



Universidad Nacional De Rosario (UNR)
Facultad De Ciencias Exactas, Ingeniería Y Agrimensura
Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la
Información y Sistemas (CIFASIS). CONICET–UPCAM–UNR
Grupo de Informática Aplicada a Ingeniería de Procesos (GIAIP)

Tesis Doctoral

Desarrollo De Sistemas De Diagnóstico De Fallas Integrado Al Diseño De Control Tolerante A Fallas En Procesos Químicos

David Alejandro R. Zumoffen

Director: Dra. Marta S. Basualdo
Co-Director: Dr. Mario A. Jordán

Miembros del jurado: Dr. Carlos Ruiz
Mst. Juan Nachez
Dr. Miguel Mussati

Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, en
cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de:

Doctor en Ingeniería

3 de Octubre de 2008

Certifico que el trabajo incluido en esta tesis es el resultado de tareas de investigación originales y que no ha sido presentado para optar a un título de postgrado en ninguna otra Universidad o Institución.

David Alejandro R. Zumoffen

GIAIP Grupo de Informática Aplicada a Ingeniería de Procesos.
CIFASIS (UNR-UPCAM-CONICET).
RMN - Planta Alta.
Blvd. 27 de Febrero 210 Bis.
2000 Rosario, Argentina.
TE: +54 - 0341 - 4821771 Ext. 104.
E-mail: zumoffen@cifasis-conicet.gov.ar
Año: 2008.

Agradecimientos

Primero es lo primero y no siempre en ese orden..., en definitiva un comienzo con agradecimientos y reconocimientos a todas las personas que directa e indirectamente han participado de este proceso parece ser el más apropiado, necesario e inevitable.

Primeramente quiero expresar mi agradecimiento a mi directora de tesis la Dra. Marta Basualdo por su inagotable fuente de paciencia. Sus directrices fueron los cimientos de todo el proceso. A mi co-director de tesis el Dr. Mario Jordán por su gran aporte en el área de control adaptivo predictivo y su excelente predisposición.

Mencionar y agradecer la hospitalidad del pueblo español y en particular de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) en mi primer año de doctorado en esa ciudad. Especialmente al profesor y amigo Francisco Ballesteros Olmo del departamento de Matemática Aplicada a las Tecnologías de la Información quien me brindó su apoyo incondicional.

Al grupo de Sistemas Inteligentes del IFIR, principalmente al Dr. Alejandro Ceccatto por facilitar el desarrollo de esta tesis y dar el marco necesario de trabajo. A los compañeros del viejo espacio físico: Ulises (Uli, volvé que el barrio te está esperando), Alejandro (Rebi), Inés y a el Dr. Granito por el apoyo.

Quiero agradecer especialmente a los nuevos compañeros del nuevo espacio físico: Gonzalo, José, Ale y Leo por generar un lugar de trabajo insuperable y sus contribuciones en el campo de la filosofía. A los directivos del Centro Internacional Franco-Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas (CIFASIS), al Dr. Ceccatto y el Dr. Kaufmann, por permitir el desarrollo de este trabajo en dicho centro.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica por el soporte económico en el desarrollo de ésta tesis. También quiero agradecer la excelente predisposición del caballero Carlos Franco en la resolución expeditiva de problemas.

Y finalmente a mis afectos. Este espacio quiero dedicarlo especialmente a las personas que atesoro en lo profundo de mi corazón. Mis viejos, mi hermana, mis amigos de siempre (Guille, Juan y Mauricio) y las dos personas más importantes de mi vida, mi mujer Belén que me ha guiado, aguantado y estimulado en todo este proceso (sin su enorme sentido común quién sabe por dónde estaría volando)... gracias amor!. Y a mi pequeño y hermoso bebé, Ian, que hace que cada día sea una odisea de sensaciones.

David A. Zumoffen

Resumen

En las últimas tres décadas se ha incrementado notablemente el interés en sistemas de monitoreo aplicado a grandes plantas químicas. Esto es debido esencialmente a condiciones de operación más exigentes de los procesos debido a cuestiones de seguridad de equipos y personas, costos operativos y restricciones ambientales. La creciente complejidad en aspectos vinculados al diseño de grandes plantas y su correspondiente política de control hace que los sistemas de monitoreo resulten cada vez más sofisticados en aspectos tales como velocidad de detección, robustez, facilidad de explicación, requerimientos de modelado y almacenamiento de datos, adaptabilidad, etc.. Esta fuerte interacción entre información y acciones de control tiene lugar fundamentalmente a través de sensores y actuadores. Sin embargo, estos elementos son potenciales fuentes de fallas comunes en procesos industriales. En este contexto, se advierte que el área de sistemas de monitoreo integrados al control tolerante a fallas, aplicado a plantas químicas completas, es aún un problema abierto. En la actualidad, se han encontrado sólo algunas soluciones particularizadas dependientes del caso de aplicación (en general académicos).

En tal sentido, el objetivo de esta tesis es abordar el problema de diseño de sistemas de detección, diagnóstico y estimación de fallas (SDDEF) integrados al control tolerante a fallos (CTF) en procesos químicos. El desarrollo está focalizado en automatizar el correcto manejo de situaciones anormales (MSA) y brindar una correcta interacción con el usuario y la política de control existente. El tratamiento del problema distingue claramente las herramientas que deben emplearse de acuerdo con la dimensión del mismo. Así, se presentan soluciones alternativas para una sola unidad de proceso y varias de ellas fuertemente interconectadas. En todos los casos se contemplan a los sistemas bajo esquemas de control convencional y avanzado. El desarrollo de un novedoso SDDEF, apto para plantas de diferentes dimensiones y contemplando los requerimientos fundamentales que impone hoy la industria química constituye uno de los principales aportes de esta tesis. Herramientas tales como transformada wavelet discreta, identificación de sistemas, análisis de componentes principales, sistemas de lógica difusa y redes neuronales artificiales son integradas adecuadamente para el desarrollo del SDDEF. En este contexto se presenta una nueva metodología general para el correcto MSA en grandes procesos basado en un SDDEF híbrido y estrategias de integración al CTF activo, ya sea de políticas de control existentes o nuevas. El SDDEF se diseña de forma tal que resulte independiente de factores tales como, dimensión, complejidad, operabilidad y tipo de los procesos y de sus estrategias de control.

