



APLICAÇÃO DO MÉTODO SIMPLEX PARA MAXIMIZAR O USO DA MATÉRIA-PRIMA NA FABRICAÇÃO DE SEMICONDUTORES E REDUZIR O TEMPO DE CÁLCULO NA PREPARAÇÃO DOS LOTES PARA PRODUÇÃO

Lucian Araujo da Silva (FACULDADE MARTHA FALCÃO) lucian.infor@gmail.com
Iracyanne Retto Uhlmann (FACULDADE MARTHA FALCÃO) iracyanne.uhlmann@professores.fmf.edu.br

Resumo

A indústria de eletrônicos e automotiva vem sofrendo com a escassez de semicondutores, essa crise tem sido agravada pela *Covid-19* que afetou todo o mundo a partir do ano de 2020, forçando um consumo maior de eletrônicos. Os fabricantes de *microchips*, não conseguem atender a pedidos de clientes, gerando transtorno em diversas fábricas, não atendendo as demandas do mercado consumidor. Diante disso, é oportuno usar conceitos da pesquisa operacional nos processos produtivos para reduzir desperdícios de matéria-prima. O objetivo dessa pesquisa é aplicar o método simplex para maximizar o uso de substrate/padles na fabricação de semicondutores, também reduzindo o tempo de cálculo no processo de preparação dos lotes para a produção. A aplicação prática da pesquisa foi desenvolvida usando a ferramenta 8D para direcionamento metodológico. Os benefícios foram positivos: redução de 92.11% no desperdício da matéria-prima e de 90,24% no tempo médio gasto no cálculo para a preparação dos lotes. A aplicação do simplex mostrou-se eficiente, demonstrando que com objetivos adequados definidos, é possível auxiliar nas operações práticas de uma fábrica, gerando melhorias para o processo.

Palavras-Chaves: (Semicondutores. Pesquisa Operacional. Simplex)

1. Introdução

A indústria de eletrônicos e automotiva, vem sofrendo com a escassez de semicondutores, isso vem acontecendo devido a alta demanda potencializada pela *Covid-19*, que afetou todo o mundo a partir do ano de 2020, forçando um consumo maior de eletrônicos, por isso os fabricantes de *microchips*, não conseguem atender a pedidos de clientes (LOURES e CARVALHO, 2021).

De acordo com Yinug (2021), o tempo médio de fabricação de *chips*, desde a produção da matéria-prima até a finalização do produto acabado é de 26 semanas. O desperdício também é um fator que afeta o volume de produção desses *chips*, ocorrendo durante o processo de

formação de lotes para a manufatura. Então, como a indústria de semicondutores pode reduzir o desperdício de matéria-prima durante a preparação dos lotes para a produção?

Desde há muito tempo e com cada vez mais influência, a tomada de decisões rápida e objetiva é um grande diferencial competitivo, sendo a Pesquisa Operacional (PO) uma das técnicas mais usadas. Chaves e Bernardo (2018) afirmam que a PO tem a capacidade de resolver problemas do mundo real, mas muitas vezes geram incertezas nos seus resultados e previsões, porém, ainda assim gera a possibilidade de uma alternativa eficaz. De acordo com Moraes, Ferreira e Silva (2019), as técnicas de PO combinadas com *softwares* mais avançados têm grande importância para as organizações e preparações da produção.

Botacim *et al.* (2019) conceitua PO como um método matemático analítico de tratamento de dados que auxiliam na tomada de decisão, extraíndo desses dados a melhor solução possível. Dentre as várias opções da PO para resolução de problemas, destaca-se a programação linear (PL). De acordo com Sá, Arpini e Santos (2019) a finalidade da PL é definir a melhor forma de utilizar recursos limitados, escolhendo qual a melhor combinação possível para uma variedade de produtos a serem produzidos, sendo isso potencializado com o método simplex. Segundo Silva, A. (2016), o método simplex é um algoritmo utilizado para se determinar, numericamente, a solução de um modelo em PL, sendo normalmente usado para maximizar ou minimizar um resultado.

Neste estudo, foi realizada uma análise quantitativa onde, a partir das restrições impostas pela própria matéria-prima, buscou-se determinar a melhor combinação da quantidade ideal de material para atender a ordem de produção emitida. Como resultado, foi possível realizar cálculos mais precisos que auxiliam no atendimento da ordem de produção com mínima sobra de matéria-prima durante a preparação dos lotes, demonstrando assim a eficácia da PO para maximizar o uso de material.

2 Referencial teórico

2.1 Pesquisa operacional

A PO tem como base métodos que realizam cálculos matemáticos e análise de situações que dependem de decisões para que sejam conduzidas da melhor forma possível e, com o avanço da computação, se tornou uma forte ferramenta para tomadores de decisões dentro da indústria e em vários outros seguimentos (CHAVES e BERNARDO, 2018).

De acordo com Longaray (2013) um estudo de PO consiste na construção de um modelo para um sistema real que sirva como instrumento de análise e compreensão do comportamento

deste sistema, com o objetivo de levar o sistema a apresentar o desempenho desejado. Assim, a PO busca encontrar a melhor solução, conhecida como solução ótima para o problema analisado.

2.2 Programação linear

Segundo Leigus, Fenerich e Moraes (2009) as técnicas da PO são aplicadas de acordo com a necessidade de cada caso, sendo as mais conhecidas: programação linear, simulação computacional e teoria dos jogos.

