

Modeling and Control of an Automated System in Surgical Microscopy Based on Petri Nets

L. Ortiz, *Member, IEEE* and A. Aguila, *Member, IEEE*

Abstract— This scientific study makes reference to the modeling, control, and failure diagnosis based on Petri-Net based machine (PN) system. The described system incorporates an automated ophthalmic surgical microscope, which is utilized here. The approach for its design and function concerns control logic based applications, particularly, extended Hierarchical Petri Nets GHENe Sys and language programming for the coordination of timed continuous activities and the use of CCS compiler. Due to the fact that the control system is based on discrete events, a formal PN system model was adopted. The aim to verify the feasibility of the functional properties and structure of the model is proposed in order to achieve greater efficiency in the control design as well as considering a failure-tolerant control system.

Keywords— Petri Net, Control, Failure Diagnosis, Biomedical, Ophthalmic Surgical Microscope.

I. INTRODUCCIÓN

EL PROYECTO propuesto, expone el potencial de las Redes de Petri (PN) en el modelado, la simulación y el análisis de un sistema real. Este microscopio está compuesto por un sistema de iluminación y tres motores controlados en paralelo, por lo que se desarrolló un estudio que predice la estrategia de alimentación de las lámparas y motores, evaluando las siguientes etapas para la realización del modelado mediante PN. [1]–[22]

Analizar previamente el chequeo de estado real del sistema en general.

Definir las estrategias de alimentación a los sistemas a ejecutar.

Modelar el sistema real con PN para las diferentes estrategias.

II. MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA

A. Descripción del sistema.

El Microscopio Quirúrgico está compuesto, como se planteó con anterioridad, por un sistema de iluminación controlado de dos lámparas, y tres motores controlados encargados de los diferentes movimientos quirúrgicos.

Subsistemas principales. [11]

1. Sistema óptico central.

2. Sistema de acercamiento de la imagen (ZOOM).

3. Sistema de posicionamiento fino (x, y)

4. Sistema de iluminación.

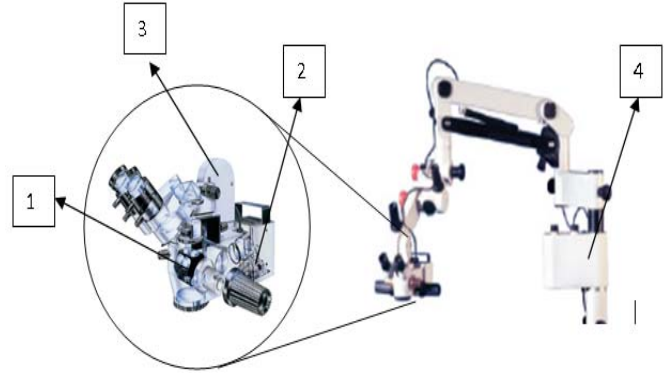


Figura 1. Subsistemas del Microscopio. [11].

En principio, el microscopio está constituido por la combinación de dos sistemas ópticos, el objetivo y el ocular, separados por una distancia considerable, los cuales son ajustables a través de movimiento para el aumento de la imagen (“ZOOM”) y los movimientos en los ejes X y Y. Los motores realizan su función mediante el mecanismo de rotación de la lente óptica gradual.

B. Estrategias de alimentación definidas para los sistemas.

TABLA I. VARIABLES DE ENTRADA DEL SISTEMA.

Entradas	Etiqueta	Port PIC
BotónEncendido	STA	A0-A3; E
Botón x Adelante (mov)	MXAD	A0-A3; E
Botón x Atrás (mov)	MXAT	A0-A3; E
Botón y Izquierda (mov)	MYI	A0-A3; E
Botón y Derecha (mov)	MYD	A0-A3; E
Botón Z Izquierda (mov)	MZI	A0-A3; E
Botón Z Derecha (mov)	MZD	A0-A3; E
BotónCambiar de Lamp.	CL	A0-A3; E
Encoder motor “x”	SX	C0
Encoder motor “y”	SY	C1
Encoder motor “Z”	SZ	C2
Sensor Ilumin. “1”	ZL1	C3
Sensor Ilumin. “2”	ZL2	C4

TABLA II. SISTEMA DE FALLO.