Esta tesis está organizada como sigue: el capítulo 1 presenta el marco de referencia de los problemas reales encontrados habitualmente en procesos industriales y sus consecuencias. El capítulo 2 presenta una extensa recopilación bibliográfica que permite adquirir un panorama amplio del estado del arte en el abordaje de MSA, diseño de sistemas de monitoreo y CTF

desde el punto de vista académico e industrial. El capítulo 3 realiza una breve descripción de las principales herramientas utilizadas a lo largo de esta tesis tanto en el campo del procesamiento de la información como del área de control de procesos. El capítulo 4 aborda el problema principalmente orientado a unidades aisladas de proceso que contemplan menor número de variables. Aquí se presentan los principales resultados obtenidos en la aplicación de control predictivo adaptivo como CTF activo. Dado que se confrontan los resultados alcanzados con y sin sistema de diagnóstico, es posible realizar una evaluación rigurosa de los alcances de emplear el SDDEF integrado al CTF. Se discuten aquí diseños basados en la TWD e identificación de sistemas para la conformación del SDDEF. Los resultados obtenidos provienen tanto de planteos teóricos como de un caso de aplicación de un reactor tipo tanque agitado continuo con camisa. Además, se proponen nuevas alternativas de control adaptivo predictivo, políticas de integración y manejo de eventos anormales en lazos simples de control. Fallas típicas como offset en sensores y retardos extras en actuadores son analizadas de forma secuencial y simple, en paralelo con diferentes condiciones de operación de los procesos. El capítulo 5 presenta el diseño de un complejo SDDEF híbrido para procesos de grandes dimensiones y su integración al CTF para políticas de control existentes. La estrategia propuesta es probada sobre casos de aplicación tales como una planta de tratamiento de aguas residuales y una de pulpa y papel (la cual representa el caso más complejo y de mayor dimensión existente en la comunidad de investigación de control de procesos). Además, se desarrollan varios índices capaces de brindar una correcta evaluación ya sea de funcionamiento del SDDEF, así como de costos involucrados con el empleo del SDDEF integrado al CTF. Se presenta un conjunto importante de simulaciones efectuadas en diferentes escenarios para poder apreciar el aporte concreto de esta estrategia. Fallas en sensores del tipo offset y en actuadores del tipo retardo extra y bloqueos son propuestas. Las fallas consideradas en cada caso de estudio fueron seleccionadas acorde con la magnitud del problema que producían las mismas. De esta forma se considera que la metodología propuesta se somete a pruebas contundentes que posibilitan extraer sustentar las conclusiones presentadas en el capítulo 6. En el mismo también se incluyen algunas posibles direcciones futuras de trabajos de investigación. Finalmente, los apéndices dan el soporte necesario a temáticas específicas como identificación recursiva con factor de olvido, predicciones con diferentes modelos lineales, algoritmos de factorización, control basado en modelo interno y control en avance.

Durante el desarrollo de esta tesis se han generado diversas publicaciones, las cuales han sido sometidas tanto a arbitrajes nacionales como internacionales. Los trabajos más importantes se resumen en el capítulo denominado publicaciones (y en anexo al final de la tesis).

Publicaciones

Durante el desarrollo de esta tesis se han generado diversas publicaciones. Las principales se detallan a continuación:

- A- **An Approach to Improve the Performance of Adaptive Predictive Control Systems: Theory, Simulations and Experiments.** M. Jordán, M. Basualdo and D. Zumoffen. *International Journal Of Control*. 2006, 79(10), 1216/1236.
- B- **Robust Adaptive Predictive Fault-Tolerant Control Linked with Fault Diagnosis System Applied On a Nonlinear Chemical Process.** D. Zumoffen, M. Basualdo, M. Jordán and A. Ceccatto. *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*. 2006, 3512/3517. San Diego, CA, USA.
- C- **Robust Adaptive Predictive Fault-Tolerant Control Integrated To a Fault-Detection System Applied to a Nonlinear Chemical Process.** D. Zumoffen, M. Basualdo, M. Jordán and A. Ceccatto. *Ind. Eng. Chem. Res.*. 2007, 46(22), 7152/7163.
- D- **From Large Chemical Plant Data to Fault Diagnosis Integrated to Decentralized Fault-Tolerant Control: Pulp Mill Process Application.** D. Zumoffen and M. Basualdo. *Ind. Eng. Chem. Res.*. 2008, 47(4), 1201/1220.
- E- **Improvements in Fault Tolerance Characteristics for Large Chemical Plants Part I: Waste Water Treatment Plant with Decentralized Control.** D. Zumoffen and M. Basualdo. *Ind. Eng. Chem. Res.*. 2008, 47(15), 5464/5481.
- F- **Improvements in Fault Tolerance Characteristics for Large Chemical Plants Part II: Pulp Mill Process with Model Predictive Control.** D. Zumoffen, M. Basualdo and G. Molina. *Ind. Eng. Chem. Res.*. 2008, 47(15), 5482/5500.

Las publicaciones A, B y C forman parte del capítulo 3 y la estructura fundamental del capítulo 4. A su vez las publicaciones D, E y F estructuran el capítulo 5. En cada caso, dichos capítulos pretenden otorgar un visión extendida de las publicaciones documentando nuevos resultados y estrategias.

Además, numerosos trabajos interdisciplinarios se han llevado a cabo en este período. El resultado de dicha interacción se ve reflejada en las publicaciones enunciadas anteriormente y los siguientes trabajos presentados en congresos y reuniones científicas:

1. *Desarrollo De Un Sensor Virtual De Composiciones Para La Implementación De Control Con Trayectoria Óptima Aplicado A Destilación Batch.* J.P. Ruiz, F. Garetto, D. Zumoffen y M. Basualdo. Congreso X RPIC, Argentina. 2003.
2. *A Nonlinear Soft Sensor For Quality Estimation And Optimal Control Applied In A Ternary Batch Distillation Column.* J.P. Ruiz, D. Zumoffen, M. Basualdo and L. Jimenez Esteller. ESCAPE 14 European Symposium on Computer Aided Process Engineering, Portugal. 2004.

