

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**GUSTAVO BURATTO
PEDRO HENRIQUE FONTANA SPRENGER**

**DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS APLICADO A UM PROCESSO DE
ELETROEROSÃO PARA MICROFURAÇÃO EM
BICOS INJETORES DE MOTORES DE COMBUSTÃO A DIESEL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2019**

**GUSTAVO BURATTO
PEDRO HENRIQUE FONTANA SPRENGER**

**DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS APLICADO A UM PROCESSO DE
ELETROEROSÃO PARA MICROFURAÇÃO EM
BICOS INJETORES DE MOTORES DE COMBUSTÃO A DIESEL**

Trabalho de conclusão do curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação apresentado à disciplina de Trabalho de conclusão de curso 2, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Emerson Rigoni.

Co-orientador: Eng. Tiago Luiz da Veiga Ribas.

CURITIBA

2019

GUSTAVO BURATTO
PEDRO HENRIQUE FONTANA SPRENGER

Delimitação de experimentos aplicado a um processo de eletroerosão para microfuração em bicos injetores de motores de combustão a diesel

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 14 de novembro de 2019.

Prof. Paulo Sérgio Walenia, Esp.
Coordenador de Curso
Engenharia de Controle e Automação

Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia de Controle e Automação do DAELT

ORIENTAÇÃO

Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Tiago Luiz Veiga Ribas, Eng.
Robert Bosch Ltda.
Co-Orientador

BANCA EXAMINADORA

Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Winderson Eugenio dos Santos, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Tiago Luiz Veiga Ribas, Eng.
Robert Bosch Ltda.

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Controle e Automação.

RESUMO

BURATTO, Gustavo; SPRENGER, Pedro Henrique Fontana. **DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS APLICADO A UM PROCESSO DE ELETROEROSÃO PARA MICROFURAÇÃO EM BICOS INJETORES DE MOTORES DE COMBUSTÃO A DIESEL**. 2019. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Curso de Engenharia de Controle e Automação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

Este trabalho apresenta uma aplicação de delineamento de experimentos para identificar e avaliar o grau de influência das variáveis que afetam o processo de fabricação de bicos injetores, na etapa de usinagem por eletroerosão. Este processo de usinagem se dá por meio da geração de descargas elétricas controladas, entre um eletrodo e a peça, em um meio dielétrico. Devido a variações no processo produtivo geradas por variáveis com níveis de interferência ainda desconhecidos, foram observados problemas como: altas taxas de refugo, longos tempos de ciclo e diferenças entre bicos produzidos com uma mesma parametrização de máquina. Para entender melhor o comportamento das variáveis investigadas, foi realizado um estudo sobre a máquina responsável pela fabricação dos bicos injetores. Após a identificação e a avaliação dos fatores de influência foram realizadas melhorias em chão de fábrica para a otimização do processo e, por fim, foi feito um comparativo da efetividade produtiva da máquina antes e depois das melhorias.

Palavras-chave: Eletroerosão. Delineamento de experimentos. Bicos injetores.

ABSTRACT

BURATTO, Gustavo; SPRENGER, Pedro Henrique Fontana. **DESIGN OF EXPERIMENTS APPLIED TO AN ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PROCESS FOR MICRODRILLING IN INJECTION NOZZLES FOR DIESEL COMBUSTION ENGINES**. 2019. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Curso de Engenharia de Controle e Automação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

The objective of this work is, through experimental design methods, to identify and evaluate the degree of influence of the variables that affect the injection nozzle manufacturing process, in the stage of electrical discharge machining, which is a machining process that occurs by generation of controlled electric discharges between an electrode and the piece in a dielectric environment. Due to variations in the production process, generated by variables with still unknown levels of interference, there are problems such as: high scrap rates, long cycle times and differences between nozzles produced according to the same parameters. To better understand the behavior of the investigated variables, a study has been performed on the machine that makes the injection nozzles. After the identification and evaluation of the factors of influence, improvements have been done on the shop floor to optimize the process and, finally, a comparison has been made of the machine's productive effectiveness before and after the proposed improvements.

Key words: Electrical discharge machining. Experimental design. Injection nozzles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema simplificado do processo de EDM	16
Figura 2 – Características dos furos em bicos injetores	17
Figura 3 – Exemplo de relatório da Mycrona	18
Figura 4 – Foto frontal da máquina AGIE QUADRATRON I	19
Figura 5 – Exemplo de programa de furação da máquina AGIE QUADRATRON I	19
Figura 6 – Gráfico das respostas médias	39
Figura 7 – Gráficos lineares para matriz ortogonal L_8	48
Figura 8 – Gráfico das médias para o tempo de ciclo (experimento 1)	59
Figura 9 – Gráfico das razões S/N para o tempo de ciclo (experimento 1)	60
Figura 10 – Gráfico das médias para o fluxo hidráulico (experimento 1)	61
Figura 11 – Gráfico das médias para o diâmetro interno (experimento 1)	62
Figura 12 – Gráfico das razões S/N para o diâmetro interno (experimento 1)	63
Figura 13 – Gráfico das médias para o diâmetro externo (experimento 1)	64
Figura 14 – Gráfico das razões S/N para o diâmetro externo (experimento 1)	65
Figura 15 – Gráfico das médias para o tempo de ciclo (experimento 2)	70
Figura 16 – Gráfico das razões S/N para o tempo de ciclo (experimento 2)	71
Figura 17 – Gráfico das médias para o fluxo hidráulico (experimento 2)	72
Figura 18 – Gráfico das razões S/N para o fluxo hidráulico (experimento 2)	73
Figura 19 – Gráfico das médias para o diâmetro interno (experimento 2)	74
Figura 20 – Gráfico das razões S/N para o diâmetro interno (experimento 2)	74
Figura 21 – Gráfico das médias para o diâmetro externo (experimento 2)	75
Figura 22 – Gráfico das razões S/N para o diâmetro externo (experimento 2)	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Influência dos parâmetros sobre as variáveis de saída

78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados típicos de um experimento com único fator	25
Tabela 2 – Tabela de análise de variância para um único fator	26
Tabela 3 – Tabela de análise de variância para blocos completos	29
Tabela 4 – Exemplo de quadrado latino para $p = 5$	30
Tabela 5 – Tabela de análise de variância para quadrado latino	32
Tabela 6 – Quadrado latino sistemático para $p = 4$	33
Tabela 7 – Exemplo de quadrado latino obtido após a permutação de linhas	33
Tabela 8 – Exemplo de quadrado latino obtido após a permutação de colunas	33
Tabela 9 – Tabela de análise de variância para quadrado latino replicado	35
Tabela 10 – Dados típicos de um experimento fatorial com dois fatores	36
Tabela 11 – Tabela de análise de variância para dois fatores	38
Tabela 12 – Dados típicos de um planejamento 2^2	40
Tabela 13 – Sinais dos efeitos de um planejamento 2^2	41
Tabela 14 – Sinais dos efeitos de um planejamento 2^3	42
Tabela 15 – Exemplo de atribuição de fatores às colunas da matriz L_8	48
Tabela 16 – Conversão de três fatores de dois níveis em um fator de quatro níveis	49
Tabela 17 – Matriz L_8 adaptada para comportar um fator de quatro níveis	49
Tabela 18 – Modelo de análise para matriz ortogonal L_4	51
Tabela 19 – Parâmetros fixos no primeiro experimento	56
Tabela 20 – Fatores e níveis para o primeiro experimento	56
Tabela 21 – Matriz ortogonal L_{25} para o primeiro experimento	57
Tabela 22 – Resultados obtidos no primeiro experimento	58
Tabela 23 – Parâmetros fixos no segundo experimento	67
Tabela 24 – Fatores e níveis para o segundo experimento	68
Tabela 25 – Matriz ortogonal L_{16} (4^5) para o segundo experimento	68
Tabela 26 – Resultados obtidos no segundo experimento	69
Tabela 27 – Matriz ortogonal L_4	83
Tabela 28 – Matriz ortogonal L_8	83
Tabela 29 – Matriz ortogonal L_9	83
Tabela 30 – Matriz ortogonal L_{16} (4^5)	84
Tabela 31 – Matriz ortogonal L_{18}	84
Tabela 32 – Matriz ortogonal L_{25}	85

LISTA DE SIGLAS

AM	Ajuste de Máquina
DOE	<i>Design of Experiments</i>
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>
MSD	<i>Mean Squared Deviation</i>
OA	<i>Orthogonal Array</i>
RPD	<i>Robust Parameter Design</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	TEMA	11
1.1.1	Delimitação do Tema	12
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	12
1.3	OBJETIVOS	13
1.3.1	Objetivo Geral	13
1.3.2	Objetivos Específicos	13
1.4	JUSTIFICATIVA	14
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	14
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	ESTUDO DO PROCESSO	16
2.1	MÁQUINA DE ELETROEROSÃO	18
2.2	PARÂMETROS DO PROGRAMA DE FURAÇÃO DA MÁQUINA	19
2.3	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	21
3	DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS	22
3.1	INTRODUÇÃO	22
3.2	TERMINOLOGIA	23
3.3	PLANEJAMENTOS DE EXPERIMENTO COM FATOR ÚNICO	24
3.3.1	Experimento Completamente Aleatorizado com Fator de Efeito Fixo	24
3.3.2	Experimento Aleatorizado em Blocos Completos	27
3.3.3	Experimento em Quadrado Latino	29
3.3.3.1	Análise de variância	31
3.3.3.2	Aleatorização dos tratamentos em um quadrado latino	32
3.3.3.3	Replicação de quadrados latinos	33
3.4	PLANEJAMENTOS DE EXPERIMENTO COM MAIS DE UM FATOR	35
3.4.1	Experimento Fatorial com Dois Fatores	36
3.4.2	Experimento Fatorial 2^k	39
3.4.3	Experimento Fatorial 2^k Fracionado	41
3.4.3.1	Meia-fração do planejamento 2^k	42
3.4.4	Planejamento de Superfície de Resposta	44
3.5	MÉTODO DE TAGUCHI	45
3.5.1	Metodologia	46

3.5.1.1	Atribuição de fatores e adequação da matriz ortogonal	48
3.5.2	Análise dos resultados	50
3.6	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	53
4	PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS	54
4.1	SELEÇÃO DO MODELO DE EXPERIMENTO	54
4.2	FERRAMENTAS UTILIZADAS	54
4.3	PRIMEIRO EXPERIMENTO	55
4.3.1	Planejamento do experimento	55
4.3.2	Execução e resultados	57
4.3.3	Análise dos dados	58
4.4	SEGUNDO EXPERIMENTO	66
4.4.1	Planejamento do experimento	66
4.4.2	Execução e resultados	68
4.4.3	Análise dos dados	70
4.5	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	77
5	CONCLUSÃO	80
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	81
	REFERÊNCIAS	82
	ANEXO A – Matrizes ortogonais	83

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o tema do trabalho, seus objetivos, os problemas existentes que se procura solucionar e a metodologia a ser aplicada.

1.1 TEMA

A usinagem por eletroerosão, também conhecida pela sigla EDM (do inglês *Electrical Discharge Machining*), é um processo de usinagem que se dá por meio da geração de descargas elétricas controladas entre um eletrodo e a peça em um meio dielétrico. Diferentemente dos processos de usinagem convencionais, na eletroerosão não há contato físico entre ferramenta de corte (eletrodo) e peça, que são separados por uma distância chamada de fenda de trabalho. Esta distância deve existir, de maneira a evitar curtos circuitos que são prejudiciais ao processo, mas por outro lado deve ser pequena, pois para distâncias grandes não ocorrerão descargas elétricas (JAMESON, 2001; SOUZA, 2000).

O eletrodo e a peça estão ligados a uma fonte de energia, responsável por gerar uma diferença de potencial que consiga promover a ruptura do dielétrico e a consequente formação de descargas elétricas. Como consequência da tensão de descarga e de correntes que podem alcançar centenas de ampères, haverá uma alta densidade de energia no local, que ocasionará aquecimento e fusão do material, proporcionando a erosão da peça (SOUZA, 2000).

O líquido dielétrico, que poderá ser água deionizada, querosene, óleos minerais, entre outros, serve como uma barreira para a formação da descarga elétrica, de maneira que sua intensidade seja controlada, além de auxiliar na lavagem e arrefecimento da peça e do eletrodo após a erosão (LIMA; CORRÊA, 2006).

Para algumas aplicações, como em geometrias complexas, ou que envolvam furos muito estreitos, raios de canto pequenos, ou materiais de alta dureza, há uma maior facilidade de produção quando se utiliza a EDM em comparação com os métodos tradicionais, além de proporcionar uma boa qualidade superficial da região erodida (AMORIM, 2002).

Tipicamente as máquinas de EDM destinadas à realização de micro-furos são dotadas de fonte de alimentação para o arco voltaico, sistema de controle de posição, sensor para monitorar o desgaste do eletrodo e guia para o eletrodo e para o

direcionamento do fluido. A vantagem no uso da EDM inclui o fato de que podem operar de forma automática com um mínimo de intervenção humana, permitindo assim um maior controle sobre os padrões de qualidade do produto final. Entretanto, com o uso de múltiplas estações de EDM acaba sendo menos trivial a tarefa de ajuste dos parâmetros operacionais da máquina, dificultando qualquer sistematização em nível de gerência de produção.

1.1.1 Delimitação do Tema

Uma das aplicações de máquinas de eletroerosão é na fabricação de bicos injetores, utilizados em motores a explosão. O processo de EDM é uma forma atualmente viável para a abertura de pequenos orifícios sub-milimétricos por onde fluirá o combustível a ser injetado nos cilindros motores. Neste caso, o sucesso da aplicação do processo de EDM é alcançado ao se produzir furos com dimensões e acabamentos superficiais aceitáveis. Para este último é, por vezes, utilizado um processo de usinagem adicional denominado hidroerosão, que não será tema deste trabalho.

A empresa Robert Bosch Ltda. faz uso destas máquinas, denominadas AGIE, na produção de bicos injetores, sendo utilizadas tanto máquinas analógicas quanto digitais, ambas do mesmo fabricante, porém de gerações diferentes.

Este trabalho será realizado em parceria com a Bosch e terá como objetivo investigar o processo de furação de bicos injetores por eletroerosão em uma planta fabril dotada de múltiplas estações EDM do tipo analógica, a fim de se planejar e executar uma bateria de ensaios capaz de fornecerem dados suficientes para identificação das variáveis de influência nos desvios de qualidade do processo produtivo.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

A produção em larga escala de bicos injetores implica na utilização de uma grande quantidade de estações EDM. No caso particular da empresa Robert Bosch Ltda. tais estações são oriundas de um único fabricante com dois modelos distintos em termos de geração tecnológica. Devido a não uniformidade no comportamento produtivo entre estações similares, apesar da utilização de ajustes idênticos e em

máquinas idênticas, ocorre influência de fatores ainda desconhecidos no processo. São observados problemas como altas taxas de refugo, longos tempos de ciclo, diferenças entre bicos produzidos de acordo com os mesmos parâmetros. Como resultado, o índice de produtividade opera com um valor ainda abaixo do ideal.

Tem-se como premissa a utilização de métodos estatísticos a partir de dados obtidos em uma série de ensaios, de maneira a avaliar a influência de cada variável no resultado do processo e identificar as principais entre elas. Dessa premissa emerge a questão principal, norteadora deste trabalho: **Como conduzir um delineamento de experimentos para identificar as principais variáveis de influência no processo de usinagem por eletroerosão?**

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Elaborar um estudo estatístico investigativo, baseado em delineamento de experimentos, para identificar as variáveis de influência que contribuem para a redução da produtividade no processo de fabricação de bicos injetores, na etapa de usinagem por eletroerosão.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Detalhar o processo de usinagem por eletroerosão e sua aplicação na produção de bicos injetores;
- Conduzir o delineamento de experimentos: identificar seus objetivos, selecionar as variáveis respostas, escolher os fatores de influência e seus níveis, planejar os procedimentos experimentais, realizar o experimento, analisar os dados e interpretar os resultados;
- Estabelecer as conclusões do trabalho e realizar ações de melhoria na fábrica.

1.4 JUSTIFICATIVA

Devido à grande concorrência do mercado atual, faz-se necessário a otimização da produção, mantendo-se a qualidade e reduzindo os custos do processo. Deste modo as empresas podem manter um alto nível de efetividade, equivalente ou superior ao de seus concorrentes. Esta é uma necessidade da empresa em questão, que procurou a UTFPR a fim de encontrar soluções que otimizem o processo de produção de bicos injetores.

Este é um trabalho de engenharia, relacionado à área de controle, e, apesar de possuir uma abrangência maior que de um trabalho de conclusão de curso, serão disponibilizados pela empresa os recursos necessários para sua execução.

Por esses motivos, esse trabalho em parceria com a Bosch, pretende reduzir as perdas na empresa, tanto no âmbito financeiro, quanto da efetividade produtiva. Além de se reduzir as perdas, também serão estudados meios de tornar o processo mais estável de acordo com a parametrização utilizada.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho será realizado inicialmente com o estudo das bases teóricas existentes, como por exemplo, o manual da máquina estudada, além de artigos e dissertações publicados sobre o assunto. Compreendida a base teórica, serão realizadas pesquisas de campo, buscando identificar e avaliar os parâmetros que afetam a fabricação dos bicos injetores. Em seguida, serão consultados especialistas no assunto para compreender mais a fundo o tema em questão, para então se obter um amplo escopo do estado da arte.

Para a realização dos experimentos, serão utilizados métodos estatísticos, que determinarão de que forma os dados serão coletados, de maneira eficiente, reduzindo o tempo utilizado e minimizando os custos para a realização dos ensaios. Além disso, as técnicas estatísticas têm papel fundamental na identificação de erros experimentais. Assim, o planejamento será mais eficaz e os a análise dos dados obtidos mais confiáveis (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Com a base teórica consolidada, inicia-se sua aplicação prática alinhada ao objetivo geral do trabalho. Com os resultados da aplicação prática, serão realizadas melhorias ao processo de usinagem por eletroerosão na indústria em questão. Por

fim, será feito um comparativo do cenário produtivo anterior e posterior a aplicação das soluções propostas.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

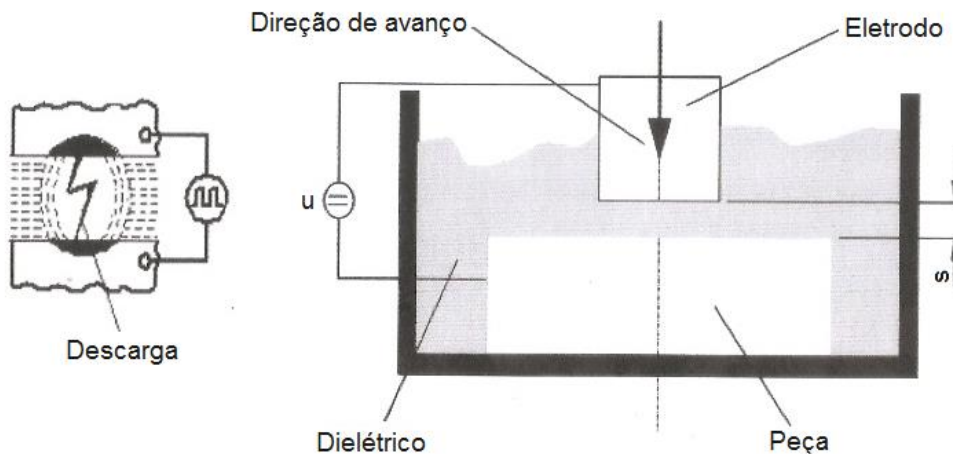
Este trabalho será dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo, a introdução, tem como objetivo fazer uma breve apresentação do assunto estudado e os motivos para fazê-lo. O capítulo dois apresenta um estudo da máquina que realiza a usinagem por eletroerosão (EDM). O capítulo três aborda o delineamento de experimentos, de forma a determinar como serão analisados os dados obtidos. O capítulo quatro apresenta a aplicação da teoria vista no capítulo três a máquina estudada no capítulo dois. Por fim, no capítulo cinco, a conclusão, será apresentado um comparativo da efetividade produtiva da máquina antes e depois do estudo feito.

2 ESTUDO DO PROCESSO

A eletroerosão por faíscas (EDM) é o mais utilizado e popular processo especial de usinagem, no qual o eletrodo reproduz seu formato na peça usinada, através de descargas elétricas controladas e consecutivas gerando grandes temperaturas, que fundem e vaporizam parcelas do material, criando microcrateras que modelam a peça no formato desejado (SANTOS, 2010).

As descargas elétricas acontecem em um meio dielétrico que envolve a ponta do eletrodo e a peça, que são posicionados pela máquina até a posição de trabalho, de maneira que a fenda de trabalho (s) permaneça entre eles. O esquema simplificado do processo está representado na Figura 1. Uma tensão u é aplicada por uma fonte de energia (gerador) entre a peça e o eletrodo. A diferença de potencial e a pequena distância da fenda de trabalho entre eletrodo e peça geram pontos de alta intensidade de campo elétrico onde ocorre a “ruptura” do dielétrico promovendo a descarga elétrica (SANTOS, 2010).

Figura 1 – Esquema simplificado do processo de EDM

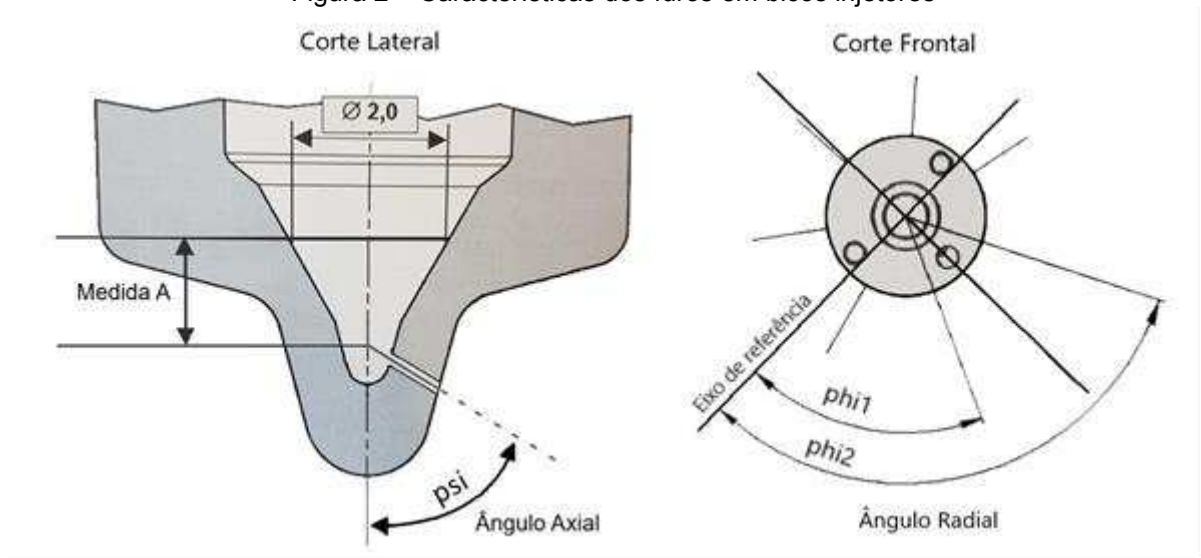


Fonte: Adaptado de Robert Bosch Ltda. (2018).

Após a “ruptura” do dielétrico, uma tensão de aproximadamente 15 a 30V cria uma elevada densidade de energia elétrica na superfície do eletrodo e da peça, que são rapidamente aquecidos, fundidos e evaporam. A remoção de material é proporcional à quantidade e a variação temporal da energia elétrica na superfície do eletrodo, e também é influenciada pelas propriedades físicas do tipo de material da peça e do eletrodo (SANTOS, 2010).

Cada modelo de bico injetor possui características diferentes que se adequam ao tipo de motor para o qual aquela peça foi projetada. O processo de usinagem busca impor as seguintes características para cada furo: diâmetro de entrada e saída, conicidade (diferença do diâmetro de entrada com relação ao de saída), ângulo ϕ (ângulo radial do furo com relação ao eixo central do bico), ângulo ψ (ângulo axial do furo com relação ao eixo central do bico) e medida A (distância entre o diâmetro fixo de 2 mm e o cruzamento do eixo do furo com o eixo do bico injetor). A Figura 2 demonstra as características dos furos em um bico injetor.

