

SISTEMA DE SUPERVISIÓN DE TEMPERATURA DE LA TURBINA DE GAS DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE CICLO COMBINADO

Agustín Espíndola Vásquez Guadalupe Madrigal Espinosa
Instituto de Investigaciones Eléctricas - División de Sistemas de Control.
Av. Reforma # 113, Col. Palmira, C.P. 62490. Cuernavaca, Morelos. México.
E-mail: aev@iie.org.mx. Tel. (777)362-38-11, Fax:(777)362-38-13.

Resumen

En este artículo se presenta la realización del sistema de supervisión de temperatura en una Unidad Turbogas (UTG), cuya finalidad es mantener la temperatura de los álabes de la turbina dentro de los límites establecidos, conservando un desempeño satisfactorio tanto desde el punto de vista operativo como de seguridad. El supervisor de temperatura se diseñó con base en la teoría de la lógica difusa y su desempeño se evaluó empleando un modelo matemático no-lineal que emula el comportamiento de una Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado (CTCC).

Los resultados obtenidos en las pruebas de simulación indican que el sistema de supervisión difuso de temperatura presenta un mejor desempeño cuando se le compara con el esquema de supervisión convencional. El sistema de supervisión difuso está integrado por tres módulos principales: Supervisión de retrocesos por temperatura durante la etapa de arranque de la UTG; Supervisión de retrocesos por temperatura durante la etapa de generación de potencia de la UTG, y Control por temperatura en la etapa de generación de potencia eléctrica de la UTG.

1. Introducción

En las plantas de proceso, cuya operación es compleja y su comportamiento dinámico es no lineal, las estrategias de control de lazo simple no proporcionan el desempeño deseado cuando se aplican en lazos de control que regulan variables críticas. Ante esta situación, los sistemas de control convencional cascadas, pre-retroalimentados o aquellos que, con base en condiciones lógicas, permiten la selección de una u otra señal de control, resultan ser la solución. Estos sistemas están conformados en una estructura de dos niveles de jerarquía; una de control directo y otra de control supervisorio.

La lógica difusa ha encontrado una amplia aceptación cuando se emplea para manejar funciones de control de alto nivel que caen fuera del dominio de los métodos convencionales de control. Uno de estos casos es la aplicación de la lógica difusa al control supervisorio, [1].

Un esquema de control supervisorio con una arquitectura de dos niveles puede estar integrado por un sistema difuso, en el segundo nivel, supervisa o modifica la operación de un controlador PID convencional, en el primer nivel de la jerarquía. [7]. El control supervisorio difuso utiliza el conocimiento de los expertos, lo introduce en un conjunto de reglas y crea un controlador de alto nivel que determina de manera automática la referencia del controlador PID de bajo nivel.

En las turbinas de gas de una Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado (CTCC) una de las variables críticas, tanto desde el punto de vista operativo como desde el punto de vista de seguridad, es la temperatura de los álabes de la turbina. El mejor desempeño de la Unidad Turbogas (UTG) desde el punto de vista de generación eléctrica se obtiene cuando es posible lograr la mayor eficiencia térmica, manteniendo la temperatura de los álabes en el límite impuesto por el fabricante. Este límite se establece para evitar que los esfuerzos térmicos considerables en las partes internas de la turbina decrementen su vida útil.

Para mantener la temperatura de álabes dentro del límite establecido, el sistema de control de la turbina de gas cuenta con un sistema de supervisión de temperatura de álabes que modifica la referencia de los controladores PI de velocidad o potencia eléctrica generada que regulan la válvula de flujo de combustible a la cámara de combustión de la UTG. Este sistema de supervisión, que está basado en condiciones lógicas para generar su salida, es uno de los más importantes de la UTG, tanto desde el punto de vista operativo, ya que permite obtener un mejor desempeño de la turbina, como desde el punto de vista

de seguridad, ya que garantiza la integridad de las partes internas de la misma.

En este artículo se presenta un sistema de control supervisorio diseñado con base en la teoría de la lógica difusa, aplicado al control de supervisión de la temperatura de álabes de una Unidad Turbogas (UTG). Se muestran los resultados de validación del desempeño del supervisor de temperatura, obtenidos ante diferentes escenarios de pruebas, cuando se implementó este esquema de control en un modelo matemático no lineal que simula una CTCC [2], [3].

