

COMPARACION DE UNA RED INDUSTRIAL CENTRALIZADA CON UNA RED INDUSTRIAL DISTRIBUIDA FIELDBUS

Guillermo Tejada Muñoz ^{1,2} y Moacyr Martucci Júnior ²

*1.-Profesor de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Facultad de Ingeniería Electrónica, Lima -Perú*

*2.-Laboratorio de Sistemas Abiertos del Departamento de Sistemas Digitales y
Computación de la Escuela Politécnica de la Universidad de Sao Paulo.*

Resumen : El presente trabajo es un análisis comparativo en términos de confiabilidad, disponibilidad, desempeño y costos entre una red industrial centralizada con una red industrial distribuida *Fieldbus*, en el nivel mas bajo de la jerarquía de la estructura de la automatización industrial (nivel de instrumentación). De esta forma también, se intenta establecer una metodología para el análisis de redes similares o más complejas.

Abstract : This work is a comparative analysis in terms of reliability, availability, performance and cost between a industrial net centralized and a industrial net distributed *Fieldbus* in the lowest level of the automation structure (the instrumentation level). In this way, this work is also trying to establish models and methodologies for analyzing similar architecture or more complex ones.

Palabras claves : Redes Industriales, *Fieldbus*, Automatización Industrial, *Profibus*, Markov, Modelo de Arbol de Éxito.

I. INTRODUCCION

Existe mucha información técnica proveniente de los fabricantes de los llamados instrumentos inteligentes (capacidad de procesamiento propio y transmisión digital) hablando sobre sus ventajas, sin embargo, existen muy pocos trabajos provenientes del área académica analizando esta tecnología. El presente trabajo intenta cubrir esta deficiencia haciendo un estudio de estos instrumentos digitales, que en los niveles más bajos de la jerarquía de la estructura de la automatización industrial esta reemplazando a los tradicionales analógicos que usan para su transmisión de datos el *standard* analógico de 4-20 mA.

Para lograr este objetivo, se hará un analices a través de herramientas matemáticas, cuyos resultados numéricos nos auxiliaran a extraer conclusiones sobre las ventajas y desventajas de esta nueva tecnología frente a la tradicional.

En este sentido, se comparará una red centralizada con otra distribuida, en términos de confiabilidad, disponibilidad, desempeño y costos. La red industrial centralizada controlara el proceso con instrumentos analógicos (figura 1), utilizando el tradicional *standard* de comunicación de datos de 4-20 mA, mientras que la distribuida utilizará instrumentos digitales (figura 2), llamados inteligentes, utilizando el protocolo de comunicación de datos *Fieldbus*.

Para la evaluación de la confiabilidad se utilizara el modelo de Arbol de Éxito, el cual esta basado en circuitos digitales combinaciones, mientras que para la disponibilidad se utilizara el Modelo de Markov, el cual esta basado en transiciones probabilísticas de estados; el desempeño será evaluado en función del número de instrumentos y de los tiempos de retardo producidos por: la adquisición de datos, el programa de control, la ejecución del protocolo de comunicación y el trafico de los datos a través del *bus* de comunicación.

Finalmente, se evaluara los costos de ambas redes para su comparación con los resultados de confiabilidad y desempeño.

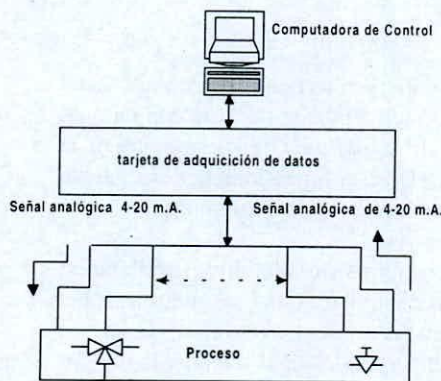


Figura 1 - Red industrial centralizada

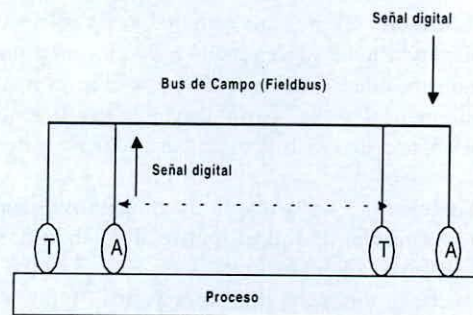


Figura 2 - Red industrial distribuida

II. CALCULO DE LA TASA DE FALLA Y REPARACION DE LAS PARTES DE LAS REDES

2.1 Red industrial centralizada

De la red mostrada en la figura 1 se estimo la tasa de falla de cada una de sus partes (equipos e instrumentos) a través de la ecuación:

$$\lambda_{\text{EQUIP}} = \sum_{i=1}^n (N\lambda_g\Pi_Q)_i \quad (1)$$

Donde,

- λ_{EQUIP} = Tasa de falla total del equipo
- N = Cantidad de componentes del tipo i
- λ_g = Tasa de falla genérica del componente de tipo i
- Π_Q = Factor de calidad de los componentes de tipo i
- n = Diferentes tipos de dispositivos en el equipo

Los resultados obtenidos son mostrados en la tabla I

Tabla 1 - Resumen de la tasa de falla de la red centralizada

	Componente/Dispositivo	λ_i falhx10 ⁻⁶ horas
1	Computadora	96.297
2	Tarjeta de adquisición de datos	42.390
3	Sensor y actuador	6.00

Por otro lado, en la tabla 2 se muestra los tiempos medios de reparación, así como también las tasas de reparación estimados para cada parte de esta red.

Tabla 2 - Tiempos medios y tasas de reparación estimados para las tarjetas/dispositivos de la red centralizada

	Componente/Dispositivo	MTTR _i (horas)	μ_{Ri} (reparación/hora)
1	Computadora	4	0.25
2	Tarjeta de adquisición	2	0.50
3	Sensor/actuador	1	1.00

Como la computadora y sus tarjetas de interfaces están en serie, la tasa de falla de la red industrial centralizada, la cual será simbolizada por λ_K , es calculada a través de la suma de sus Partes:

$$\lambda_K = \sum_1^n \lambda_i \quad (2)$$

Después obtener el valor de λ_K y con los datos de las tablas 1 y 2, es calculada la tasa de reparación de la red industrial centralizada, la cual será simbolizada por μ_k , a través de la siguiente ecuación:

$$\mu_k = [(1/\lambda_K) \sum_1^n \lambda_i (MTTR_i)]^{-1} \quad (3)$$

Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3 - Tasas de falla y reparación de la red industrial centralizada

Subsistema	Tasa de Falla Falhx10 ⁻⁶ hora		Tasa de Reparación reparoxhora ⁻¹	
	Símbolo	Valor	Símbolo	Valor
Computadora	λ_K	144.687	μ_K	0.308
Sensor	λ_S	6	μ_S	1
Actuador	λ_A	6	μ_A	1

En la figura 3, se muestra la red industrial centralizada, la misma que fue representada en la figura 1, pero incluyendo en ella los valores de tasa de falla y reparación de la tabla 3.

