

DESENVOLVIMENTO ELETROELETRÔNICO DE UMA MÁQUINA DE ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO

Marcus Aurélio Cardoso¹

Rafael de Oliveira Silva²

RESUMO

Eletoerosão é um processo de usinagem não convencional, que se baseia na remoção do material, por sucessivas descargas elétricas. O seguinte artigo trata-se dos princípios básicos de funcionamento e construção de uma máquina de eletroerosão por penetração. O trabalho apresenta-se de forma sucinta os conceitos históricos, os principais componentes eletroeletrônicos utilizados na fabricação da máquina e os respectivos métodos adotados. Após a montagem da máquina foram efetivados testes que provaram o funcionamento da mesma, ao observar o corpo de prova percebe-se a remoção de material.

Palavras chave: Usinagem não convencional. Dielétrico. Capacitor.

¹ Graduando de Engenharia Mecânica pela Universidade de Rio Verde, Faculdade de Engenharia Mecânica.

² Orientador, Professor Mestre da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Rio Verde – UniRV.

1 INTRODUÇÃO

O processo de usinagem pode ser caracterizado como um método de fabricação, que confere formato, dimensão e acabamento da superfície de uma peça. Atualmente podem ser identificadas algumas formas de usinagem, que são divididos em grupos. Os métodos mais conhecidos como torneamento, brochamento, aplainamento, entre outros, são denominados de usinagem convencional, há também, os métodos de usinagem não convencionais, como a eletroerosão, remoção química, remoção por ultrassom, entre outros. Este projeto, trata-se de um meio de usinagem não convencional, eletroerosão, por penetração.

A eletroerosão é o método de usinagem não convencional mais utilizado, devido empregar a energia térmica, para usinar peças condutoras eletricamente independentemente, da dureza do material. É amplamente utilizada na confecção de matrizes, moldes, componentes automotivos, aeroespaciais, que geralmente apresentam características geométricas de difícil usinagem, por um método convencional. O método de usinagem por penetração é o método que o eletrodo reproduz a imagem ou geometria da peça.

O presente artigo tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma máquina de eletroerosão, por penetração, com foco na parte eletroeletrônica. A construção da máquina foi uma forma de apresentar o conhecimento adquirido no decorrer da graduação, bem como será usado, para novos estudos, que envolvam este método de usinagem.

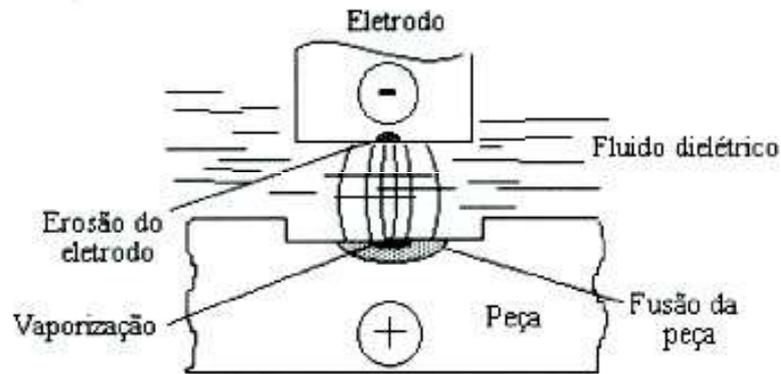
1.1 PRINCÍPIOS FÍSICOS DO PROCESSO

Eletroerosão, também conhecido como usinagem por descarga elétrica, ou ainda *Electrical Discharge Machining* (EDM) é um dos processos de usinagem não convencional, mais utilizado, baseia-se na remoção de material através do efeito térmico das descargas elétricas entre o eletrodo e a peça a ser usinada (LIMA, 2006). O processo permite a usinagem de furos, ranhuras, matrizes e superfícies, com formas complexas e dimensões mínimas, em materiais de elevada dureza, desde que sejam condutores elétricos, que dificilmente seriam usinados, por processos convencionais (ARANTES, 2001).

A peça, geralmente está associada ao polo positivo, recebendo o impacto dos elétrons, ao passo que o eletrodo recebe o impacto dos íons positivos, devido serem mais pesados, que os elétrons, são menos velozes, transferindo menor energia ao eletrodo. Desta

forma, calor de menos intensidade é gerado no eletrodo reduzindo assim, o material removido do mesmo, como mostra na Figura 1 (LIMA, 2006).