Figura 2 – Características dos furos em bicos injetores



Fonte: Adaptado de Robert Bosch Ltda. (2018).

A verificação da qualidade final do furo é feita por três processos de medição. O primeiro é uma conferência visual feita através de um microscópio adaptado que possibilita o operador constatar a presença dos furos e o seu formato. A segunda medição que é feita é a do fluxo hidráulico, cuja função é verificar a vazão de óleo (de viscosidade específica) que o bico injetor fornece de acordo com uma pressão pré-determinada. Por fim, é feita uma averiguação digital, realizada por uma máquina denominada Mycrona, que avalia, para cada furo, os diâmetros de entrada e saída, o ângulo radial e axial, a medida A , além dos respectivos desvios de cada medida comparando-os com os valores esperados. Na Figura 3, é mostrado um exemplo de relatório fornecido pela Mycrona informando, na parte superior, os valores medidos e as suas médias, amplitudes e desvios, e na parte inferior, os valores desejados e as suas tolerâncias.

Figura 3 – Exemplo de relatório da Mycrona

nozzle protocol	Furo Nr	Ø Saída [mm]	Ø [mm]	Conicidade [mm]	PSI/Ângulo V [°]	Desvio [°]	PHI-Ângulo HDesvio [°]	Medida-A [mm]	Desvio [mm]	Medida D [mm]	Deslocament Desvio [mm]	MM Aus	MM Ein	Circularida [mm]
Data	1	0.2203	0.2257	-0.0054	70.015	0.015	44.754 -0.246	1.020	0.015	0.993	0.031	0.031	1	4
26/10/2018 12:45:52	2	0.2195	0.2252	-0.0056	69.932	-0.068	89.404 -0.596	1.022	0.017	0.990	0.017	0.017	1	4
TTNr Número de tipo	3	0.2200	0.2253	-0.0053	69.995	-0.005	134.420 -0.580	1.022	0.017	0.990	0.021	0.021	1	4
0433171564	4	0.2197	0.2255	-0.0058	70.086	0.086	179.404 -0.596	1.026	0.021	0.989	0.021	0.021	1	4
Gravação - Número do Desenho	5	0.2203	0.2202	0.0001	70.093	0.093	224.423 -0.577	1.021	0.016	0.991	0.014	0.014	1	4
DLA140P826	6	0.2202	0.2255	-0.0053	70.196	0.196	269.429 -0.571	1.021	0.016	0.992	0.013	0.013	1	4
Tipo de Exame	7	0.2207	0.2250	-0.0044	70.297	0.297	314.485 -0.515	1.025	0.020	0.990	0.009	0.009	1	4
ENCERRAMENTO LO	8	0.2199	0.2236	-0.0037	70.215	0.215	359.605 -0.395	1.026	0.021	0.989	0.010	0.010	1	4
Examinador	Valor h	0.2201	0.2245	-0.0044	70.104	0.104	-0.510	1.023	0.018		0.017			
Fernando Balduino	Amplitu	0.0011	0.0055	0.0060		0.365	0.350		0.006		0.022			
Máquina de medição	Desvio	0.3745	1.8684	1.9820		0.124	0.126		0.002		0.007			
Altera DSE 385	Ø Guia [mm]:		4.00											
Máquina de produção	Quant. Furos:		8											
22														
Canal														
4														
Turno	Furo Nr	Ø Saída	Ø Entrada	Conicidade	PSI-Ângulo	PHI-Ângulo	Medida-A	Deslocamento tangencial						
	1	0.2200	0.003	0.2200	0.003	0.000	0.005	70,000	1,50	45,000	2,50	0,035	0,100	
			-0,003		-0,003		-0,005		-1,50		-2,50	-0,035	-0,100	
Momento de descarga	2	0.2200	0.003	0.2200	0.003	0.000	0.005	70,000	1,50	90,000	2,50	1,005	0,035	0,100
			-0,003		-0,003		-0,005		-1,50		-2,50	-0,035	-0,100	
Número básico para erosão	3	0.2200	0.003	0.2200	0.003	0.000	0.005	70,000	1,50	135,000	2,50	1,005	0,035	0,100
65679			-0,003		-0,003		-0,005		-1,50		-2,50	-0,035	-0,100	
Número de Lote / EE	4	0.2200	0.003	0.2200	0.003	0.000	0.005	70,000	1,50	180,000	2,50	1,005	0,035	0,100
			-0,003		-0,003		-0,005		-1,50		-2,50	-0,035	-0,100	
Q-Hyd. 100/0	5	0.2200	0.003	0.2200	0.003	0.000	0.005	70,000	1,50	225,000	2,50	1,005	0,035	0,100
			-0,003		-0,003		-0,005		-1,50		-2,50	-0,035	-0,100	
Q-Hyd. 100/60	6	0.2200	0.003	0.2200	0.003	0.000	0.005	70,000	1,50	270,000	2,50	1,005	0,035	0,100
			-0,003		-0,003		-0,005		-1,50		-2,50	-0,035	-0,100	
	7	0.2200	0.003	0.2200	0.003	0.000	0.005	70,000	1,50	315,000	2,50	1,005	0,035	0,100
			-0,003		-0,003		-0,005		-1,50		-2,50	-0,035	-0,100	
	8	0.2200	0.003	0.2200	0.003	0.000	0.005	70,000	1,50	0,000	2,50	1,005	0,035	0,100
			-0,003		-0,003		-0,005		-1,50		-2,50	-0,035	-0,100	
Diâmetro do eletrodo	Valor h	0.2200	0.003	0.2200	0.003	0.000	0.005	1.50			0.035			
			-0.003		-0.003		-0.005	-1.50			-0.035			
Ø Saída Hidráulica	Amplitu	0.0000	0.006	0.0000	0.006	0.0000	0.010	3.00		5.00	0.070		0.200	
	Desvio	0.0000	0.006	0.0000	0.006	0.0000	0.010	3.00		5.00	0.070		0.200	
Conicidade Hydraulic														

Fonte: Robert Bosch Ltda. (2018).

Os bicos injetores produzidos, atualmente, pela Robert Bosch Ltda. em Curitiba se dividem em três tipos: P, CRI e S. Os bicos do tipo P são os modelos mais comuns e mais antigos. Os bicos CRI são utilizados em motores mais modernos e exigem um alto nível de precisão do processo de EDM. Já os bicos S são usados em aplicações mais pesadas como navios, lanchas e locomotivas.

Esse processo é realizado por máquinas destinadas exclusivamente para realização dos microfuros nos bicos injetores. A precisão da máquina é de extrema importância, pois tem grande influência sobre a qualidade e eficiência da peça. Para compreender melhor essa técnica de usinagem, foi realizado um estudo sobre a máquina, fabricada pela empresa AGIE-Charmilles, do modelo QUADRATRON I.

2.1 MÁQUINA DE ELETROEROSÃO

A QUADRATRON I é composta de duas estruturas interligadas, representadas na Figura 4. Na estrutura do lado esquerdo localizam-se os quatro cabeçotes da máquina, com o suporte para os bicos injetores e o sistema de posicionamento da peça e do eletrodo. O lado direito possui um computador interno que faz a comunicação homem-máquina para entrada de dados e acompanhamento gráfico do processo ao longo da erosão. Além disso, é onde se localiza o hardware responsável pela geração e controle da descarga durante o processo. Acoplado à máquina

também está a bomba de vazão que fornece o líquido dielétrico, que neste caso é a água deionizada, em uma vazão constante e controlada.

Figura 4 – Foto frontal da máquina AGIE QUADRATRON I



Fonte: Autoria própria (2018), instalações da Robert Bosch Ltda.

Para a estabilidade do processo, a máquina é mantida em um ambiente climatizado e é feito também o monitoramento da condutividade do dielétrico. Dessa forma, reduz-se o número de variáveis externas que possam afetar a saída do processo.

2.2 PARÂMETROS DO PROGRAMA DE FURAÇÃO DA MÁQUINA

A programação da máquina é fornecida pelo operador antes de cada rodada de produção, através de um documento denominado AM (ajuste de máquina). Inicialmente é informado o código (ou número do programa) da peça a ser usinada, que determinam a quantidade e a posição dos furos. Em seguida são passados os parâmetros de cada etapa do processo. Um exemplo de programa de furação é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Exemplo de programa de furação da máquina AGIE QUADRATRON I

Step	Cam.(Weg)	U	I	U-adj	T	S-BOX	P	COMPR	GAIN	UNIGAP	ACC	ACO
1	-0,20	-7	1	0	1	30	8	20	22	0	0	0
2	-0,60	-7	1	0	1	42	8	20	8	0	0	65
3	-1,90	-7	1	0	1	44	8	20	8	0	0	65
4												
5												

Fonte: Robert Bosch Ltda. (2018).

Os parâmetros da máquina AGIE QUADRATRON I são:

- a) **Step:** são os passos do programa de furação. A divisão do processo de usinagem em etapas permite controlar a distância percorrida pelo eletrodo gradativamente e a descarga elétrica ao longo do processo;
- b) **Cam. (Weg):** corresponde ao caminho percorrido pelo eletrodo em milímetros. Possui valores negativos e varia a cada passo do programa;
- c) **U:** pelo código da máquina, pode receber desde o valor 0 até 7, porém, para esta aplicação, é um parâmetro inativo, sem interferência no processo. Apesar disso, o sinal (+/-) indica a polaridade imposta ao eletrodo, sendo que o sinal positivo resulta num desgaste maior do eletrodo e o negativo um desgaste maior na peça. A polaridade positiva normalmente é usada na primeira etapa do programa para eliminar possíveis irregularidades na ponta do eletrodo;
- d) **I:** é a corrente da descarga. Varia de 0 A até 5,6 A. Pelo código da máquina pode receber desde o valor 0 (0 A) até 7 (5,6 A), variando de 0,8 em 0,8 ampères;
- e) **U-adj:** é o ajuste fino da tensão. Possui 64 níveis, de 0 a 63, que correspondem a 255 V e 66 V, respectivamente. Cada posição reduz o valor da tensão em 3 volts;
- f) **T:** tempo de carregamento do capacitor. Pode receber valores entre 0,4 e 7500 μ s com 32 níveis selecionáveis no programa da máquina;
- g) **S-BOX:** capacitância do capacitor que acumula a energia de cada descarga. A capacitância pode ter valores na faixa de 0 a 11 nF (16 posições) e possui dois modos de regulagem diferentes, “com diodo” (posições 40 a 55) e “sem diodo” (posições 20 a 35). A aplicação “com diodo” suprime a parcela negativa da corrente, dessa forma, aumentando a retirada de material da peça e diminuindo o desgaste do eletrodo;
- h) **P:** tempo de pausa entre cada carregamento do capacitor. Assim como o parâmetro *T*, possui uma faixa de valores entre 0,4 e 7500 μ s com 32 níveis selecionáveis;
- i) **COMPR:** define a distância entre o eletrodo e a peça (fenda de trabalho). Pode ser regulada com valores entre 0 e 55%, que são inversamente proporcionais à distância da fenda de trabalho;

- j) **GAIN:** regula a velocidade de avanço do posicionamento do eletrodo. Pode ser regulado entre 0 e 99%. É fundamental a estabilidade do processo, pois regula a fenda de trabalho baseado na tensão nominal do gerador e a tensão real na fenda de trabalho. Se a fenda de trabalho for muito grande, não ocorre nenhuma descarga elétrica, a tensão em vazio é detectada pela máquina que avança o eletrodo para reposicioná-lo. Quando a fenda de trabalho é muito pequena, ocorrem descargas falhas e curtos circuitos, que são corrigidos pelo controlador de avanço (SOUZA, 2000);
- k) **UNIGAP:** determina o tempo entre etapas do programa (*Steps*). Varia de 0 a 60 segundos;
- l) **ACC/ACO (Adaptive Control with Constrains/Optimizations):** acionamento de unidades automáticas de controle e supervisão do processo para correção dos parâmetros que variam durante a usinagem (SOUZA, 2000).

Em alguns casos, podem ser utilizados mais de um programa de furação para diferentes furos em uma mesma peça, caso estes possuam geometrias diferentes.

2.3 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram abordados o processo de eletroerosão (EDM), as características dos furos em bicos injetores, que serão objeto de estudo deste trabalho, os procedimentos de medição e a máquina utilizada no processo, tanto em relação à sua estrutura quanto em relação a seus parâmetros programáveis.

O estudo referente à máquina e ao processo é de fundamental importância para o prosseguimento do trabalho, uma vez que, juntamente ao conteúdo abordado no próximo capítulo, orientará a fase de execução dos experimentos e posterior análise.

O Capítulo 3 tratará sobre os modelos de planejamento de experimentos, dentre os quais será escolhido o mais apropriado para o caso em questão. No capítulo seguinte, o modelo será aplicado na otimização dos parâmetros apresentados.

3 DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

Este capítulo trata do delineamento de experimentos, também conhecido pela sigla DOE (do inglês *Design of Experiments*), que, segundo Werkema e Aguiar (1996), consiste de técnicas utilizadas para planejar e executar experimentos de maneira eficiente, de modo a obter resultados confiáveis a custo e tempo mínimos, a partir de uma coleta de dados adequada e sua posterior análise por meio de ferramentas estatísticas. Serão abordados também os modelos de DOE que poderão ser utilizados em cada situação.

3.1 INTRODUÇÃO

Um experimento consiste em um procedimento de avaliação de causa e efeito em um sistema através de alterações em uma ou mais variáveis de entrada, a fim de se analisar o comportamento da saída a estas alterações, determinando-se, então, uma relação entre a entrada e saída do sistema (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Experimentos planejados podem ser utilizados para identificar as variáveis que exercem maior influência em um processo, encontrar faixas de valores para as variáveis de entrada que levem a valores desejados da variável de saída, ou que minimizem o efeito de fatores não controláveis indesejáveis. Com isto, é possível melhorar o rendimento do processo, reduzir a variabilidade e os tempos e custos de projeto e operação (MONTGOMERY; RUNGER, 2009; WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Ao se planejar um experimento, devem-se levar em conta os três princípios básicos do DOE: réplica, aleatorização e formação de blocos, que são definidos a seguir de acordo com Werkema e Aguiar (1996):

- a) **Réplica:** corresponde a cada repetição do experimento, realizada sob condições experimentais idênticas, isto é, mantendo outros fatores que possam exercer influência na resposta constantes. Quanto mais réplicas forem realizadas, melhor é possível estimar se a variação dos valores medidos na variável de saída é devida somente ao erro aleatório ou à influência das variáveis de entrada analisadas;
- b) **Aleatorização:** a ordem de realização dos ensaios em cada réplica do experimento e a alocação dos corpos de prova a serem utilizados no ensaio devem ser feitas de maneira aleatória. A aleatorização possibilita

que efeitos de fatores não-controlados sejam balanceados, evitando confusões destes com os efeitos das variáveis estudadas no experimento;

- c) **Formação de blocos:** em algumas situações, tais como corpos de prova providos de diferentes lotes, onde pode haver uma certa heterogeneidade entre lotes que não seja de interesse no experimento, pode ser importante agrupá-los em blocos homogêneos de modo a eliminar do erro aleatório a parcela devido a esta variabilidade, possibilitando que os fatores de interesse sejam avaliados com melhor eficácia.

Em muitas situações, são aplicados vários experimentos planejados sequenciais em um mesmo processo. Por exemplo, um primeiro experimento denominado de experimento exploratório (*screening experiment*) pode ser utilizado para determinar quais são as variáveis de maior importância que afetam a saída do sistema; experimentos seguintes podem ser empregados para determinar ajustes para estas variáveis, buscando otimizar o processo (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

3.2 TERMINOLOGIA

Em delineamento de experimentos, são utilizados alguns termos que serão definidos a seguir, segundo Werkema e Aguiar (1996):

- a) **Unidade experimental:** refere-se ao corpo de prova do experimento, sobre o qual serão realizadas as medições;
- b) **Fator:** corresponde a uma das variáveis de entrada de interesse no experimento, cuja influência sobre a resposta deseja-se determinar. Em um experimento pode haver um ou múltiplos fatores, e planejamentos diferentes serão utilizados dependendo desta quantidade;
- c) **Nível:** corresponde a cada valor ou condição que um fator poderá assumir no experimento. Por exemplo, se forem analisados três tipos de reagentes em um processo, cada tipo será um nível;
- d) **Tratamento:** refere-se a cada combinação de níveis de diferentes fatores. Por exemplo, se houver dois fatores, temperatura e pressão,

cada combinação de valores destas variáveis será um tratamento. Para casos em que há um único fator, os tratamentos serão os próprios níveis;

- e) **Ensaio:** corresponde à realização do experimento em cada tratamento, ou seja, é a aplicação de um tratamento à unidade experimental;
- f) **Variável resposta:** corresponde à variável de saída medida em cada ensaio.

Para contextualizar, neste trabalho a unidade experimental será o bico injetor, os fatores serão os parâmetros de entrada, com seus respectivos níveis, e a variável resposta poderá ser uma característica geométrica, como diâmetro interno, externo, o fluxo hidráulico, ou ainda o tempo de ciclo.

3.3 PLANEJAMENTOS DE EXPERIMENTO COM FATOR ÚNICO

Nesta seção, serão apresentados alguns modelos de planejamento para situações em que haja apenas um fator de interesse.

3.3.1 Experimento Completamente Aleatorizado com Fator de Efeito Fixo

Em um experimento, fatores podem ser classificados em dois tipos: fatores de efeito fixo e de efeito aleatório. Fatores de **efeitos fixos** são aqueles cujos níveis foram escolhidos *a priori* e, portanto, a conclusão obtida após a análise dos resultados será válida apenas para estes níveis. Em contrapartida, fatores de **efeitos aleatórios** são aqueles em que os níveis são escolhidos aleatoriamente em uma população. Normalmente, estes fatores possuem uma população muito grande e, portanto, é mais vantajoso utilizar um modelo de efeitos aleatórios, pois as conclusões poderão ser estendidas a outros níveis não considerados no experimento. Neste trabalho, serão tratados apenas os fatores de efeito fixo, porém, um exemplo em que poderiam ser utilizados efeitos aleatórios seria uma indústria têxtil com um grande número de teares, dentre os quais seriam selecionados aleatoriamente apenas alguns deles como níveis do experimento, porém, por se tratar de um modelo de efeitos aleatórios, as conclusões obtidas seriam aplicáveis a toda a população de teares (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Considerando um experimento em que haja um fator único com k níveis (tratamentos) e sejam realizados n réplicas (observações). Cada medição é denotada

pela notação x_{ij} , que corresponde à j -ésima observação do i -ésimo nível (tal que i varia de 1 a k e j varia de 1 a n). O total em cada nível i é representado por um ponto substituindo o índice j (ou seja, $x_{i.}$). Similarmente, o total geral é representado por pontos substituindo ambos os índices ($x_{..}$). Pode-se construir uma tabela para a coleta de dados como demonstra a Tabela 1 (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Tabela 1 – Dados típicos de um experimento com único fator

Tratamento (Nível)	Observações (Réplicas)				Totais	Médias
1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1n}	$x_{1.}$	$\bar{x}_{1.}$
2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2n}	$x_{2.}$	$\bar{x}_{2.}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
k	x_{k1}	x_{k2}	...	x_{kn}	$x_{k.}$	$\bar{x}_{k.}$
					$x_{..}$	$\bar{x}_{..}$

Fonte: Adaptado de Werkema e Aguiar (1996).

Cada observação x_{ij} em um experimento completamente aleatorizado com fator único, segundo Werkema e Aguiar (1996), pode ser descrita por:

$$x_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Onde:

μ = média geral de todos os tratamentos;

τ_i = efeito do i -ésimo tratamento;

ε_{ij} = erro aleatório associado à x_{ij} .

Feitas as observações, procede-se com a análise de variância. Por se tratar de erro aleatório, supõe-se que todos os ε_{ij} sejam variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas que sigam uma distribuição normal com média zero e variância σ^2 constante, ou abreviadamente $\varepsilon_{ij} \text{ iid } N(0, \sigma^2)$, conforme Werkema e Aguiar (1996). Esta suposição será utilizada em todos os modelos de planejamento apresentados neste trabalho.

Considerando o modelo de efeitos fixos, cada efeito de um tratamento pode ser definido como:

$$\tau_i = \mu_i - \mu \quad (2)$$

onde μ_i é a média do i -ésimo tratamento e μ a média global, que corresponde à média de todos os μ_i para i variando de 1 a k (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Para avaliar a influência do fator de interesse em relação à saída, deve-se testar a hipótese de que os μ_i sejam iguais, ou seja, de que os efeitos τ_i sejam todos iguais a zero. O teste de hipótese pode ser representado por:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ para pelo menos um } i$$
(3)

A partir do teste de hipótese, é feita a análise de variância através dos cálculos das somas dos quadrados total (índice T), entre tratamentos (índice E) e residual (índice R), dos quadrados médios entre tratamentos e residual e, por fim, pelo cálculo da relação F_0 entre eles (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

As somas dos quadrados, considerando os índices apresentados anteriormente, são calculadas por:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 - \frac{x_{..}^2}{kn}$$
(4)

$$SQ_E = \sum_{i=1}^k \frac{x_{i.}^2}{n} - \frac{x_{..}^2}{kn}$$
(5)

$$SQ_R = SQ_T - SQ_E$$
(6)

Os quadrados médios são calculados por:

$$QM_E = \frac{SQ_E}{k - 1}$$
(7)

$$QM_R = \frac{SQ_R}{k(n - 1)}$$
(8)

A relação F_0 é dada por:

$$F_0 = \frac{QM_E}{QM_R}$$
(9)

A análise de variância pode ser resumida pela Tabela 2.

Tabela 2 – Tabela de análise de variância para um único fator

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F_0
Entre tratamentos	SQ_E	$k - 1$	QM_E	$F_0 = \frac{QM_E}{QM_R}$
Residual	SQ_R	$k(n - 1)$	QM_R	–
Total	SQ_T	$kn - 1$	–	–

Fonte: Werkema e Aguiar (1996).

Após o cálculo de F_0 , deve-se compará-lo com o valor de $F_\alpha(k - 1, k(n - 1))$, obtido por meio da distribuição F, onde $k - 1$ e $k(n - 1)$ são os graus de liberdade e α é a significância. Se F_0 for maior que $F_\alpha(k - 1, k(n - 1))$, pode-se rejeitar a hipótese H_0 e concluir, com um nível de confiança de $100(1 - \alpha)\%$ que há diferença entre as

médias dos tratamentos e que, portanto, o fator de interesse exerce uma influência significativa sobre a variável de saída (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

3.3.2 Experimento Aleatorizado em Blocos Completos

Conforme fora mencionado na seção 3.1, em algumas situações pode ser útil a formação de blocos em um experimento, tais como quando há fontes perturbadoras conhecidas que influenciam na resposta. Por exemplo, considerando uma matéria-prima utilizada como unidade experimental que seja fabricada em lotes, pode ser que as amostras de matéria-prima provindas de diferentes lotes não sejam totalmente idênticas, o que poderia gerar uma fonte de erro adicional que seria confundida com o erro aleatório, caso fosse utilizado um experimento completamente aleatorizado. Ao se optar pela formação de blocos, em que em cada bloco haja apenas amostras provindas do mesmo lote, a variabilidade devido aos diferentes lotes deixa de fazer parte do erro aleatório (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Neste modelo, a aleatorização em relação à alocação das unidades experimentais que serão utilizadas em cada ensaio ocorre apenas dentro dos blocos, de modo a preservar sua homogeneidade (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Considerando que haja um fator único com a níveis e que tenham sido formados b blocos, sendo realizada uma única observação para cada nível em cada bloco, o modelo pode ser escrito, segundo Werkema e Aguiar (1996), como:

$$x_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, a \quad j = 1, 2, \dots, b \quad (10)$$

Onde:

x_{ij} = medição realizada no i -ésimo nível do fator no j -ésimo bloco;

μ = média global;

τ_i = efeito do i -ésimo nível do fator;

β_j = efeito do j -ésimo bloco;

ε_{ij} = erro aleatório associado à x_{ij} .

