

## Modelo físico computacional para la obtención de imágenes eléctricas de alta resolución mediante procesos de fotocopiado

Segundo A. Martínez<sup>1,\*</sup> y Hernán Estrada<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá

### Resumen

Se modela la formación de la imagen eléctrica en materiales fotoconductores como una etapa del proceso electrofotográfico. El interés en este trabajo es estudiar la etapa inicial de la formación de la imagen eléctrica y las implicaciones que ésta tiene en relación con la calidad de resolución de la imagen eléctrica que se forma sobre el rodillo fotoconductor.

El proceso se modela utilizando las ecuaciones de Maxwell. El modelo matemático empleado se soluciona con la ayuda de un programa de cómputo escrito en lenguaje Fortran.

En el estudio de la formación de la imagen eléctrica se consideran dos casos: el caso de imagen unidimensional y el caso de imagen bidimensional.

**Palabras claves:** Física computacional, obtención de imágenes, fotocopiado

### Abstract

The formation of electric image in photoconductor materials as the electrophotographic process is modeled. The aim of this work is to study the initial phase of the formation of this image and its relation with the resolution quality of the image formed at the photoconductor system.

The process is modeled by using the Maxwell equations. The mathematical model is resolved by the utilizing of a Fortran program.

## 1. Introducción

Los principales avances hechos en el área de la Electrofotografía, que han permitido mejorar la calidad de impresión se han logrado a partir del entendimiento, estudio y perfeccionamiento de los mecanismos involucrados en todo el proceso, pues cada uno de éstos juega un papel definitivo en el resultado final.

El propósito del trabajo es describir el proceso que tiene lugar durante la formación de la imagen eléctrica. En particular, el trabajo se centra en el estudio de la física específica involucrada en el proceso de formación de dicha

---

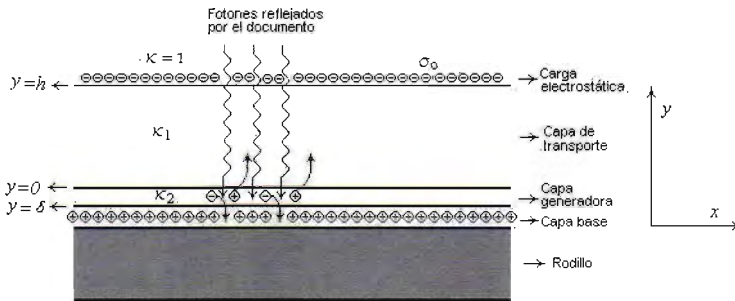
\*: [sphysics@netscape.net](mailto:sphysics@netscape.net)

imagen, creada en la superficie del rodillo fotoconductor, el cual es consecuencia del balance de interacciones entre materia, radiación, campos eléctricos y campos magnéticos.

## 2. Descripción del proceso electrofotográfico

Inicialmente el rodillo fotoconductor se ioniza y se logra el efecto corona, el cual permite preparar al fotoconductor para iniciar el proceso. Una vez cargado el rodillo fotoconductor, se escanea el documento y la luz que se refleja sólo por las partes claras del mismo, se transporta mediante dispositivos ópticos y se proyecta sobre la superficie del rodillo fotoconductor.

Al llegar estos fotones al rodillo, viajan a través de la capa de transporte y llegan finalmente a la capa generadora, en esta capa, por complejos procesos de interacción radiación-materia, los fotones generan pares electrón-hueco en las capas internas del fotorreceptor como se ilustra en la figura 1



**Figura 1.** Representación esquemática del proceso electrofotográfico.

Básicamente, la imagen eléctrica formada sobre el tambor consiste en zonas de carga negativa, que simulan las partes oscuras del documento que se quiere fotocopiar. Sobre estas zonas, se adhiere el tóner que se encuentra cargado positivamente y forma la imagen que luego se transfiere al papel.