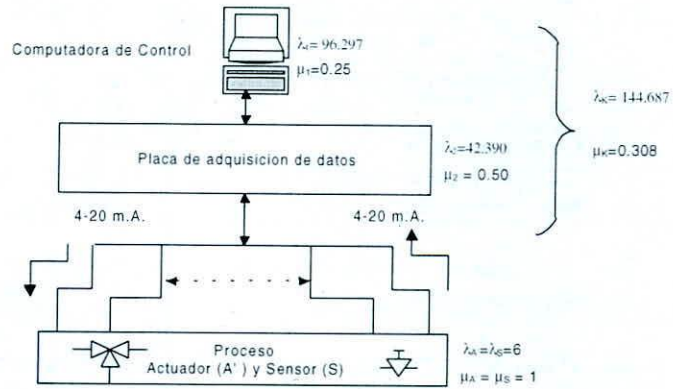


Figura 3 - Tasas de falla y reparación de la red industrial centralizada

2.2 Red industrial distribuida Fieldbus

A través de la ecuación 1, también se calculo la tasa de falla de las partes que constituyen la red industrial distribuida constituida por transmisores y actuadores inteligentes (ver figura 2), los datos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4 - Datos de tasa de falla del transmisor y actuador inteligente

Subsistema	Símbolo	Valor Falla x 10 ⁻⁶ horas
Transmisor	λ_T	44.7645
Actuador	λ_A	41.573

Por otra parte, la tabla 5 muestra el tiempo medio de reparación y tasa de reparación estimadas para las partes de esta red. En la estimación se llevo en cuenta el tamaño y complejidades de las tarjetas, así como también, sus capacidades de autodiagnóstico.

Tabla 5 - Tiempo medio y tasa de reparación de las tarjetas del transmisor y actuador inteligente.

Subsistema	MTTR Hora	Tasa de reparación Reparo x hora ⁻¹	
		Símbolo	Valor
Transmisor	1	μ_T	1
Actuador	1	μ_A	1

Finalmente en la figura 4, se muestra la red industrial distribuida incluyendo en ella los valores de tasa de falla y reparación de las tablas 4 y 5.

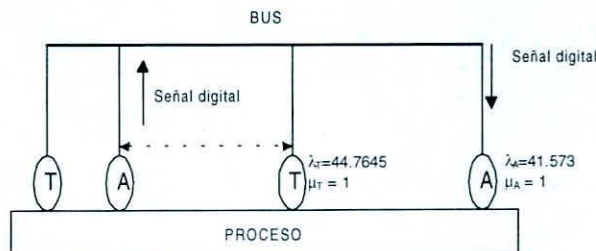


Figura 4 - Tasa de falla y reparación de la red industrial distribuida.

III. CONFIABILIDAD

La confiabilidad es definida como la probabilidad que un componente, dispositivo, equipo, o sistema ejecute sus funciones deseadas, bajo un conjunto de condiciones establecidas, en un intervalo específico de tiempo.

Para calcular este parámetro se uso el modelo del Arbol de Exito. En donde, con el objetivo de generalizar las redes, fueron adoptadas varias posibilidades de tolerancia de falla, tales como:

- falla la red, si falla cualquiera de sus dispositivos (peor caso);
- falla la red, si fallan dos sensores o dos actuadores;
- falla la red, si fallan tres sensores o tres actuadores;
- falla la red, si fallan cuatro sensores o cuatro actuadores.

Estas posibilidades se justifican pues en procesos automatizados complejos, aunque no exista redundancia, no necesariamente la falla de un actuador o sensor significaría la falla de la red. Así por ejemplo, no necesariamente el vuelo de una aeronave sería colocado en riesgo si las partes de instrumentos comprometidos con el control de las luces internas o el aire acondicionado tuvieran una falla durante su trayectoria. Lo mismo tendría valides para otros casos, como por ejemplo en automatización industrial, donde se puede tener el caso de un sistema de control de un proceso químico y del medio ambiente; en este caso la red podría ser definida operativa aunque fallen los sensores y actuadores controlando las partes del proceso del medio ambiente.

3.1 Confiabilidad de la Red industrial centralizada.

La figura 5 muestra el caso general, en donde la red centralizada formada por m sensores y m actuadores podría fallar si n de sus sensores o n de sus actuadores o el subsistema (formado por la computadora y su tarjeta de interface de adquisición de datos) presentaran falla, el peor caso se presenta cuando $n=1$, es decir cuando la red falla si lo hiciese cualquiera de sus partes.

Para modelar la red se utilizo las puertas n/m lo que significa que si n de m dispositivos conectados en su entrada fallan la salida de esas puertas será nula. La ecuación de confiabilidad en la salida de las puertas será:

$$R_s = [1 - (1 - R)^n]^{\binom{m}{n}} \quad (6)$$

donde,

$$\binom{m}{n} = \text{combinación de } n \text{ de } m \text{ dispositivos}$$

n = número de dispositivos que falla

m = número total de dispositivos

R_s = confiabilidad resultante.

R = confiabilidad de cada componente en la entrada de la puerta.

Utilizando esta formula, la confiabilidad para la red de la figura 5 será:

$$R_{nC} = R_K [1 - (1 - R_A)^n]^{\binom{m}{n}} [1 - (1 - R_S)^n]^{\binom{m}{n}} \quad (7)$$

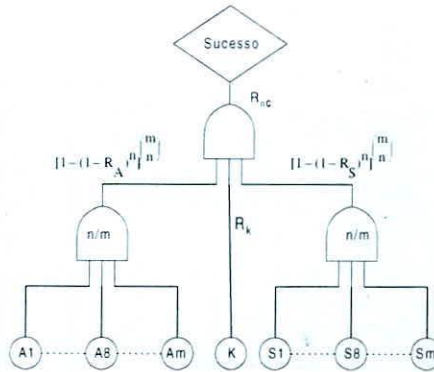


Figura 5 - Modelo de árbol de Éxito. El sistema falla si n actuadores (A) o n sensores (S), o el subsistema: computadora y sus interfaces (K) presentan falla.

Con los datos de tabla 3 y la ecuación 6, se representa la curva de confiabilidad de la red en la figura 6, se tomo como ejemplos los casos cuando $n=1, 2, 3, 4$ y $m=16$, lo que representa la confiabilidad cuando la red tolera una R1C, dos R2C, Tres R3C y cuatro R4C fallas respectivamente. En esa figura aparece una línea que marca la probabilidad de la red de fallar de 98%, la cual servirá para propósitos comparación en las conclusiones.

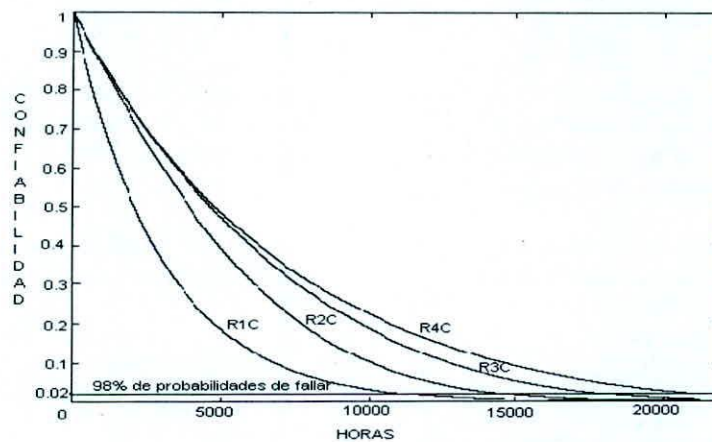


Figura 6 - Confiabilidad de la red industrial centralizada, cuando el sistema tolera una R1C, dos R2C, Tres R3C y cuatro R4C fallas respectivamente.

3.2 Cálculo de la Confiabilidad de la Red industrial distribuida

La figura 7 muestra el caso, en donde, la red formado por m transmisores o m actuadores inteligentes podría fallar si n de sus transmisores o n de sus actuadores presentaran fallas. El peor caso se presenta cuando $n=1$, es decir cuando la red falla si lo hace cualquiera de sus partes.

