placas de Circuito Impresso com montagem PTH, conforme ilustrado na Figura 1 e explicado na seqüência.

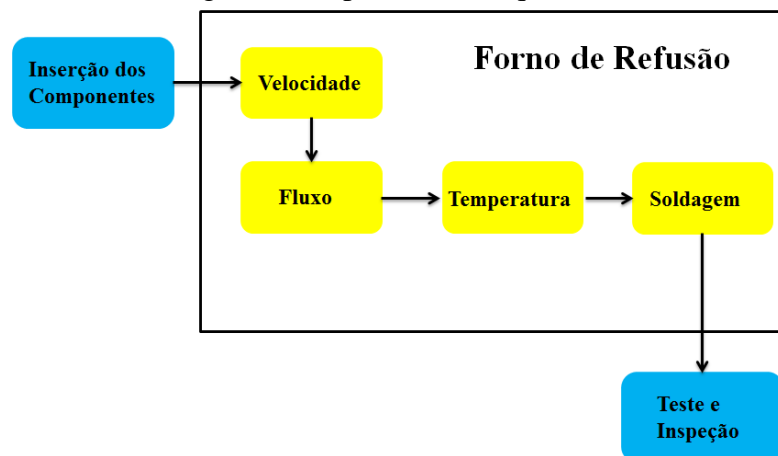


Figura 1: Descrição do processo produtivo

Etapas no processo produtivo de Placas de Circuito Impresso:

1. Inserção dos componentes: os componentes são inseridos na PCI de forma manual por um profissional especializado.
2. Velocidade: regulação da velocidade da esteira para a inserção da placa no Forno de Refusão.
3. Fluxo: aplicação do fluxo de solda, com o objetivo de facilitar a soldagem dos componentes à placa.

4. Temperatura: o forno de refusão possui três zonas de aquecimento, que varia da temperatura de pré-aquecimento até a temperatura ideal para a soldagem dos componentes.
5. Soldagem: ainda no forno de refusão, a placa é submetida em uma onda de solda de estanho onde o componente é fixado a placa.
6. Teste e Inspeção: após o resfriamento da placa, é realizado os testes de funcionamento e inspeção para aprovação de qualidade ao produto.

3.3 MÁQUINA DE SOLDAGEM POR ONDA

A soldagem por onda é o processo mais utilizado na junção de componentes PTH as placas de circuitos impressos. A máquina utilizada para realizar esse processo é a máquina de soldagem por onda, que tem como função fornecer de forma uniforme uma atmosfera aquecida de modo a permitir o refluxo (fusão) do fluxo de solda, permitindo a fixação dos componentes à PCI.

Cria-se uma atmosfera aquecida por meio do método de aquecimento por infravermelho, sistema que garante uniformidade do calor por meio da superfície da PCI, ainda o mais utilizado. O processo inicia-se com a colocação do fluxo de solda, Lau (2003) afirma que: os fluxos são basicamente catalisadores das reações químicas envolvidas nos processos de soldagem.

Segundo Körbes (2011), as duas principais tarefas dos fluxos são limpar as superfícies a serem soldadas e mantê-las limpas, e atuar na tensão superficial dos metais a serem soldados de forma a garantir espalhamento uniforme da liga de solda.

Após aplicação do fluxo de solda, Lima (2011) explica que o forno terá sua temperatura elevada gradualmente até a soldagem dos componentes e o posterior resfriamento controlado da placa. Primeiramente a placa de circuito impresso irá entrar na zona de pré-aquecimento, onde a temperatura da PCB e dos componentes sobe uniformemente.

Numa segunda etapa, conhecida como *zona de cura*, a temperatura atinge um nível que o fluxo é ativado (temperatura em que a reatividade do fluxo é a mais eficiente), removendo óxidos das superfícies e dos furos de encaixe dos componentes PTH na PCB. A placa então passa para uma região onde os furos metálicos são fundidos ficando um pouco acima da temperatura de fusão da liga por alguns segundos. Depois, a placa entra na zona de arrefecimento para resfriamento, onde as temperaturas diminuem uniformemente.

