



DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO DE IMPRESSÃO DE POLÍMEROS ELETRÔNICOS VIA SISTEMA DE INJEÇÃO ELETRÔNICA DE BAIXO CUSTO¹

Adriana Diniz Barbosa²
Sávio Augusto Lopes da Silva³
Rodrigo Fernando Bianchi⁴

Resumo

Neste trabalho é apresentado o projeto e o desenvolvimento de um equipamento inovador e de baixo custo para fabricação de filmes finos de polímeros eletrônicos a partir da tecnologia automotiva de injeção eletrônica. Para tanto, ensaios foram realizados com o objetivo de adequar a precisão e a eficiência da aspersão de tintas e soluções orgânicas com a uniformidade de deposição dos filmes produzidos.

Palavras-chave: Polímeros semicondutores; Filme fino; Sistema de injeção eletrônica; Controle.

DEVELOPMENT OF EQUIPMENT PRINTING OF ELECTRONIC POLYMERS THROUGH ELECTRONIC INJECTION SYSTEM IN LOW COST

Abstract

In this paper we report the design and development of innovative and low-cost equipment for manufacturing printable electronics polymeric thin-film using the technology of automotive electronic injection. We carried out tests in order to adjust the accuracy and efficiency of spray paint and organic solutions with the uniformity of films deposition produced

Key words: Polymer semiconductors; Thin film; Electronic injection system; Control.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Eng. Controle e Automação; Mestra em Engenharia de Materiais - REDEMAT/UFOP – e-mail: adrianadinizbarbosa@gmail.com

³ Eng. Eletricista; M.Sc.; D.Sc.; Prof. Adjunto do Dep. Eng. de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais/Escola de Minas/UFOP – savio@decat.em.ufop.br

⁴ Físico; M.Sc.; Doutor em Ciências e Engenharia de Materiais.; Prof. Adjunto do Dep. de Física Instituto de Ciências Exatas e Biológicas/UFOP – bianchi@iceb.ufop.br



1 INTRODUÇÃO

Lançada em 2004, a atual política industrial, tecnológica e de comércio exterior (PITCE) do Governo Federal elegeu as áreas de *semicondutores*, *software*, *bens de capital*, *fármacos e medicamentos* como estratégicas para a retomada do crescimento econômico sustentável do país e, conseqüentemente, da superação dos desequilíbrios internos e externos enfrentados pela economia brasileira nas últimas décadas.⁽¹⁾ Em especial ao que tange a área de semicondutores, tal política é de grande importância para o fortalecimento não apenas de uma indústria de base como também para composição de toda cadeia produtiva de dispositivos eletro-eletrônicos no país, até o momento, inexistente ou assolada pela falta de políticas coordenadas entre os setores produtivos, governo e academia. Ademais, a inserção das indústrias brasileiras na área de semicondutores ainda visa tornar o Brasil competitivo num mercado mundial estimado em US\$ 220 bilhões/ano, com taxas de crescimento da ordem de 13% ao ano, dominado, principalmente, por países asiáticos e pelos Estados Unidos.⁽²⁾ Não obstante toda necessidade em se inserir o país num setor competitivo, e de alto valor agregado, o panorama mundial ainda está marcado por um novo dinamismo econômico baseado na ampliação da demanda por produtos e processos diferenciados e viabilizados pelo desenvolvimento intensivo e acelerado de novas tecnologias. Essa nova dinâmica realça a importância da inovação como um elemento-chave para o crescimento da competitividade industrial, o que vem norteando várias empresas a operarem com alta qualidade atrelada a baixos custos. Concomitantemente, o desenvolvimento de processos, equipamentos e produtos no cenário mundial possibilita fortalecer a disputa por novos mercados. Recentemente o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos do Ministério de Ciência e Tecnologia (CGEE-MCT) elaborou um estudo sobre o mapa atual dos semicondutores orgânicos,⁽³⁾ cujo resultado apontou a oportunidade atual de desenvolvimento desses dispositivos como uma ação estratégica para o crescimento industrial do Brasil. Dessa forma, o domínio dessa área de nanotecnologia (ou de eletrônica orgânica) abre perspectivas para inovações que vão desde o desenvolvimento de equipamentos e processos até a fabricação de dispositivos luminosos de alta eficiência. Em particular, a necessidade de desenvolvimento de sistemas de fabricação de filmes orgânicos é, sem dúvida, uma realidade atual. Tal equipamento destaca-se como uma ferramenta para estabelecer a cadeia produtiva de dispositivos poliméricos e, portanto, de interesse científico e tecnológico. Baseado nessa realidade, esse trabalho apresenta o desenvolvimento inédito de um equipamento de impressão de polímero eletrônico baseado em sistemas de injeção eletrônica que, por meio de uma metodologia experimental adequada, resultou na preparação de filmes poliméricos com taxas de deposição controladas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada nesse trabalho foi dividida em duas partes, a saber: (1) escolha do polímero para fabricação de filmes e (2) projeto e desenvolvimento do equipamento de injeção. Nesse contexto, o polímero utilizado foi o poli(etileno-dioxitiofeno) (PEDOT), que é um polímero condutor de fácil preparação, baixo custo e bastante utilizado como camada transportadora de cargas em dispositivos emissores de luz poliméricos.⁽⁴⁾ Esse polímero foi obtido comercialmente e diluído em solução aquosa, com pH ácido, para preparação da solução de injeção. Já o

