

4° SEMINARIO DE ACERCAMIENTO TECNOLÓGICO
Area Automatización y Control de Procesos
Hotel Park, Calama, Chile, Junio 2008

CONTROL AVANZADO EN
PROCESAMIENTO DE MINERALES:
PRODUCTOS, DESAFIOS Y SOLUCIONES

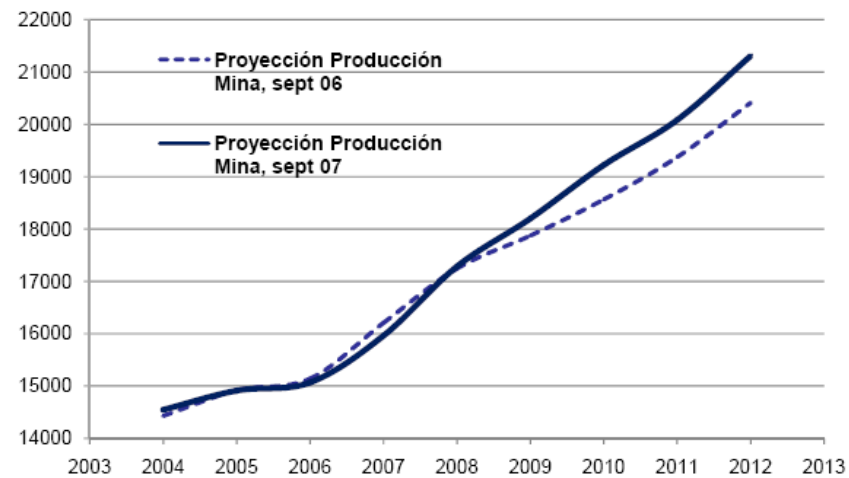
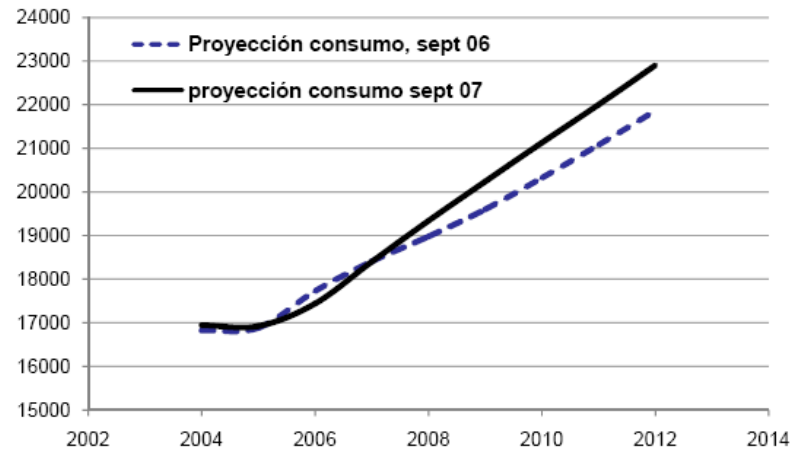
Prof. Dr. Aldo Cipriano

Pontificia Universidad Católica de Chile

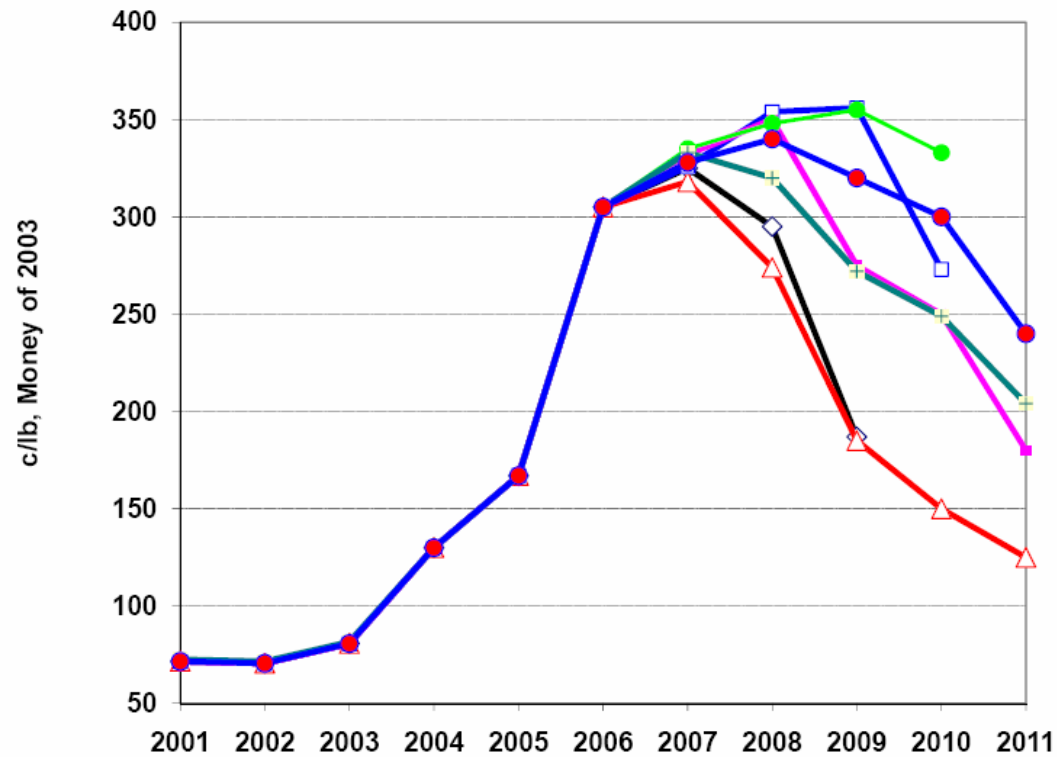
CONTENIDO

- Motivación
- Desafío actual
- Objetivos y arquitecturas
- Nuevos desarrollos en sensores
- Sistemas para tiempo real: PLC, SCADA, DCS
- Sistemas robóticos y autónomos
- Sistemas inteligentes
- Sistemas de control predictivo
- Investigaciones en desarrollo
- Síntesis
- Desafíos pendientes
- Posibles soluciones
- Resumen final

CONSUMO Y PRODUCCION DE COBRE EN KTON, PROF. GUSTAVO LAGOS, CENTRO DE MINERIA UC



PREDICCIONES DEL PRECIO DEL COBRE, 09/2007



Fuente: Alfonso Gonzalez

BOOM DE LOS MINERALES

□ Prof. Marian Radetzki, Centro de Minería UC

- “Usando un conjunto de supuestos razonables respecto del comportamiento de las inversiones, nuestros resultados sugieren que la capacidad inadecuada y los precios altos continúen durante 10 a 15 años antes de lograr un nuevo equilibrio.”

□ Proyección de la demanda en China, en KTON

Year	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Demand	3.916	4.582	5.132	5.645	6.153	6.645	7.177
Change		+ 17 %	+ 12 %	+ 10 %	+ 9 %	+ 8 %	+ 8 %

INICIATIVAS PARA APROVECHAR EL BOOM

- ❑ The Chinese Academy of Science (CAS) and BHP Billiton have created a strategic alliance for joint research and development, education and technology commercialisation in scientific and technical areas for the minerals and energy industries. The agreement will involve an academic and scholarship program with the Graduate School of the Chinese Academy of Science, collaborative research with relevant institutes and joint efforts to commercialise research results in the global market.
- ❑ Under CAS there are five Academic Divisions, 108 scientific research institutes, over 200 science and technology enterprises, and more than 20 supporting units including one university, one graduate school and five documentation and information centers. They are distributed over various parts of the country. CAS has a total staff of over 58,000, of whom 39,000 are scientific personnel according to 2000 figures.

INICIATIVAS PARA APROVECHAR EL BOOM

❑ **Lanzamiento del Consejo Nacional Estratégico Público-Privado del Cluster Minero, Antofagasta, Mayo 2008**

Este Consejo se crea como respuesta a los lineamientos y recomendaciones formulados por el Consejo Nacional de Innovación para la Competitividad, que planteó la necesidad de estimular el fortalecimiento del Cluster Minero, de manera de aprovechar nuestras actuales ventajas comparativas, a fin de elevar el desempeño innovador de la economía chilena.

❑ **Codelco Digital**

Codelco Digitales la manera de ver el Codelco del futuro a través del prisma de las TICA, se nutre y es parte inherente a los planes de negocio de la Corporación.

EL BOOM Y LAS EMPRESAS DE AUTOMATIZACION

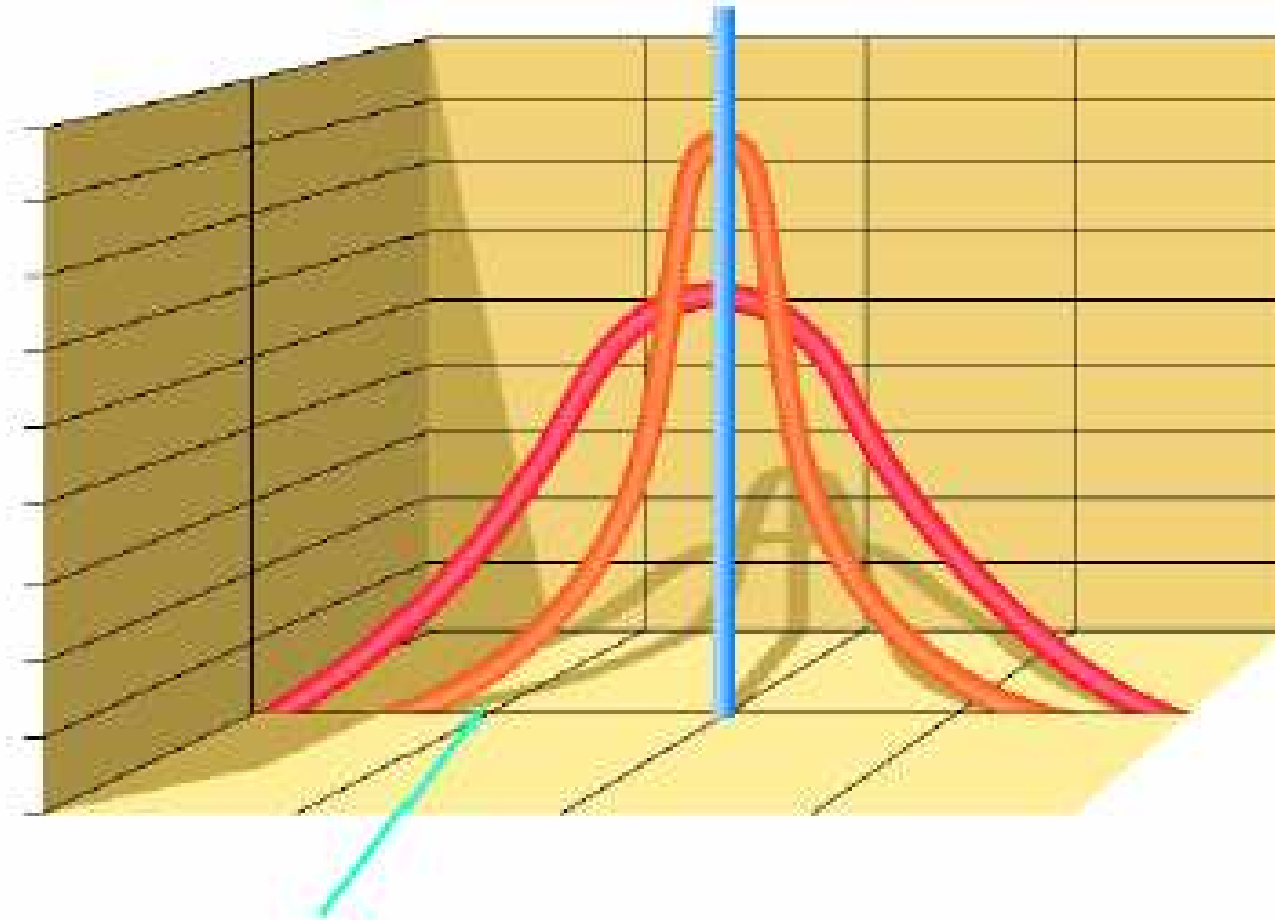
- Empresas con trayectoria en minería han potenciado su oferta y propuesto nuevas formas de hacer negocios.
- Asimismo, están invirtiendo en desarrollar tecnología para el sector.
- Empresas previamente centradas en otros sectores están dirigiendo su mirada también hacia la minería.
- En el caso de Chile, están ingresando al mercado nacional empresas que hasta hace poco no tenían representación en el país.
- Ejemplos: Expomin 2008, Automining 2008.
- Como consecuencia, la oferta de productos y servicios para automatización y control de procesos mineros está creciendo significativamente.

DESAFIO ACTUAL

- ❑ En lo que respecta a la minería del cobre, la automatización tiene como gran desafío actual aprovechar las favorables condiciones del mercado y la buena disposición de las empresas de ingeniería para incorporar masivamente la automatización en todos los procesos productivos, y generar, con inversiones razonables y en tiempos prudentes, los beneficios ya alcanzados en otros sectores industriales:
 - Mayor seguridad para las personas
 - Menores costos de operación
 - Mayor producción
 - Mayor calidad de los productos.