-
3. *Aplicación De Control Predictivo Funcional Para El Seguimiento De Una Trayectoria Óptima De Temperatura En Una Columna De Destilación Batch Multicomponente*. D. Zumoffen, L. Garyulo y M. Basualdo. XIX Congreso Argentino de Control Automático, Argentina. 2004.
 4. *Predictive Functional Control Applied To Multicomponent Batch Distillation Column*. D. Zumoffen, L. Garyulo, M. Basualdo and L. Jiménez. ESCAPE 15, European Symposium on Computer Aided Process Engineering, Spain. 2005, 1465/1470.
 5. *Sistema De Detección De Fallas En Un CSTR Controlado Con PFC*. D. Zumoffen, M. Basualdo y A. Ceccatto. Congreso XI RPIC, Argentina. 2005.
 6. *Control Tolerante Predictivo Funcional aplicado A Un CSTR*. D. Zumoffen, M. Basualdo y M. Jordán. Congreso XI RPIC, Argentina. 2005.
 7. *Control predictivo generalizado no lineal aplicado a una columna de destilación batch ternaria*. J. Walczuk, L. Caviglia, D. Zumoffen y M. Basualdo. Congreso XI RPIC, Argentina. 2005.
 8. *On the Design of Fault-Tolerant Systems using Robustness Filtering with Adaptive Control*. M. Jordán, M. Basualdo and D. Zumoffen. Congreso XI RPIC, Argentina. 2005.
 9. *An Industrial Application Of Signal Processing For Developing A Fault Diagnosis System Linked With A Fault Tolerant Control Strategy*. M. Basualdo and D. Zumoffen. Workshop on Signal Processing (WSP06), Argentina. 2006.
 10. *Control Tolerante A Fallos Integrado A Un Sistema De Diagnóstico Basado En Análisis De Principales Componentes Y Lógica Difusa*. D. Zumoffen, M. Basualdo y G. Molina. XX Congreso Argentino de Control Automático, Argentina. 2006.
 11. *Fault Detection and Estimation System Integrated To Fault Tolerant Control. Part I: FDIE System Design*. D. Zumoffen and M. Basualdo. Congreso XII RPIC, Argentina. 2007.
 12. *Fault Detection and Estimation System Integrated To Fault Tolerant Control. Part II: Reconfiguration of the Control Strategy*. D. Zumoffen and M. Basualdo. Congreso XII RPIC, Argentina. 2007.
 13. *Hybrid Fault Diagnosis For Large Chemical Plants Under Control*. D. Zumoffen and M. Basualdo. ESCAPE 18, European Symposium on Computer Aided Process Engineering, France. 2008.
 14. *Fault Diagnosis and Identification System Applied to a Non-invasive Biosensor of Blood Glucose*. M. Basualdo, D. Zumoffen and A. Rigalli. ESCAPE 18, European Symposium on Computer Aided Process Engineering, France. 2008.
 15. *Monitoreo Y CTF en Grandes Plantas Químicas. Parte I: Diseño del SDDEF*. D. Zumoffen y M. Basualdo. XXI Congreso Argentino de Control Automático, Buenos Aires, Argentina. 2008.
 16. *Monitoreo Y CTF en Grandes Plantas Químicas. Parte II: Integración al CTF*. D. Zumoffen y M. Basualdo. XXI Congreso Argentino de Control Automático, Buenos Aires, Argentina. 2008.

Glosario

ACP	Análisis en componentes principales
ACPA	Análisis en componentes principales adaptivo
ACPD	Análisis en componentes principales dinámico
ACPM	Análisis en componentes principales móvil
ACPME	Análisis en componentes de principales de múltiples escalas
ACPPE	Análisis en componentes principales pesado exponencialmente
ACT	Análisis cualitativo de tendencias
AF	Árboles de fallas
ARX	Autorregresivo con entrada externa (AutoRegressive with eXogenous input)
ASM1	Modelo de lodos activos (Activate Sludge Model) N°1
BTO	Beneficio total de operación
CAPFRA	Control adaptivo predictivo con filtro robusto adaptivo
CBMI	Control basado en modelo interno
CEA	Control en avance (feedforward)
CFRAP	Control con filtro robusto adaptivo predictivo
COD	Concentración de oxígeno disuelto
CPA	Control predictivo adaptivo
CPF	Control predictivo funcional
CPM	Control predictivo multivariable
CTF	Control tolerante a fallos
DDF	Detección y diagnostico de fallas
DG	Digrafos
DGS	Digrafos con signo
DVS	Descomposición en valores singulares
EAR	Extracción automática de reglas
ECP	Error cuadrático de predicción
ECMP	Error cuadrático medio de predicción
FC	Física cuantitativa
FEC	Filtros espejo en cuadratura
FIR	Respuesta finita al impulso (Finite Impulse Response)
FP	Función de pertenencia
IEA	Integral del error absoluto
IS	Identificación de sistemas
LB	Licor blanco
LD	Lógica difusa

LF	Línea de fibra
LND	Licor negro débil
LV	Licor verde
MCP	Mínimos cuadrados parciales
MMPE	Media móvil pesado exponencialmente
MRG	Matriz relativa de ganancias
MSA	Manejo de situaciones anormales
OD	Oxígeno disuelto
P	Control proporcional
PA	Promedio de los autovalores
PI	Control proporcional/integral
PID	Control proporcional/integral/derivativo
PMB	Porcentaje de mejora del beneficio
PME	Porcentaje de mejora del error
PPP	Planta de pulpa y papel
PQ	Punto de quiebre
PSR	Porcentaje de soporte de la regla
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
PTD	Porcentaje del tiempo de detección
PVA	Porcentaje de varianza acumulado
RNA	Redes neuronales artificiales
RQ	Recupero químico
RTAC	Reactor tanque agitado continuo
SA	Situación anormal
SCTF	Sistema de control tolerante a fallos
SDDEF	Sistema de detección, diagnóstico y estimación de fallas
SDEF	Sistema de detección y estimación de fallas
SE	Sistema experto
SISO	Simple entrada/simple salida (Single Input/Single Output)
SLD	Sistema de lógica difusa
SM	Sistema de monitoreo
SVD	Subespacio de variación dominante
TWD	Transformada wavelet discreta
UO	Unidades en capa oculta
US	Unidades en capa de salida
VC	Variable controlada
VM	Variable manipulada

Variables

Capítulo 2

$d(k)$	Señal de perturbación
$f(k)$	Evolución temporal de la falla
$u(k)$	Señal de entrada
$y(k)$	Señal de salida
$\hat{f}(k)$	Estimación de la falla
$y_{ref}(k)$	Trayectoria de referencia

