

DIEGO FERRA URQUIDI

Utilização da função Desirability em um processo de fundição de aço ABNT 1030

Guaratinguetá
2015

DIEGO FERRA URQUIDI

Utilização da função Desirability em um processo de fundição de aço ABNT 1030

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva

Guaratinguetá
2015

U79u	Urquidi, Diego Ferra Utilização da função Desirability em um processo de fundição de aço ABNT 1030. / Diego Ferra Urquidi – Guaratinguetá, 2014. 75 f : il. Bibliografia: f. 47-48 Trabalho de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014. Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva 1. Planejamento experimental 2. Aço – fundição I. Título CDU 519.242
------	---

Utilização da função Desirability em um processo de fundição de aço ABNT 1030

Diego Ferra Urquidi

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA

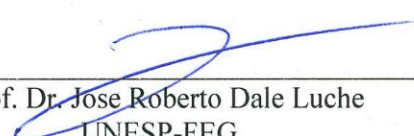


Prof^ª. Dr^ª. Arminda Eugenia Marques Campos
Coordenadora

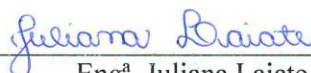
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Messias Borges Silva
Orientador/ UNESP-FEG



Prof. Dr. Jose Roberto Dale Luche
UNESP-FEG



Eng^ª. Juliana Laiate
UNESP-FEG

Fevereiro 2015

Dedico este trabalho de modo especial aos meus pais, João Carlos e Rosangela, ao meu irmão, meus familiares e a todos aqueles que amo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, *João Carlos* e *Rosangela*, pela enorme paciência, amor e apoio em todos os momentos da minha vida.

Ao meu irmão, *João Vicente*, pela eterna amizade.

Aos meus avós, tios e tias pelo apoio ao estudo.

Aos meus amigos e irmão de República que me proporcionaram momentos únicos de amizade e companheirismo.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Messias Borges Silva*, pela paciência e disposição em me orientar no Trabalho de Graduação.

A minha amiga, *Juliana Laiate*, que atuou neste trabalho como coorientadora.

URQUIDI, D. F. **Utilização da função Desirability em um processo de fundição de aço ABNT 1030**. 2015. Trabalho de Graduação (Engenharia de Produção Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

A presente dissertação aborda como tema principal a utilização da ferramenta *desirability* na otimização de um processo com múltiplas variáveis resposta. O atual cenário de fortes concorrências para conquista do mercado consumidor torna necessário o desenvolvimento de melhorias para um melhor desempenho do processo como um todo, seja para diminuir gastos, aumentar eficiência ou eficácia. Deste modo, a utilização de metodologias que auxiliem nesse processo está se tornando cada vez mais viável. O presente trabalho utilizou o programa MINITAB e os dados obtidos da tese de doutorado do Doutor Luiz Henrique Dias Alves, com o objetivo de comparar o resultado obtido em ambos os trabalhos. Como resultado, após a aplicação do método *desirability*, simulou-se a otimização de duas variáveis respostas referente a formação de vazios relacionados à solidificação em processo de fundição do aço ABNT 1030. Dessa forma, foi possível avaliar o comportamento das variáveis com a variação dos parâmetros da função *desirability*.

PALAVRAS-CHAVES: Otimização. Múltiplas Respostas. Função *desirability*.

URQUIDI, D. F. **Using Desirability function in a steel casting process ABNT 1030**. 2015. Undergraduate Monograph (Industrial Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

This dissertation addresses the main theme the use of desirability tool in optimizing a process with multiple response variables. The current scenario of strong bids to conquer the consumer market makes it necessary to develop improvements for better process performance as a whole, is to cut costs, increase efficiency or effectiveness. Thus, the use of methods to assist in this process is becoming increasingly feasible. This study used the MINITAB program and the data of the doctoral thesis of Dr. Luiz Henrique Dias Alves, in order to compare the results obtained in both studies. As a result, after applying the desirability method, simulated to optimize two responses variables regarding the formation of voids related to solidification in ABNT 1030 steel casting process. Thus, it was possible to evaluate the behavior of the variables with the variation of parameters of the desirability function.

KEYWORDS: Optimization. Multiple-Response. Desirability function.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Modelo geral de um processo	20
FIGURA 2 - Estratégia inicial do planejamento experimental	22
FIGURA 3 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 11	38
FIGURA 4 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 12	39
FIGURA 5 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 13	40
FIGURA 6 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 14	40
FIGURA 7 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 15	41
FIGURA 8 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 16 e 17	42
FIGURA 9 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 18	43
FIGURA 10 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 19 e 20	44
FIGURA 11 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 21	49
FIGURA 12 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 22	49
FIGURA 13 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 23	50
FIGURA 14 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 24	50
FIGURA 15 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 25	51
FIGURA 16 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 26	51
FIGURA 17 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 27	52
FIGURA 18 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 28	52
FIGURA 19 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 29	53

FIGURA 20 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 30	53
FIGURA 21 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 31	54
FIGURA 22 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 32	54
FIGURA 23 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 33	55
FIGURA 24 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 34	55
FIGURA 25 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 35	56
FIGURA 26 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 36	56
FIGURA 27 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 37	57
FIGURA 28 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 38	57
FIGURA 29 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 39	58
FIGURA 30 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 40	58
FIGURA 31 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 41	59
FIGURA 32 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 42	59
FIGURA 33 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 43	60
FIGURA 34 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 44	60
FIGURA 35 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 45	61
FIGURA 36 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 46	61
FIGURA 37 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 47	62
FIGURA 38 - <i>Desirability</i> da média x valor da média ($T_{média} = 0$, $TS/N = 0$)	62
FIGURA 39 - <i>Desirability</i> do Sinal/Ruído x valor do Sinal/Ruído ($T_{média} = 0$, $TS/N = 0$)	63
FIGURA 40 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabelas 48, 49, 50, 51 e 52	65

FIGURA 41 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 53	65
FIGURA 42 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 54	66
FIGURA 43 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 55	66
FIGURA 44 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 56	67
FIGURA 45 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 57	67
FIGURA 46 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 58	68
FIGURA 47 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 59	68
FIGURA 48 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 60	69
FIGURA 49 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 61	69
FIGURA 50 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 62	70
FIGURA 51 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 63	70
FIGURA 52 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 64	71
FIGURA 53 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 65	71
FIGURA 54 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 66	72
FIGURA 55 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 67	72
FIGURA 56 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 68	73
FIGURA 57 - <i>Desirability</i> do Sinal/Ruído x valor do Sinal/Ruído ($T_{média} = 5$, $TS/N = -15$)	73
FIGURA 58 - Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabelas 69, 70, 71, 72, 73 e 74	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Variáveis estudadas e seus níveis para os experimentos exploratórios	27
TABELA 2 - Arranjo ortogonal utilizado para análise exploratória	28
TABELA 3 - Resultado dos experimentos exploratórios com o valor da média de volume de defeitos e valor do percentual de contribuição na resposta	29
TABELA 4 - Variáveis a serem avaliadas na segunda etapa de experimentos	29
TABELA 5 - Arranjo ortogonal L16 utilizado como “Matriz de experimento”	30
TABELA 6 - Volume do rechupe por experimento e valores da média e razão (S/N)	31
TABELA 7 - Análise de variância para média dos efeitos nas respostas	32
TABELA 8 - Análise de variância para a razão Sinal/Ruído (S/N)	32
TABELA 9 - Análise de variância dos efeitos de todas as variáveis e interações na resposta	33
TABELA 10 - Análise de variância para a razão Sinal/Ruído (S/N)	34
TABELA 11 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	38
TABELA 12 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	39
TABELA 13 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	39
TABELA 14 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	40
TABELA 15 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	41
TABELA 16 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	41
TABELA 17 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	42
TABELA 18 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	42
TABELA 19 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	43

TABELA 20 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	44
TABELA 21 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	49
TABELA 22 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	49
TABELA 23 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	50
TABELA 24 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	50
TABELA 25 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	51
TABELA 26 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	51
TABELA 27 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	52
TABELA 28 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	52
TABELA 29 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	53
TABELA 30 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	53
TABELA 31 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	54
TABELA 32 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	54
TABELA 33 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	55
TABELA 34 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	55
TABELA 35 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	56
TABELA 36 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	56
TABELA 37 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	57
TABELA 38 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	57
TABELA 39 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	58
TABELA 40 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	58
TABELA 41 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	59
TABELA 42 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	59

TABELA 43 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	60
TABELA 44 – Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	60
TABELA 45 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	61
TABELA 46 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	61
TABELA 47 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	62
TABELA 48 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	64
TABELA 49 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	64
TABELA 50 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	64
TABELA 51 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	64
TABELA 52 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	64
TABELA 53 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	65
TABELA 54 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	65
TABELA 55 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	66
TABELA 56 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	66
TABELA 57 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	67
TABELA 58 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	67
TABELA 59 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	68
TABELA 60 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	68
TABELA 61 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	69
TABELA 62 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	69
TABELA 63 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	70
TABELA 64 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	70
TABELA 65 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	71

TABELA 66 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	71
TABELA 67 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	72
TABELA 68 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	72
TABELA 69 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	74
TABELA 70 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	74
TABELA 71 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	74
TABELA 72 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	74
TABELA 73 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	74
TABELA 74 - Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização	74

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Objetivos da otimização do Método de Derringer e Suich	36
QUADRO 2 - Relação de importância entre o alvo e os limites no <i>desirability</i>	37

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2 OBJETIVOS	16
1.3 JUSTIFICATIVA	17
1.4 MATERIAL E MÉTODOS	17
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
2.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO	19
2.3 MÉTODO TAGUCHI	23
2.4 A INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO E A TESE DE DOUTORADO	25
2.5 MÉTODO DESIRABILITY	34
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	38
4 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS	45
5 CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
ANEXO A	49
ANEXO B	64
ANEXO C	74

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No cenário econômico atual, é de extrema importância para a sobrevivência de uma empresa a busca incessante por melhorias na produção, tanto pela qualidade quanto pela diminuição de custos. Devido à grande concorrência e à velocidade das inovações, os clientes estão cada vez mais exigentes.

Com tal exigência é cada vez maior o número de variáveis que influenciam na qualidade de um produto ou processo. Muitas vezes existe mais de uma resposta ótima, ou seja, existem múltiplas respostas ótimas.

É muito importante saber trabalhar com estas múltiplas respostas ótimas, pois assim, a empresa que tiver a ferramenta correta ou mais eficaz, terá uma grande vantagem sobre as outras. Saber quais são os fatores que mais influenciam seu produto, ou processo, e quais são os níveis que estes são otimizados, geram um aumento dos lucros.

A Estatística é um conjunto de técnicas usadas para recolher certos dados e interpretá-los. Ela é muito utilizada em praticamente todas as áreas de estudo.

O Planejamento de Experimentos é uma área da Estatística que pode ser utilizada em praticamente qualquer área de estudo. Esta técnica serve de auxílio para definir quais fatores ou variáveis influenciam no produto final.

Para a resolução de problemas com duas ou mais variáveis respostas, este trabalho conta com a ferramenta *desirability*.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é a utilização da ferramenta *desirability* na otimização de um processo com múltiplas variáveis resposta. E como objetivos específicos temos:

- Determinar os níveis dos fatores nas variáveis respostas.
- Analisar e discutir a viabilidade do método utilizado neste tipo de processo.

- Comparar os resultados obtidos com os resultados obtidos originalmente.

1.3 JUSTIFICATIVA

Muitas vezes em uma indústria, no desenvolvimento de um produto, se faz necessário a aplicação empírica de experimentos para obter informações deste produto ou processo.

Estes experimentos nos ajudam a entender como certos fatores influenciam no produto final, desenvolve novos conceitos, indicam como resolver problemas de fabricação, etc..

O Planejamento de Experimentos nos ajuda a descobrir quais fatores e em que condições devem ser empregados para que tenhamos uma resposta com precisão estatística e a baixo custo.

Com essa finalidade, o presente estudo propõe o uso da ferramenta *desirability*, para otimização de processos com múltiplas respostas em um processo de fundição, determinando os fatores que afetam o resultado, com um mínimo montante de experimentação.

1.4 MATERIAL E MÉTODOS

Primeiramente houve uma pesquisa literária sobre a ferramenta *desirability* em livros, artigos e teses acadêmicas.

O presente estudo realizará uma avaliação do comportamento das variáveis respostas quando combinadas entre si, e que venha satisfazer as condições de melhor ajuste do processo.

Para a otimização com múltiplas respostas será utilizado o método *desirability*.

E, assim, analisar os resultados obtidos das otimizações por múltiplas respostas, avaliando a ferramenta *desirability*.

Este trabalho utiliza o programa MINITAB e os dados obtidos da tese de doutorado do Dr. Luiz Henrique Dias Alves.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2, será apresentada a fundamentação teórica deste trabalho e informações sobre as ferramentas utilizadas

No capítulo 3, será apresentado o procedimento experimental, as informações necessárias para a aplicação do procedimento e os resultados obtidos com a otimização do processo com múltiplas variáveis resposta.

No capítulo 4, será apresentada a análise dos resultados obtidos.

No capítulo 5, serão apresentadas as considerações finais e as conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo tem como objetivo a apresentação de conceitos utilizados neste trabalho, tais como: Planejamento Experimental, Método Taguchi, a indústria de fundição e por fim a função *desirability* (principal objeto de estudo deste trabalho).

2.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO

O Planejamento de Experimento, termo traduzido do inglês *Design of Experiments* (DOE), é uma metodologia criada entre as décadas de 20 e 30 do século passado e é creditada como sendo de autoria do Sir Ronald A. Fischer, um estatístico, biólogo e geneticista. A primeira aplicação do DOE foi em um ambiente agrícola, sendo esta considerada a 1ª Era, ou era agrícola (década de 20 até início da década de 30), esta era conta com os surgimentos do arranjo fatorial e da ANOVA. (Eberly College of Science).

Por ser uma ferramenta muito útil e eficaz em qualquer área com experimento, auxiliando na contínua melhora dos processos, o DOE logo foi utilizado em outras áreas industriais, sendo aprimorada por outros pesquisadores como George E. P. Box, sendo esta considerada a 2ª Era do DOE ou 1ª era industrial (início década de 30 até final da década de 70). Esta época caracterizou-se pelo estudo de superfície de resposta e grande aplicação da estatística na indústria química e nos processos envolvidos. (Eberly College of Science).

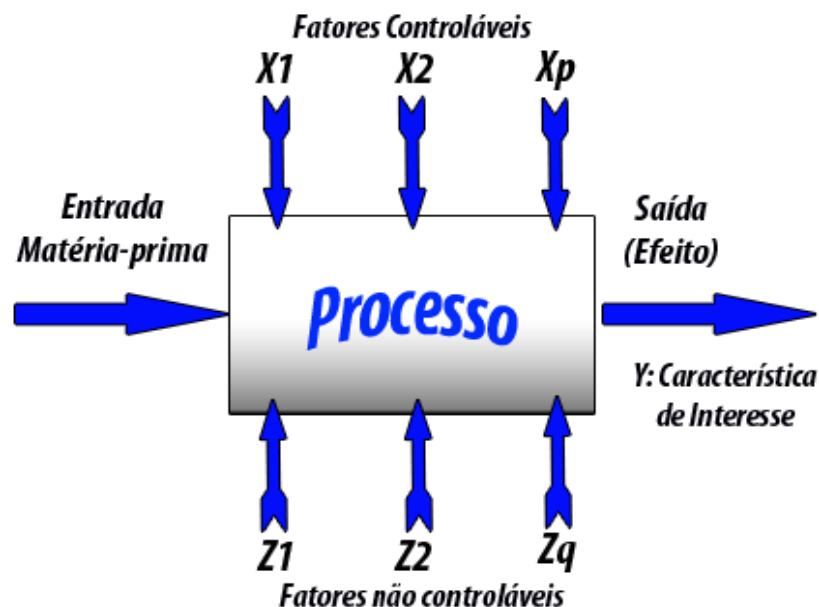
Outro famoso pesquisador foi o Genichi Taguchi, considerado o nome mais importante da conhecida 3ª Era do DOE ou 2ª era industrial (final da década de 70 até início da década de 90). Nesta época surgem conceitos como “projeto robusto”, controle de qualidade total e a utilização em massas nas indústrias destes conceitos. (Eberly College of Science).

A 4ª era, ou era moderna, tem início no começo dos anos noventa e caracteriza-se pela busca de qualidade devido ao efeito da globalização e grande concorrência.

Devido as pesquisas de Planejamento de Experimentos terem sua origem na agricultura, muitos termos como “tratamento” e “bloco” são utilizados mesmo sem a conotação agrícola.

O DOE é uma técnica muito utilizada para planejar experimentos, identificando as variáveis importantes de um processo e os limites inferiores e superiores, ou seja, definindo quais dados serão estudados, em que quantidade e em quais condições. É um procedimento no qual alterações propositalmente são feitas nas variáveis de entrada de um processo de modo que se possa avaliar as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, representada na figura abaixo.

Figura 1: Modelo geral de um processo.



Fonte: (www.portallaction.com.br)

Algumas variáveis respostas são controláveis e outras não. As não controláveis chamamos de Ruído.

Coleman & Montgomery (1993) propuseram as seguintes etapas para a realização de um Planejamento de Experimento:

- Caracterização do problema – É importante o envolvimento de todas as áreas na identificação do problema e traçar os objetivos;
- Escolha dos fatores de influência e níveis – Deve-se escolher os fatores que irão variar, o intervalo da variação destes fatores e os níveis de atuação de cada um deles;
- Seleção das variáveis de resposta – Muitas vezes a média ou o desvio padrão do fator estudado é a variável resposta, às vezes pode existir respostas múltiplas, a capacidade do medidor é um fator importante também, pois se sua capacidade é baixa, apenas efeitos grandes de fatores serão detectados;

- Determinação de um modelo de planejamento de experimento – Deve-se considerar o tamanho da amostra, suas restrições ou se há uma formação de blocos, por exemplo;
- Condução do experimento – O importante nesta etapa é acompanhar o processo, para que este siga com o planejado;
- Análise dos dados – Deve-se analisar com dados por meio de métodos estatísticos afins de que se tire uma conclusão e não apenas uma opinião;
- Conclusões e recomendações – Após analisar os dados, deve-se tomar uma decisão, ou seja, uma ação. O acompanhamento seguinte aos testes e testes de confirmação é importante também.