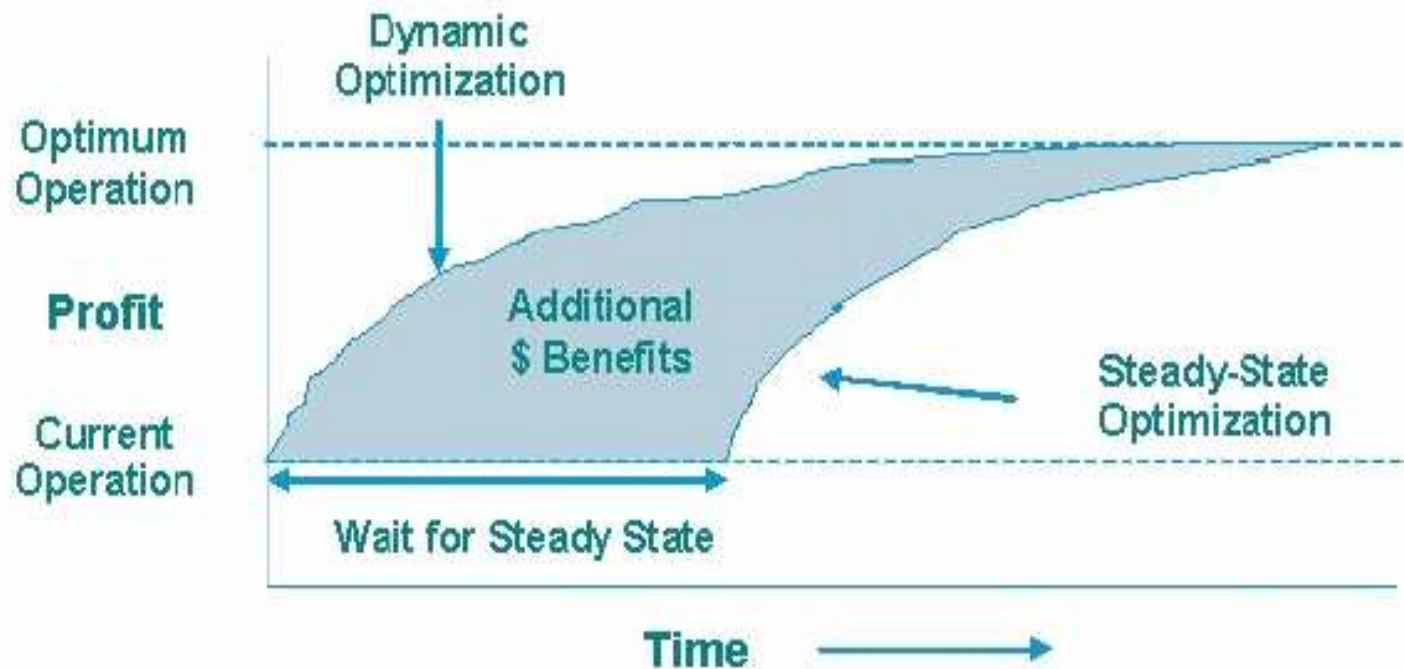
OBJETIVOS DEL CONTROL DE PROCESOS

- ❑ **Objetivo 1: Estabilización y reducción de la varianza**



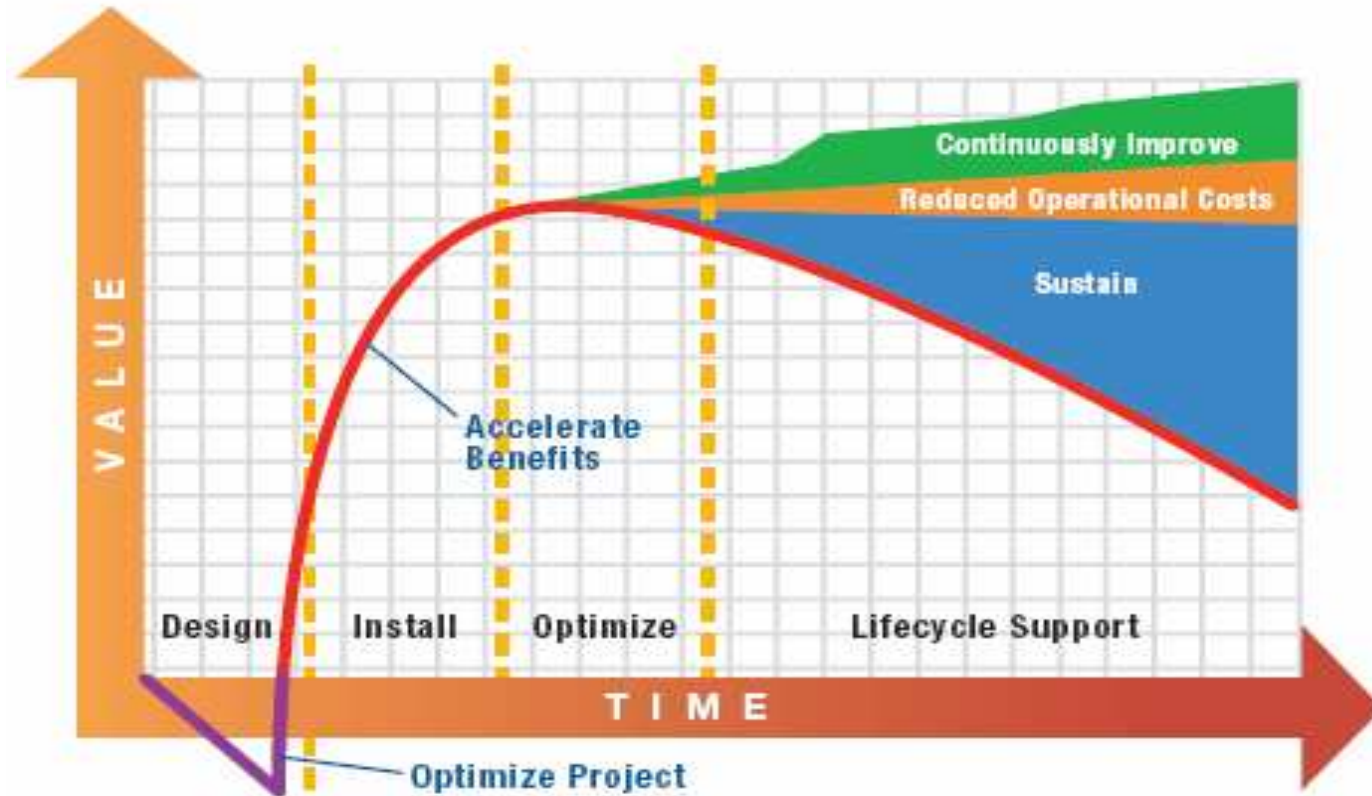
OBJETIVOS DEL CONTROL DE PROCESOS

- ❑ **Objetivo 2: Optimización (tiempo de respuesta, producción, calidad)**



OBJETIVOS DEL CONTROL DE PROCESOS

- ❑ Objetivo 3: Sustentabilidad en el ciclo de vida

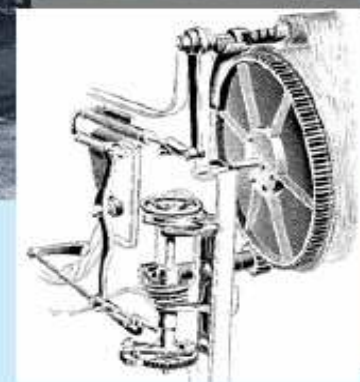
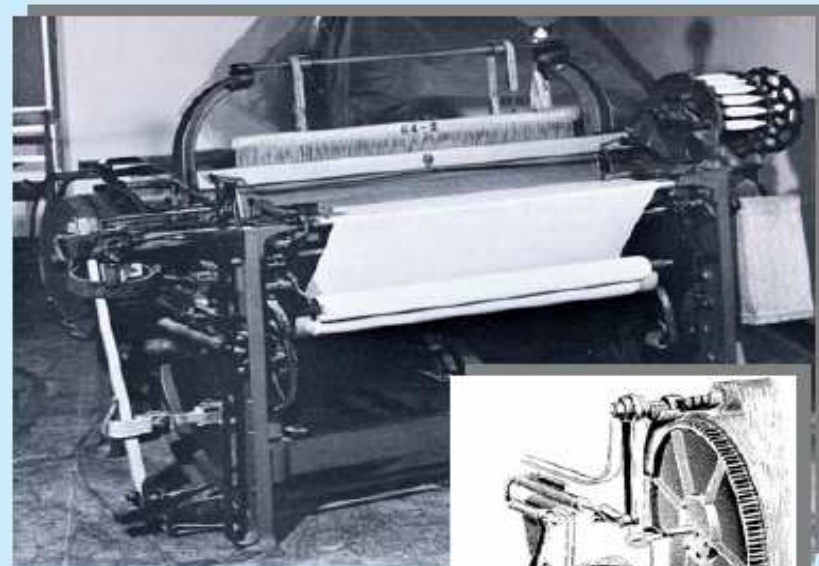


AUTOMATIZACION Y CONTROL

19th Century: First Automatic Machines



"Lap" (Steam) Engine,
James Watt , 1788:
continuous control operation



Power Loom
with Bartlett Let-off Mechanism:
discontinuous control operation

AUTOMATIZACION Y CONTROL

Processing
Industries
(Continuous)

DCS,
Motion Control



Hybrid
Industries
(Continuous/Batch)
+ Discrete)

+ Discrete)
DCS + PLC,
Motion Control

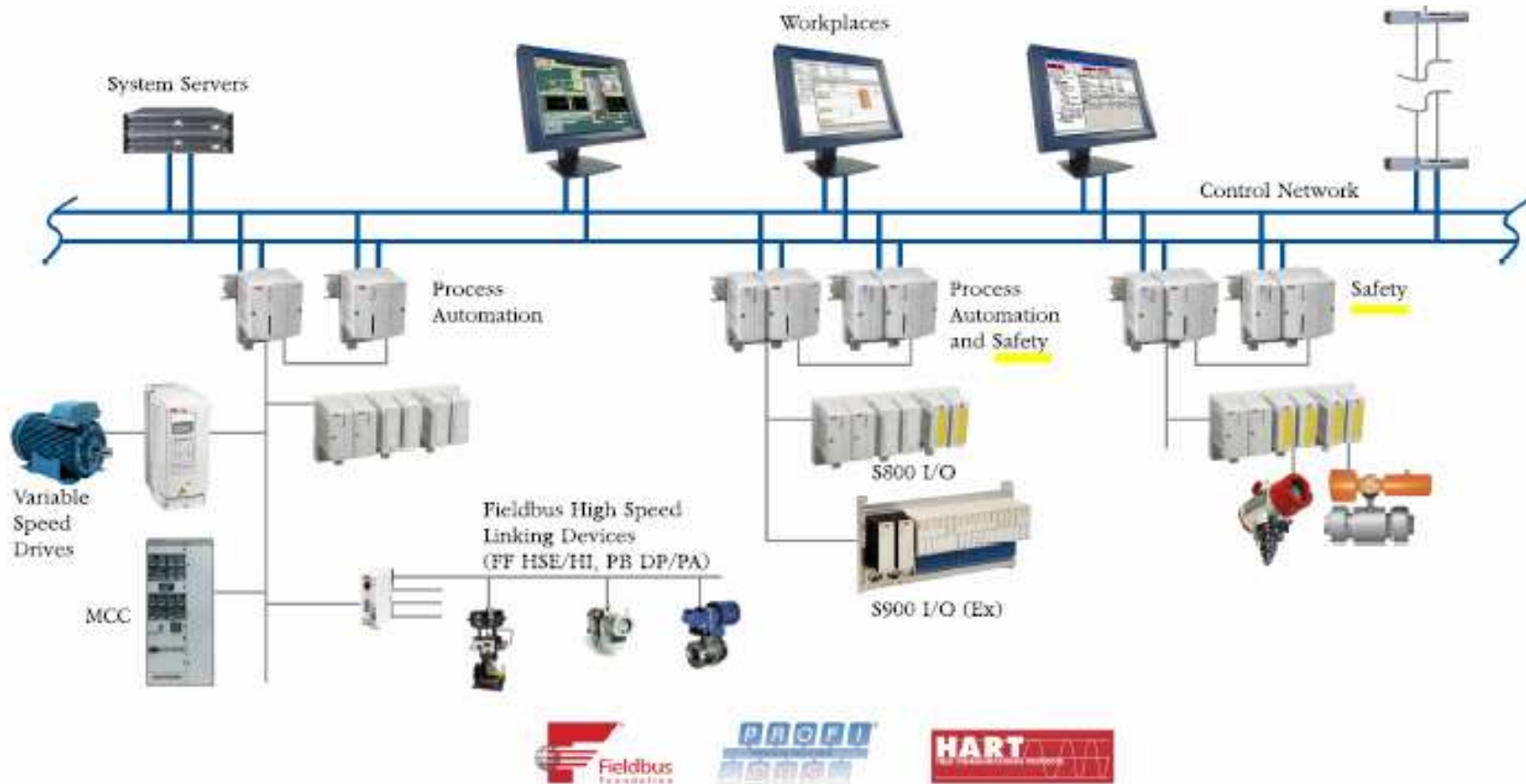


Manufacturing
Industries
(Discrete)

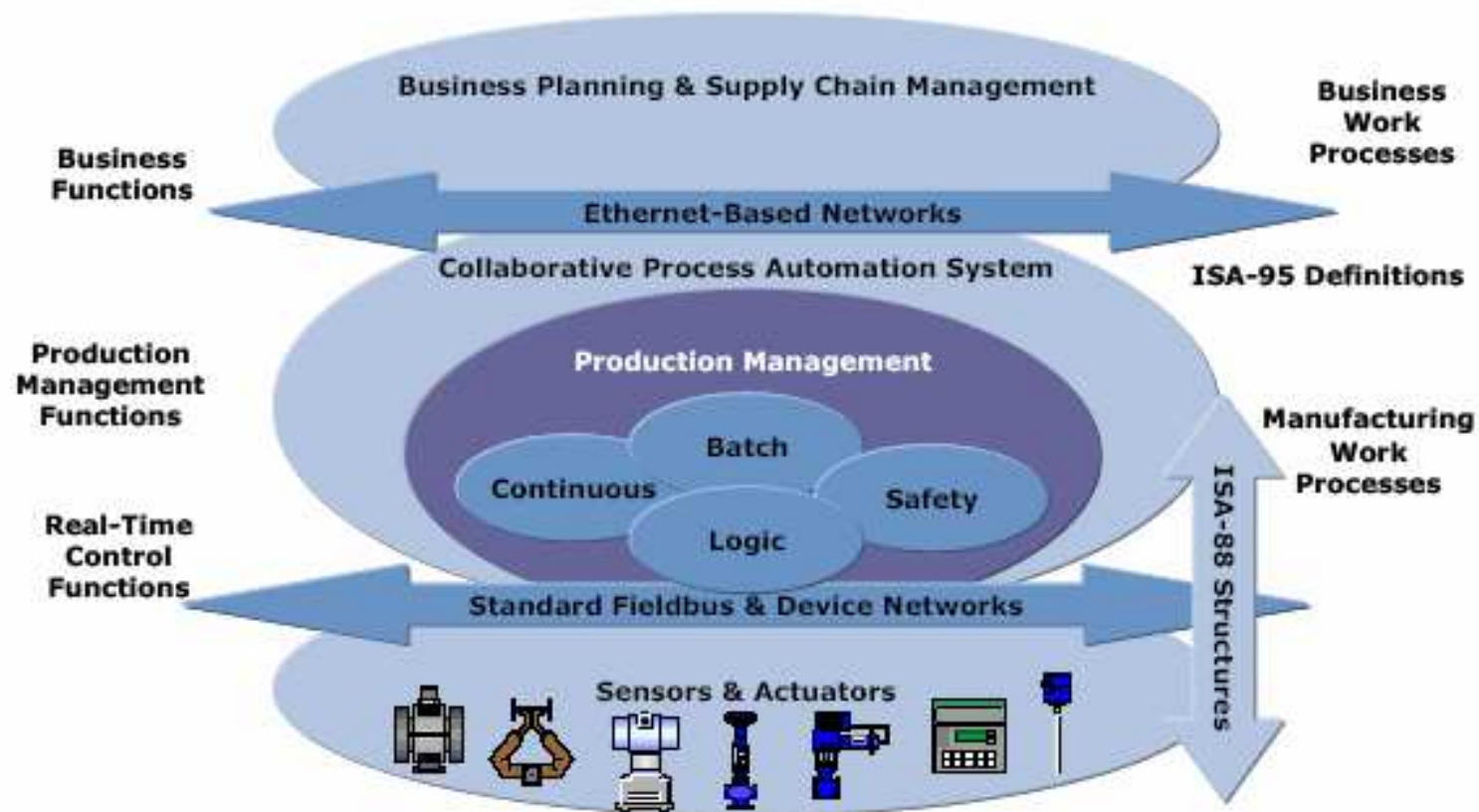
PLC, CNC,
Motion Control



AUTOMATIZACION Y CONTROL

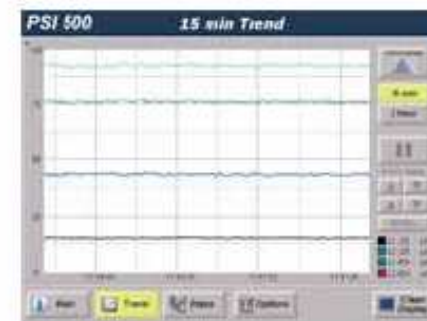
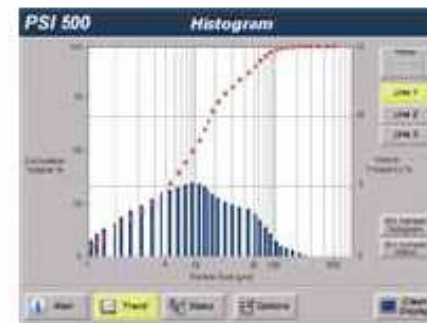