Assim como para o modelo completamente aleatorizado com fator único, após serem realizadas as medições, procede-se com a análise de variância. Supondo que a condição $\varepsilon_{ij} \text{ iid } N(0, \sigma^2)$ seja satisfeita, será testada a hipótese de que o efeito do fator seja nulo, ou seja:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 \quad (11)$$

$H_1: \tau_i \neq 0$ para pelo menos um i

Utilizando a notação de Werkema e Aguiar (1996), para denotar o total das observações em cada nível ou bloco será utilizado um ponto substituindo o índice que varia na soma, ou seja, $x_{i\cdot}$ denota o total do i -ésimo nível (j é variável) e $x_{\cdot j}$ o total do j -ésimo bloco (i é variável). Similarmente, $x_{\cdot\cdot}$ denota o total de todas as observações. As médias amostrais correspondentes são indicadas por um traço sobre a variável. Tem-se ainda que o número total de observações é dado por:

$$N = ab \quad (12)$$

Realiza-se, então, a análise de variância através dos cálculos das somas dos quadrados total (índice T), do fator (índice F), dos blocos (índice B) e residual (índice R), dos quadrados médios do fator, do bloco e residual e, por fim, pelo cálculo da relação F_0 entre o quadrado médio do fator e o residual (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

As somas dos quadrados são calculadas por:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b x_{ij}^2 - \frac{x_{\cdot\cdot}^2}{N} \quad (13)$$

$$SQ_F = \sum_{i=1}^a \frac{x_{i\cdot}^2}{b} - \frac{x_{\cdot\cdot}^2}{N} \quad (14)$$

$$SQ_B = \sum_{j=1}^b \frac{x_{\cdot j}^2}{a} - \frac{x_{\cdot\cdot}^2}{N} \quad (15)$$

$$SQ_R = SQ_T - SQ_F - SQ_B \quad (16)$$

Os quadrados médios são calculados por:

$$QM_F = \frac{SQ_F}{a - 1} \quad (17)$$

$$QM_B = \frac{SQ_B}{b - 1} \quad (18)$$

$$QM_R = \frac{SQ_R}{(a - 1)(b - 1)} \quad (19)$$

A relação F_0 é dada por:

$$F_0 = \frac{QM_F}{QM_R} \quad (20)$$

A análise de variância pode ser resumida pela Tabela 3.

Tabela 3 – Tabela de análise de variância para blocos completos

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F_0
Fator	SQ_F	$a - 1$	QM_F	$F_0 = \frac{QM_F}{QM_R}$
Blocos	SQ_B	$b - 1$	QM_B	–
Residual	SQ_R	$(a - 1)(b - 1)$	QM_R	–
Total	SQ_T	$N - 1$	–	–

Fonte: Werkema e Aguiar (1996).

Para se rejeitar H_0 com um nível de significância α , o valor de F_0 deve ser maior que $F_\alpha(a - 1, (a - 1)(b - 1))$, que é obtido por meio da distribuição F, em que $a - 1$ e $(a - 1)(b - 1)$ são os graus de liberdade. Se H_0 for rejeitada, será possível concluir, com um nível de confiança de $100(1 - \alpha)\%$, que o fator de interesse exerce uma influência significativa sobre a variável de saída (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Para avaliar se a formação de blocos seria realmente necessária, pode-se avaliar o valor da razão QM_B/QM_R . Valores altos indicam que os blocos exercem um efeito significativo sobre a resposta e que a escolha de incluí-los foi assertiva. Deve-se notar, porém, que não é válida a analogia de comparar esta razão com $F_\alpha(b - 1, (a - 1)(b - 1))$ com o intuito de testar a hipótese dos efeitos β_j serem iguais a zero, uma vez que a aleatorização ocorreu dentro dos blocos, somente (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Presumiu-se que não houvesse interação entre o fator e os blocos. Caso esta interação exista e seja de interesse, deve-se utilizar um experimento fatorial, que é assunto da seção 3.4 (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

3.3.3 Experimento em Quadrado Latino

Na seção 3.3.3 foi apresentado o planejamento de experimentos com blocos completos, em que os blocos são formados a fim de controlar a variabilidade devido a uma fonte perturbadora. Em algumas situações, porém, pode ser que exista mais de uma fonte perturbadora envolvida no processo, por exemplo, matéria-prima provinda de diferentes lotes e manuseio por diferentes operadores, com diferentes níveis de experiência e habilidade. No exemplo citado, se a quantidade de lotes, operadores e de níveis do fator de interesse forem iguais, pode-se optar por um experimento em quadrado latino (MONTGOMERY, 2013).

Este modelo é mais frequentemente utilizado em situações em que haja de cinco a oito tratamentos. Uma vez que o número de tratamentos deve ser igual ao número de repetições, o planejamento em quadrado latino pode se tornar inviável para casos em que haja muitos tratamentos, por requerer um número maior de repetições. Além disso, o número de graus de liberdade para os resíduos é menor, se comparado a outros modelos, o que propicia uma menor sensibilidade para a análise de variância, tornando-o pouco eficiente em situações com apenas três ou quatro tratamentos (FERREIRA, 2018).

Considerando que haja duas fontes perturbadoras, cada uma com p níveis, e um fator de interesse, também com p níveis, pode-se construir um quadrado cujas linhas representem uma das fontes perturbadoras e cujas colunas representem a outra. Os níveis do fator (tratamentos) serão representados por letras do alfabeto latino (o que explica o nome “quadrado latino”) e devem ser alocados às células de maneira aleatória, porém com a restrição de que as letras não se repitam na mesma linha ou coluna. Um exemplo de quadrado latino, para $p = 5$, pode ser visto na Tabela 4 (MONTGOMERY, 2013).

Tabela 4 – Exemplo de quadrado latino para $p = 5$

	1	2	3	4	5
1	A	D	B	E	C
2	D	A	C	B	E
3	C	B	E	D	A
4	B	E	A	C	D
5	E	C	D	A	B

Fonte: Adaptado de Montgomery (2013).

Segundo Montgomery (2013), a observação x_{ijk} pode ser descrita pelo modelo estatístico:

$$x_{ijk} = \mu + \alpha_i + \tau_j + \beta_k + \varepsilon_{ijk}, \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, p \\ k = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (21)$$

Onde:

μ = média global;

α_i = efeito da i -ésima linha;

τ_j = efeito do j -ésimo tratamento;

β_k = efeito da k -ésima coluna;

ε_{ijk} = erro aleatório associado a x_{ijk} .

É importante salientar que, neste modelo, considera-se que não existam interações entre linhas, colunas e tratamentos. Além disso, em cada célula é realizada uma única observação (MONTGOMERY, 2013).

3.3.3.1 Análise de variância

Para realizar a análise de variância, devem ser calculadas as somas dos quadrados total (índice T), das linhas (índice L), das colunas (índice C), entre tratamentos (índice E) e residual (índice R), os quadrados médios das linhas, colunas, entre tratamentos e residual e, por fim, pelo cálculo da relação F_0 entre o quadrado médio entre tratamentos e o residual (MONTGOMERY, 2013).

Os totais em uma linha, coluna, ou para um mesmo tratamento serão denotados por um ponto substituindo os índices variáveis na soma (ou seja, $x_{i..}$, $x_{..k}$ e $x_{.j.}$, respectivamente). Similarmente, a notação $x_{...}$ denota o total geral. As médias obtidas no experimento serão indicadas por um traço sobre a variável.

Segundo Montgomery (2013), o número de observações N é dado por:

$$N = p^2 \quad (22)$$

As somas dos quadrados são calculadas por:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^p x_{ijk}^2 - \frac{x_{...}^2}{N} \quad (23)$$

$$SQ_E = \sum_{j=1}^p \frac{x_{.j.}^2}{p} - \frac{x_{...}^2}{N} \quad (24)$$

$$SQ_L = \sum_{i=1}^p \frac{x_{i..}^2}{p} - \frac{x_{...}^2}{N} \quad (25)$$

$$SQ_C = \sum_{k=1}^p \frac{x_{..k}^2}{p} - \frac{x_{...}^2}{N} \quad (26)$$

$$SQ_R = SQ_T - SQ_E - SQ_L - SQ_C \quad (27)$$

Os quadrados médios são calculados por:

$$QM_E = \frac{SQ_E}{p - 1} \quad (28)$$

$$QM_L = \frac{SQ_L}{p - 1} \quad (29)$$

$$QM_C = \frac{SQ_C}{p - 1} \quad (30)$$

$$QM_R = \frac{SQ_R}{(p - 2)(p - 1)} \quad (31)$$

A relação F_0 é dada por:

$$F_0 = \frac{QM_E}{QM_R} \quad (32)$$

A análise de variância pode ser resumida pela Tabela 5.

Tabela 5 – Tabela de análise de variância para quadrado latino

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F_0
Entre tratamentos	SQ_E	$p - 1$	QM_E	$F_0 = \frac{QM_E}{QM_R}$
Linhas	SQ_L	$p - 1$	QM_L	–
Colunas	SQ_C	$p - 1$	QM_C	–
Residual	SQ_R	$(p - 2)(p - 1)$	QM_R	–
Total	SQ_T	$p^2 - 1$	–	–

Fonte: Adaptado de Montgomery (2013).

Para concluir que o fator exerce um efeito significativo sobre a resposta, a um nível de significância α , o valor de F_0 deve ser maior que $F_\alpha(p - 1, (p - 2)(p - 1))$, obtido por meio da distribuição F, em que $p - 1$ e $(p - 2)(p - 1)$ são os graus de liberdade do numerador e do denominador, respectivamente (MONTGOMERY, 2013).

3.3.3.2 Aleatorização dos tratamentos em um quadrado latino

De acordo com Ferreira (2018), para a obtenção de quadrado latino aleatorizado, tal como o apresentado na Tabela 4, pode-se partir de um quadrado latino sistemático e realizar a permutação das linhas e colunas de maneira aleatória.

Um quadrado latino sistemático ou padrão, segundo Montgomery (2013), é aquele em que as letras na primeira linha e na primeira coluna estão escritas em ordem alfabética. As linhas subsequentes são escritas de modo que as letras sejam deslocadas uma célula para a esquerda. A Tabela 6 apresenta um quadrado latino sistemático de tamanho $p = 4$.

Tabela 6 – Quadrado latino sistemático para $p = 4$

	1	2	3	4
1	A	B	C	D
2	B	C	D	A
3	C	D	A	B
4	D	A	B	C

Fonte: Adaptado de Montgomery (2013).

Partindo do quadrado latino sistemático da Tabela 6, realiza-se então a permutação das linhas. Um exemplo de quadrado que poderá ser obtido é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Exemplo de quadrado latino obtido após a permutação de linhas

	1	2	3	4
1	C	D	A	B
2	B	C	D	A
3	D	A	B	C
4	A	B	C	D

Fonte: Autoria própria (2019).

Finalmente, realiza-se a permutação das colunas. O resultado será um quadrado latino aleatorizado como o da Tabela 8.

Tabela 8 – Exemplo de quadrado latino obtido após a permutação de colunas

	1	2	3	4
1	D	B	C	A
2	C	A	B	D
3	A	C	D	B
4	B	D	A	C

Fonte: Autoria própria (2019).

Dessa forma, garante-se que os efeitos de fatores externos não-controláveis sejam balanceados entre os tratamentos e não sejam confundidos com o efeito do fator de interesse (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

3.3.3.3 Replicação de quadrados latinos

Devido ao baixo número de graus de liberdade do erro, quando comparado a outros modelos de planejamento, principalmente para valores de p baixos, como $p = 3$ ou $p = 4$, pode ser desejável realizar réplicas do experimento, o que aumentaria o número de graus de liberdade. Para isso, porém, devem ser feitas algumas alterações à análise de variância (MONTGOMERY, 2013).

Considerando que sejam mantidos os mesmos níveis para as duas fontes perturbadoras em cada réplica, a observação será denotada por x_{ijkl} , em que a réplica

é representada pelo índice adicional l . Supondo que haja n réplicas, o número total de observações, segundo Montgomery (2013), agora será dado por:

$$N = np^2 \quad (33)$$

Para a análise de variância, haverá dois termos a mais para serem calculados, a soma dos quadrados e o quadrado médio das réplicas, além dos já apresentados na seção 3.3.4.1, que devem ser recalculados. Considerando que $x_{...l}$ seja o total para a réplica l , de acordo com Montgomery (2013), as somas dos quadrados devem ser calculadas por:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^p x_{ijkl}^2 - \frac{x_{...}^2}{N} \quad (34)$$

$$SQ_E = \sum_{j=1}^p \frac{x_{.j..}^2}{np} - \frac{x_{...}^2}{N} \quad (35)$$

$$SQ_L = \sum_{i=1}^p \frac{x_{i...}^2}{np} - \frac{x_{...}^2}{N} \quad (36)$$

$$SQ_C = \sum_{k=1}^p \frac{x_{...k.}^2}{np} - \frac{x_{...}^2}{N} \quad (37)$$

$$SQ_{Rélicas} = \sum_{l=1}^n \frac{x_{...l}^2}{p^2} - \frac{x_{...}^2}{N} \quad (38)$$

$$SQ_R = SQ_T - SQ_E - SQ_L - SQ_C - SQ_{Rélicas} \quad (39)$$

Os quadrados médios são calculados por:

$$QM_E = \frac{SQ_E}{p-1} \quad (40)$$

$$QM_L = \frac{SQ_L}{p-1} \quad (41)$$

$$QM_C = \frac{SQ_C}{p-1} \quad (42)$$

$$QM_{Rélicas} = \frac{SQ_{Rélicas}}{n-1} \quad (43)$$

$$QM_R = \frac{SQ_R}{(p-1)[n(p+1)-3]} \quad (44)$$

A relação F_0 continua sendo dada por:

$$F_0 = \frac{QM_E}{QM_R} \quad (45)$$

A nova análise de variância pode ser resumida pela Tabela 9.

Tabela 9 – Tabela de análise de variância para quadrado latino replicado

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F_0
Entre tratamentos	SQ_E	$p - 1$	QM_E	$F_0 = \frac{QM_E}{QM_R}$
Linhas	SQ_L	$p - 1$	QM_L	–
Colunas	SQ_C	$p - 1$	QM_C	–
Réplicas	$SQ_{R\acute{e}plicas}$	$n - 1$	$QM_{R\acute{e}plicas}$	–
Residual	SQ_R	$(p - 1)[n(p + 1) - 3]$	QM_R	–
Total	SQ_T	$np^2 - 1$	–	–

Fonte: Adaptado de Montgomery (2013).

Ao comparar F_0 com F_α , deve-se observar que o número de graus de liberdade residual passou a ser $(p - 1)[n(p + 1) - 3]$, logo o F_α a ser utilizado deve ser $F_\alpha(p - 1, (p - 1)[n(p + 1) - 3])$.

3.4 PLANEJAMENTOS DE EXPERIMENTO COM MAIS DE UM FATOR

Normalmente, quando se deseja analisar o efeito de mais de um fator sobre a saída do processo, utilizam-se os **experimentos fatoriais**, nos quais cada combinação de níveis de fatores é avaliada. Estes experimentos possuem como vantagem a capacidade de detecção de possíveis interações entre fatores, em comparação com os experimentos em que se variam apenas os níveis de um fator por vez. Por exemplo, caso existam dois fatores, A e B , ao se fixar um valor de A e encontrar um valor de B que otimize a saída e, em seguida, fixar B neste valor e encontrar um valor ótimo de A , pode-se concluir erroneamente de que os valores encontrados sejam a solução ótima, o que pode não ser verdade, uma vez que possa existir interação entre A e B (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

De acordo com Werkema e Aguiar (1996), mesmo na ausência de interação, experimentos fatoriais têm a vantagem de necessitarem de menos observações que experimentos em que se varia um fator por vez para se obterem resultados com a mesma precisão. Supondo novamente dois fatores, A e B , ambos com dois níveis: A_1 e A_2 para o fator A e B_1 e B_2 para o fator B . Em um experimento fatorial, poderiam-se estimar os efeitos das mudanças de A e B por:

$$\text{Efeito}_A = \frac{(A_2B_1 - A_1B_1) + (A_2B_2 - A_1B_2)}{2} \quad (46)$$

$$\text{Efeito}_B = \frac{(A_1B_2 - A_1B_1) + (A_2B_2 - A_2B_1)}{2} \quad (47)$$

Pelas Equações 46 e 47, nota-se que são necessárias quatro observações: A_1B_1 , A_1B_2 , A_2B_1 e A_2B_2 , realizadas em uma única réplica. Por outro lado, ao se variar apenas um fator por vez, a observação A_2B_2 não existiria e seriam necessárias 2 réplicas para se obterem conclusões de mesma precisão. Os efeitos das mudanças de A e B seriam dados por:

$$\text{Efeito}_A = \frac{[(A_2B_1)_1 - (A_1B_1)_1] + [(A_2B_1)_2 - (A_1B_1)_2]}{2} \quad (48)$$

$$\text{Efeito}_B = \frac{[(A_1B_2)_1 - (A_1B_1)_1] + [(A_1B_2)_2 - (A_1B_1)_2]}{2} \quad (49)$$

em que os índices após os parênteses indicam a réplica em questão. Nota-se que há 3 combinações: A_1B_1 , A_1B_2 e A_2B_1 , mas, por terem sido realizadas duas réplicas, isso totaliza 6 observações, número superior às 4 observações do planejamento fatorial (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

3.4.1 Experimento Fatorial com Dois Fatores

Considerando um experimento em que haja dois fatores, A e B , com a e b níveis, respectivamente, e sejam realizados n réplicas. Cada observação é denotada por x_{ijk} , que corresponde à k -ésima observação da resposta ($k = 1, 2, \dots, n$), na situação em que A está em seu i -ésimo nível ($i = 1, 2, \dots, a$) e B em seu j -ésimo nível ($j = 1, 2, \dots, b$). Assim como nos modelos anteriores, será utilizada a notação de ponto para indicar o total em um nível de um fator, substituindo os índices que variam na soma, sendo o total geral representado por três pontos. As médias amostrais são denotadas por um traço superior. Para a coleta de dados, pode-se utilizar como base a Tabela 10, na qual as réplicas estão indicadas dentro da mesma célula, separadas por vírgula (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Tabela 10 – Dados típicos de um experimento fatorial com dois fatores

Fator A	Fator B			
	1	2	...	b
1	$x_{111}, x_{112}, \dots, x_{11n}$	$x_{121}, x_{122}, \dots, x_{12n}$...	$x_{1b1}, x_{1b2}, \dots, x_{1bn}$
2	$x_{211}, x_{212}, \dots, x_{21n}$	$x_{221}, x_{222}, \dots, x_{22n}$...	$x_{2b1}, x_{2b2}, \dots, x_{2bn}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
a	$x_{a11}, x_{a12}, \dots, x_{a1n}$	$x_{a21}, x_{a22}, \dots, x_{a2n}$...	$x_{ab1}, x_{ab2}, \dots, x_{abn}$

Fonte: Werkema e Aguiar (1996).

Cada observação x_{ijk} , segundo Werkema e Aguiar (1996) e Montgomery e Runger (2009), pode ser descrita por:

$$x_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (50)$$

Onde:

μ = média global;

τ_i = efeito do i -ésimo nível do fator A ;

β_j = efeito do j -ésimo nível do fator B ;

$(\tau\beta)_{ij}$ = efeito da interação entre A e B ;

ε_{ijk} = erro aleatório associado a x_{ijk} .

Assim como para o modelo com fator único, procede-se com a análise de variância. Segundo Montgomery e Runger (2009), serão realizados três testes de hipóteses, analisando os efeitos de A , B e da interação AB . Os testes podem ser representados por:

$$H_{0/A}: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 \quad (51)$$

$$H_{1/A}: \tau_i \neq 0 \text{ para pelo menos um } i$$

$$H_{0/B}: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0 \quad (52)$$

$$H_{1/B}: \beta_j \neq 0 \text{ para pelo menos um } j$$

$$H_{0/AB}: (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots = (\tau\beta)_{ab} = 0 \quad (53)$$

$$H_{1/AB}: (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ para pelo menos um } ij$$

Devem-se calcular as somas dos quadrados total (índice T), do fator A , do fator B , da interação AB e residual (índice R), dos quadrados médios para os fatores A , B , para a interação AB e residual e, por fim, pelo cálculo das relações $F_{0/A}$, $F_{0/B}$ e $F_{0/AB}$ entre o quadrado médio do fator ou interação correspondente e o quadrado médio residual. Para o cálculo da soma dos quadrados da interação AB , pode ser útil calcular primeiramente a soma dos quadrados dos subtotais (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

As somas dos quadrados são calculadas por:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n x_{ijk}^2 - \frac{x_{...}^2}{abn} \quad (54)$$

$$SQ_A = \sum_{i=1}^a \frac{x_{i..}^2}{bn} - \frac{x_{...}^2}{abn} \quad (55)$$

$$SQ_B = \sum_{j=1}^b \frac{x_{.j.}^2}{an} - \frac{x_{...}^2}{abn} \quad (56)$$

$$SQ_{Subtotais} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{x_{ij.}^2}{n} - \frac{x_{...}^2}{abn} \quad (57)$$

$$SQ_{AB} = SQ_{Subtotais} - SQ_A - SQ_B \quad (58)$$

$$SQ_R = SQ_T - SQ_{Subtotais} \quad (59)$$

Os quadrados médios são calculados por:

$$QM_A = \frac{SQ_A}{a-1} \quad (60)$$

$$QM_B = \frac{SQ_B}{b-1} \quad (61)$$

$$QM_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{(a-1)(b-1)} \quad (62)$$

$$QM_R = \frac{SQ_R}{ab(n-1)} \quad (63)$$

As relações F_0 são dadas por:

$$F_{0/A} = \frac{QM_A}{QM_R} \quad (64)$$

$$F_{0/B} = \frac{QM_B}{QM_R} \quad (65)$$

$$F_{0/AB} = \frac{QM_{AB}}{QM_R} \quad (66)$$

A análise de variância pode ser resumida pela Tabela 11.

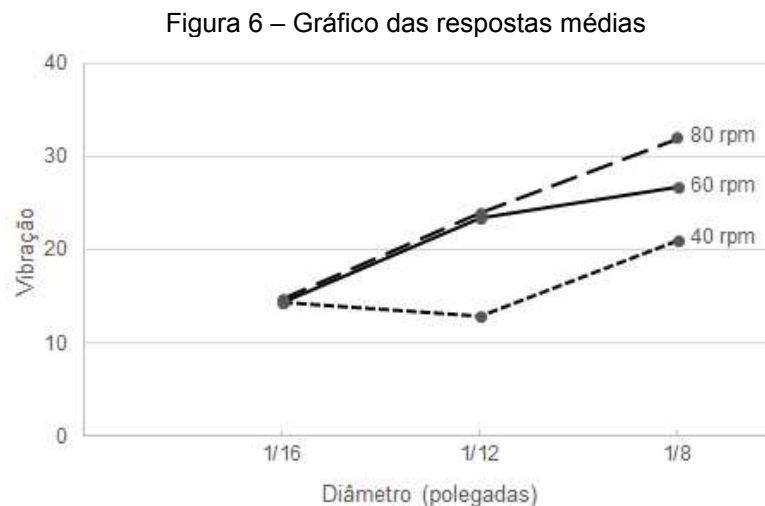
Tabela 11 – Tabela de análise de variância para dois fatores

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F_0
Fator A	SQ_A	$a-1$	QM_A	$F_{0/A} = \frac{QM_A}{QM_R}$
Fator B	SQ_B	$b-1$	QM_B	$F_{0/B} = \frac{QM_B}{QM_R}$
Interação AB	SQ_{AB}	$(a-1)(b-1)$	QM_{AB}	$F_{0/AB} = \frac{QM_{AB}}{QM_R}$
Residual	SQ_R	$ab(n-1)$	QM_R	–
Total	SQ_T	$abn-1$	–	–

Fonte: Werkema e Aguiar (1996).