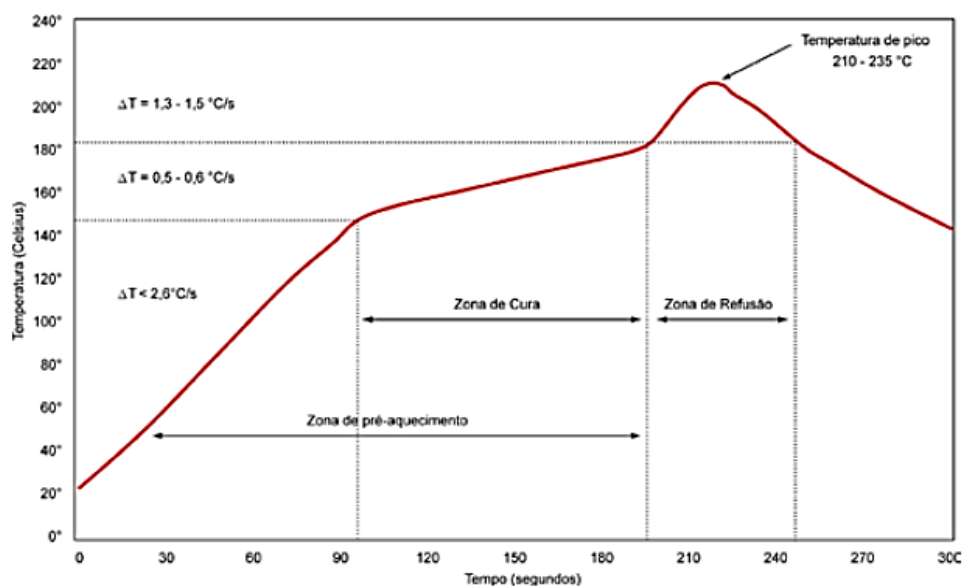


Figura 2: Exemplo da Curva de aquecimento da máquina de soldagem por onda

3.4 TECNOLOGIA THT (THROUGH-HOLE TECHNOLOGY)

Placas de circuito impresso consistem em placas de suporte não condutor (geralmente plásticos como fenolite ou epóxi, com espessura entre 1,5 a 2,0 mm, contendo trilhas de material condutor (geralmente cobre na sua superfície)). Cada placa tem definida pelo projeto as suas posições onde os componentes eletrônicos, tais como resistores, capacitores, diodos, transistores ou circuitos integrados, deverão ser montados para que ela execute a sua função no sistema a que será destinada (RABAK e SICHMAN, 2001). Doro (2004) afirma que a placa se comporta como um isolante e suas trilhas têm a função de conectar eletricamente os diversos componentes, para executarem suas funções no circuito.

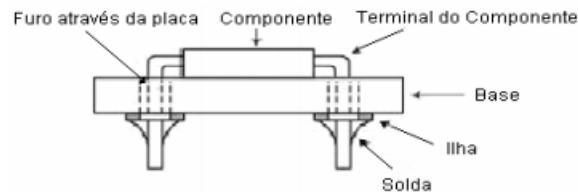


Figura 3: Montagem de Componente utilizando a tecnologia TH.

Os componentes PTH (*Plated Through Hole*) que tem seus terminais banhados através do furo são inseridos e soldados dentro do furo. Este tipo de montagem proporciona uma ligação mecânica mais forte comparada a outras montagens de componentes eletrônicos, por este motivo, é utilizado na soldagem de componentes de maior massa, como conectores e capacitores maiores. Os processos de soldagem utilizados são por onda ou manualmente.

Este tipo de montagem consiste basicamente de duas atividades fundamentais: inserção dos componentes e soldagem dos componentes. No processo de inserção, os componentes podem ser inseridos automaticamente ou manualmente nos furos da placa. A inserção automática é executada por máquinas, que são alimentadas por fitas contendo componentes TH.

Os componentes são apanhados da alimentação, moldados e inseridos automaticamente nos furos da placa. Para a máquina poder se referenciar é necessário que a placa possua “furos guias”, estes furos são posicionados normalmente próximo aos cantos da placa. Entretanto, estas máquinas são capazes de inserir automaticamente somente os componentes TH dos tipos axiais, radiais e 23 CIs, sendo que os demais tipos de componentes devem ser inseridos manualmente. (BRINDLEY, 1990).

3.5 PROBLEMAS DETECTADOS

O processo de montagem de PCI's com componentes apresenta alguns tipos de problemas após sua finalização. Pode-se listar como os mais frequentes no processo de produção estudado:

1. Excesso de solda nos lados inferiores dos terminais;

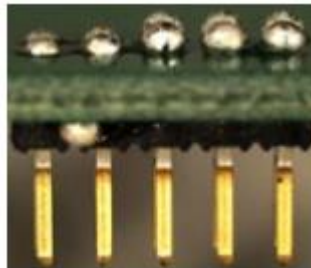


Figura 4: Excesso de Solda no lado inferior na maioria dos terminais.

2. *Solder Beading*: excesso solda abaixo do encapsulamento;

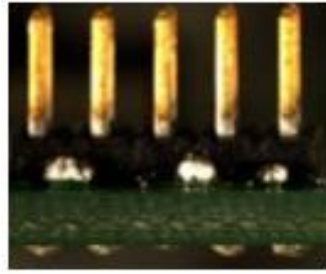


Figura 5: Formação de grandes *beadings*.