A utilização do Planejamento de Experimentos visa:

- Redução da variação do processo e melhor concordância entre os valores obtidos e os valores pretendidos;
- Redução do tempo do processo;
- Redução do custo operacional;
- Melhoria no rendimento do processo.

Existem três princípios básicos de um planejamento de experimentos:

- Replicação;
- Aleatoriedade;
- Blocagem.

A replicação é importante por dois motivos. Primeiro porque permite a obtenção do erro experimental. E segundo porque, se a média for usada para medir o efeito de um fator no experimento, a replicação permite a obtenção mais precisa da estimativa deste efeito.

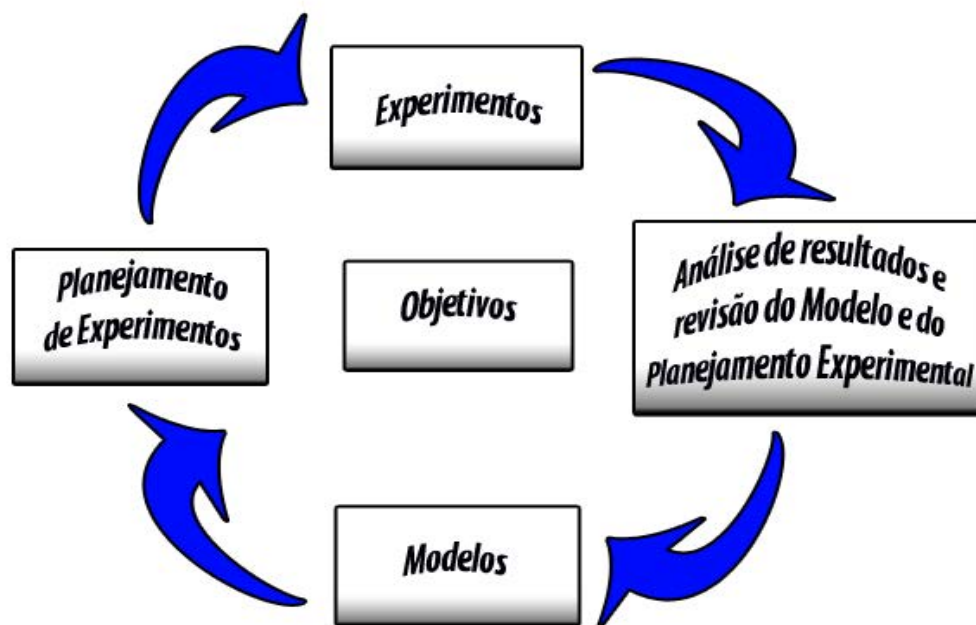
Os experimentos devem ser realizados de forma aleatória, garantindo assim a distribuição homogênea de todos os fatores não considerados.

O objetivo da blocagem é aumentar a precisão do experimento. É comum nos processos termos fatores externos que influenciam, mas não será foco deste estudo. Entretanto, a técnica da blocagem é usada para evitar a não homogeneidade, tratando cada fator separadamente, ou seja, como um bloco.

O planejamento experimental é na verdade uma série de planejamentos, onde o primeiro planejamento tem por objetivo definir quais são as variáveis importantes e depois são

realizados experimentos para definir quais são os níveis importantes. Existem variáveis qualitativas (tipo de equipamento, operados, etc.) e quantitativas (temperatura, pressão, pH do meio, etc.). Devemos analisar o resultado do experimento e fazer modificações no planejamento de experimento pertinentes. A figura abaixo representa esta estratégia inicial.

Figura 2: Estratégia inicial do planejamento experimental.



Fonte: (www.portaaction.com.br)

O arranjo experimental mais utilizado é o fatorial completo. O número de experimentos é: $N = AK$, onde A é o número de níveis e K é o número de fatores. Os níveis são representados pelos sinais de mais (+) e menos (-), onde o sinal negativo representa o nível inferior e o sinal positivo representa o nível superior.

“Experimento fatorial completo é o planejamento de experimentos em que cada réplica completa do experimento, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigados” (MONTGOMERY *et al*, 2004, p. 216). Mas a medida que aumenta o número de fatores linearmente, o número de experimentos cresce exponencialmente e dependendo do tamanho, o experimento torna-se inviável de realizar.

Em muitos casos a utilização do fatorial fracionário é suficiente para identificar os fatores realmente influentes, economizando tempo e dinheiro. Utiliza-se o confundimento de fatores para diminuir o número de experimentos.

2.3 MÉTODO TAGUCHI

O método Taguchi pode ser compreendido como uma nova abordagem da engenharia de qualidade para o processo e o produto. Esse método é conhecido também por “Projeto Robusto”.

A visão de qualidade de Taguchi visa a satisfação do cliente, ou seja, ele considera como perda custos relacionados com a insatisfação do cliente, como custos relacionados a reputação da empresa. Esta definição é diferente da definição até então vigente que considerava apenas como custo os custos de produção como sucata, custos de trabalho, garantia, entre outros.

Segundo Taguchi, a qualidade é medida pelo desvio que uma característica funcional apresenta em relação ao valor esperado da mesma. Fatores chamados “Ruídos” são os responsáveis por tais desvios, causando assim perdas na qualidade, assim Taguchi (1986) propôs a criação da chamada “função perda”.

O método Taguchi utiliza de técnicas estatísticas para criar um projeto que não se preocupa em isolar o produto dos fatores “Ruídos” e sim em criar um projeto que eliminem os efeitos dos fatores “Ruídos”. Este método fez muito sucesso nas indústrias e em empresas pois se preocupa na aplicação prática, apesar de ter sofrido muitas críticas de profissionais da área estatística.

Taguchi afirma que minimizando a variação da performance de um produto aumenta a qualidade e a satisfação do cliente, variação esta causada pelo “Ruído” e que podemos dividi-lo em três categorias:

- Ruído externo – condições de uso do produtos e o ambiente onde o produto é utilizado;
- Ruído interno ou ruídos degenerativos – mudanças decorrentes do resultado de um desgaste;

- Variações na produção ou ruído peça – diferenças entre produtos que são fabricados sobre as mesmas especificações.

O objetivo é minimizar o ruído tanto nas atividades *off-line* (método usado durante o projeto do produto) quanto nas *on-line* (método usado durante a produção do produto).

Além da “função perda”, o método Taguchi faz uso de três passos principais, são eles:

1. Projeto de sistemas – Aplicam-se os conhecimentos de engenharia e científicos para a formação de um protótipo básico funcional;
2. Projeto de parâmetros – Consiste na determinação dos valores ótimos dos fatores importantes, desde que o projeto seja funcional e robusto aos fatores de ruídos;
3. Projeto de tolerâncias – Estabelece as tolerâncias dos valores nominais encontrados no projeto de parâmetros.

Existem três objetivos que podem ser alcançados por meio do método Taguchi:

- Menor é melhor – Definida pela equação (1);
- Maior é melhor – Definida pela equação (2);
- Nominal é melhor – Definida pela equação (3).

$$S/N = -10 \log \sum y_i^2 / n \quad (1)$$

$$S/N = -10 \log (1/n) \sum (1/y_i^2) \quad (2)$$

$$S/N = 10 \log (y^2/S^2) \quad (3)$$

Onde:

- y_i representa os valores individuais das respostas;
- n representa o número de réplicas;
- S^2 representa a variância.

Na escolha do arranjo ortogonal leva-se em conta a quantidade de fatores estudados e suas interações, assim como o número de níveis estudados. Um dos métodos utilizados para a escolha do arranjo ortogonal é o método do “Número de Graus de Liberdade”, que é o número de fatores menos um. O arranjo será definido na tabela dos arranjos ortogonais de Taguchi (PADKE, 1989).

Para a distribuição dos fatores na matriz, bem como avaliar suas interações, deve-se utilizar os gráficos lineares de Taguchi (PADKE, 1989).

2.4 A INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO E A TESE DE DOUTORADO

A fundição é basicamente o processo de despejar um metal na forma líquida em um molde para que este se solidifique e fique com o formato do molde.

Em toda produção há uma constante luta contra o desperdício. Na indústria de fundição um destes desperdícios se dá por meio da formação de rechupes e poros, onde peças indesejáveis necessitam de retrabalho ou viram sucatas, ou seja, aumento do custo de produção.

Rechupes são vazios ou cavidades formadas no processo de solidificação, eles ocorrem por causa da contração do metal do estado líquido para o estado sólido. Quando o metal, em estado líquido, é despejado na forma há quase que instantaneamente a formação de uma película de metal sólido entre o molde e a peça, isto ocorre devido à diferença de temperatura entre o metal líquido e o molde e isto ajuda a definir a forma externa da peça. A peça vai se solidificando no sentido do exterior para o interior da peça e à medida que ocorre o processo de solidificação ocorre a formação de rechupes também.

Gases que estão dissolvidos no metal também contribuem para a formação de poros, pois quando o metal está em estado líquido eles estão dissolvidos, mas quando há a solidificação os gases são rejeitados do metal.

Para combater a formação de rechupes e poros deve-se utilizar o massalote, que é uma espécie de reserva de metal líquido. À medida que a peça vai reduzindo de volume devido à contração do metal, o metal do massalote vai transferindo-se para a peça, a fim de preencher o volume restante. Deve-se calcular com cuidado a quantidade de metal usada no massalote, pois o que sobrar deverá ser reutilizado no processo e isto traz mais custos.

Os massalotes são classificados de acordo com seu posicionamento na peça, forma ou material com que é revestido. Com relação ao seu posicionamento eles podem ser de topo ou lateral, dependendo de onde estão posicionados ao alimentarem a peça se estão em cima da peça ou lateralmente. Com relação à forma tanto os massalotes de topo quanto os de lateral podem ser aberto ou fechado, ele é considerado aberto quando a face superior do massalote

está aberta ao ambiente e fechado quando não está. Tanto os massalotes abertos quanto os fechados podem ser revestidos em areia ou com luvas, são considerados massalotes revestidos em areia quando estes são revestidos com o mesmo material que o molde e massalotes com luvas quando estes são revestidos por outro material. As luvas podem ser isolantes, quando tem somente a função de reduzir a troca de calor ou exotérmicas, quando a luva se queima e gera calor para aquecer o líquido, aumentando o tempo de solidificação do massalote.

Existem muitas variáveis envolvidas no processo de fundição e a tese de doutorado, usada como base para o estudo em questão, propõe um modelo matemático capaz de prever qual a combinação de níveis e variáveis que minimizam a formação de rechupes no processo de solidificação de peças fundidas em aço ABNT 1030 moldadas em areia com aglomerante químico e vazamento por gravidade. Na fase exploratória utilizou o planejamento de experimentos com fatorial fracionado e para validação utilizou-se o método Taguchi.

Para o experimento exploratório foram levados em consideração 15 variáveis, que são elas:

- A – Temperatura de vazamento;
- B – Quantidade de pó exotérmico sobre massalotes abertos;
- C – Tipo de luva ou “Fabricante de luva A e Fabricante de luva B”;
- D – Luva estufada para eliminar umidade e luva conforme era retirada da embalagem;
- E – Tempo de vazamento;
- F – Tempo da luva fora da embalagem;
- G – Luva fechada com ou sem concentrador de calor;
- H – Tempo, aguardando vazamento após moldagem;
- I – Percentual de óxido de ferro na areia;
- J – Percentual de alumínio adicionado no aço para desoxidação;
- L – Resistência da areia;
- M – Percentual de carbono equivalente no metal final;
- N – Percentual de carbono queimado ou oxidado no processo de elaboração do aço;

O – Tipo de pintura;

P – Sequencia de vazamento;

Depois das variáveis, seus respectivos níveis também foram definidos e formou-se a tabela 1.

Tabela 1: Variáveis estudadas e seus níveis para os experimentos exploratórios.

	Variáveis	Limite Inferior (-)	Limite Superior (+)
A	% Al na composição química do aço	0,03	0,09
B	% Carbono equivalente no metal final	0,415	0,513
C	% Óxido de ferro na areia de moldagem	2	4
D	Temperatura de vazamento	1540 °C	1600 °C
E	% Carbono queimado na elaboração do aço	0,05	0,3
F	Tempo aguardando vazamento após moldagem	4 horas	72 horas
G	Tipo de pintura	Spray	Lavagem
H	Tempo da luva fora da embalagem	0 dias	7 dias
I	Tipo de luva (Fabricante A ou B)	A	B
J	Umidade da luva	Ambiente	Ambiente
L	Resistência da areia em 1 hora	552 Kpa	689 Kpa
M	Quantidade pó exotérmico sobre o massalote	550 g	1650 g
N	Tempo de vazamento (segundos)	Menor que 25 s	Maior que 60 s
O	Luva com ou sem ponto concentrador de calor	Com ponto quente	Sem ponto quente
P	Sequência de vazamento	Primeiro vazado	Último vazado

Fonte: (ALVES, 2009)

Depois de definido as variáveis e seus respectivos níveis, foi escolhido o arranjo ortogonal a ser utilizado. Com se tratava de 15 variáveis um fatorial completo era inviável devido ao enorme número de experimentos. Logo se optou pelo fatorial fracionado com 16 condições experimentais. Para cada condição experimental foram realizadas duas réplicas. A resposta dos experimentos foi dada em volume de vazios (poros e rechupes) relacionados á solidificação, em centímetros cúbicos.

Na tabela 2 podemos visualizar o arranjo ortogonal utilizado para a análise exploratória.

Tabela 2: Arranjo ortogonal utilizado para análise exploratória.

Experimentos	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	-	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-
3	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-
4	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	+
5	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-
6	-	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	+
7	-	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
8	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-
9	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-
10	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
11	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+
12	-	-	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	
13	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+
14	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-
15	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
16	+	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+

Fonte: (ALVES, 2009)

Depois de fundidas as peças passaram por ensaios de ultrassom para detecção e localização dos defeitos. Assim que detectados os mesmos foram abertos e seus volumes foram calculados. Foi calculada a contribuição de cada variável para a formação do defeito e as variáveis com influência superior a 3% deveriam ser pesquisadas posteriormente.

Tabela 3: Resultado dos experimentos exploratórios com o valor da média de volume de defeitos e valor do percentual de contribuição na resposta.

Experimentos	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P	V (cm ³)
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	315
2	+	-	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	332
3	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	444
4	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	+	528
5	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-	820
6	-	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	+	180
7	-	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	479
8	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-	539
9	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-	1013
10	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	770
11	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+	701
12	-	-	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+		432
13	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	390
14	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	770
15	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	577
16	+	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	195
% Contribuição	14	18	14	8	11	0	3	0	3	11	0	4	0	0	14	

Fonte: (ALVES, 2009)

Para a próxima etapa foi utilizado o método Taguchi. A tabela 3 mostra o resultado dos experimentos exploratórios em volume médio de rechupes e a contribuição de cada variável na resposta

As variáveis com contribuição menor que 3% foram desconsideradas. São elas “F”, “H”, “L”, “N” e “O”. Para a segunda etapa de experimentos foram desconsideradas também as variáveis “I”, “J”, “M” e “P”. Porém a variável “F” foi reconsiderada devido ao resultado conflitante com a literatura de fundição. Desta forma ficaram sete variáveis para a segunda etapa de experimentos. São eles representados na tabela 4.

Tabela 4: Variáveis a serem avaliadas na segunda etapa de experimentos.

	Variáveis	Limite Inferior (-)	Limite Superior (+)
A	% Al na 29 ^o composição química do aço	0,03	0,09
B	% Carbono equivalente no aço	Menor que 0,4	Maior que 0,52
C	% Óxido de ferro na areia de moldagem	2	4
D	Temperatura de vazamento	1540°C	1600°C
E	% Carbono queimado na elaboração do aço	0,1	0,4
F	Tempo aguardando vazamento após moldagem	Até 8 horas	Mais que 24 horas
G	Processo de pintura utilizado para pintar o molde	Spray	Lavado

Fonte: (ALVES, 2009)

Para a próxima etapa foi escolhido um arranjo ortogonal que abrange as sete variáveis já selecionadas mais algumas interações, dando um total de treze. Foi escolhido então o arranjo ortogonal L16, utilizando-se o método “Número de Graus de Liberdade”, conforme descrito na página 24 que se segue na tabela 5.

Tabela 5: Arranjo ortogonal L16 utilizado como “Matriz de experimento”.

Experimentos	D	B	DB	A	V	BA	V	C	CD	E	DE	F	DF	G	DG
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
3	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+
4	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
5	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
6	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-
7	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-
8	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+
9	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
10	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-
11	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-
12	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+
13	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-
14	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+
15	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+
16	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-

Fonte: (ALVES, 2009)

As colunas vazias são representadas pela letra V, que foram usadas posteriormente para o cálculo do erro experimental.

A tabela 6 apresenta os resultados da segunda etapa de experimentos, a média dos volumes de defeitos encontrados e o cálculo da razão Sinal/Ruído para todas as condições experimentais, onde: H=DB; I=BA; L=CD; M=DE; O=DF; P=DG.

Tabela 6: Volume do rechupe por experimento e valores da média e razão (S/N).

Ex	D	B	H	A	V	I	V	C	L	E	M	F	O	G	P	VOLUME DE RECHUPES (cm ³)					
																Y1	Y2	Y3	Y4	Média	(S/N)
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,66	19,26	22,23	20,86	20,00	-26,05
2	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	19,94	17,21	19,96	19,19	19,08	-25,62
3	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	13,38	8,05	16,12	13,26	12,70	-22,30
4	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	20,58	13,84	13,78	17,79	16,50	-24,48
5	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	71,62	15,69	19,32	18,78	31,35	-31,68
6	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	19,62	17,91	4,65	9,37	12,89	-23,09
7	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	18,91	17,26	16,55	17,66	17,60	-24,92
8	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	1,65	7,65	13,08	0,81	5,80	-17,65
9	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	15,46	16,03	14,61	16,09	15,55	-23,84
10	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	4,14	5,03	19,81	17,63	11,65	-22,71
11	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	10,67	16,43	20,73	15,21	15,76	-24,17
12	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	16,63	19,87	24,98	11,17	18,16	-25,50
13	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	21,55	19,11	17,56	22,33	20,14	-26,12
14	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	18,89	17,78	20,07	12,39	17,28	-24,88
15	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	14,87	10,53	16,90	17,12	14,86	-23,57
16	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-	18,16	6,69	15,86	11,74	13,11	-22,81
																				16,40	-24,17

Fonte: (ALVES, 2009)

Observa-se que a melhor condição experimental foi a de número 8 com volume médio de defeitos igual a 5,8 cm³ e a pior condição experimental foi a de número 5 com volume médio de defeitos igual a 31,35 cm³. Para a razão Sinal/Ruído a melhor condição experimental também foi a de número 8, pois tem o maior valor (-17,65) e a pior condição experimental também foi a de número 5, pois tem o menor valor (-31,68).