projeto do equipamento de impressão foi baseado na mecânica e na eletrônica disponíveis para sistemas de injeção eletrônica automotiva. Como instrumento de “aspersão” de polímero empregou-se uma válvula de injeção eletrônica utilizada em automóveis, devido a sua resistência à ambientes hostis. Isso é necessário porque a válvula de injeção desses sistemas é inerte a, por exemplo, solventes orgânicos, muito utilizados na fabricação de filmes poliméricos, como o clorofórmio, o tolueno e o n-metil-2-pirrolidona (NMP). Essa válvula tem a função de pulverizar o combustível em automóveis e, no caso desse trabalho, de pulverizar a solução polimérica de forma similar às condições encontradas em impressoras a jato de tinta comerciais. Destaca-se, contudo, que o custo de fabricação desse sistema, atrelado a baixa taxa de corrosão química e de entupimento são, sem dúvida, a principal vantagem desse equipamento para impressão de polímeros.

A deposição da solução polimérica é realizada por um injetor apropriado a uma pressão de 2,4 Bar. O injetor consiste num corpo de uma válvula que contém enrolamento de solenóide e a guia da válvula agulha. Nesse caso, quando a corrente no solenóide é nula, a válvula é comprimida de encontro ao seu assento por uma mola helicoidal. Na presença de um fluxo de corrente a válvula, por sua vez, é levantada permitindo assim a injeção da solução através do orifício de precisão. A quantidade de solução injetada é determinada pela duração do pulso elétrico.⁽⁵⁾ A Figura 1 mostra um esquema da estrutura interna do bico injetor.⁽⁶⁾

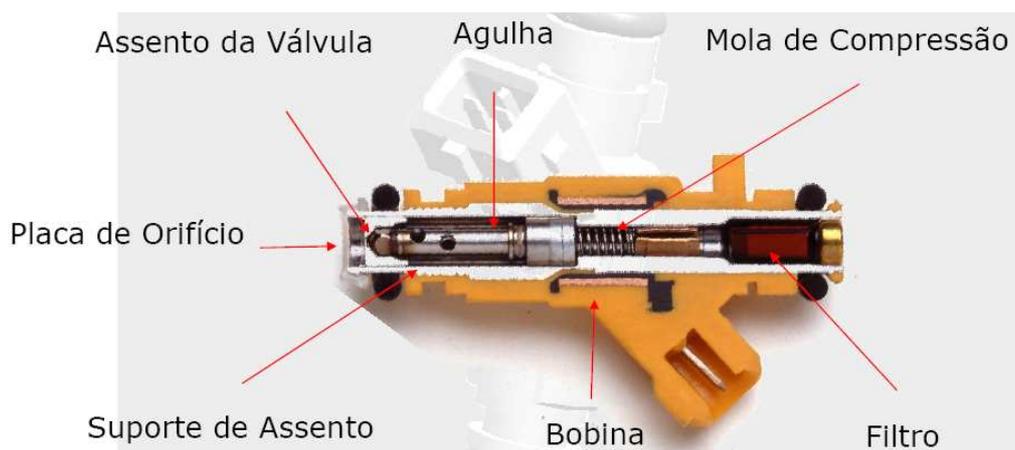


Figura 1. Esquema dos componentes da válvula injetora EV6. Componentes internos.⁽⁶⁾