Deve-se comparar cada F_0 com o valor de $F_\alpha(\nu_1, ab(n-1))$ correspondente, obtido por meio da distribuição F, sendo ν_1 igual ao número de graus de liberdade do numerador de F_0 , conforme a Tabela 11, $ab(n-1)$ é o grau de liberdade do denominador e α é a significância. Se um F_0 for maior que seu F_α correspondente, pode-se concluir, com um nível de confiança de $100(1-\alpha)\%$ que o fator ou interação em questão exerce uma influência significativa sobre a variável de saída (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Em experimentos fatoriais, pode ser útil construir um gráfico das médias obtidas em cada tratamento, tal como o ilustrado na Figura 6, obtida do Exemplo 4.1 de Werkema e Aguiar (1996), em que os fatores eram o diâmetro e a velocidade de uma broca e a variável de saída era a vibração resultante.



Fonte: Adaptado de Werkema e Aguiar (1996).

A partir do gráfico, constatou-se, pela análise de variância, que ambos os fatores e também sua interação eram influentes no processo. A ausência de paralelismo entre as linhas é um indicador da interação existente entre os fatores (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

3.4.2 Experimento Fatorial 2^k

Dentre os casos de planejamento fatorial, um dos mais importantes é o de k fatores e dois níveis (2^k). Os dois níveis podem ser valores quantitativos, como dois valores de uma variável, ou qualitativos, tais como a presença ou não de um fator ou níveis “alto” e “baixo”. Esse tipo de planejamento é ideal para estágios iniciais de um

experimento, pois exige o menor número de corridas para estudar os k fatores em um planejamento fatorial completo (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Considerando o experimento 2^k mais simples, ou seja, com apenas dois fatores (2^2), os dois podem ser representados por A e B . Podem-se denotar os níveis baixo e alto dos fatores pelos sinais $-$ e $+$, respectivamente. A combinação dos tratamentos pode ser representada por (1) , a , b e ab . Sendo (1) ambos os fatores em nível baixo, e a combinação de tratamentos a indica o fator A em nível alto e B em nível baixo, b indica o fator B em nível alto e A em nível baixo. Pode-se construir uma tabela para a coleta de dados como demonstra a Tabela 12.

Tabela 12 – Dados típicos de um planejamento 2^2

Combinação dos Tratamentos	Fatores do planejamento			Observações (Réplicas)	Totais	Médias
	A	B	AB			
(1)	$-$	$-$	$+$	$x_{(1)1}$ $x_{(1)2}$ \dots $x_{(1)n}$	$x_{(1)\cdot}$	$\bar{x}_{(1)\cdot}$
a	$+$	$-$	$-$	x_{a1} x_{a2} \dots x_{an}	$x_{a\cdot}$	$\bar{x}_{a\cdot}$
b	$-$	$+$	$-$	x_{b1} x_{b2} \dots x_{bn}	$x_{b\cdot}$	$\bar{x}_{b\cdot}$
ab	$+$	$+$	$+$	x_{ab1} x_{ab2} \dots x_{abn}	$x_{ab\cdot}$	$\bar{x}_{ab\cdot}$

Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2009).

Os efeitos de interesse no planejamento 2^2 são A e B e o fator de segunda ordem é AB . Segundo Montgomery e Runger (2009), os efeitos podem ser estimados utilizando-se a média das observações, e podem ser descritos por:

$$A = \bar{x}_{A+} - \bar{x}_{A-} = \frac{a + ab}{2n} - \frac{b + (1)}{2n} = \frac{1}{2n} [a + ab - b - (1)] \quad (67)$$

$$B = \bar{x}_{B+} - \bar{x}_{B-} = \frac{b + ab}{2n} - \frac{a + (1)}{2n} = \frac{1}{2n} [b + ab - a - (1)] \quad (68)$$

$$AB = \frac{ab + (1)}{2n} - \frac{a + b}{2n} = \frac{1}{2n} [ab + (1) - a - b] \quad (69)$$

Onde:

n = número de réplicas (observações).

As grandezas representadas entre colchetes nas equações anteriores são chamadas de contrastes. Elas são utilizadas no cálculo das estimativas dos efeitos e nas somas dos quadrados. O contraste de A , por exemplo, é dado por $a + ab - b - (1)$. Para se obter o sinal de cada contraste é possível utilizar uma tabela de sinais mais e menos, como a da Tabela 13, onde as colunas são os efeitos principais A e B , AB é a interação dos dois fatores e I é o total. Já as linhas são as combinações dos tratamentos (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Tabela 13 – Sinais dos efeitos de um planejamento 2^2

Combinação dos Tratamentos	Efeito Fatorial			
	<i>I</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>AB</i>
(1)	+	-	-	+
<i>a</i>	+	+	-	-
<i>b</i>	+	-	+	-
<i>ab</i>	+	+	+	+

Fonte: Montgomery e Runger (2009).

As somas dos quadrados de *A*, *B* e *AB*, são calculadas por:

$$SQ_A = \frac{[a + ab - b - (1)]^2}{4n} \quad (70)$$

$$SQ_B = \frac{[b + ab - a - (1)]^2}{4n} \quad (71)$$

$$SQ_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{4n} \quad (72)$$

A soma total dos quadrados (SQ_T) é calculada da mesma maneira que foi apresentada na Equação 54, substituindo *a* e *b* na equação pelo valor 2, por se tratarem de dois níveis para ambos os fatores.

De acordo com Montgomery e Runger (2009), qualquer planejamento 2^k com *n* réplicas (observações), as estimativas dos efeitos e a soma dos quadrados são calculados por:

$$Efeito = \frac{Contraste}{n2^{k-1}} \quad (73)$$

$$SQ_{Efeito} = \frac{Contraste^2}{n2^k} \quad (74)$$

Os demais cálculos para análise da variância são realizados como foi apresentado na seção 3.4.1.

3.4.3 Experimento Fatorial 2^k Fracionado

O número de corridas aumenta exponencialmente com o aumento de fatores (*k*) em um planejamento fatorial. No entanto, muitas vezes interações de ordem superior não são relevantes para o estudo realizado. Se esse for o caso, um planejamento fatorial fracionário é uma boa opção, pois é possível reduzir o número de corridas para se obter somente os dados sobre os efeitos principais e interações de ordem baixa (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Uma das principais aplicações dos experimentos fatoriais fracionados são os experimentos exploratórios (*screening experiment*), dado que, geralmente se tratam de etapas iniciais de um estudo e, por isso, muitos fatores são levados em conta. Sendo assim, o planejamento 2^k fracionado é ideal para identificar quais desses fatores têm efeitos relevantes (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

3.4.3.1 Meia-fração do planejamento 2^k

Um planejamento de meia-fração do planejamento 2^k exige 2^{k-1} corridas, metade do que seria necessário em um planejamento 2^k completo. Tomando como exemplo uma meia-fração de 2^3 , com sua tabela de sinais representada abaixo na Tabela 14, aplicando um planejamento 2^{3-1} o número de corridas necessárias passa de oito para quatro. Particionando a tabela abaixo, podemos selecionar os tratamentos a , b , c e abc como uma meia-fração, cujas combinações resultam num efeito ABC positivo, por isso ABC é chamado de gerador dessa meia-fração com uma relação de definição $I = ABC$ (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Tabela 14 – Sinais dos efeitos de um planejamento 2^3

Combinação de Tratamentos	Efeito Fatorial							
	<i>I</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>
<i>a</i>	+	+	–	–	–	–	+	+
<i>b</i>	+	–	+	–	–	+	–	+
<i>c</i>	+	–	–	+	+	–	–	+
<i>abc</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>ab</i>	+	+	+	–	+	–	–	–
<i>ac</i>	+	+	–	+	–	+	–	–
<i>bc</i>	+	–	+	+	–	–	+	–
(1)	+	–	–	–	+	+	+	–

Fonte: Montgomery e Runger (2009).

As combinações dos tratamentos desta meia-fração resultam em três graus de liberdade relacionados com os efeitos principais estimados pelas seguintes equações (MONTGOMERY; RUNGER, 2009):

$$A = \frac{[a - b - c + abc]}{2} \quad (75)$$

$$B = \frac{[-a + b - c + abc]}{2} \quad (76)$$

$$C = \frac{[-a - b + c + abc]}{2} \quad (77)$$

Da mesma maneira, as estimativas das interações de segunda ordem podem ser averiguadas como sendo:

$$BC = \frac{[a - b - c + abc]}{2} \quad (78)$$

$$AC = \frac{[-a + b - c + abc]}{2} \quad (79)$$

$$AB = \frac{[-a - b + c + abc]}{2} \quad (80)$$

Dessa forma, é possível constatar que a combinação linear das observações na coluna A (l_A), além de estimar o efeito A também estima a interação BC, ou seja, a combinação linear l_A estima a soma desses efeitos. Essas associações são chamadas de pares associados e são consequência da replicação fracionada. Na prática é possível selecionar a fração que associe os efeitos principais e interações de ordem baixa com interações de alta ordem (que são, em sua maioria, insignificantes). O mesmo ocorre para as combinações lineares l_B e l_C , assim podemos concluir que as estimativas dos efeitos podem ser representadas por (MONTGOMERY; RUNGER, 2009):

$$l_A = A + BC \quad (81)$$

$$l_B = B + AC \quad (82)$$

$$l_C = C + AB \quad (83)$$

Os pares associados também podem ser obtidos pela multiplicação de qualquer efeito pela relação de definição, que nesse caso é $I = ABC$.

$$A = A \times ABC = A^2BC = BC \quad (84)$$

$$B = B \times ABC = AB^2C = AC \quad (85)$$

$$C = C \times ABC = ABC^2 = AB \quad (86)$$

Normalmente a fração que possui a relação de definição com sinal positivo é chamada de fração principal, e a com sinal negativo é chamada de fração alternada. No exemplo citado a fração alternada ($I = -ABC$) gera as seguintes estimativas dos efeitos (MONTGOMERY; RUNGER, 2009):

$$l'_A = A - BC \quad (87)$$

$$l'_B = B - AC \quad (88)$$

$$l'_C = C - AB \quad (89)$$

Pela adição e subtração de ambas as frações é possível obter as estimativas não associadas, por exemplo, pode-se desacoplar o efeito principal A da interação de segunda ordem BC :

$$\frac{1}{2}(l_A + l'_A) = \frac{1}{2}(A + BC + A - BC) = A \quad (90)$$

$$\frac{1}{2}(l_A - l'_A) = \frac{1}{2}(A + BC - A + BC) = BC \quad (91)$$

O mesmo pode ser feito para isolar os outros efeitos principais e as interações de segunda ordem. Essa propriedade permite com que o planejamento fatorial seja boa opção para problemas experimentais, pois permite correr sequencias de experimentos pequenos e eficientes, combinar informações de vários experimentos e acelerar o processo de aprendizado sobre o processo (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

3.4.4 Planejamento de Superfície de Resposta

Segundo Montgomery e Runger (2009), a metodologia da superfície de resposta é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas que tem como objetivo otimizar a resposta de aplicações que possuem influência de muitas variáveis. Por exemplo, em um sistema que tem como variáveis de entrada x_1 e x_2 , sendo ϵ o ruído ou erro observado na resposta, a variável de saída Y pode ser denotada como:

$$Y = f(x_1, x_2) + \epsilon \quad (92)$$

Se a resposta esperada for dada por:

$$E(Y) = f(x_1, x_2) = \eta \quad (93)$$

O termo η é chamado superfície de resposta e pode ser representado por:

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (94)$$

Neste caso, a superfície de resposta pode ser plotada em gráfico tridimensional sobre os níveis de x_1 e x_2 . Como, normalmente, o objetivo é observar o comportamento da superfície de resposta, é plotado o gráfico dos contornos (ou curvas de nível) para observar as linhas de resposta constantes sobre o plano x_1, x_2 (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Em grande parte dos problemas em que a metodologia da superfície de resposta é aplicada, a relação da resposta com as variáveis independentes não é conhecida. Por isso, a primeira etapa desse método é encontrar uma aproximação

para a relação de Y com as variáveis independentes (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Se a resposta se aproximar de uma função linear das variáveis independentes, o modelo de primeira ordem pode ser aplicado:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (95)$$

onde os β_i representam os coeficientes do polinômio.

Se relação não for linear um polinômio de grau superior deve ser utilizado, como o modelo de segunda ordem:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (96)$$

O método dos mínimos quadrados é utilizado para estimar os parâmetros nas aproximações polinomiais. Dessa forma, a avaliação da superfície de resposta é feita relacionando-a com a superfície ajustada. Se as superfícies forem próximas, então a análise da superfície ajustada poderá ser considerada aproximadamente equivalente à análise do sistema real (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Se a região da superfície avaliada estiver afastada do valor ou da faixa de valores buscadas para a variável de saída, o modelo ideal é o de primeira ordem, pois ele conduzirá mais rapidamente o estudo à vizinhança desejada. Quando o ponto ótimo estiver próximo, modelos de ordem superior podem ser utilizados, além de análises para encontrar o máximo da superfície (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

3.5 MÉTODO DE TAGUCHI

O método de Taguchi, também conhecido por design robusto de parâmetros (RPD, do inglês *robust parameter design*), é um modelo que busca reduzir desvios de qualidade, com foco na determinação de níveis de parâmetros (fatores controláveis) que garantam valores desejados para as variáveis de saída, com mínima variabilidade (FIOD NETO, 1997; MONTGOMERY, 2013).

Este método pode ser considerado como um modelo de delineamento de fatorial fracionado em que são aplicadas ferramentas facilitadoras como matrizes ortogonais e gráficos lineares de modo a aproximar a teoria estatística ao cotidiano da engenharia (TAGUCHI, 1993; ROSS, 1991 apud FIOD NETO, 1997).

Taguchi faz uso de matrizes ortogonais (OAs, do inglês *orthogonal arrays*) como uma forma de determinar o menor número de experimentos necessários para uma dada quantidade de fatores. Em casos em que as interações entre fatores não sejam importantes e estes possuam um número fixo de níveis, uma OA padrão pode ser utilizada; por outro lado, se houver interações ou se os fatores possuírem um número misto de níveis, então pode-se adaptar a matriz para a situação em questão (ROY, 1990).

O uso de matrizes ortogonais reduz significativamente o número de corridas necessárias em um experimento. Por exemplo, em uma situação em que haja 15 fatores, cada um com dois níveis, ao se optar por um experimento fatorial completo, seriam necessárias 32768 (2^{15}) corridas para teste de cada uma das combinações de níveis possíveis; por outro lado, ao se optar pelo modelo proposto por Taguchi, em grande parte dos casos poderia ser adequado utilizar uma matriz ortogonal L_{16} , o que reduziria o número de corridas para apenas 16 (ROY, 1990).

Diferentemente do método em que se varia um fator por vez, a influência dos níveis de um fator é analisada variando-se também os níveis de outros fatores, de acordo com a matriz ortogonal utilizada, dessa forma, se a diferença entre dois níveis de um fator A for consistente durante o experimento, o efeito de A tende a ser significativo; porém, se essa diferença variar significativamente para diferentes níveis de outros fatores, pode-se concluir que A tenha pouca influência na saída do processo. Em comparação, quando se varia apenas um fator por vez, pode-se chegar a conclusões errôneas a respeito do efeito do fator, pois este foi testado apenas para uma condição em que os outros fatores foram mantidos constantes e será verdade apenas para esta combinação de níveis. Dessa forma, o método de Taguchi garante uma maior reprodutibilidade do experimento (TAGUCHI; CHOWDHURY; WU, 2005).

3.5.1 Metodologia

De acordo com Roy (1990), é de fundamental importância o conhecimento do processo ou produto, o qual deseja-se investigar através do experimento, de modo a identificar os fatores que possuam maior chance de exercer uma maior influência na resposta e os níveis a serem testados. Isto pode ser feito através de reuniões de *brainstorming* com as pessoas envolvidas no projeto.

Definidos os parâmetros e seus níveis, deve-se escolher a matriz ortogonal mais apropriada para o experimento. Em casos em que os fatores possuam dois níveis apenas, podem-se utilizar matrizes L_4 (2^3), L_8 (2^7), L_{12} (2^{11}), L_{16} (2^{15}), ou L_{32} (2^{31}); para casos com três níveis, as matrizes L_9 (3^4), L_{27} (3^{13}), ou L_{81} (3^{40}); para quatro níveis, as matrizes L_{16} (4^5) e L_{64} (4^{21}); para cinco níveis, a matriz L_{25} (5^6); e, em casos em que haja um número misto de níveis, as matrizes L_{18} ($2^1 \times 3^7$) ou L_{36} ($2^3 \times 3^{13}$), em que o expoente indica o número de fatores, a base o número de níveis e o subscrito de L o número de corridas, ou seja, no caso da matriz L_{18} , há um fator com dois níveis e sete com três níveis e são realizadas 18 corridas. Taguchi, Chowdhury e Wu (2005) recomendam o uso das matrizes L_{12} , L_{18} e L_{36} , pois nestas OAs as interações são quase igualmente distribuídas entre as colunas. No Anexo A, são apresentadas algumas dessas matrizes (L_4 , L_8 , L_9 , L_{16} (4^5), L_{18} e L_{25}), em que as colunas representam os fatores que serão atribuídos; as linhas, as condições do experimento (ou seja, as combinações de níveis a serem testadas); e cada célula, o nível do fator correspondente para aquela condição, representado por um número.

Para determinar qual OA é mais apropriada, deve-se primeiramente calcular o número de graus de liberdade (DOF, do inglês *degrees of freedom*) do experimento, que corresponde à soma dos DOFs para cada fator e para cada interação que seja de interesse (ROY, 1990).

Considerando n_A como sendo o número de níveis de um fator A , o número de graus de liberdade do fator é calculado por:

$$DOF_A = n_A - 1 \quad (97)$$

Caso seja analisado o efeito de alguma interação, o número de graus de liberdade para a interação considerada será dado pela multiplicação dos DOFs dos fatores correspondentes:

$$DOF_{AB} = DOF_A \cdot DOF_B \quad (98)$$

O DOF total, obtido pela soma dos DOFs individuais, deve ser menor ou igual ao DOF da matriz ortogonal a ser escolhida (que corresponde ao subscrito x da notação L_x , ou seja, o número de tratamentos avaliados). Por exemplo, para se utilizar uma matriz L_8 , o experimento deve ter no máximo um DOF igual a 8 (ROY, 1990).

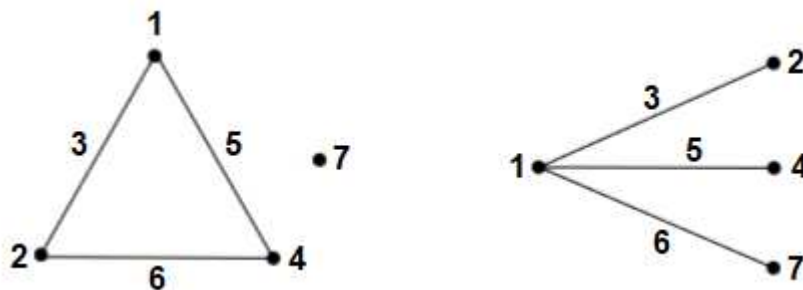
Esta, porém, não é a única condição para a escolha da matriz. Dependendo das interações consideradas, pode não ser possível utilizar uma determinada matriz, por mais que a condição de DOF tenha sido respeitada. Por exemplo, se houver quatro

fatores: A , B , C e D , cada um com dois níveis, e forem de interesse as interações AC e BD , isso resultaria em um DOF igual a 6, porém não seria possível utilizar uma OA L_8 pois, nesta configuração, as interações devem possuir um fator em comum (tal como AB e AC , em que o fator em comum é o A) (ROY, 1990).

3.5.1.1 Atribuição de fatores e adequação da matriz ortogonal

Em casos em que não sejam consideradas interações, podem-se atribuir os fatores às colunas da matriz escolhida de maneira arbitrária, caso contrário, faz-se necessário o uso de matrizes triangulares ou de gráficos lineares para esta atribuição. No caso de uma matriz L_8 , existem dois gráficos lineares que podem ser utilizados, ambos apresentados na Figura 7. Nestes gráficos, as interações devem ser atribuídas às linhas, os fatores correspondentes aos pontos em suas extremidades e os demais fatores são atribuídos arbitrariamente, dessa forma, nota-se que para a situação descrita anteriormente, em que as interações AC e BD são de interesse, não é possível adequá-las a nenhuma das duas configurações apresentadas (ROY, 1990).

Figura 7 – Gráficos lineares para matriz ortogonal L_8



Fonte: Adaptado de Roy (1990).

Considerando uma situação em que haja 5 fatores: A , B , C , D e E , e duas interações: AB e AC , poderia se atribuir, por exemplo, utilizando-se o primeiro gráfico linear da Figura 7, AB para a coluna 3, AC para a coluna 5 e, conseqüentemente, o fator A para a coluna 1 (junção das linhas 3 e 5), B para a coluna 2 e C para a coluna 4. Os outros dois fatores, D e E , poderiam ser atribuídos a qualquer uma das colunas restantes, 6 e 7, em qualquer ordem. Isto pode ser resumido pela Tabela 15.

Tabela 15 – Exemplo de atribuição de fatores às colunas da matriz L_8

Coluna	1	2	3	4	5	6	7
Fator	A	B	AB	C	AC	D ou E	E ou D

Fonte: Autoria própria (2019).

De acordo com Roy (1990), em alguns casos, em que haja fatores com mais ou menos níveis do que os disponíveis em uma matriz ortogonal, podem-se realizar adaptações à matriz de modo a adequá-la à situação proposta. Por exemplo, ao se utilizar uma OA cujos fatores possuam dois níveis, tal como uma L_8 , mas exista um fator com quatro níveis, é possível transformar três colunas de dois níveis, desde que uma delas seja a interação das outras duas, de acordo com os gráficos lineares, em uma de quatro níveis através da tabela de conversão apresentada (Tabela 16).

Tabela 16 – Conversão de três fatores de dois níveis em um fator de quatro níveis

	Colunas		
	1	2	123 (nova coluna)
Níveis	1	1	→ 1
	1	2	→ 2
	2	1	→ 3
	2	2	→ 4

Fonte: Adaptado de Roy (1990).

Neste caso, as colunas 1, 2 e 3 são combinadas formando a coluna 123. De acordo com Roy (1990), a coluna 3, apesar de não aparecer na Tabela 16 por não influenciar nos níveis da nova coluna, também deve ser incluída como parte da combinação. A Tabela 17 apresenta a nova matriz L_8 adaptada para este caso.

Tabela 17 – Matriz L_8 adaptada para comportar um fator de quatro níveis

Condições	Colunas				
	123	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	2	1	1	2	2
4	2	2	2	1	1
5	3	1	2	1	2
6	3	2	1	2	1
7	4	1	2	2	1
8	4	2	1	1	2

Fonte: Adaptado de Roy (1990).

Segundo Roy (1990), além de ser possível combinar colunas de modo a obter uma coluna com um número maior de níveis, também é possível reduzir o número de níveis. Para isso, utiliza-se o tratamento “fictício” (*dummy treatment*), que consiste em tornar um dos níveis equivalente a outro de interesse. Por exemplo, se existirem quatro fatores de dois níveis e um de três níveis, pode-se partir da Tabela 17 e tornar o nível 4 da coluna 123 equivalente ao nível 1. Deve-se notar, porém, que, apesar de na prática existirem três níveis, existe um quarto nível “fictício” e, portanto, o DOF para este fator continuará sendo 3 em vez de 2.

Um terceiro tipo de adaptação possível é a combinação de dois fatores de dois níveis em um fator de três níveis. Supondo que existam dois fatores, A e B , de dois níveis, e três fatores, C , D e E , de três níveis, e deseje-se utilizar uma matriz L_9 , que comporta quatro fatores de três níveis. Pode-se combinar A e B em um único fator denominado AB de três níveis, tal que $(AB)_1 = A_1B_1$, $(AB)_2 = A_2B_1$ e $(AB)_3 = A_1B_2$. A combinação A_2B_2 não é avaliada. O fator AB é então atribuído a uma das colunas da matriz e os demais fatores às demais colunas e o experimento é realizado. É importante salientar que este método não pode ser utilizado se houver interação entre os fatores combinados, neste caso, A e B (ROY, 1990).