Segundo Rodrigues *et al.* (2014), PL é a técnica mais conhecida na PO, por ser simples e conseguir representar problemas do mundo real em equações lineares, sendo esse processo chamado de modelagem do problema.

A PL tem como objetivo minimizar custos ou maximizar lucros, sendo também utilizada para definir a sequência de produção de linhas flexíveis, definindo a melhor combinação de produtos a serem produzidos, e a quantidade da matéria-prima que será consumida (MORAES, FERREIRA e SILVA, 2019).

As variáveis de decisão, função objetivo e restrições são os três termos usados na PL para estruturar as equações que representam o caso estudado. A solução ótima de um problema de PL tem como resultado um conjunto de possíveis decisões (RODRIGUES *et al.*, 2014). A Figura 01 ilustra o modelo de equação linear, com função objetivo, restrições, variáveis e condição de não negatividade.

Figura 01 - Modelo de Equação de Programação Linear

$$\begin{array}{l} \text{Maximizar: } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ \text{Sujeito a: } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i (i = 1, 2, \dots, m) \\ x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \end{array}$$

Fonte: Maneguzzo (2015).

Onde:

Z é a função-objetivo

x variável de decisão

b restrição do sistema

n é o número de variáveis

m é o número de restrições do sistema

i é o índice de uma determinada restrição ($i=1, 2 \dots m$)

j é o índice de uma determinada variável ($j = 1, 2 \dots n$)

c é o coeficiente (constante) da variável x , na função-objetivo.

a é o coeficiente (constante) da variável x , da j -ésima restrição.

2.3 Substrate/Padle

O semicondutor (*chip* de silício) é um dispositivo altamente integrado que não pode ser conectado diretamente à placa principal da maneira que os condensadores ou resistores podem. Portanto, um *substrate/padle* ou camada intermediária é necessário para transmitir os sinais do semicondutor para a placa principal (CHEN e LO 2012, tradução nossa). Em outras palavras, o *substrate/padle* é o material de suporte que atua como uma ponte entre o semicondutor e a placa-mãe (placa principal).

3 Método de Pesquisa

O presente artigo foi desenvolvido em uma fábrica de semicondutores localizada na Zona Franca de Manaus, que conta com um volume médio de produção de 349 mil unidades por mês de *ball grid array* (BGA) e *Embedded Multimedia Card* (eMMC). Todo volume fabricado é direcionado a clientes do setor de eletrônicos de Manaus, São Paulo e Bahia.

Esta pesquisa teve início a partir de uma reclamação feita por um dos operadores de máquina do processo, que relatou demora excessiva e cansativa na atividade de formação dos lotes para a produção. Então, optou-se pelo uso da ferramenta 8D, já usada pela fábrica, como metodologia para direcionamento e estruturação desse estudo. Adicionalmente, algumas etapas da 8D foram suportadas por outras ferramentas da qualidade, como 5 Porquês (5 *Why*), 5W2H e Diagrama de *Ishikawa*.

3.1 8D

O objetivo do relatório 8D (8 Disciplinas) é identificar, corrigir e eliminar problemas recorrentes. O 8D estabelece ações corretivas permanentes baseadas na análise do problema e origem do problema. As 8 disciplinas (Quadro 01) são 8 pontos que delimitam os passos que você toma se um problema ou defeito for observado em um processo ou produto (MUNCUT *et al.*, 2019, tradução nossa).

O uso original do 8D foi tão eficaz que a Ford adotou como o primeiro método de documentar os esforços de resolução de problemas, usado até hoje. Por ser eficaz e relativamente simples de ensinar, 8D tornou-se muito popular entre os fabricantes de todo o mundo (RATHI *et al.* 2021, tradução nossa).

Quadro 01 – Descrição das etapas do 8D

D1	Definição da equipe e responsabilidade	Denifir um grupo de pessoas que tenham <i>know-how</i> para resolver o problema e implementar as ações corretivas.
D2	Descrever o prolema	O problema deve ser descrito em termos mensuráveis, de maneira especificada.
D3	Definir as ações de contenção	Definir e implementar ações de contenção, que tem como objetivo proteger o cliente do problema.
D4	Definir e verificar as causas	Identificar as possíveis causas do problema. Após a identificação, deve ser avaliada e testada cada uma das causas potenciais.
D5	Definir as ações corretivas	Admitir que a ações corretivas propostas resolvem o problema, sem trazer consequências indesejadas.
D6	Implementar ações corretivas	Denifir e implementar as ações corretivas permanentes, ou seja, que eliminem o problema.
D7	Prevenir a recorrência	Com a solução do problema, são necessárias algumas alterações, como por exemplo: fluxos, procedimentos, especificações, etc.
D8	Conclusão e reconhecimento da equipe.	Reconhecimento dos esforços da equipe, compartilhando conhecimento e aprendizado.

Fonte: Bianca (2019).

3.2 5 Porquês (5 WHY)

Segundo Anjos (2020), diante de um problema, em qualquer organização, dificilmente se consegue saber a causa raiz de forma rápida, e uma das técnicas existentes para se chegar à causa raiz é o 5 Porquês. A técnica funciona basicamente perguntando 5 vezes o porquê de algo, o princípio é que após questionar por cinco vezes consecutivas o porquê de um determinado problema estar ocorrendo, sempre se baseando na resposta anterior, será descoberta a causa fundamental deste problema.