2. Unidad Turbogas (UTG)

Una UTG está integrada por cuatro elementos principales: la turbina de gas, el compresor, la cámara de combustión y el generador eléctrico. Figura 1.

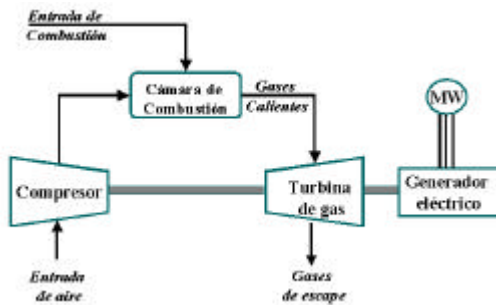


Figura 1.- Diagrama esquemático de una Unidad Turbogás (UTG).

En una UTG tres son las variables críticas que se deben regular: la velocidad de la turbina de gas, la potencia eléctrica generada y la temperatura de los álabes de la turbina (temperatura en la entrada de la turbina).

Cuando ocurren cambios repentinos en la temperatura de entrada a la turbina durante los arranques o las operaciones transitorias de la UTG, en los álabes de la turbina ocurren fatigas térmicas considerables que pueden generar grietas en los materiales de los álabes. Esto, debido a que la temperatura en la superficie de los álabes resulta diferente de la temperatura en el centro de ellos [5]. Los materiales disponibles para la construcción de álabes imponen un límite a la temperatura máxima de entrada en las turbinas de gas. El someter los álabes a temperaturas extremas por encima de estos límites, pueda dar lugar a fatigas térmicas severas, erosión y corrosión en los materiales de los álabes.

El esquema convencional del sistema de supervisión de temperatura de álabes empleado en el tipo de UTG

consideradas para el desarrollo de este estudio, está basado en una estructura que combina diferentes estados lógicos y en función de ellos modifica la referencia de los controladores PI convencionales de velocidad o de potencia generada. La referencia del supervisor de temperatura de álabes se genera con base en una función de relación de la presión de descarga del compresor [6].

El propósito primario de seguridad del sistema de supervisión de temperatura es mantener la temperatura de álabes de la turbina por debajo de esta referencia, en todo el rango de operación de UTG (arranque y generación de potencia). Cuando la temperatura de álabes sobrepasa su referencia se genera una condición llamada Retroceso. Ante esta condición, el sistema supervisor de temperatura modifica la referencia de los controladores PI de velocidad o de potencia eléctrica generada, con el propósito de disminuir el flujo de combustible a la cámara de combustión y con ello lograr que la temperatura de álabes retroceda por debajo de su referencia. Desde el punto de vista operativo, en el sistema supervisor de temperatura es posible seleccionar el modo de control por temperatura. En este modo de control se busca mantener la temperatura de los álabes en su referencia a fin de obtener la mayor generación de energía eléctrica (Carga Base) de la UTG.

3. Supervisor Difuso de Temperatura

El sistema de supervisión difuso está integrado por tres módulos principales: Supervisión de retrocesos por temperatura durante la etapa de arranque de la UTG (CLD1); Supervisión de retrocesos por temperatura durante la etapa de generación de potencia de la UTG (CLD2), y Control por Temperatura en la etapa de generación de potencia eléctrica de la UTG (CLD3), [4]. La figura 2 muestra un diagrama esquemático de la arquitectura del supervisor difuso de temperatura de la UTG, en donde se ubican los controladores lógicos difusos (CLD's).

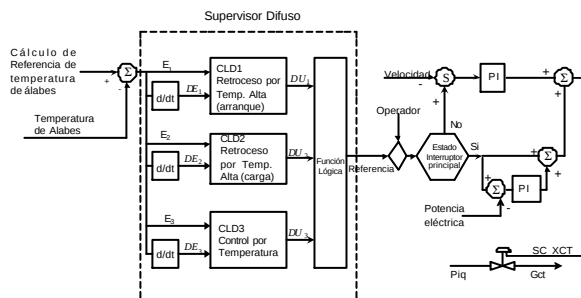


Figura 2. Esquema Supervisor Difuso de Temperatura de la UTG.