En estos modelos se utilizo las puertas n/m y la ecuación 6. La ecuación de confiabilidad para la red será:

$$R_{nD} = [1 - (1 - R_A)^n]^m [1 - (1 - R_T)^n]^m \quad (8)$$

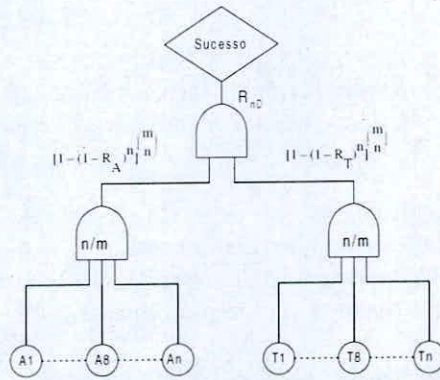


Figura 7 - Modelo de árbol de Éxito para el proceso distribuido. El sistema falla si n actuadores (A), o n transmisores (T) inteligentes presentaran falla.

Con el uso de los datos de la tabla 4, la ecuación 8 para $n=1, 2, 3, 4$ y $m=16$, se obtuvo el gráfico representado en la figura 8 que representa la confiabilidad de la red industrial distribuida para cuatro casos de tolerancia de falla. Lo mismo que para el caso de la figura 6, en esta figura aparece una línea que marca la probabilidad de la red de fallar de 98%, la cual servirá para propósitos comparación en las conclusiones.

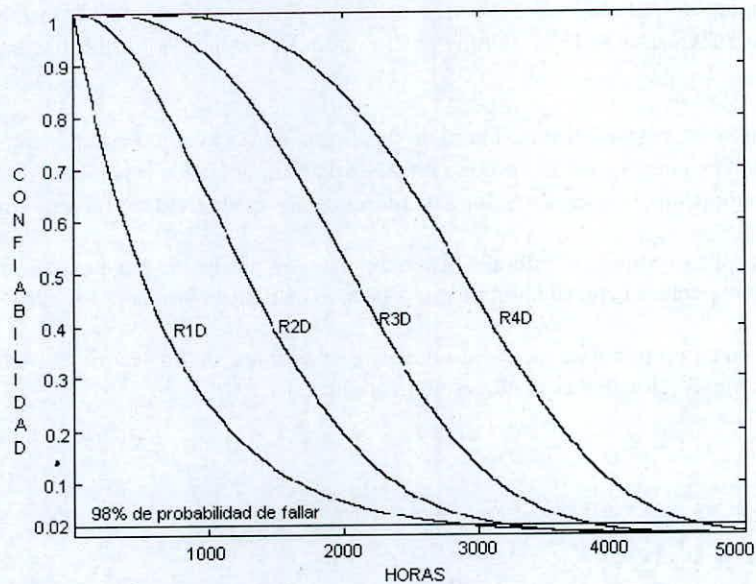


Figura 8 - Confiabilidad de la red industrial distribuida, cuando el sistema tolera una R1D, dos R2D, tres R3D o cuatro R4D fallas respectivamente.

IV. DISPONIBILIDAD

La disponibilidad es la probabilidad que el sistema funcione durante un período de tiempo especificado. El termino de *steady state* (o estado constante) de la función de disponibilidad es la fracción de tiempo durante la cual el sistema está disponible o en funcionamiento, este período de tiempo se ubica como una zona constante de esta función.

La disponibilidad de las redes centralizada y distribuida es calculada a través de los modelos de Markov y para los mismos casos de falla que fueron considerados para el cálculo de confiabilidad. En el modelo no están siendo llevados en cuenta componentes paralelos pasivos o activos, ni fallas ocultas o de conmutación.

4.1 Red industrial centralizada

La figura 9a presenta el modelo de Markov de la red industrial centralizada para la peor situación, en este caso el sistema falla por causa de un sensor, actuador, computadora o tarjetas de interfaces. El estado PF (proceso falla) agrupa todos los estados donde el sistema falla.

En el estado inicial, representado por **I**, la disponibilidad del sistema es 100%, el estado **K** representa la falla del subsistema representado por la computadora y tarjetas de interfaces, el estado **A** representa la falla de un actuador, mientras que el estado **S** representa la falla de un sensor. Las tasas de falla son representadas por los símbolos $\lambda_K, \lambda_A, \lambda_S$, mientras que las de reparación son μ_K, μ_A, μ_S respectivamente.

La figura 9b representa el caso donde la falla del sistema puede ser producido cuando dos sensores o dos actuadores o la computadora con su tarjeta de interface falla.

Cada letra en cada estado indicará que componente está fallando, así por ejemplo, el estado **A** o **S** simbolizará la falla de un actuador o sensor, mientras que el símbolo **AS** representará la falla de un actuador y un sensor.

La figura 9c representa el caso donde la falla de la red puede ser producido por fallas de tres sensores o tres actuadores o la computadora con su tarjeta de interface. El análisis es el mismo que para los casos anteriores. Donde, por ejemplo, la transición del estado **I** para el estado **S** es de $16\lambda_S$, debido a que en **I** existen 16 posibles sensores que podrían fallar; del estado **S** para **AS** será de $16\lambda_A$, porque en **S** existe 16 posibles actuadores para fallar; del estado **AS** para **2AS** será de $15\lambda_A$, porque en el estado **AS** existen 15 posibles actuadores para fallar y así sucesivamente.

Análogamente la transición del estado **S** para **I** será de μ_S porque en **S** existe un componente sensor esperando ser reparado; del estado **AS** para **S** será μ_A , porque en **AS** existe un actuador esperando ser reparado, de **2AS** para **AS** será de $2\mu_A$, porque en el estado **2AS** dos actuadores están esperando ser reparos y así por delante.

La figura 9d representa el caso donde la falla del sistema puede ser producida por la falla de cuatro sensores o cuatro actuadores o la computadora con su tarjeta de interface, el análisis es similar a los casos anteriores.

El número de estados crece proporcionalmente al número de variables, debido a que el número de estados en cada modelo aumenta como 2^n , donde n es el número de variables.

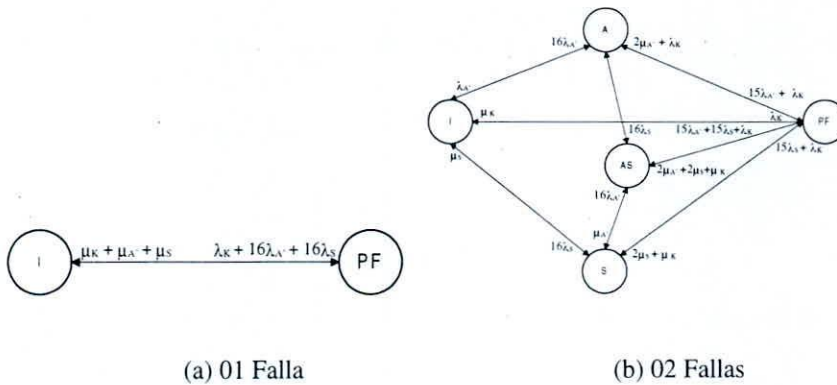


Figura 9 - Modelo de Markov de la red industrial centralizada

4.2 Red industrial distribuida

Las figuras 13a - 13d representan los modelos de Markov de la red industrial distribuida, donde el proceso puede fallar porque uno (peor situación), dos, tres o cuatro transmisores o actuadores inteligentes pueden presentar fallas respectivamente. El análisis de estas figuras es similar al de la red industrial centralizada, el estado PF agrupa todos los estados donde el sistema falla, el estado I representa el estado inicial, el estado A representa la falla de un actuador, mientras que el estado T representa la falla un transmisor inteligente; las tasas de falla son representadas por los símbolos λ_A , λ_T , mientras que las de reparación por μ_A , μ_T , respectivamente.