3. Solda sem formação de filetes;



Figura 6: Falhas visuais no preenchimento pelo lado inferior.

4. Excesso de solda em ambos os lados;

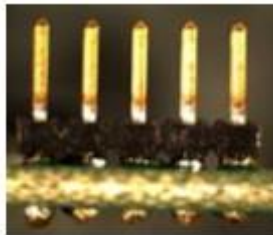


Figura 7: Excesso de solda nos lados inferior e superior.

5. Excesso de fluxo de solda;

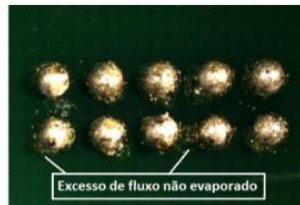


Figura 8: Excesso de fluxo não evaporado.

3.6 PARÂMETROS DO FORNO DE SOLDAGEM POR ONDA

Apresentam-se os métodos e os experimentos utilizados no presente estudo, mostrando como foram definidos os parâmetros, até a utilização da SMC. A primeira etapa do estudo foi compreender o funcionamento do processo de soldagem de componentes PTH, para rastrear as possíveis causas que levam aos problemas de soldagem nas placas eletrônicas. Como auxílio, fez-se uso do diagrama de Ishikawa (ou diagrama de causa-efeito), uma ferramenta de grande utilização na Engenharia de Produção.

Esta ferramenta consiste em uma forma gráfica usada como metodologia de análise para representar fatores de influência (causas) sobre um determinado problema (efeito). Também é denominada de Diagrama de Ishikawa, devido ao seu criador, ou Diagrama Espinha de Peixe, devido à sua forma (MIGUEL, 2006). Realizou-se um *brainstorming* juntamente com o operador de máquina e com o técnico de controle de qualidade, para obter uma prévia com o intuito de facilitar a análise dos problemas envolvidos no processo.

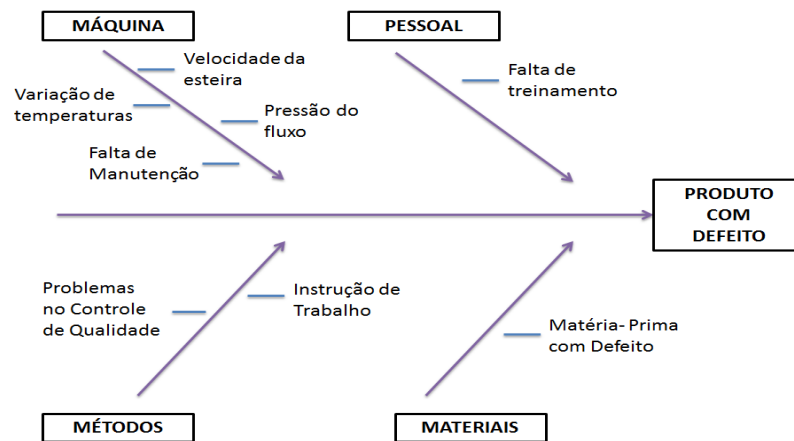


Figura 9: Diagrama de Ishikawa.

Com a elaboração do diagrama, percebeu-se que a máquina de soldagem por onda é o maior influenciador de problemas no processo. A partir disso, os estudos serão voltados à adequação dos parâmetros da máquina para melhor desempenho do processo.

Observou-se a presença de alguns parâmetros controláveis no processo: fluxagem, temperatura de pré-aquecimento, velocidade da esteira, temperaturas das zonas de aquecimento (zonas de cura e refusão). Analisando o processo de soldagem como problema, percebe-se que os parâmetros envolvidos são os fatores de regulação de máquina de solda por onda, para a definição dos parâmetros foram realizados testes em uma amostra de 144 placas eletrônicas.

O primeiro parâmetro encontrado foi a etapa de fluxagem, onde ocorre a limpeza e a desoxidação da PCI, afim de proporcionar uma fixação elétrica e mecânica adequada, obtendo uma melhor força na solda, redução da tensão superficial no contato da sonda. Por ser um processo, que utiliza da tecnologia THT, é necessário que a solda ultrapasse o furo, e preencha o espaço entre o terminal do componente PTH e o furo metalizado da placa eletrônica.

A empresa em estudo utiliza o fluxo com designação NC (*No Clean*), não necessitando de um processo de limpeza após a soldagem, sendo que os resíduos sólidos presentes na PCI são aceitáveis, não causando prejuízo à confiabilidade ao produto, segundo o fabricante do fluxo.

Nos testes, foram executadas medições da pressão do fluxo de solda, na amostra de placas utilizadas para execução desse estudo na máquina de soldagem por onda, a densidade e o índice de acidez foram mantidos sempre nos valores de limites especificados pelo fabricante nas características do fluxo. Os testes na amostragem apresentaram uma grande influência da pressão do fluxo, podendo interferir na qualidade final na solda.