Entradas	Etiqueta	Port PIC
Botón quitar la indicación del fallo	RST F	A0-A3; E
Botón realizar chequeo de fallo manual	TM	A0-A3; E
Botón test "L1" o "L2"	TL12	A0-A3; E
Botón test "X", "Y"	TXY	A0-A3; E
Botón test "Z"	TZ	A0-A3; E
Botón test conexión pedal	TP	A0-A3; E

TABLA III. VARIABLES DE SALIDAS DEL SISTEMA

Salidas	Etiqueta	Port PIC
Lamp. "1" y "2"	L1	D7
Encender-apagar lámpara	LON-OFF	D6
Mov. Motor "X" Adelante	OMXAD	B0
Mov. Motor "X" Atrás	OMXAT	B1
Mov. Motor "Y" Izquierda	OMYI	B2
Mov. Motor "Y" Derecha	OMYD	B3
Mov. Motor "Z" Izquierda	OMZI	B4
Mov. Motor "Z" Derecha	OMZD	B5
LED error "L1"	LD1	D0
LED error "L2"	LD2	D1
LED error "X"	LDX	D2
LED error "Y"	LDY	D3
LED error "Z"	LDZ	D4
LED error no conexión pedal	LDP	D5

C. Modelado de las diferentes estrategias del sistema con PN.

Modelar un sistema real consiste en reflejar, de la manera más exacta y más fiel posible, el funcionamiento de un proceso real. Para conseguir este objetivo, se establecen dos campos de acción diferentes:[16]

El funcionamiento y lógica del modelo.
El aspecto físico del modelo.

El funcionamiento y la lógica del modelo se desarrollaron de la manera más exacta posible al del proceso real, esta condición es indispensable para poder confiar en las salidas del modelo y que estas puedan considerarse una imagen fiel del sistema real.

La similitud del aspecto físico del modelo con el aspecto del sistema real no es una condición necesaria para obtener un modelo válido, pero es cierto que en el momento de modificar el modelo o presentar el trabajo realizado, un buen parecido con la realidad ayudará a la validación y comprensión del modelo.

D. Modelación del subsistema por software.

Se muestra en la Fig. 2 la Red de Petri que corresponde al subsistema de movimiento para los motores de ajustes del sistema de aumento automático de la imagen ("ZOOM"), y los movimientos "X", y "Y". La Red planteada permite al análisis

para las tres estrategias, y permite hacer un estudio completo del funcionamiento lógico.

El sistema cuenta con tres etapas principales: motor parado, motor moviéndose a la derecha y motor moviéndose a la izquierda, habilitados por la marca de Funcionamiento Normal y el botón del pedal asignado a dicha función. En caso de ocurrir un fallo de funcionamiento de una de las etapas, este sería señalizado inmediatamente y corregido el problema por un medio alternativo.

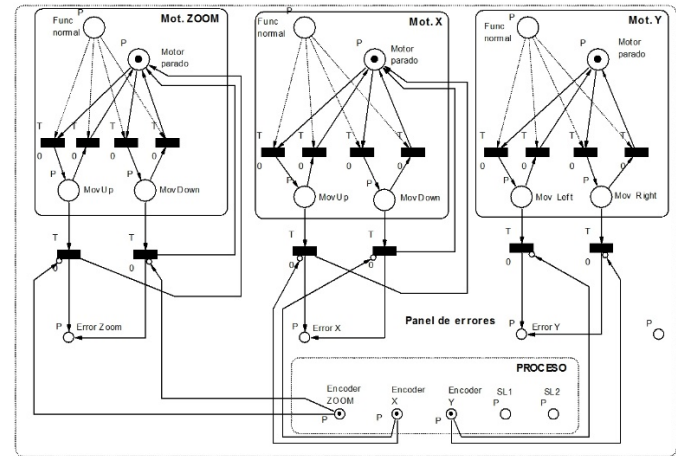


Figura 2. Modelo en PN de los subsistemas de ajuste de imagen.

En la Fig. 3 se muestra la Red de Petri correspondiente al subsistema de iluminación, la cual permite interpretar el funcionamiento alternado de las lámparas y la acción del sistema de falla.

Este sistema cuenta con dos etapas principales, lámpara apagada y lámpara encendida. Dichas etapas son activadas por la marca de funcionamiento normal, el botón de cambio de lámpara, o por la señal de error de los sensores ópticos de iluminación de las lámparas. En caso de que ocurra un fallo de funcionamiento este sería señalizado inmediatamente.