Capítulo 3

$\mathbf{1}_m$	Vector de unos de longitud m	μ_i	Valor medio de la variable i
a	Escalado wavelet	σ_i	Varianza de la variable i
A	Componentes principales	λ_i	Autovalor i
\mathbf{A}	Matriz del modelo EE	$\Delta\bar{x}$	Error de predicción
A_J	Aproximación a nivel J	δ_{T^2}	Límite de confianza para T^2
b	Desplazamiento wavelet	δ_Q	Límite de confianza para Q
\mathbf{b}	Vector de valores medios	χ^2	Distribución chi-cuadrado
\mathbf{B}	Matriz del modelo EE	ν	Factor de confianza
$C(a, b)$	Coefficientes wavelets	$\psi(\cdot)$	función wavelet madre
$D_j(t)$	Detalle a nivel j	$\phi(\cdot)$	función de escala
$D^*(z^{-1})$	Polinomio causal	θ	Vector de parámetros
\mathbf{D}_λ	Matriz de autovalores	$\hat{\theta}$	Vector de parámetros estimado
$\mathbf{D}_{\lambda A}$	Matriz de A autovalores	$\alpha^{(i)}$	Paso en la iteración i
$\mathbf{e}(k)$	Vector de errores	$\xi^{(i)}$	Dirección de búsqueda en i
\mathbf{E}	Matriz de restricciones	$\theta^{(i)}$	Estima en i
$f_i(\cdot)$	Función de pertenencia i	θ^0	Valor inicial de la estima
$F(z^{-1})$	Filtro pasa bajo	φ_j	Entrada j de la neurona
$F_{A,m-A,\alpha}$	Distribución F	$\phi(k)$	Regresor lineal
\mathbf{F}	Matriz de restricciones	$\varepsilon(N)$	Error de predicción a priori
$g(i)$	Coefficientes del modelo FIR	$\epsilon(k)$	Error de seguimiento
G	Filtro pasa alto wavelet	α_i	Pesos del error
\tilde{G}	Filtro espejo de G	β_i	Pesos del control
$G(z^{-1})$	Transf. del proceso	$\Delta\hat{u}(k)$	Movimiento futuro de control
$\hat{G}(z^{-1})$	Transf. estimada del proceso	$\eta(k)$	Perturbación de salida
$\hat{G}_0(z^{-1})$	Transf. estimada nominal del proceso	$\hat{\eta}(k)$	Estimación de la perturbación
\mathbf{G}	Matriz de restricciones	$\Delta\hat{\mathbf{U}}(k)$	Movimientos futuros
h_p	Fin horizonte de predicción	$\Delta\hat{G}(z^{-1}, k)$	Corrección del modelo
h_u	Horizonte de control	$\Delta\hat{\theta}(k)$	Corrección de los parámetros

h_w	Inicio horizonte de predicción
H	Filtro pasa bajo wavelet
\tilde{H}	Filtro espejo de H
$J(k)$	Funcional costo matricial
$K(N)$	Ganancia del algoritmo MCR
K_g	Compensación estática
n	no. variables medidas
n_h	no. neuronas en capa oculta
n_φ	no. de entradas
$pva(l)$	% de varianza acumulada para l
\mathbf{P}	A componentes principales
$\bar{\mathbf{P}}$	subespacio residual
\mathbf{P}_N	Inversa de la matriz de correlación
$Q(k)$	Estadístico ECP
$r(t)$	Ruido de medición
$R(z)$	Polinomio no causal
\mathbf{R}	Matriz de correlación
$s(t)$	Señal para análisis wavelet
\mathbf{s}	Vector de varianzas
t	Tiempo
$\mathbf{t}(k)$	Variables latentes
T_{ref}	Tiempo de respuesta
T_s	Tiempo de muestreo
$T^2(k)$	Estadístico de Hotelling
$\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \mathbf{T}_3, \mathbf{T}_4$	Matrices de transformación
$u(k)$	Señal de entrada
$\hat{\mathbf{u}}(k)$	Vector de entradas futuras
\mathbf{U}	Vector de movimientos futuras
$V_N(\cdot)$	funcional costo cuadrático
w_{ij}	Peso j de la neurona i
w_{i0}	Bias de la neurona i
$w(k)$	Trayectoria de referencia
$x(k)$	Estados del modelo EE
\bar{x}	Medición normalizada del proceso
X	Espacio de entrada
\mathbf{X}	Matriz de datos
$\bar{\mathbf{X}}$	Matriz de datos normalizada
$y(k)$	Señal de salida
y_i	Salida de la neurona i
\hat{y}_i	Predicción de y_i
$\hat{\mathbf{y}}(k)$	Vector de predicciones
\mathbf{Y}_r	Vector de referencias futuras
Z^N	Datos entrada/salida con N muestras

Capítulo 4

$\hat{d}(k)$	Retardo estimado	α_r	Cte. tiempo filtro
$G_{vm}(z^{-1})$	Modelo actuador/válvula	ϕ_{au}	Regresor aumentado
$h(k)$	Respuesta al escalón	$\hat{\theta}_{au}$	Estima aumentada
$off(t)$	Offset de medición	ζ	Umbral del retardo
$p_o(k)$	Valor de pico en D_1	λ	Factor de olvido
$p\hat{p}o$	Parámetro de punto operativo	δ_o	Parámetro proporcional
$r(t)$	Ruido de medición		
$s_1(k)$	Versión filtrada de $z_n(k)$		
t_d	Retardo temporal		
T_f	Tiempo de ocurrencia de la falla		

u_{00}	Punto operativo de la entrada
$u_c(t)$	Señal de control
$u_c(t - t_d)$	Señal de control retrasada en t_d
$w_0(k)$	Referencia original
$y(t)$	Variable de salida real
$y_m(t)$	Variable de salida medida
y_{00}	Punto operativo de la salida
$z_n(k)$	Indicador de persistencia a la excitación

Capítulo 5

b_{VM_j}	Valor medio de la VM_j	δ_z	Límite de confianza para z
BTO_j^i	Beneficio total de operación	δ_{pva}	% de varianza acumulada
\bar{c}_i	Precio costo/venta	τ_f^i	Cte. de tiempo filtro CBMI
$ECMP_j$	Error cuadrático medio de predicción	η	Parámetro de diseño
$f_{P_j}^i$	Función de pertenencia j sobre i	μ	Conversión de unidades
F_i	Falla tipo i	τ_m	Cte. tiempo del modelo
\bar{F}_i^j	Cantidad de material	κ_i	Par. del modelo inferencial
IEA_j^i	Integral del error absoluto	ν_i	Par. del modelo inferencial
K_m	Ganancia del modelo	τ_p	Cte. tiempo del proceso
K_p	Ganancia del proceso	θ_p	Tiempo muerto del proceso
K_{PI}	Ganancia del PI	τ_{PI}	Cte. integral del PI
l_i	Valor lingüístico para i		
$[L_{min}^i, L_{max}^i]$	Rango de operación normal de i		
M_i	Modelo inferencial i		
N_a	Número máximo de alertas de peligro		
N_{aux}	Dimensión matriz auxiliar		
N_w	Dimensión matriz normal		
$\hat{o}_{ff}^{VC_j}$	Estimación del offset en VC_j		
p	Número de reglas		
PI_i	Controlador PI del lazo i		
PMB_j^i	Porcentaje de mejora del beneficio		
PSR_j	Porcentaje de soporte de la regla j		
PTD	Porcentaje de tiempo de detección		
r	Número de componentes de \mathbf{u}_{FL}		
\mathbf{R}_p	Regla del evento p		
\mathbf{R}_{matriz}	Matriz de reglas		
s_{VC_j}	Varianza de la VC_j		
s_i	Activación del lazo adicional i		
$sp_i(k)$	Referencia para i		
$sp_i^0(k)$	Referencia original para i		
$sp_{pr}^0(k)$	Ref. original de producción		
$sp_{pr}^1(k)$	Ref. actualizada de producción		
$\hat{t}_d^{VM_j}$	Estimación del retardo en VM_j		
T_c	Tiempo de clasificación		
T_d	Tiempo de detección		
$[T_{iz}, T_{fz}]$	Zona de análisis		
T_r	Tiempo de reconfiguración		
T_{sd}	Dinámica mas lenta del proceso		
T_u	Tiempo de actualización		
$u_{FL}(k)$	Entradas del SLD		
u_i^m	Valor medio de i		
u_i^c	Corrección de la ref. de producción		
\mathbf{u}_{FL}^m	Vector de contribuciones medias		