AUTOMATIZACION Y CONTROL



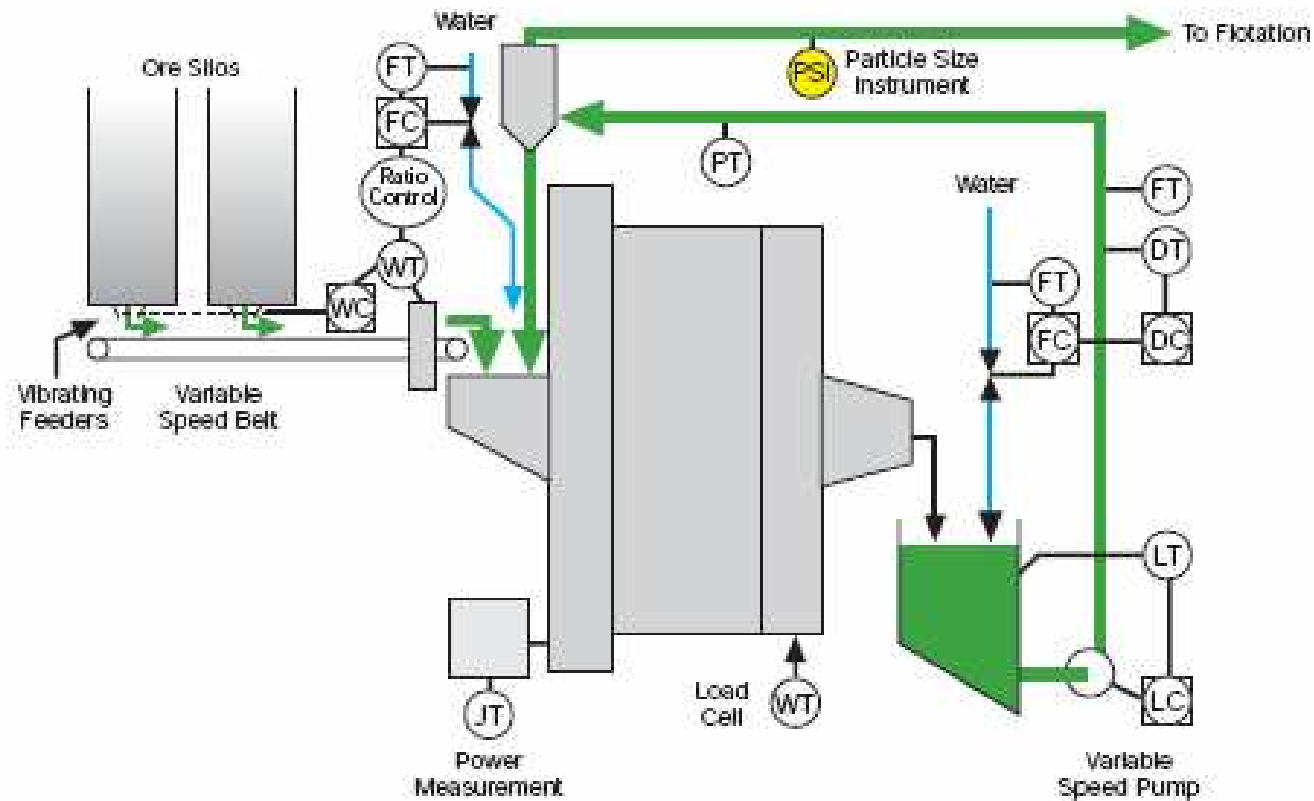
NUEVOS DESARROLLOS EN SENSORES

- ❑ **PSI-500, Outotech: Analizador en línea de tamaño de partículas**



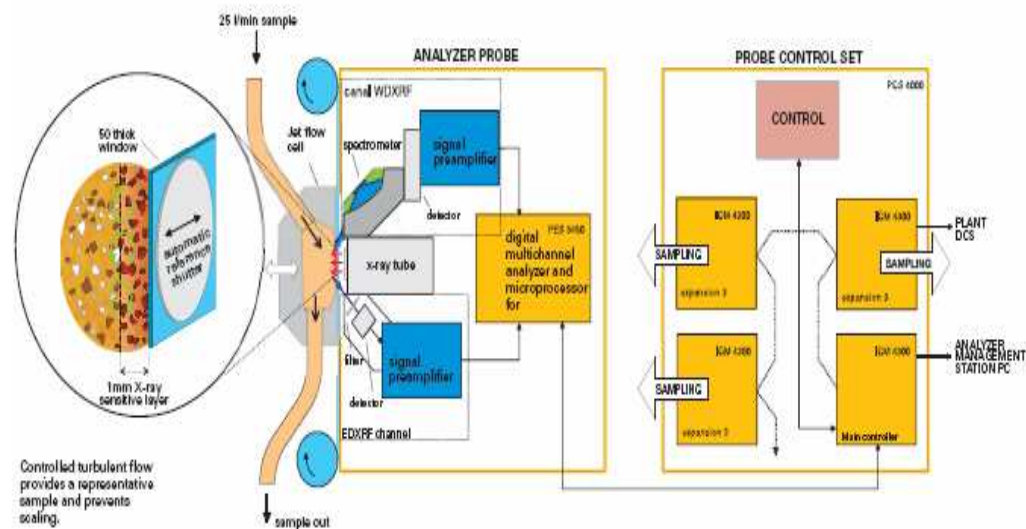
NUEVOS DESARROLLOS EN SENSORES

❑ PSI-500, Outotech: Aplicación



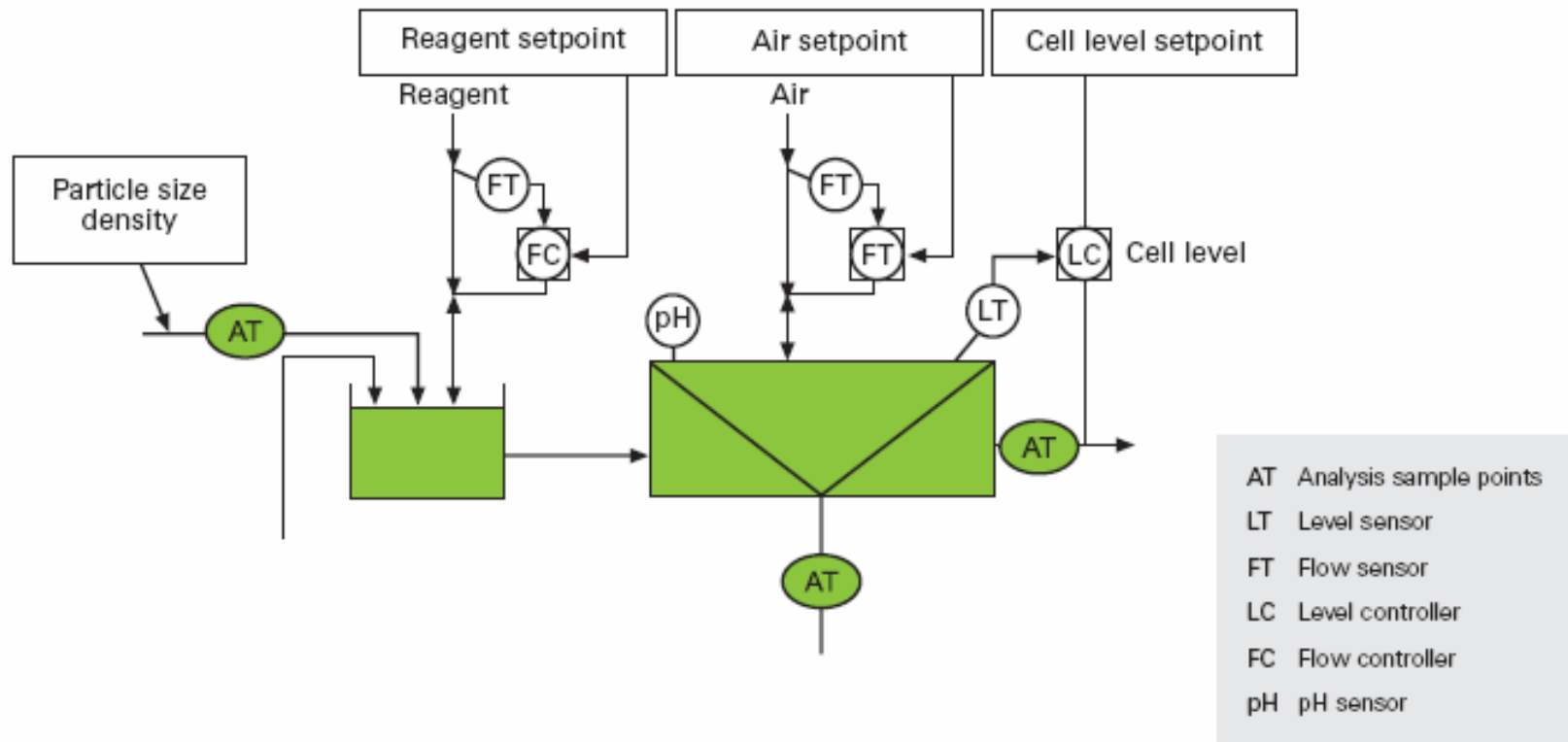
NUEVOS DESARROLLOS EN SENSORES

- ❑ **COURIER 6 SL, Outotech: Analizador en línea de pulpas de flotación**



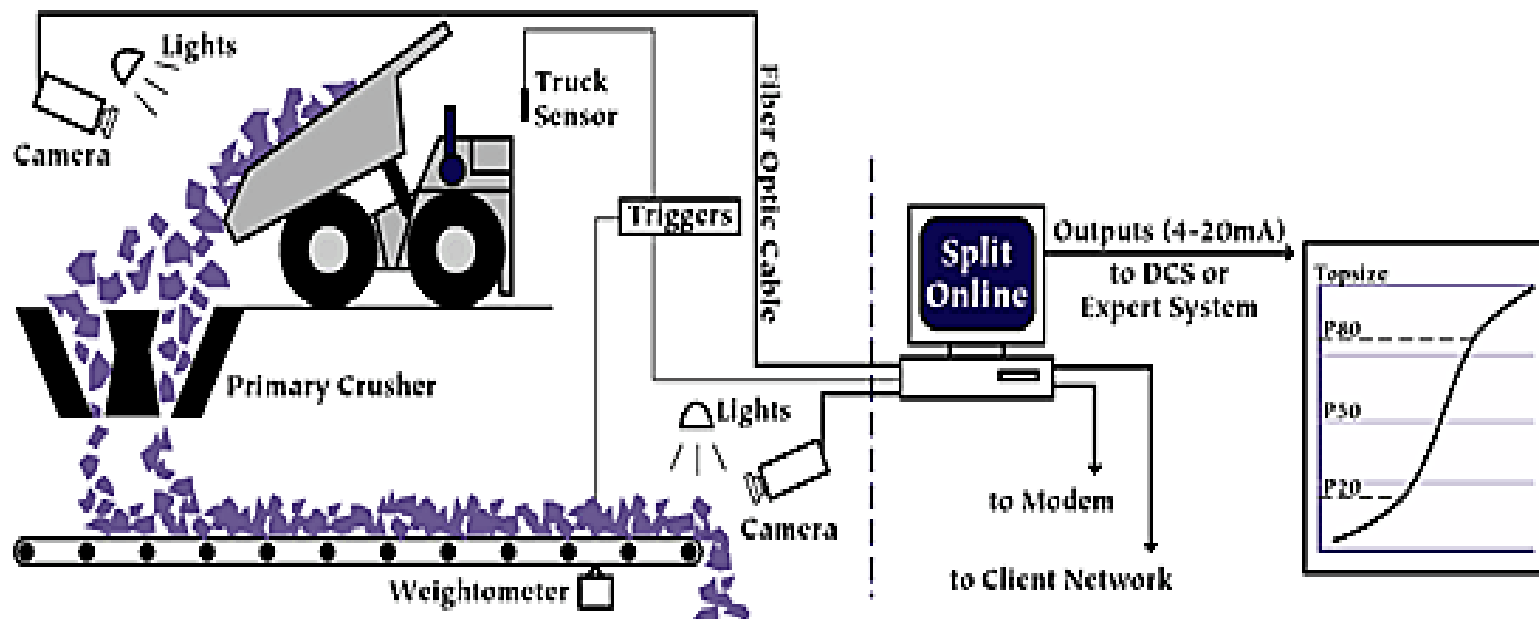