## 3. Modelación de la imagen

Los huecos que se producen en la capa generadora se desplazan por la capa de transporte, para posteriormente neutralizar parcialmente la carga presente en la superficie del tambor y, transcurridos algunos microsegundos, formar la imagen eléctrica del documento sobre el tambor.

Ahora, como dentro del material fotoconductor se debe satisfacer la ecuación de continuidad para la densidad de huecos tenemos.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{J} \quad (1)$$

Donde  $\mathbf{J}$  es la densidad de corriente de huecos y se relaciona con el campo eléctrico mediante la Ley de Ohm así:

$$\mathbf{J} = \mu_0 \rho \mathbf{E} \quad (2)$$

Además debemos considerar la ecuación de Maxwell para  $\mathbf{E}$  dentro del material.

$$\nabla \cdot (k\mathbf{E}) = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3)$$

Al combinar las ecuaciones (1),(2) y teniendo en cuenta que  $\mathbf{E} = -\nabla V$  se tiene:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\mu_0 \nabla \cdot (\rho \nabla V) \quad (4)$$

Luego, de álgebra vectorial sencilla la anterior ecuación se convierte en:

$$\frac{\partial \rho(x, y, t)}{\partial t} = -\mu_0 (\nabla \rho(x, y, t)) \cdot (\nabla V(x, y, t)) + \mu_0 \rho \nabla^2 V(x, y, t) \quad (5)$$

Esta ecuación describe la variación de la densidad de huecos en el tiempo en función del potencial  $V$  dentro del material. Normalmente, los materiales utilizados por los fabricantes de películas fotoconductoras tienen un valor muy similar de  $\kappa$  ( $\kappa_1 \approx \kappa_2$ ). Así, la ecuación para el potencial  $V$  ecuación (3), se convierte en una ecuación de Poisson para toda la región del tambor:

$$\nabla^2 V(x, y, t) = -\frac{\rho(x, y, t)}{\epsilon_0 \kappa} \quad (6)$$

Los huecos fotogenerados al llegar a la parte superior del fotoconductor, son depositados allí y neutralizan poco a poco la carga negativa presente sobre dicha superficie, consiguiendo finalmente que se forme la imagen eléctrica. Esta imagen se define con ayuda de la densidad superficial de carga negativa denotada por  $\sigma$ , que se encuentra sobre el tambor.

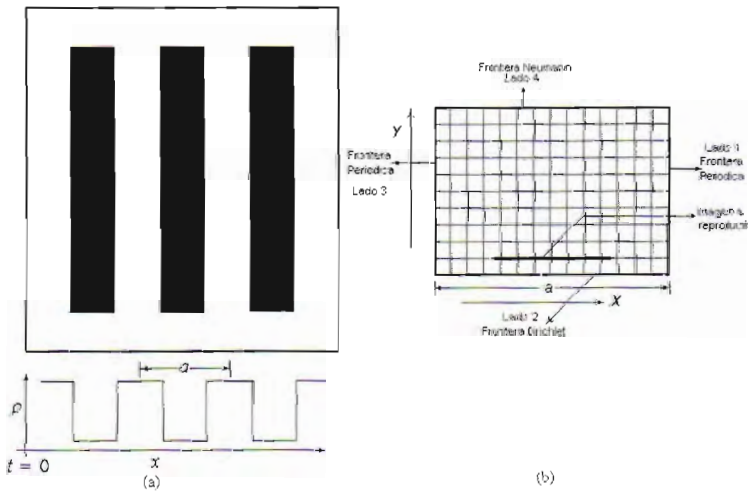
El objetivo en este trabajo es determinar cómo cambia  $\sigma$  a medida que transcurre el tiempo y ver el efecto en la formación de la imagen eléctrica. La solución de la ecuación de Poisson (6), queda totalmente determinada por las condiciones de frontera que tiene el potencial en los límites del material. Por un lado se presenta una discontinuidad de  $V$  en la superficie, como consecuencia de  $\sigma$ . Así el potencial en esta frontera debe satisfacer:

$$\kappa \left. \frac{\partial V(x, y, t)}{\partial y} \right|_{y=h-0}^{y=h+0} = \frac{\sigma(x, t)}{\epsilon_0 \kappa} \tag{7}$$