Para la implementación de los CLD's se empleó el "toolbox" de lógica difusa del programa *MatLab* 6.1. Los CLD's se diseñaron de tipo Mamdani con dos entradas: el error de la temperatura de álabes (E) y la derivada del error (DE) y una salida es la razón de cambio (DU) que modifica la referencia de los controladores PI de velocidad y de potencia generada.

De acuerdo con las tendencias de estas variables, obtenidas en la simulación del modelo de la CTCC con el control convencional, se definieron los rangos de las funciones de pertenencia para las entradas y la salida de cada CLD's.

Las funciones de pertenencia se seleccionaron de tipo triangular y trapezoidal. Para el error se seleccionaron cinco funciones de pertenencia y para la derivada del error tres funciones. El método de fusificación seleccionado fue el singleton.

Como salida de cada CLD se genera una razón de cambio (DU) para modificar la referencia de los controladores PI convencionales de velocidad o generación de potencia eléctrica. Para la salida se seleccionaron cinco funciones de pertenencia de tipo triangular y trapezoidal. Para la defusificación se seleccionó el método de promedio ponderado.

La base de reglas difusas se definió mediante el conjunto de las R^n reglas de la forma:
 R^n : IF E es A_n AND DE es B_n , THEN DU es C_n .

Donde E, DE representan las variables de entrada a los CLD's y DU la salida. A_n y B_n son valores difusos asignados a los valores numéricos de las variables E, DE, respectivamente y C_n son valores de los triángulos asignados a la variable DU. Las reglas difusas se obtuvieron con base en el análisis de la dinámica de temperatura de álabes, su derivada y de la razón de cambio para modificar la referencia de los controladores PID convencionales de velocidad o generación de potencia eléctrica, en los distintos estados de operación de la UTG.

El método de inferencia fue configurado de acuerdo a los siguientes criterios: [7].

- i). Inferencia basada en *activación individual* de reglas.
- ii). Implicación tipo *Mamdani* : Mínimo.
- iii). *Mínimo* para todas las operaciones con la *norma T* y *Máximo* para todas las operaciones con la *norma S*.

4. Presentación de Resultados

El sistema de supervisión de temperatura de álabes se implantó en el modelo matemático no lineal que representa el comportamiento dinámico de una CTCC [4]. El ambiente de simulación se desarrolló en la plataforma de programación del *MatLab* 6.1.

Con el fin de validar el desempeño del sistema de supervisión difuso de temperatura y compararlo contra el desempeño obtenido por el esquema convencional se seleccionaron como índices de desempeño la Integral de los errores absolutos (IAE) y la Integral de los errores cuadráticos (ISE).

$$IAE = \int_0^t |e| dt \quad ISE = \int_0^t e^2 dt$$

Las pruebas de simulación que se realizaron fueron las siguientes:

- Retroceso por alta temperatura en la etapa de arranque.
- Retroceso por alta temperatura en la etapa de generación de potencia eléctrica.
- Selección del Control por temperatura.

En las gráficas de tendencias obtenidas como resultado de las pruebas de simulación, las etiquetas mostradas, corresponden a las siguientes variables:

T_EMPTG1	=	Temperatura de álabes.
REF_TEMP	=	Referencia de temperatura de álabes.
OMEGA1	=	Velocidad de la turbina de gas.
PA_OMT1	=	Punto de ajuste de velocidad.
WET1	=	Potencia eléctrica generada.
REF_WET1	=	Referencia de potencia eléctrica.

Al final de cada etiqueta se adiciona una D si corresponde a resultados obtenidos con el supervisor de difuso o una C si los resultados están relacionadas con el supervisor convencional.

Prueba de retroceso por alta temperatura en la etapa de arranque.

Se observa en la figura 3 que al existir una condición de retroceso por alta temperatura, el supervisor difuso (CLD1) logra regresar la temperatura de álabes (T_EMPTG1_D) por debajo de su referencia (REF_TEMP_D) hasta un valor del orden de los 349.9 °K. El supervisor convencional también regresa la temperatura de álabes (T_EMPTG1_C) abajo de su

referencia (REF_TEMP_C), más sin embargo este retorno es casi alrededor de los 138.88 °K. El esfuerzo térmico al que se ven sometidos los álabes es mayor cuando opera el supervisor convencional.