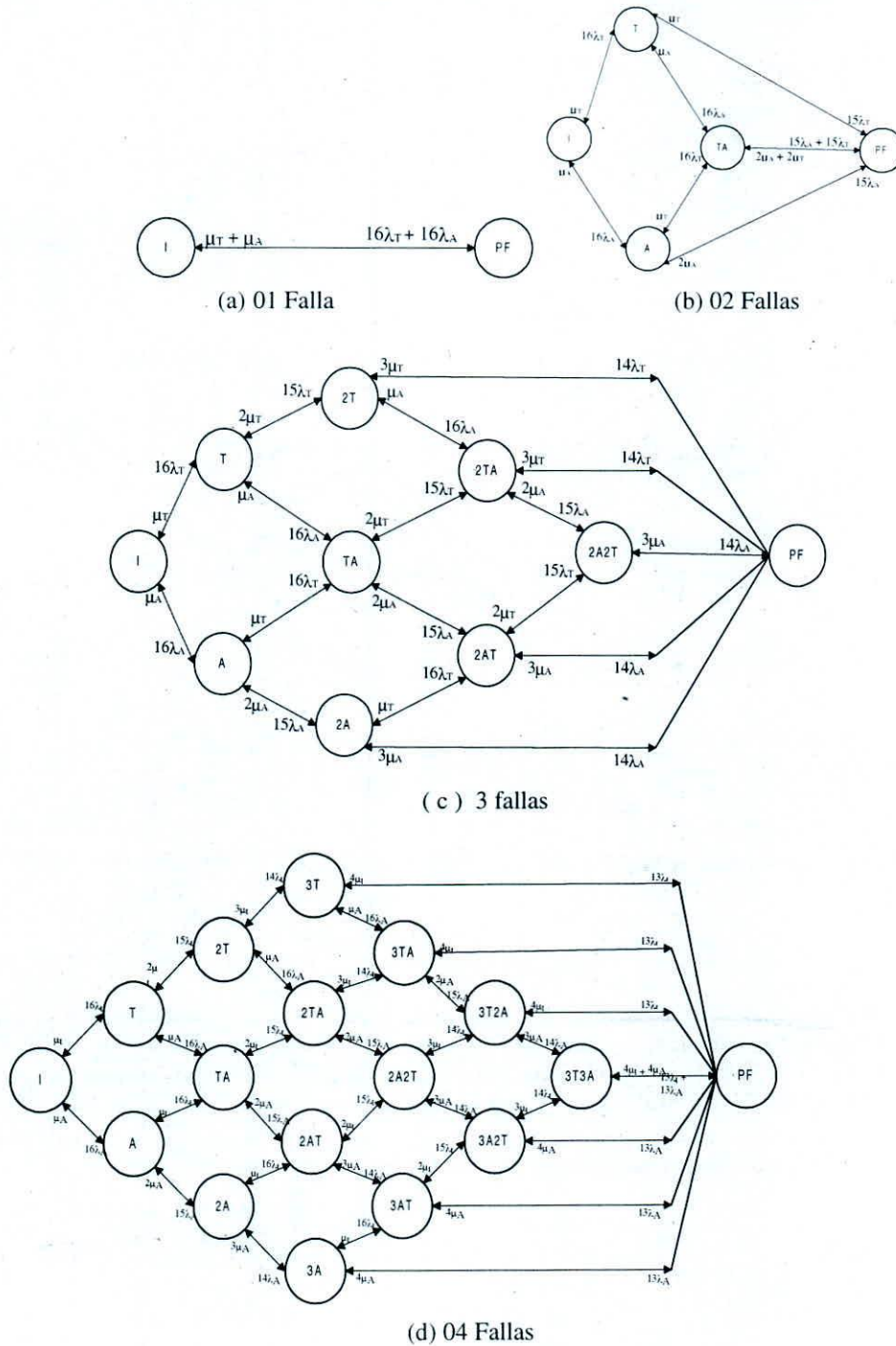


Figura 10 - Modelo de Markov de la red industrial distribuida

4.2.1 Resultados

En este caso, las matrices obtenidas de la figura 10a–10d para el cálculo de la confiabilidad, son de tamaño 2x2, 4x4, 16x16 y 32x32, respectivamente y son calculadas a través del MATLAB, los resultados se presentan en la tabla 7.

Tabla 7 - Disponibilidad de la red industrial distribuida para varios casos de falla

Caso de Falla	Modelo	Disponibilidad
1 sensor el 1 actuador	figura 10a	0.99862050563352
2 sensores el 2 actuadores	figura 10b	0.99999908699339
3 sensores el 3 actuadores	Figura 10c	0.9999999987952
4 sensores el 4 actuadores	Figura 10d	0.9999999999997
$\lambda_A=0.000041573$; $\lambda_T=0.0000447645$; $\mu_{LA}=0.5$; $\mu_T=0.5$		

V. DESEMPEÑO

A continuación se presenta los cálculos y las estimaciones necesarias para encontrar el desempeño medido como el retardo producido por el hardware y software de las redes durante el proceso de adquisición, control y transmisión de los datos.

5.1 Hardware Simplificado de la Red industrial centralizada y Formulación de Ecuaciones

El hardware simplificado de la red industrial centralizada se muestra en la figura 14. Los datos analógicos (0-20 mA) serán adquiridos por el sensor y pasados para el multiplexor, donde será seleccionado uno de entre n canales de datos que pasarán a ser convertidos para un dato digital en el Conversor Analógico/Digital. El temporizador de la red interrumpe periódicamente la CPU (cada T_C milisegundos) solicitando la ejecución del programa de control, el valor de T_C debe ser mayor que la suma del tiempo de retardo del hardware de adquisición de datos y del tiempo de ejecución del algoritmo de control ($T_C > \text{Tiempo de retardo del hardware de adquisición de datos} + \text{Tiempo de ejecución del algoritmo de control}$).

Los datos serán procesados en la CPU al ejecutarse el algoritmo de control: Proporcional-Integral-Derivativo (PID), posteriormente los resultados serán enviados hacia uno de los Convertidores Digital/Analógico seleccionado por un decodificador de direcciones.

El algoritmo PID realiza sus cálculos con dos datos consecutivos leídos desde el proceso en un intervalo de tiempo T_C . El tiempo de retardo del hardware de adquisición de datos, llamado T_{2ID} , medido desde el momento que el dato es leído por el sensor hasta llegar a la CPU para su procesamiento es igual a dos veces la suma de los tiempos de retardo del Decodificador Selector del Canal de Entrada (T_{DE1}), del Multiplexor Analógico (T_{MA}), del Circuito *Sample and Hold* (T_{SH}) y del Conversor Analógico/Digital (T_{AD}):

$$T_{2ID}=2*(T_{DE1}+T_{MA}+T_{SH}+T_{AD}) \quad (10)$$

Para propósitos de solo medir el tiempo de retardo, desde el momento en que los datos son adquiridos por los sensores hasta que son enviados a los actuadores, se está considerado, de aquí en adelante, el tiempo de respuesta de estos dispositivos (sensor, actuador) nulos, también para simplificar los cálculos se obvia la existencia de un amplificador y un filtro en la entrada del circuito, el cual no siempre es empleado. En las conclusiones se comentará los efectos que tendría la inclusión de estos o cualquier otro dispositivo sobre el retardo de la red.