Não obstante à estrutura física e à resistência à corrosão da válvula injetora (Figura 1), que são condições necessárias para aspersão das soluções poliméricas, destaca-se ainda que essa válvula apresenta um microprocessador, caracterizado pela precisão, confiabilidade, versatilidade e baixo consumo de energia.⁽⁷⁾ Assim, a quantidade de solução injetada é facilmente dosada pela unidade de comando através do tempo de abertura das válvulas de injeção, também conhecido como tempo de injeção.⁽⁸⁾

A Figura 2 mostra a placa de orifício da válvula injetora, caracterizada por 04 furos micro-puncionados cujo diâmetro é igual $(55 \pm 5) \mu\text{m}$. A vazão depende da pressão do sistema e do tamanho (diâmetro) desses furos.

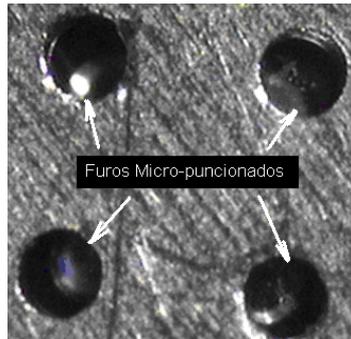


Figura 2. Placa de orifício de uma válvula injetora com 04 furos micro-puncionados cujos diâmetros são de $(55 \pm 5) \mu\text{m}$.

Para um melhor desenvolvimento e aperfeiçoamento do equipamento de fabricação de filmes poliméricos foram estudadas as características elétricas e mecânicas de sistemas automotivos de injeção eletrônica (SAIEs), tais como, frequência de abertura e fechamento da válvula, temperatura e tensão de trabalho, vazão e corrente. A válvula injetora foi testada primeiramente com tintas adequadas para o estudo do espalhamento e, após algumas adaptações, com as soluções de PEDOT. Assim, a altura, a pressão, o tempo de abertura e a velocidade de movimentação da válvula foram adaptados para as características das soluções utilizadas.

Finalmente, o controle do bico injetor foi realizado a partir da modulação por tamanho de pulso (PWM - *Pulse-Width Modulation*) cujo projeto eletrônico é apresentado na Figura 3. Este circuito engloba a modulação de sua razão cíclica para transportar qualquer informação sobre um canal de comunicação e controlar o valor da alimentação entregue a carga. A PWM utilizada suporta a frequência máxima de 100 KHz e realiza o controle da abertura e o fechamento do bico injetor por meio de variações no valor dessa frequência. O tempo de abertura da válvula injetora “ T_{ON} ”, ou $T[1]$, pode ser regulado de forma independente do tempo de fechamento da válvula “ T_{OFF} ”, ou $T[0]$, permitindo assim o controle da vazão ou ejeção da solução polimérica.

Oscilador CMOS AT.dwg
(4093)

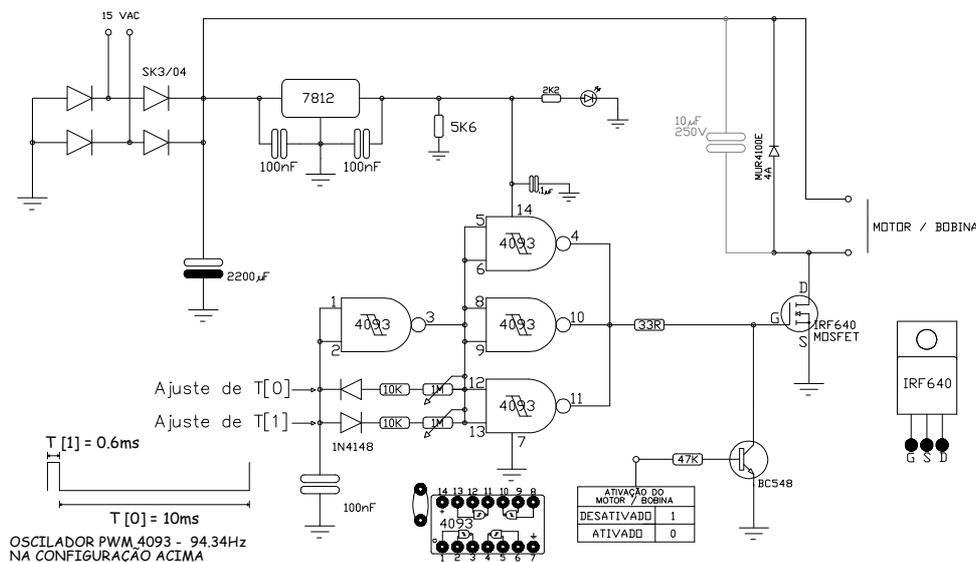


Figura 3. Projeto eletrônico para o controle do sistema de injeção de soluções poliméricas.⁽⁹⁾