Además, a medida que los huecos se desplazan, la densidad de carga superficial  $\sigma$  cambia debido a la variación del potencial  $V$  en el tiempo según:

$$\frac{\partial \sigma(x, t)}{\partial t} = \mu_0 \rho(x, y = h, t) \frac{\partial V(x, y = h, t)}{\partial y} \tag{8}$$

La imagen a reproducir es como la mostrada en la figura 2a. Esta producirá una densidad inicial de huecos  $\rho_0$  con periodo  $a$  como se indica en la parte inferior.



**Figura 2.** Estrategia para modelar la reproducción de una imagen.

La estrategia seguida en la solución de este sistema, fue la siguiente: se divide la región a estudiar, en este caso el documento de periodo  $a$ , en una malla rectangular bidimensional y uniforme, como la mostrada en la figura 2b, sobre la cual se plantean las siguientes condiciones:

- 1 En la capa generadora (lado 2) del fotoconductor el potencial es  $V = 0$ .
2. En la superficie del fotoconductor (lado 4), el potencial está sujeto a la condición de frontera dada en la ecuación (7).
3. Al lado derecho y al lado izquierdo de la malla (lados 1 y 3), las condiciones de frontera son periódicas para tener en cuenta el carácter periódico de la imagen de la figura 2a.

Se tiene así un problema con tres tipos de condiciones de frontera. Situaciones como éstas son consideradas, como problemas de valores a la frontera mixtos y su solución suele ser mucho más difícil analíticamente, que los problemas que sólo tienen valores en la frontera del tipo *Dirichlet* o del tipo *Neumann* únicamente, de ahí la necesidad de solucionar este tipo de ecuaciones diferenciales parciales de manera computacional.

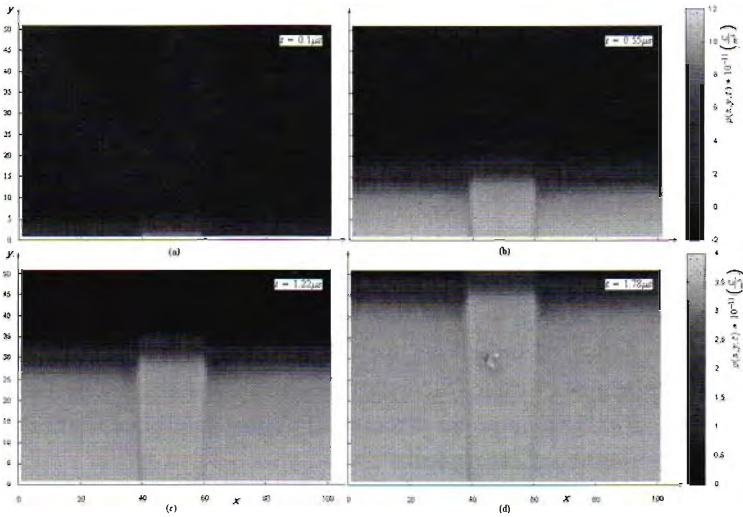
#### 4. Resultados y discusión

En la figura 3, se muestra el desplazamiento del flujo de huecos atravesando la capa de transporte, para tres instantes de tiempo dados. El eje  $y$  discretizado en 50 pasos, corresponde al espesor del material fotoconductor, y el eje  $x$  discretizado en 100 pasos, representa el trazo de periodo  $a$  que se está reproduciendo. La barra de colores que aparece al lado derecho de cada gráfica, representa las variaciones de la densidad instantánea de huecos  $\rho$ , asociada a las diferentes tonalidades.