Los datos serán procesados por el algoritmo de control PID en un tiempo que será función del número de variables simbolizado por $T_{PC}(n)$.

Posteriormente, el resultado será enviado al actuador a través del hardware de salida en un tiempo (T_{SD}), igual a la suma del tiempo de respuesta del Decodificador Selector del circuito integrado (T_{DE2}) y el tiempo de respuesta del Conversor D/A (T_{DA}):

$$T_{SD} = T_{DE2} + T_{DA} \quad (11)$$

Por tanto, el retardo de la red centralizada (T_{SC}) para un ciclo del proceso (los datos de los n sensores serán procesados), será igual a:

$$T_{SC} = (T_{2ID} + T_{SD}) * n + T_{PC}(n) \quad (12)$$

Donde, como se explico anteriormente:

T_{2ID} = Tiempo del ingreso de las variables (hardware);
 $T_{PC}(n)$ = Tiempo del programa de control para n variables (Software);
 T_{SD} = Tiempo de salida de datos (hardware).

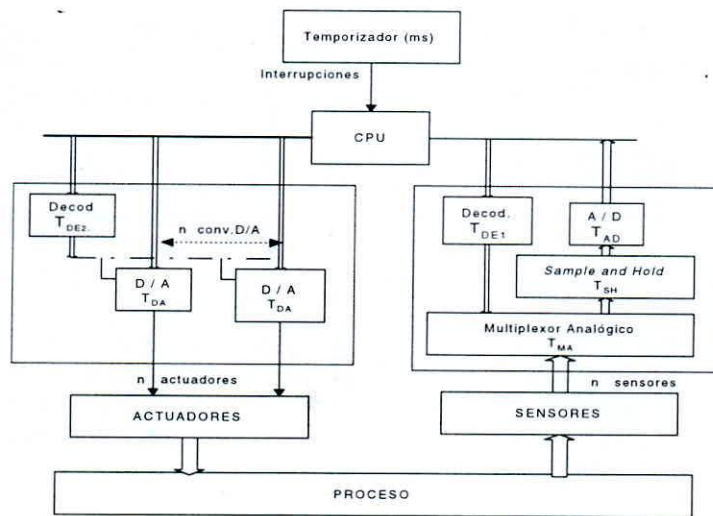


Figura 14 - Hardware de la red industrial centralizada

5.2 Software de la red Centralizada

La figura 12 representa el programa general, constituido por el programa principal, el subprograma de control, el subprograma de interface hombre-máquina, y sub-programa de alarmas, los cuales están representados en la figura como transiciones del programa principal; ellos serán ejecutados cada vez que los dispositivos de hardware como por ejemplo teclado, sensor de sobrecarga, temporizador, etc., interrumpan la CPU. El programa de control es considerado un evento periódico, porque será ejecutado cíclicamente cada T_c milisegundos, mientras los otros programas serán solo ejecutados durante los tiempos libres del microprocesador.

Para el objetivo que se persigue, es decir, medir el retardo de la red, solo son de interés los eventos periódicos, por ese motivo, a continuación, solo se analizará su algoritmo de control (Proporcional-Integral-Derivativo-PID) y el tiempo de su ejecución

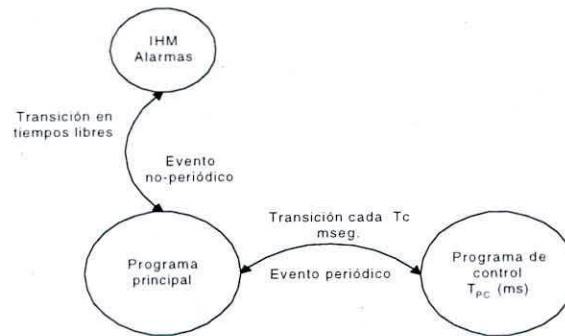


Figura 15 - Transiciones de tiempos para el programa de la red industrial centralizada

5.2 Medida del Tiempo del Programa de Controle (T_{PC})

El algoritmo de control PID es representado en la ecuación 13, donde K_I es la constante integral, K_D la constante derivativa, K_P la constante proporcional, u la señal de salida y ξ la señal de error.

$$u = K_P * \xi + K_D * \frac{\Delta \xi}{\Delta t} + K_I * (1/2) * (\xi_2 + \xi_1) * \Delta t \quad (13)$$

Este algoritmo junto con las sentencias necesarias para el ingreso y salida de los datos fue implementado en lenguaje C, en una computadora 486DX4/100MHZ, en ambiente DOS (evitando las interrupciones propias del sistema operativo Windows). Se midió la duración de la rutina a través de dos métodos:

- En el primero fue posible observar y medir directamente la duración de la rutina, a través de un osciloscopio (resolución de nanosegundos), al iniciar y finalizar su ejecución la rutina enviaba hacia la puerta paralela de la computadora, una señal lógica de 1 y 0 respectivamente, las cuales eran detectadas con un osciloscopio. Se midió el tiempo de 3000 interacciones a los efectos de tener una mejor exactitud.
- En el segundo método, se utilizó la función de adquisición de tiempo *gettime* del lenguaje C, al iniciar y finalizar la rutina, con este método también fue necesario medir varias interacciones (100) del tiempo de ejecución de la rutina, se tomaron varias muestras y se registro su valor medio.

Con ambos métodos se obtuvieron medidas similares, registrándose el tiempo de ejecución de la rutina con 16 canales de entrada y 16 de salida (sensores/actuadores), los valores fueron tabulados en el software de planillas EXCEL, de donde se obtuvo la ecuación general del tiempo de ejecución del programa de control en función al número de canales:

$$T_{PC}(n) = 9.8613 * n + 25.91 \text{ (microsegundos)} \quad (14)$$

5.2 Cálculos

Con datos de los manuales de dispositivos electrónicos en las ecuaciones 10, 11 se obtendrá:

$$\begin{aligned} T_{2ID} &= 0.2442 \text{ ms.} \\ T_{SD} &= 0.0030 \text{ ms} \end{aligned}$$

Con estos datos y 14 substituidos en 12 se obtendrá:

$$T_{SC} = 0.2571 * n + 0.0259 \text{ ms} \quad (15)$$

5.3 Hardware Simplificado del Proceso Distribuido y Formulación de Ecuaciones

La figura 13, muestra la red para el caso de tener un transmisor y un actuador inteligente, el transmisor se encargara de coleccionar datos del proceso ejecutando su programa de adquisicion. Posteriormente, cuando el Maestro solicite los datos adquiridos por el transmisor, con el proposito de ejecutar el algoritmo de control, estos seran enviados en paquetes llamados *frames*. La transmision es realizada a traves de la UART con una tasa de transmision de 12 Mb/seg.

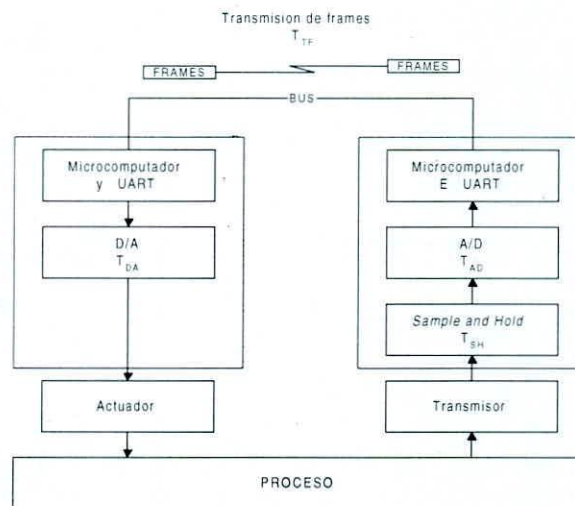


Figura 13 - Transmisor y actuador inteligente de la red industrial distribuida

El Maestro procesará los datos a través del algoritmo PID en un tiempo T_{PC} , cuyo resultado será enviado para un Conversor D/A, donde es convertido en una señal analógica que alimentará el actuador. Debe observarse que los instrumentos inteligentes tiene mucha mas capacidad de procesamiento que el descrito, la simplicidad fue realizada con el objetivo de comparar los tiempos de retardo de la red industrial centralizada y distribuida bajo condiciones similares.