De forma bastante simplificada a Figura 4 mostra o aparato experimental usado para impressão da solução polimérica. Nesse aparato um compressor garante a pressão em um reservatório de ar que, por sua vez, garante a pressão no compartimento da solução polimérica acoplado à válvula injetora controlada eletronicamente via circuito PWM. A solução polimérica é direcionada a um substrato colocado sobre em uma mesa controladora em X para posterior fabricação dos filmes em regiões pré-definidas pelo operador.

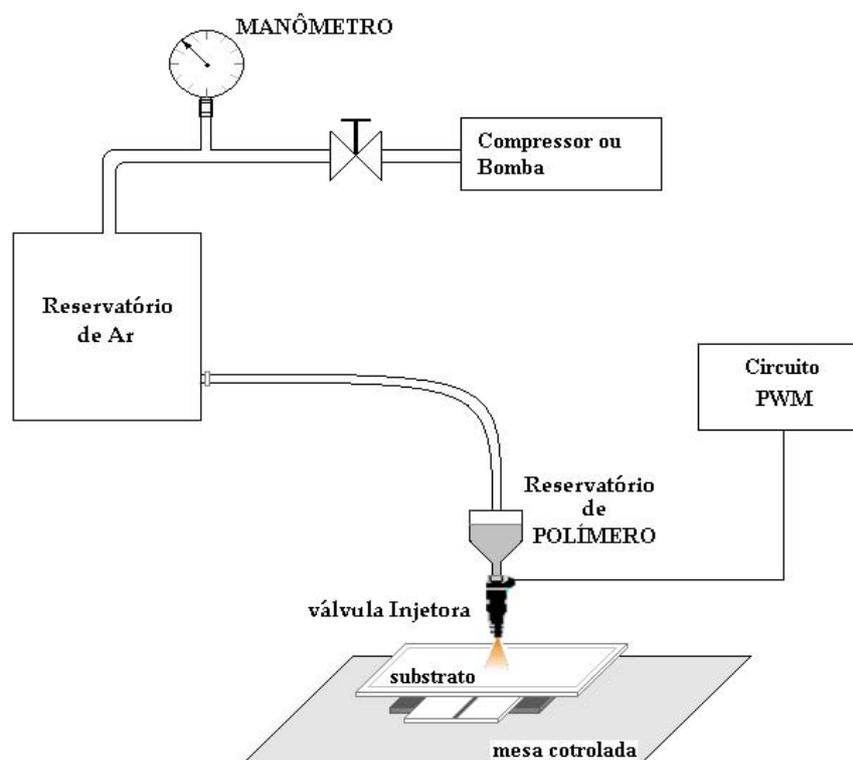


Figura 4. Esquema básico de uma máquina para recobrimento uniforme de polímeros em substratos planos.

No protótipo desenvolvido foi utilizado um eixo de movimentação vertical (eixo Z) cuja altura da válvula ao substrato foi controlada manualmente. Um pequeno motor foi utilizado para fazer a movimentação do substrato no eixo "X", uma vez que a válvula injetora permanece imóvel. Diferentes ensaios foram realizados variando-se a distância entre o substrato e bico injetor, bem como a frequência, o tempo de abertura e o fechamento da válvula. O controle foi feito manualmente em um botão de liga/desliga, podendo, assim, ajustar os parâmetros de entradas para controle da saída desejada. Com esse equipamento foi possível imprimir filmes de PEDOT sem as principais desvantagens de impressoras à jato de tinta comerciais, como, por exemplo, a baixa resistência química e a tendência de entupimento das cabeças de impressão. Para tanto, foram realizados ensaios usando-se uma válvula injetora de automóvel padrão. Para uma análise prévia do sistema foram realizados ensaios com tinta corante azul no lugar da solução de PEDOT. Como substratos foram utilizadas folhas de papel tamanho A4 (210 x 297) mm², como mostra a Figura 5. Variáveis como, altura da válvula ao substrato, velocidade de recobrimento, posição da válvula sobre o substrato (ângulo) foram trabalhadas em diferentes valores. Para tanto, uma seringa foi adaptada à válvula injetora para servir como "armazenamento" da tinta a ser ejetada sobre as folhas de papel A4 (Figura 5a). Utilizou-se ainda um motor *dc* para controlar a velocidade de movimentação do substrato durante a