Na etapa de fluxagem, o ambiente de trabalho aquecido no interior da máquina acarreta à alta evaporação do fluxo (constituído em sua maior parcialidade por solvente), aumentado a densidade e o índice acidez do fluxo podendo acarretar em resíduos iônicos na superfície da placa, ou defeitos na solda entre o componente e a placa, por isso a grande importância da utilização do fluxo adequado às especificações do fornecedor, fazendo com que o parâmetro controlável nessa etapa seja a pressão do fluxo.

O próximo parâmetro influenciador no processo é a temperatura de pré-aquecimento, suas funções são: proporcionar uma variação térmica mínima na passagem da placa na máquina, efetuar a evaporação dos solventes contidos no fluxo de solda e ativar o fluxo.

O sistema de pré-aquecimento utilizado é por infravermelho, responsável por garantir a uniformidade do calor na superfície da placa, a temperatura do ar na máquina é verificada por termopares, situados em uma localização específica no interior na máquina de solda por onda, essa por sua vez possui duas zonas de pré-aquecimento.

Nos testes de amostragem, foi induzida uma temperatura entre 30 a 100°, em um intervalo de tempo em 10 a 40 segundos, tempo utilização para se obter a ativação do fluxo de solda.

O terceiro parâmetro controlável é a velocidade da esteira. O transportador da placa na máquina consiste em um conjunto de duas esteiras verticais, e um suporte para a fixação da placa na esteira.

A velocidade da esteira define quanto tempo a placa ficará em cada etapa da máquina, esse parâmetro é considerado o mais importante, pois o mesmo influencia em todos os outros parâmetros do processo. Com os testes realização nas amostras, a velocidade da esteira, foi definida entre 1,0 e 2,0 metros/minutos para aplicação do método de melhoria Monte Carlo.

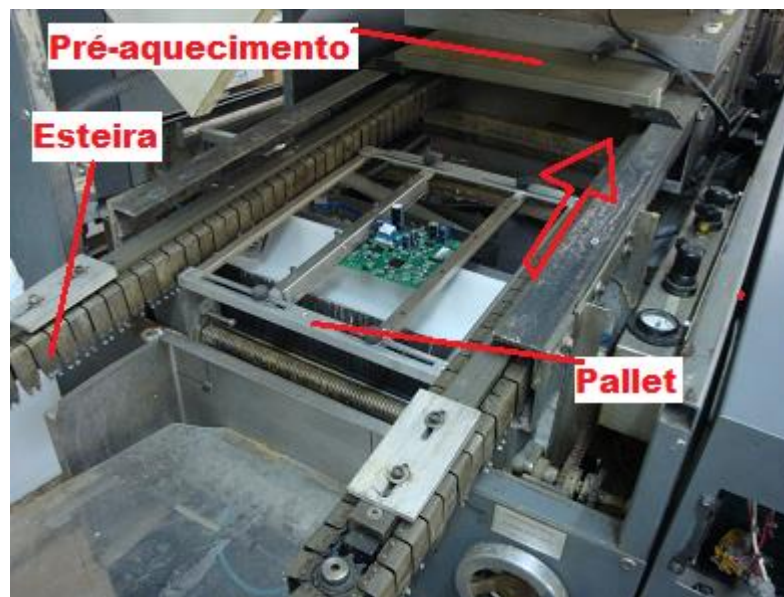


Figura 10: Etapa Inicial de Soldagem por Onda.

O próximo parâmetro controlável são as temperaturas utilizadas nas zonas de aquecimento do tanque de solda, essa etapa consiste na soldagem dos componentes PTH na placa, a máquina possui 2 zonas de aquecimento: zona de cura com temperaturas de 100 a 180°C e zona de refusão de 180 a 230°C. Para o estudo das temperaturas das zonas foram traçadas com um perfil térmico, sendo utilizado nos testes uma variação no aquecimento entre 2 e 3°C/s, em cada zona.

Por fim, o último parâmetro encontrado foi o tipo de solda utilizado no processo, que se trata de um parâmetro não controlável, pois a empresa utiliza de um único tipo de solda no processo, a solda *Lead Free*. A solda *Lead Free*, consiste em uma solda “Livre de Chumbo”, mais viável ao processo por ser menos nociva ao meio ambiente, considerando os efeitos ambientais causados pelo chumbo. Sendo assim, em todos os testes de amostragem foram utilizados a solda *Lead Free*.

Dessa forma os problemas em questão permitem utilizar a SMC para melhoria na utilização dos parâmetros encontrados. A seguir são mostrados os parâmetros e variáveis de decisão utilizadas na aplicação do SMC.