Los microcontroladores de ambos instrumentos son los encargados de ejecutar el algoritmo de comunicación del protocolo de *bus* de campo (*Fieldbus*) y los programas aplicativos de los usuarios.

Para establecer, transferir los datos y cerrar la comunicación se utilizara respectivamente los servicios de INITIATE, READ y ABORT del protocolo de comunicación PROFIBUS.

El tiempo que los microcontroladores de los instrumentos demoran en la interpretación, procesamiento y preparación de los mensajes de los servicios INITIATE, READ y ABORT del protocolo PROFIBUS será llamado T_{PT} ; mientras que el tiempo durante el cual los mensajes de datos transitan durante estos servicios a través del *bus* será llamado de T_{TF} .

El tiempo transcurrido (T_{ID}) desde que el dato ingresa hasta que es almacenado en el *buffer* del transmisor inteligente, será igual que la suma del tiempo de retardo del circuito integrado *Sample and Hold* (T_{SH}), del tiempo de conversión de datos por el Conversor Análogo/Digital (T_{AD}) y del tiempo ejecución del programa aplicativo de adquisición de datos (T_{PAQD}).

Como para el cálculo del algoritmo PID se necesitan de dos datos consecutivos, el tiempo de retardo para dos datos leídos será:

$$T_{ID} = 2*(T_{SH} + T_{AD} + T_{PAQD}) \quad (16)$$

Cuando la estación Maestro solicita los datos de la estación Esclavo (transmisor) se establece los servicios del protocolo de INITIATE , READ y ABORT. Durante este tiempo el *bus* estará ocupado con el transito de mensajes y datos entre las estaciones, este tiempo, que fue llamado de T_{TF} , es función del número y tamaño de los mensajes a ser transmitidas.

El tiempo en que los datos permanecen en la estación Maestro, hasta que son enviados hacia el actuador es llamado T_{SD} , y es igual a la suma de los tiempos de ejecución del programa aplicativo de control PID (T_{PC}) y del tiempo de retardo del circuito integrado D/A (T_{DA}):

$$T_{SD} = T_{DA} + T_{PC} \quad (17)$$

Por lo tanto, el tiempo de respuesta del proceso distribuido para el caso de un sensor y actuador será:

$$T_{PD1} = T_{ID} + T_{PT} + T_{TF} + T_{SD} \quad (18)$$

Los tiempos T_{ID} , T_{PT} y T_{SD} ocurren simultáneamente en cada instrumento, en un procesamiento paralelo, mientras que el tiempo T_{TF} será empleado en cada instrumento compartiendo el *bus* en un procesamiento serie.

Por lo tanto, para los n instrumentos Maestros y Esclavos el tiempo de respuesta del hardware distribuido será:

$$T_{PDN} = T_{ID} + T_{PT} + T_{TF} * n + T_{SD} \quad (19)$$

3.4 Software de la Red Distribuida y Estimación del Tiempo del Protocolo (T_{TP})

La figura 14 muestra los programas que cada Maestro ejecuta cuando recibe el *token*. Las transiciones de los programas son representadas como transiciones no periódicas y periódicas, las primeras son aquellas que son atendidas en los momentos libres del procesamiento principal, y las segundas las que periódicamente y sin ningún tipo de interrupción controlaran el proceso.

Los programas aplicativos de cada estación son ejecutados paralelamente. La estación Maestra implementa el mismo programa de control PID que fue analizado para el caso de la red centralizada; periódicamente solicitará los datos registrados por la estación Esclava a través de la ejecución de los servicios del protocolo PROFIBUS: INITIATE, READ y ABORT.

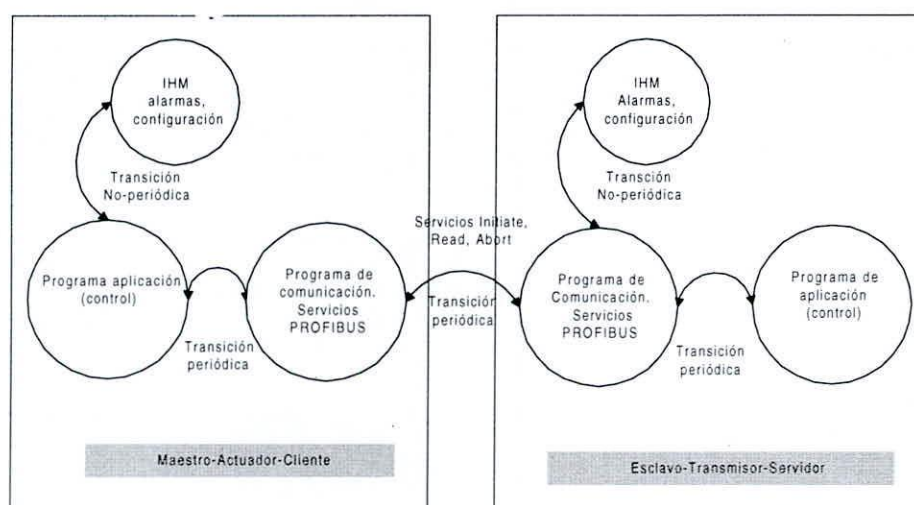


Figura 14 - Transiciones de tiempo de los programas de la red industrial distribuida

El Esclavo a través de su programa aplicativo registrara periódicamente los datos y los almacenara en sus registros internos. Con el objetivo de registrar datos consecutivos y actualizados (necesarios para el algoritmo PID), cada uno es leído después de un tiempo igual al retardo producido por el circuito integrado Sample and Hold (T_{SH}) y el Conversor Análogo/Digital (T_{AD}).

El procesamiento de los servicios INITIATE, READ y ABORT del protocolo, en la estación Esclava o Maestra, se reduce a la interpretación de los *frames* de pedidos y al montaje de los *frames* de respuestas. En Santos (1996) fue implementado y medido el tiempo de procesamiento del protocolo para estos mismos servicios. En esa implementación se usó un procesador 486, *frames* de pedido de tamaño de 6 bytes y *frames* de respuesta de 14 bytes, obteniéndose tiempos de procesamiento menores que 100us.

Por lo tanto, tomando como dato el máximo valor:

$$\begin{aligned} T_{INITIATE} &= T_{READ} = T_{ABORT} = 0.1 \text{ ms} \\ T_{PT} &= 0.3 \text{ ms} \end{aligned} \quad (20)$$

5.5 Estimación del Tiempo del Trafico dos Frames (T_{TF})

La tabla 8 muestra el tiempo empleado para varios tamaños de *frames* al transitar desde la estación Maestra hasta la estación Esclava considerando una tasa de transmisión de 12Mbit/seg (valor típico para estos servicios del protocolo).

Tabla 8 - Tiempos de transmisión para varios tamaños de *frames*.