Para análise da influência dos fatores A e B , devem-se calcular seus efeitos individuais por:

$$\bar{A} = \overline{(AB)}_1 - \overline{(AB)}_2 \quad (99)$$

$$\bar{B} = \overline{(AB)}_1 - \overline{(AB)}_3 \quad (100)$$

O cálculo dos efeitos dos níveis de AB , isto é, $\overline{(AB)}_1$, $\overline{(AB)}_2$ e $\overline{(AB)}_3$, ou de qualquer outro fator, será apresentado na seção seguinte.

3.5.2 Análise dos resultados

A partir dos dados experimentais obtidos, é feita a análise dos resultados, que se pode dar através da análise de variância e/ou do cálculo e interpretação das razões *signal to noise* (simbolizadas por S/N) de cada corrida. No método de Taguchi, como normalmente são realizadas muitas corridas, é frequente a utilização deste segundo procedimento, uma vez que auxilia na seleção de um nível ótimo que garanta o valor de saída mais próximo ao desejado e com a menor variação e também possibilita a comparação entre conjuntos de dados obtidos em diferentes observações do experimento (ROY, 1990).

Os valores de S/N representam o quão maior é o sinal comparado ao efeito aleatório das variáveis de ruído, dessa forma, quanto maior o valor de S/N , maior será o efeito de um determinado nível de um fator comparado com os ruídos existentes e, conseqüentemente, mínimas serão as variações de qualidade do resultado final (ROY, 1990).

Para o cálculo da razão S/N , deve-se primeiramente calcular o desvio quadrado médio (MSD, do inglês *mean squared deviation*), que depende do comportamento

esperado para a variável de saída, que poderá ser: quanto maior, melhor; ou, quanto menor, melhor; ou, o valor nominal é melhor (ROY, 1990).

Considerando y como a saída do sistema, caso se deseje minimizar o valor de y (ou seja, se y for do tipo menor-melhor), o MSD será calculado por:

$$MSD = \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \quad (101)$$

em que y_i representa cada medição e n é o número de repetições.

Caso se deseje que valor de y seja igual ao nominal (ou seja, se y for do tipo nominal-melhor), o MSD será calculado por:

$$MSD = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - y_0)^2}{n} \quad (102)$$

em que y_0 é o valor nominal desejado.

Por fim, caso se deseje maximizar o valor de y (ou seja, se y for do tipo maior-melhor), o cálculo de MSD será dado por:

$$MSD = \sum_{i=1}^n \frac{1/y_i^2}{n} \quad (103)$$

Calcula-se, então, para cada linha da matriz ortogonal (ou seja, cada tratamento avaliado), a razão S/N através da equação:

$$S/N = -10 \log_{10}(MSD) \quad (104)$$

De acordo com Taguchi, Chowdhury e Wu (2005), o valor de S/N correspondente a um nível de um fator (ou efeito do nível) pode ser calculado através da média dos valores de S/N para as linhas da matriz em que o fator se encontra naquele nível. Por exemplo, considerando uma matriz L_4 com três fatores A , B e C , cada um com dois níveis, indicados pelos números 1 e 2, os valores de S/N estão representados na última coluna da Tabela 18.

Tabela 18 – Modelo de análise para matriz ortogonal L_4

Condições (Tratamentos)	Fatores			Medições	S/N
	A	B	C		
1	1	1	1	$y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1n}$	$(S/N)_1$
2	1	2	2	$y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2n}$	$(S/N)_2$
3	2	1	2	$y_{31}, y_{32}, \dots, y_{3n}$	$(S/N)_3$
4	2	2	1	$y_{41}, y_{42}, \dots, y_{4n}$	$(S/N)_4$

Fonte: Autoria própria (2019).

A condição ótima, a princípio, será aquela que apresentar o maior valor de S/N . Porém, se houver interações significativas, esta condição deverá ser reavaliada (ROY, 1990).

Para o exemplo considerado, o efeito do nível 1 do fator A (denotado por \bar{A}_1) seria calculado fazendo-se a média entre os valores de S/N para as linhas 1 e 2, onde o fator A é avaliado no nível 1, isto é:

$$\bar{A}_1 = \frac{(S/N)_1 + (S/N)_2}{2} \quad (105)$$

O procedimento é análogo para os outros níveis de todos os fatores, por exemplo, o efeito do nível 2 do fator C é calculado por:

$$\bar{C}_2 = \frac{(S/N)_2 + (S/N)_3}{2} \quad (106)$$

Caso tenham sido consideradas interações, o efeito da interação para uma combinação de níveis de seus respectivos fatores (por exemplo $\overline{A_1B_1}$) será calculado pela média dos valores de S/N em que os fatores estejam simultaneamente nos níveis especificados. Isto é diferente de calcular o efeito de um nível de uma coluna de interação AB (por exemplo $\overline{(AB)}_1$), o qual é calculado de maneira análoga às Equações 105 e 106 (ROY, 1990).

Para determinar a influência de um fator, pode-se calcular a diferença Δ entre o maior e o menor efeito de seus níveis. No exemplo anterior, supondo que o efeito do nível 1 de A seja maior que o do nível 2 de A , então Δ_A é calculado por:

$$\Delta_A = \bar{A}_1 - \bar{A}_2 \quad (107)$$

O mesmo procedimento é válido para o cálculo da influência de uma interação, ou seja:

$$\Delta_{AB} = \overline{(AB)}_1 - \overline{(AB)}_2 \quad (108)$$

Os valores de Δ para cada fator são então ordenados de modo que, quanto maior o Δ , maior será a influência do fator correspondente sobre a saída do sistema (TAGUCHI; CHOWDHURY; WU, 2005).

Caso fique constatado que uma interação é significativa, é importante reavaliar a condição considerada ótima, pois poderá haver outra condição com melhor desempenho. Supondo uma situação com três fatores em que determinou-se que a condição ótima inicial fosse A no nível 2, B no nível 1 e um terceiro fator C no nível 2 (linha 3 da matriz L_4), e que exista uma interação AB significativa, deve-se comparar $\overline{A_2B_1}$ com os efeitos de todas as outras combinações de níveis de A e B (isto é, $\overline{A_1B_1}$,

$\overline{A_1B_2}$ e $\overline{A_2B_2}$). Caso o efeito de alguma ou algumas destas combinações seja maior que $\overline{A_2B_1}$, a nova hipótese de condição ótima será aquela que possuir o maior efeito. Deve-se, então, comparar a performance ótima (Y_{opt}) das duas situações (ROY, 1990).

Considerando \bar{T} como sendo a média global das medições e, considerando os efeitos calculados a partir das médias das medições em vez das médias dos valores de S/N , para a hipótese inicial, Y_{opt} será calculado por:

$$Y_{opt} = \bar{T} + (\bar{A}_2 - \bar{T}) + (\bar{B}_1 - \bar{T}) + (\bar{C}_2 - \bar{T}) \quad (109)$$

Supondo que o valor de $\overline{A_1B_1}$ tenha sido maior que o de $\overline{A_2B_1}$, Y_{opt} para a nova hipótese (ou seja, A no nível 1, B no nível 1 e C no nível 2) será calculado por:

$$Y_{opt} = \bar{T} + (\overline{A_1B_1} - \bar{T}) + (\bar{C}_2 - \bar{T}) \quad (110)$$

Os valores de Y_{opt} são então comparados e, aquele que for maior, corresponderá a real condição ótima (ROY, 1990).

3.6 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram abordados os modelos de delineamento de experimentos (DOE), em quais situações podem ser aplicados e como analisar os dados obtidos em cada um deles.

O entendimento dos modelos é fundamental para realizar a melhor escolha de qual será utilizado na etapa prática. Apesar de só serem utilizados um ou alguns deles, é importante entender os modelos disponíveis pois estes poderão ser empregados em outras situações, além da importância de se explorar os conhecimentos básicos sobre o assunto.

No Capítulo 4 será definido, baseado nas informações deste capítulo, qual modelo de DOE será utilizado, as ferramentas computacionais para análise dos dados, como realizar os experimentos e quais dados foram obtidos a partir deles. Com isso, será possível concluir acerca da influência dos parâmetros de entrada da máquina, vistos no Capítulo 2.

4 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Após o estudo da máquina e dos conceitos referentes à DOE, inicia-se a realização de experimentos, através dos quais deseja-se entender a respeito da influência dos parâmetros de entrada sobre as variáveis de saída do processo. Serão realizados dois experimentos, conforme será apresentado nas seções 4.3 e 4.4.

4.1 SELEÇÃO DO MODELO DE EXPERIMENTO

Para a execução dos experimentos, optou-se por utilizar o método de Taguchi, uma vez que, conforme apresentado no capítulo anterior, neste método, o número de tratamentos a serem avaliados no experimento é reduzido significativamente, além de ser um método de fácil análise e de fornecer informações referentes à relação entre sinal e ruído (S/N), importante para o estudo da qualidade do processo.

4.2 FERRAMENTAS UTILIZADAS

Para o planejamento e execução dos experimentos, será utilizado o *software* Minitab, que facilita o processo de escolha e criação das matrizes ortogonais para os fatores e níveis desejados, como também a análise dos dados, automatizando os cálculos apresentados no capítulo anterior e mostrando-os em forma de gráficos. No caso de experimentos Taguchi, é possível plotar os gráficos das médias e da razão sinal-ruído (S/N). A análise será melhor detalhada na seção 4.3.3.

Os experimentos serão monitorados com osciloscópio industrial, verificando-se as formas de onda de tensão e de corrente, de modo a avaliar a conformidade e estabilidade do processo de microfuração, porém o estudo das formas de onda não será o foco deste trabalho.

O fluxo hidráulico dos bicos usinados será medido através da bancada de fluxo Liebig e os diâmetros interno e externo através do equipamento de medição visual Mycrona, ambos disponíveis na empresa.

4.3 PRIMEIRO EXPERIMENTO

Neste primeiro experimento, deseja-se ter uma ideia inicial referente à influência dos parâmetros de entrada na saída do processo, bem como seus comportamentos. O planejamento, execução, resultados obtidos e análise serão apresentados a seguir.

4.3.1 Planejamento do experimento

A primeira etapa para o planejamento do experimento foi a seleção dos parâmetros (fatores) a serem avaliados. A partir de estudos prévios, selecionaram-se 6 dos 12 parâmetros de programação da máquina: *U-adj*, *T*, *S-BOX*, *P*, *COMPR* e *GAIN*.

Conforme apresentado no capítulo 2, o parâmetro *U* é um parâmetro inativo, com exceção de seu sinal, que representa a polaridade do eletrodo (normalmente negativa, uma vez que para polaridade positiva, o desgaste ocorre com maior intensidade no próprio eletrodo) e, portanto, foi fixado em -7 (valor normalmente utilizado na produção).

A partir de um estudo anterior realizado na própria empresa, constatou-se que a corrente *I* se torna prejudicial ao processo para valores diferentes de 1, uma vez que resulta em maior instabilidade e, portanto, foi fixada neste valor. A partir do mesmo estudo, observou-se, ainda, que o parâmetro *ACC* também ocasiona instabilidade e deve ser mantido em zero.

Foi realizado um experimento prévio para avaliação da influência do parâmetro *UNIGAP* no processo, devido a sempre ser mantido em zero na produção, e constatou-se que este parâmetro acrescenta um tempo após o respectivo *step*, resultando em um tempo de ciclo maior. Não foram observadas influências relevantes nas demais saídas do processo. Como deseja-se minimizar o tempo de ciclo, este parâmetro foi mantido em zero.

A partir de consulta com especialistas, entendeu-se que o parâmetro *ACO* é utilizado em valores diferentes de zero apenas em furações que utilizam eletrodos de tungstênio, de modo a tornar o processo mais estável. Para eletrodos de prata, esta influência não é significativa. Uma vez que serão utilizados eletrodos de prata no

experimento (por serem os mais comumente utilizados na produção), este parâmetro será mantido em zero.

Para o experimento, será utilizado um programa com um único *step*, uma vez que, para múltiplos *steps*, há um intervalo de tempo entre eles e também porque não se deseja alterar o valor dos parâmetros em uma mesma furação, apenas entre os tratamentos da matriz ortogonal. O parâmetro *Cam. (Weg)* para o último *step* de furação está relacionado à geometria do furo, devendo ser maior (em módulo) do que o comprimento deste. Como será considerado um único *step*, este valor dependerá do modelo de bico considerado.

Será utilizado como unidade experimental o modelo de bico 5518 (um dos *runners* na produção), que possui como parâmetro *Cam. (Weg)* no último *step* o valor -2,44, fluxo hidráulico nominal de 680 cm³/30 s, com tolerância de 666 até 694, tempo de ciclo nominal de 379,5 s, sete furos de diâmetro interno nominal de 0,2060 mm e diâmetro externo nominal de 0,2010 mm e utiliza eletrodo de prata de diâmetro 0,167 mm.

A Tabela 19 mostra, resumidamente, os parâmetros que serão mantidos fixos no experimento.

Tabela 19 – Parâmetros fixos no primeiro experimento

Eletrodo	Cam. (Weg)	U	I	UNIGAP	ACC	ACO
0,167 (Prata)	-2,44	-7	1	0	0	0

Fonte: Autoria própria (2019).

Considerando os seis parâmetros selecionados para o experimento, optou-se por utilizar uma matriz ortogonal L_{25} , que comporta seis fatores com cinco níveis cada. Os níveis foram escolhidos baseando-se em valores comumente utilizados na produção. Os seis fatores, bem como seus respectivos níveis, são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Fatores e níveis para o primeiro experimento

Nível	Fatores					
	U-adj	T	S-BOX	P	COMPR	GAIN
1	0	0	40	8	24	8
2	1	1	42	9	27	10
3	10	2	44	10	30	12
4	20	3	46	11	33	14
5	30	4	48	12	36	16

Fonte: Autoria própria (2019).

A matriz ortogonal L_{25} para os fatores e níveis considerados pode ser vista na Tabela 21.

Tabela 21 – Matriz ortogonal L₂₅ para o primeiro experimento

Tratamento	Fatores					
	<i>U-adj</i>	<i>T</i>	<i>S-BOX</i>	<i>P</i>	<i>COMPR</i>	<i>GAIN</i>
1	0	0	40	8	24	8
2	0	1	42	9	27	10
3	0	2	44	10	30	12
4	0	3	46	11	33	14
5	0	4	48	12	36	16
6	1	0	42	10	33	16
7	1	1	44	11	36	8
8	1	2	46	12	24	10
9	1	3	48	8	27	12
10	1	4	40	9	30	14
11	10	0	44	12	27	14
12	10	1	46	8	30	16
13	10	2	48	9	33	8
14	10	3	40	10	36	10
15	10	4	42	11	24	12
16	20	0	46	9	36	12
17	20	1	48	10	24	14
18	20	2	40	11	27	16
19	20	3	42	12	30	8
20	20	4	44	8	33	10
21	30	0	48	11	30	10
22	30	1	40	12	33	12
23	30	2	42	8	36	14
24	30	3	44	9	24	16
25	30	4	46	10	27	8

Fonte: Autoria própria (2019).

Serão realizados 25 tratamentos, para os quais serão avaliados o fluxo hidráulico, tempo de ciclo e diâmetros interno e externo. O experimento será realizado com um único cabeçote.

4.3.2 Execução e resultados

O experimento foi executado em dois dias. No primeiro dia, foram realizados os tratamentos de 1 a 10 e no segundo dia, de 11 a 25. Nestes dias, foram medidos o fluxo hidráulico e o tempo de ciclo. O fluxo foi medido utilizando-se a bancada de medição Liebig disponível na própria fábrica, a uma pressão constante de 100 bar, e o tempo de ciclo é fornecido pela máquina ao final de cada furação.

Devido à indisponibilidade de máquinas Mycrona nestes dias, uma vez que são máquinas de alta demanda, as medições de diâmetro interno e externo foram sendo feitas nas semanas seguidas. Para isso, as peças usinadas foram armazenadas em um suporte e periodicamente lavadas com óleo para evitar oxidação. Para cada peça medida, a Mycrona imprime um relatório contendo as medições de diâmetros de cada

furo, bem como suas médias e desvios, conforme o exemplo da Figura 3, apresentada no capítulo 2.

Tomou-se o cuidado de manter parâmetros externos como a vazão de dielétrico e medida X (distância entre o prisma de apoio do eletrodo e o pino de suporte do cabeçote) constantes, para evitar influências externas.

Os valores medidos para cada um dos tratamentos são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados obtidos no primeiro experimento

Tratamento	Tempo de ciclo (s)	Fluxo hidráulico (cm ³ /30 s)	Diâmetro interno médio (mm)	Diâmetro externo médio (mm)
1	347	676,10	0,2079	0,1982
2	347	683,83	0,2087	0,1999
3	307	686,30	0,2077	0,2006
4	274	690,60	0,2066	0,1995
5	289	685,98	0,2063	0,2015
6	410	652,48	0,2049	0,2002
7	373	659,95	0,2048	0,1978
8	402	661,00	0,2041	0,2008
9	246	732,40	0,2117	0,2081
10	302	685,16	0,2083	0,2014
11	449	642,47	0,2030	0,1968
12	237	729,94	0,2122	0,2048
13	246	728,77	0,2118	0,2050
14	338	666,01	0,2055	0,1989
15	366	660,72	0,2064	0,2012
16	339	654,66	0,2071	0,2013
17	346	660,74	0,2071	0,2005
18	552	605,26	0,2035	0,1978
19	520	613,97	0,2014	0,1969
20	289	664,61	0,2080	0,2046
21	417	611,35	0,2006	0,1956
22	752	571,42	0,1933	0,1933
23	402	621,20	0,2012	0,1983
24	349	646,83	0,2043	0,1999
25	310	663,04	0,2064	0,2019

Fonte: Autoria própria (2019).

Pode-se observar que há uma grande dispersão dos resultados, devido à mudança dos níveis dos parâmetros em cada tratamento, conforme a matriz ortogonal apresentada anteriormente.

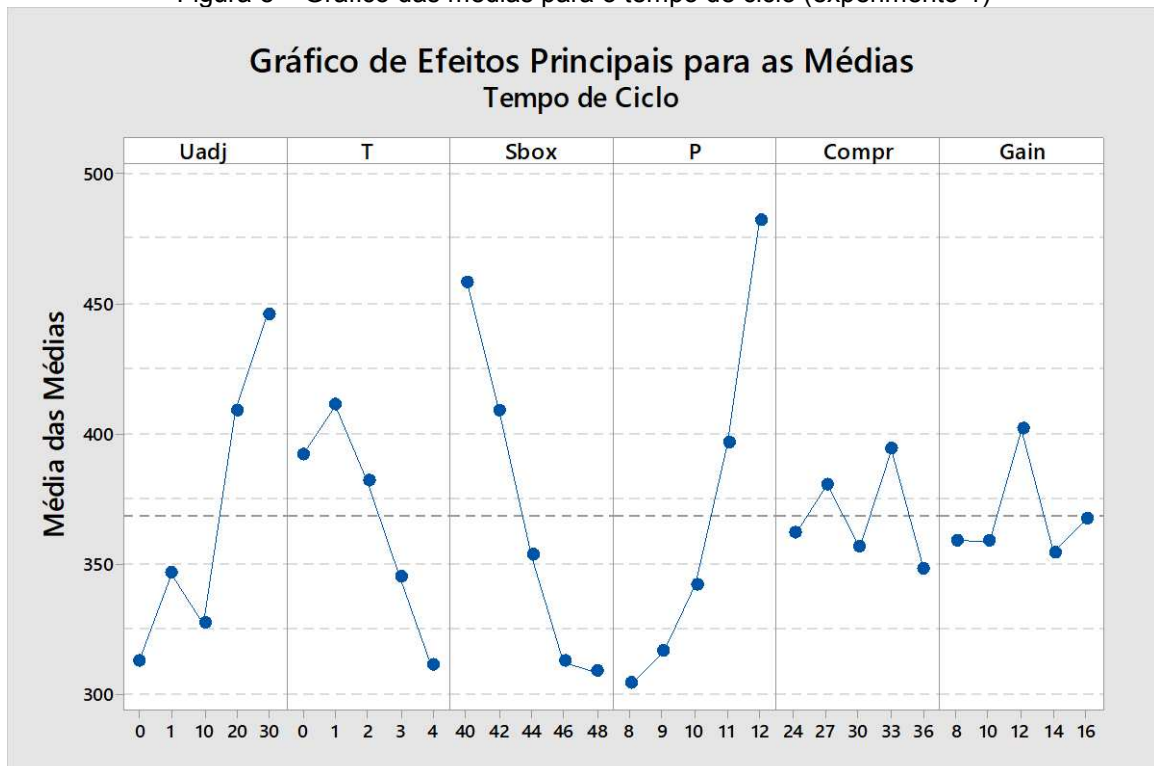
4.3.3 Análise dos dados

Os resultados obtidos foram então inseridos no *software* Minitab para a análise de influência dos parâmetros. As Figuras 8, 10, 11 e 13 apresentam os gráficos das médias, fornecidos pelo *software*, para o tempo de ciclo, fluxo hidráulico, diâmetros

interno e externo, respectivamente. As Figuras 9, 12 e 14 apresentam os gráficos da relação sinal-ruído (S/N) para o tempo de ciclo e diâmetros interno e externo, respectivamente. O tempo de ciclo é uma variável do tipo menor-melhor e as demais saídas são do tipo nominal-melhor. Não foi possível construir o gráfico de sinal-ruído para o fluxo hidráulico, uma vez que apenas uma medição foi feita e este tipo de gráfico, para a situação nominal-melhor, requer um número maior de medições. O gráfico para os diâmetros foi possível uma vez que se levaram em conta as medições para os sete furos.

O gráfico das médias representa o quanto cada fator influencia na saída correspondente, enquanto que o gráfico das razões S/N representa o quão significativo é cada nível de um determinado fator em relação aos ruídos inerentes ao processo. Para o gráfico das médias do tempo de ciclo, visto na Figura 8, observa-se uma tendência de aumento desta variável ao se aumentarem os parâmetros $U\text{-adj}$ e P , e uma tendência de redução ao se aumentarem T e $S\text{-BOX}$, com exceção dos pontos $U\text{-adj} = 10$ e $T = 0$. Não se observou influência significativa dos parâmetros $COMPR$ e $GAIN$ sobre o tempo de ciclo.