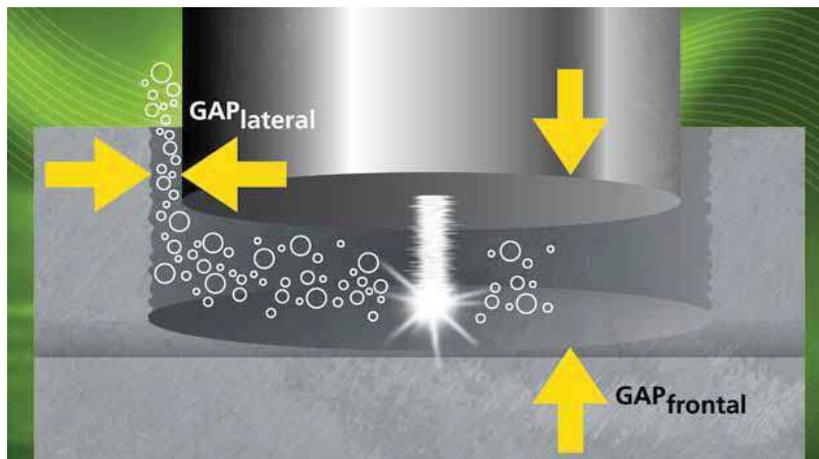
FIGURA 1 - Representação do Processo



Fonte: LIMA, 2006

Com bons ajustes na máquina, é possível controlar a erosão de modo que se obtenha até 99,5 % de erosão na peça e 0,5 % no eletrodo. Uma forma de controle é o espaçamento entre o eletrodo e a peça, que é denominado de gap (*gap = folga*). Esse espaçamento é preenchido com fluido dielétrico (CRUZ JUNIOR, 2015). Na figura 2, nota-se a distinção entre o chamado gap lateral e o gap frontal.

FIGURA 2 - Gap lateral e frontal



Fonte: CRUZ JUNIOR (2015).

1.3 DIELÉTRICO

Um fluido dielétrico é caracterizado como um isolante elétrico, que sob a influência de um campo elétrico externo superior, ao limite de sua rigidez dielétrica, possibilita o fluxo de corrente elétrica (ARANTES, 2001).

No processo de eletroerosão, suas principais funções são: remover as pequenas partículas da erosão da peça e do eletrodo, refrigeração do eletrodo para evitar a fusão do mesmo com a peça e a refrigeração da peça para manter o controle dimensional correto (SILVA, 2004).

O fluido dielétrico circula através da região das descargas elétricas alimentadas por furos ou rasgos na peça ou no eletrodo, muitas vezes, ambos ficam submersos. No circuito de circulação o fluido é constantemente purificado através de filtros apropriados, não se faz necessário apenas quando é uma operação de desbaste, com distâncias relativamente grandes entre o eletrodo e a peça, as partículas do dielétrico facilitam a passagem de maior corrente elétrica, sem aumentar a tensão (SILVA, 2004).

As principais características que um bom fluido dielétrico apresenta são: baixa viscosidade, alto ponto de inflamação, boa resistência dielétrica, não corroer o equipamento e não afetar o operador. Os fluidos dielétricos mais utilizados no processo são: óleos à base de silicone, querosene, óleos minerais, água desionizada e líquidos polares, tais como soluções aquosas de glicóis etilênicos (SILVA, 2004).

1.4 CAPACITORES

Os capacitores também conhecidos como condensadores, são dispositivos de circuito elétrico, que possuem a função de armazenar cargas elétricas e conseqüentemente energia eletrostática, ou elétrica. Essa capacidade de armazenar cargas elétricas em forma de campo eletrostático é denominada capacitância (SANTOS, 2017). Podem ser amplamente utilizados também, para filtrar ou remover sinais de corrente alternada de vários circuitos (CIPELLI, MARKUS, 2004).

De forma estrutural simples, considere duas placas condutoras paralelas A e B, chamadas de armaduras, isoladas, por um material dielétrico, como apresentado na Figura 4 (CIPELLI, MARKUS, 2004).

FIGURA 4 - Estrutura do Capacitor



Fonte: CIPELLI, MARKUS, 2004

A capacitância de um capacitor de placas paralelas pode ser calculada pela Equação (1).

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (1)$$

Onde (ϵ) representa a permissividade absoluta do material dielétrico; (S) é a área das placas e (d) distância entre as placas.

No vácuo, $\epsilon_0 = 8,9 \cdot 10^{-12}$ F/m. Para os demais materiais, essa característica pode ser dada em relação à permissividade do vácuo, conforme Tabela 1.

TABELA 1 - Permissividades de alguns materiais

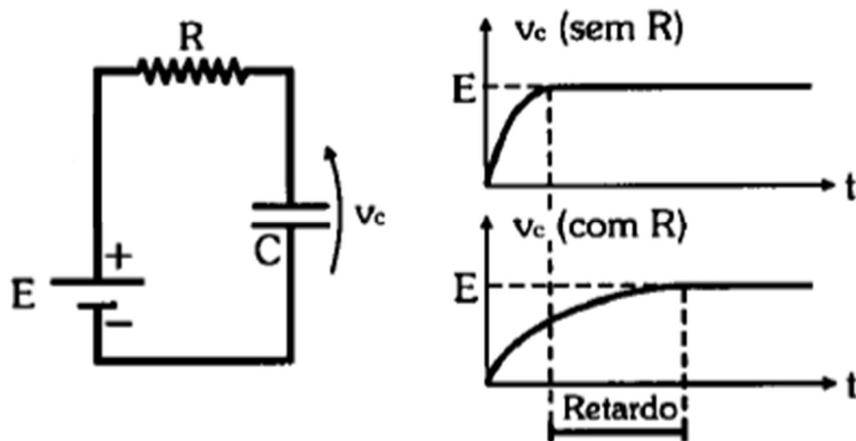
Dielétrico	Permissividade – ϵ [F/m]
Ar	ϵ_0
Polietileno	2,3. ϵ_0
Papel	3,5. ϵ_0
Baquelite	4,8. ϵ_0
Mica	6. ϵ_0
Porcelana	6,5. ϵ_0