Tasa (Kbps)	ms
TSD1	0.0057
TSD3	0.0066
TSD2-10	0.0095
TSD2-11	0.0104
TSD2-12	0.0113
TSD2-13	0.0123

La tabla 9 muestra los resultados de los cálculos para el tiempo de ejecución de cada servicio del protocolo PROFIBUS (INIATE, READ, ABORT) llevando en cuenta el número de *frames* generados y los resultados de la tabla anterior.

Tabla 9 - Tiempos para el trafico de *frames* (T_{TF}) en ciclo completo de transferencia de datos

	Frases en trafican	Costos de tiempo (ffts) T_{TF}
Establecimiento de la conexión	SD2-13, SD3, SD2-11, SD1	0.0350
Transferencia de datos (primera lectura)	SD2-11, SD2-12, SD1	0.0274
Transferencia de datos (sucesivas lecturas)	SD1, SD2-12	0.0170
Cierre de la conexión	SD2-10, SD1	0.0150

Sumando los valores de esta tabla correspondientes a la primera lectura, se obtendrá:

$$T_{TF} = 0.0944 \text{ ms} \quad (21)$$

Se estima el tiempo de ejecución del algoritmo PID como aquel que se obtendría de la ecuación 14 con $n=1$:

$$T_{PC} = 0.03577 \text{ ms} \quad (22)$$

De los datos de los manuales técnicos, substituidos en las ecuaciones 16 y 17:

$$T_{ID}=0.220\text{ms} \quad (23)$$

$$T_{SD} = 0.0039\text{ms} \quad (24)$$

Finalmente, con los datos de las expresiones 20, 21, 23, 24 y la expresión 19, el tiempo de retardo estimado para la red distribuida será:

$$T_{PDN} = 0.559 + 0.0944*n \quad (25)$$

El desempeño de las redes centralizada y distribuida es representado por las ecuaciones de retardo 15 y 25 que son ploteadas en las figuras 15 y 16.

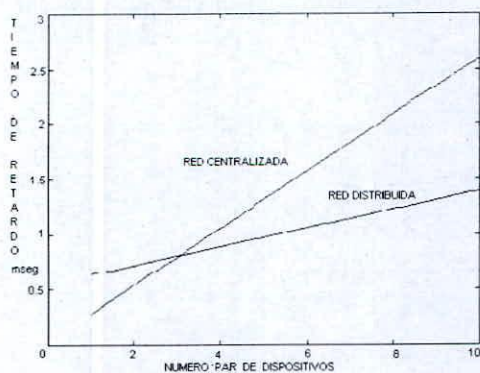


Figura 15 - Desempeño para $n < 10$

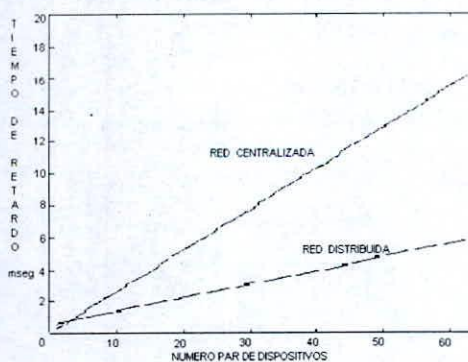


Figura 16 - Desempeño para $n < 70$

VI. ANALISIS DE COSTOS

A continuación se presenta una comparación de costos entre ambas redes, para este objetivo, se investigo los precios entre varios fabricantes.

6.1 Red industrial centralizada.

La tabla 10 muestra los costos medios de las partes que constituyen la red centralizada.

Tabla 10 - Relación de dispositivos y costos de la red industrial centralizada

Item	Partes	Cantidad	Precio (Dólares)
A1	Computadora	01	1800
B1	Tarjetas de adquisición de entrada analógica	01	2200
C1	Tarjetas de adquisición de salida analógica	01	1200
D1	Sensor analógico	01	400
E1	Actuador analógico	01	700

Con la información de la tabla 10, la ecuación que relaciona los costos de la red centralizada con relación al número de sensores y actuadores, es:

$$P_{SC} = (A1+B1+C1) + (D1+E1)*n$$

$$P_{SC} = 5200 + 1100 * n \quad (26)$$

6.2 Red industrial distribuida

La tabla 11 muestra los costos medios de las partes que constituyen la red industrial distribuida. Lo mismo que para el caso de la red industrial centralizada los datos fueron consultados entre varios fabricantes.

Tabla 11 - Relación de dispositivos y costos para la red industrial distribuida

Item	Partes	Cantidad	Precio Dólares
A2	Computadora+Tarjeta de interfaces para configurar red+ Fuente de alimentación	01	2800
B2	Transmisor Inteligente	01	2300
C2	Actuador Inteligente	01	1100

Con la información de la tabla 11, la ecuación que relaciona los costos de la red distribuida en función al número de transmisores y actuadores inteligentes es:

$$\begin{aligned}
 P_{SD} &= A2 + [B2+C2] * n \\
 P_{SD} &= 3000 + 3400*n
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

La figura 17 presenta ploteadas las ecuaciones 26 y 27

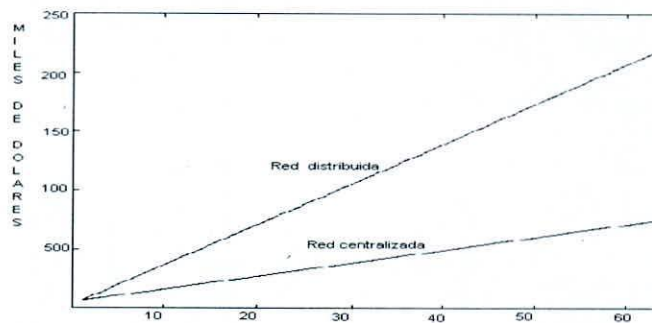


Figura 17 - Costos de ambas redes

VII. CONCLUSIONES

Aunque el parámetro de confiabilidad debe ser analizado para intervalos de tiempos específicos, el siguiente análisis puede dar una primera aproximación de la confiabilidad entre ambas redes: observando las curvas 6 y 8 puede deducirse después de tomar como referencia una probabilidad de 98% (ver la línea horizontal en los gráficos) y para los casos más críticos de falla (RIC, RID) que la red centralizada falla al cabo de aproximadamente 12000 horas de funcionamiento mientras que la red distribuida lo hace al cabo de las 2500 horas, similares resultados pueden ser encontrados en la misma figura para los otros casos de fallas; por tanto, se puede concluir que la confiabilidad de la red industrial centralizada es mayor que la red industrial distribuida Fieldbus. Este resultado se explica por el hecho que en la red distribuida existe mayor volumen de hardware que en la red centralizada, lo cual representa mayores probabilidades de falla.

Por otro lado, a la vista de los resultados de la disponibilidad para ambas redes, mostrada en las tablas 6 y 7, puede concluirse que la red industrial distribuida Fieldbus y la red industrial centralizada son igualmente disponibles.

De la ecuación que relaciona el retardo de la red centralizada (ver ecuación 12) puede observarse que el número de instrumentos (n) multiplica a todos sus términos. Por este factor multiplicativo, cualquier modificación o agregado en los tiempos representado por la alteración del hardware o la ejecución del algoritmo de control o el cambio del número de variables en la red (n) puede beneficiar o perjudicar críticamente su característica de tiempo de respuesta. Por esto sería muy importante escoger adecuadamente los tiempos de retardo de los sensores y los actuadores (que por simplicidad fueron ignorados) de tal manera que sus tiempos de respuesta (que en los peores casos esta en el orden de los segundos) no sean críticos en el retardo de la red. El retardo de la red distribuida, en cambio, presenta otro comportamiento (ver ecuación 19), para este caso puede observarse que para valores muy grandes de n (por ejemplo 100) el retardo será función únicamente de aquel producido por el tráfico de *frames*, mientras que para valores menores de n , este dependerá de todos sus demás parámetros (retardo del hardware, tiempo de ejecución del algoritmo de control, tiempo de procesamiento del protocolo).