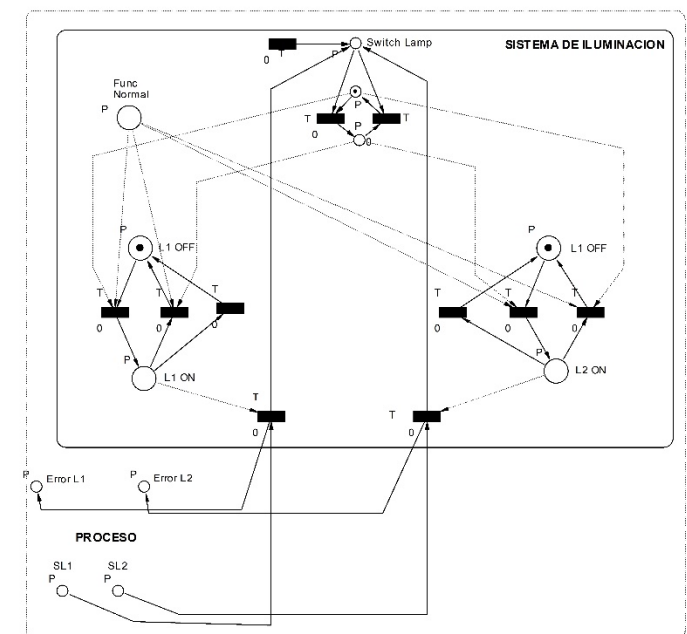


Figura 3. Modelo en PN del Subsistema de iluminación.