Fonte: CIPELLI, MARKUS, 2004

1.5 CONSTANTE DE TEMPO

Embora seja muito pequeno o tempo de carga de um capacitor alimentado diretamente por uma fonte de tensão, isso não ocorre instantaneamente. Com o propósito de retardar o tempo de carga, liga-se um resistor em série, com o capacitor, fazendo com que a tensão entre os seus terminais cresça mais lentamente, como apresentado na Figura 5 (CIPELLI, MARKUS, 2004).

FIGURA 5: Representação de um circuito Resistivo-Capacitivo



Fonte: Adaptado de CIPELLI, MARKUS, 2004

Em um circuito Resistivo-Capacitivo, quanto maior a constante de tempo, maior será o tempo necessário, para que o capacitor carregue. Essa constante é representada pela letra grega τ (tau), e pode ser expressa matematicamente, de acordo a Equação (2) (CIPELLI, MARKUS, 2004).

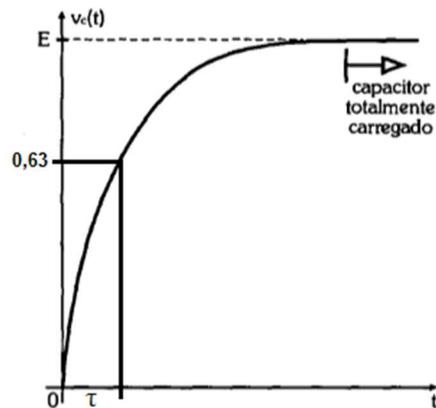
$$\tau = R \cdot C \quad (2)$$

Onde, R representa a resistência do resistor e o C a capacitância do capacitor.

O τ é o tempo gasto para que o circuito atinja 63% da tensão de entrada como mostra a Figura 6. O tempo gasto para que o capacitor atinja 99% de carga pode ser calculado pela Equação (3).

$$t = 5 \cdot \tau \quad (3)$$

FIGURA 6 - Gráfico do carregamento exponencial do carregador

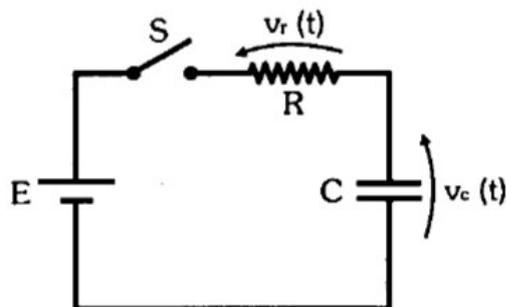


Fonte: Adaptado de CIPELLI, MARKUS, 2004

1.6 CARGA DO CAPACITOR

Considere um circuito Resistivo-Capacitivo série ligado a uma fonte de tensão contínua E e a uma chave S aberta, com o capacitor completamente descarregado, como ilustra a Figura 7.

FIGURA 7 - Circuito RC com chave



Fonte: CIPELLI, MARKUS, 2004

Ao ligar a chave S no instante $t = 0$, nota-se que a tensão do resistor (v_r) cai exponencialmente de E até zero. Para calcular a tensão no resistor usa-se a Equação (4).

$$V_r(t) = E \cdot e^{-t/\tau} \quad (4)$$

Em que, $e \cong 2,72 =$ algarismo neperiano.

A tensão no capacitor (v_c) apresenta um crescimento exponencial de zero até a tensão E , quando sua carga é total, como apresentado na Figura 6. Deste modo, a tensão no capacitor é uma exponencial crescente que é deduzida pela equação (5).