De la figura 16, puede concluirse que para el caso de tener una red con un gran número de instrumentos el desempeño de la red industrial distribuida fieldbus supera al de la centralizada (su retardo es menor que la red centralizada), todavía este hecho puede ser reforzado llevando en cuenta que cualquiera agregado en las redes, como se explicó, afectará mas el desempeño de la red centralizada que el de la distribuida. Por otro lado, en esa misma figura se puede observar que la red centralizada para mas que 40 pares de instrumentos excederá la respuesta en tiempo real especificada para procesos industriales (10 ms.), limitación que no es observada para el caso de la curva de la red distribuida. Por otro lado, de la figura 15 donde se representa el retardo de redes formada con pocos instrumentos, puede concluirse que el desempeño red industrial centralizada es comparativamente igual e inclusive puede resultar mejor que el de la red distribuida (su retardo es igual o menor que la red distribuida). Este hecho no sorprende mucho si llevamos en cuenta que para valores pequeños de n los tiempos que predominan en las respuestas de la red centralizada son: el tiempo de retardo del hardware y el tiempo de ejecución del programa de control; mientras que en la red distribuida además de estos tiempos se suman el tiempo de ejecución del protocolo Fieldbus, es decir, en este intervalo de n la ventaja de la red centralizada con respecto a la distribuida es el tiempo que este ultimo emplea para la ejecución del protocolo Fieldbus.

De aquí podemos observar la importancia que tiene para la red distribuida, la optimización del tiempo de ejecución del protocolo que se podría conseguir con procesadores cada vez más rápidos, la reducción del número de capas del protocolo y la especificación de servicios cada vez mas apropiados para la transferencia de datos.

En la curva de costos (ver figura 17), se puede ver la tendencia de 3 a 1 entre el costo de la red distribuida con respecto al de la centralizada. Esto se explica porque para un numero grande de instrumentos las curvas dependerán básicamente de los términos dependientes de n de sus ecuaciones respectivas ($\approx 34000/1100$). Además, la gran diferencia de costos era de esperarse porque el crecimiento de la red distribuida implica la compra de unidades de mayor precio debido a su hardware más complejo que se justifica por su potencial de procesar gran cantidad de datos.

Finalmente, desde una óptica más general después de ponderar estas conclusiones, se puede deducir lo siguiente:

- Una implementación de una red distribuida Fieldbus solo se justifica si su tamaño es grande o si existe la perspectiva para un gran crecimiento. La compensación obtenida en por la gran inversión es: gran desempeño, flexibilidad de crecimiento garantizando tiempo real de respuesta y capacidad de procesar gran cantidad de información. Aunque la confiabilidad es un riesgo.
- Una implementación con instrumentación analógica está totalmente justificada para redes pequeñas y medias, donde se obtiene gran desempeño y gran confiabilidad. Aunque, con este tipo de implementación no existe capacidad de crecimiento por comprometer el tiempo de respuesta.

VIII. REFERENCIAS

- Carnegie-Mellon University. Control tutorials for Matlab: PID tutorial. <http://rclsgi.eng.ohio-state.edu/matlab/PID/PID.html>, April, 1997
- Caro, R. H. SP50 Chair: la perspectiva on fieldbus. Intech, August, 1996, P. 2
- Cavalieri, S.; Di Stefano, La.; Mirabella, EL. Centralized versus distributed protocols for fieldbus applications. In: IEEE International Conference on Industrial Electronic Control and Instrumentation, 21, Orlando, 1995, Proceedings. New York, IEEE, 1995, vol 2, p 1580-5.
- Cena G.; Demartine C.; Durante L. An objet oriented model for the FIP protocol. In: The International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON'94: proceedings. New York, IEEE, 1994. V.2, p.1214-9.
- Chatha, LA. Fieldbus: the foundation for field control systems. Control Engineering, v.41, p.77-80, May 1994.
- Clarke, La. B.; Disney, R. L. Probabilidades y procesos estocásticos. John Wiley, 1979.
- Coutinho, J.; Martin, S.; Samata, G.; Tapley, S.; Wilkin, D. Fieldbus tutorial. Computer Systems Engineering at Curtin University of Technology in Western Australia: <http://rolf.ece.curtin.edu.au/~clive/Fieldbus/fieldbus.htm>; May, 1995.
- Cutler-Hammer. PID driver. http://cutlerhammer.eaton.com/op_la_sys/pid.html, July 1997.
- D.L.A.T.L.A. Inc. Interfaces integrated circuits. D.L.A.T.L.A. Book Electronic Information Series. V.27, Book 25, San Diego, 1982
- Dorf, R. C. Modern control systems. 6. ed. Reading: Addison-Wesley, 1992.
- Furness, H. Digital communications provides. Control Engineering, v.4 p. 55-57, jan. 1994.
- Kapur, K. C. Lamberson, L.R. Reliability in engineering design. New York, John Wiley, 1977.
- Kuo, B. C. Matlab tools for control system analysis and design. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1994.
- Leviti, P. IEC/ISA Fieldbus DLL Tutorial. Italian Electro-Technical Committee, Rev 02- 29 April, 1996, Pp. 1-54.
- Lewis, Y. Y. Introduction to reliability engineering. New York, John Wiley, 1987.
- Military Handbood, Reliability prediction of electronic equipment. Mil-Hdk-217f, 2 December 199
- Muppala, J. K.; Woollet, S. P.; Trivedi, K. S. On modeling perfomance of real time systems in the presence of failures. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1993. 240p.
- Pappas, C. H.; Murray, W.H. TuranC++: completo y total. Trad. por MáranMoro. SonPaulo, Makron, 199
- Piovesan, A. S. Instrumentação inteligente: implementação de malha de controle no nível dos instrumentos de processo. São Paulo, 1993. 94p. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Raja, P.; Noubir, G.; Hernández, J.; Dominique, J. Analysis of polling protocols for fieldbus networks. Computer Communication Review, V. 23, N.3, p. 69-89, July 1993.
- Ramakumar, R. Engineering reliability: fundamentals and applications. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1993.
- Reibman, LA. L.; Veeraraghavan, M. Reliability modeling: an overview for system designers. IEEE, 1991. p.49-57
- Santori, M.; ZECH, K. Fieldbus brings protocol to process control. IEEE SPECTRUM, n.3, p.60-4, Mar. 1996.
- Santos, J. L. Implementação e uso de rede fieldbus para monitoramento e controle de aplicação em tempo real. São Carlos, SP, 1996. 160p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Shaw, j. The PID control algorithm. <http://members.aol.com/JohnShaw/pid/index.html>, July, 1997
- Silva, R. D. Comunicação de dados em ambiente industrial: um protocolo para automação e controle em tempo real. São Carlos, SP, 1996. 190p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Vita. A family of three fieldbuses solutions. <http://Vita.Con/Mar96vj/Vjmar96.Html#Anchor1035783>. March, 1996, Pp. 14-17.
- Voltz, M. Profibus - Technical Overview/Hints and Tips. <http://www.profibus.com/data/technic/index.html>, November, 1996
- Williams, C. D. H. Feedback and temperature control. University of Exeter Department of Physics PHY3128. <http://newton.ex.ac.uk/teaching/CDHW/Feedback/>, July, 1997