NUEVOS DESARROLLOS EN SENSORES

❑ COURIER 6 SL, Outotech: Aplicación



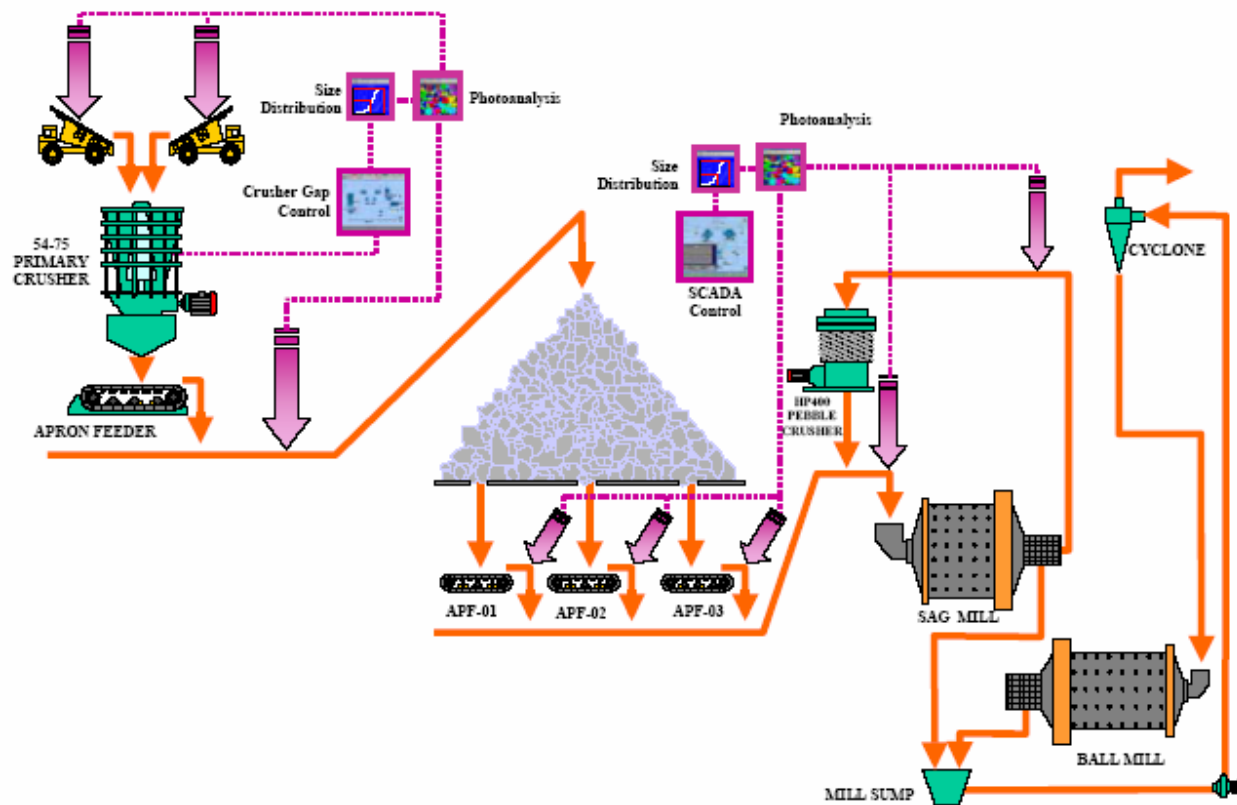
SENSORES VISUALES

❑ Split OnLine, Split Engineering



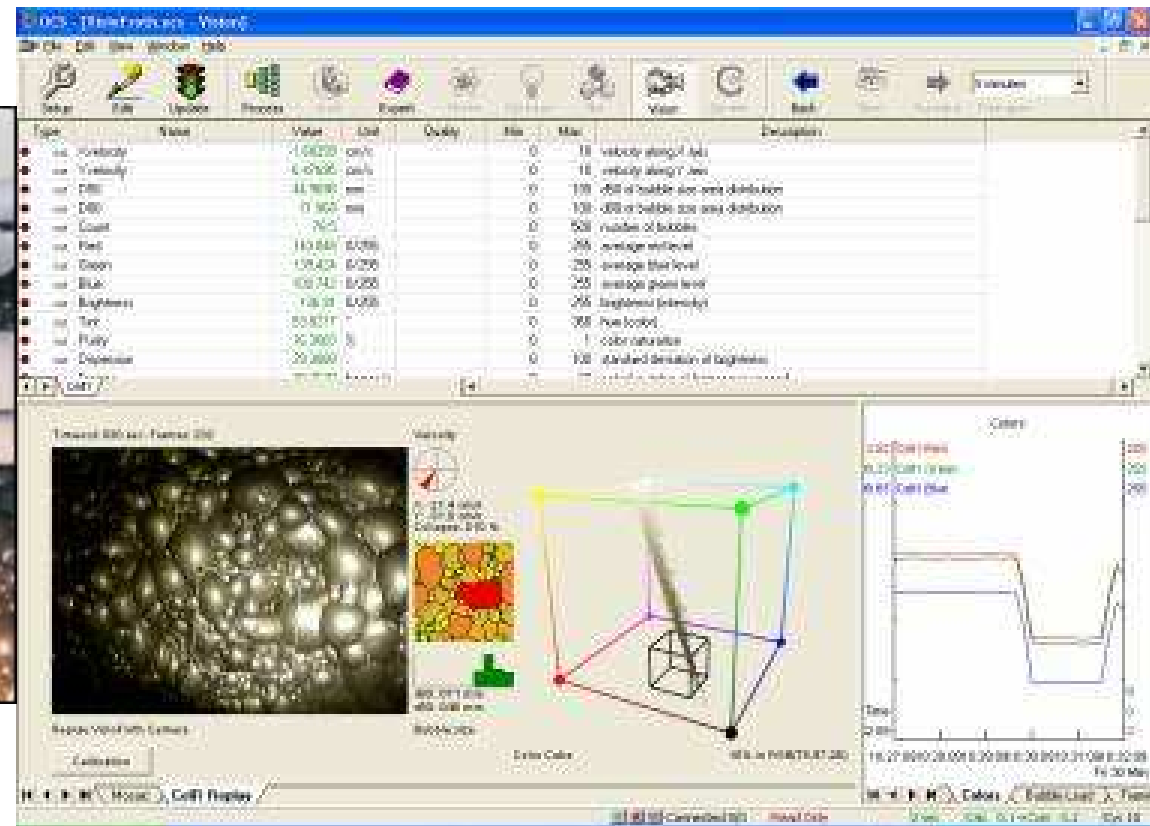
SENSORES VISUALES

❑ Split OnLine, Aplicación

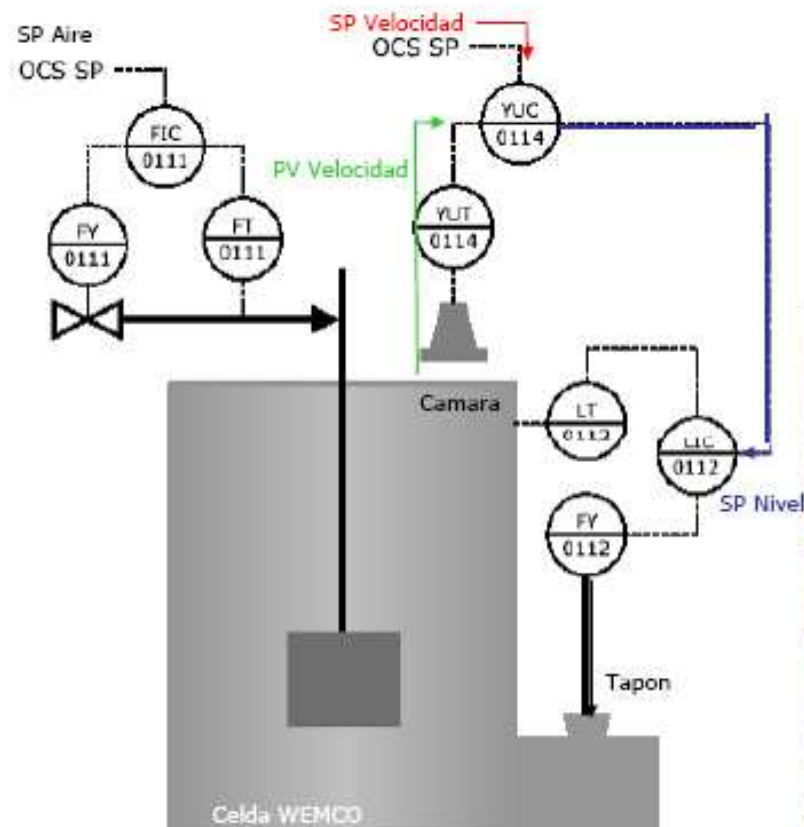


SENSORES VISUALES

VisioFroth, Metso Minerals



CONTROL CON SENSORES VISUALES

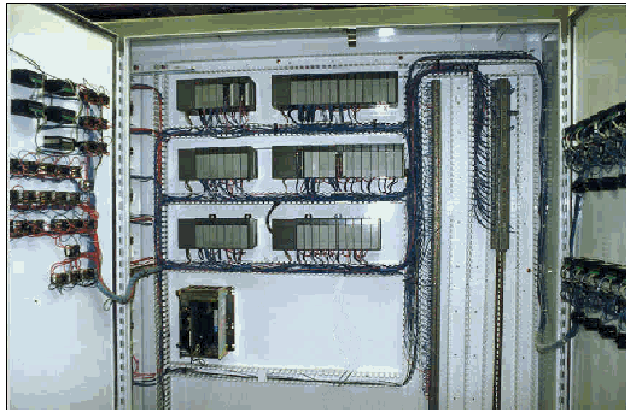


Escondida: Instalación en la Flotación
Primaria Líneas 1,2,3,4,5,6
(54 Camaras)