Variáveis Independentes Analisadas

- | | |
|-------|---------------------------------------|
| x_1 | Velocidade da Esteira (m/min) |
| x_2 | Temperatura de Pré – Aquecimento (°C) |
| x_3 | Zona de Cura (°C) |
| x_4 | Zona de Refusão (°C) |

Variáveis Dependentes Analisadas

y_1	Quantidade Aprovada
y_2	Quantidade Reprovada

Por meio dos estudos do processo, para aplicar o método, inicialmente, definiram-se os parâmetros de regulação atual do forno. A empresa utiliza um ajuste padrão para o forno no processo, onde $x_1=1,6\text{m/min}$; $x_2=30^\circ$; $x_3=140^\circ$; $x_4=160^\circ$, porém há um grande índice de defeitos. Realizou-se um experimento com o ajuste padrão do forno, os resultados obtidos estão na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros do forno atual.

Parâmetros do Forno Atual						
	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2
	1,6	30	140	160	0	6

Após a análise dos parâmetros do forno atual, foram realizados testes de amostragem, no período de 4 dias, onde em cada teste alterou-se um parâmetro controlável diferente com uma amostra de 6 placas em cada teste, priorizando a alteração de um parâmetro em cada dia. Ao final dos testes, obteve-se os resultados que estão na Tabela 2.

Tabela 2: Testes dos Parâmetros.

Testes	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2
1	1,0	30°	140°	160°	1	5
2	1,2	30°	140°	160°	2	4
3	1,4	30°	140°	160°	1	5
4	1,6	30°	140°	160°	0	6
5	1,8	30°	140°	160°	0	6
6	2,0	30°	140°	160°	0	6
7	1,6	30°	140°	160°	0	6
8	1,6	45°	140°	160°	0	6
9	1,6	60°	140°	160°	1	5
10	1,6	75°	140°	160°	1	5
11	1,6	90°	140°	160°	2	4
12	1,6	100	140°	160°	2	4
13	1,6	30°	100°	160°	0	6
14	1,6	30°	115°	160°	0	6
15	1,6	30°	130°	160°	0	6
16	1,6	30°	145°	160°	2	4
17	1,6	30°	160°	160°	2	4
18	1,6	30°	180°	160°	3	3
19	1,6	30°	140°	180°	1	5
20	1,6	30°	140°	190°	2	4

21	1,6	30°	140°	200°	2	4
22	1,6	30°	140°	210°	3	3
23	1,6	30°	140°	220°	2	4
24	1,6	30°	140°	230°	2	4

3.7 APLICAÇÃO DA OVSMC

Para a realização da OvSMC utilizou-se como ferramenta de otimização e simulação o otimizador *OPTQUEST* do *software Crystal Ball*. Dessa forma, todo o processo foi construído de acordo com a funcionalidade da ferramenta.

O modelo foi aplicado no conjunto de dados do processo de produtivo de placas eletrônicas, dado na Tabela 5, gerando o modelo representado por uma função empírica determinística, dada por (5), e a função empírica estocástica dada por (6):

$$\hat{y} = -75,47557 - 0,20968x_3 - 0,029298x_4 + 22,9909 \times \ln(x_3) + 0,56208 \times x_1^2 + -0,0001513x_2^2 \quad (5)$$

$$\hat{y} = \tilde{\beta}_0 + \tilde{\beta}_1 \cdot x_3 + \tilde{\beta}_2 \cdot x_4 + \tilde{\beta}_3 \cdot \ln(x_3) + \tilde{\beta}_4 \cdot x_1^2 + \tilde{\beta}_5 \cdot x_2^2 \quad (6)$$

Os resultados obtidos por meio da função empírica estão na Tabela 3. Observa-se que a explicação do modelo é de 70,4% (R-quadrado ajustado) e, portanto apresenta uma boa aderência.

Tabela 3: Estatística de Regressão

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,872221672
R-Quadrado	0,760770645
R-quadrado ajustado	70,4%
Erro padrão	0,564286011
Observações	24

A Tabela 4 apresenta os resultados gerais do modelo de regressão. Observe-se que todos os coeficientes analisados são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 5% (valor-P <0,05).

Tabela 4: Resultados gerais do modelo de regressão.

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	-75,47557236	39,37995	-1,9166	4,13%	-158,21	7,258625
Variável x_1	-0,209681885	0,074863	-2,80087	1,18%	-0,36696	-0,0524
Variável x_2	-0,029298414	0,005772	-5,07606	0,01%	-0,04142	-0,01717
Variável x_3	22,99098643	10,12907	2,269801	3,57%	1,71059	44,27138
Variável x_4	0,562085203	0,221853	2,533595	2,08%	0,09599	1,028181
Variável x_5	-0,000151305	5,05E-05	-2,99911	0,77%	-0,00026	-4,5E-05

Para modelar a variação dos coeficientes (linear e angulares) do modelo de regressão, utilizou-se uma função de densidade de probabilidade triangular (SILVA *et al.*, 2014), tomando como base os intervalos de confiança destes coeficientes (95% inferiores e 95% superiores), conforme ilustrado na Figura 11.