$V_a(k)$	Funcional costo adicional
$V_0(k)$	Funcional costo original
VA	% de violación de amoníaco
VN	% de violación de nitrógeno
$\bar{\mathbf{X}}_n$	Matriz de datos normales
$\bar{\mathbf{X}}_{aux}$	Matriz auxiliar
$y_i^m(k)$	Medición de la salida i
$\hat{y}_i^m(k)$	Inferencia de la salida i
\mathbf{y}_{FL}	Salida del SLD
$z(k)$	Estadístico combinado

Apéndices

A	Matriz del modelo EE	λ	Factor de olvido
B	Matriz del modelo EE	ξ	Retardo del proceso
C	Matriz del modelo EE	w	Frecuencia
$C(s)$	Transferencia del controlador		
\mathbf{D}_*	Matriz de la factorización UD		
e_m	Error multiplicativo		
$f_{lp}(s)$	Transferencia del filtro pasa bajos		
$\tilde{g}_+(s)$	Parte no invertible		
$\tilde{g}_+(s)$	Parte invertible		
$G(s)$	Transferencia del proceso		
$\tilde{G}(s)$	Modelo del proceso		
$G_c(s)$	Transferencia del CBMI		
G	Matriz dinámica		
K_{ff}	Transf. del controlador en avance		
S	Matriz dinámica		
$u(k)$	Señal de entrada		
\mathbf{U}_*	Matriz de la factorización UD		
$x(k)$	Estados del modelo EE		
$y(k)$	Señal de salida		

Índice general

Índice de figuras

Índice de tablas

Introducción

La mayoría de las plantas petroquímicas y refinerías poseen sistemas de control para controlar simultáneamente cientos de variables del proceso, tales como presiones y temperaturas, por ejemplo. El rol humano principal en estos sistemas de control altamente automatizados es el de *supervisión*. Esta actividad supervisora requiere: monitoreo del estado actual de la planta, ajuste de los parámetros de control, realizar actividades planeadas de operación y detectar, diagnosticar, compensar y corregir situaciones anormales.

El incremento de la demanda de alta eficiencia y operación en estas industrias han derivado en un incremento muy importante en la sofisticación de los sistemas de control mediante el desarrollo de estrategias de control y sensores avanzados. De todas formas estos avances no han eliminado el problema de la presencia de situaciones anormales.

Una paradoja persistente en el dominio del control supervisor es que a medida que las tecnologías de automatización incrementan su complejidad y sofisticación, los operarios profesionales deben tomar decisiones cada vez mas complejas para el manejo de situaciones anormales (MSA).

1.1. Manejo de situaciones anormales (MSA)

De forma general una situación anormal (SA) puede definirse como: *una perturbación o una serie de perturbaciones que causan la desviación de la planta de su punto operativo normal*. La naturaleza de la SA podrá ser mínima o catastrófica dependiendo de su entorno. Será tarea del equipo de operaciones identificar la causa de la situación y ejecutar acciones correctivas o compensatorias de una manera rápida y eficientemente.

Una SA puede generar una reducción en la producción, pérdidas en la calidad del producto, daños en equipos y aún mas serias poner en riesgo la integridad de las personas. Debido a la naturaleza dinámica de los procesos las situaciones anormales se extienden, desarrollan y cambian temporalmente incrementando la complejidad de los requerimientos de intervención.

1.1.1. Fuentes o causas

Para comprender como abordar tales situaciones, es importante conocer los factores que causan o influyen sobre las situaciones anormales. En la mayoría de los casos, la SA se presenta como resultado de la interacción de múltiples fuentes.

Existen tres tipos de causas o fuentes de situaciones anormales

1.1. Manejo de situaciones anormales (MSA)

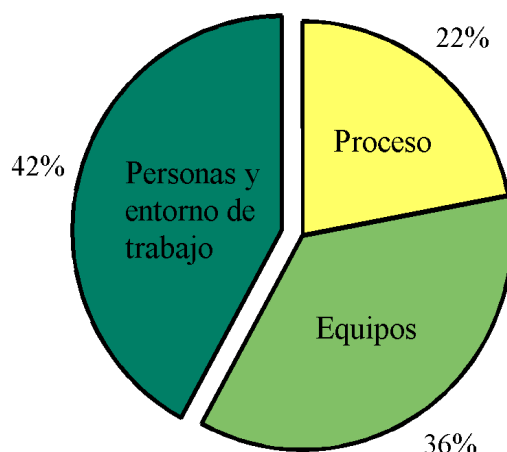


Figura 1.1: Porcentajes de fuentes de situaciones anormales (?®)

- A. Factores relacionados con las personas y el entorno de trabajo.
- B. Factores relacionados con los equipos.
- C. Factores relacionados con el proceso.

una cuarta fuente podría ser los antecedentes ambientales físicos (relámpagos, terremotos, tormentas) que no serán considerados aquí debido a su ocurrencia infrecuente y su generalmente rol obvio como causa raíz.

Las tres fuentes enumeradas anteriormente han sido identificadas de los reportes de incidentes de compañías miembros del consorcio de manejo de situaciones anormales (abnormal situation management consortium , ?®) en el período 1992–1993. De todos los reportes de incidentes solo han sido considerados los que tuvieron un impacto sobre la operación del proceso. Los porcentajes promedio para cada tipo de fuente se encuentran representados en la Fig. ??.

Los datos provenientes de los reportes de incidentes deben ser analizados con cuidado, ya que podemos encontrar información polarizada de diferentes formas. Los individuos generalmente rechazan la idea de identificar a las personas como fuente de un incidente y por otro lado, los datos son recolectados de un pequeño número de sitios reflejando la idiosincrasia de tales lugares.