3.3 5W2H

De acordo com Silva *et al.* (2013) a ferramenta 5W2H foi criada por profissionais da indústria automobilística do Japão como uma ferramenta auxiliar na utilização do *plan-do-check-act* (PDCA). Especialmente na fase de planejamento, o 5W2H é um método eficaz para auxiliar na análise e tomadas de decisões. No Quadro 02 é possível verificar a comparação dos termos em inglês com o significado em português e a finalidade de cada pergunta.

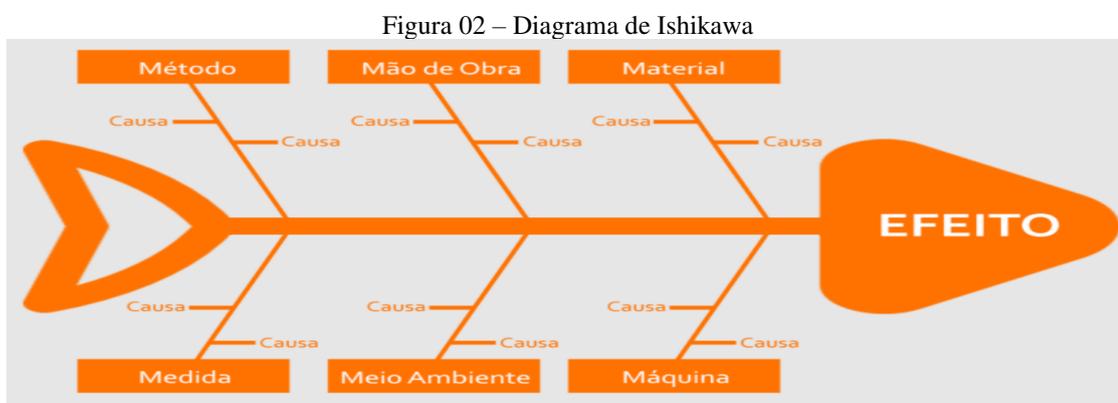
Quadro 02 – Métodos 5W2H

Método do 5W2H			
5W	<i>What?</i>	O quê?	Que ação será executada?
	<i>Who?</i>	Quem?	Quem irá executar/participar da ação?
	<i>Where?</i>	Onde?	Onde será executada a ação?
	<i>When?</i>	Quando?	Quando será executada?
	<i>Why?</i>	Por quê?	Por que a ação será executada?
2H	<i>How?</i>	Como?	Como será executada a ação?
	<i>How much?</i>	Quanto custa?	Quanto custa para executar a ação?

Fonte: Raphael (2019).

3.4 Diagrama de Ishikawa

Segundo Faedo e Silva (2019), o diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de causa e efeito ou diagrama de espinha de peixe (Figura 02), foi desenvolvido pelo engenheiro japonês Kaoru Ishikawa. A sistemática desta ferramenta consiste em, de maneira gráfica, identificar fatores de influências (causas) sobre determinados problemas (efeito) por meio da construção do diagrama, tendo como base os 6Ms (Método, Máquina, Medida, Meio Ambiente, Material e Mão de Obra), para realizar análises com objetivo de identificar a causa raiz de um problema e elaborar um plano de ação sobre ele.



Fonte: Lean Blog (2018).

4 Aplicação prática

4.1 Formação do time(D1)

A formação do time ocorreu naturalmente, por se tratar de pessoas que estão envolvidas com o dia-a-dia do processo. As responsabilidades de cada membro da equipe estão listadas no Quadro 03:

Quadro 03 – Responsabilidades dos membros da equipe

8Ds	PDCA	Equipe / Membros
Desenvolver o trabalho em equipe (D1)	Planejar	Todos
Descrever o problema (D2)		Especialista de Engenharia
Desenvolver ações de contenção provisória (D3)	Fazer	Líder de produção Líder de almoxarifado
Definir e verificar causas básicas (D4)		Todos
Desenvolver ações corretivas permanentes (D5)		Especialista de Engenharia
Implementar e validar ações corretivas (D6)	Verificar	Especialista de Engenharia Operadores de Máquina
Prevenir reocorrências (D7)		Todos
Reconhecer e parabenizar o trabalho em equipe como contribuições individuais (D8)	Agir	Todos

Fonte: Adaptado de Bianca (2019).

4.2 Descrição do problema (D2)

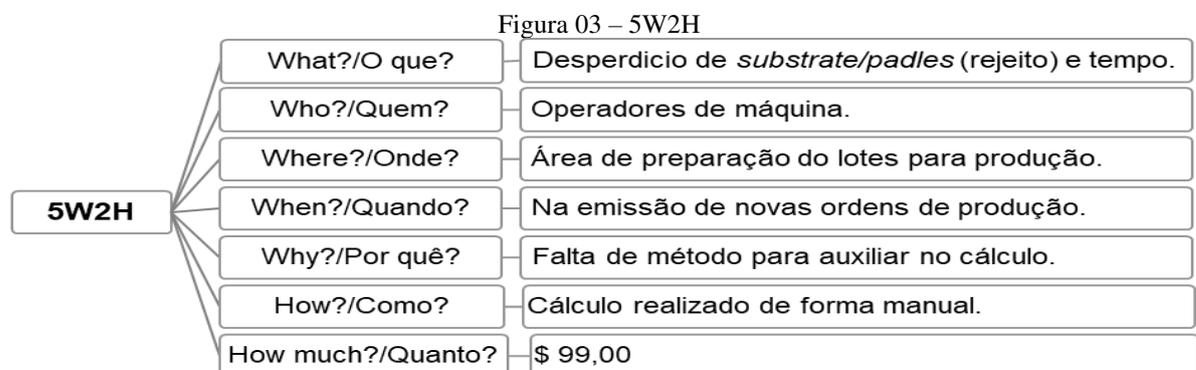
A aplicação da pesquisa foi realizada na etapa de preparação da matéria-prima que é utilizada na formação dos lotes de *substrate/padles* que são usados no processo de fabricação de semicondutores. O problema é o rejeito de matéria-prima e o tempo gasto na preparação dos lotes para a produção, isso ocorre devido a dificuldade de executar o cálculo na preparação dos lotes, que era realizado por operadores que não possuíam habilidades técnicas específicas para a atividade.