A tabela 7 mostra a análise de variância ou ANOVA para a média dos efeitos nas respostas. Empregou-se um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 7: Análise de variância para média dos efeitos nas respostas.

Análise de variância. Volume de vazios ($f_{0,05 \ 1,6} = 5,9$)					
	SQ	gl	SMQ	F	p
D	2,97563	1	2,97563	0,372345	0,564110
DB	3,43176	1	3,43176	0,429422	0,536573
A	59,88825	1	59,88825	7,493922	0,033848
BA	37,96100	1	37,96100	4,750127	0,072113
C	60,00439	1	60,00439	7,508455	0,033729
CD	22,10175	1	22,10175	2,765631	0,147369
E	71,12814	1	71,12814	8,900389	0,024530
DE	47,35160	1	47,35160	5,925189	0,050873
F	16,60563	1	16,60563	2,077891	0,199531
Erro*	47,94946	6	7,99158		

Fonte: (ALVES, 2009)

Verifica-se que as variáveis de maior influência são as “A”, “C”, “E” e a interação “DE”. As variáveis “B”, “G” e as interações “DF” e “DG” apresentaram pouca significância, por isso foram utilizadas na estimativa do erro experimental. As variáveis “D”, “F” e as interações “DB”, “BA” e “CD” são de menor significância.

A tabela 8 mostra a análise de variância para a razão Sinal/Ruído. Empregou-se um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 8: Análise de variância para a razão Sinal/Ruído (S/N).

Análise de variância. S/N ($f_{0,05 \ 1,6} = 5,9$)					
	SS	df	MS	F	p
D	0,30323	1	0,30323	0,113628	0,747530
DB	0,32353	1	0,32353	0,121235	0,739590
A	21,58153	1	21,58153	8,087049	0,029421
BA	14,13862	1	14,13862	5,298035	0,060954
C	15,82833	1	15,82833	5,931205	0,050788
CD	9,45223	1	9,45223	3,541948	0,108852
E	24,51147	1	24,51147	9,184957	0,023078
DE	14,81271	1	14,81271	5,550630	0,056594
F	2,95295	1	2,95295	1,106532	0,333346
Erro*	16,01192	6	2,66865		

Fonte: (ALVES, 2009)

A análise de variância para a razão Sinal/Ruído aponta que as variáveis de maior influência são as “A”, “C”, “E” e a interação “DE”. O erro foi estimado utilizando as variáveis “B”, “G” e as interações “DF” e “DG”.

Calculando-se a análise de variância dos efeitos de todas as variáveis e interações na resposta temos a tabela 9. Empregou-se um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 9: Análise de variância dos efeitos de todas as variáveis e interações na resposta.

Análise de variância (Volume de vazios) ($f_{0,05 1,50} = 4,04$)					
	SQ	gl	SMQ	F	p
D	22,090	1	22,0900	0,343286	0,560574
B	3,276	1	3,2761	0,050912	0,822404
DB	6,027	1	6,0270	0,093662	0,760843
A	279,809	1	279,8093	4,348327	0,042171
BA	184,213	1	184,2128	2,862726	0,096878
C	280,311	1	280,3113	4,356129	0,049199
CD	113,476	1	113,4758	1,763450	0,190225
E	328,244	1	328,2438	5,101016	0,028306
DE	225,375	1	225,3752	3,502403	0,067136
F	88,360	1	88,3600	1,373143	0,246826
DF	3,960	1	3,9601	0,061541	0,805092
G	2,624	1	2,6244	0,040784	0,840775
DG	12,709	1	12,7092	0,197506	0,658660
Erro	3217,436	50	64,3487		

Fonte: (ALVES, 2009)

Pela tabela 9 confirma-se que as variáveis de maior significância são as “A”, “C” e “E”. Como o valor de “f” da interação “DE” está abaixo do “f” crítico, esta interação deixa de ser significativa.

A tabela 10 mostra a análise de variância dos efeitos de todas as variáveis para a razão Sinal/Ruído. Empregou-se um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 10: Análise de variância para a razão Sinal/Ruído (S/N).

Análise de variância. S/N ($f_{0,05} 1,50 = 4,04$)					
	SQ	gl	SMQ	F	p
D	6,9031	1	6,9031	0,351399	0,555994
B	20,5997	1	20,5997	1,048616	0,310755
DB	73,4419	1	73,4419	3,738510	0,058843
A	92,1174	1	92,1174	4,689175	0,035150
BA	89,2357	1	89,2357	4,542483	0,038003
C	165,4673	1	165,4673	8,423003	0,005498
CD	42,4639	1	42,4639	2,161599	0,147762
E	131,5528	1	131,5528	6,696610	0,012612
DE	142,4935	1	142,4935	7,253540	0,009605
F	0,3711	1	0,3711	0,018890	0,891235
DF	24,4401	1	24,4401	1,244106	0,270013
G	61,2323	1	61,2323	3,116990	0,083586
DG	4,4922	1	4,4922	0,228670	0,634596
Erro	982,2344	50	982,2344		

Fonte: (ALVES, 2009)

De acordo com os resultados dos experimentos e análise de variância, concluiu-se que as variáveis de maior influência são as “A”, “C”, “E” e a interação “DE”.

2.5 MÉTODO DESIRABILITY

Um problema muito comum no desenvolvimento de um produto ou de um processo é encontrar um conjunto de condições ou níveis das variáveis de entrada que produza o produto, ou processo mais desejável. A função *desirability* é um método utilizado na otimização de um processo com múltiplas respostas, que se baseia na ideia de que a qualidade de um produto ou processo que possui múltiplas características de qualidades, mesmo com apenas uma das características fora dos limites desejados, é considerada inaceitável.

Para cada uma das respostas $Y_i(x)$ a função *desirability* $d_i(Y_i)$ assume um valor entre 0 e 1, onde $d_i(Y_i) = 0$ representa um valor completamente indesejável de $Y_i(x)$ e $d_i(Y_i) = 1$ representa um valor completamente desejável de $Y_i(x)$.

O valor da *desirability* pode ser interpretado, segundo Harrington (1965), em:

- $1 \leq d < 0,8$: Excelente;
- $0,8 \leq d < 0,63$: Bom;

- $0,63 \leq d < 0,37$: Aceitável, mas medíocre;
- $0,37 \leq d < 0,2$: Limite do aceitável;
- $0,2 \leq d < 0$: Pobre.

Através das médias geométricas das *desirability* individuais podemos calcular a chamada *desirability* Global (D), conforme demonstrado pela equação 1.

$$D = (d_1(Y_1) \times d_2(Y_2) \times d_3(Y_3) \dots d_k(Y_k))^{1/k} \quad (1)$$

Onde: k representa o número de *desirability* individuais. É importante frisar que para qualquer $d_i(Y_i) = 0$, torna a *desirability* Global indesejável ($D = 0$).

A equação (1) é utilizada quando todas as respostas têm o mesmo grau de importância. Quando isto não acontecer deve-se utilizar a equação (2):

$$D = [\prod_{i=1}^n d_i^{w_i}]^{1/W} \quad (2)$$

Onde: w_i representa o grau de importância de cada resposta individual e W a soma dos graus de importância de todas as respostas.

Uma função *desirability* pode ser de maximização, minimização e normalização, dependendo do valor de resposta desejado. Estas classes de funções foram proposta por Derringer e Suich (1980). São utilizados as letras L, U e T, que são respectivamente o ponto mais baixo (*lower*), mais alto (*upper*) e valor-alvo (*target*). As funções são:

- Normalização – Se a resposta é do tipo “quanto mais no alvo melhor”. Quando o valor T de uma resposta está entre o limite máximo U e o limite mínimo L, a função é dada por:

$$d = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{se } Y < L \text{ ou } Y > U \\ \{(Y - L) / (T - L)\}^{s'} & \text{se } L \leq Y \leq T \\ \{(U - Y) / (U - T)\}^{t'} & \text{se } T \leq Y \leq U \end{array} \right\}$$

- Maximização – Se a resposta é do tipo “quanto maior melhor”. Quando o valo T deve atingir o valor máximo da função, a função é dada por:

$$d = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{se } Y < L \\ \{(Y - L) / (T - L)\}^{s'} & \text{se } L \leq Y \leq T \\ 1 & \text{se } Y > T \end{array} \right\}$$

- Minimização – Se a resposta é de tipo “quanto menor melhor”. Quando o valor T deve atingir o valor mínimo da função, a função é dada por:

$$d = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{se } T < Y \\ \{(U - Y) / (U - T)\} & \text{se } T \leq Y \leq U \\ 0 & \text{se } Y > U \end{array} \right\}$$

Quadro 1: Objetivos da otimização do Método de Derringer e Suich.

Objetivo	Características	Representação Esquemática
Minimizar	O valor da função <i>desirability</i> aumenta enquanto que o valor da resposta original se aproxima de um valor alvo mínimo. Abaixo do alvo, $d = 1$; acima do limite superior, $d = 0$	
Normalizar	Quando a resposta se move em direção alvo, o valor da função <i>desirability</i> aumenta. Acima ou abaixo dos limites, $d = 0$; no alvo $d = 1$.	
Maximizar	O valor da função <i>desirability</i> aumenta quando o valor da resposta aumenta. Abaixo do limite inferior, $d = 0$; acima do alvo, $d = 1$.	

Fonte: (PAIVA, 2006)

Os parâmetros s' e t' são fatores de ponderação, estes fatores determinam o quão importante é acertar o valor-alvo. Para $s = t = 1$ a função *desirability* aumenta linearmente em

relação a T. Para $s < 1$ e $t < 1$ a função é convexa e para $s > 1$ e $t > 1$ a função é côncava, porém os valores de s' e t' podem ser diferentes, ou seja, eles não precisam ser simétricos. Os valores dos parâmetros dependerão da importância ou prioridade que se deseja atribuir a cada resposta. Ao atribuir valores elevados para s' e t' somente será possível atingir um valor alto da *desirability* quanto estiver muito próximo do valor ótimo desejado. No entanto, ao atribuir valores baixos para s' e t' será possível atingir um valor alto da *desirability* mesmo se não estiver próximo do valor ótimo desejado, como observado no Quadro 2.

Quadro 2: Relação de importância entre o alvo e os limites no *desirability*.

 Peso=0,1 d = 0 d = 1 Alvo	Se o peso é menor que 1 (valor mínimo é 0,1), então, menos ênfase se dá ao alvo.
 Peso=1,0 d = 0 d = 1 Alvo	Quando o peso é igual a 1, a importância dada ao alvo é igual à importância dada aos limites.
 Peso=10,0 d = 0 d = 1 Alvo	Se o peso dado à resposta é maior do que 1 (o valor máximo é 10), então, mais ênfase é dada ao alvo.

Fonte: (PAIVA, 2006)

As variações de soluções com diferentes valores de s' e t' nos mostram o quão robusto é o experimento, pois se as soluções forem insensíveis a variação de s' e t' , significa que o experimento é robusto.

Apesar do método *desirability* ser muito utilizado ele possui algumas desvantagens. Segundo Khuri e Conlon (1981) as múltiplas respostas são aglutinadas. Já segundo Wu (2005) uma das desvantagens deste método é não levar em consideração a estrutura de variância-covariância das respostas. Outra desvantagem, segundo Ortiz (2004), é o aumento da não linearidade que ocorre quando há um aumento de variáveis de respostas e a possível obtenção de ótimo local e não global como é desejado.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

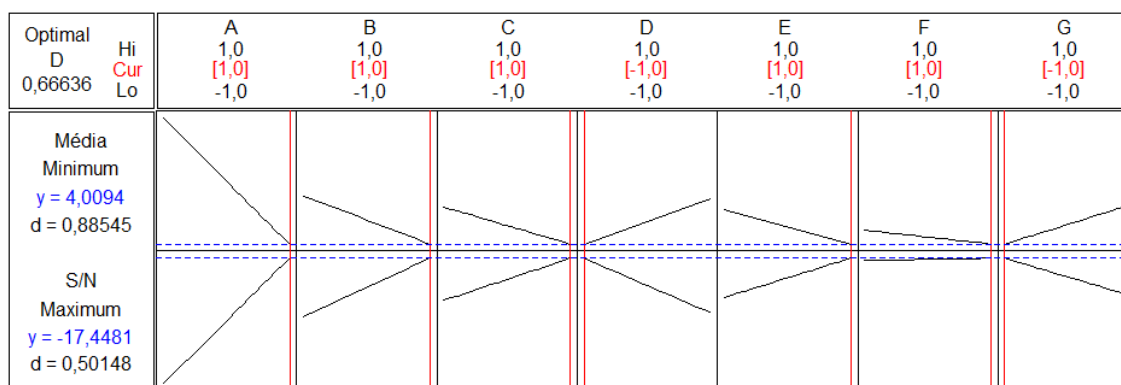
Com o auxílio do *software* MINITAB RELEASE 14 buscou-se a otimização das variáveis respostas razão Sinal/Ruído (S/N) e volume de rechupes. Ao optar pela função de minimização para a variável resposta razão Sinal/Ruído (S/N) o *software* travou a coluna referente ao valor mais baixo (*lower*) e ao optar pela função de maximização para a variável resposta volume de rechupes o *software* travou a coluna referente ao valor mais alto (*upper*). Nas tabelas referentes aos valores de L, T e U as colunas travadas estão marcadas com fundo verde.

A figura 3 mostra os valores das *desirability* individuais para cada variável resposta, a *desirability* global e em quais níveis os fatores precisam ser ajustados para os valores referentes a Tabela 11.

Tabela 11: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 3: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 11.



Fonte: (Autor)

Para a primeira medida atribuiu-se o valor de 0 (zero) para o valor-alvo (*target*), pois o ideal em uma fundição é a não formação de volume de rechupe e uma razão de Sinal/Ruído de valor 0 (zero). Para a média, o primeiro valor atribuído foi 35 para U, pois a pior condição experimental teve volume médio de defeitos igual a 31,35 cm³. Já para a razão Sinal/Ruído o

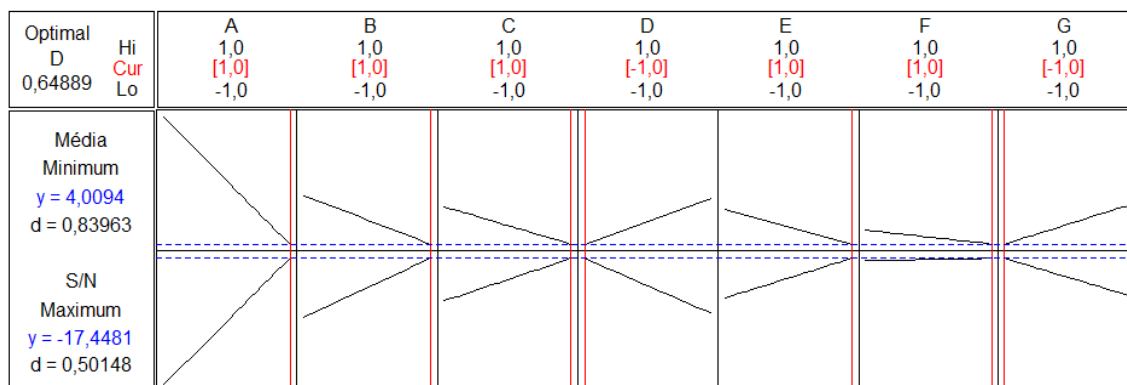
primeiro valor atribuído foi de -35 para L, pois a pior condição experimental teve o menor valor igual a -31,68.

Nota-se que, nestas condições, o valor da *desirability* global (D) foi aproximadamente de 0,67, sendo considerada esta apenas como “boa”. A *desirability* da média foi de aproximadamente 0,88, sendo esta considerada “excelente”. Já a *desirability* do S/N foi de aproximadamente 0,50, ou seja, considerada “aceitável, mas medíocre”.

Tabela 12: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	25	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 4: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 12.



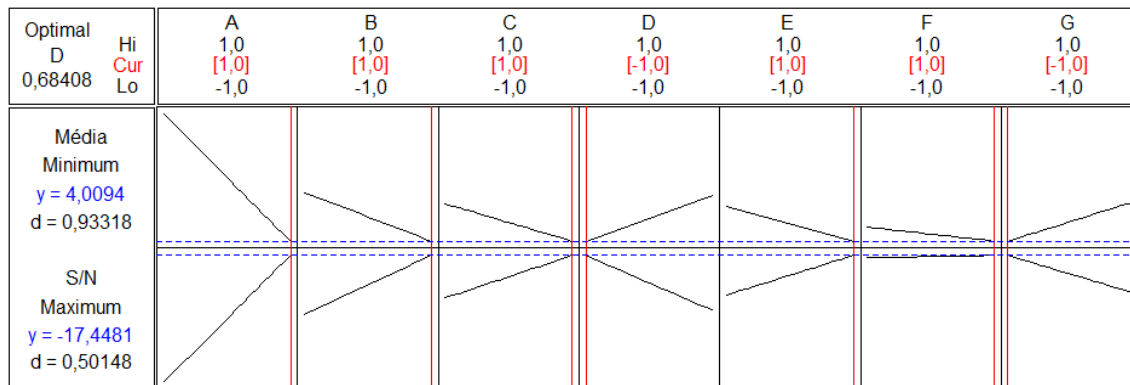
Fonte: (Autor)

Para a próxima medição manteve-se o valor atribuído para S/N e diminuiu-se o valor atribuído para a média, como observado nas condições da Tabela 12. Desta maneira constatou-se que o valor da *desirability* global e da média diminuíram, Figura 4. Como a intenção é de aumentar o valor da *desirability*, o próximo passo foi aumentar os valores atribuídos para a média, mantendo o mesmo valor atribuído ao S/N, como demonstra a Tabela 13. Deve-se mudar o valor atribuído na variável resposta um de cada vez a fim de compreender o comportamento da variável.