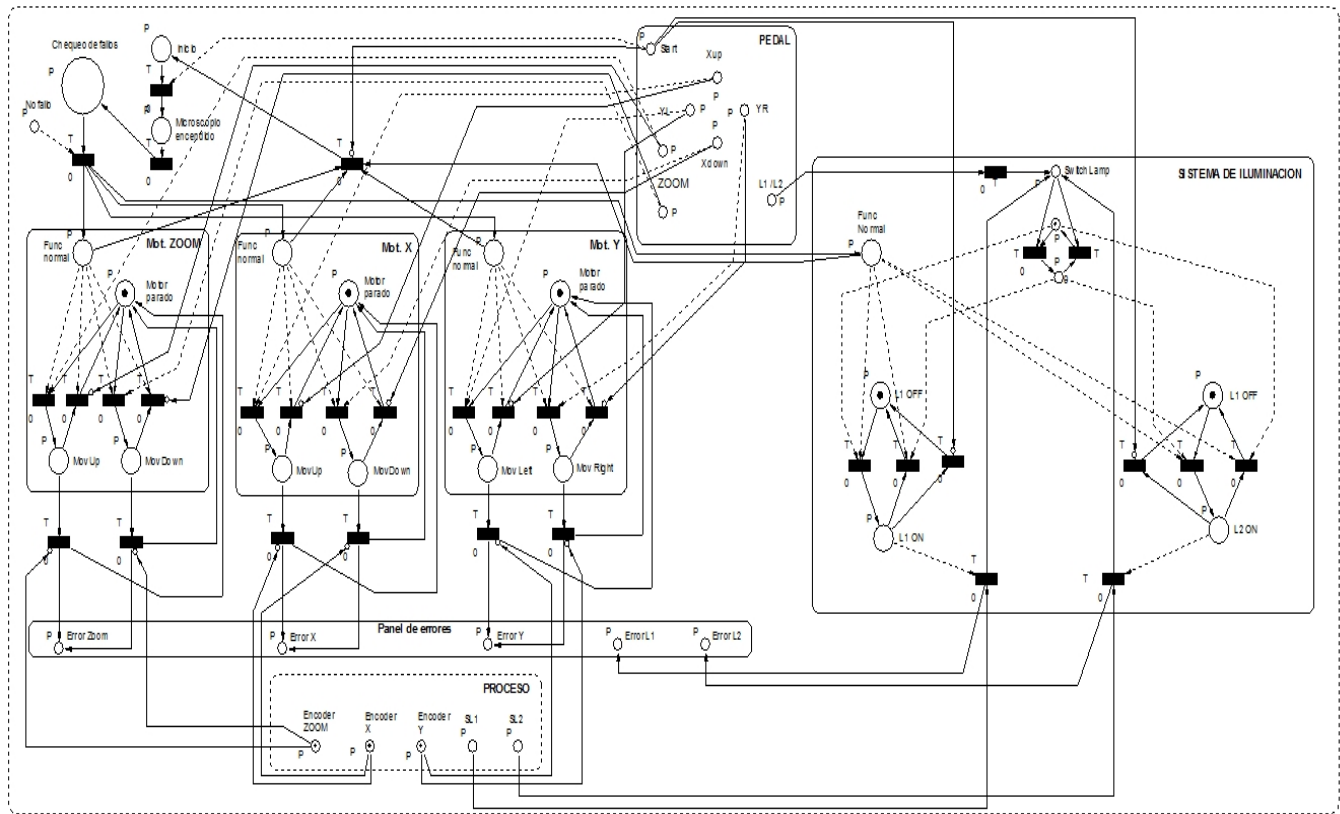


Figura 4. Modelo completo en PN de los subsistemas.

III. MODELADO Y SIMULACIÓN DEL CONTROL TOLERANTE A FALLOS [15][2][21]

En la Fig. 5 se muestra la Red de Petri que corresponde al subsistema detección y diagnóstico para el fallo de conexión del pedal de control. Esta red nos permite realizar el chequeo mediante un testeo inicial, el cual le permite al usuario determinar que el pedal de control se encuentra conectado correctamente.

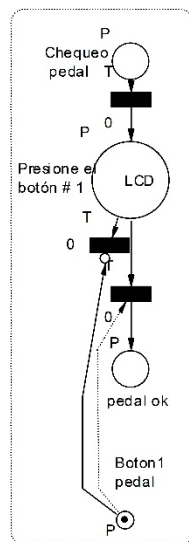


Figura 5. Modelo en PN del Subsistema de diagnóstico de fallo para el pedal de control.

El sistema de comprobación del pedal es realizado al inicio

de forma automática o manual, ordenado por el sistema o por el especialista. Posteriormente, se muestra en el panel (Display) el mensaje a visualizar, para el momento en que se necesite que se apriete la tecla solicitada durante el test. Si es detectado el pulsador del pedal, pasa al estado “sistema en buen estado”, de no ocurrir, se mostraría el led de “error”.

En la Fig. 6a, se expone el modelo de la Red de Petri que corresponde al sistema detección de fallo en lámparas, esta red realiza el chequeo para el test inicial, el cual permite al usuario el estado de ambas lámparas de iluminación.

Una vez que es activado por el sistema o de forma manual, el token de chequeo de iluminación pasa a encender ambas lámparas, chequeándolas paralelamente y mostrando su estado. En caso que se encuentre problemas, se activa el LED asignado a la lámpara del problema, y pasaría el trabajo a la lámpara en buen estado.

Las Figs. 6b y 7, representan la Red de Petri que corresponde al sistema de detección de fallo del motor “ZOOM”, del “X” y del “Y”. Dicha red realiza el test que le brinda al usuario la información del estado del sistema de motores que componen el sistema (“ZOOM”, “X”, “Y”)

Una vez que es activada la red de manera automática por el sistema o de manera manual, el token de chequeo da la orden para el movimiento de los motores en un sentido, y siendo estos chequeados de manera paralela, y posteriormente mostrando el estado del sistema. En caso de existir problemas en cualquiera de los sistemas, se señala el led indicado, asignado para el error correspondiente.

conforma el código de lectura para identificación de la tecla	LecA
conforma el código de identificación de la Lamp	SL
bandera de estado del pedal, 1-Ok, 0-defectuoso	P
bandera de estado de la lámpara L1, 1-Ok, 0-defectuoso	L1
bandera de estado de la lámpara L2, 1-Ok, 0-defectuoso	L2
bandera de estado del motor de ZOOM, 1-Ok, 0-defectuoso	Z
bandera de estado del motor de mov X, 1-Ok, 0-defectuoso	X
bandera de estado del motor de mov Y, 1-Ok, 0-defectuoso	Y
Bandera que indica que el sistema completo está en perfecto estado	Scom
variable para la identificación del número del botón	pOK
variable de ciclo	Boton
	I

B. Algunos ejemplos de la programación del control tolerante a fallos.

ALGORITMO PARA PROGRAMACIÓN DE DETECCIÓN DE PEDAL

'Realizar la atención del teclado cuando se active una tecla (0xFF)'

Leer el PIN_A0 y **asignarle** a A_0 ;
Leer el PIN_A1 y **asignarle** a A_1 ;
Leer el PIN_A2 y **asignarle** a A_2 ;
Leer el PIN_A3 y **asignarle** a A_3 ;
 lecA=A_3*8+A_2*4+A_1*2+A_0*1;
si lecA es igual a 0){
establecer salida PIN_D5 a nivel alto; }