ejeção da solução. Uma fonte *dc* ajustável foi usada para controlar a velocidade de movimentação do substrato simulando uma mesa X. Já para controlar os tempos de abertura e fechamento da válvula de forma independente foi utilizado o circuito mostrado na Figura 3, aplicando à mesma uma tensão de 12 V. Finalmente, para o funcionamento adequado do sistema, T_{ON} foi mantido em 0,6 ms, enquanto T_{OFF} foi de 10 ms. Nesse caso, a válvula injetora foi posicionada inicialmente em um ângulo cuja haste de apoio se encontrava perpendicular ao plano do substrato (Figura 5b).



Figura 5. (a) Fotografia do aparato utilizado na realização dos ensaios de ejeção e (b) detalhe da válvula de injeção eletrônica acoplada a uma seringa contendo tinta corante azul.

Finalmente, a Tabela 1 mostra os parâmetros de controle de deposição de tinta azul e do material polimérico usado ao longo desse trabalho. A tabela apresenta o conjunto de ensaios S_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6) realizados onde a distância substrato-válvula de injeção e a velocidade de movimentação do substrato foram variadas de, respectivamente, 0,5 cm a 3 cm e de 1,4 cm/s a 20 cm/s. Nos ensaios, a pressão sobre o êmbolo da seringa foi mantida igual a pressão atmosférica. Na tabela observa-se ainda que para uma velocidade constante e igual a 3,0 cm/s, a velocidade de movimento do substrato variou de 1,4 cm/s a 20 cm/s em S1, S2, S3 e S4. Já para S4, S5 e S6, a velocidade foi mantida constante e igual a 20 cm/s, enquanto a distância foi variada de 0,5 cm a 3,0 cm. Os resultados obtidos são apresentados no item 3.

Tabela 1: Parâmetros obtidos através dos ajustes dos componentes “v” e “d” apresentadas na Figura 5, onde a pressão sobre o êmbolo da seringa é constante em aproximadamente $p = 7,5$ cm de H_2O

Sistema	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Distancia - d (cm)	3,0	3,0	3,0	3,0	1,0	0,5
Velocidade - v (cm/s)	1,4	5,5	10,0	20,0	20,0	20,0

3 RESULTADOS

A Figura 6 mostra um conjunto de fotos do resultado de deposição de tinta azul em papel com o equipamento apresentado na Figura 5 e cujos parâmetros de deposição estão apresentados na Tabela 1, a saber: (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5 e (f) S6. Nessa figura observa-se a formação de uma linha para a deposição de tinta cuja velocidade de movimentação do substrato é de 1,4 cm/s (Figura 6a). À medida que a velocidade aumenta (Figuras 6b a 6d), a deposição se dá por meio da formação de círculos, cujo área e diâmetro médios são de aproximadamente 1 mm e $0,8 \text{ mm}^2$. Por outro lado, mantendo-se a velocidade constante e igual a 20 cm/s, mas variando-se a distância da válvula-substrato de 3,0 cm a 0,5 cm (Figuras 6d a 6f), a distância dos círculos diminui tendendo, conseqüentemente, a formação de uma linha.