Tabela 13: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	60	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 5: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 13.



Fonte: (Autor)

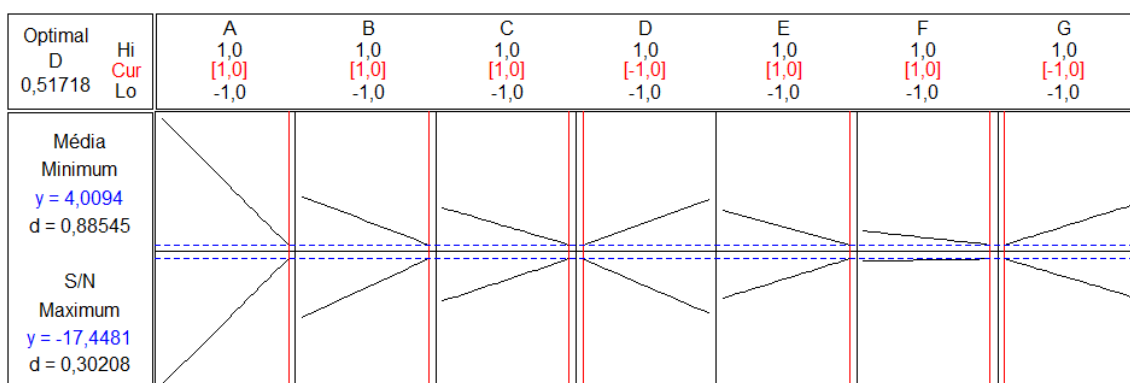
Mesmo aumentando o valor de U (média) para 60, ainda assim temos um valor da *desirability* global baixo (aproximadamente 0,68). Aumentando pouco a pouco o valor de U para a média e mantendo o mesmo valor da S/N observou-se que, para valores atribuídos acima de 60, pouco se nota de diferença no valor da *desirability*, como observado nos dados do Anexo 1.

O próximo passo foi fixar o valor inicial para a média e trabalhar somente com a variação dos valores de S/N.

Tabela 14: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-25	0	0	1	1

Figura 6: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 14.



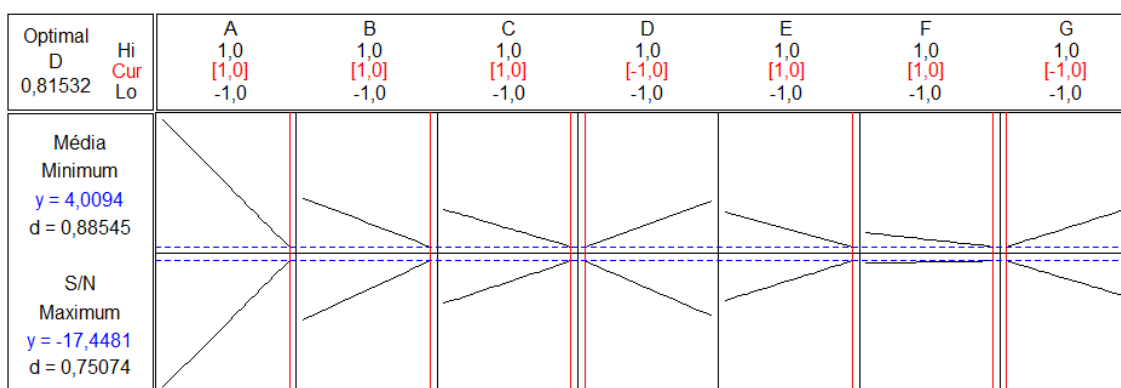
Fonte: (Autor)

Ao atribuir um valor maior para o S/N constatou-se uma queda no valor da *desirability*, tanto de S/N quanto da global, logo deve-se atribuir valores menores para a S/N, pois a intenção é de aumentar o valor da *desirability*.

Tabela 15: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-70	0	0	1	1

Figura 7: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 15.



Fonte: (Autor)

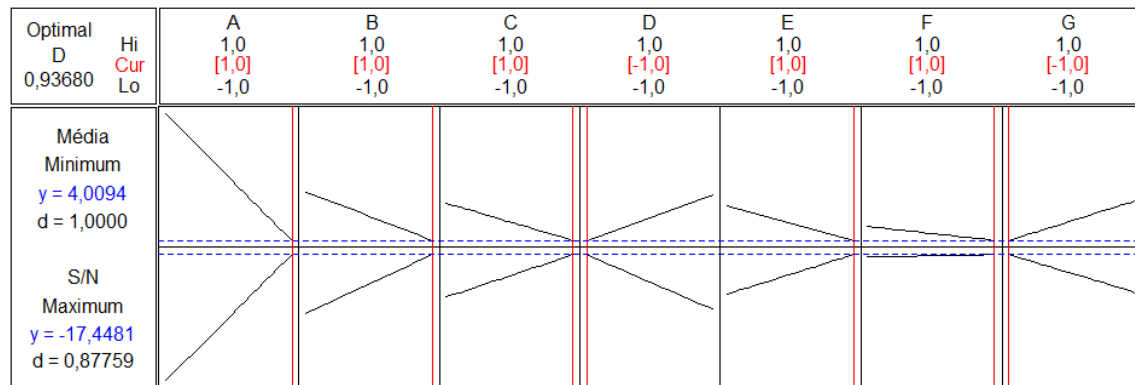
Diminuindo pouco a pouco o valor de L para o S/N e mantendo o mesmo valor da média observa-se que, para valores atribuídos abaixo de -70, pouco se nota de diferença no valor da *desirability*, como observado nos dados do Anexo 1. Para os parâmetros correspondentes da Tabela 15, temos uma *desirability* global excelente de aproximadamente 0,81.

Para a segunda etapa do experimento mudou-se os valores de T. Para a média adotou-se o valor de 5, pois este está próximo da melhor condição experimental que foi de volume médio de defeitos igual a 5,8 cm³. Já para o S/N adotou-se o valor de -15, pois este está próximo da melhor condição experimental que teve o valor de -17,65. Os valores iniciais de U, para a média, e L, para o S/N, foram os mesmos pelos mesmos motivos já citados.

Tabela 16: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-35	-15	-15	1	1

Figura 8: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabelas 16 e 17.



Fonte: (Autor)

Nestas condições, observa-se que a *desirability* da média esta no seu melhor valor, ou seja, $d = 1$ e a *desirability* global esta com um valor bom, aproximadamente de 0,94.

Tabela 17: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	6	1	1
S/N	-35	-15	-15	1	1

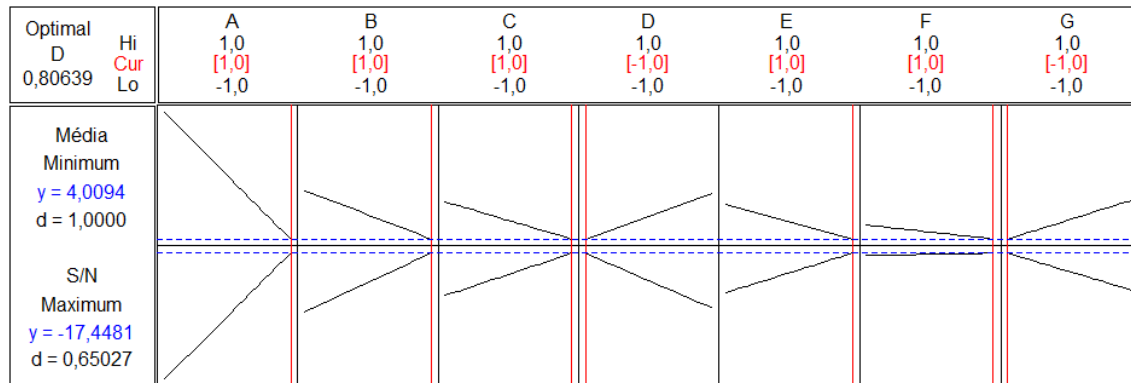
Mesmo diminuindo o valor de U (média) para próximo do T (média) o valor da *desirability* não altera, sendo ainda $d = 1$.

Mantendo o valor inicial para U (média) e alterando o valor de L (S/N) percebe-se que, ao aumentar o valor de S/N, diminui-se o valor da *desirability*.

Tabela 18: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-22	-15	-15	1	1

Figura 9: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 18.



Fonte: (Autor)

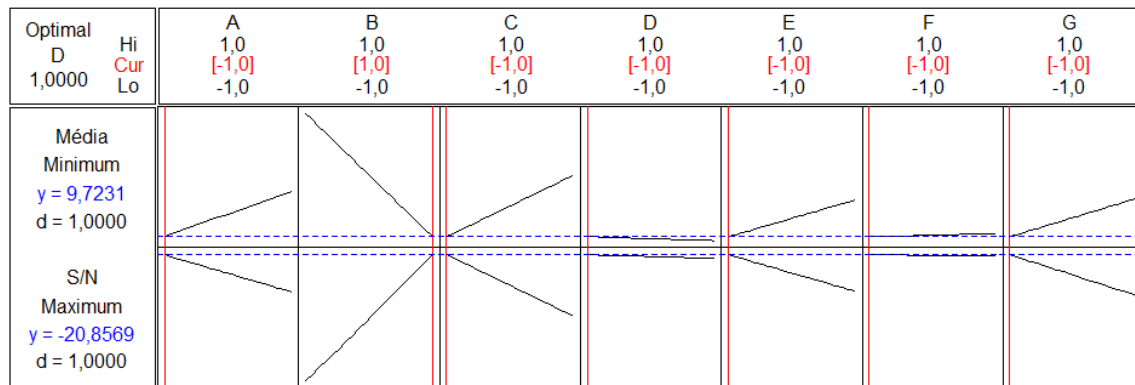
Para os parâmetros da Tabela 18, considera-se um excelente valor de *desirability* global, pois D está próximo a 0,81. Quando mais se diminui o valor de S/N, maior se torna o valor da *desirability* e quanto mais se diminui o valor de S/N, menos se nota diferença entre os valores encontrados da *desirability*, como observado nos dados do Anexo 2.

Para a terceira etapa do experimento mudou-se os valores de T novamente. Para a média adotou-se o valor de 16,4, valor igual à média das médias. Já para S/N adotou-se o valor de -24,17, valor este igual à média dos S/N. Observou-se que, não importando os valores de L (para S/N) e U (para média), ambas as *desirability* (média e S/N) e a *desirability* global (D) são iguais a 1.

Tabela 19: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	16,4	16,4	35	1	1
S/N	-35	-24,17	-24,17	1	1

Figura 10: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabelas 19 e 20.



Fonte: (Autor)

Tabela 20: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	16,4	16,4	16,5	1	1
S/N	-25	-24,17	-24,17	1	1

4 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS

Analisando as simulações discutidas acima, constatou-se que, para os valores ideais, ou seja, $T = 0$ tanto para média quanto para o S/N há uma dificuldade maior em obter uma *desirability* de bom valor. A partir de certo momento, mesmo com um grande aumento do valor do U ou L o valor da *desirability* não sofre alteração significativa.

Quando se atribui valores para T próximo aos valores das melhores condições experimentais, torna-se mais fácil alcançar uma *desirability* aceitável, porém assim como acontece para valores ideais de T, a partir de certo momento nem mesmo um grande aumento do valor do U ou L, faz com que o valor da *desirability* sofra mudança significativa.

Em ambos os casos os níveis dos fatores mantiveram equivalentes, sendo os fatores “A”, “B”, “C”, “E” e “F” ajustados no nível alto como resposta otimizada e apenas 2 fatores no nível baixo, “D” e “G”. Observou-se também uma dificuldade maior em conseguir manter a Razão Sinal/Ruído com um bom valor de *desirability* em relação ao valor da Média, esta que em geral manteve-se pelo menos excelente ($d > 0,8$).

A tese de doutorado concluiu que os fatores “A”, “B”, “C”, “F” e “G” devem ser ajustados no nível alto, já os fator “D” e “E” devem ser ajustados no nível baixo.

Quando o valor-alvo foi igual às médias da Média e do S/N, em todas as situações a *desirability* foi desejável ($d = 1$). Quase todos os fatores, com exceção do “B”, foram ajustados para o nível baixo.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho tem por objetivo a aplicação do método *desirability*, comparando o resultado obtido pelo método em questão com o Taguchi. Os dados, média de volume de rechupes produzidos e razão Sinal/Ruído, foram inseridos no programa MINITAB para análise da função *desirability*, sendo estes tratados como variável resposta. Atribuindo-se diferentes valores para ambas as variáveis concluiu-se que, dos sete fatores selecionados, cinco deles obtiveram ajuste semelhante e dois diferentes, aos ajustes propostos pela tese de doutorado.

Com relação aos fatores que mais influenciaram a formação de vazios, segundo a tese de doutorado usada como base do estudo em questão, os fatores “A” e “C” tiveram os mesmos ajustes que os encontrados com a ferramenta *desirability*, porém o fator “E” foi ajustado no nível alto com a ferramenta *desirability* e foi ajustado no nível baixo na tese de doutorado.

A ferramenta *desirability* se mostrou eficiente, mesmo para objetivos ideais impossíveis de se conseguir, como volume de rechupe 0 (zero) ou Razão Sinal/Ruído 0 (zero) também.

Não podemos afirmar quais fatores influenciam mais na formação de vazios, pois o método *desirability* fornece apenas o ajuste e não a influência do fator.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se explorar a otimização de múltiplas respostas através de outros métodos como Programação por Compromisso, Método da Métrica Ponderada, Erro Quadrático Médio, Algoritmo Genético, Recozimento Simulado, entre outros.

Além disso, pode-se desenvolver um trabalho abordando este tema, porém com dados retirados de experimentos, ou invés de dados retirados de outras teses ou trabalhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, L. H. D. **Utilização do Método de Taguchi na Modelagem e Otimização de Vazios Relacionados à Solidificação em Processos de Fundição de Aço ABNT 1030I**. 2009. 148 P. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Área de Concentração em Gestão e Otimização) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

CAMPOS, M. S. **Desvendando o MINITAB**. Rio de Janeiro: Qualitymark, p. 195-230, 2003.

COLEMAN, D. E.; MONTEGOMERY, D. C. (1993). A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. *Technometrics*, v.35, n.1.

DERRINGER, G., SUICH, R. **Simultaneous Optimization of Several Response Variables**. *Journal of Quality Technology*, v 12, n 4, pp.214-219, 1980.

Eberly College of Science em: <https://onlinecourses.science.psu.edu/stat503/node/6> . Acesso em 10 dez. 2015.

HARRINGTON, E. C. **The desirability function**. *Industrial Quality Control*. 1965.

KHURI, A. I., CONLON, M. **Simultaneous optimization of multiple responses represented by polynomial regression functions**. *Technometrics*, v 23, n4, p.363-375, 1981.

LAIATE, J. **Utilização da Função *Desirability* na otimização de processos com múltiplas respostas**. 2010. 77 f. Trabalho de Graduação (Engenharia de Produção Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

PADKE, M. S. **Quality Engineering Using Robust Design**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York, 1989.

PAIVA, A. P. **Metodologia de superfície de resposta e análise de componentes principais em otimização de processos de manufatura com múltiplas respostas correlacionadas**. Tese (Doutorado em Projeto e Fabricação) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, p. 229, 2006.

Portal Action. Disponível em: <http://www.portalaction.com.br/> . Acesso em 25 set. 2014.

Portal de conhecimentos. Disponível em:
<http://www.portaldeconhecimentos.org.br/index.php/por> . Acesso em 25 set. 2014.

TAGUCHI, G. Introduction to quality engineering: design quality into products and process. 1986, Tokio. **Asian Productivity Organization**.

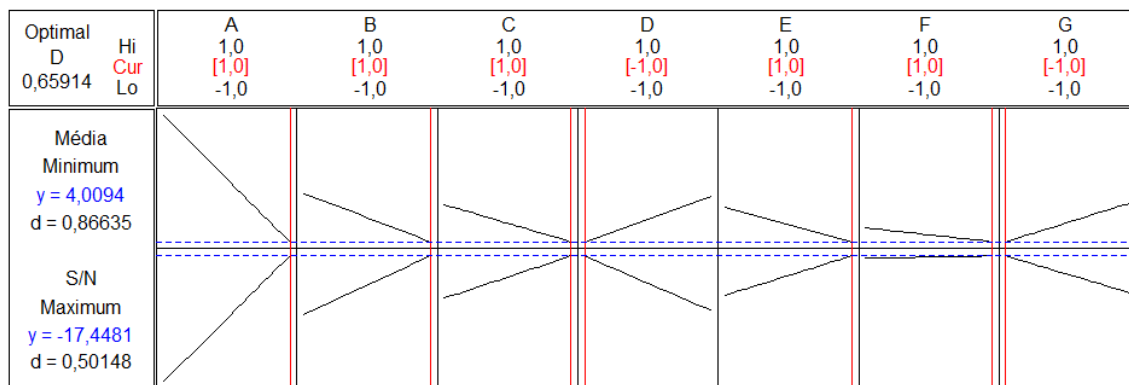
WU, F. C. **Optimization of correlated multiple quality characteristics using desirability function**. Quality Engineering, v. 17, n. 1, p. 119-126, 2005.

ANEXO A - Valores Target (Média = 0 e S/N = 0)

Tabela 21: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	30	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 11: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 21.