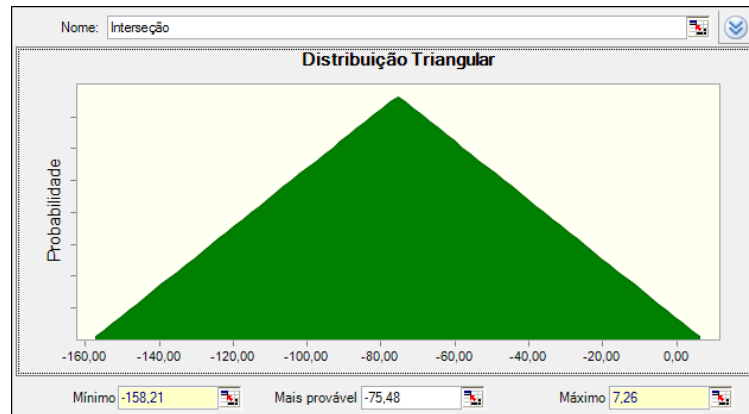


Figura 11: Comportamento do coeficiente associado a β_0

Realizou-se 48 experimentos com 200 corridas de cada um deles, O tempo computacional foi de aproximadamente 3 minutos e 40 segundos. A Tabela 5 apresenta os resultados da otimização considerando a função empírica estocástica. Os resultados obtidos na OvSMC demonstram que, com estes ajustes, a probabilidade de se obter peças defeituosas é de 50,9% (Figura 12). Tal cenário mostra que o processo produtivo não é capaz, ou seja, não está sob controle.

Tabela 5: Ajuste Ideal para a simulação estocástica

Parâmetros para o forno	Ajuste Proposto
x_1	2,0
x_2	100
x_3	180
x_4	230

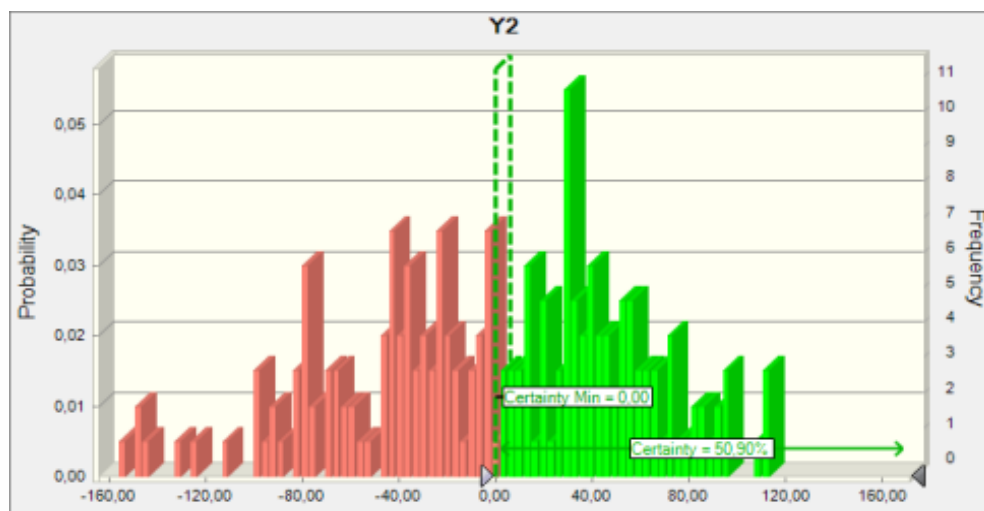


Figura 12: Resultados da Otimização.

A Figura 13, a seguir, mostra a análise de sensibilidade para o modelo investigado e, percebe-se que a variável x_3 possui a maior contribuição para o aumento de defeitos, com participação de 89,2%, sendo seguida pela variável x_1 .