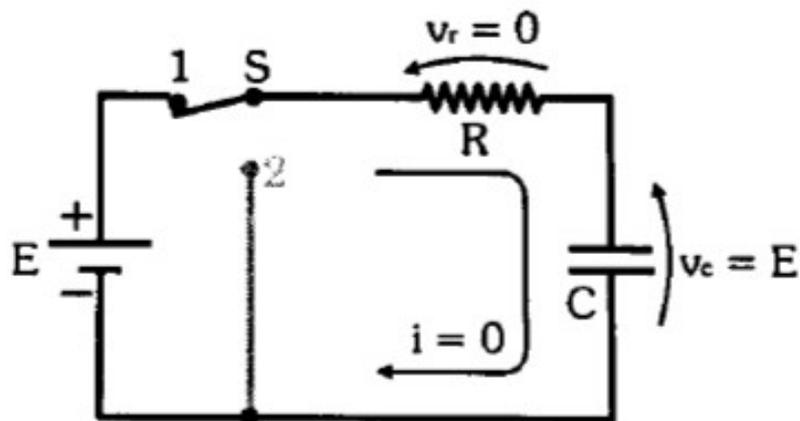
$$V_c(t) = E \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (5)$$

Observa-se que o termo $(1 - e^{-t/\tau})$ aumenta com o aumento do instante t .

1.7 DESCARGA DO CAPACITOR

Considera-se um circuito Resistivo-Capacitivo série ligado a uma fonte de tensão E e a chave S inicialmente na posição 1, com o capacitor já completamente carregado, como mostra a Figura 8.

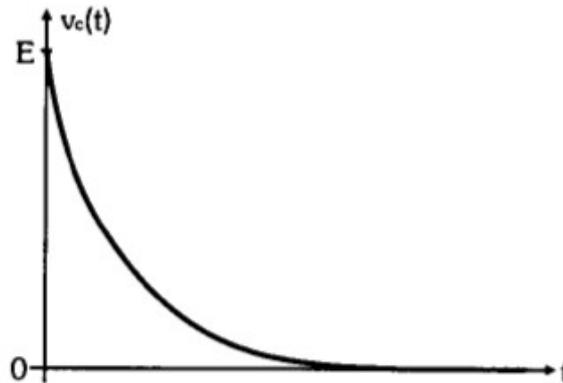
FIGURA 8: Circuito RC



Fonte: CIPELLI, MARKUS, 2004

Ao mudar a chave S para a posição 2 no instante $t = 0$, a fonte de alimentação é desligada, ficando o circuito Resistivo-Capacitivo em curto. O capacitor se descarrega sobre o resistor, de modo, que a sua tensão descreva uma curva exponencial decrescente, como ilustra a Figura 9.

FIGURA 9 - Exponencial de descarga



Fonte: CIPELLI, MARKUS, 2004

A tensão no resistor (v_r) acompanha a corrente, pode ser calculada pela equação (6):

$$V_r(t) = - E \cdot e^{-t/\tau} \quad (6)$$

A equação (7) demonstra a descarga do capacitor de acordo com sua tensão (v_c).

$$V_r(t) = E \cdot e^{-t/\tau} \quad (7)$$

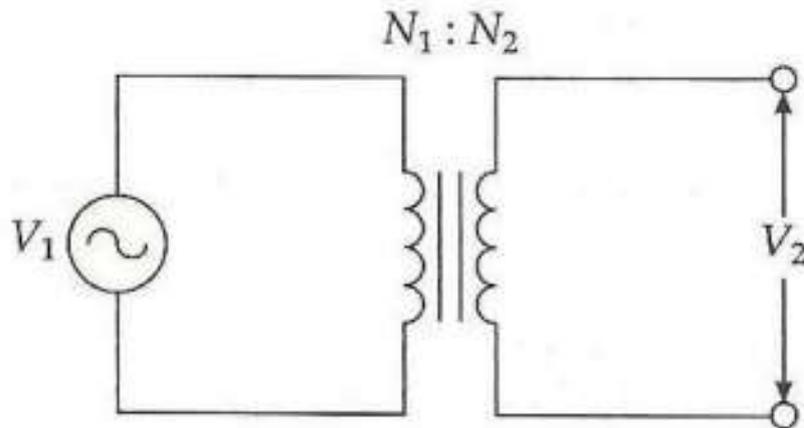
1.8 TRANSFORMADORES

Transformadores ou trafos, como também são conhecidos, são dispositivos elétricos que têm a finalidade de elevar ou diminuir tensão, ou isolar um circuito. Existem diversos tipos de transformadores, cada um com uma finalidade, construção e tamanho específico.

Um transformador é constituído no mínimo por dois enrolamentos, o enrolamento que aplica-se a tensão, que deseja transformar é chamado de primário, e o que se obtêm, a tensão desejada é chamada de secundário. A tensão do enrolamento secundário depende da relação de espiras entre o primário e o secundário e também da tensão aplicada, no primário.

A Figura 10 apresenta um exemplo de transformador, a bobina da esquerda é o enrolamento primário e a da direita enrolamento secundário. N_1 representa o número de espiras no enrolamento primário, N_2 o número de espiras no secundário (MALVINO, 1995).