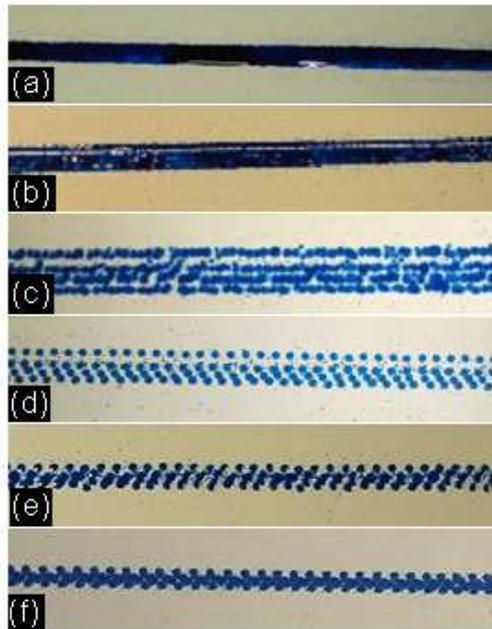


Figura 6. Seqüências de deposição de tinta azul usando-se os parâmetros disponíveis na Tabela 1, a saber: (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5 e (f) S6. Área dos círculos em (c), (d), (e) e (f) de aproximadamente $0,8 \text{ mm}^2$.

Dos resultados apresentados na Figura 6 fica claro que parâmetros como distância do substrato à válvula injetora e, velocidade de movimentação do substrato influenciam diretamente na distância entre os círculos do material depositado, mas praticamente não influenciam na área desses círculos.

A Figura 7 mostra os resultados da deposição de tinta azul sobre substratos (folhas) de papel (Figura 7a) e poliestireno comercial (Figura 7b). Para tanto, a distância substrato-válvula de ejeção e a velocidade de movimentação do substrato foram mantidas em, respectivamente, $2,0 \text{ cm/s}$ e 20 cm/s , enquanto T_{OFF} foi alterado de 10 ms para 20 ms para separar a distância entre as gotas depositadas e, portanto, melhorar a análise da forma do material deposito em cada um dos substratos. Destaca-se ainda que as fotos apresentadas foram ampliadas em relação a Figura 6, uma vez que o objetivo desse ensaio foi verificar a influência das características do substrato na formação do material impresso.

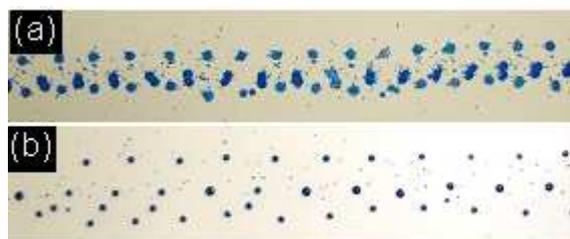


Figura 7. Seqüências de deposição de tinta azul usando-se os parâmetros disponíveis na Tabela 1 e os substratos de papel (a) e poliestireno (b). Ampliação 2X.

Na Figura 7 observa-se que a tinta azul quando depositada em poliestireno, Figura 7b, apresenta característica circular mais nítida do que a mesma tinta depositada sobre papel. Essa característica deve estar associada a absorção da tinta pelo papel, que deforma a forma da gota deposita inicialmente. Por outro, o substrato de poliestireno se comporta como hidrofóbico para tinta, contribuindo para a formação de gotas mais definidas. Finalmente, a área dos círculos obtidos em



substrato de poliestireno não é constante ao longo da linha de deposição do material, variando de $0,44 \text{ mm}^2$ a $0,78 \text{ mm}^2$. Essa diferença está associada à variação no diâmetro dos furos micro-puncionados (Figura 2) e, conseqüentemente, no volume das gotas ejetadas pelo equipamento.

A Figura 8 mostra uma foto da deposição da solução de PEDOT sobre substrato de papel. Para tanto, a distância substrato válvula, a velocidade de movimentação do substrato e T_{OFF} foram iguais a 2,0 cm, 20,0 cm/s 20 ms. As imagens foram obtidas iluminando-se o sistema papel+PEDOT com luz azul para melhor o contraste das figuras. São apresentas fotos com ampliação de (a) 1X, (b) 2,5X e (c) 5X. Nas fotos apresentadas na Fig. 8 fica claro a formação de estruturas irregulares de PEDOT sobre papel que mostram, por um lado, a possibilidade de deposição de materiais poliméricos via sistema de injeção de eletrônica mas, por outro lado, mostram a irregularidade das estruturas obtidas de PEDOT. Estudo sobre a melhoria dessas estruturas encontra-se em andamento pelos autores desse trabalho.