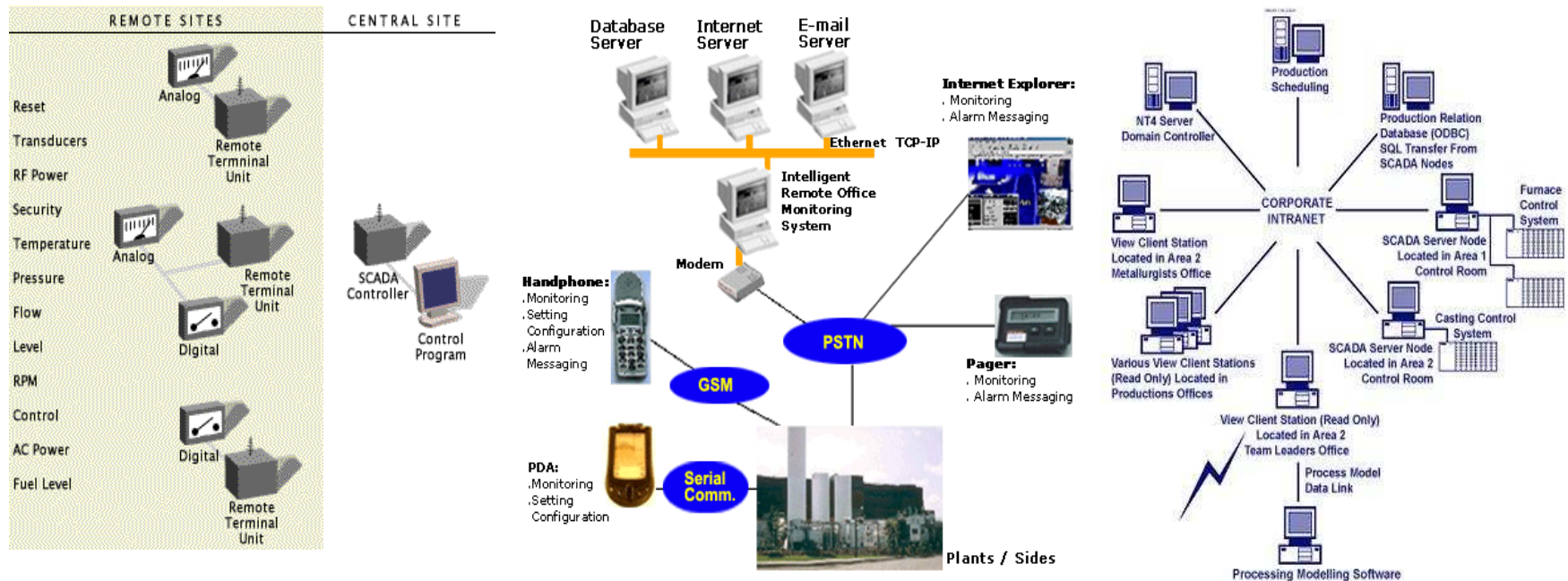
SISTEMAS DE AUTOMATIZACION

❑ PLC: Programmable Logic Controllers



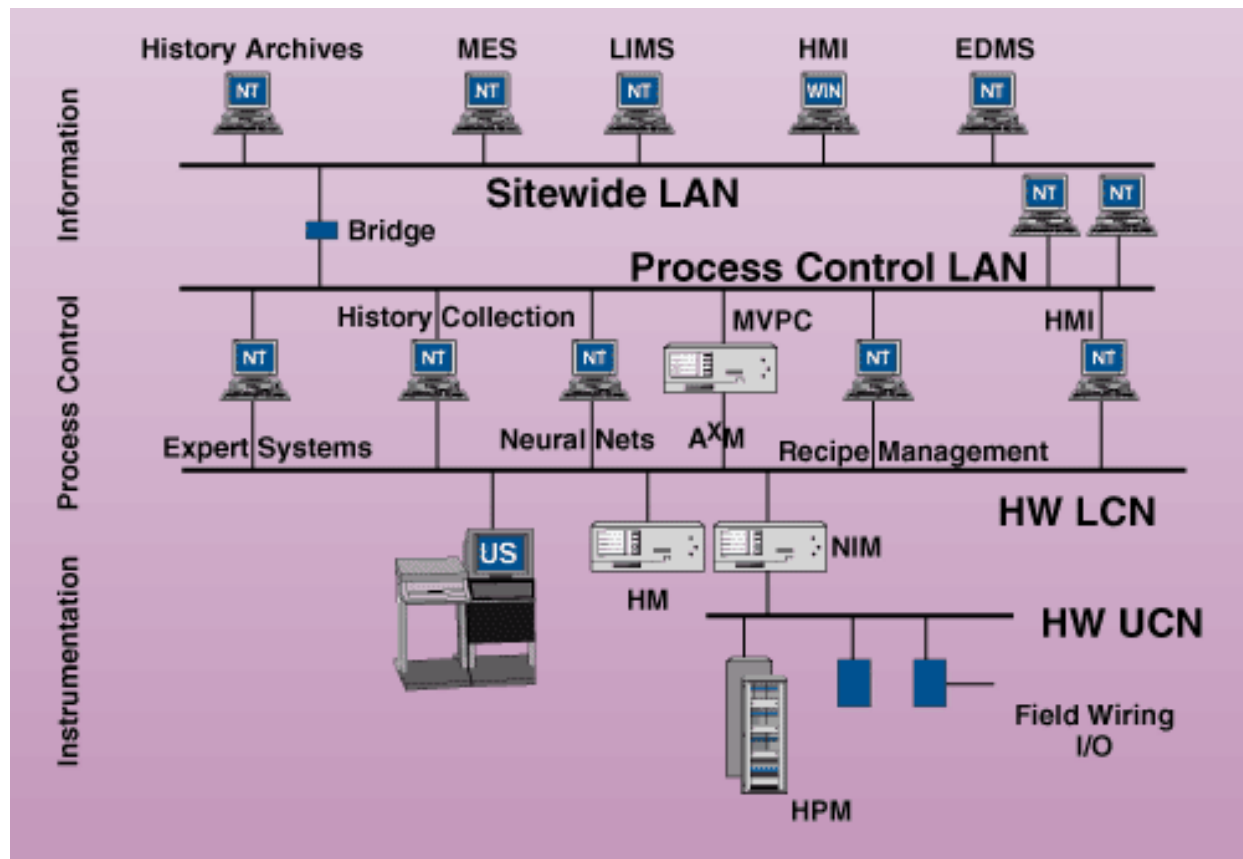
SISTEMAS DE AUTOMATIZACION

SCADA: Supervision Control and Data Acquisition



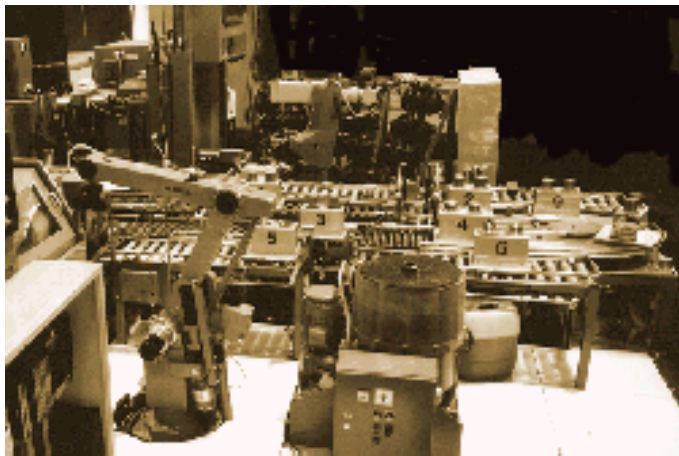
SISTEMAS DE AUTOMATIZACION

❑ DCS: Distributed Control Systems

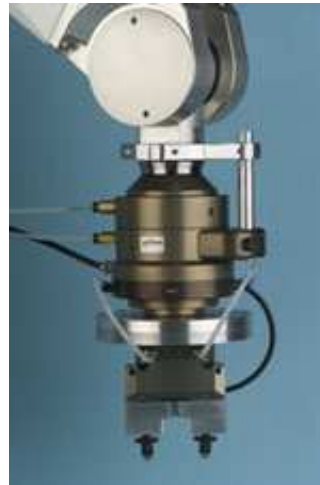


SISTEMAS ROBOTICOS Y AUTONOMOS

❑ Manipuladores robóticos



Sistema de manufactura flexible



Juntura rotatoria.



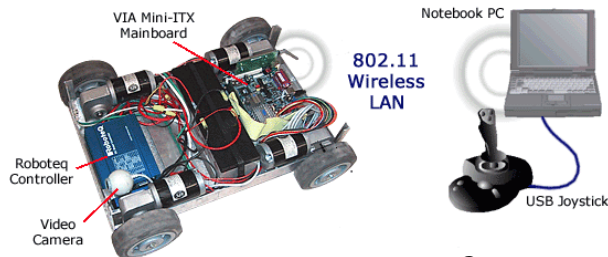
Grúa articulada



Grúa industrial



Suburu – Sistema Manipulador



Componentes de un vehículo robotizado

SISTEMAS ROBOTICOS Y AUTONOMOS

- ❑ Mining Robotics - Sciro
 - LHD y camiones autónomos



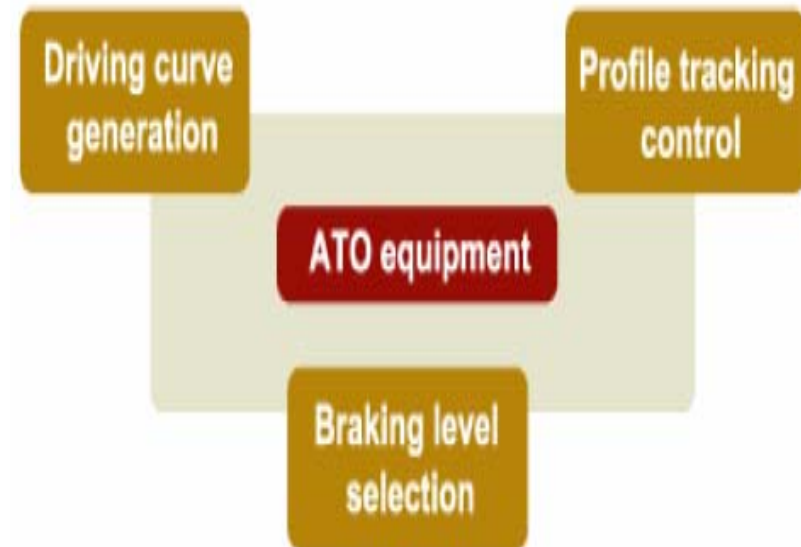
SISTEMAS ROBOTICOS Y AUTONOMOS

AutoMine®: Arquitectura del sistema



SISTEMAS ROBOTICOS Y AUTONOMOS

- ❑ Ferrocarriles con ATO, Automatic Train Operation



SISTEMAS ROBOTICOS Y AUTONOMOS

- ❑ Camiones autónomos, Komatsu

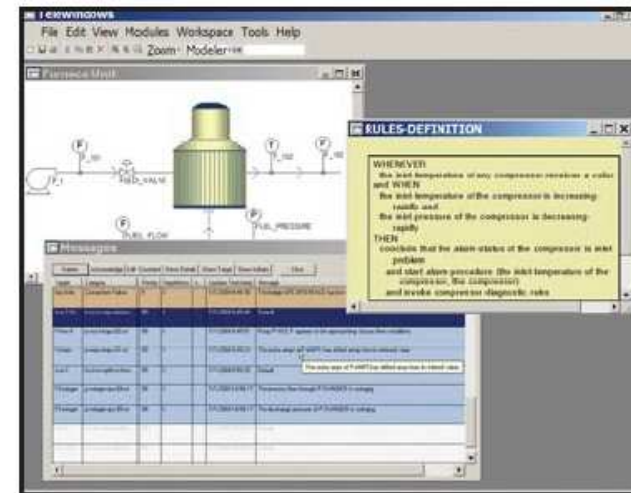


SISTEMAS INTELIGENTES

❑ G2, Gensym



Next-generation G2 offers deployment flexibility through a cross-platform client/server architecture.

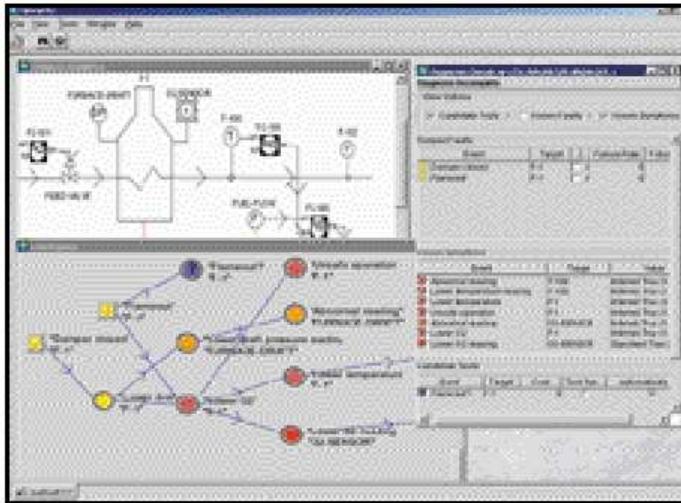


Next-generation G2's entirely new Telewindows enables developers to deploy G2 solutions with a full Microsoft Windows look-and-feel for greater ease-of-use. Next-generation G2 also introduces new message management tools to support highly scalable, distributed operator advisory and alarm management applications.

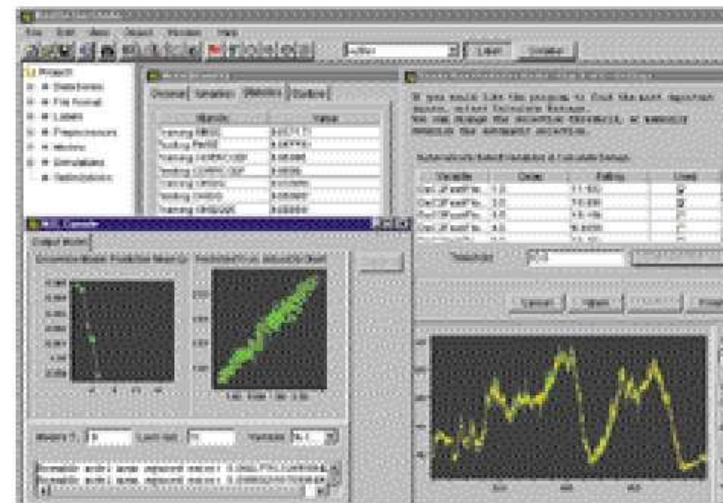
SISTEMAS INTELIGENTES

❑ G2, Gensym

- Optegrity: para optimización de procesos
- NeurOn-Line: para modelación neuronal.



With Optegrity, developers visually build reasoning models that describe the cause-effect relationship between problems and their symptoms.



NeurOn-Line Studio enables engineers to quickly create neural-network process models using historical process data and by automating many modeling decisions.

SISTEMAS INTELIGENTES

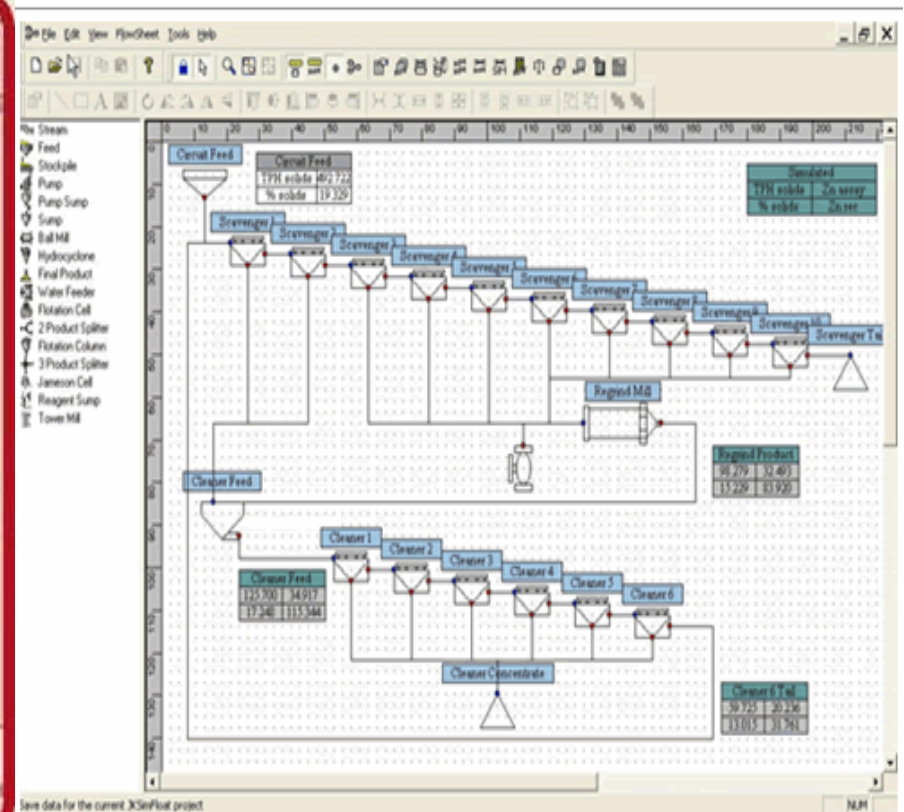
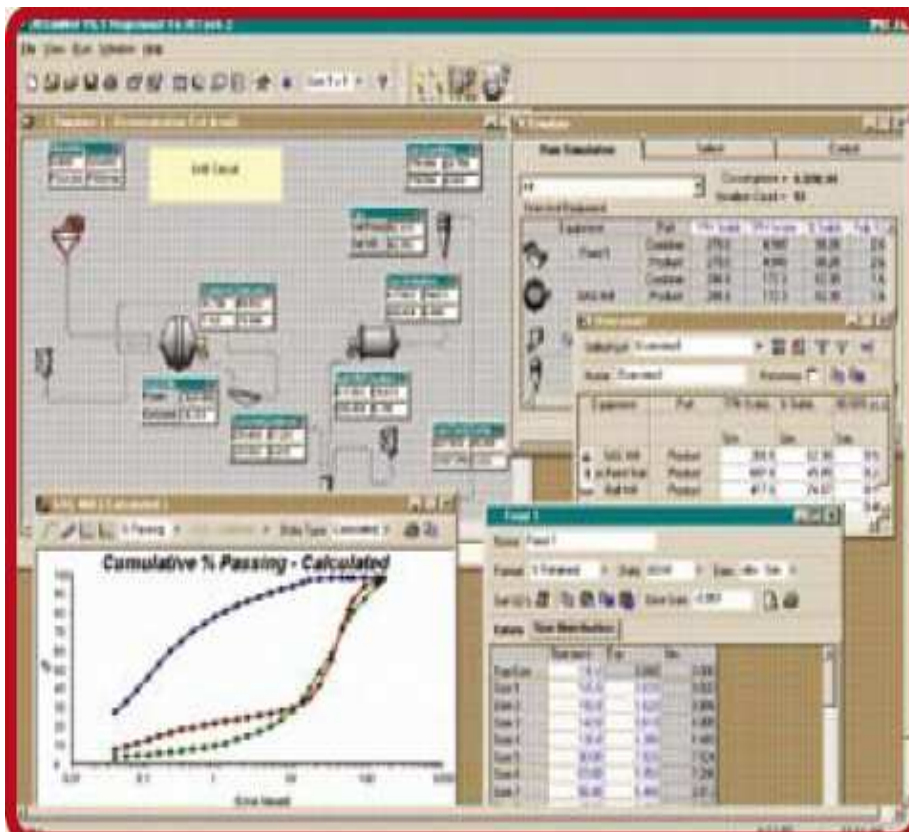
❑ eCM, SmartSignal

Monitorización v diagnóstico con métodos estadísticos.