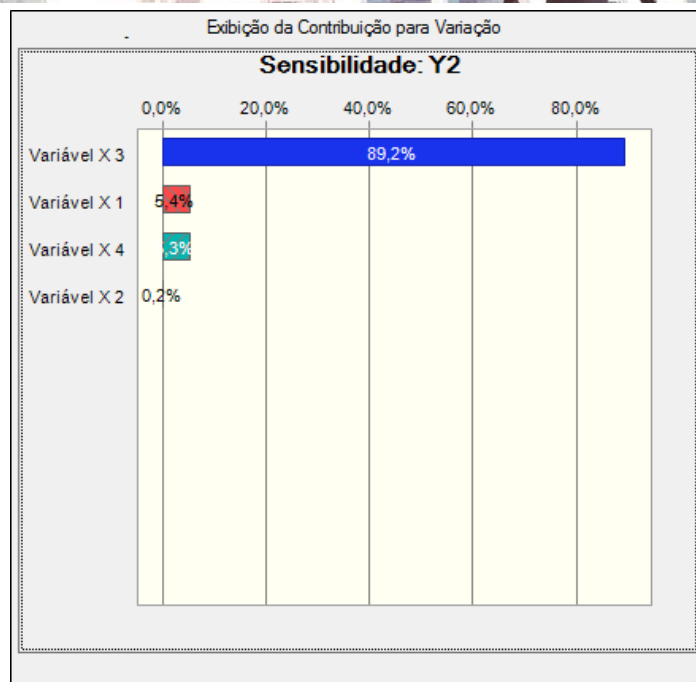


Figura 13: Análise de Sensibilidade

Aplicou-se a otimização considerando a função empírica determinística (Equação 5), e os resultados dessa otimização estão na Tabela 6. Por se tratar de modelos determinísticos não lineares e também pelo fato de se empregar algoritmos combinatórios (metaheurística), não se pode afirmar que essa solução é a ótima.

Tabela 6: Ajuste Ideal para a simulação determinística

Parâmetros para o forno	Ajuste Proposto
x_1	1,6
x_2	75
x_3	180
x_4	230
y_2	0,0221

3.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com os resultados do modelo determinístico, realizou-se testes de comprovação em 150 placas. O processo de comprovação foi feito em um período de três dias (50 placas produzidas/por dia). Os defeitos encontrados nos testes de comprovação foram: solda sem formação de filetes, excesso de fluxo de solda. Observou-se a solução obtida pela otimização determinística resultou em poucas peças defeituosas (y_2), conforme disposto na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados da otimização do modelo determinístico

Testes	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2
1° dia	1,6	75°	180°	230°	48	2
2° dia	1,6	75°	180°	230°	47	3
3° dia	1,6	75°	180°	230°	48	2

Por motivo de ajustes e disponibilidade, o resultado obtido pela OvSMC estocástica não foi testado, pois a empresa não dispõe de dados referentes às variáveis de ajuste do forno,

torando os resultados não viáveis para o processo. A OvSMC estocástica pode ser aplicada em futuras pesquisas, assim que os levantamentos de dados forem coletados em futuras amostragens.

4. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados pela OvSMC (modelo determinístico) demonstram que a utilização da Simulação Monte Carlo é viável para otimização de processos produtivos. Por meio da elaboração de um modelo que contemple os parâmetros de ajuste da máquina de soldagem por onda, juntamente com o banco de dados históricos de tais parâmetros, analisou-se estatisticamente o melhor ajuste dos parâmetros do processo, para a diminuição de erros e efeitos indesejáveis.

A ideia é que o modelo de ajuste encontrado auxilie os gestores e colaboradores na configuração da máquina. Isso é possível, uma vez que se conhece a quantidade de defeito simulado para cada ajuste. A partir disso, é possível tomar medidas, para a aplicação prática do modelo de ajuste proposto, com o objetivo de minimizar os defeitos.

A escolha da ferramenta que suportará as análises estatísticas é muito importante, pois suas funcionalidades permitem obter mais ou menos interpretações dos resultados. No caso do modelo tratado nesse trabalho, utilizou-se a ferramenta *Crystal Ball*.

Quanto aos resultados obtidos por meio da simulação estocástica pode-se afirmar que o modelo simulado não é viável, por apresentar uma probabilidade de defeito superior a 58% na produção. Contudo, chama-se a atenção, que mesmo minimizando a função estocástica, ver (6), como domínio das variáveis de decisão customizados, conforme Tabela 5, a probabilidade de se ter peças com defeitos com base nos ajustes da Tabela 8 é maior que 50%. Em outras palavras, o processo analisado apresenta uma baixa capacidade do processo.

Sendo assim aplicou-se a simulação determinística para obter resultados mais satisfatórios, e com isso o estudo resultou em um modelo que proporcionou confiabilidade e qualidade no processo de fabricação de placas eletrônicas da empresa em estudo.

5. REFERÊNCIAS

ABDELAZIZ, F. B.; AOUNI, B. & EL FAYEDH, R. Multi-objective stochastic programming for portfolio selection. *European Journal of Operational Research*, v. 177, 1811-1823, 2007.

AOUNI, B., BEN ABDELAZIZ, F. & MARTEL, J. M. Decision-makers preferences modeling in the stochastic goal programming. *European Journal of Operational Research*, v. 162, 610-618, 2005.