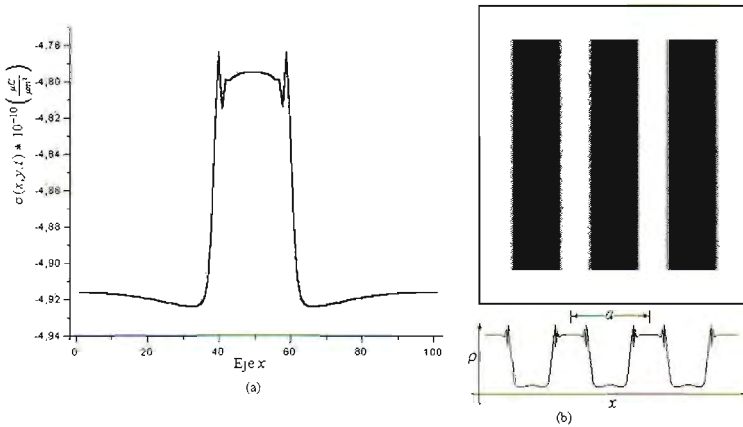
Puede observarse la deformación progresiva de la imagen eléctrica, consecuencia del viaje no perpendicular del flujo de huecos, lo cual se refleja en un ensanchamiento o cambio dimensional de la imagen  $\rho_0$ , formada en la capa generadora.

En la figura 4a se aprecian los picos laterales, que corresponden a una intensificación de borde como lo expresa *Friedman* y además se tienen huecos, en donde no debieran presentarse, lo que genera un desvanecimiento de la imagen en sus zonas periféricas. Estas imperfecciones están acordes con los resultados observados en fotocopiadoras convencionales, lo cual refleja el acierto en el modelo físico adoptado y su correspondiente modelación matemática. Finalmente, la imagen eléctrica  $\sigma$  que se forma en la superficie del rodillo fotoconductor, es la mostrada en la figura 4b para el tiempo dado. Esta figura manifiesta la evidente deformación de la imagen.

Es de esperar que la densidad de huecos  $\rho_0$ , se conserve durante todo el proceso de transporte y que llegue a  $y = h$ , una forma similar a la de la figura en mención. Sin embargo, por factores como:



**Figura 3.** Desplazamiento del flujo de huecos atravesando la capa de transporte.



**Figura 4.** Formación de la imagen en la superficie del rodillo fotoconductor

- a) Las interacciones electrostáticas.
- b) El proceso de fotogeneración de cargas, en principio no responde con precisión a la imagen proyectada sobre el rodillo fotoconductor.
- c) La eficiencia cuántica, considerada como el número de pares electrón-hueco que se producen por cada fotón absorbido.

- d) La existencia de pérdidas por recombinación de cargas en las capas base y generadora, en la producción del par electrón-hueco.
- e) La inyección de cargas de la capa generadora a la capa de transporte.
- f) El tiempo de tránsito empleado por los huecos en atravesar la capa de transporte.

Podemos decir finalmente que la imagen se deforma. En la figura 2a, vemos cómo el documento que es un conjunto periódico de manchas oscuras, y que da origen a una densidad inicial de huecos  $\rho_0$  como se indica en su parte inferior, se convierte por el complejo sistema, en una imagen como la ilustrada en la figura 4b, donde se aprecian desvanecimientos que hacen que la imagen eléctrica no sea idéntica a la original.

A partir de los resultados de este trabajo se abre la perspectiva de estudiar la física de los estados amorfos, combinaciones de materiales, espesores y tiempo de fotocopiado con el fin de reducir estas irregularidades que son inherentes al proceso y que se reflejan en los resultados de la modelación.

## Referencias

- [1] M. J. Stanich *Print-quality Enhancement in electrophotographic Printer* by IBM (1997)
- [2] Damodar M. Pai and B. E. Springett *Rev. Mod. Phys.* **65**(1) (1993)
- [3] L. B. Shein *Electrophotography and Development Physics* Springer-Verlag, Heidelberg (1988)
- [4] A.V Patsis <http://www.obd.com/oki otr/html nf/otr-161.html>
- [5] William H. Press *Numerical Recipes in Fortran 90* (1998)