FIGURA 10 - Transformador



Fonte: MALVINO, 1995

Os transformadores classificam-se de acordo com o número de espiras, no enrolamento secundário, se a relação N_2/N_1 apresenta resultado maior que um, é chamado de transformador elevador, por outro lado, se apresentar resultado menor que um é chamado de transformador abaixador. (MALVINO, 1995)

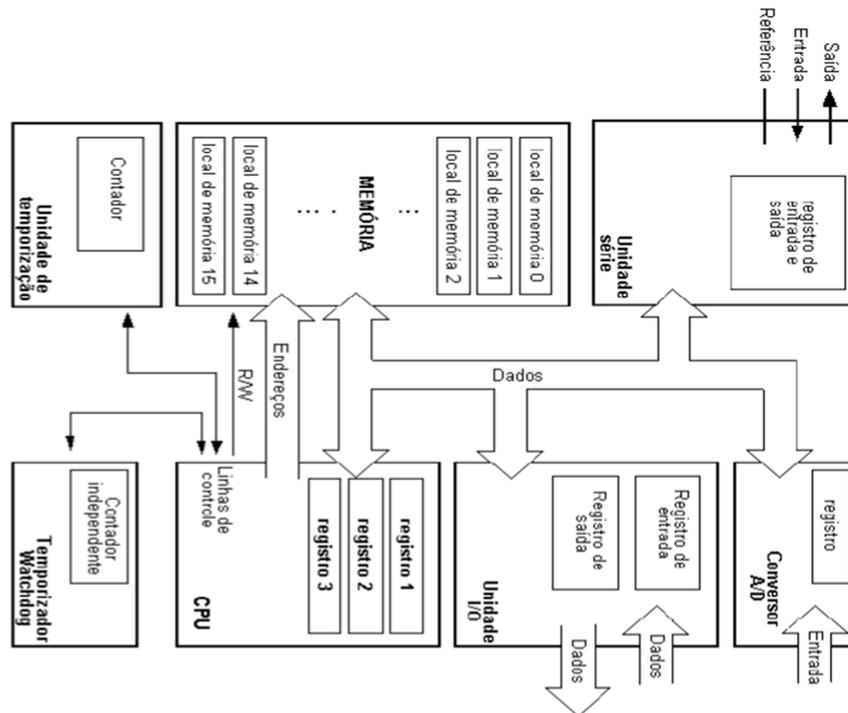
1.9 MICROCONTROLADOR

O micro controlador caracteriza-se como um circuito integrado capaz de efetuar processos lógicos, com extrema rapidez e precisão. Uma das grandes vantagens deste circuito é a sua capacidade de programação, o que o torna ajustável à finalidade desejada e possibilita programá-lo, de acordo com a tarefa requerida (ASSIS, 2004).

Os micros controladores são de forma geral utilizados na automação, no gerenciamento de processos lógicos, no controle de produtos e periféricos, entre outras aplicações.

A Figura 11 apresenta o esquema de um micro controlador com os seus elementos básicos e ligações internas.

FIGURA 11 - Parte principal de um micro controlador



Fonte: ASSIS, 2004

A seguir apresenta-se um breve comentário dos principais blocos, que compõem um micro controlador.

A unidade série é o bloco que possibilita a comunicação, permitindo receber e enviar dados simultaneamente, uma vez que tenha linhas separadas. O nome série é devido ao tipo de comunicação, diferente da transmissão em paralelo dessa unidade os dados movem-se bit, após bit.

O bloco memória tem a função de armazenar dados, ele é constituído, por um conjunto de locais de memória, para escolher onde armazenará esses dados é necessário fazer o endereçamento.

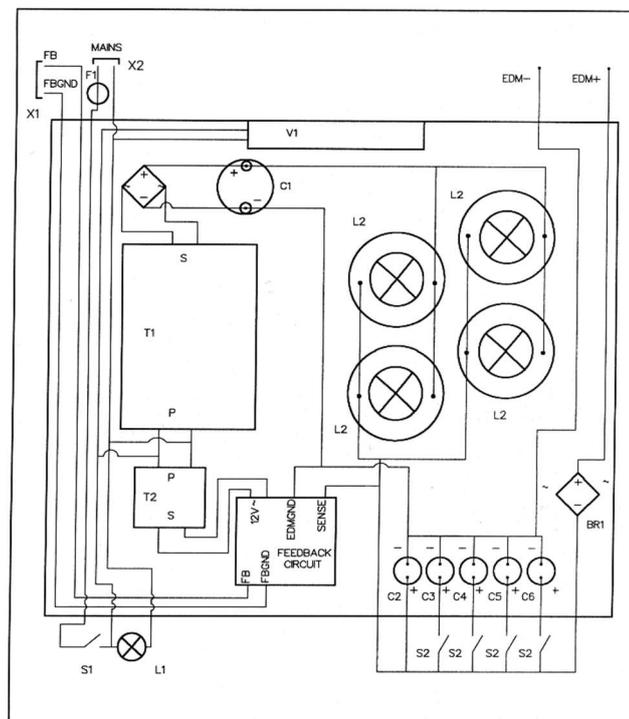
A unidade central de processamento é o bloco, que apresenta mais 3 locais de memória nomeados como registro, neste bloco é possível ter a capacidade de dividir, subtrair, multiplicar e mover os seus conteúdos de um local de memória, para o outro. Os registros são locais de memória cuja a função é ajudar a executar várias operações matemáticas ou outras operações com dados (ASSIS, 2004).