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. Brasília, 2015. Disponível em <<http://www.abinee.org.br>> acessado dia 20 de Dezembro de 2015.

ANDRADE, E.L. Introdução à Pesquisa Operacional – Métodos e Modelos para Análise de Decisão. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1989.

ASSIS, A. FRANCIS, F. RABECHINI JR, R. Gestão de Riscos: Fundamentos e Práticas – Análise Qualitativa e Quantitativa de Riscos. 100 p. Goiânia, 2013.

BAMPI, S. Perspectivas do investimento em eletrônica. Relatório integrante da pesquisa “Perspectivas do Investimento no Brasil”, em parceria com o Instituto de Economia da UNICAMP, financiada pelo BNDES. UFRJ. Rio de Janeiro, 2009.

BASSANEZI, R. C. Ensino aprendizagem com modelagem matemática. São Paulo: Contexto, 2002.

BERTRAND, J. W. M, FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*, v. 22, 241 – 264, 2002.

BRINDLEY, K. N. Electronics Assembly Handbook – Techniques, Standards and Quality Assurance. 2 ed. Oxford: Heinemann Professional Publishing Ltd, 1990.

CASTRO, M. D. Aplicação de técnicas de análise quantitativa de risco para subsidiar processos decisórios em projetos do segmento da construção civil no estado de Goiás. In: Revista Especializa - IPOG. Goiás, 2014. Páginas??

CORRAR, L. J. Projeção de Custos e o Método Simulação de Monte Carlo: o Caso da Fundação Salute. V Congresso Brasileiro de Gestão Estratégica de Custos. Fortaleza, 1998.

DEB, K. Multi-Objective optimization using evolutionary algorithms. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

DORO, M. M. Sistemática para Implementação da Garantia da Qualidade em Empresas Montadoras de Placas de Circuito Impresso. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

GAGLIARDI, J. P. RENAUD, J. RUIZ, A. A simulation modeling framework for multiple- aisle automated storage and retrieval systems. Journal of Intelligent Manufacturing, 2014.

GALVÃO, O.J.A. Globalização e mudanças na configuração espacial: da economia mundial: uma visão panorâmica das últimas décadas. Revista Economia Contemporânea. v.11 Ed.1. Rio de Janeiro, 2007.

HAI DUCK, M.P. Estudo Analítico e Numérico de Modelos Epidemiológicos do Tipo S.I., S.P.R. e S.I.S. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai da Missões. Erechim, 2008.

MIGUEL, P.A.C. Qualidade: Enfoques e Ferramentas. 1ª ed. Editora Artliber. São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, P.H.D. BARROS, N.R. dos REIS, S.G. Aplicabilidade do Método de Simulação Monte Carlo na Previsão dos Custos de Produção de Companhias Industriais: O Caso da Companhia Vale do Rio Doce. Revista de Contabilidade e Organizações – USP. São Paulo, 2010.

RABAK, C. S. SICHMAN, J. S. Otimização do processo de inserção automática de componentes eletrônicos empregando a técnica de times assíncronos. Pesquisa Operacional, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

SHAHINIDIS, N. V. Optimization under uncertainty: state of the art and opportunities. Computers and Chemical Engineering, v. 28, 971–983, 2004.

SAKURADA, N. MIYAKE, D.I. Aplicação de Simuladores de Eventos Discretos no Processo de Modelagem de Sistemas de Operações de Serviços. Gestão de Produção. São Carlos, 2009.

SILVA, D.M. Aplicação das Ferramentas da Qualidade de uma Indústria Eletrônica: Estudo de Caso para a Redução de Defeitos na Montagem de Placas de Circuito Impresso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

SILVA, A.F., SILVA, M.F.F., MARINS, F.A.S. Otimização Estocástica com Múltiplos Objetivos e Simulação Monte Carlo no Desenvolvimento de Estratégias de Vendas. PODes – Revista Eletrônica Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento. V.6 n.1. Rio de Janeiro, 2014.

GARCIA, S. LUSTOSA, P. R. B. BARROS N. R. Aplicabilidade do Método de Simulação de Monte Carlo na Previsão dos Custos de Produção de Companhias Industriais: o Caso da Companhia Vale do Rio Doce. Revista de Contabilidade e Organizações – FEA-RP/USP. São Paulo, 2010.

WEILER, J.A. Projeto de Viabilidade de Compras de Equipamentos para Linha de Montagem SMT. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Panambi, 2015.

ZATARIN, V.A. Automação de Centrífuga para Desmontagem de Placas de Circuito Impresso para Reciclagem. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, 2013.

HUDSON, A., TILLEY, D. R. – Assessment of Uncertainty in Energy Evaluations Using Monte Carlo Simulations. Ecological Modelling, v. 271, 52-61, 2014.