Figura 8 – Gráfico das médias para o tempo de ciclo (experimento 1)

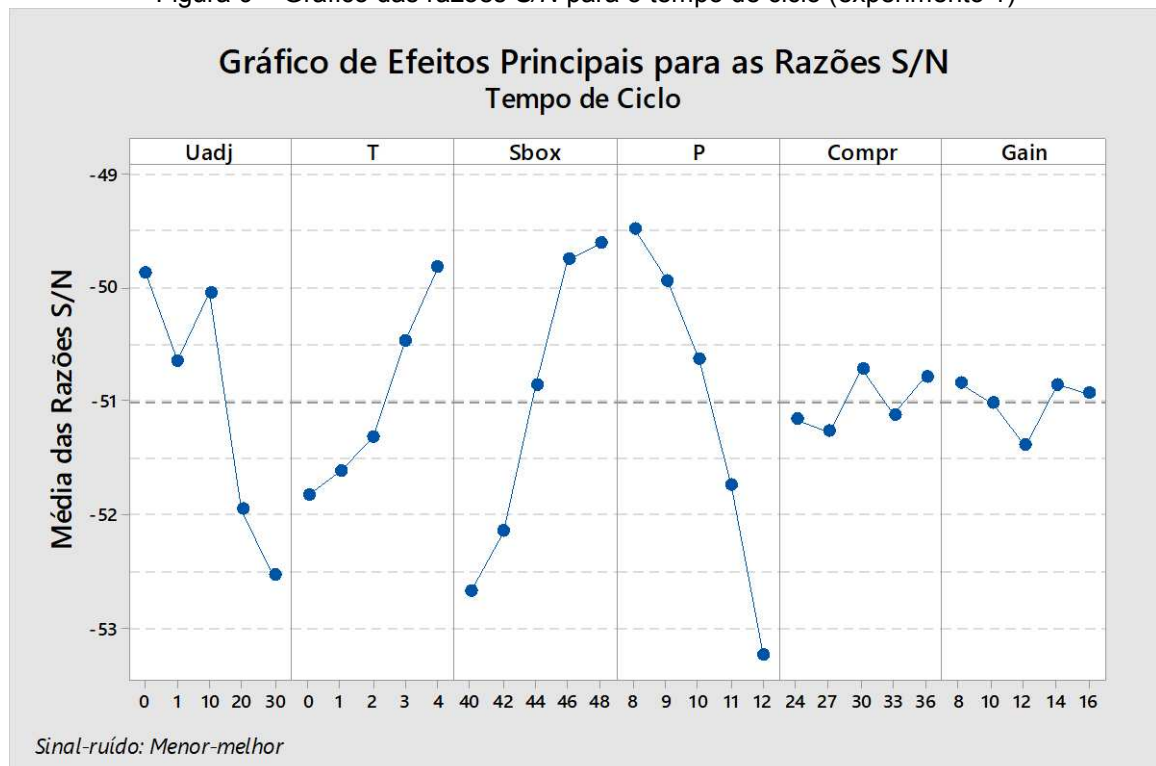


Fonte: Autoria própria (2019).

A partir dos gráficos das razões sinal-ruído, podem-se encontrar os pontos ótimos de cada parâmetro. Uma vez que o método de cálculo do *MSD* é diferente dependendo se a variável de saída é do tipo maior-melhor, nominal-melhor ou menor-melhor, conforme as Equações 101, 102 e 103, a razão *S/N* deverá ser sempre maximizada.

Em relação ao gráfico das razões *S/N* para o tempo de ciclo, ilustrado na Figura 9, percebe-se que, para os níveis considerados, os valores que otimizam esta variável são: *U-adj* = 0 ou 10, *T* = 4, *S-BOX* = 48 ou 46 e *P* = 8. Os parâmetros *COMPR* e *GAIN* não apresentaram influência significativa na razão sinal-ruído.

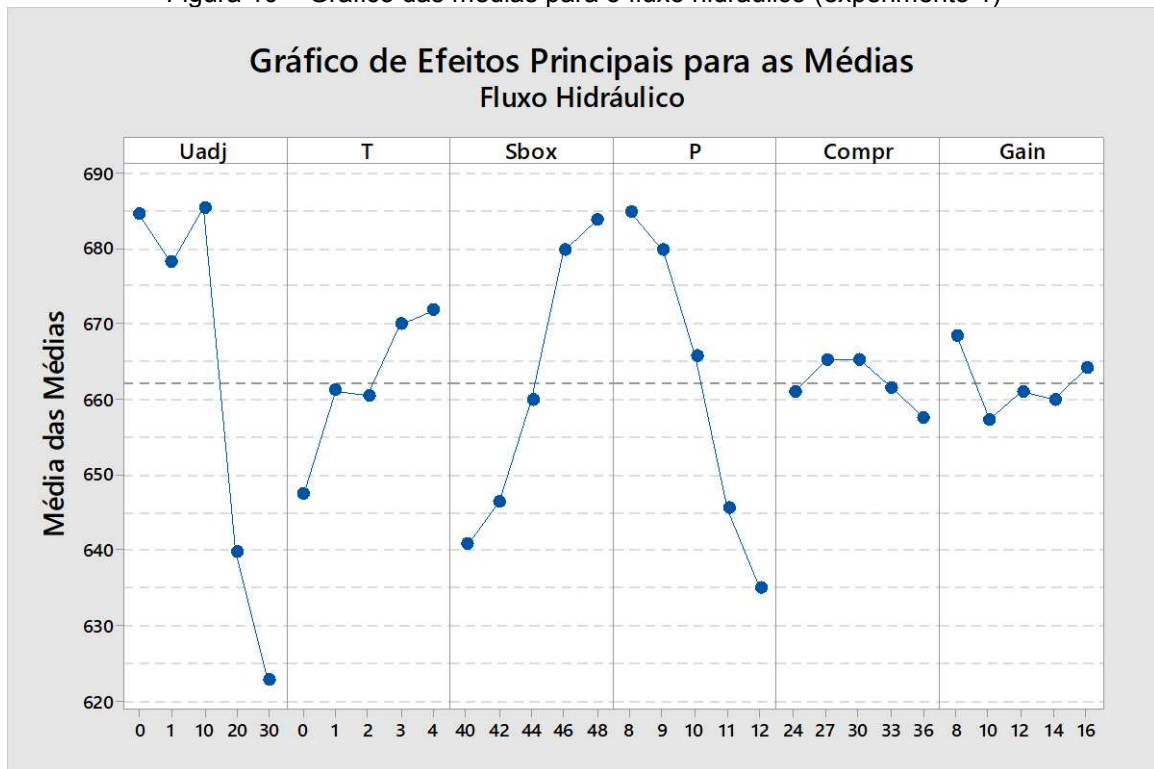
Figura 9 – Gráfico das razões *S/N* para o tempo de ciclo (experimento 1)



Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 10 ilustra o gráfico das médias para o fluxo hidráulico, em que se percebe que os parâmetros *U-adj* e *P* tendem a reduzir o fluxo, enquanto os parâmetros *T* e *S-BOX* tendem a aumentá-lo, com exceção dos pontos *U-adj* = 1 e *T* = 2, apesar da influência do *T* ser menor se comparado ao *S-BOX*. Assim como para o tempo de ciclo, não se observou uma influência significativa dos parâmetros *COMPR* e *GAIN* sobre o fluxo hidráulico. Não foi possível encontrar os pontos ótimos para o fluxo hidráulico, uma vez que não foi possível construir o gráfico das razões *S/N*, conforme mencionado anteriormente.

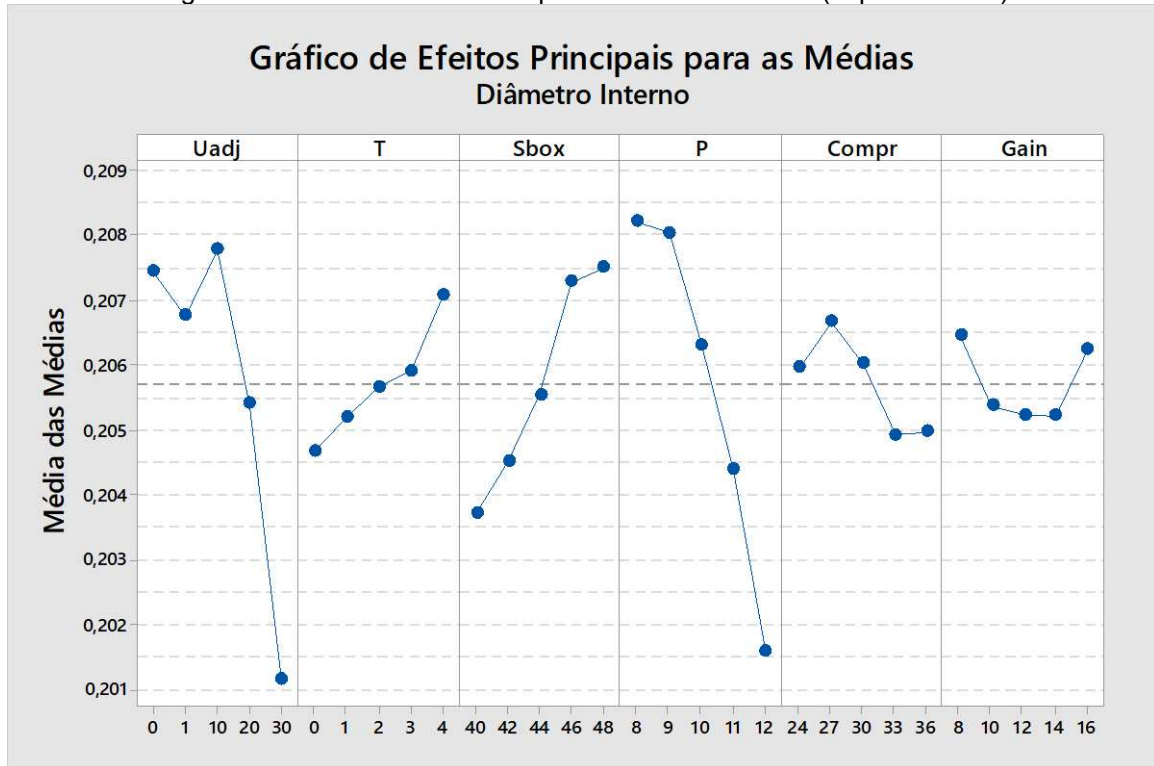
Figura 10 – Gráfico das médias para o fluxo hidráulico (experimento 1)



Fonte: Autoria própria (2019).

Em relação ao diâmetro interno, percebe-se pelo gráfico das médias da Figura 11 uma tendência semelhante ao do fluxo hidráulico, de redução com o aumento de U_{adj} e P e de aumento ao se aumentarem T e $S\text{-BOX}$, exceto para o ponto $U_{adj} = 1$, novamente sem influência significativa dos parâmetros $COMPR$ e $GAIN$.

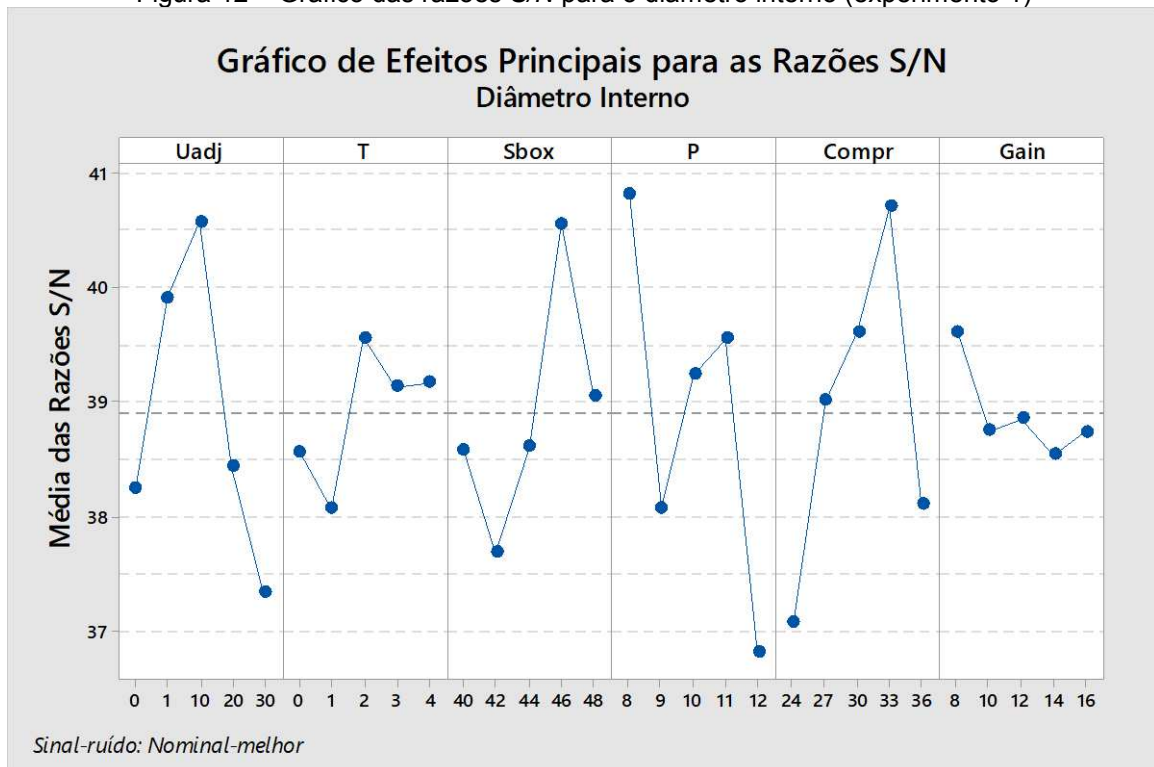
Figura 11 – Gráfico das médias para o diâmetro interno (experimento 1)



Fonte: Autoria própria (2019).

Pelo gráfico das razões S/N , mostrado na Figura 12, nota-se que os pontos ótimos para o diâmetro interno são $U\text{-adj} = 10$, $T = 2$, $S\text{-BOX} = 46$, $P = 8$, $COMPR = 33$ e $GAIN = 8$. Nota-se ainda, que apesar do $COMPR$ ter pouca influência sobre as médias, ele apresentou alta influência na dispersão dos diâmetros.

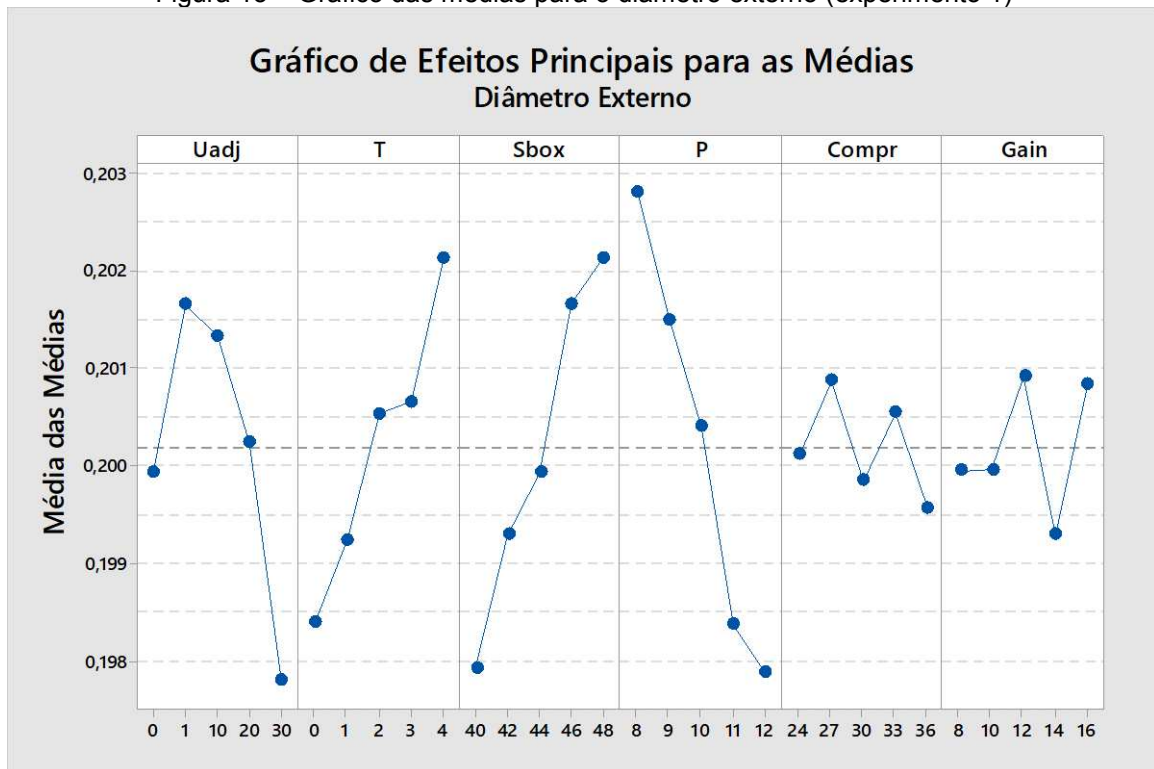
Figura 12 – Gráfico das razões S/N para o diâmetro interno (experimento 1)



Fonte: Autoria própria (2019).

O comportamento dos parâmetros sobre o diâmetro externo foi semelhante ao do diâmetro interno, reduzindo-o com um aumento de *U-adj* e *P* e aumentando-o ao se aumentarem *T* e *S-BOX*, exceto para o ponto *U-adj* = 0, apesar da influência de *T* e *S-BOX* sobre o diâmetro externo ser maior se comparado ao diâmetro interno. Não houve influência significativa dos parâmetros *COMPR* e *GAIN*. O gráfico das médias pode ser visto na Figura 13.

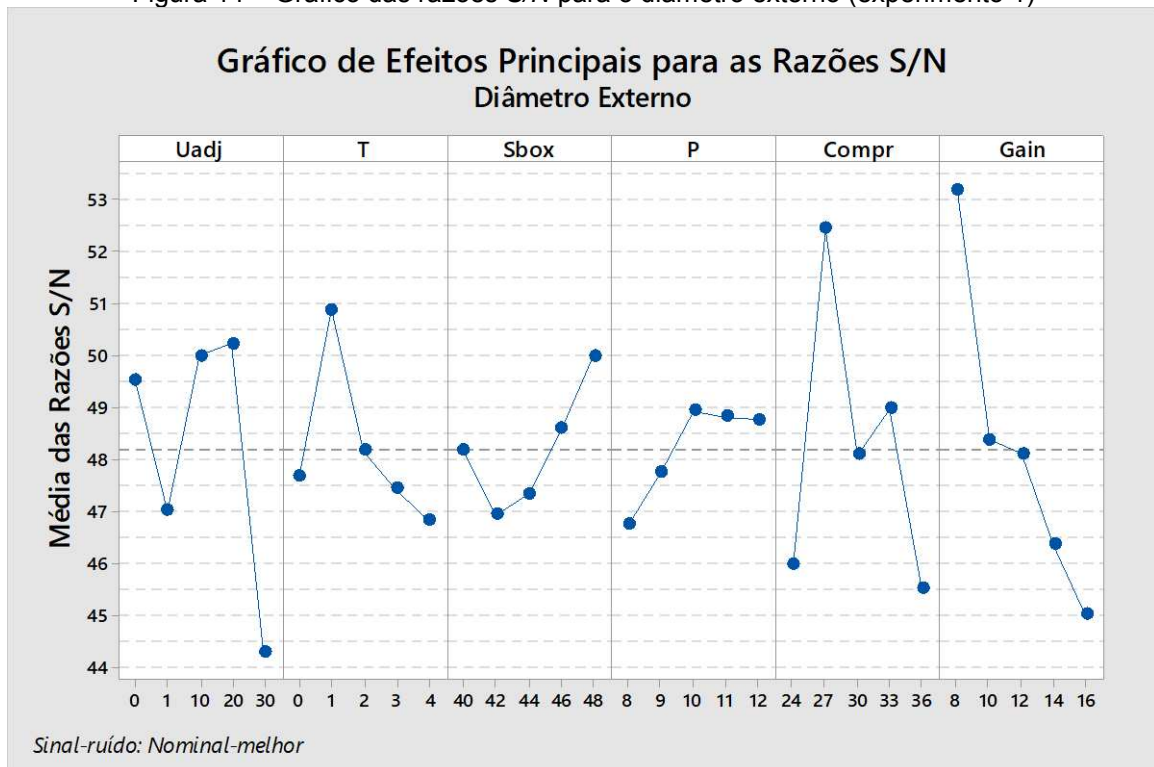
Figura 13 – Gráfico das médias para o diâmetro externo (experimento 1)



Fonte: Autoria própria (2019).

Para o diâmetro externo, obtiveram-se os pontos ótimos: $U\text{-adj} = 20$ ou 10 , $T = 1$, $S\text{-BOX} = 48$, $P = 9, 10$, ou 11 , $COMPR = 27$ e $GAIN = 8$, conforme o gráfico das razões sinal-ruído visto na Figura 14. Nota-se que, para o diâmetro externo, não apenas o $COMPR$ teve influência na dispersão dos diâmetros como também o $GAIN$.

Figura 14 – Gráfico das razões S/N para o diâmetro externo (experimento 1)



Fonte: Autoria própria (2019).

Pelos gráficos das médias, pôde-se observar que o parâmetro *U-adj* tem a tendência de aumentar o tempo de ciclo e de reduzir o fluxo hidráulico e os diâmetros interno e externo, apesar de o tempo reduzir para *U-adj* = 10, o fluxo e o diâmetro interno aumentarem para *U-adj* = 1 e haver um aumento do diâmetro externo ao aumentar o *U-adj* de 0 para 1. Deve-se levar em conta, porém, que a diferença entre os níveis 1 e 2 (*U-adj* = 0 e 1, respectivamente) é menor se comparada à diferença entre os demais níveis, e corresponde à uma diferença de tensão de apenas 3 V.

O parâmetro *T*, por sua vez, reduz o tempo de ciclo e aumenta o fluxo hidráulico e os diâmetros interno e externo, à exceção dos pontos *T* = 0 para o tempo de ciclo e *T* = 2 para o fluxo hidráulico.

O parâmetro *S-BOX* mostrou tendência de redução do tempo de ciclo e de aumento do fluxo e diâmetros interno e externo, não havendo pontos de discordância.

O parâmetro *P* apresenta comportamento contrário ao do *S-BOX*, aumentando o tempo de ciclo e reduzindo o fluxo hidráulico e os diâmetros interno e externo, sem apresentar pontos de discordância.

Por fim, observa-se que tanto o parâmetro *COMPR* quanto o *GAIN* apresentam um comportamento oscilatório em torno de um valor médio e são irrelevantes se comparados à influência dos demais parâmetros. Apesar disso, notou-se que, embora

os parâmetros *COMPR* e *GAIN* não influenciem significativamente nas médias de nenhuma das saídas, eles apresentaram influência considerável sobre as razões sinal-ruído tanto do diâmetro interno médio e do diâmetro externo médio, logo não podem ser descartados. Nos pontos ótimos, a dispersão entre os diâmetros dos furos é minimizada.

4.4 SEGUNDO EXPERIMENTO

Neste segundo experimento, deseja-se expandir o entendimento referente à influência dos fatores sobre as variáveis de saída, através do estudo com níveis diferentes, além da inclusão de um parâmetro mecânico não considerado anteriormente (diâmetro do eletrodo), que pode possuir influência significativa no processo. O planejamento, execução, resultados obtidos e análise serão apresentados a seguir.

4.4.1 Planejamento do experimento

Serão considerados na análise os parâmetros elétricos *U-adj*, *S-BOX*, *P* e *COMPR*, além do parâmetro mecânico referente ao diâmetro do eletrodo, por suspeitar-se de que possa exercer grande influência principalmente no fluxo hidráulico e nos diâmetros interno e externo dos furos.

O parâmetro *T*, incluído como fator no experimento anterior, será fixado em 1, pois, pela análise das formas de onda de tensão e corrente através do uso de osciloscópio, constatou-se que, para valores diferentes de 1, ocorre um alto número de descargas falhas no processo. Além disso, na produção, este parâmetro é sempre fixado em 1.

O parâmetro *GAIN* também será fixado, pois observou-se, durante a realização de experimentos intermediários para a otimização de parâmetros, que o valor 12 apresentou os melhores resultados, mostrando-se mais eficaz do que o valor 8, que fora considerado como ótimo no primeiro experimento Taguchi. Além disso, este é o valor mais comumente utilizado na produção.

Com exceção do diâmetro do eletrodo, os demais parâmetros que foram fixados no experimento anterior permanecerão fixados. Seus valores, como também os valores de *T* e *GAIN*, estão descritos na Tabela 23.

Tabela 23 – Parâmetros fixos no segundo experimento

Cam. (Weg)	U	I	T	GAIN	UNIGAP	ACC	ACO
-1,95	-7	1	1	12	0	0	0

Fonte: A autoria própria (2019).

Será utilizado como unidade experimental o modelo de bico 5510 (outro modelo *runner* na produção), que possui como parâmetro *Cam. (Weg)* no último step o valor -1,95, fluxo hidráulico nominal de 475 cm³/30 s, com tolerância de 466 até 485, tempo de ciclo nominal de 253 s, cinco furos de diâmetro interno e externo nominais de 0,2020 mm e utiliza eletrodo de prata de diâmetro 0,168 mm. Este último parâmetro, porém, será variado em uma faixa de 0,160 a 0,169 mm, sempre com eletrodos de prata. Optou-se por utilizar um modelo de bico diferente para se avaliar se os resultados obtidos são condizentes com os do experimento anterior, uma vez que o modelo de bico não deve ser um fator de influência no comportamento dos parâmetros. Além disso, ambos os modelos de bico possuem o mesmo AM padrão, com exceção do valor de *Cam. (Weg)*.