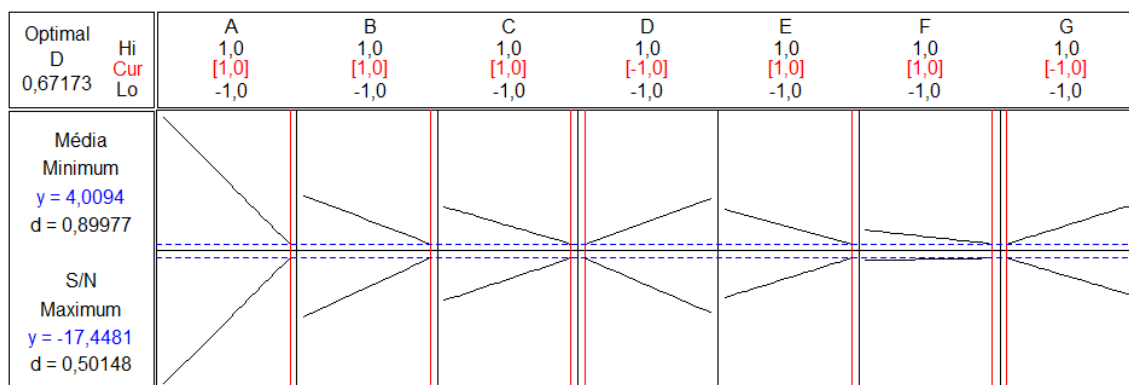


Fonte: (Autor)

Tabela 22: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	40	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 12: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 22.

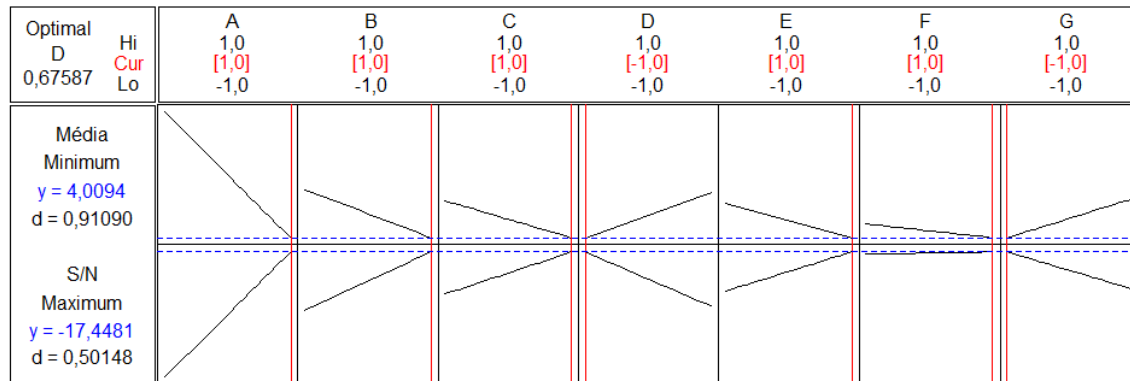


Fonte: (Autor)

Tabela 23: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	45	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 13: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 23.

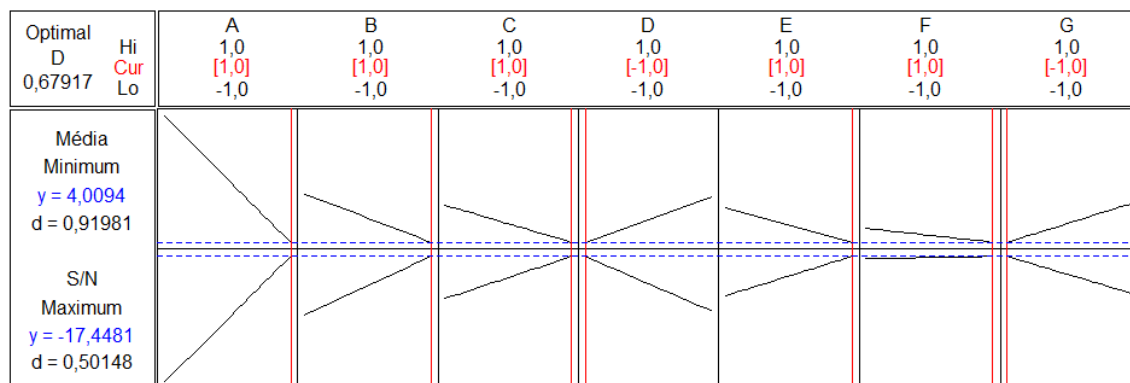


Fonte: (Autor)

Tabela 24: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	50	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 14: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 24.

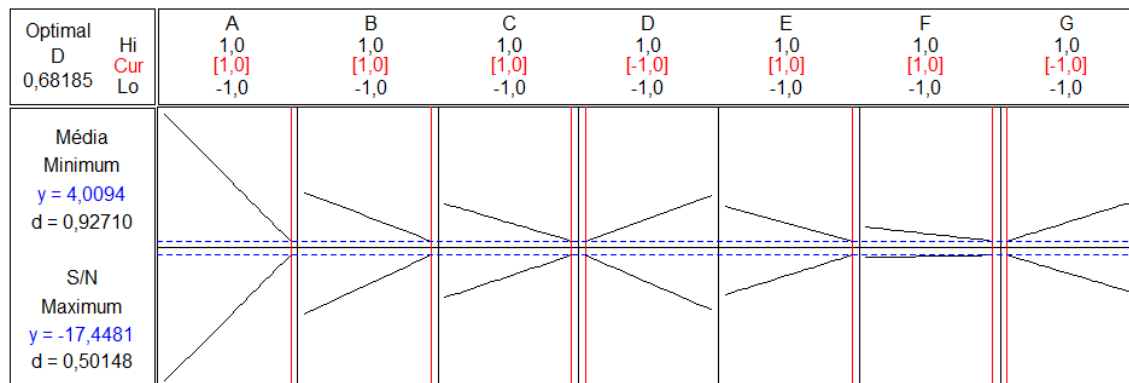


Fonte: (Autor)

Tabela 25: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	55	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 15: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 25.

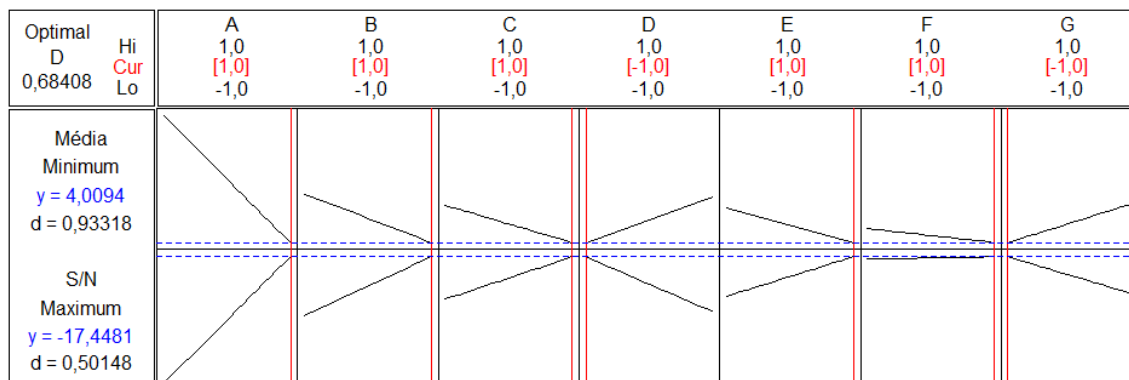


Fonte: (Autor)

Tabela 26: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	60	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 16: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 26.

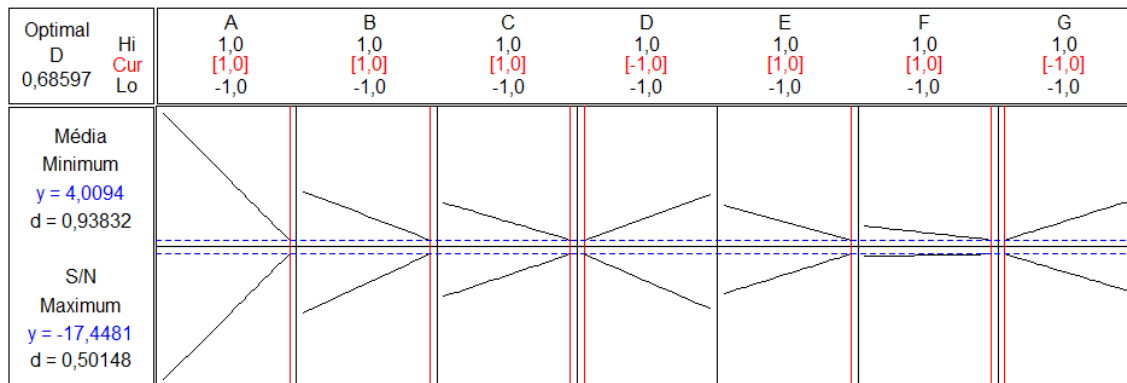


Fonte: (Autor)

Tabela 27: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	65	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 17: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 27.

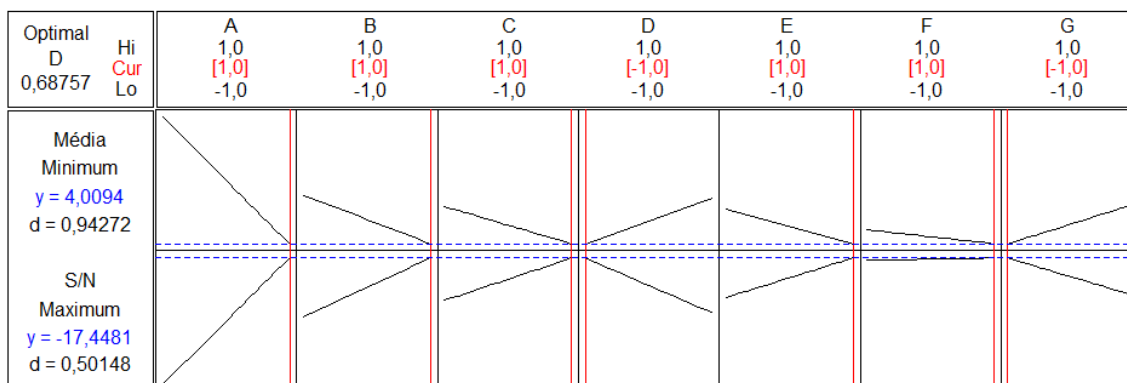


Fonte: (Autor)

Tabela 28: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	70	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 18: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 28.

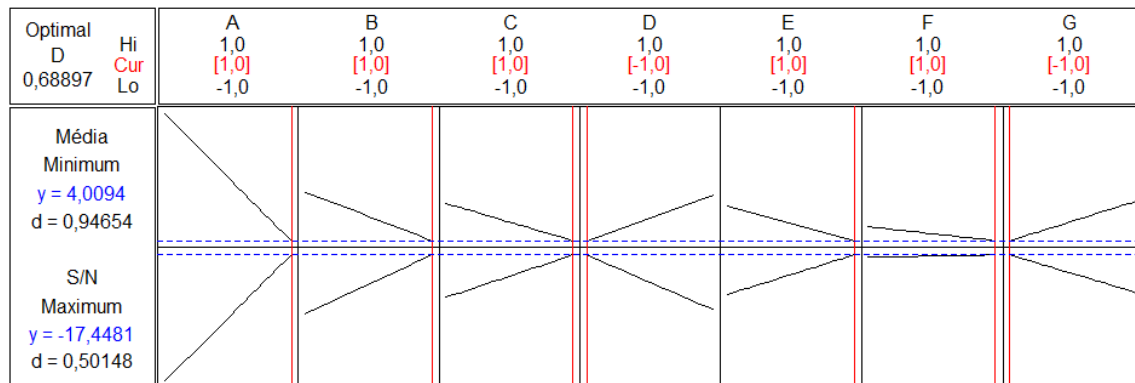


Fonte: (Autor)

Tabela 29: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	75	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 19: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 29.

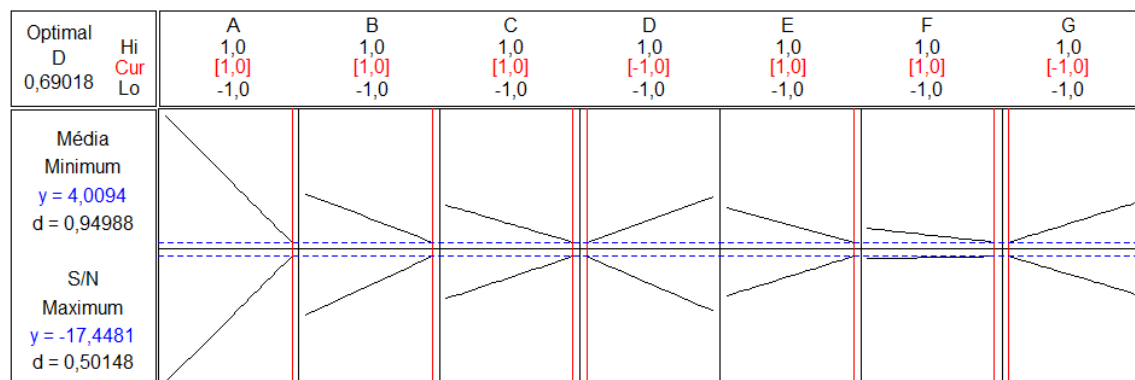


Fonte: (Autor)

Tabela 30: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	80	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 20: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 30.

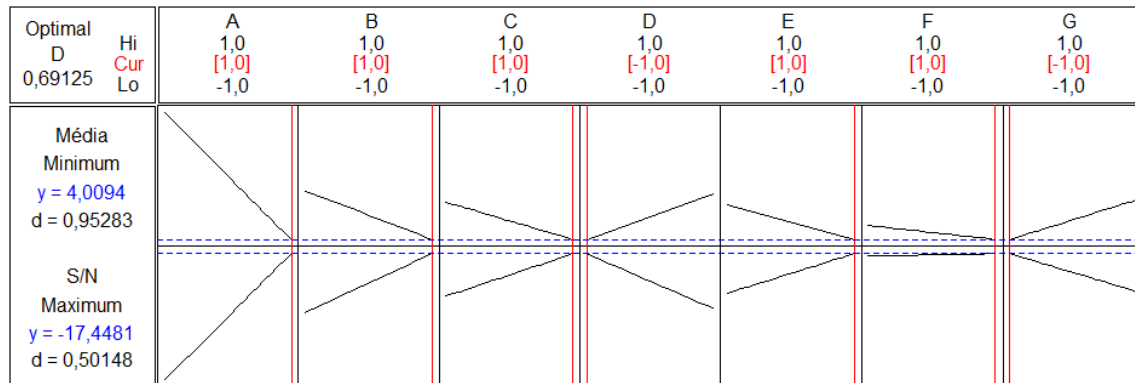


Fonte: (Autor)

Tabela 31: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	85	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 21: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 31.

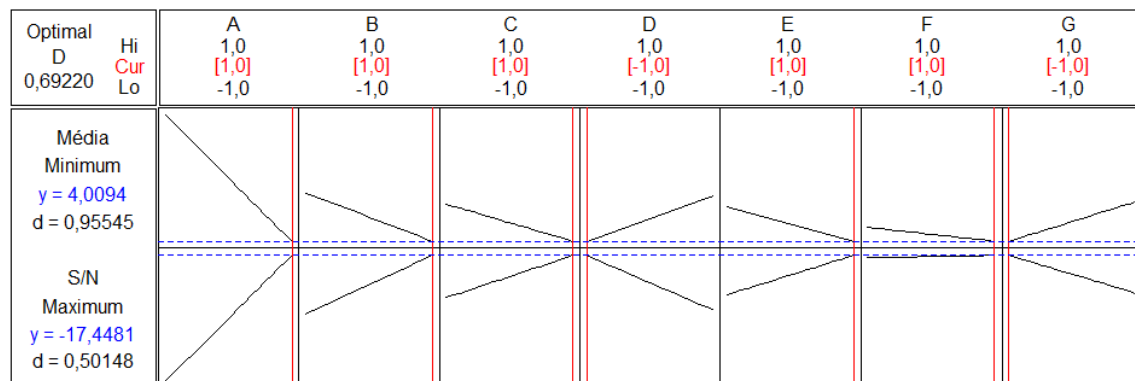


Fonte: (Autor)

Tabela 32: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	90	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 22: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 32.

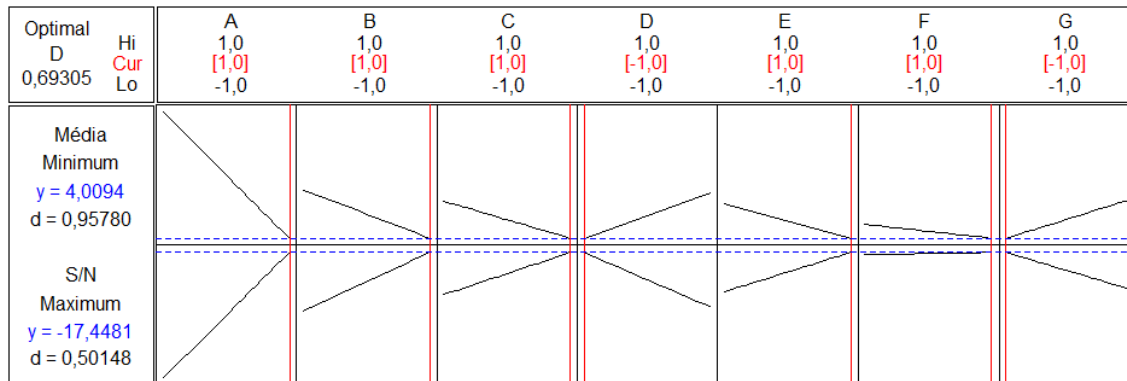


Fonte: (Autor)

Tabela 33: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	95	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 23: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 33.

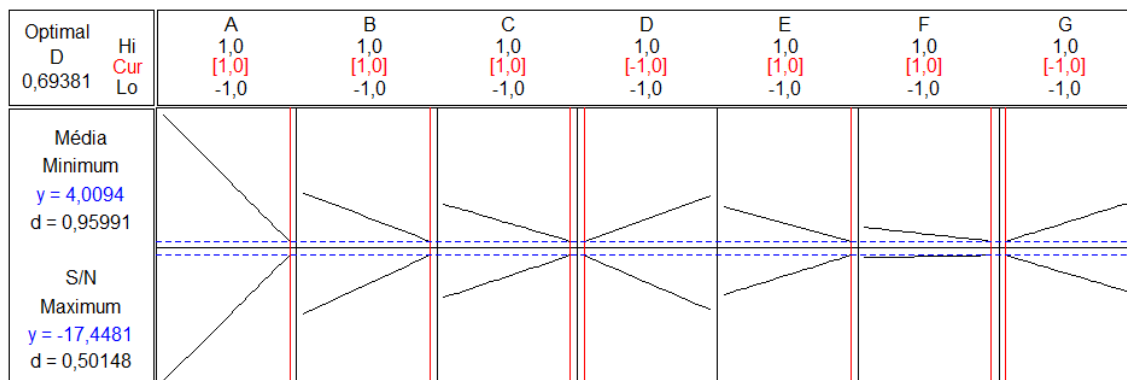


Fonte: (Autor)

Tabela 34: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	100	1	1
S/N	-35	0	0	1	1

Figura 24: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 34.