Segundo a operadora, dependendo do volume da demanda, eram gastos de 30 a 60 minutos para realizar o cálculo, nem sempre com resultado ótimo, para definir a melhor combinação de quantidade de matéria-prima (*substrate/padles*) para formação dos lotes.

Devido à falta de exatidão, muitas vezes a quantidade definida no cálculo, ultrapassava a quantidade da ordem de produção emitida, gerando assim, excesso de matéria-prima, e uma vez que o lote tivesse sido desmembrado no processo não poderia mais ser aproveitado, gerando refugo. Os dados resultantes da execução do cálculo manual (por tentativa e erro), para uma ordem de produção, realizado pelo time operacional, são apresentados a seguir:

- Tempo gasto para realizar o cálculo manual: 60 minutos
- Quantidade de rejeito: 66 rejeitos
- Taxa de custo total e rejeito sobre a ordem de produção: 0,12%
 - a) Custo de *padle*: \$ 49,50.
 - b) Custo de *compound*: \$ 33,00.
 - c) Custo de *solder ball*: \$ 16,50.

A Figura 03 ilustra a ferramenta 5W2H utilizada para estruturar a definição do problema:



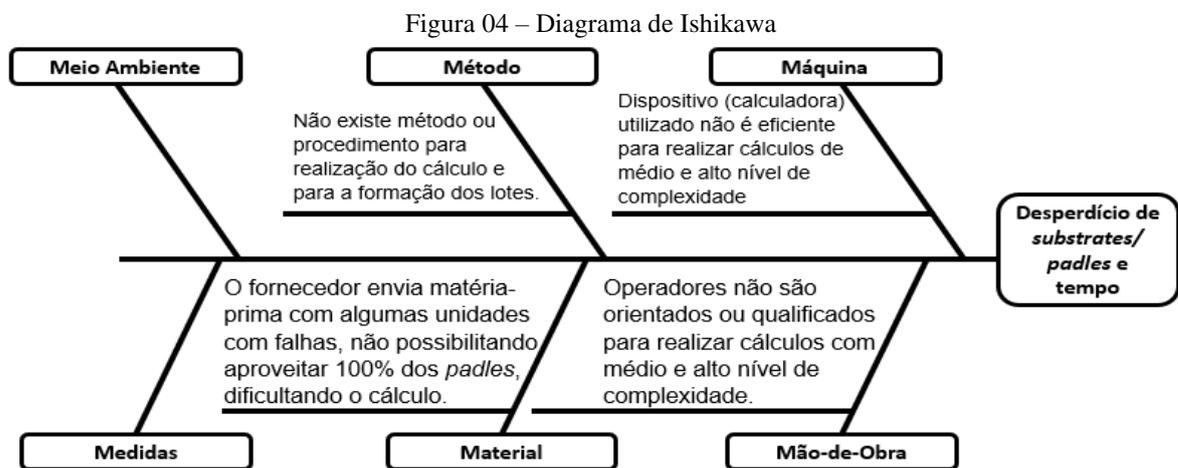
Fonte: Adaptado de Raphael (2019).

4.3 Ação de contenção provisória (D3)

Solicitou-se ao time do estoque/materiais que enviasse os pacotes de *substrate* com a quantidade mais próxima possível definida pela ordem de produção, mesmo que para isso fosse necessário não obedecer ao FIFO (*first-in-first-out*) do material. Dessa forma, por algumas vezes, era possível encontrar pacotes de matéria-prima lacrados que atendiam a ordem de produção de maneira exata.

4.4 Análise da causa raiz (D4)

A Figura 04 ilustra o uso do diagrama de *Ishikawa* para auxiliar na determinação da causa raiz.



Fonte: Autoria própria (2021).

4.4.1 Material

O *substrate* (Figura 05) é uma placa flexível de circuito impresso, que é subdividida em vários blocos menores chamados de *padle*. Cada *padle*, após passar pelo processo de fabricação (montagem, soldagem, encapsulamento, corte e teste), se tornará um componente pronto para ser usado na placa principal de diversos produtos eletrônicos.

Figura 05 – Material *Substrate/PadleI* – Tipo 73 (73 unidades de padles ativos)



Fonte: Autoria própria (2021).

Dependendo de como o *substrate* é produzido no fornecedor, o mesmo tipo pode conter quantidades diferentes de *padles*, uns com a quantidade padrão, que são considerados *substrates* sem falhas (ativo), e outros com quantidades menores por possuírem algum(uns) *padle(s)* com defeito (inativo) de fabricação. A quantidade de *padles* ativos definirá o tipo de *substrate* no estudo.

Quando o material chega ao estoque do processo produtivo, é armazenado lacrado, pois não é permitido que os pacotes de *substrate* sejam abertos fora do processo de sala limpa, local onde o processo de preparação é realizado. Independente do *padle* ativo ter sido usado ou não, ele passará pelo processo de encapsulamento, esse processo envolve todo o *substrate*, uma vez encapsulado o *substrate/padle* não pode mais ser utilizado, caso ele esteja vazio, sem o chip semicondutor, ele é descartado como refugo.