Considerando os cinco parâmetros selecionados, optou-se por utilizar uma matriz ortogonal $L_{16} (4^5)$, que comporta cinco fatores com quatro níveis cada. Constatou-se que valores baixos de *U-adj* são mais eficazes, uma vez que a tensão fornecida pelo gerador é maior, logo escolheram-se níveis variando de 0 a 12. Observou-se no experimento anterior, que quanto maior for *S-BOX* e quanto menor for *P*, menor será o tempo de ciclo, portanto níveis maiores de *S-BOX* (50 e 52) e menores de *P* (6 e 7) foram incluídos na análise, juntamente a dois níveis de cada já considerados anteriormente. Os níveis de *COMPR* foram mantidos na mesma faixa (porém com uma variação de 2 em 2 unidades), uma vez que foi constatado que valores muito baixos fazem com que a distância entre eletrodo e peça seja grande demais para a ocorrência de descargas, e valores muito altos causam furações instáveis, pelo fato de o eletrodo estar muito perto da peça, facilitando a ocorrência de curtos-circuitos. Os valores de diâmetro de eletrodo foram escolhidos de modo a não necessitar que o prisma de apoio fosse trocado durante o processo, pois a troca poderia afetar os resultados das variáveis de saída. Os cinco fatores, bem como seus respectivos níveis, são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Fatores e níveis para o segundo experimento

Nível	Fatores				
	Diâm. Eletrodo (mm)	<i>U-adj</i>	<i>S-BOX</i>	<i>P</i>	<i>COMPR</i>
1	0,160	0	46	6	25
2	0,163	4	48	7	27
3	0,166	8	50	8	29
4	0,169	12	52	9	31

Fonte: Autoria própria (2019).

A matriz ortogonal $L_{16} (4^5)$ para os fatores e níveis considerados pode ser vista na Tabela 25.

Tabela 25 – Matriz ortogonal $L_{16} (4^5)$ para o segundo experimento

Tratamento	Fatores				
	Diâm. Eletrodo (mm)	<i>U-adj</i>	<i>S-BOX</i>	<i>P</i>	<i>COMPR</i>
1	0,160	0	46	6	25
2	0,160	4	48	7	27
3	0,160	8	50	8	29
4	0,160	12	52	9	31
5	0,163	0	48	8	31
6	0,163	4	46	9	29
7	0,163	8	52	6	27
8	0,163	12	50	7	25
9	0,166	0	50	9	27
10	0,166	4	52	8	25
11	0,166	8	46	7	31
12	0,166	12	48	6	29
13	0,169	0	52	7	29
14	0,169	4	50	6	31
15	0,169	8	48	9	25
16	0,169	12	46	8	27

Fonte: Autoria própria (2019).

Serão realizados 16 tratamentos, para os quais serão avaliados o fluxo hidráulico, tempo de ciclo e diâmetros interno e externo. Diferentemente do primeiro experimento, este será realizado com dois cabeçotes, para que haja duas medições de fluxo hidráulico em cada tratamento e seja possível construir o gráfico das razões S/N para esta variável.

4.4.2 Execução e resultados

O experimento foi executado em um único dia, em que foram medidos o fluxo hidráulico e o tempo de ciclo através dos mesmos procedimentos que para o primeiro experimento. As medições de diâmetro interno e externo foram sendo feitas nas semanas seguidas, uma vez que as máquinas Mycrona possuem alta demanda na produção, conforme citado anteriormente. Durante este período, as peças usinadas

foram armazenadas em um suporte e periodicamente lavadas com óleo para evitar oxidação. Mantiveram-se parâmetros como a vazão de dielétrico e medida X constantes, a fim de não gerar influências externas.

Os valores medidos para cada um dos tratamentos são apresentados na Tabela 26. O tempo de ciclo é o tempo total fornecido pela máquina (ou seja, o tempo para o cabeçote que demorou mais); as demais variáveis de saída foram medidas separadamente para ambos os bicos produzidos em dois cabeçotes. Escolheram-se cabeçotes que estivessem operando com tempos de ciclo semelhantes. Notou-se, porém, que para algumas combinações de parâmetros os cabeçotes realizavam a furação em tempos diferentes, devido a causarem maior instabilidade no processo.

Tabela 26 – Resultados obtidos no segundo experimento

Tratamento	Tempo de ciclo (s)	Fluxo hidráulico (cm ³ /30 s)		Diâmetro interno médio (mm)		Diâmetro externo médio (mm)	
	Total	Cab. 1	Cab. 2	Cab. 1	Cab. 2	Cab. 1	Cab. 2
1	340	505,53	513,21	0,2038	0,2070	0,2035	0,2071
2	330	492,80	516,75	0,2038	0,2073	0,2061	0,2086
3	168	487,73	520,57	0,2012	0,2038	0,1978	0,2038
4	156	484,56	515,52	0,1987	0,2026	0,1950	0,1998
5	161	521,92	523,75	0,2037	0,2036	0,2009	0,2022
6	174	504,72	503,13	0,2009	0,2022	0,1977	0,1982
7	336	504,94	534,81	0,2043	0,2101	0,2125	0,2167
8	294	510,90	522,64	0,2077	0,2096	0,2069	0,2141
9	156	531,63	537,76	0,2052	0,2056	0,2040	0,2067
10	162	537,69	533,45	0,2085	0,2099	0,2098	0,2108
11	271	508,72	534,11	0,2046	0,2082	0,2045	0,2092
12	289	499,83	515,93	0,2039	0,2073	0,2116	0,2148
13	287	553,35	542,10	0,2146	0,2124	0,2174	0,2219
14	300	551,60	558,51	0,2141	0,2153	0,2190	0,2214
15	179	526,47	547,41	0,2035	0,2086	0,2027	0,2072
16	172	525,84	541,33	0,2056	0,2071	0,2031	0,2073

Fonte: Autoria própria (2019).

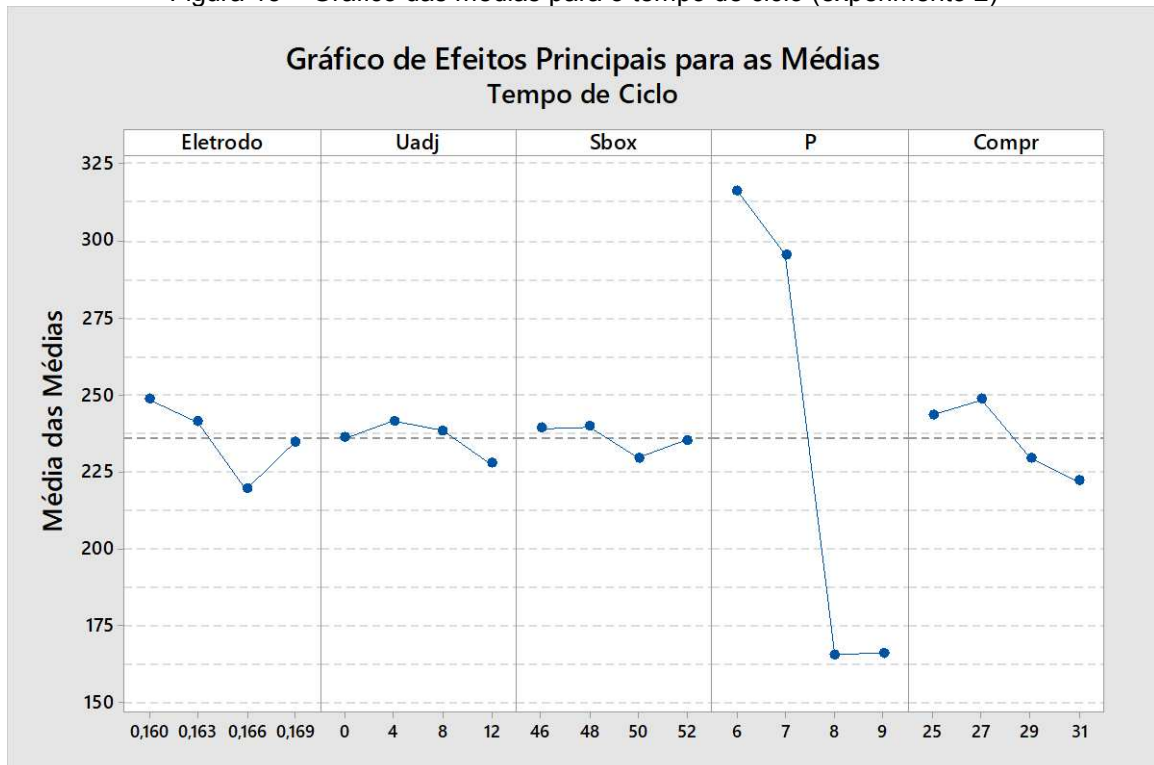
Percebe-se que há uma grande dispersão dos resultados devido à mudança dos níveis em cada tratamento. Além disso, observa-se que, para algumas combinações de parâmetros (por exemplo, o tratamento 3), os fluxos para os dois cabeçotes foram muito diferentes, enquanto que para outras (por exemplo, o tratamento 6), os fluxos foram muito próximos. Semelhantemente ao que fora explicado para o tempo de ciclo, isso se dá, pois, algumas combinações geram maior instabilidade e, portanto, furações irregulares. O mesmo notou-se para os diâmetros interno e externo médios.

4.4.3 Análise dos dados

Utilizando o *software* Minitab, plotaram-se os gráficos de efeitos principais para as médias e para as razões sinal-ruído (S/N). Nas Figuras 15, 17, 19 e 21, são apresentados os gráficos das médias para o tempo de ciclo, fluxo hidráulico, diâmetros interno e externo, respectivamente. Nas Figuras 16, 18, 20 e 22, são apresentados os gráficos da relação sinal-ruído para as mesmas variáveis de saída. O tempo de ciclo é uma variável do tipo menor-melhor e as demais são do tipo nominal-melhor.

Pelo gráfico das médias para o tempo de ciclo, mostrado na Figura 15, observa-se que o parâmetro de maior influência foi o *P* e, diferentemente do que fora observado no primeiro experimento, em que valores de *P* menores reduziam o tempo de ciclo, os valores 6 e 7 aumentaram-no significativamente, devido à instabilidade causada pelo tempo de pausa insuficiente para a limpeza completa do furo após cada descarga. A influência dos demais parâmetros foi pequena se comparada ao *P*.

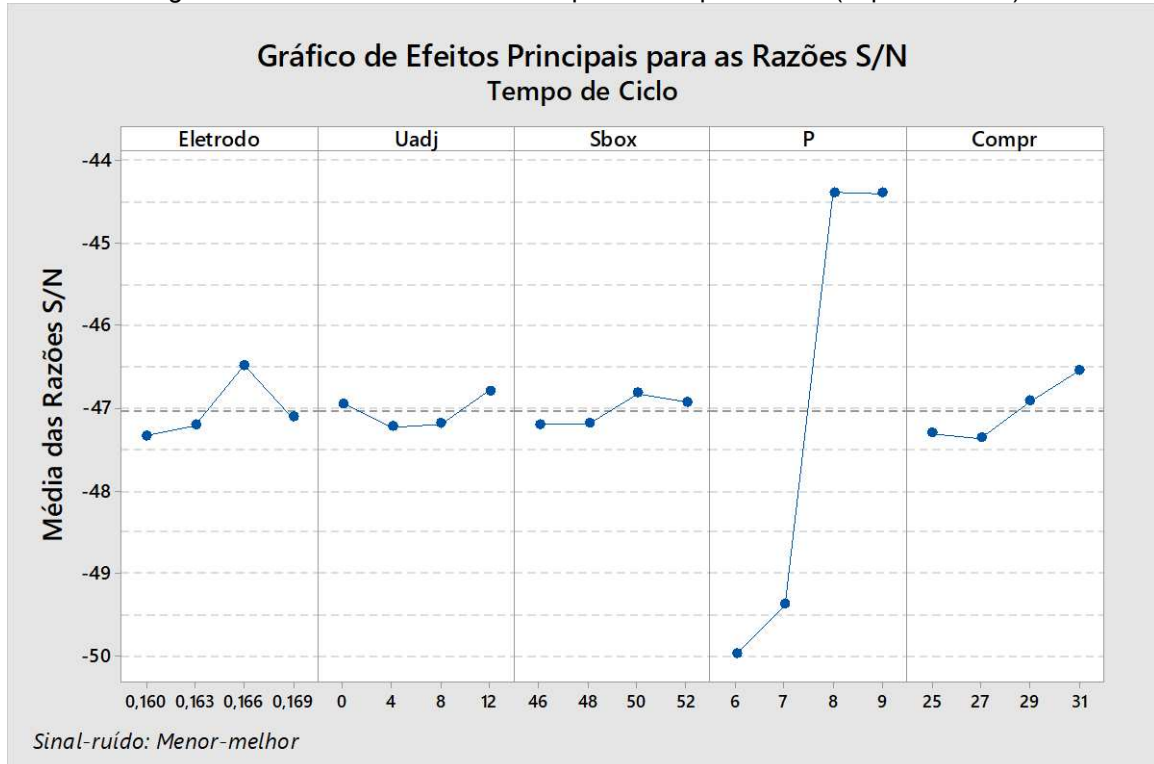
Figura 15 – Gráfico das médias para o tempo de ciclo (experimento 2)



Fonte: Autoria própria (2019).

Observa-se, também, pelo gráfico das razões S/N para esta mesma variável, ilustrado na Figura 16, que os valores 6 e 7 de P resultaram nas menores razões sinal-ruído, devido a esta instabilidade, e que os valores ótimos são $P = 8$ ou 9 . Os demais parâmetros podem assumir qualquer valor dentre os analisados, uma vez que apresentaram pouca influência sobre o tempo de ciclo.

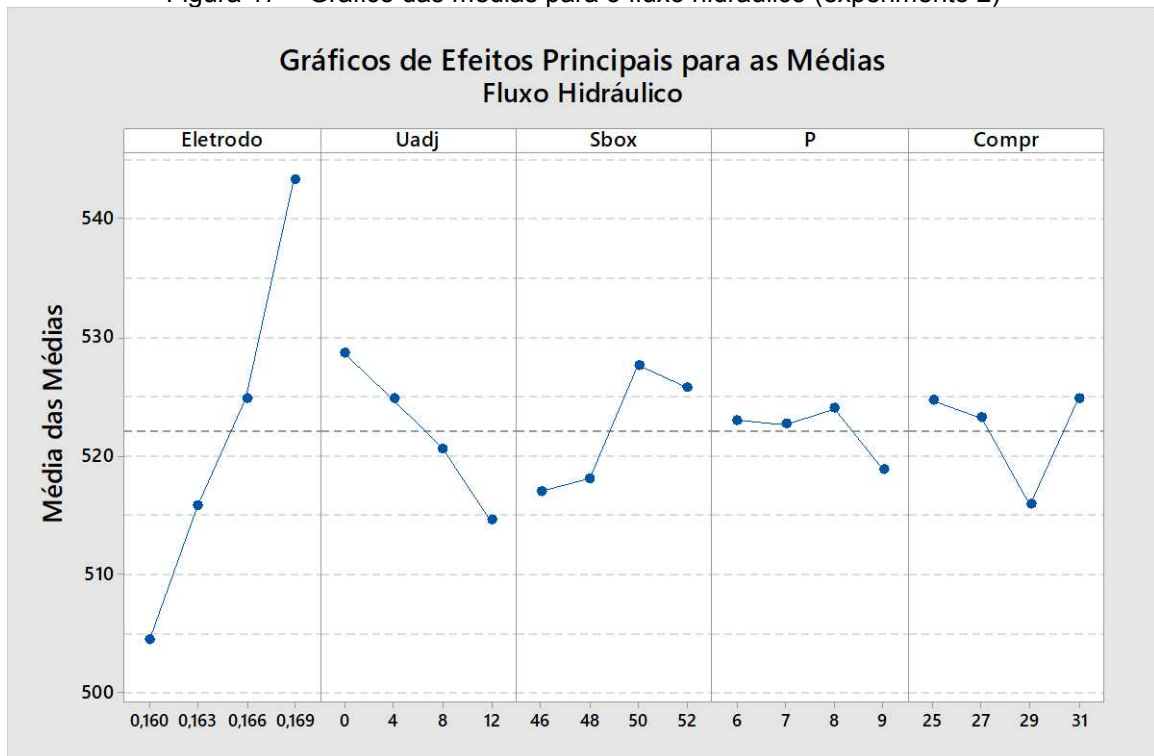
Figura 16 – Gráfico das razões S/N para o tempo de ciclo (experimento 2)



Fonte: Autoria própria (2019).

Em relação ao fluxo hidráulico, nota-se que ele é afetado principalmente pelo diâmetro do eletrodo. Um aumento de $3 \mu\text{m}$ no diâmetro do eletrodo é suficiente para aumentar o fluxo em cerca de 10 a 20 unidades. A influência dos demais parâmetros foi menor se comparada ao diâmetro do eletrodo, porém nota-se uma tendência de redução do fluxo ao se aumentar o $U\text{-adj}$, bem como de aumento ao se aumentar o $S\text{-BOX}$, com exceção do ponto $S\text{-BOX} = 52$. O gráfico das médias para esta variável é apresentado na Figura 17.

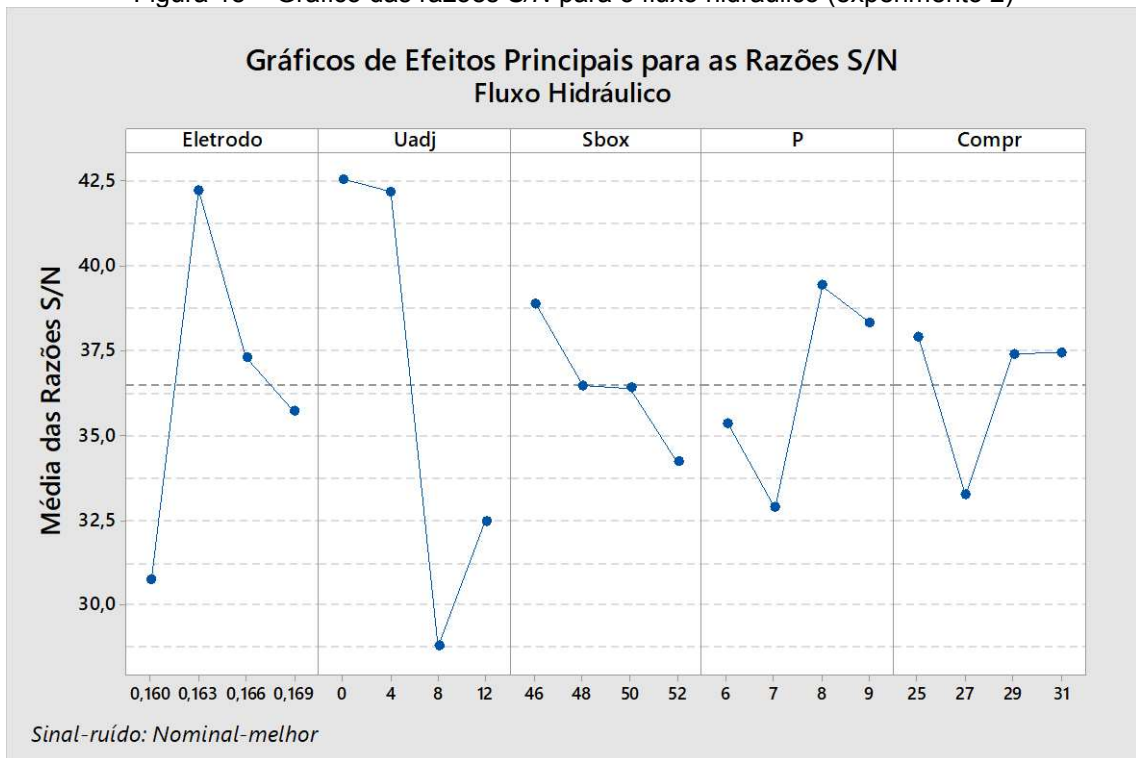
Figura 17 – Gráfico das médias para o fluxo hidráulico (experimento 2)



Fonte: Autoria própria (2019).

Pelo gráfico das razões sinal-ruído, que pode ser visto na Figura 18, percebe-se que os valores que centralizam o fluxo hidráulico são: eletrodo de 0,163 mm de diâmetro, $U\text{-adj} = 0$ ou 4, $S\text{-BOX} = 46$, $P = 8$ ou 9 e $COMPR$ em qualquer valor exceto 27.

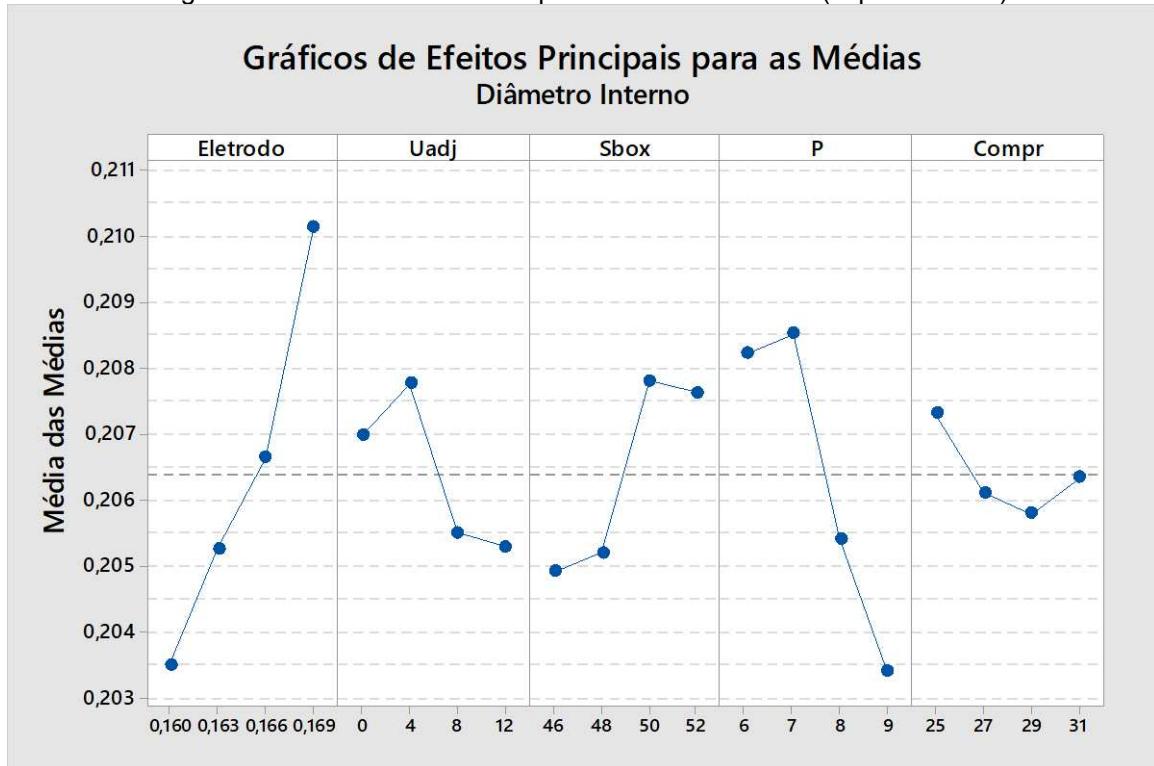
Figura 18 – Gráfico das razões S/N para o fluxo hidráulico (experimento 2)



Fonte: Autoria própria (2019).

Assim como para o fluxo hidráulico, o diâmetro do eletrodo foi o parâmetro que mais influenciou no diâmetro interno. Quanto maior o diâmetro do eletrodo, maior o diâmetro interno dos furos. Os demais parâmetros apresentaram influência menor, porém se observa que o *U-adj* e o *P* reduzem o diâmetro interno e o *S-BOX* o aumenta, exceto para os pontos *U-adj* = 0, *S-BOX* = 52 e *P* = 6. O gráfico das médias pode ser visto na Figura 19.