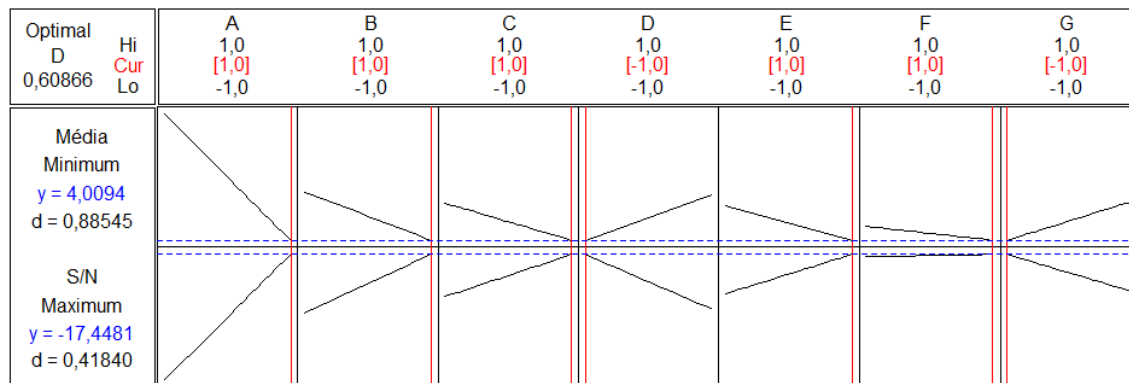


Fonte: (Autor)

Tabela 35: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-30	0	0	1	1

Figura 25: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 35.

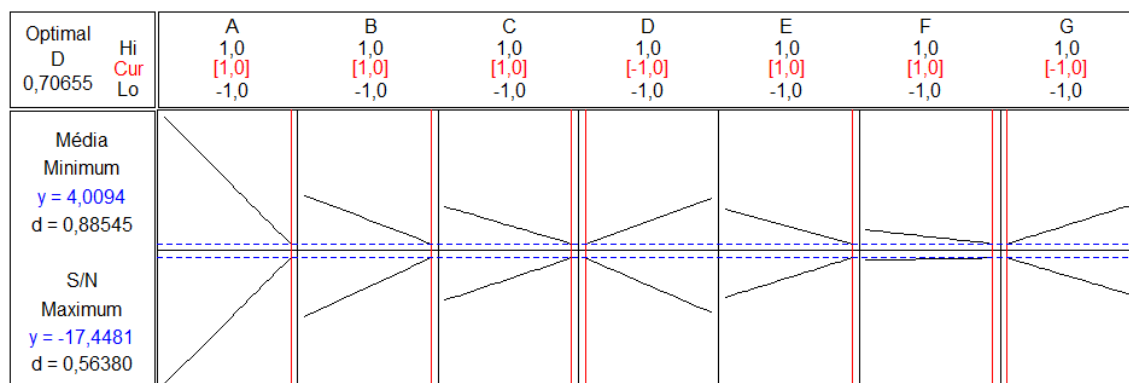


Fonte: (Autor)

Tabela 36: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-40	0	0	1	1

Figura 26: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 36.

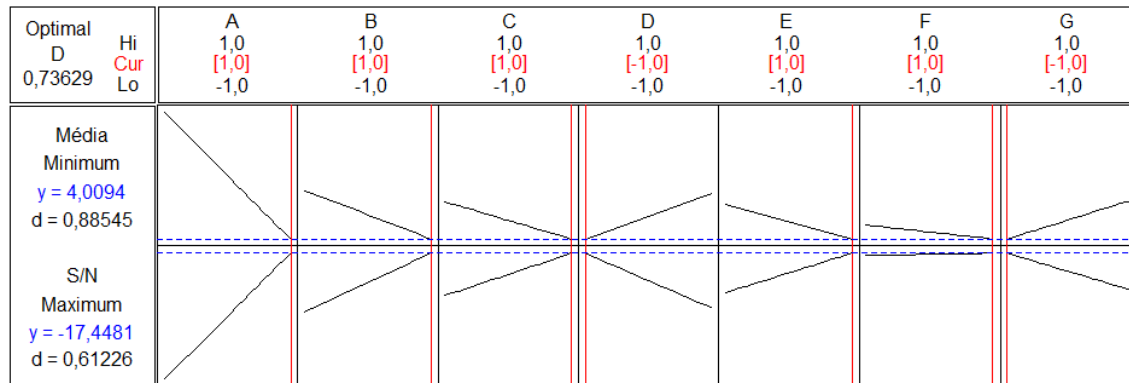


Fonte: (Autor)

Tabela 37: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-45	0	0	1	1

Figura 27: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 37.

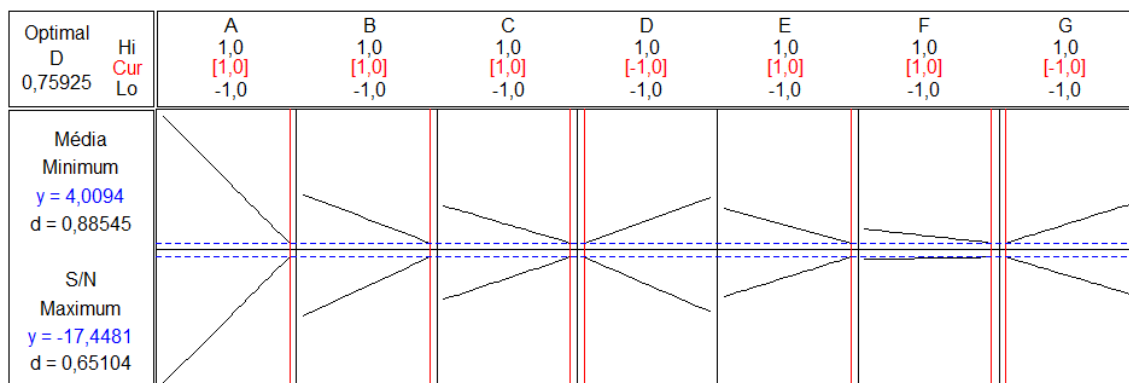


Fonte: (Autor)

Tabela 38: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-50	0	0	1	1

Figura 28: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 38.

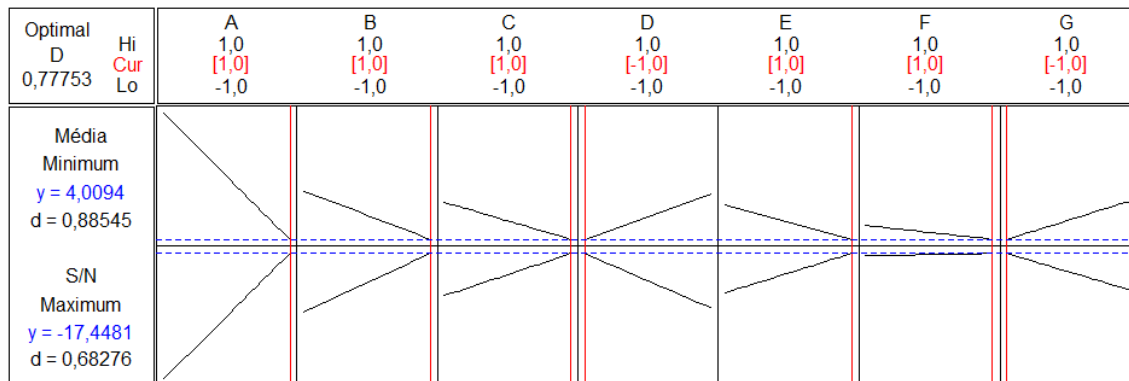


Fonte: (Autor)

Tabela 39: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-55	0	0	1	1

Figura 29: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 39.

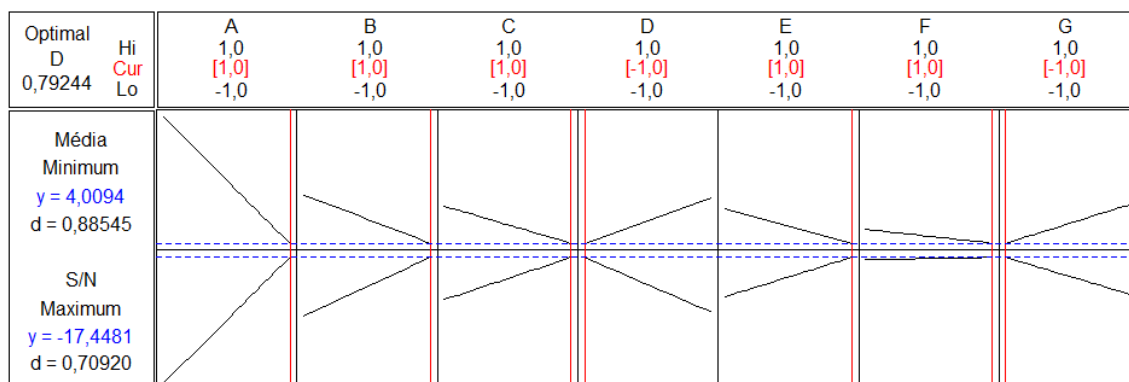


Fonte: (Autor)

Tabela 40: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-60	0	0	1	1

Figura 30: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 40.

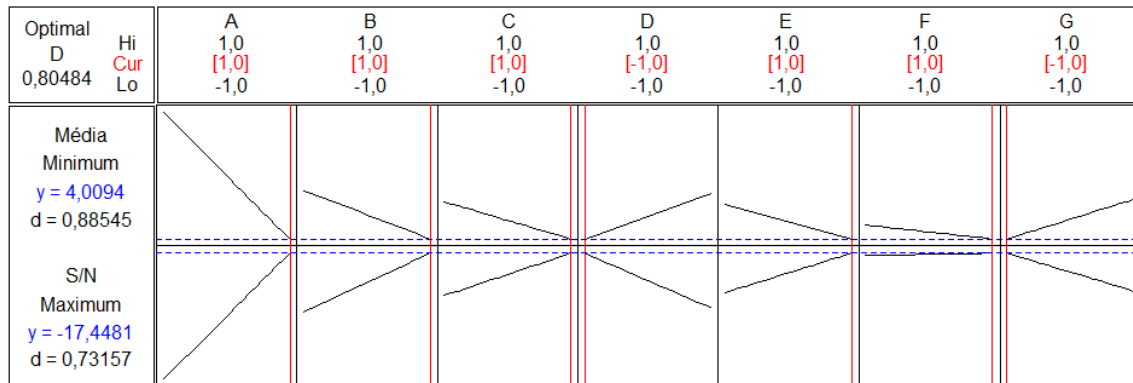


Fonte: (Autor)

Tabela 41: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-65	0	0	1	1

Figura 31: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 41.

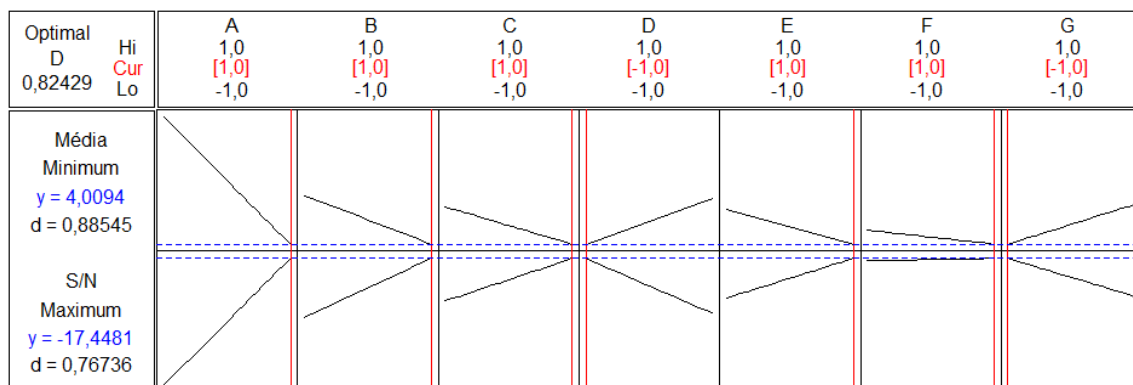


Fonte: (Autor)

Tabela 42: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-75	0	0	1	1

Figura 32: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 42.

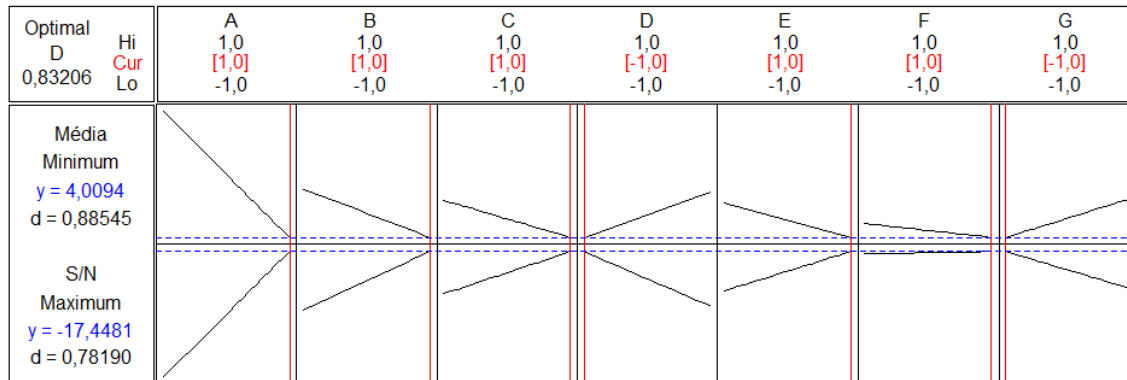


Fonte: (Autor)

Tabela 43: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-80	0	0	1	1

Figura 33: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 43.

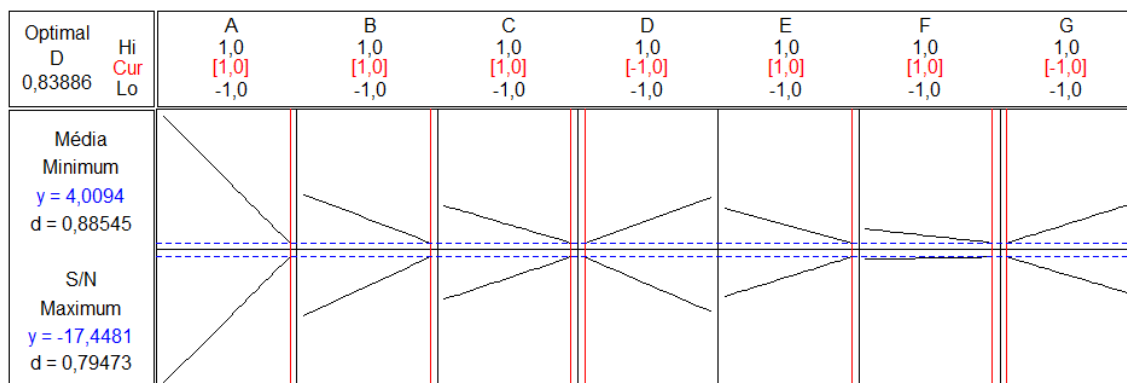


Fonte: (Autor)

Tabela 44: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-85	0	0	1	1

Figura 34: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 44.

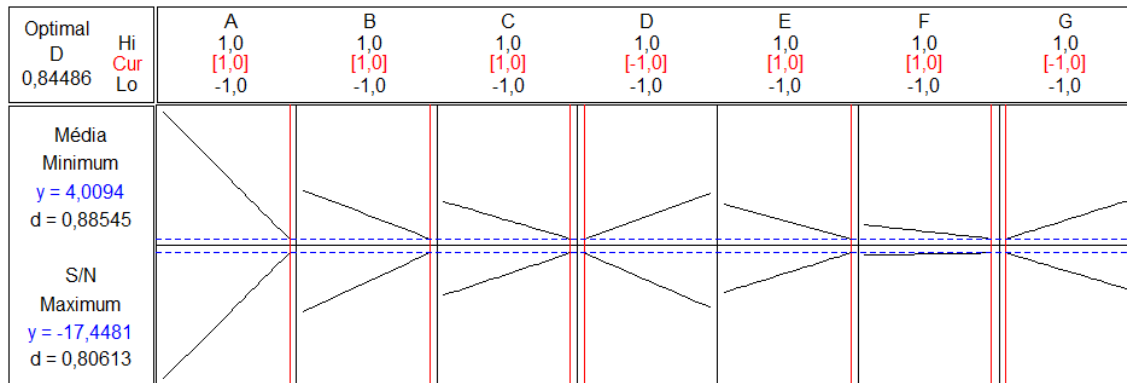


Fonte: (Autor)

Tabela 45: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-90	0	0	1	1

Figura 35: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 45.

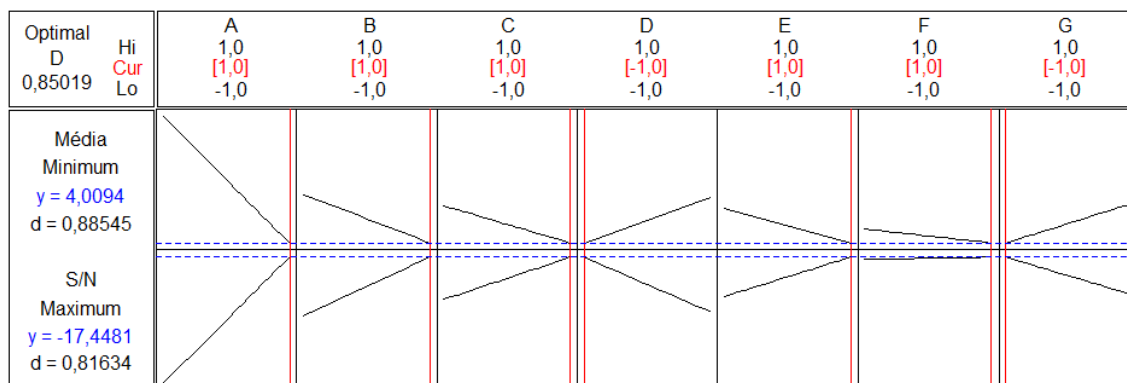


Fonte: (Autor)

Tabela 46: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-95	0	0	1	1

Figura 36: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 46.