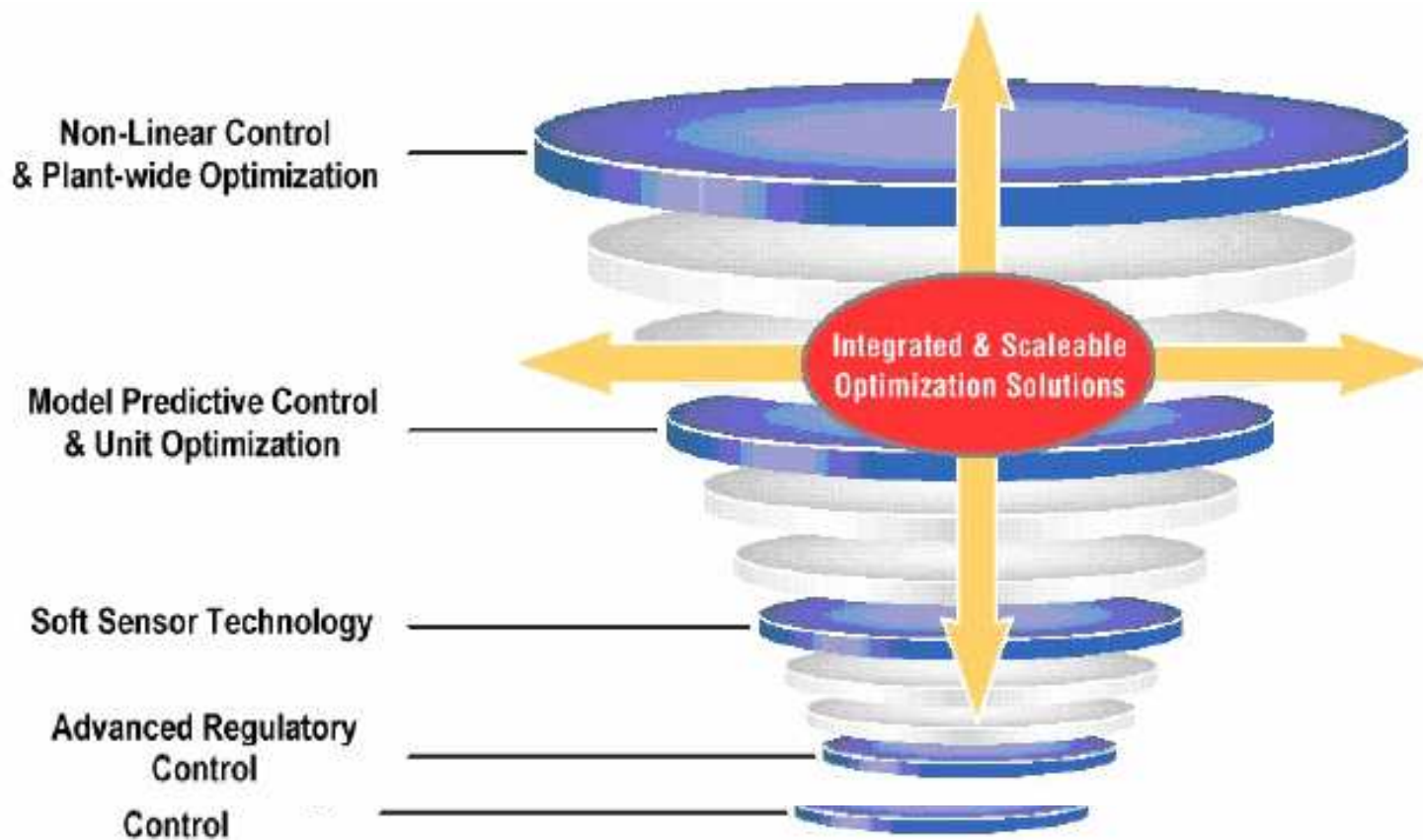
SIMULADORES

JKSimMet y JKSimFloat, JKTech



ARQUITECTURAS DE CONTROL

❑ Concepto Honeywell



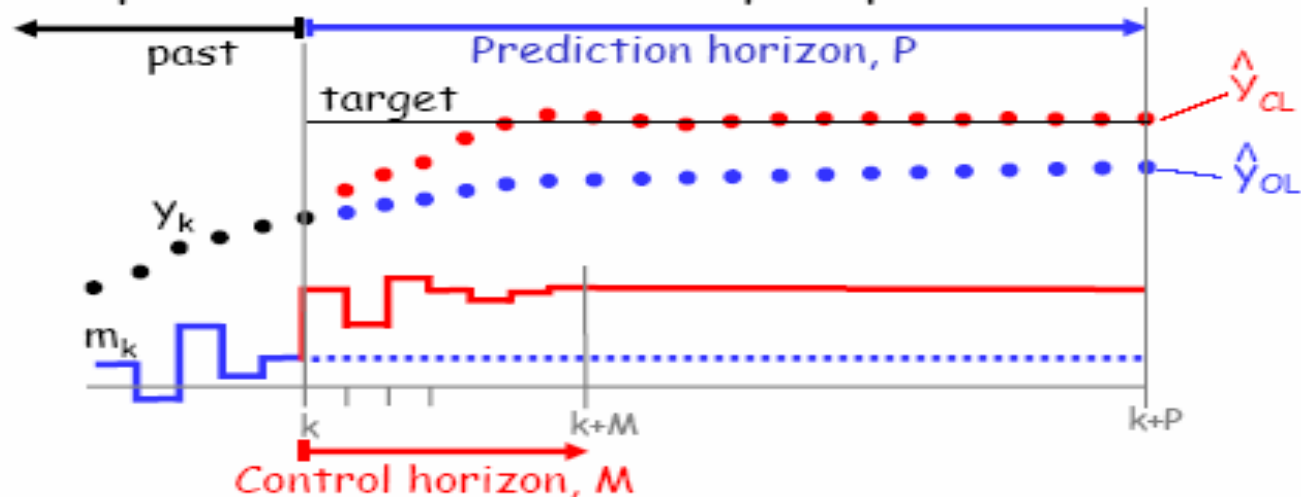
SISTEMAS DE CONTROL PREDICTIVO

Control Predictivo Basado en Modelo

MPC made simple...

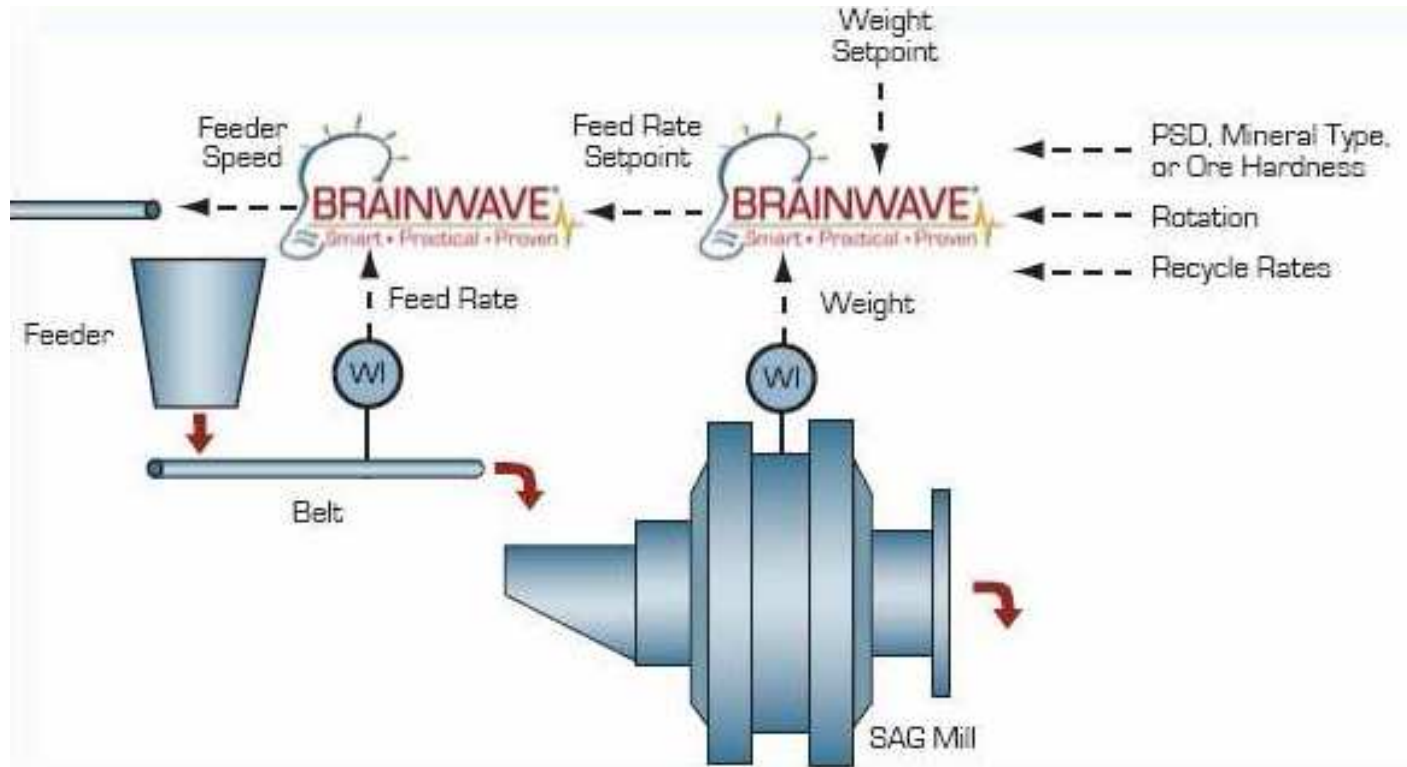
MPC is a model-based control strategy using models in 2 ways:

- Uses a reliable **model** to predict effect of past control moves on P future outputs, assuming no future moves.
- Uses the same **model** to compute the optimal M controller moves. Implement first move and repeat procedure.