Sino si P es igual a 1;

delay_us(1500);

'Realizar la atención del teclado cuando se active una tecla (0xFF)'

Leer el PIN_A0 y **asignarle** a A_0 ;
Leer el PIN_A1 y **asignarle** a A_1 ;
Leer el PIN_A2 y **asignarle** a A_2 ;
Leer el PIN_A3 y **asignarle** a A_3 ;
 lecA=A_3*8+A_2*4+A_1*2+A_0*1;
si lecA es igual a 0){

ALGORITMO PARA PROGRAMACIÓN DE CHEQUEO DE ILUMINACIÓN

'L1'

'Encendemos la lámpara 1'

Establecer salida PIN_D6 a nivel alto;

Establecer salida PIN_D7 a nivel alto;

Leer PIN_C3 y **asignarle** a SL1;

Leer PIN_C4 y **asignarle** a SL2

SL=SL2*2+SL1*1;

Si SL es igual 0x02{

Establecer salida PIN_D0 a nivel alto;
 }
Sino L1 igual 1;
 //'L2"
 //Encendemos la lámpara 2
Establecer salida PIN_D6 a nivel alto;
Establecer salida PIN_D7 a nivel alto;
Leer el PIN_C2 y **asignarle** a SL1;
Leer el PIN_C4 y **asignarle** a SL2;
 SL=SL2*2+SL1*1;

ALGORITMO PARA PROGRAMACIÓN DE CHEQUEO DEL MOTOR DEL ZOOM

'Motor "ZOOM"'

Establecer salida PIN_B4 a nivel alto;

Establecer salida PIN_B5 a nivel bajo;

Si (Entrada (PIN_C2) es igual a 0);

{

Establecer salida PIN_D4 a nivel alto

}

Establecer salida PIN_B5 a nivel alto;

Establecer salida PIN_B4 a nivel bajo;

Si (Entrada (PIN_C2) igual a 0);

{

Establecer salida PIN_D4 a nivel alto;

}

Sino si Z igual a 1;

Establecer salida PIN_B5 a nivel bajo;

Establecer salida PIN_B4 a nivel bajo;

ALGORITMO PARA PROGRAMACIÓN DE CHEQUEO DE LOS MOTORES "XY"

'Motor "X"'

Establecer salida PIN_B0 a nivel alto; 'mover motor adelante'

Establecer salida PIN_B1 a nivel bajo;

Si (entrada (PIN_C0) igual a 0); 'lectura del encoder'

{

Establecer salida PIN_D2 a nivel alto; 'led de error de "X"'

}

Establecer salida PIN_B1 a nivel alto; 'mover motor atrás'

Establecer salida PIN_B0 a nivel bajo;

Sino si (entrada (PIN_C0) igual a 0); 'lectura del encoder'

{

Establecer salida PIN_D2 a nivel alto; 'led de error de "X"'

}

Sino X igual a 1; 'motor "X" ok'

Establecer salida PIN_B1 a bajo; 'apagar mov motor'

Establecer salida PIN_B0 a nivel bajo;

V. CONCLUSIONES

A lo largo de la ponencia, se puede demostrar de manera fácil y sencilla el modelado y la automatización de un microscopio quirúrgico oftalmológico, aplicando la lógica de control basada en los modelos de Redes de Petri Jerárquicas extendidas, utilizada en la coordinación de actividades en tiempo discreto y llevadas a su trabajo continuo en su programación en el PIC, herramientas que demostraron gran potencialidad en la rama del diseño de control, simulación, implementación y veracidad.