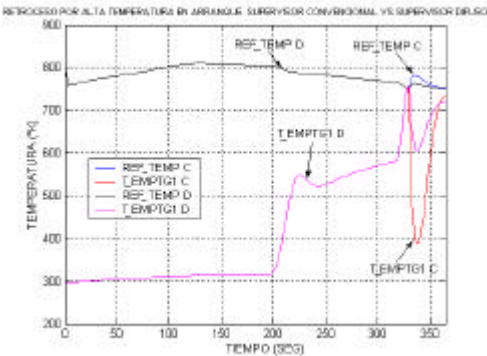


Figura 3. Gráfica de la respuesta en temperatura ante un retroceso por alta temperatura en arranque, para el supervisor convencional y el CLD1.

Puede observarse en la figura 4 que el CLD1 ante el mismo evento de retroceso por alta temperatura en arranque, le permite al controlador PI de velocidad convencional presentar un mejor desempeño, al lograr que la velocidad de la UTG (OMEGA1_D) siga más de cerca la referencia de velocidad (PA_OMT1_D).

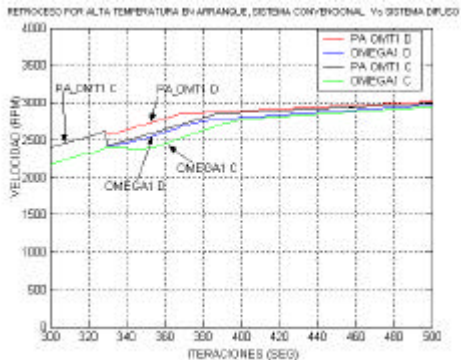


Figura 4. Gráfica de la respuesta en Velocidad ante un retroceso por alta temperatura en arranque, para el supervisor convencional y el CLD1.

Los índices de desempeño que se presentan en la tabla 1, fueron obtenidos en el periodo de tiempo (328 = t <= 365).

Tabla 1. Índices de desempeño para la respuesta de temperatura de álabes ante retrocesos, en la etapa de arranque de la UTG.

Índices de desempeño	Supervisor convencional		Supervisor difuso	
IAE	1.278e+004	1	5.383e+003	0.421
ISE	6.687e+006	1	1.057e+006	0.158

Para realizar una mejor comparación se normalizaron los índices presentados por ambos sistemas de supervisión de temperatura de álabes, considerando como la unidad al mayor índice obtenido por cualquiera de los dos sistemas. En este caso, los índices presentados por el supervisor convencional resultaron ser los mayores por los que se les asignó el valor de la unidad. Se observa que los índices presentados por el supervisor difuso son considerablemente menores.

Pruebas para el retroceso por alta temperatura en generación de potencia eléctrica.

En la figura 5 se observa que al presentarse una condición de retroceso por alta temperatura, el supervisor difuso (CLD2) logra regresar la temperatura de álabes (T_EMPTYG1_D) por debajo de su referencia (REF_TEMP_D) con una mayor rapidez, presentando poco sobrepaso. Además, el CLD2 permite que la temperatura de álabes se mantenga ligeramente debajo de su referencia, no presentando nuevamente una condición de retroceso. El supervisor convencional también regresa la temperatura de álabes (T_EMPTYG1_C) abajo de su referencia (REF_TEMP_C). Sin embargo, lo realiza con una menor velocidad y presentando un mayor sobrepaso. Además, con el supervisor convencional se presenta nuevamente la condición de retroceso por alta temperatura.

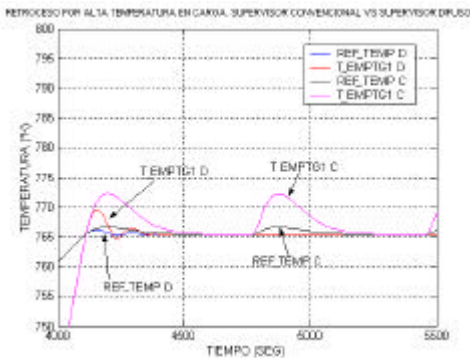


Figura 5. Gráfica de la respuesta en temperatura ante un retroceso por alta temperatura en potencia generada, para el supervisor convencional y el CLD2.