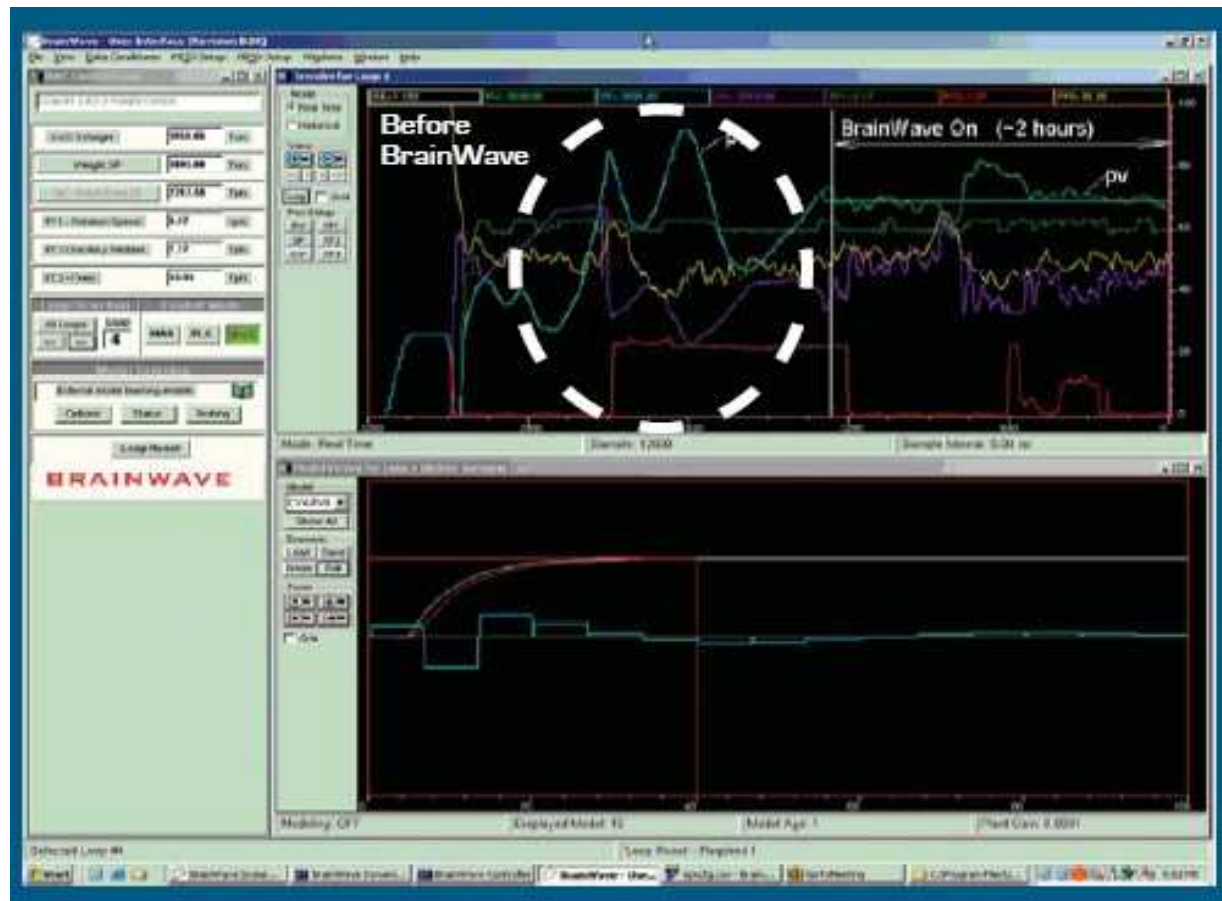
SISTEMAS DE CONTROL PREDICTIVO

❑ BrainWave, Aplicación



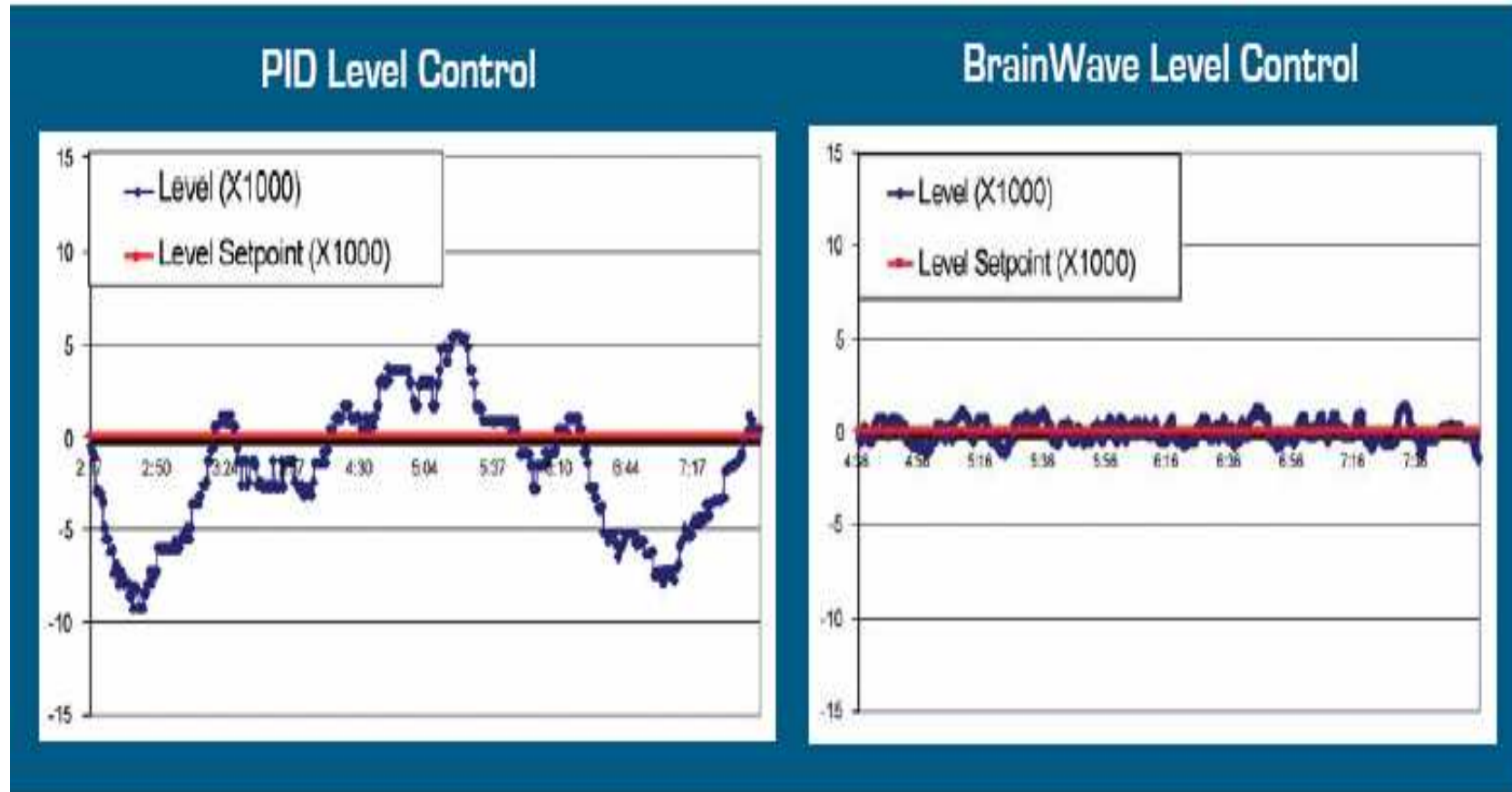
SISTEMAS DE CONTROL PREDICTIVO

❑ BrainWave, Aplicación a molienda SAG



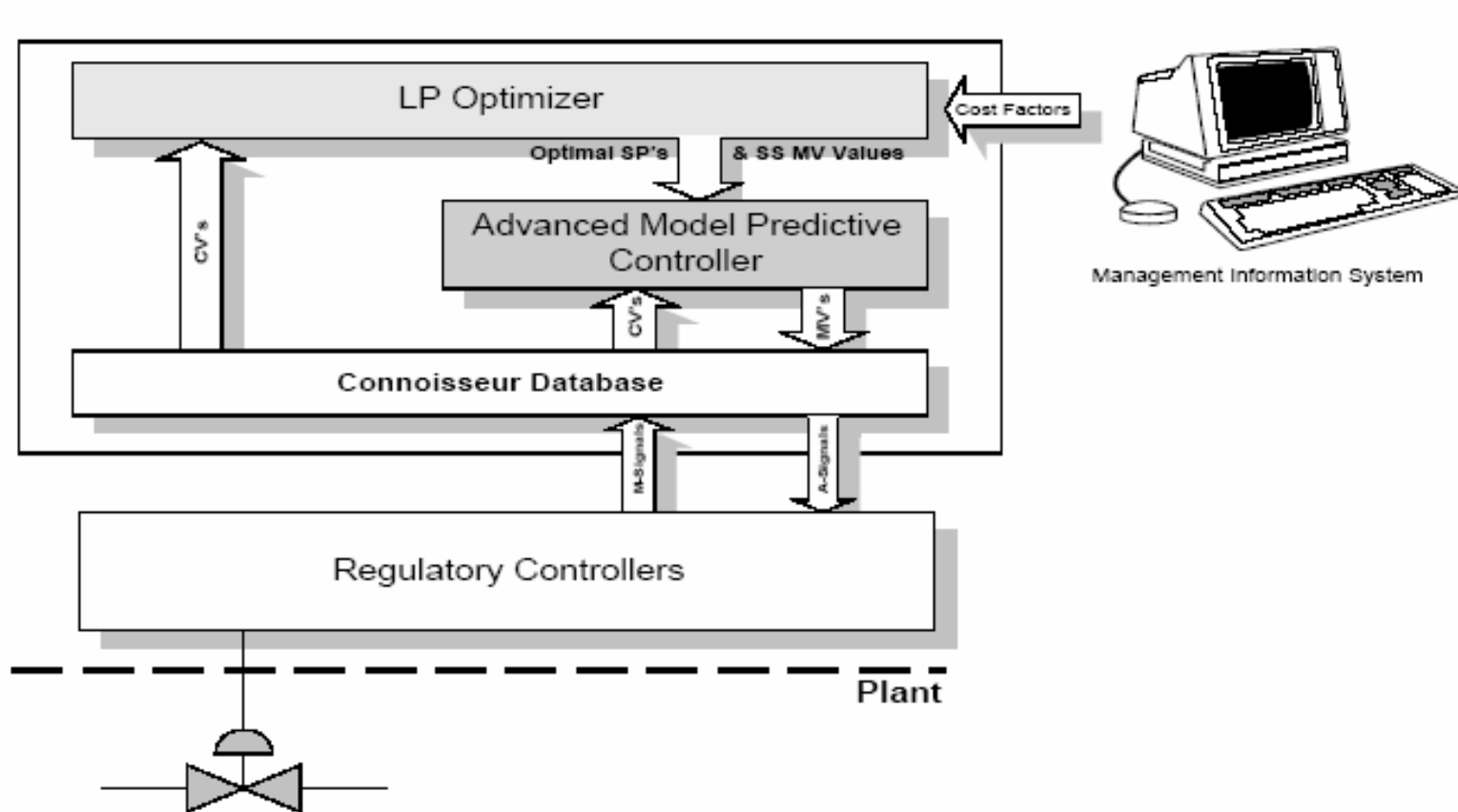
SISTEMAS DE CONTROL PREDICTIVO

❑ BrainWave, Aplicación



SISTEMAS DE CONTROL PREDICTIVO

❑ Connaisseur, Invensys



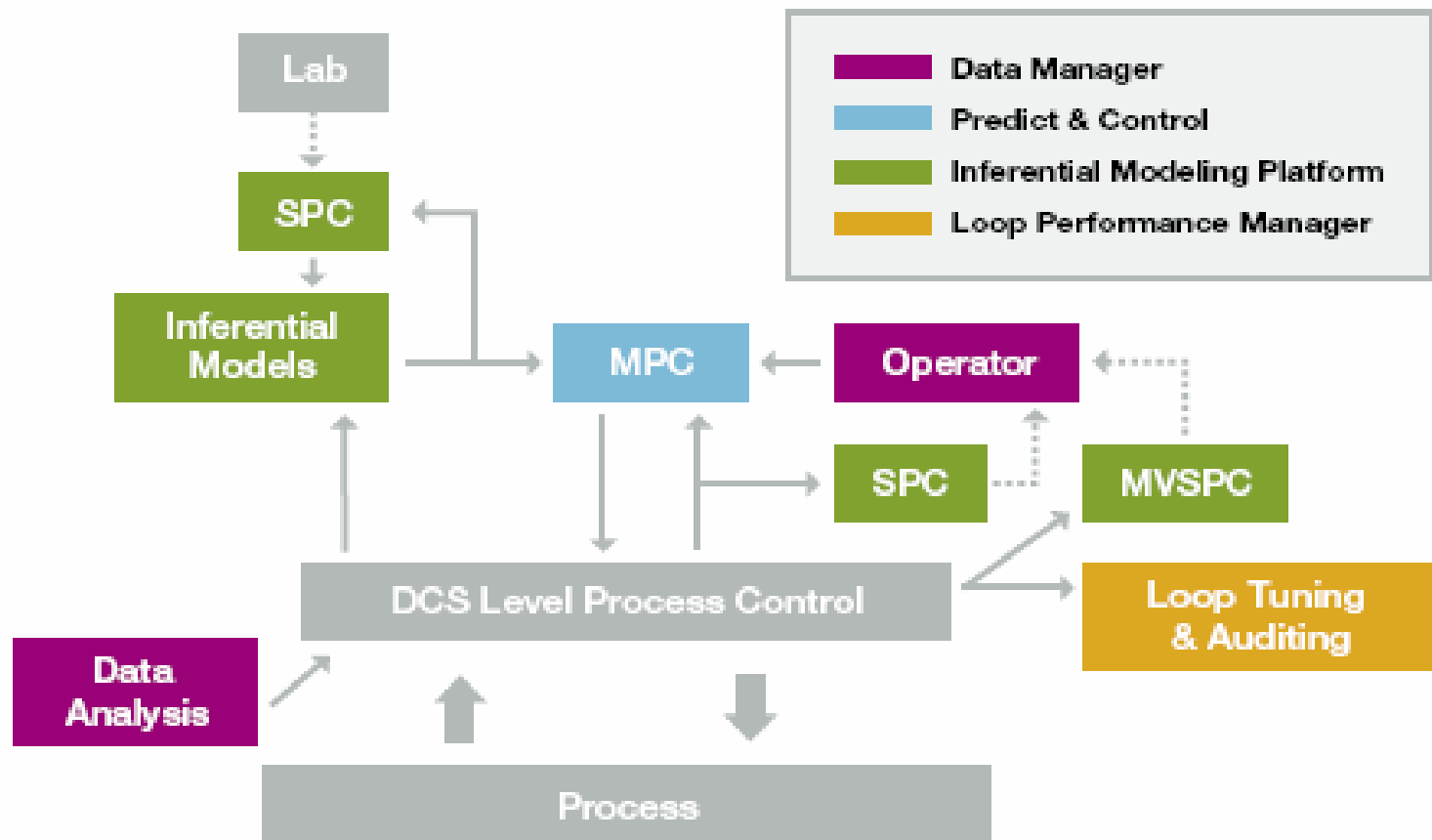
SISTEMAS DE CONTROL PREDICTIVO

□ FIR Model, Connisseur, Invensys

$$\begin{aligned}
 & [\mathbf{M1000}_{k+4} - \mathbf{M1000}_k] = \begin{bmatrix} -0.003 \\ -0.004 \\ 0.253 \\ 0.430 \\ 0.344 \\ 0.276 \\ 0.220 \\ 0.177 \\ 0.141 \\ 0.113 \\ 0.089 \\ 0.072 \\ 0.057 \\ 0.046 \\ 0.037 \\ 0.029 \\ 0.023 \\ 0.019 \\ 0.013 \\ 0.011 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} \mathbf{A1000}_k - \mathbf{A1000}_{k-4} \\ \mathbf{A1000}_{k-4} - \mathbf{A1000}_{k-8} \\ \mathbf{A1000}_{k-8} - \mathbf{A1000}_{k-12} \\ \mathbf{A1000}_{k-12} - \mathbf{A1000}_{k-16} \\ \mathbf{A1000}_{k-16} - \mathbf{A1000}_{k-20} \\ \mathbf{A1000}_{k-20} - \mathbf{A1000}_{k-24} \\ \mathbf{A1000}_{k-24} - \mathbf{A1000}_{k-28} \\ \mathbf{A1000}_{k-28} - \mathbf{A1000}_{k-32} \\ \mathbf{A1000}_{k-32} - \mathbf{A1000}_{k-36} \\ \mathbf{A1000}_{k-36} - \mathbf{A1000}_{k-40} \\ \mathbf{A1000}_{k-40} - \mathbf{A1000}_{k-44} \\ \mathbf{A1000}_{k-44} - \mathbf{A1000}_{k-48} \\ \mathbf{A1000}_{k-48} - \mathbf{A1000}_{k-52} \\ \mathbf{A1000}_{k-52} - \mathbf{A1000}_{k-56} \\ \mathbf{A1000}_{k-56} - \mathbf{A1000}_{k-60} \\ \mathbf{A1000}_{k-60} - \mathbf{A1000}_{k-64} \\ \mathbf{A1000}_{k-64} - \mathbf{A1000}_{k-68} \\ \mathbf{A1000}_{k-68} - \mathbf{A1000}_{k-72} \\ \mathbf{A1000}_{k-72} - \mathbf{A1000}_{k-76} \\ \mathbf{A1000}_{k-76} - \mathbf{A1000}_{k-80} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