4.4.2 Método, máquina e mão de obra

Também foi evidenciado a inexistência de procedimento para realização do cálculo e a falta de uma ferramenta adequada. Aplicou-se a ferramenta 5 Porquês (Quadro 04) para definir a causa raiz:

Quadro 04 – Análise 5 porquês

Descrição do problema:	Desperdício de <i>substrate/padles</i> (rejeito) e tempo na preparação dos lotes para a produção.				
1. Por quê?	O time operacional tem dificuldade em realizar o cálculo.				
	2. Por quê?	O time operacional não possui conhecimento e habilidade para realizar os cálculos de forma rápida e precisa.			
		3. Por quê?	O cálculo é realizado de forma manual com uma calculadora comum.		
			4. Por quê?	A calculadora é a única ferramenta disponível para realizar o cálculo.	
				5. Por quê?	Não há uma ferramenta ou método conhecido que faça os cálculos de forma mais eficiente. (causa raiz)
Conclusão:	Necessidade de desenvolver uma ferramenta/método para auxiliar o time operacional no cálculo da quantidade exata para a formação adequada dos lotes para o processo de produção.				

Fonte: Autoria própria (2021)

4.5 Ações corretivas (D5)

Identificou-se a oportunidade de aplicar alguns conceitos de PO, tratando sobre a otimização em relação a combinação ou escolha do melhor produto a se produzir, e quanto desse produto deve ser produzido, utilizando-se das variáveis disponíveis, das restrições conhecidas de cada uma dessas variáveis e do objetivo que se deseja alcançar.



Como ferramenta foi utilizado o *Solver* do *software Excel*, usado para realizar cálculos matemáticos de PL. Então, com as variáveis definidas, com as restrições conhecidas e com o objetivo claro, a solução foi desenvolvida.

4.5.1 Cálculos matemáticos

A definição da função objetivo foi baseada nos preceitos de que toda a matéria-prima disponível poderia ser utilizada, porém respeitando a quantidade disponível de cada tipo de *substrate*, e as restrições teriam que se sujeitar a quantidade de cada *substrate* e a ordem de produção, não podendo ser produzido nada a mais.

4.5.1.1 Função Objetivo:

A função objetivo é definida pela equação (1)

$$\text{Max } Z = \text{Sub1}.X1 + \text{Sub2}.X2 + \text{Sub3}.X3 + \text{Sub4}.X4 + \text{Sub5}.X5 + \text{Sub6}.X6 + \text{Sub7}.X7 + \text{Sub8}.X8 + \text{Sub9}.X9 + \text{Sub10}.X10 \quad (1)$$

Onde:

Sub 1, Sub 2, ..., Sub 10 são os materiais disponíveis (restrições)

X1, X2, ..., X10 são as variáveis de decisões

4.5.1.2 Restrições:

As restrições são definidas pelas equações a seguir:

$$\text{Sub1}.X1 + \text{Sub2}.X2 + \text{Sub3}.X3 + \text{Sub4}.X4 + \text{Sub5}.X5 + \text{Sub6}.X6 + \text{Sub7}.X7 + \text{Sub8}.X8 + \text{Sub9}.X9 + \text{Sub10}.X10 = \text{OP (Ordem de Produção)} \quad (2)$$

$$\text{Sub1}.X1 + \text{Sub2}.X2 + \text{Sub3}.X3 + \text{Sub4}.X4 + \text{Sub5}.X5 + \text{Sub6}.X6 + \text{Sub7}.X7 + \text{Sub8}.X8 + \text{Sub9}.X9 + \text{Sub10}.X10 \leq \text{Sub1} \quad (3)$$

$$\text{Sub1}.X1 + \text{Sub2}.X2 + \text{Sub3}.X3 + \text{Sub4}.X4 + \text{Sub5}.X5 + \text{Sub6}.X6 + \text{Sub7}.X7 + \text{Sub8}.X8 + \text{Sub9}.X9 + \text{Sub10}.X10 \leq \text{Sub2} \quad (4)$$

$$\text{Sub1}.X1 + \text{Sub2}.X2 + \text{Sub3}.X3 + \text{Sub4}.X4 + \text{Sub5}.X5 + \text{Sub6}.X6 + \text{Sub7}.X7 + \text{Sub8}.X8 + \text{Sub9}.X9 + \text{Sub10}.X10 \leq \text{Sub3} \quad (5)$$

$$\text{Sub1}.X1 + \text{Sub2}.X2 + \text{Sub3}.X3 + \text{Sub4}.X4 + \text{Sub5}.X5 + \text{Sub6}.X6 + \text{Sub7}.X7 + \text{Sub8}.X8 + \text{Sub9}.X9 + \text{Sub10}.X10 \leq \text{Sub4} \quad (6)$$

$$\text{Sub1}.X1 + \text{Sub2}.X2 + \text{Sub3}.X3 + \text{Sub4}.X4 + \text{Sub5}.X5 + \text{Sub6}.X6 + \text{Sub7}.X7 + \text{Sub8}.X8 + \text{Sub9}.X9 + \text{Sub10}.X10 \leq \text{Sub5} \quad (7)$$