2 MATERIAL E MÉTODO

2.1 CIRCUITO EDM

O circuito de potência EDM é o responsável pela geração das faíscas. A unidade é composta por componentes elétricos e eletrônicos comuns. As ligações dos componentes elétricos do circuito foram feitas de acordo com o esquema elétrico mostrado na Figura 12.

FIGURA 12 – Esquema elétrico do circuito EDM.



Fonte: *PROVED BY PRACTICE PUBLICATIONS*, 2000

O funcionamento do circuito é descrito da seguinte maneira: um transformador com corrente máxima de trabalho de 8A reduz a tensão do sistema para 40V (T1), em seguida uma ponte retificadora (BR1) transforma a corrente alternada em contínua e o capacitor (C1) filtra esta tensão deixando-a mais pura. Para limitar a corrente do curto-circuito a um valor abaixo da corrente máxima admissível pelo transformador foram utilizadas quatro lâmpadas halógenas (L2) realizando a função de resistor, evitando sobre corrente e conseqüentemente o aquecimento do transformador. A Figura 13 apresenta um banco de capacitores (C2, C3, C4, C5 e C6) cuja função é aumentar o tempo de duração do arco elétrico gerado, pela saída do

circuito EDM, e ainda controlar a intensidade da descarga elétrica a qual influenciará no acabamento final da peça. O controle dos capacitores é realizado através de chaves as que permitem que o usuário do equipamento faça os ajustes necessários, conforme o corpo de prova.

FIGURA 13 – Banco de capacitores



Fonte: MARCUS AURELIO CARDOSO, 2017

A Tabela 2 apresenta os componentes, a quantidade e a descrição dos mesmos, para a realização da montagem do circuito.

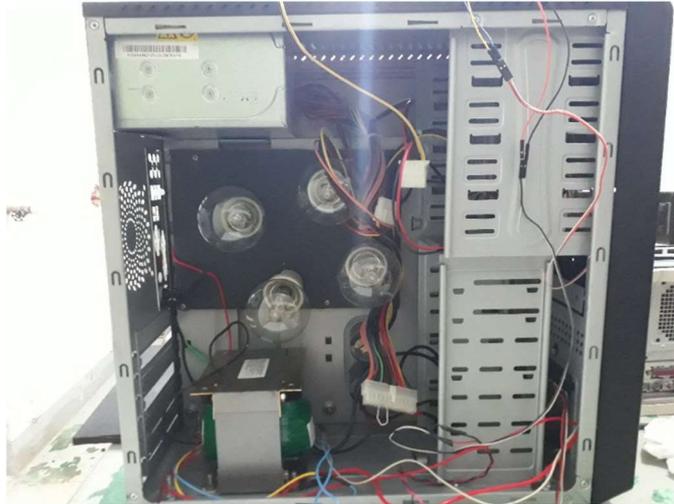
TABELA 2 – Componentes do circuito EDM

Sigla	Quantidade	Componente	Descrição
T1	1	Transformador	40V; 8 Amp.
T2	1	Transformador	12V; 1 Amp.
C1	1	Capacitor	3000uF; 150V; eletrolítico
C2	1	Capacitor	56uF; 150V; eletrolítico
C3	1	Capacitor	100uF; 150V; eletrolítico
C4	1	Capacitor	220uF; 150V; eletrolítico
C5	1	Capacitor	330uF; 150V; eletrolítico
C6	1	Capacitor	470uF; V; eletrolítico
L2	4	Lâmpada	Tensão de rede; 70W
BR1	2	Retificador de Ponte	100V; 35Amp
F1	1	Fusível + Suporte	Tensão de rede; 3 Amp.
S1	1	Interruptor	Tensão de rede; 3Amp.
S2	4	Interruptor	100V; 10 Amp.
V1	1	Ventilador	12V

Fonte: MARCUS AURELIO CARDOSO, 2017

A montagem do circuito foi realizada em um gabinete de computador padrão ATX, com intuito de reduzir os custos e o tempo gasto, com a fabricação de uma caixa para acomodação dos componentes, já que o mesmo oferece as características estruturais e estéticas necessárias, para o projeto, como pode ser observado na Figura 14.