En la Fig. ?? podemos observar la distribución de la frecuencia, medida en cantidad de incidentes, de cada fuente identificada. En el caso de personas y entorno de trabajo la causa que mas contribuye a situaciones anormales es la no existencia de procedimientos o procedimientos inadecuados. En los factores vinculados con equipos claramente las fallas mecánicas son la fuente con mas contribución. Finalmente, una mala operación del proceso superando los límites originales de de diseño son la causa raíz mas probable cuando hablamos de factores vinculados al proceso.

A. Factores relacionados con las personas y el entorno de trabajo

Los seres humanos siempre serán una parte del proceso de toma de decisión en las operaciones de planta y por lo tanto siempre existirán oportunidades para errores humanos que contribuyen a las situaciones anormales. En varios puntos del proceso las personas pueden contribuir a una SA por no responder correctamente con acciones anticipatorias/compensatorias o por responder con acciones inadecuadas. Las consecuencias de dichos errores dependerán de

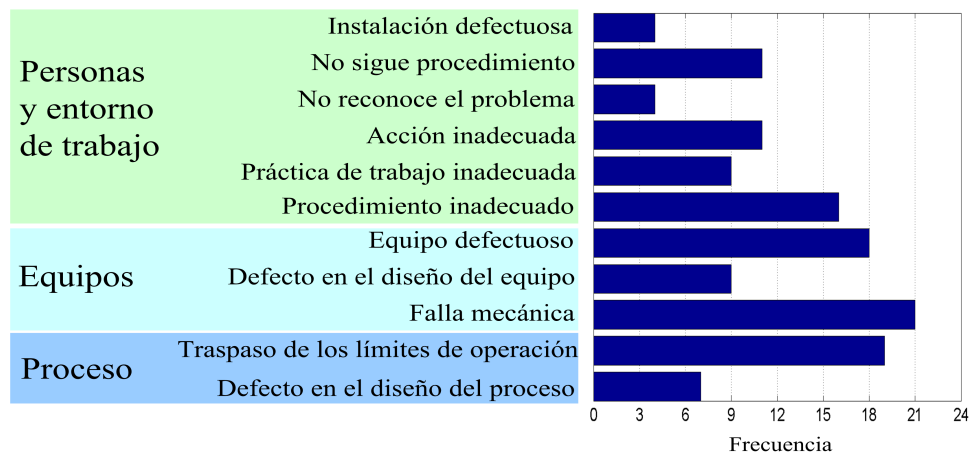


Figura 1.2: Contribución relativa de cada fuente (??)

la naturaleza de la SA. Para comprender el rol del personal de planta es importante clasificar las características internas y externas de la toma de decisión que contribuyen a los errores.

Las características internas relacionan conceptos como

- **entrenamiento/habilidad:** Los equipos de operación deben comprender cómo trabaja el proceso y fundamentalmente cómo se utiliza el sistema de control para monitorear la planta. Una carencia de entrenamiento contribuye a situaciones anormales;
- **práctica/experiencia:** Los equipos de operación deben contar con la experiencia requerida para completar sus tareas. La experiencia y la práctica deben ser distribuidas en todo el personal;
- **tensión:** En el caso de una SA los equipos de operación deben ser informados pero no abrumados, ya que altos niveles de tensión contribuyen a aumentar la probabilidad de errores humanos.

Las características externas por otro lado relacionan:

- **estructura de la organización:** Según la estructura de organización de un equipo de operaciones puede tener impacto en la probabilidad de un evento anormal;
- **comunicación:** Debido a que las operaciones de planta resultan de un esfuerzo coordinado de unidades de proceso la habilidad de comunicación y de información es un factor crítico en la operación.
- **procedimientos:** La carencia de procedimientos o procedimientos inapropiados pueden contribuir a situaciones anormales. Los procedimientos son solamente valiosos si se utilizan.

Otras características externas pueden ser: prácticas de trabajo, demandas de tareas, entorno, etc.

En conclusión, el personal de planta tiene numerosas cuestiones que monitorear y mantener para que un proceso cumpla con las condiciones de operabilidad y eficiencia y al mismo tiempo con requisitos de seguridad.

1.1. Manejo de situaciones anormales (MSA)

B. Factores relacionados con los equipos

La naturaleza y estado de los equipos de la planta son la mayor causa de situaciones anormales. Una clasificación general de los equipos de una planta es: *equipos de proceso* y *equipos de control*. El primero hace referencia a equipos tales como bombas, compresores, tanques, reactores, columnas, etc. y entre las causas de situaciones anormales mas comunes podemos encontrar:

- fallas de los equipos: estas refieren a interrupciones en equipos tales como bombas, compresor, etc.. Tales averías pueden causar trastornos significantes en la planta y en un caso extremo podrían ocasionar la salida de servicio del proceso. En áreas críticas de la planta pueden utilizarse equipos de respaldo;
- degradación del equipo: esta es la situación anormal más común vinculada a equipos. Este tipo de avería gradual puede resultar en pérdidas de producción o de calidad del producto así como también en una disminución del rendimiento de control. Son por lo general fallas difíciles de detectar.

Mientras que los equipos de control incluyen sensores, válvulas y controladores. Una gran variedad de factores relacionados a equipos tales como edad, carga, historial de mantenimiento, etc. pueden impactar en la naturaleza de la SA. Errores de lectura en un sensor y posicionamiento de una válvula pueden causar una carga considerable en los equipos de operación. Decidir sobre el estado del proceso con variables erróneas puede traer consecuencias catastróficas.

- Fallas en sensores: Existen cuatro modos de fallas en sensores, A) La lectura del sensor esta fuera de los límites del sensor/proceso, B) La lectura del sensor es cambiante a una tasa que está fuera de los límites físicos del proceso o es inconsistente con las características del sensor, C) El sensor se bloquea dando una medición constante, y D) Sensor con offset (bias), el sensor provee una lectura dentro de los límites físicos pero es diferente a el valor real. Las mediciones de los sensores generalmente se utilizan en lazos automáticos de control, así, un sensor que falla en su lectura puede provocar acciones de control erróneas dejando al proceso en puntos operativos diferentes o incluso producir la salida de servicio de la planta.
- Fallas en válvulas: De forma similar las válvulas utilizadas para implementar las acciones de control pueden sufrir fallas. Un error de posicionamiento de dicha válvula puede causar trastornos significantes si los operadores no identifican el problema rápidamente.
- Fallas en controladores: El advenimiento de los sistemas de control automático ha complicado la tarea de los equipos de operaciones cuando se presenta la necesidad de cambiar a modo de control manual. No sólo influye la carencia de capacitación de los equipos de operaciones para controlar manualmente la planta sino que también se debe tener en cuenta la complejidad del proceso.