$$\text{Sub1}.X1 + \text{Sub2}.X2 + \text{Sub3}.X3 + \text{Sub4}.X4 + \text{Sub5}.X5 + \text{Sub6}.X6 + \text{Sub7}.X7 + \text{Sub8}.X8 + \text{Sub9}.X9 + \text{Sub10}.X10 \leq \text{Sub6} \quad (8)$$

$$\text{Sub1.X1} + \text{Sub2.X2} + \text{Sub3.X3} + \text{Sub4.X4} + \text{Sub5.X5} + \text{Sub6.X6} + \text{Sub7.X7} + \text{Sub8.X8} + \text{Sub9.X9} + \text{Sub10.X10} \leq \text{Sub7} \quad (9)$$

$$\text{Sub1.X1} + \text{Sub2.X2} + \text{Sub3.X3} + \text{Sub4.X4} + \text{Sub5.X5} + \text{Sub6.X6} + \text{Sub7.X7} + \text{Sub8.X8} + \text{Sub9.X9} + \text{Sub10.X10} \leq \text{Sub8} \quad (10)$$

$$\text{Sub1.X1} + \text{Sub2.X2} + \text{Sub3.X3} + \text{Sub4.X4} + \text{Sub5.X5} + \text{Sub6.X6} + \text{Sub7.X7} + \text{Sub8.X8} + \text{Sub9.X9} + \text{Sub10.X10} \leq \text{Sub9} \quad (11)$$

$$\text{Sub1.X1} + \text{Sub2.X2} + \text{Sub3.X3} + \text{Sub4.X4} + \text{Sub5.X5} + \text{Sub6.X6} + \text{Sub7.X7} + \text{Sub8.X8} + \text{Sub9.X9} + \text{Sub10.X10} \leq \text{Sub10} \quad (12)$$

$$X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, X10 \geq 0 \quad (13)$$

4.5.2 Ferramenta desenvolvida no Solver

A Figura 06 ilustra a planilha função objetivo, desenvolvida no *Solver*, no *software* Excel. Essa planilha tem como finalidade organizar as variáveis de decisão de forma ordenada, nela foram definidos os campos da função objetivo, das restrições e dos tipos de *substrate* disponíveis, esses campos possuem fórmulas matemáticas para automatizar os cálculos.

Figura 06 – Planilha função objetivo

FUNÇÃO OBJETIVO		Substrate											
Item	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Tipo de Substrate	Sub01	Sub02	Sub03	Sub04	Sub05	Sub06	Sub07	Sub08	Sub09	Sub10			
Quantidade de Substrate	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Quant. Padle por tipo de Substrate para Produzir													
Z=	0												
RESTRIÇÕES											Utilizado (Quantidade Padles)	Disponível (Quantidade Padles)	
nº	Sub01	Sub02	Sub03	Sub04	Sub05	Sub06	Sub07	Sub08	Sub09	Sub10	LHS	RHS	
Ordem de Produção	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	
Sub01	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sub02	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sub03	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sub04	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sub05	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Sub06	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Sub07	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Sub08	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Sub09	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Sub10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	

Fonte: Autoria própria (2021).



A Figura 07 mostra a planilha onde os dados de entrada são inseridos e os dados de saída são visualizados, é através dela que informamos a quantidade da ordem de produção, os tipos de *substrate* e a quantidade de cada tipo disponível.

Figura 07 – Planilha de entrada e saída de dados

	Quantidade Padle/Substrate	Quantidade de Substrate	Quant. de Padle	Quant. de Substrate Calculado	Quant. Padle por tipo de Substrate para Produzir	Quant. de Scrap(Padles)	Qty de Substrate necessários para ordem de Produção
Sub01	76		0	0	0	0	0
Sub02	75		0	0	0	0	0
Sub03	74		0	0	0	0	0
Sub04	73		0	0	0	0	0
Sub05	72		0	0	0	0	0
Sub06	71		0	0	0	0	0
Sub07	70		0	0	0	0	0
Sub08	69		0	0	0	0	0
Sub09	68		0	0	0	0	0
Sub10	67		0	0	0	0	0
	Total	0	0	0,00	0	0	0

Fonte: Aatoria própria (2021).

A Figura 08 mostra os parâmetros utilizados no Solver, todas as restrições e a regra de não negatividade. Foi escolhido a opção “Max”, para que o sistema use o máximo de material disponível possível.

Figura 08 – Parâmetros do Solver

Set Objective:

To: Max Min Value Of:

By Changing Variable Cells:

Subject to the Constraints:

- \$V\$31 <= \$W\$31
- \$V\$32 <= \$W\$32
- \$V\$30 <= \$W\$30
- \$V\$28 = \$W\$28
- \$V\$33 <= \$W\$33
- \$V\$34 <= \$W\$34
- \$V\$35 <= \$W\$35
- \$V\$29 <= \$W\$29
- \$V\$38 <= \$W\$38
- \$V\$36 <= \$W\$36
- \$L\$23:\$U\$23 = integer
- \$V\$37 <= \$W\$37
- \$L\$23:\$U\$23 >= 0

Fonte: Aatoria própria (2021).

4.6 Validação da ação corretiva (D6)

Para validar a ação corretiva, levantou-se todos os lotes produzidos em um período de 9 meses, quando ainda era usado o cálculo manual, então, com esses dados, simulou-se qual seria o resultado se tivesse sido usada a ferramenta desenvolvida para auxiliar no cálculo.

A Quadro 05, apresenta o resultado do cálculo manual obtido pelo time operacional, onde observa-se que durante uma ordem produção houve o refugo de 66 *padles*.