FIGURA 14 – Circuito EDM



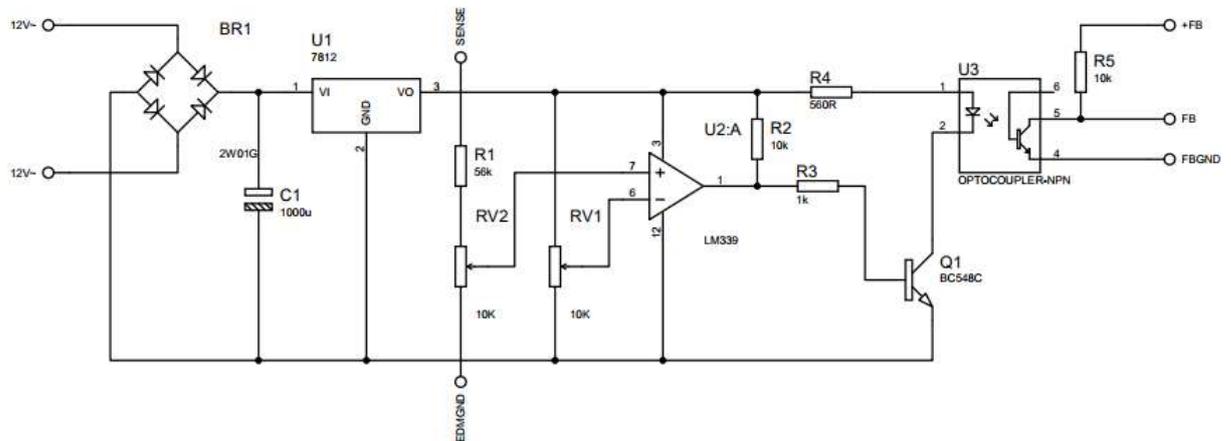
Fonte: MARCUS AURELIO CARDOSO, 2017

2.2 CIRCUITO DE REALIMENTAÇÃO OU FEEDBACK

O circuito responsável pela leitura de tensão proveniente da carga dos capacitores, com a finalidade de controlar o GAP. Quando o eletrodo se aproxima do corpo de prova abre um arco elétrico e com isso a tensão dos capacitores diminui, o circuito de realimentação realiza a leitura desta tensão e envia um sinal, para o micro controlador, que através de um motor de passo com guias, afasta o eletrodo da peça, até que os capacitores recarreguem, após os mesmos recarregarem o eletrodo volta a se aproximar da peça, tornando assim, um processo contínuo.

Para um monitoramento da tensão e posteriormente um melhor ajuste do gap um circuito foi criado de acordo com o diagrama representado pela Figura 15.

FIGURA 15 – Circuito de realimentação



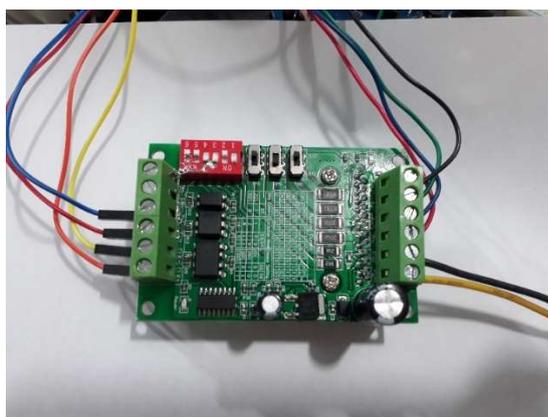
Fonte: MARCUS AURELIO CARDOSO, 2017

Conforme apresentado na Figura 15, o circuito é composto por três etapas, sendo que a primeira contempla uma fonte de alimentação contínua contendo uma ponte retificadora (BR1), um capacitor de filtro (C1) e um regulador de tensão de 12V (U1). A segunda etapa traz uma grande relevância, pois esta é responsável pela leitura da tensão do arco elétrico e a comparação com um valor de referência ajustado através de um resistor variável (RV1) configurado como divisor de tensão. Já a última parte inicia-se pela saída de sinal do amplificador operacional configurado como comparador de tensão, de modo que a sua entrada não inversora monitora a tensão do arco elétrico e enquanto esta for maior que a tensão de referência presente na entrada inversora, a saída do comparador estará em nível baixo (0V) fazendo com que o transistor (Q1) fique em estado de corte, sendo assim, o sinal presente no terminal (FB) será alto (5V) autorizando a descida do eletrodo para a abertura do arco elétrico. A medida que o eletrodo se aproxima da peça (corpo de prova) a tensão no capacitor diminui até um valor menor que a tensão de referência, invertendo assim a saída do comparador para nível alto (12V) e consequentemente saturando o transistor (Q1) e invertendo o sinal de (FB) para nível baixo (0V) autorizando a subida do eletrodo. O objetivo da comparação de tensão, é permitir o controle de altura entre o eletrodo e a peça, ou seja, o GAP. Um fotoacoplador (U3) foi adicionado ao circuito para promover a isolamento galvânica entre o sinal do circuito EDM e o controlador, evitando assim, possíveis ruídos oriundos das descargas elétricas geradas.