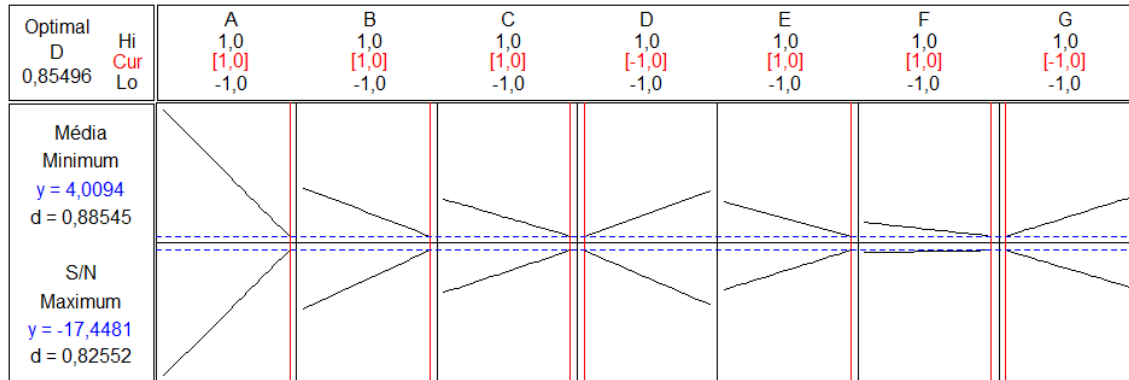


Fonte: (Autor)

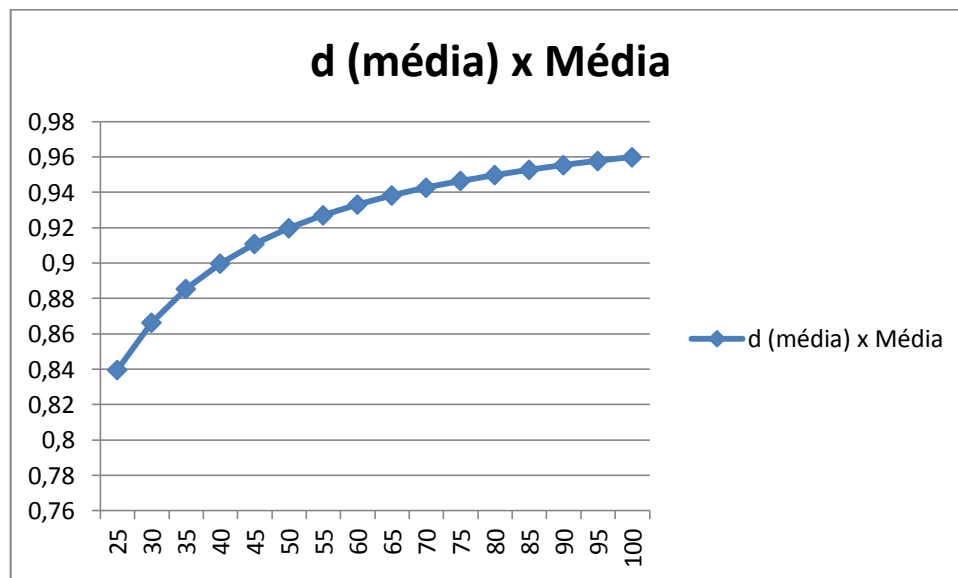
Tabela 47: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	0	0	35	1	1
S/N	-100	0	0	1	1

Figura 37: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 47.

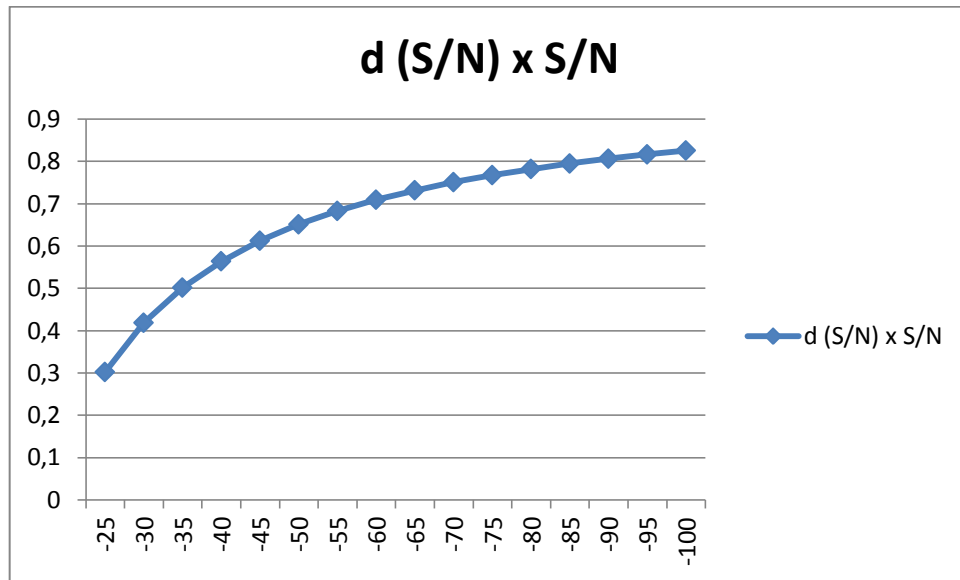


Fonte: (Autor)

Figura 38: Desirability da média x valor da média ($T_{média} = 0$, $TS/N = 0$).

Fonte: (Autor)

Figura 39: *Desirability* do Sinal/Ruído x valor do Sinal/Ruído ($T_{média} = 0$, $TS/N = 0$).



Fonte: (Autor)

ANEXO B - Valores Target (Média = 5 e S/N = -15)

Tabela 48: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	30	1	1
S/N	-35	-15	-15	1	1

Tabela 49: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	25	1	1
S/N	-35	-15	-15	1	1

Tabela 50: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	20	1	1
S/N	-35	-15	-15	1	1

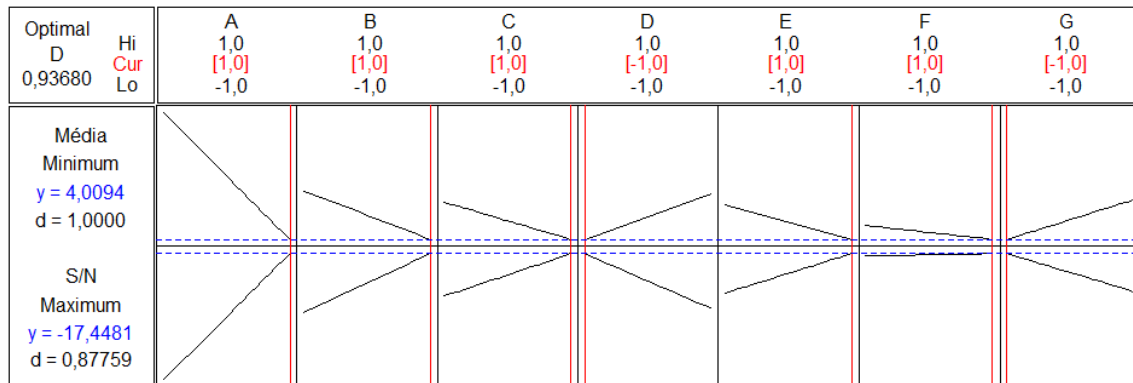
Tabela 51: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	15	1	1
S/N	-35	-15	-15	1	1

Tabela 52: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	10	1	1
S/N	-35	-15	-15	1	1

Figura 40: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabelas 48, 49, 50, 51 e 52.

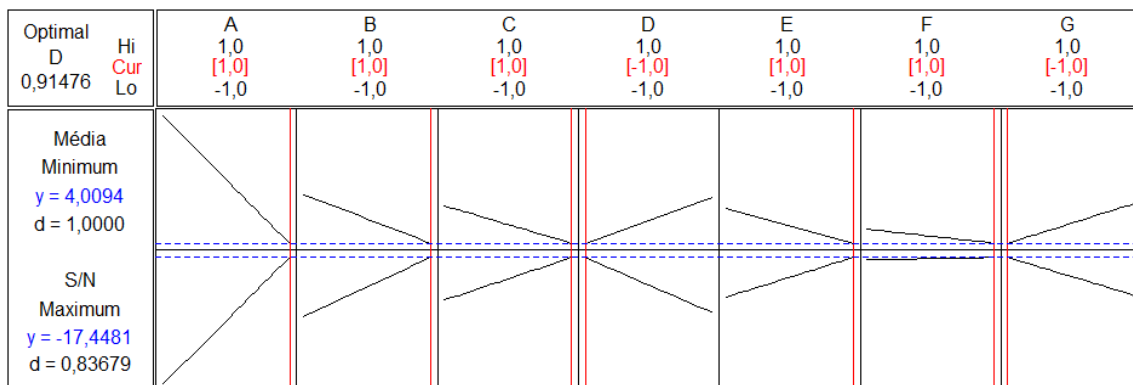


Fonte: (Autor)

Tabela 53: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-30	-15	-15	1	1

Figura 41: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 53.

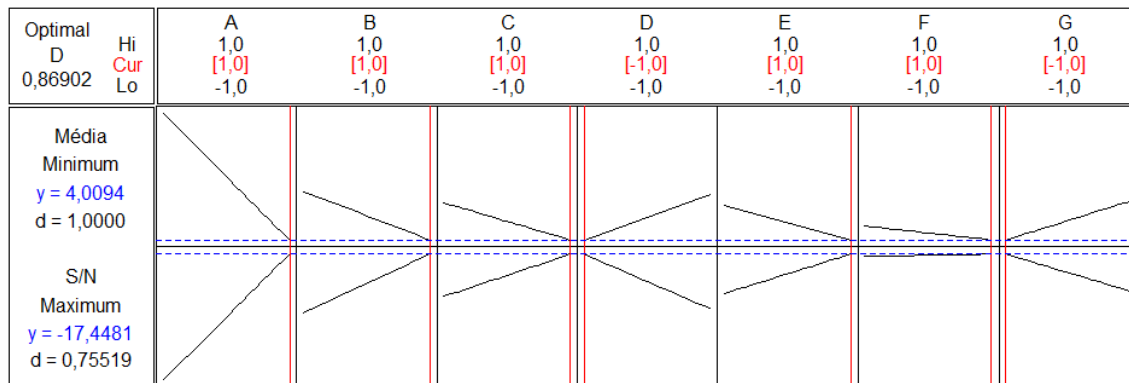


Fonte: (Autor)

Tabela 54: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-25	-15	-15	1	1

Figura 42: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 54.

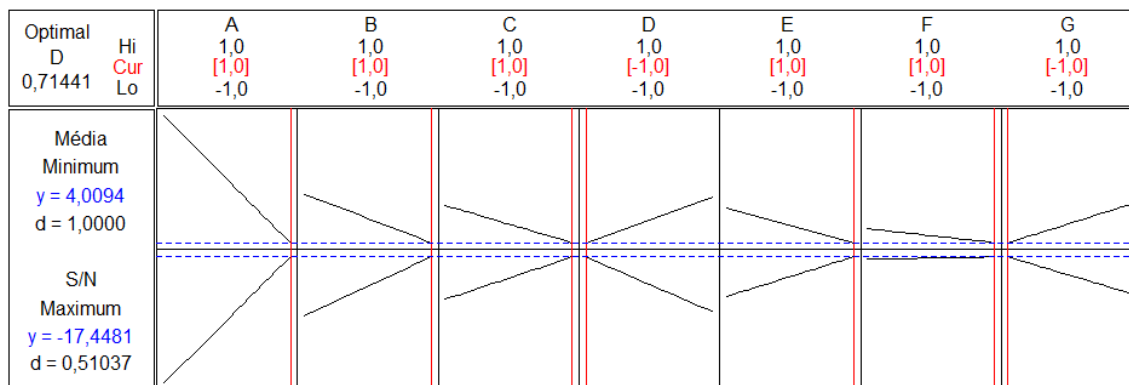


Fonte: (Autor)

Tabela 55: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-20	-15	-15	1	1

Figura 43: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 55.

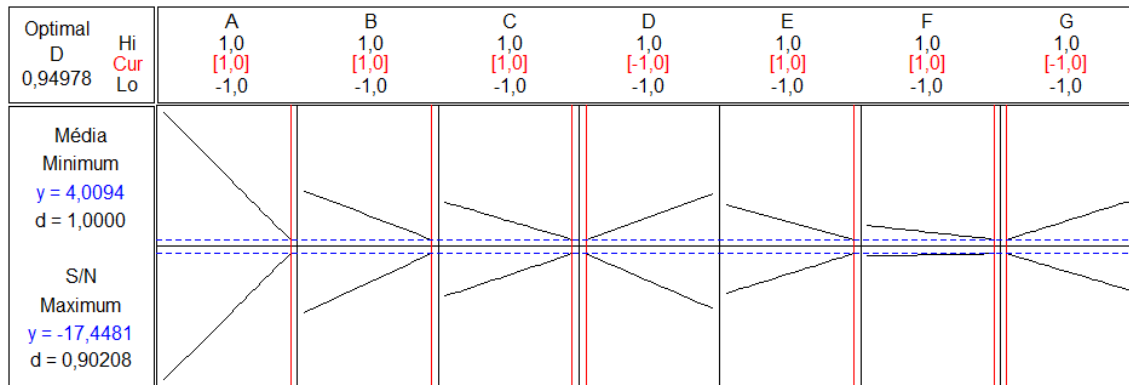


Fonte: (Autor)

Tabela 56: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-40	-15	-15	1	1

Figura 44: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 56.

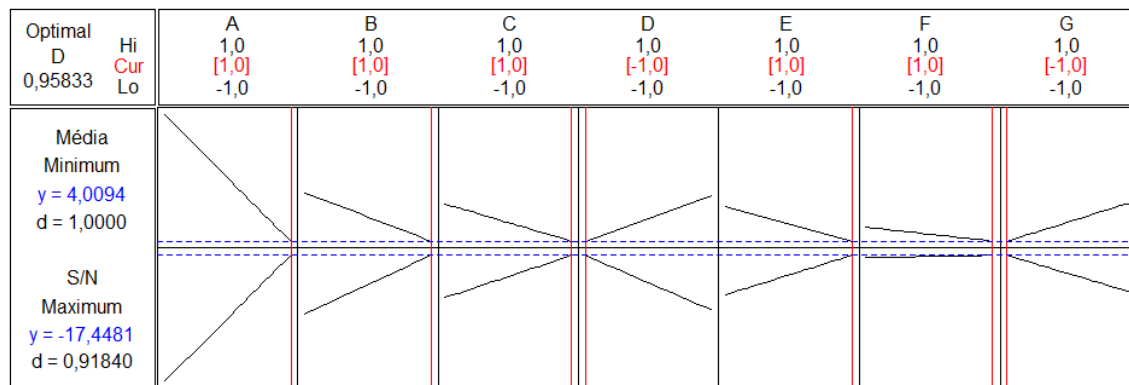


Fonte: (Autor)

Tabela 57: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-45	-15	-15	1	1

Figura 45: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 57.

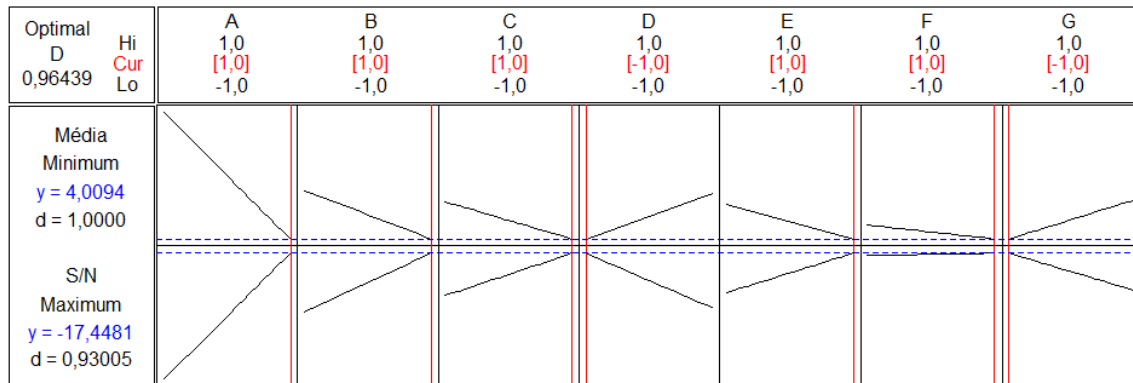


Fonte: (Autor)

Tabela 58: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-50	-15	-15	1	1

Figura 46: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 58.

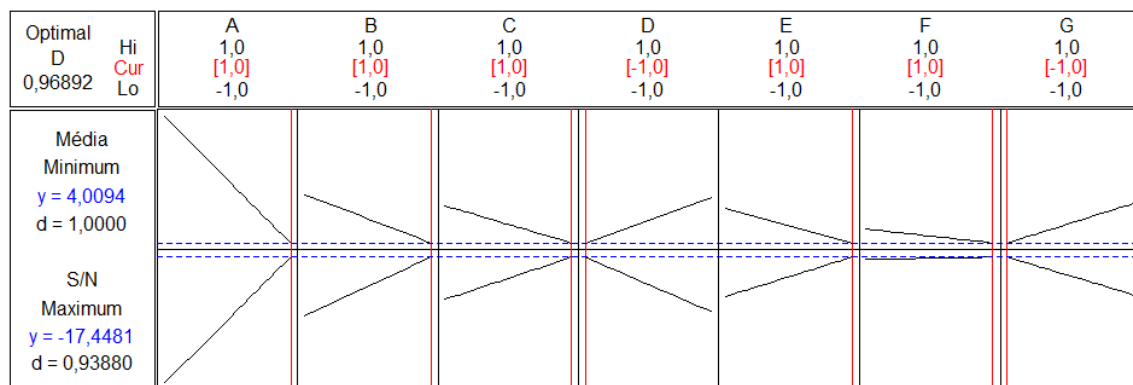


Fonte: (Autor)

Tabela 59: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-55	-15	-15	1	1

Figura 47: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 59.