Quadro 05 – Formação dos lotes com o cálculo manual

Ordem de Produção:	210144661A1	Data da Produção	Cliente	Modelo		PN
Quantidade da Ordem de Produção:	53999	13.03.2021	BIW	BGA - eMMC		90110C0011T
Quantidade de Substrate Recebido:	745	Material Disponível		Material Utilizado		
"Tipos de Substrate"	Quantidade de Padles/Sustrate	Quantidade de Sustrate	Quantidade de Padles	Quantidade de Substrates Usados	Quantidade de Padles Usados	Quantidade de Padles Scrap
Sub01	76	75	5700	75	5700	0
Sub02	75	56	4200	56	4200	0
Sub03	74	215	15910	215	15910	0
Sub04	73	115	8395	115	8395	0
Sub05	72	110	7920	110	7920	0
Sub06	71	95	6745	95	6745	0
Sub07	70	45	3150	45	3150	0
Sub08	69	10	690	10	690	0
Sub09	68	19	1292	15	1020	66
Sub10	67	5	335	5	335	0
Total		745	54337	741	54065	66

Fonte: Autoria própria (2021).

A Quadro 06 mostra o resultado da ferramenta desenvolvida no *solver* com o Simplex, destacando que para a mesma ordem produção, foram refugadas apenas 3 *padles*.

Quadro 06 – Formação dos lotes com a ferramenta desenvolvida no *Solver*

Ordem de Produção	210144661A1	Data da Produção	Cliente	Modelo		PN
Quantidade da Ordem de Produção:	53999	13.03.2021	BIW	BGA - eMMC		90110C0011T
Quantidade de Substrate Recebido:	745	Material Disponível		Material Utilizado		
"Tipos de Substrate"	Quantidade de Padles/Sustrate	Quantidade de Sustrate	Quantidade de Padles	Quantidade de Substrates Usados	Quantidade de Padles Usados	Quantidade de Padles Scrap
Sub01	76	75	5700	75	5700	0
Sub02	75	56	4200	56	4200	0
Sub03	74	215	15910	215	15910	0
Sub04	73	115	8395	115	8395	0
Sub05	72	110	7920	110	7920	0
Sub06	71	95	6745	95	6745	0
Sub07	70	45	3150	45	3150	0
Sub08	69	10	690	10	690	3
Sub09	68	19	1292	19	1292	0
Sub10	67	5	335	0	0	0
Total		745	54337	740,00	54002	3

Fonte: Autoria própria (2021).



Realizou-se a mesma simulação com mais 7 lotes produzidos, o Quadro 07 mostra o resultado de cada simulação. É importante informar, que as informações de tempo e quantidade de rejeito antes da ferramenta, foram retiradas dos registros da produção de entrada e saída de material que existe em cada etapa do processo.

Quadro 07 – Simulação: Manual vs Solver

Ordem de Produção	Qty	Manual			Solver		
		Tempo (min)	Rejeito	Taxa (%)	Tempo (Min)	Rejeito	Taxa (%)
1	53.999	60	66	0,12%	5	3	0,01%
2	25.562	49	33	0,13%	5	6	0,02%
3	18.258	42	24	0,13%	5	2	0,01%
4	16.150	35	23	0,14%	5	3	0,02%
5	50.131	56	61	0,12%	5	4	0,01%
6	60.259	60	63	0,10%	5	0	0,00%
7	32.492	52	25	0,08%	5	3	0,01%
8	38.034	56	22	0,06%	5	4	0,01%
Total	294.885	51 (média)	317	0,11%	5 (média)	25	0,01%

Fonte: Autoria própria (2021).

Considerando o total de demanda, somando todas as ordens de produção (294.885 produtos), as quantidades totais de rejeito usando o cálculo manual (317 *padles* refugados) e o cálculo simplex (25 *padles* refugados), notamos que a taxa de rejeito reduziu de 0,11% para 0,01%. A melhoria torna-se ainda mais evidente quando se compara que 25 *padles* refugados usando o cálculo simplex representam somente 7,89% dos 317 *padles* refugados usando o cálculo manual, concluindo-se que o novo método reduziu a quantidade de *padles* refugados em 92,11%.

Em relação ao tempo, nota-se que o tempo médio usado no cálculo manual (51,25 minutos) reduziu em 90,24% com a nova ferramenta, pois o cálculo simplex é executado em apenas 5 minutos, independente do tamanho da ordem de produção.

4.7 Identificação e implementação de ações preventivas (D7)

A fim de evitar a recorrência do problema, as seguintes ações preventivas foram tomadas:

- Instalação de uma estação de trabalho com um computador para utilização da ferramenta para cálculo automático dos lotes;
- Documentação das etapas do uso do Solver em uma Instrução de Trabalho;
- Treinamento do time operacional sobre como utilizar a ferramenta;
- Registro de treinamento para todos os envolvidos.



4.8 Reconhecimento individual e do time (D8)

Ao final desse processo, foi realizada uma reunião para fechamento e agradecimento de todos os envolvidos. Evidenciou-se a eficácia da ferramenta, recebendo a gratidão e o reconhecimento pelo esforço e resultado alcançado.

5 Considerações finais

Este estudo aplicou o método simplex na fabricação de semicondutores, maximizando o uso da matéria-prima *substrate/padles* e reduzindo o tempo de cálculo no processo de preparação dos lotes para a produção.