En la figura 6 se puede observar que el CLD2 ante un retroceso por alta temperatura en la etapa de generación de potencia, permite que el controlador PI convencional de potencia generada presente un mejor desempeño, al regresar en menor tiempo, y mantener la potencia generada (WET1_D) en su referencia (REF_WET_D)

Los índices de desempeño que se presentan en la tabla 2 y 3 fueron obtenidos en el periodo de tiempo ($t = 4112$ hasta $t \leq 4600$). En este caso, los índices presentados por el supervisor convencional resultaron ser los mayores por los que se les asignó el valor de la unidad. Se observa en la tabla 2 que los índices presentados por el CLD2, con relación a la temperatura de álabes, son considerablemente menores. Los índices presentados en la tabla 3, relacionados con la potencia generada son menores para el CLD, aún cuando están cerca de la unidad.

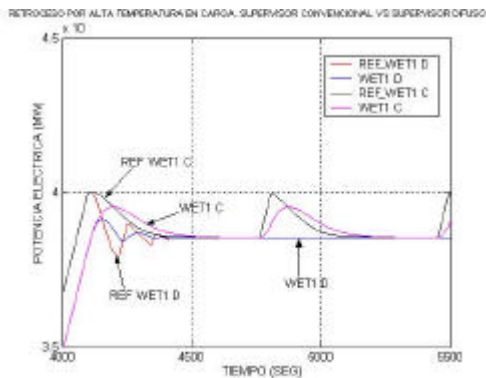


Figura 6. Gráfica de la potencia eléctrica ante un retroceso por alta temperatura en potencia generada, para el supervisor convencional y el CLD2.

Tabla 2. Índices de desempeño para la respuesta de temperatura de álabes ante retrocesos, en la etapa de generación de potencia de la UTG.

Índices de desempeño	Supervisor convencional		Supervisor difuso	
IAE	1.956e+003	1	540.0149	0.275
ISE	1.400e+004	1	2.106e+003	0.150

Tabla 3. Índices de desempeño para la respuesta de potencia ante retrocesos, en la etapa de generación de potencia de la UTG.

Índices de desempeño	Supervisor convencional		Supervisor difuso	
IAE	1.903e+010	1	1.888e+010	0.992
ISE	7.407e+017	1	7.294e+017	0.984

Pruebas para el control por temperatura.

En la figura 7 se muestra la tendencia de la temperatura de álabes de ambos supervisores, el convencional y el difuso (CLD3), cuando se selecciona el modo de Control por Temperatura. Se observa que el CLD3 presenta una mejor velocidad de respuesta en la temperatura de álabes (T_EMPTG1_D) al alcanzar más rápido su referencia (REF_TEMP_D).

Los índices de desempeño que se presentan en la tabla 4, fueron obtenidos en el periodo de tiempo ($t = 4100$ a $t \leq 4350$). Los índices presentados por el supervisor

convencional resultaron ser los mayores por los que se les dio el valor de la unidad. Se observa en la tabla 4 que los índices presentados por el CLD3 resultan ser menores.

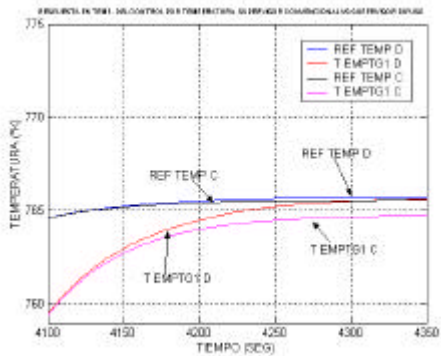


Figura 7. Gráficas de la respuesta en temperatura del control por temperatura para el sistema supervisor convencional y el CLD3.

Tabla 4. Índices de desempeño para la respuesta en temperatura en álabes, en Control por Temperatura.

Índices de desempeño	Supervisor convencional		Supervisor difuso	
IAE	767.9699	1	561.4445	0.631
ISE	3.352e+003	1	2.663e+003	0.794

La gráfica de la figura 8 presenta la tendencia de la temperatura de álabes para ambos supervisores cuando al estar presente el Control por Temperatura, existe una solicitud de carga pico para la UTG. La carga pico consiste en proporcionar un incremento de 19.4467 °K a la referencia de temperatura de álabes. Este incremento se refleja en una generación de potencia eléctrica por arriba de la Carga Base. Se observa que el CLD3 tiene una mejor velocidad de respuesta que el supervisor convencional, con un tiempo de asentamiento menor.