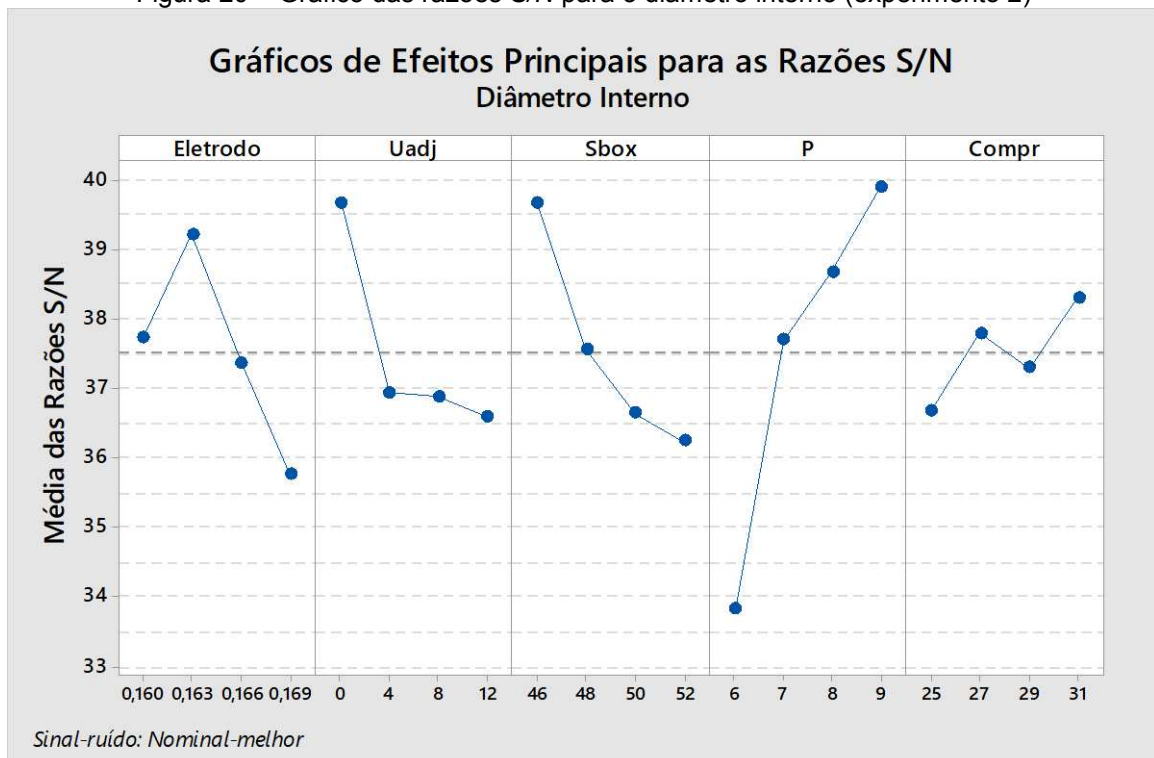
Figura 19 – Gráfico das médias para o diâmetro interno (experimento 2)



Fonte: Autoria própria (2019).

Os pontos que otimizam o diâmetro interno foram: eletrodo de 0,163 mm, $U\text{-adj} = 0$, $S\text{-BOX} = 46$, $P = 9$ e $COMPR = 31$, como pode ser visto na Figura 20.

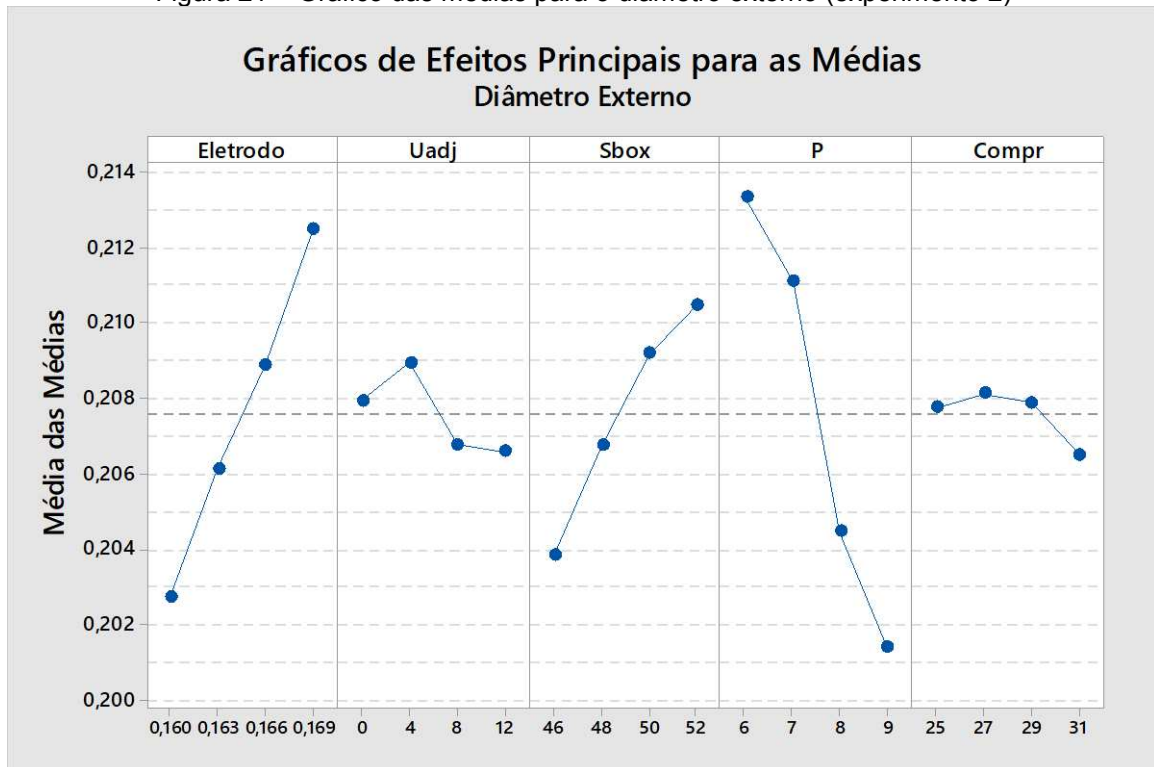
Figura 20 – Gráfico das razões S/N para o diâmetro interno (experimento 2)



Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 21 apresenta o gráfico das médias para o diâmetro externo. Nota-se uma influência semelhante à do interno, porém com uma maior influência de P e de S -BOX, mantendo a tendência de aumento do diâmetro interno com o aumento do diâmetro do eletrodo. A influência de U -adj e $COMPR$ foi pouco significativa.

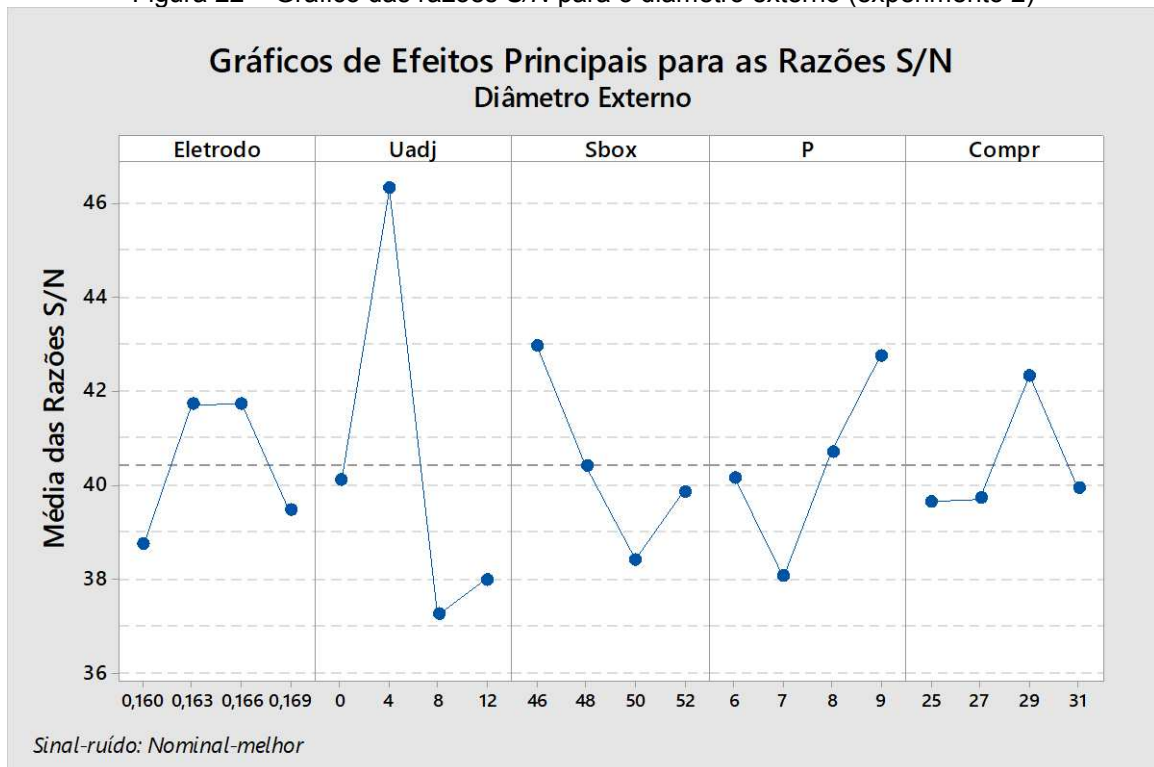
Figura 21 – Gráfico das médias para o diâmetro externo (experimento 2)



Fonte: Autoria própria (2019).

Pelo gráfico das razões S/N , visto na Figura 22, observa-se que os pontos ótimos para o diâmetro externo são: eletrodo de 0,163 ou 0,166 mm de diâmetro, U -adj = 4, S -BOX = 46, P = 9 e $COMPR$ = 29.

Figura 22 – Gráfico das razões S/N para o diâmetro externo (experimento 2)



Fonte: Autoria própria (2019).

Pôde-se observar que o diâmetro do eletrodo exerce grande influência no fluxo hidráulico e nos diâmetros interno e externo e pouca influência no tempo de ciclo. A tendência em relação às três primeiras variáveis de saída é de aumento com o aumento do diâmetro do eletrodo, porém nota-se pelos gráficos das razões sinal-ruído que o valor 0,163 mostra ser mais estável.

Diferentemente do que observado no primeiro experimento, pode-se ver que para valores baixos de U_{adj} , a influência sobre o tempo de ciclo é mínima. No experimento anterior, porém, as maiores variações de tempo de ciclo ocorreram do valor 10 para o valor 20 e do valor 20 para o 30, não incluídos neste experimento. Observou-se, ainda, que o U_{adj} tende a diminuir o fluxo hidráulico e os diâmetros interno e externo, exceto para o valor 4, em que houve um pequeno aumento dos diâmetros. Apesar disso, a influência foi menos significativa se comparada com a influência de outros parâmetros como diâmetro do eletrodo. No primeiro experimento, assim como para o tempo de ciclo, notou-se que a maior influência ocorria para valores maiores de U_{adj} .

Nota-se que a influência do parâmetro $S\text{-BOX}$ sobre as variáveis de saída foi menor do que o observado no primeiro experimento. Há um limite para $S\text{-BOX}$, portanto, em torno de 48 a 50, a partir do qual um aumento da capacitância do circuito

não alterará significativamente o comportamento do processo, com exceção do diâmetro externo, que continua a aumentar de maneira aproximadamente linear.

Pode-se observar que os valores 6 e 7 para o parâmetro P apresentaram tempo de ciclo muito alto, contrário à tendência observada no experimento anterior de redução de tempo de ciclo quanto menor o P . Além disso, as razões sinal-ruído para estes níveis foram muito baixas, o que indica que o ruído é significativo. Isto se dá devido ao fato de haver pouco tempo entre descargas para que o dielétrico limpe as impurezas decorrentes da erosão, causando maior instabilidade no processo. Apesar disso, o comportamento de redução do diâmetro externo com o aumento do P foi mantido, bem como para o diâmetro interno a partir do valor 7. Observou-se, ainda, que para os níveis analisados, a influência do parâmetro P sobre o fluxo hidráulico foi mínima, diferentemente do primeiro experimento, no qual foram analisados níveis com valores maiores.

Por fim, observa-se que o parâmetro $COMPR$ possui pouca influência sobre as quatro variáveis de saída, apesar de alguns valores influenciarem na estabilidade do processo, como se nota pelos gráficos das razões sinal-ruído.

4.5 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram abordados o planejamento, os procedimentos experimentais e a análise dos dados obtidos nos dois experimentos realizados. Concluiu-se acerca da influência dos parâmetros analisados em ambos os experimentos, porém uma síntese será apresentada aqui.

Um resumo da influência dos parâmetros pode ser visto no Quadro 1, em que uma flecha para cima indica um aumento da variável de saída com um aumento no nível do parâmetro, uma flecha para baixo indica redução, um hífen indica que o parâmetro possui pouca influência sobre a variável de saída, e o asterisco indica que, apesar de não influenciar no valor médio, a influência na dispersão dos valores é significativa.

Quadro 1 – Influência dos parâmetros sobre as variáveis de saída

Parâmetro/Saída	Tempo de ciclo	Fluxo hidráulico	Diâm. interno	Diâm. externo
Diâmetro do eletrodo	-	↑	↑	↑
<i>U-adj</i>	↑	↓	↓	↓
<i>T</i>	↓	↑	↑	↑
<i>S-BOX</i>	↓	↑	↑	↑
<i>P</i>	↑	↓	↓	↓
<i>COMPR</i>	-	-	*	*
<i>GAIN</i>	-	-	*	*

Fonte: Autoria própria (2019).

Observou-se que, aumentando o valor do parâmetro *U-adj*, há uma tendência de aumento do tempo de ciclo e de redução do fluxo hidráulico e dos diâmetros interno e externo, apesar da influência no tempo de ciclo e nos diâmetros não ser muito significativa para valores baixos de *U-adj* (isto é, valores altos de tensão), como observado no segundo experimento, se comparada com os valores 20 e 30 do primeiro experimento.

Em relação ao parâmetro *T*, notou-se que este tem a tendência de reduzir o tempo de ciclo e aumentar o fluxo hidráulico e os diâmetros interno e externo, porém, após análise de formas de onda de tensão e corrente, feitas em paralelo com os experimentos, apesar de não serem o foco deste trabalho, concluiu-se que *T* deve ser fixado em 1, pois valores diferentes ocasionam furações instáveis devido a uma maior ocorrência de descargas falhas.

Notou-se que o parâmetro *S-BOX*, variando-se dentro de uma faixa de 40 até 48, aproximadamente, possui uma tendência significativa de redução do tempo de ciclo e de aumento do fluxo e dos diâmetros interno e externo. Para valores maiores, porém, esta influência passa a ser reduzida, tendendo a uma estabilidade.

O parâmetro *P*, por sua vez, a partir do valor 8, tende a aumentar o tempo de ciclo e reduzir o fluxo hidráulico de maneira significativa. Apesar disso, valores menores como 7 ou 6 levam o sistema à instabilidade, como observado pelas baixas razões sinal-ruído para estes níveis, além de ocasionar um aumento expressivo no tempo de ciclo ao invés de uma redução. Para o diâmetro interno, porém, percebe-se uma tendência de redução a partir do valor 7 e, para o diâmetro externo, esta mesma tendência é observada desde o valor 6, analisado no segundo experimento, até o valor 12, avaliado no primeiro experimento.

Quanto aos parâmetros *COMPR* e *GAIN*, notou-se que ambos apresentam pouca influência sobre as variáveis de saída para os níveis analisados, quando comparados aos demais parâmetros. Contudo, ambos são significativos em relação à

dispersão entre os valores de diâmetros interno e externo dos diferentes furos, principalmente para os níveis avaliados no primeiro experimento, como pode ser observado pelos gráficos das razões sinal-ruído e devem, portanto, ser levados em conta durante a parametrização, de maneira a minimizar esta dispersão.

Por fim, observou-se que um aumento no diâmetro do eletrodo causa um aumento significativo no fluxo hidráulico e nos diâmetros interno e externo e pouca influência sobre o tempo de ciclo. Desta forma, se for desejado aumentar ou reduzir o fluxo hidráulico e os diâmetros sem afetar significativamente o tempo de ciclo, este parâmetro é uma boa opção para variação. Deve-se levar em conta, porém, que a folga entre o eletrodo e seu prisma de apoio não seja muito grande ou poderá ocasionar maior vibração e, portanto, maior instabilidade. Pode ser necessária uma troca do prisma dependendo do diâmetro do eletrodo utilizado.

A partir dos gráficos das razões S/N , podem-se extrair os pontos que otimizam o processo para cada variável de saída. Isto é feito analisando-se quais valores possuem maior razão sinal-ruído, uma vez que esta razão deve ser sempre maximizada. O tempo de ciclo é otimizado com P igual a 8 ou 9. Os demais parâmetros exercem pouca influência e podem assumir qualquer valor. Para o fluxo hidráulico, os valores ótimos são: eletrodo com diâmetro de 0,163 mm, $U_{-adj} = 0$ ou 4, $S\text{-BOX} = 46$, $P = 8$ e $COMPR$ em qualquer valor exceto 27. Para o diâmetro interno: eletrodo com diâmetro de 0,163 mm, $U_{-adj} = 0$, $S\text{-BOX} = 46$, $P = 9$ e $COMPR = 31$. Por fim, para o diâmetro externo: eletrodo de 0,163 ou 0,166 mm de diâmetro, $U_{-adj} = 4$, $S\text{-BOX} = 46$, $P = 9$ e $COMPR = 29$.

5 CONCLUSÃO

A partir da leitura de bibliografia referente ao processo de usinagem por eletroerosão e experiência em chão de fábrica, pôde-se compreender acerca do fenômeno e como ele ocorre na prática na produção de bicos injetores, além do funcionamento das máquinas de eletroerosão e seus parâmetros de programação.

Com o conhecimento adquirido, juntamente ao estudo da teoria referente a delineamento de experimentos, foi possível determinar o método mais apropriado para o problema, como também o *software* a ser utilizado para o tratamento dos dados. Em ambos os experimentos, determinaram-se as variáveis a serem analisadas, bem como seus níveis, e, com auxílio do *software*, a matriz ortogonal mais apropriada em cada caso.

Após a execução dos experimentos, foi possível interpretar os resultados, através do uso do *software* Minitab, e entender acerca da influência de cada um dos fatores de entrada analisados sobre as quatro variáveis de saída mais importantes para o processo: tempo de ciclo, fluxo hidráulico, diâmetro interno e diâmetro externo. Através dos gráficos das razões sinal-ruído, pôde-se determinar os pontos que otimizam estas saídas.

A partir do estudo do comportamento dos parâmetros da máquina, pode-se ter um melhor entendimento a respeito de como variá-los de modo a atingir os objetivos desejados na produção de bicos injetores, bem como quais níveis acarretam em maior estabilidade, reduzindo assim as taxas de refugo. Com este trabalho, pôde-se perceber que um dos parâmetros que raramente é variado na prática, o *U-adj*, é um dos mais importantes e pode ser útil durante o processo de otimização em chão de fábrica.

Os conhecimentos puderam ser aplicados na indústria através de encomendas de experiência, cujo objetivo era modificar o AM de vários modelos de bicos de modo a otimizar a produção das peças. O principal ganho foi em tempo de ciclo, que varia para diferentes modelos de bico, sendo que o maior obtido foi de 15%, em uma peça de furo cilíndrico, ao se reduzir o valor de *P* e aumentar o valor do *U-adj*. Outro ganho observado foi na redução do tempo de operação em uma das etapas seguintes da produção, a hidroerosão, em cerca de 40%, em uma das peças otimizadas devido à uma melhora em sua geometria.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foram avaliadas as influências de parâmetros de máquinas AGIE QUADRATRON I sobre as variáveis de saída tempo de ciclo, fluxo hidráulico, diâmetro interno e diâmetro externo. Além disso, a análise foi feita considerando sempre eletrodos de prata e, com exceção do diâmetro do eletrodo, não foi estudada a influência de parâmetros mecânicos, como a vazão de dielétrico e medida X (distância entre o prisma e o pino de suporte do cabeçote). Desta forma, a seguir serão apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros, de modo a expandir o conhecimento acerca do processo:

- Avaliar a influência dos parâmetros sobre a rugosidade do furo de injeção;
- Avaliar o comportamento de fatores externos, como temperatura e umidade ambiente, em relação ao processo;
- Estudar a influência de outros parâmetros mecânicos, como medida X e vazão de dielétrico;
- Realizar uma análise para os parâmetros da máquina QUADRATRON II;
- Repetir a análise utilizando outros modelos de delineamento de experimentos, como o modelo fatorial;
- Utilizando inteligência artificial, criar um algoritmo que preveja os valores das variáveis de saída a partir da inserção de dados referentes aos parâmetros, tanto internos à máquina quanto externos.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, Fred Lacerda. **Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga de Cobre CuBe para Ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos**. 2002.
- FERREIRA, Paulo Vanderlei. **Estatística Experimental Aplicada às Ciências Agrárias**. Viçosa: Ed. UFV, 2018.
- FIOD NETO, Miguel. Taguchi e a Melhoria da Qualidade. **Uma Releitura Crítica**, 1997.
- JAMESON, Elman C. **Electrical Discharge Machining**. The Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Michigan, 2001.
- LIMA, Francisco Elicivaldo; CORRÊA, Maurício. **Efeitos da eletroerosão sobre a superfície de peças usinadas**. Revista Tecnologia, v. 27, n. 1, 2006.
- MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. 8. ed. John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- ROY, Ranjit K. **A Primer on the Taguchi Method**. Society of Manufacturing Engineers, 1990.
- SANTOS, Irapuan. **Análise dos parâmetros de entrada na eletroerosão de penetração da liga de titânio Ti-6AL-4V**. Dissertação submetida à Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2010.
- SOUZA, Alexandre de. **Otimização do processo de microfuração por eletroerosão por faíscas de bicos injetores**. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2000.
- TAGUCHI, Genichi; CHOWDHURY, Subir; WU, Yuin. **Taguchi's quality engineering handbook**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- WERKEMA, Cristina; e AGUIAR, Sílvio. **Planejamento e Análise de Experimentos: Como Identificar as Principais Variáveis Influentes em um Processo**. Editora Werkema, 1996.

ANEXO A – Matrizes ortogonais

Tabela 27 – Matriz ortogonal L₄

Condições	Colunas		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Fonte: Adaptado de Roy (1990).

Tabela 28 – Matriz ortogonal L₈

Condições	Colunas						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Fonte: Adaptado de Roy (1990).

Tabela 29 – Matriz ortogonal L₉

Condições	Colunas			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Fonte: Adaptado de Roy (1990).

Tabela 30 – Matriz ortogonal L_{16} (4^5)

Condições	Colunas				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

Fonte: Adaptado de Taguchi, Chowdhury e Wu (2005).

Tabela 31 – Matriz ortogonal L_{18}

Condições	Colunas							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Fonte: Adaptado de Roy (1990).

Tabela 32 – Matriz ortogonal L₂₅

Condições	Colunas					
	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4	4
5	1	5	5	5	5	5
6	2	1	2	3	4	5
7	2	2	3	4	5	1
8	2	3	4	5	1	2
9	2	4	5	1	2	3
10	2	5	1	2	3	4
11	3	1	3	5	2	4
12	3	2	4	1	3	5
13	3	3	5	2	4	1
14	3	4	1	3	5	2
15	3	5	2	4	1	3
16	4	1	4	2	5	3
17	4	2	5	3	1	4
18	4	3	1	4	2	5
19	4	4	2	5	3	1
20	4	5	3	1	4	2
21	5	1	5	4	3	2
22	5	2	1	5	4	3
23	5	3	2	1	5	4
24	5	4	3	2	1	5
25	5	5	4	3	2	1

Fonte: Adaptado de Taguchi, Chowdhury e Wu (2005).