A combinação de produção indicada pela PL foi executada na prática, na nova estação de preparação de lotes, e verificou-se que esta é a melhor combinação de produção diante das outras opções que já haviam sido executadas pelo setor. O desperdício de matéria-prima *padles* reduziu em 92.11%, além disso também houve redução de 90,24% no tempo médio gasto no cálculo para a preparação dos lotes.

A PO continua conferindo resultados importantes nas aplicações práticas industriais. O conhecimento do ponto ótimo de produção pode proporcionar as organizações uma maximização de eficiência em processos simples, mas que se não tratados geram grande impacto.

Os resultados apresentados foram satisfatórios mas, considerando que mesmo com a implementação do novo método, ainda existem quantidades mínimas de rejeito de matéria-prima, novos desafios e oportunidades de pesquisa devem ser considerados para encontrar combinações que possam utilizar todo o material disponível, sem gerar rejeito, visando 100% de aproveitamento da matéria-prima.

Referências

ANJOS, Thainá Viriato dos. Análise e proposta para melhoria da confiabilidade do processo utilizando ferramentas da qualidade e Big Data: **Aprepro**. X Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. 2020.

BIANCA M. N. **Ferramentas da qualidade**. 8D. Paraná : Qualiex, 2019. Disponível em: <https://ferramentasdaqualidade.org/8d/>. Acesso em: 19 nov. 2021.

BOTACIM, Renato S. *et al.* Pesquisa Operacional: a comparação de dois métodos para resolução de um problema de programação linear. **Exatas & Engenharias**, v. 9, n. 24, 2019.

CHAVES, Viviane H. C; BERNARDO, Cristiane H. C. Aspectos filosóficos e metodológicos da Pesquisa Operacional: **International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)**, p. 195 - 199. Vol-5, n. 10, 2018.

CHEN, Andrea; LO, Randy Hsiao-Yu. **Semiconductor Packaging – Materials, Interaction and Reliability**. Taylor & Francis Group v.01. 2012.



FAEDO, Vinicius; SILVA, Ethel Cristina C. Utilização do diagrama de Ishikawa para detecção de divergências de estoque: **IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**. 2019.

LEAN BLOG. Diagrama Ishikawa. 2018. Disponível em: <https://terzoni.com.br/leanblog/diagrama-ishikawa-e-grafico-de-pareto/diagrama-ishikawa/>. Acesso em: 27 nov. 2021.

LEIGUS, Alisson; FENERICH, Amanda.T; MORAIS, Marcia. F. Aplicações da Pesquisa Operacional. **III Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial**. Feclcam – Campo Mourão – PR, p. 2-6. 2009.

LONGARAY, André A. Introdução à Pesquisa Operacional. Slide de apresentação. **SaraivaUni**, Ed. 1 2013.

LOURES, Thiago M; CARVALHO, Ítalo B. PRODUÇÃO CHIPS, SEMICONDUTORES NO BRASIL: UMA INDÚSTRIA DINÂMICA E ESTRATÉGICA EM NEGÓCIOS INTERNACIONAIS. **Revista Científica da AJES** v.10, n.20, 2021.

MANEGUZZO, Ana P. **Programação Linear do Método de Transporte – O excel como ferramenta de apoio**, Universidade de Passo Fundo, 2015.

MORAES, Diego G; FERREIRA, Cynara V; SILVA, Adriano M. OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR: **REFAS – Revista Fatec Zona Sul** V.5 n.4, 2019.

MUNCUT, E. S; *et al.* 8D complaint solving method in an automotive component processing company, **Materials Science and Engineering**, N. 568, 2019.

RAPHAEL PIRES. **Rock content**. Aprenda a usar a matriz 5W2H nos jobs e tarefas da sua agência!. *[S.l.]*. Rock Content, 2019. Disponível em: <https://rockcontent.com/br/blog/o-que-e-5w2h/>. Acesso em: 19 nov. 2021.

RATHI, R. *et al.* **Investigation and implementation of 8D methodology in a manufacturing system**, Elsevier - Materials Today: Proceedings, 2021.

RODRIGUES, L. H. *et al.* **PESQUISA OPERACIONAL – PROGRAMAÇÃO LINEAR PASSO A PASSO: DO ENTENDIMENTO DO PROBLEMA À INTERPRETAÇÃO DA SOLUÇÃO**. 1 ed. Vale do Rio dos Sinos: Editora Unisinos, v. 1, 2014.

SÁ, L. C. E.; ARPINI, B. P.; SANTOS, P. H. D. **PESQUISA OPERACIONAL NO CAMPO DA LOGÍSTICA: EXPLORANDO INTERFACES**. 1 ed. Vitória - ES: Editora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, v.1, 2019.

SILVA, Adriana B. **O MÉTODO SIMPLEX E O MÉTODO GRÁFICO NA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO**. Universidade Federal de Goiás. Jataí, 2016.

SILVA, Alisson. O *et al.* **GESTÃO DA QUALIDADE: APLICAÇÃO DA FERRAMENTA 5W2H COMO PLANO DE AÇÃO PARA PROJETO DE ABERTURA DE UMA EMPRESA**. **SIEF**. 3ª Semana Internacional das Engenharias da FAHOR, 7º Seminário Estadual de Engenharia Mecânica e Industrial, 2013.

YINUG, Falan. **Semiconductor Industry Association**. Semiconductor Shortage Highlights Need to Strengthen U.S. Chip Manufacturing, Research. Washington, 2021. Disponível em: <https://www.semiconductors.org/semiconductor-shortage-highlights-need-to-strengthen-u-s-chip-manufacturing-research/>. Acesso em: 11 nov. 2021.