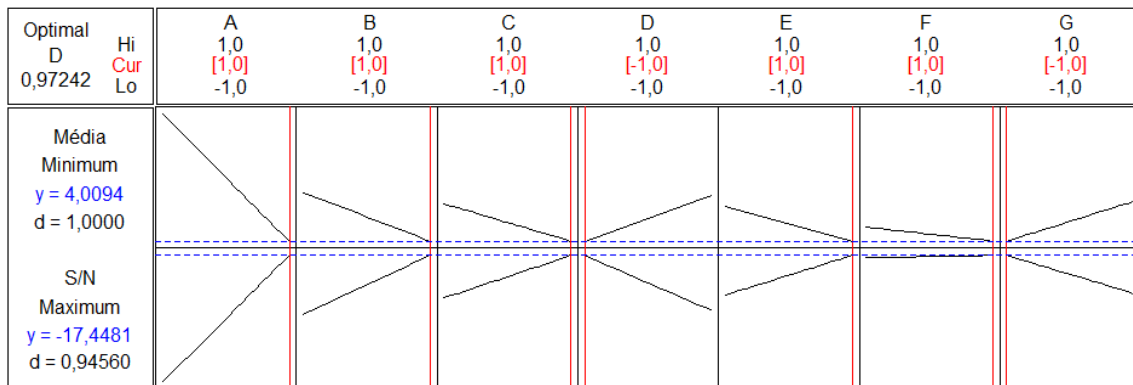


Fonte: (Autor)

Tabela 60: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-60	-15	-15	1	1

Figura 48: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 60.

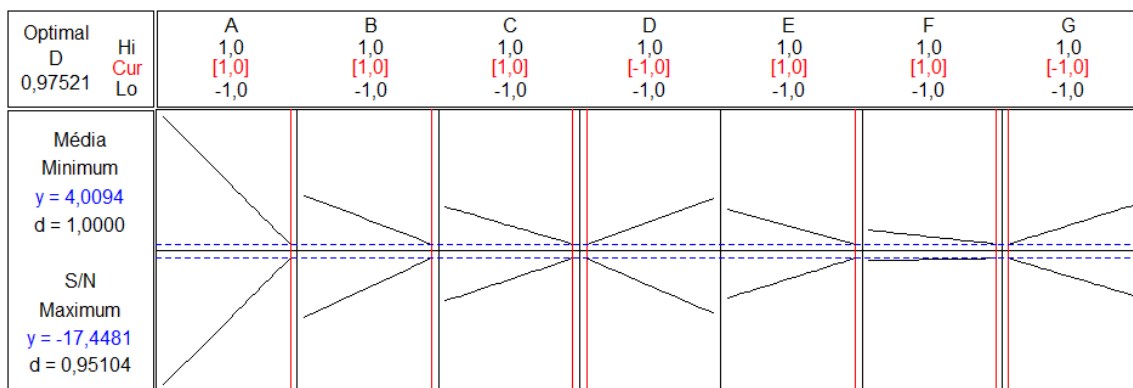


Fonte: (Autor)

Tabela 61: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-65	-15	-15	1	1

Figura 49: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 61.

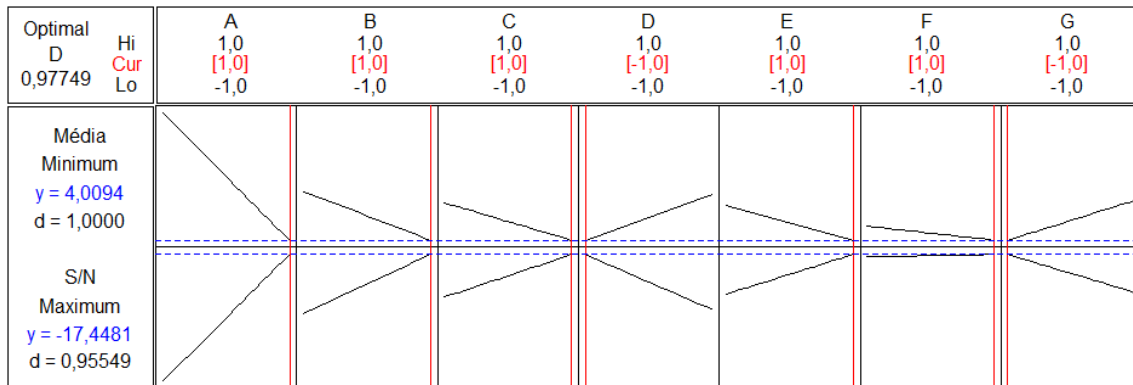


Fonte: (Autor)

Tabela 62: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-70	-15	-15	1	1

Figura 50: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 62.

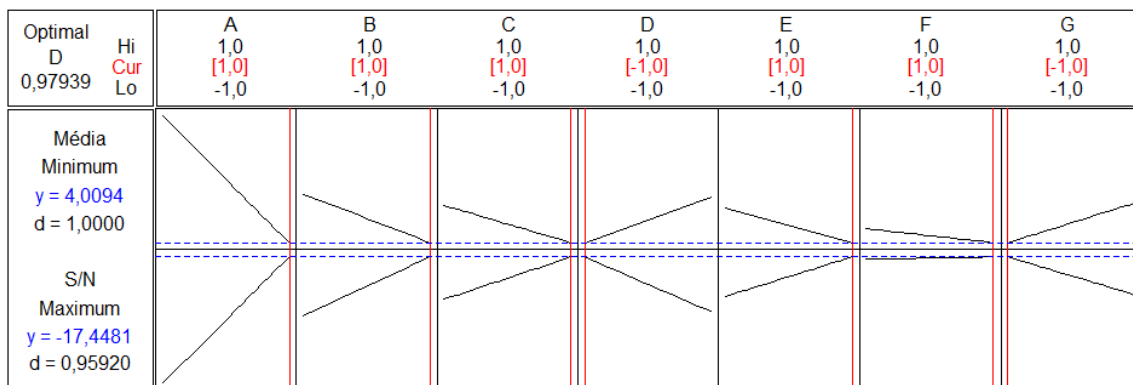


Fonte: (Autor)

Tabela 63: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-75	-15	-15	1	1

Figura 51: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 63.

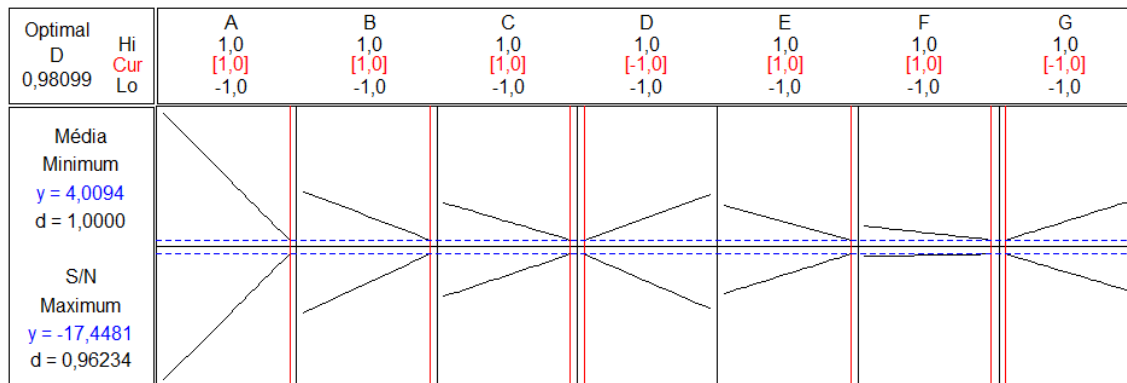


Fonte: (Autor)

Tabela 64: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-80	-15	-15	1	1

Figura 52: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 64.

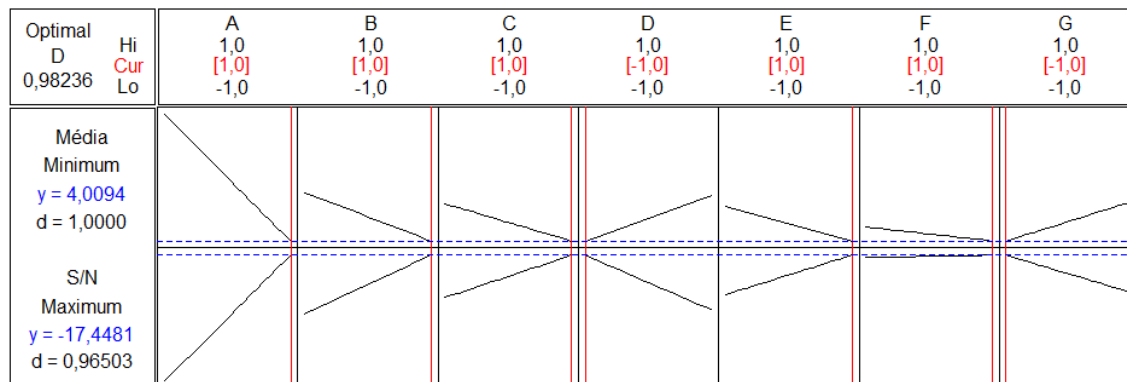


Fonte: (Autor)

Tabela 65: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-85	-15	-15	1	1

Figura 53: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 65.

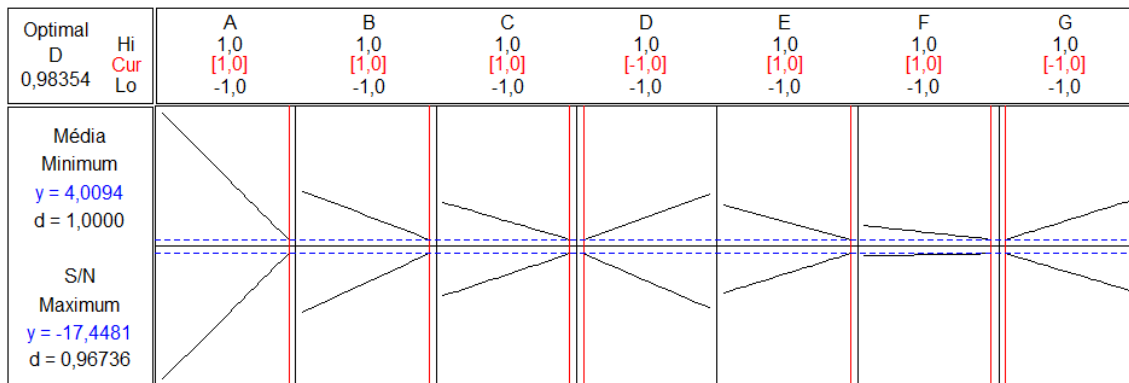


Fonte: (Autor)

Tabela 66: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-90	-15	-15	1	1

Figura 54: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 66.

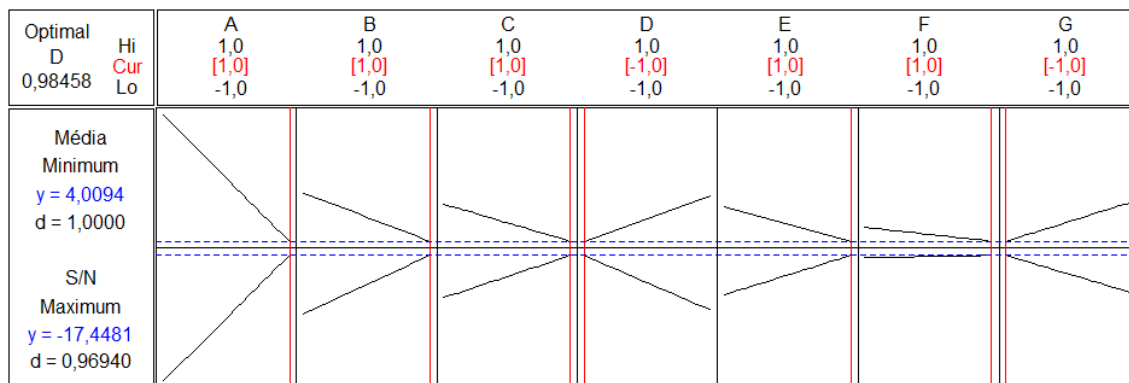


Fonte: (Autor)

Tabela 67: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-95	-15	-15	1	1

Figura 55: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 67.

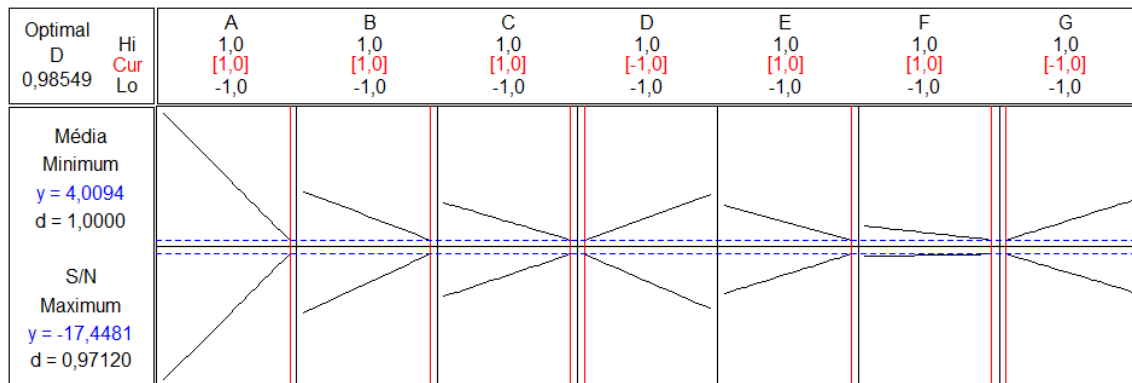


Fonte: (Autor)

Tabela 68: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

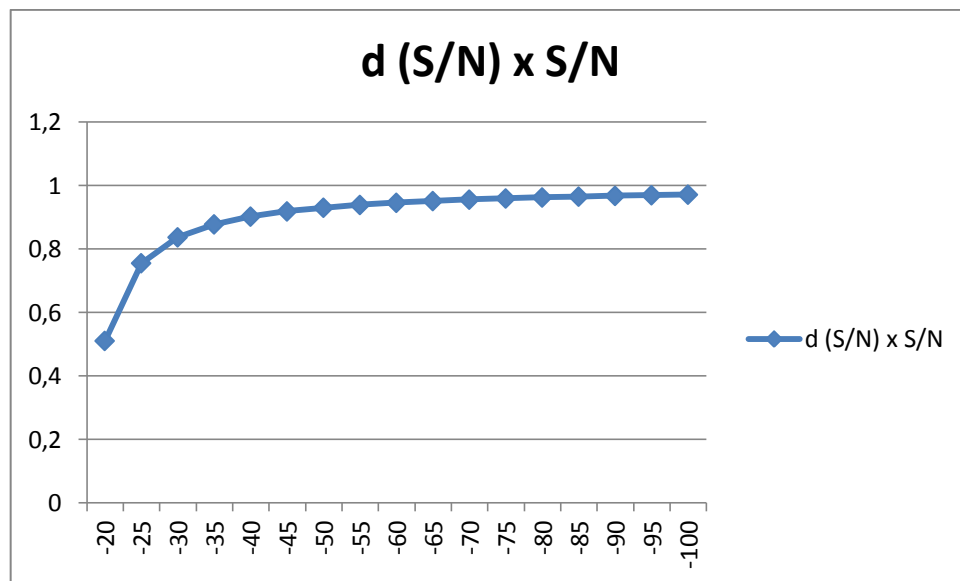
Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	5	5	35	1	1
S/N	-100	-15	-15	1	1

Figura 56: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabela 68.



Fonte: (Autor)

Figura 57: *Desirability* do Sinal/Ruído x valor do Sinal/Ruído ($T_{média} = 5$, $TS/N = -15$).



Fonte: (Autor)

ANEXO C - Valores Target (Média = 16,4 e S/N = -24,17)

Tabela 69: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	16,4	16,4	30	1	1
S/N	-35	-24,17	-24,17	1	1

Tabela 70: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	16,4	16,4	25	1	1
S/N	-35	-24,17	-24,17	1	1

Tabela 71: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	16,4	16,4	20	1	1
S/N	-35	-24,17	-24,17	1	1

Tabela 72: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	16,4	16,4	16,5	1	1
S/N	-35	-24,17	-24,17	1	1

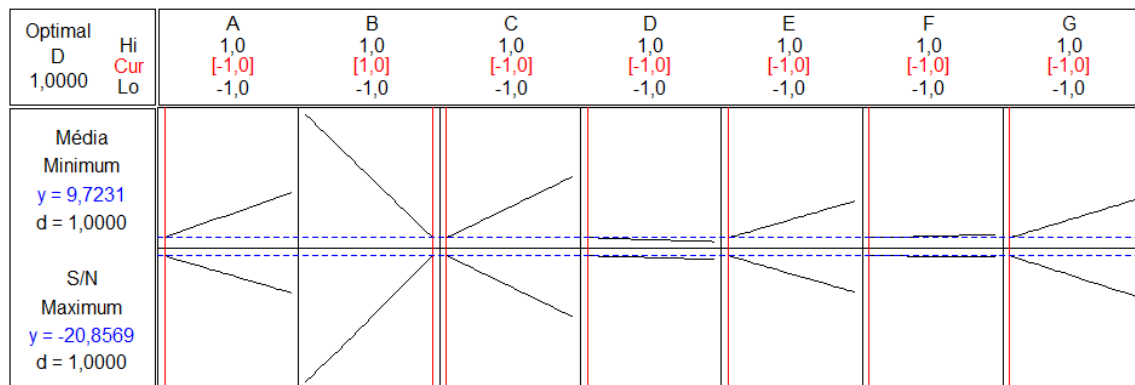
Tabela 73: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	16,4	16,4	35	1	1
S/N	-30	-24,17	-24,17	1	1

Tabela 74: Valores dos parâmetros das funções de maximização e minimização.

Variável Reposta	L	T	U	s'	t'
Média	16,4	16,4	35	1	1
S/N	-25	-24,17	-24,17	1	1

Figura 58: Simulação da otimização das variáveis respostas: parâmetros Tabelas 69, 70, 71, 72, 73 e 74.



Fonte: (Autor)