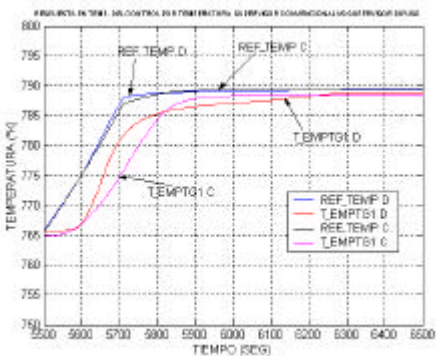


Figura 8. Gráfica de la respuesta de la temperatura de álabes, en modo de control por temperatura más solicitud carga pico, para el supervisor convencional y el CLD3.

Los índices de desempeño que se presentan en la tabla 5, fueron obtenidos en el periodo de tiempo ($t = 4500$ a $t \leq 6500$). Los índices presentados por el supervisor convencional resultaron ser los mayores por los que se les asignó el valor de la unidad. Se observa en la tabla 5 que los índices presentados por el CLD3, con relación a la temperatura de álabes, resultan ser menores.

Tabla 5. Índices de desempeño para la respuesta en temperatura en álabes, en Control por Temperatura con solicitud de carga pico.

Índices de desempeño	Supervisor convencional		Supervisor difuso	
IAE	6.895e+003	1	4.794e+003	0.695
ISE	6.901e+004	1	3.922e+004	0.568

5. Conclusiones

Las pruebas de validación se realizaron para mostrar el desempeño de ambos sistemas de supervisión: el difuso y el convencional. Las pruebas establecieron las condiciones operativas de la UTG en las cuales se tiene una actuación de estos sistemas de supervisión de temperatura.

Como se observó en los resultados de las pruebas de simulación, el desempeño del supervisor difuso de temperatura resultó ser superior al mostrado por el sistema supervisor convencional. Este desempeño fue evaluado cuantitativamente a través de los índices de desempeño de la Integral de los errores absolutos (IAE) y de la Integral de los errores cuadráticos (ISE).

Además, el supervisor difuso permitió que los controladores PI, de velocidad y de potencia generada, presentaran un mejor desempeño, que el obtenido cuando actuaban con el supervisor de temperatura convencional.

Así, los resultados de las pruebas demuestran que el sistema de supervisión difuso de temperatura logra disminuir el efecto de los retrocesos sobre la temperatura de álabes, con lo cual los esfuerzos térmicos relacionados con los retrocesos, a los cuales pueden verse sometidos los materiales de los álabes también disminuyen.

En conjunto, el sistema de control de la UTG que incluye las variables críticas de velocidad de la turbina de gas, potencia eléctrica generada y temperatura de los álabes de la turbina (temperatura en la entrada de la turbina), opera con un mejor desempeño cuando se emplea el Sistema Supervisor Difuso de Temperatura.

6. Referencias

- [1] Chiu, Stephen, "Using fuzzy logic in control applications: Beyond fuzzy PID control". IEEE Control Systems, Octubre 1998.
- [2] Delgadillo-V., M. A., "Modelo de una Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado". Informe Técnico. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Morelos. 1993.
- [3] Esquivel López, A., "Modelo dinámico simplificado de los sistemas principales de una planta termoeléctrica de ciclo combinado", Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM). Cuernavaca, Mor. 1990.
- [4] Espíndola Vásquez, A., "Sistema de control inteligente para regular la temperatura en la turbina de gas de una central termoeléctrica de ciclo combinado". Tesis de maestría. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet). Cuernavaca, Mor. 2004. A presentar.
- [5] Harman, Richard T. C. "Gas Turbine Engineering". ED. John Wiley & Sons. 1981. New York.
- [6] Uram Robert, Westinghouse Electric Corporation, "Computer control in a combined cycle power plant part II, the digital gas turbine system". IEEE PES Winter Meeting, New York, N.Y. January-February, 1977.
- [7] Wang Li-Xi, "A Course in Fuzzy Systems and Control", Ed. Prentice Hall, 1997, NJ, USA.