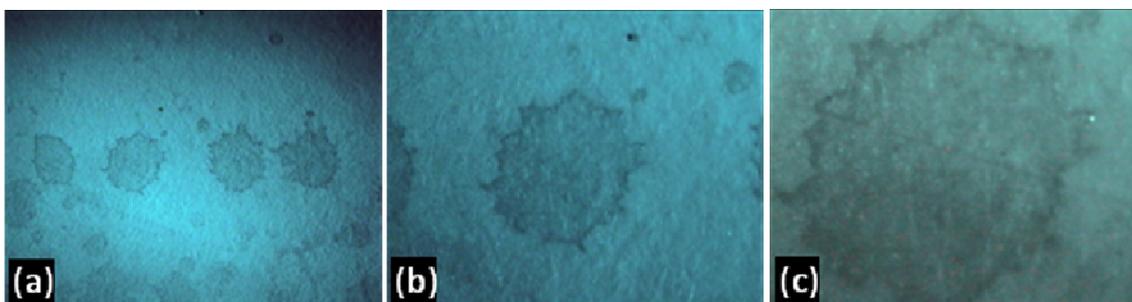


Figura 8 – Seqüências de gotas à base de PEDOT depositadas sobre o papel com ampliações de (a) 1X, (b) 2,5X e (c) 5X.

4 DISCUSSÃO

Nesse trabalho apresentamos os resultados obtidos com um equipamento para fabricação de filmes finos de polímeros eletrônicos fabricados a partir da tecnologia automotiva de injeção eletrônica. Para a confecção desses filmes, inúmeras etapas de caráter científico e tecnológico tiveram de ser vencidas, dentre elas o levantamento das especificações dos circuitos elétricos, das plataformas de hardware e de software e dos componentes mecânicos usados nos sistemas automotivos de injeção eletrônica (SAIE), e a construção do equipamento de impressão de filmes poliméricos, que possibilitou a realização de ensaios com polianilina. O uso desse sistema é inédito e surge nesse trabalho como uma alternativa de processo de fabricação de filmes polimérico a baixo custo e com precisão.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento desse trabalho mostram pela primeira vez a viabilidade técnica de produzir filmes poliméricos a partir de um novo sistema de impressão cuja tecnologia é baseada em sistemas de injeção eletrônica automotiva. Devido ao custo elevado para impressão de filmes poliméricos nas máquinas existentes atualmente, podemos afirmar que este equipamento mostrou-se eficiente quanto às resistências química e térmica de impressão e quanto ao seu valor agregado. Finalmente, a partir deste equipamento

de impressão de filmes poliméricos é possível aprimorar o processo e adequar o material (orgânico), cujo sistema de automação e controle é elaborado visando adequar a precisão e a eficiência da aspersão das soluções orgânicas com a uniformidade de deposição dos filmes produzidos visando, sobretudo, a fabricação de camadas ativas de dispositivos eletrônicos orgânicos eficientes.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio recebido da CAPES, INEO/CNPq, CNPq e Fapemig.

REFERÊNCIAS

- 1 CHIANG, C. K.; C. R. FINCHER, PARK, Y. W.; HEEGER, A. J.; SHIRAKAWA, H.; LOUIS, E. J.; GAU, S. C.; MACDIARMID, A. G. Phys. Rev. Let. 29, 17, (1977).
- 2 SHIBUSAWA, M.; KOBAYASHI, M.; HANARI, J.; SUNOHARA, K.; IBARAKI, N. IEICE Trans. Elec. E86C (11) 2269-2274 (2003).
- 3 Revista Parcerias Estratégicas. Disponível em:
<<http://www.cgee.org.br/parcerias/p08.php> > Acesso em: 30 nov. 2009.
- 4 BIANCHI, R. F. Tese Estudo das propriedades eletrônicas e ópticas de filmes e dispositivos poliméricos. Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, 2002.
- 5 GONÇALVES, P. M. F. Concepção de um Motor de Combustão Interna para um Veículo Automóvel de Extra-Baixo Consumo de Combustível. Dissertação Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Departamento de Engenharia Mecânica. Setembro de 2008.
- 6 Centro Universitário da FEI - RBLA/COM [05/2006] – © Robert Bosch Ltda.
- 7 PANAMBI, L. F. P. INJEÇÃO ELETRÔNICA, abril de 2002.
- 8 DAL COL, R. N. PWM – Modulação por largura de pulso. Engenheiro Metalurgista e de Materiais – UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto, 2008.
- 9 Centro Universitário da FEI - RBLA/COM [05/2006] – © Robert Bosch Ltda.