2.3 DRIVER DO MOTOR DE PASSO

O driver foi utilizado para energizar e controlar o motor de passo. Neste trabalho utilizou-se o modelo TB6560AHQ como mostra a Figura 16, cuja especificações são: tensão de operação de 10-35VDC e corrente nominal de 3A (pelo fato do motor de passo requerer apenas 1,2A de corrente nominal), opto-acoplador de alta velocidade 6N137 sem perda de passos e proteção contra sub-tensão e sobrecorrente. Para enviar comandos para o driver foi utilizado um microcontrolador arduino modelo UNO, por apresentar as características necessárias de projeto como baixo custo e a quantidade de portas de entradas/saídas suficientes, para a conexão de todos os componentes pertencentes a máquina.

FIGURA 16 – Driver do motor de passo



Fonte: MARCUS AURELIO CARDOSO, 2017

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultados obtidos, teve-se uma corrente de arco de 1A equivalente a 12,5% da corrente máxima do transformador, o que possibilita novos ajustes e testes afim de estudar quais os efeitos, tais mudanças acarretariam. O motivo pelo qual o valor da corrente da descarga elétrica permanecer no valor mencionado foi ocasionado devido a inserção de lâmpadas halógenas. Para um melhor funcionamento poderia ser utilizado lâmpadas incandescentes devido ao comportamento mais próximo, de uma resistência ôhmica, porém estas não são mais comercializadas atualmente.

No circuito EDM verificou-se ao realizar medições com o uso de um voltímetro que a tensão nos capacitores varia entre 0V (quando o eletrodo toca o corpo de prova) e 56V

(eletrodo afastado do corpo de prova). O limite inferior dessa faixa corresponde aos capacitores totalmente descarregados, enquanto o limite superior corresponde a carga total dos capacitores que é equivalente a tensão de pico do transformador do circuito EDM.

Para o circuito de realimentação foram realizadas duas montagens, sendo que a primeira não ofereceu ajuste de sensibilidade necessária, para manter a abertura do arco elétrico. Posteriormente testou-se a segunda montagem a qual ofereceu uma faixa maior de ajustes, o que permitiu a manutenção de abertura do arco elétrico (Figura 17), evitando que o mesmo fosse extinto, quando o eletrodo toca o corpo de prova.

FIGURA 17 – Teste



Fonte: MARCUS AURELIO CARDOSO, 2017

Para a constatação do processo de eletroerosão deixou-se a máquina operando por aproximadamente 15 minutos com abertura contínua do arco elétrico, no corpo de prova. Como resultado obteve-se uma remoção de material considerável como ilustra a Figura 18.

FIGURA 18 – Corpo de prova

Fonte: MARCUS AURELIO CARDOSO, 2017

4 CONCLUSÕES

Conclui-se que o objetivo geral do trabalho foi alcançado de maneira satisfatória, pois pode-se observar pelos testes que houve retirada de material. Durante o desenvolvimento do projeto aplicou-se diversos conhecimentos de áreas e subáreas de conhecimento como: eletrônica, eletricidade, programação e processos de fabricação.

Com os conceitos básicos e essenciais de eletrônica, foi possível a criação de um circuito de realimentação simples, porém primordial para o funcionamento da máquina. Por se tratar de componentes eletrônicos o custo foi satisfatório visto que tais componentes possuem preços acessíveis.

Por se tratar de um método de usinagem não convencional, o conhecimento desse processo ainda é pouco explorado no meio acadêmico. Desta forma, a máquina será de grande relevância para as disciplinas, que envolvem métodos de usinagem.

REFERÊNCIAS

ARANTES, Luciano José et al. **Avaliação do desempenho de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas**. 2001.

ASSIS, Pietro Diovane Keoma Bergamaschi de. **Microcontrolador**. 2004. Dissertação para obtenção do Título de Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade Presidente Antônio Carlos.

CIPELLI, Marco; MARKUS, Otávio. **Circuitos em corrente contínua**. 5ª Edição, Ed. Érica Ltda. São Paulo 2004.

CRUZ JUNIOR, Eli Jorge da. **A influência do tamanho de grão ferrítico da peça na integridade superficial de peças erodidas**. 2015.

LIMA, Francisco Elicivaldo; CORRÊA, Maurício. **Efeitos da eletroerosão sobre a superfície de peças usinadas**. *Revista Tecnologia*, v. 27, n. 1, 2006.

MALVINO, Albert Paul. **Eletrônica**. 4ª Edição, Editora Afiliada. São Paulo 1995.

SANTOS, Marco Aurélio da Silva. **"Capacitores"**; Brasil Escola. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/fisica/capacitores.htm>>. Acesso em 16 de maio de 2017.

SILVA, J.C. **Sistema Especialista Aplicado à Técnica de Usinagem por Eletroerosão**. 2004. 76p. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Taubaté, Taubaté.

STORR, M. **Important facts about spark erosion**. Stuttgart: Oelheld, 2007. 44 p. Disponível em: < www.oelheld.de>. Acesso em: Acesso em 17 de maio de 2017.