C. Factores relacionados con el proceso

La identificación de estos factores puede ser un primer paso crucial cuando se pretende aplicar soluciones para el correcto manejo de situaciones anormales. Los factores inherentes al proceso que afectan la naturaleza de la SA son:

- Tipo de fabricación: Los procesos químicos pueden ser clasificados como discontinuos, continuos o alguna combinación de estos. Cada fase de un proceso discontinuo generalmente posee un conjunto específico de criterios que establecen el éxito/falla de dicha

fase. Se dispone así de procedimientos que describen el re-procesamiento de fases que pueden fallar. Cuando una falla ocurre en un proceso continuo, la parte del proceso involucrada pierde funcionalidad generando pérdidas en la producción o la calidad del producto. En un caso extremo, esta puede provocar la salida de servicio de la planta.

- Estado de la operación: El estado operacional de una planta posee una influencia significativa en el tipo de situaciones anormales y sus consecuencias. Los estados de operación mayormente encontrados en plantas petroquímicas son: *estado estacionario*, *arranque*, *parada* y *transiciones (no incluyen arranques/paradas)*. La operación en estado estacionario es el modo típico de funcionamiento de procesos continuos. El grado de desviación de dicho estado indica la severidad del evento anormal. El arranque de un proceso es una transición infrecuente, en general las condiciones para realizarlo no son conocidas en detalle resultando en grandes posibilidades de situaciones anormales. La parada de planta es el tipo de transición menos frecuente. Equipos, unidades o plantas pueden ser paradas para mantenimiento preventivo o por situaciones de emergencia. Las transiciones de planta desde un punto operativo a otro (procesos continuos) generalmente ocurren como consecuencia de cambios en las propiedades de las materias primas, cambios en recursos o cambios en la demanda de productos.
- Tipo de materiales que son procesados: Las consecuencias de una SA en una planta química también depende de la naturaleza de los materiales que están siendo procesados. Una clasificación preliminar de materiales manejados puede ser la siguiente: *químicos peligrosos vs no peligrosos*, *estado de los químicos (sólido/líquido/gaseoso)* y *sustancias inflamables vs no inflamables*. Las acciones correctivas a ser tomadas en caso de situaciones anormales involucrando diferentes tipos de materiales pueden ser diferentes, ya sea en términos de tiempo de respuesta como en procedimientos.
- Complejidad del proceso: Mientras que es difícil definir la complejidad de proceso, la mayoría de los analistas convienen que cuanto mayor es la complejidad de un proceso, más difícil es manejar una SA. La complejidad de un proceso decrece a medida que los operadores adquieren mayor experiencia del proceso. Información inadecuada sobre el estado o comportamiento del proceso también puede ayudar a ver el proceso como uno complejo. Cuando existen múltiples interconexiones entre unidades de un proceso, puede resultar sumamente difícil para los operadores aislar la causa raíz de una SA en una unidad en particular.

1.1.2. Desafíos

Un aspecto importante del entendimiento del MSA es la interrelación entre las causas raíz y la intervención de los sistemas de planta y el personal. Específicamente, la Fig. ?? ilustra la anatomía de un incidente catastrófico.

La figura muestra la evolución de una SA desde un trastorno de operación hasta un desastre catastrófico involucrando destrucción y daños a la planta y/o la comunidad que la rodea. En el centro de la figura (sistemas críticos), se ilustra la progresión de una SA y la interacción con condiciones de fallas y problemas ocultos en diferentes sistemas de la planta. Estos sistemas están diseñados para salvaguardar la integridad de la planta ante eventos catastróficos. El rol del personal de planta también puede apreciarse de la figura anterior para prevenir trastornos en la operación. Cuando se presenta una pérdida de control el personal de planta debe intervenir para minimizar el impacto del incidente.

Las actividades de operación son realizadas por equipos de operaciones que comprenden: operadores de consola, operadores principales, supervisores y operadores de campo. Esto también incluiría la coordinación entre los equipos responsables de las operaciones de diversas áreas

1.1. Manejo de situaciones anormales (MSA)

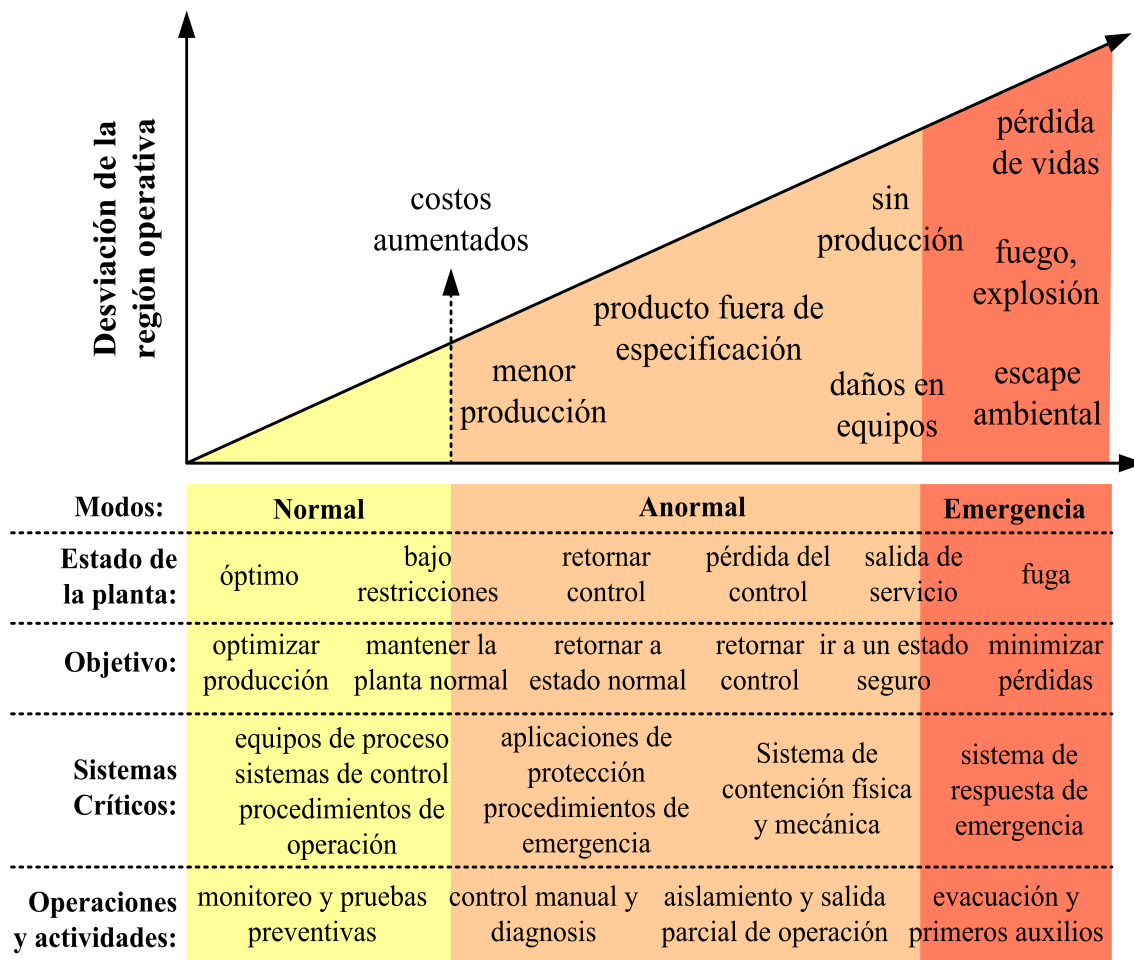


Figura 1.3: Anatomía de un incidente catastrófico (?®)