REFERENCIAS

- [1] A. Aybar and A. Iftar, "Deadlock Avoidance Controller Design for Timed Petri Nets Using Stretching," *IEEE Syst. J.*, vol. 2, no. 2, pp. 178–188, Jun. 2008.
- [2] M. Dumitrescu, T. Munteanu, D. Florica, and A. P. Ulmeanu, "A complex fault-tolerant power system simulation," 2005, pp. 267–272.
- [3] K. Feldmann, A. W. Colombo, C. Schnur, and T. Stockel, "Specification, design, and implementation of logic controllers based on colored Petri net models and the standard IEC 1131. II. Design and implementation," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 7, no. 6, pp. 666–674, Nov. 1999.
- [4] K. Feldmann, A. W. Colombo, C. Schnur, and T. Stockel, "Specification, design, and implementation of logic controllers based on colored Petri net models and the standard IEC 1131. I. Specification and design," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 7, no. 6, pp. 657–665, Nov. 1999.
- [5] S. Ghroud and J. Favrel, "A development methodology for production systems with a new paradigm based on Petri nets and object orientation," 1997, pp. 381–386.
- [6] W. Han and M. A. Jafari, "Component and agent-based FMS modeling and controller synthesis," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 33, no. 2, pp. 193–206, May 2003.
- [7] K. Hirasawa, M. Ohbayashi, S. Sakai, and J. Hu, "Learning Petri network and its application to nonlinear system control," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part B Cybern.*, vol. 28, no. 6, pp. 781–789, Dec. 1998.
- [8] H.-J. Kim, J.-H. Lee, and T.-E. Lee, "Scheduling timed Petri nets with a time-feasible reachability tree," 2013, pp. 94–99.
- [9] Y. Kim, T. Kato, S. Okuma, and T. Narikiyo, "Traffic Network Control Based on Hybrid Dynamical System Modeling and Mixed Integer Nonlinear Programming With Convexity Analysis," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part A Syst. Humans*, vol. 38, no. 2, pp. 346–357, Mar. 2008.
- [10] P. Kulp and F. DiCesare, "Performance evaluation of colored Petri net models using simulation and moment generating functions," 1998, vol. 1, pp. 154–159 vol.1.
- [11] S. Leica, "Leica M651, Microscopios quirúrgicos manuales para las disciplinas microquirúrgicas," 2003.
- [12] P. Leitao and A. W. Colombo, "Petri net based Methodology for the Development of Collaborative Production Systems," 2006, pp. 819–826.
- [13] X. Li, W. Yu, and F. Lara-Rosano, "Dynamic knowledge inference and learning under adaptive fuzzy Petri net framework," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 30, no. 4, pp. 442–450, Nov. 2000.
- [14] Z. Li, Q. Chen, Z. Gao, and D. Nie, "Fault diagnosis of 3/2 connection," 2012, pp. 1–5.
- [15] K. L. Lo, H. S. Ng, and J. Trecat, "Power systems fault diagnosis using Petri nets," *Gener. Transm. Distrib. IEE Proceedings*, vol. 144, no. 3, pp. 231–236, May 1997.
- [16] T. Murata, "Petri nets: Properties, analysis and applications," *Proc. IEEE*, vol. 77, no. 4, pp. 541–580, Apr. 1989.
- [17] J. L. Peterson, *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall, 1981, p. 290.
- [18] L. Popova-Zeugmann, *Time and Petri Nets*, 2013 edition. Heidelberg: Springer, 2013, p. 209.
- [19] W. Reisig, *Understanding Petri Nets: Modeling Techniques, Analysis Methods, Case Studies*, 2013 edition. New York: Springer, 2013, p. 230.

- [20] Z. Tao, C. Qing, and G. Zhanjun, "Fault diagnosis of 3/2 Breaker Scheme in substation based on Petri net," 2011, pp. 348–352.
- [21] A. Yakovlev, L. Gomes, and L. Lavagno, Eds., *Hardware Design and Petri Nets*, 2000 editi. Boston, MA: Springer US, 2000, p. 332.
- [22] M. Zhou, "Modeling, analysis, simulation, scheduling, and control of semiconductor manufacturing systems: A Petri net approach," *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 11, no. 3, pp. 333–357, Aug. 1998.



Leony Ortiz (Y'1982). He received both B.S. and M.Sc. degrees in Automation Engineering from the Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Mella (ISPJAM) from Universidad de Oriente, Cuba. His major research interests include biomedical technologies and mathematical modeling applied to engineering, and is currently a member of the GIREI Group. He is part of the academic staff at Universidad Politécnica Salesiana - Ecuador - Quito.



Alexander Aguila (Y'1981-M'09) received the B.S. student of Electrical Engineering and M.Sc. degrees in Energetic Efficiency. He is currently working toward his Ph.D degree in Engineering with the Universidad Pontificia Bolivariana - Colombia-Medellín, and he is Member of the GIREI Research Group. His major research interests include fault diagnosis on electrical distribution system, smart grids, minimizing power losses, renewable energy systems and energetic efficiency. He is a professor of Universidad Politécnica Salesiana- Ecuador.