dentro de la planta. Las actividades de ayuda técnica son realizadas por personal típico que abarca ingenieros y técnicos en las siguientes áreas de proceso: instrumentación, mecánica, seguridad, desarrollo y sistemas de control. Aunque, el papel de los individuos varía de situación en situación, el grado con el cual el personal de ayuda técnica se involucra depende de la velocidad a la cual el problema se desarrolla. Desafortunadamente, el operador de consola generalmente es el único habilitado a responder debido a la velocidad con que se desarrollan los eventos anormales. La capacidad de ayuda en tiempo real del operador de consola dependerá de la integración y rapidez de los sistemas de comunicación.

1.1.3. Impacto

La larga historia de desastres (no debidos a causas naturales) de las plantas petroquímicas en Estados Unidos fue de 1.6 billones de dólares en 1989. En promedio, una planta petroquímica tendrá un incidente considerable cada tres años. Actualmente y basados en datos recogidos por compañías de seguros se estima que las pérdidas de producción debido a accidentes podría ser al menos de 10 billones de dólares anualmente en los Estados Unidos. Los costos asociados a reparaciones y/o reemplazo de equipos, multas ambientales, compensaciones por pérdidas humanas, investigación, pleitos, etc., representan otros 10 billones adicionales.

La mayoría de las situaciones anormales no resultan en explosiones pero son de todas formas situaciones que generan costos por baja calidad del producto, retrasos, daños de equipos, etc..

De los análisis de procesos realizados en las compañías miembro del consorcio de manejo de situaciones anormales resulta que entre un 3 % y un 8 % de la capacidad de la planta se pierde debido a eventos inesperados.

1.2. Monitoreo de procesos

Durante los últimos 30 años, las industrias químicas y petroquímicas han realizado esfuerzos enormes para reducir costos e incrementar la eficiencia de los procesos. La re-ingeniería, las nuevas tecnologías de sensores y los nuevos sistemas de control han contribuido a llevar a acabo este incremento de eficiencia. Por otro lado, el escenario resultante son procesos con unidades sumamente conectadas entre si, con complejas políticas de control, con un gran número de elementos intervinientes y con un grado de robustez relativo.

En este contexto, los operadores de proceso son quienes atienden las situaciones anormales. Generalmente, para dar aviso de variables con valores anormales se encienden alarmas de control clásicas (por ejemplo, alarmas de alto nivel o alta presión). Sin embargo, la complejidad de los procesos modernos hace difícil la predicción de eventos anormales. Las alarmas de control clásicas no suministran información de las causas raíz de la falla, solo informan respecto de una desviación particular.

El alto grado de acoplamiento de los procesos, causa que una desviación pueda propagarse (rápidamente) por numerosos equipos haciendo difícil y a veces imposible que los operarios del proceso detecten, clasifiquen y compensen dichos eventos anormales. Además, una interacción severa en los procesos incrementa la posibilidad que una acción de control, que tiende a rechazar algún efecto provocado por perturbaciones en una unidad determinada, afecte otras unidades de la planta de forma drástica.

Los directores y operadores de planta están abocados a conocer cómo operar la planta de modo seguro y óptimo desde el punto de vista económico. A menudo, la producción no se ve afectada por una disminución en el rendimiento, pero sí cuando una falla es realmente importante. En tales situaciones, se generan costos económicos considerables ya sea por la salida de operación del proceso, daños en los equipos, contaminación ambiental, etc.

Quizás el accidente químico más grande tomó lugar en Bhopal, India en 1984, cuando una planta de pesticida (un subsidiario de Dow Chemical Company) accidentalmente dejó escapar gas tóxico. Mas de 3000 ciudadanos murieron y entre de 200000 y 600000 sufrieron daños. Este incidente provocó alrededor de 4.1 billones de euros de daños económicos. El accidente en Bhopal fue el resultado de una combinación de errores como legales, tecnológicos, de organización y humanos. A continuación se detallan algunos de los defectos encontrados en la planta (??):

- * El depurador de gas tóxico, diseñado para neutralizar cualquier escape, estaba fuera de servicio para mantenimiento. Las investigaciones luego del desastre revelan que aún funcionando este depurador podía manejar sólo un cuarto de la presión que alcanzó en el accidente.
- * La torre de quemado, diseñada para quemar cualquier escape del depurador también estaba fuera de servicio. Además también estaba mal diseñada, sólo podía manejar un cuarto del volumen del gas escapado.
- * La cortina de agua. para neutralizar cualquier gas remanente, fue demasiado corta para alcanzar lo alto de la torre de quemado, de donde el gas fue esparcido.
- * La unidad de refrigeración, que mantiene el gas a bajas temperaturas, estuvo fuera de servicio por algún tiempo.

1.2. Monitoreo de procesos

- * El tanque de almacenamiento de gas fue llenado superando su capacidad.
- * Elementos de medición de temperatura y presión, en diferentes unidades del proceso, eran tan poco confiables que los operarios ignoraron signos tempranos del problema.
- * La carencia de un efectivo sistema de alarmas.

Afortunadamente, la mayoría de los incidentes no son tan drásticos. Pero de todas formas generan un importante costo económico por daños de diferentes formas. En la última década, el interés en sistemas de monitoreo (SM) ha aumentado siguiendo la demanda de mejor dirección de plantas de acuerdo con restricciones económicas y ambientales, resultando en una disminución de los accidentes.

Los principales objetivos de un SM son minimizar los riesgos e incrementar la calidad de la producción. Un SM debe trabajar en tiempo real, 24 horas del día, los 365 días del año, detectando tantos eventos anormales como sea posible (mucho antes que las alarmas de control) e informando de forma adecuada al operador sobre el estado del proceso, causas raíz y soluciones sugeridas. Por lo tanto, pueden tomarse acciones apropiadas en tiempo real para evitar la propagación de la falla o su eventual compensación y tender a reducir lo máximo posible las consecuencias de dicho evento anormal.