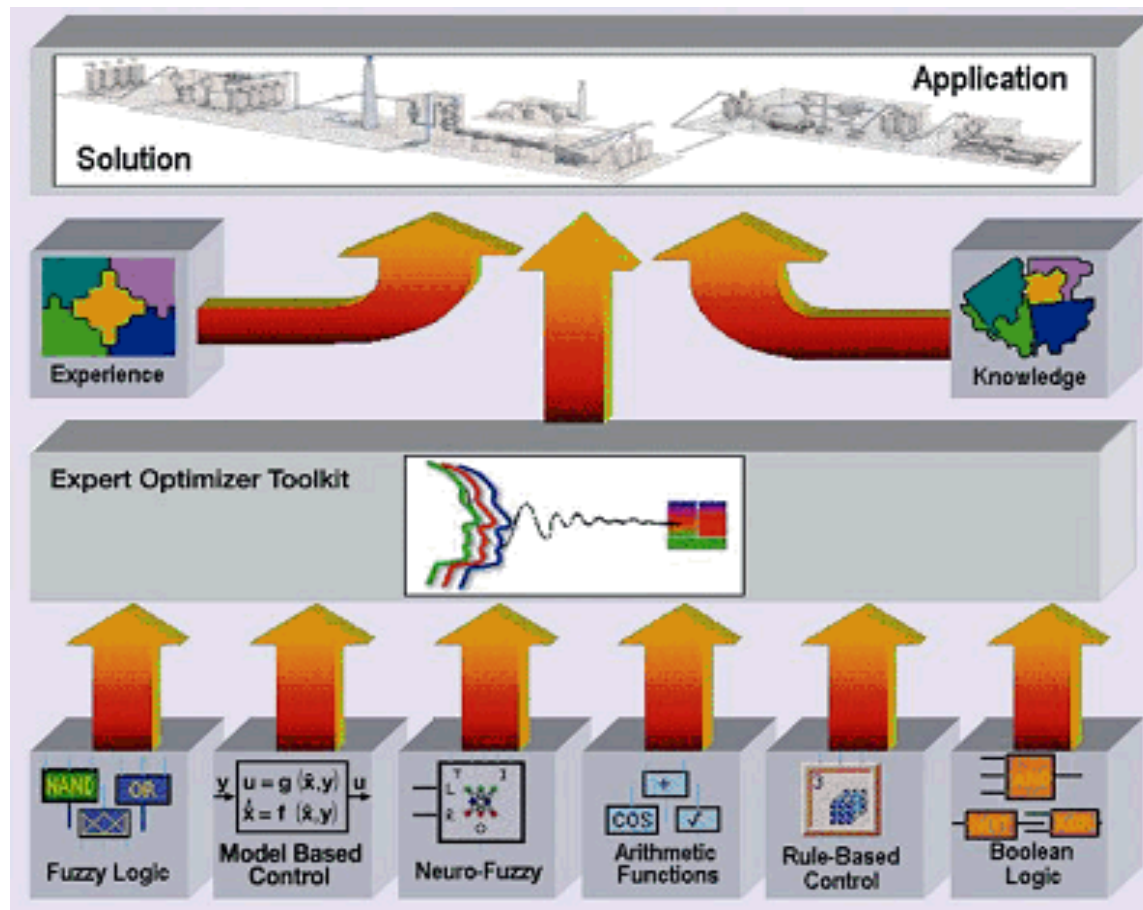
SISTEMAS DE CONTROL PREDICTIVO

Industrial Advanced Process Control, ABB



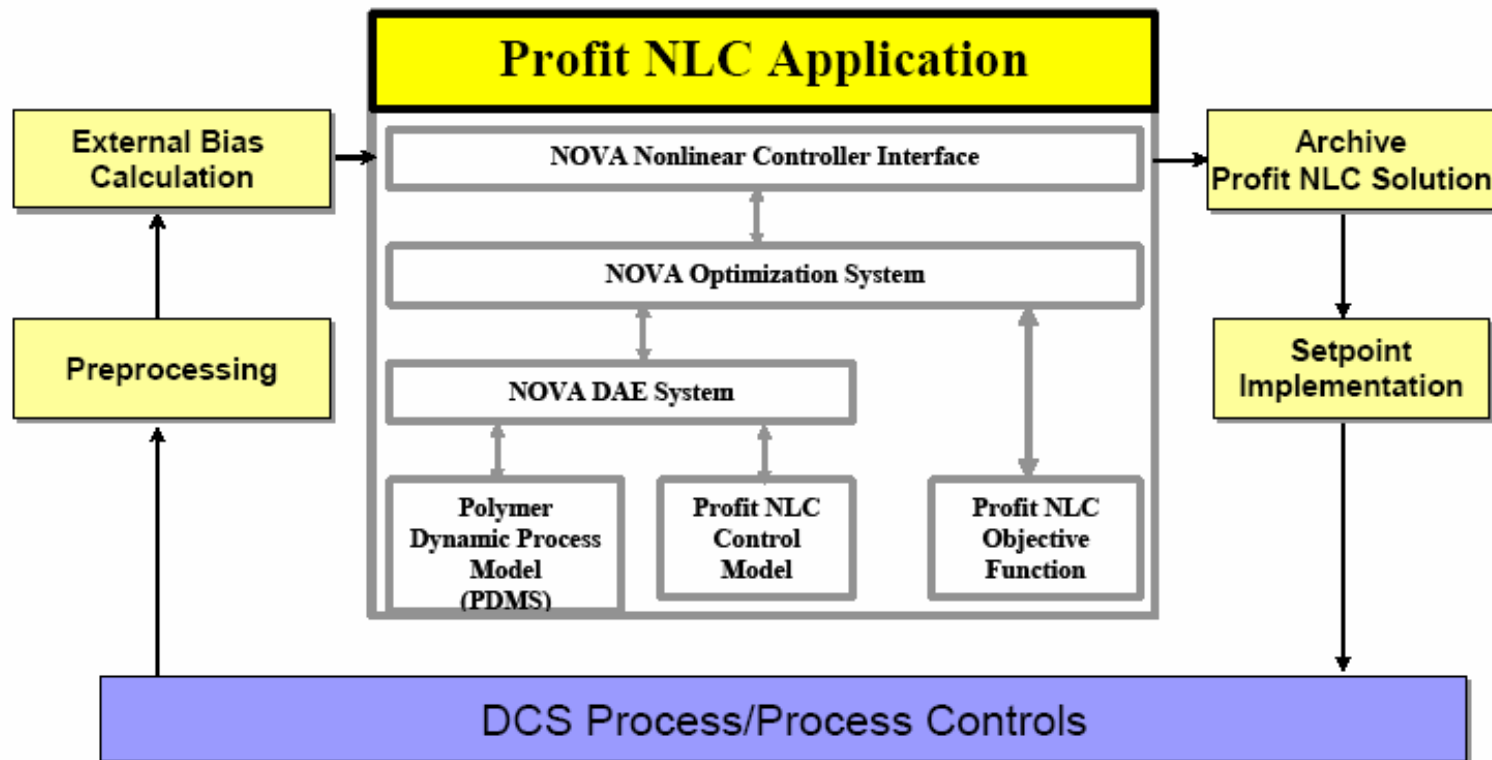
SISTEMAS DE CONTROL PREDICTIVO

❑ Optimize ITT Expert Optimizer, ABB



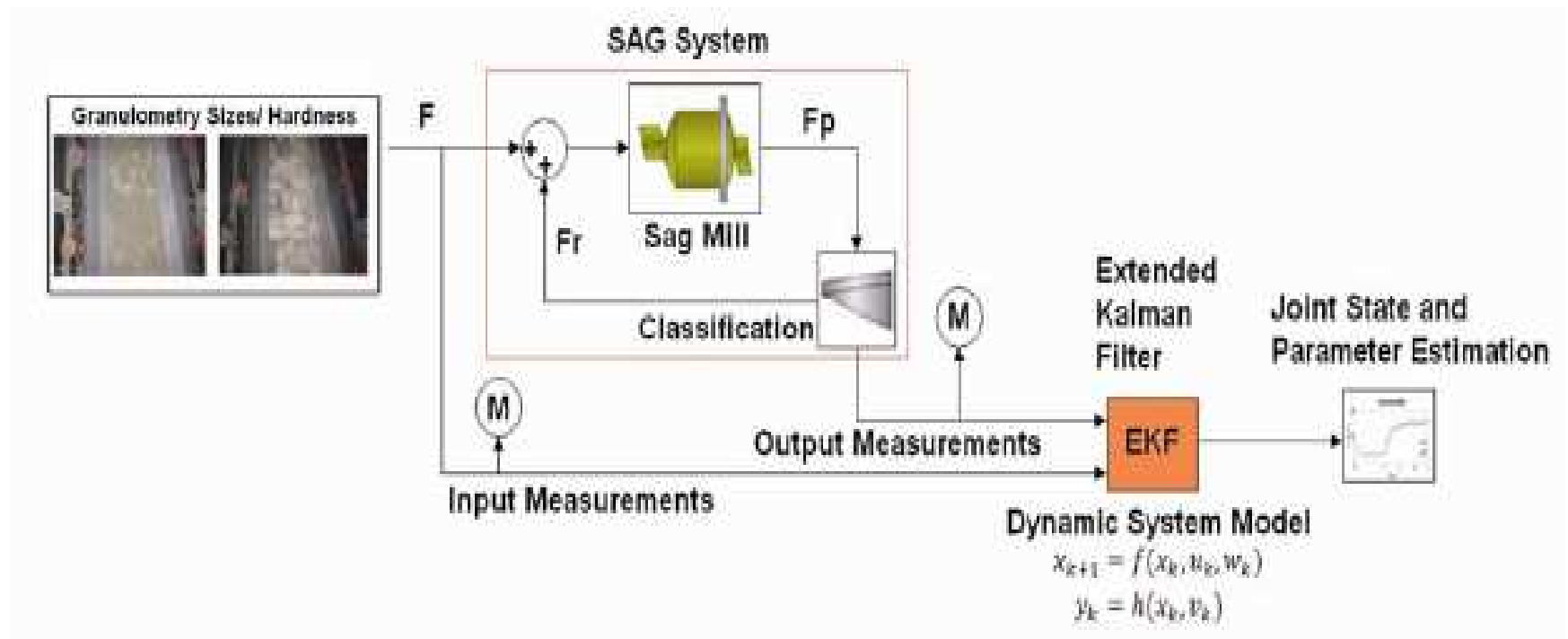
SISTEMAS DE CONTROL PREDICTIVO

❑ Non Linear Controller, Honeywell



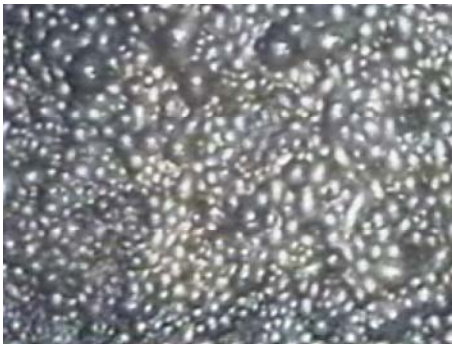
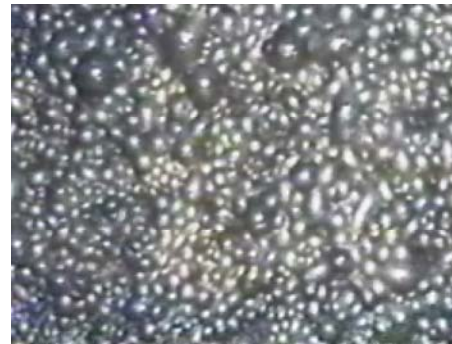
INVESTIGACIONES EN DESARROLLO

- ❑ Estimador de dureza basado en modelo, UC



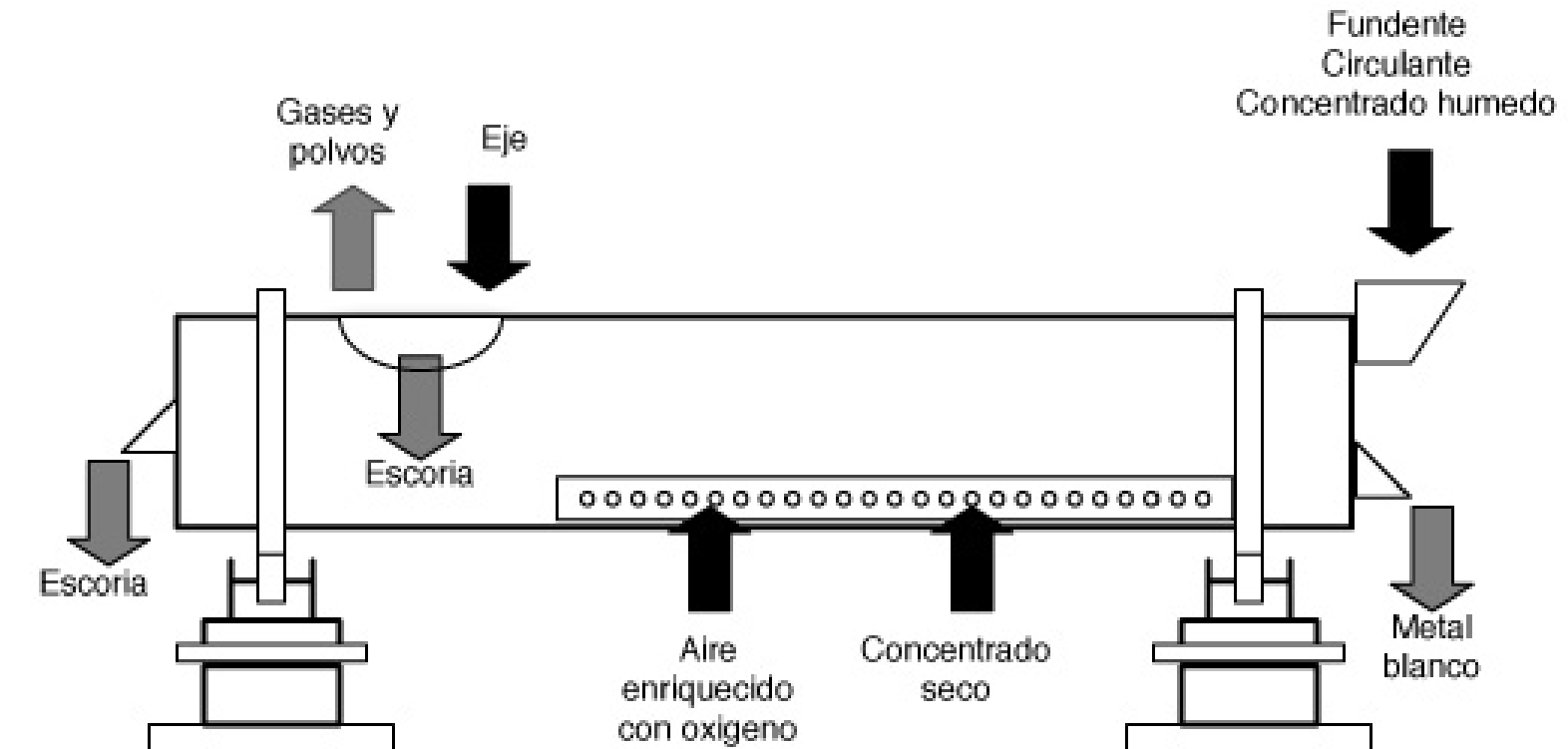
INVESTIGACIONES EN DESARROLLO

- ❑ **Modelo predictivo para los estados de la apariencia superficial, UC**
- Comportamiento del modelo predictivo en $t+1$ y $t+2$.
Arriba: imágenes captadas; Abajo: imágenes predichas.



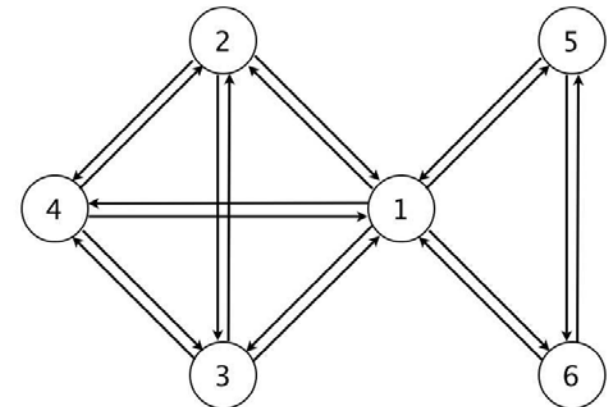
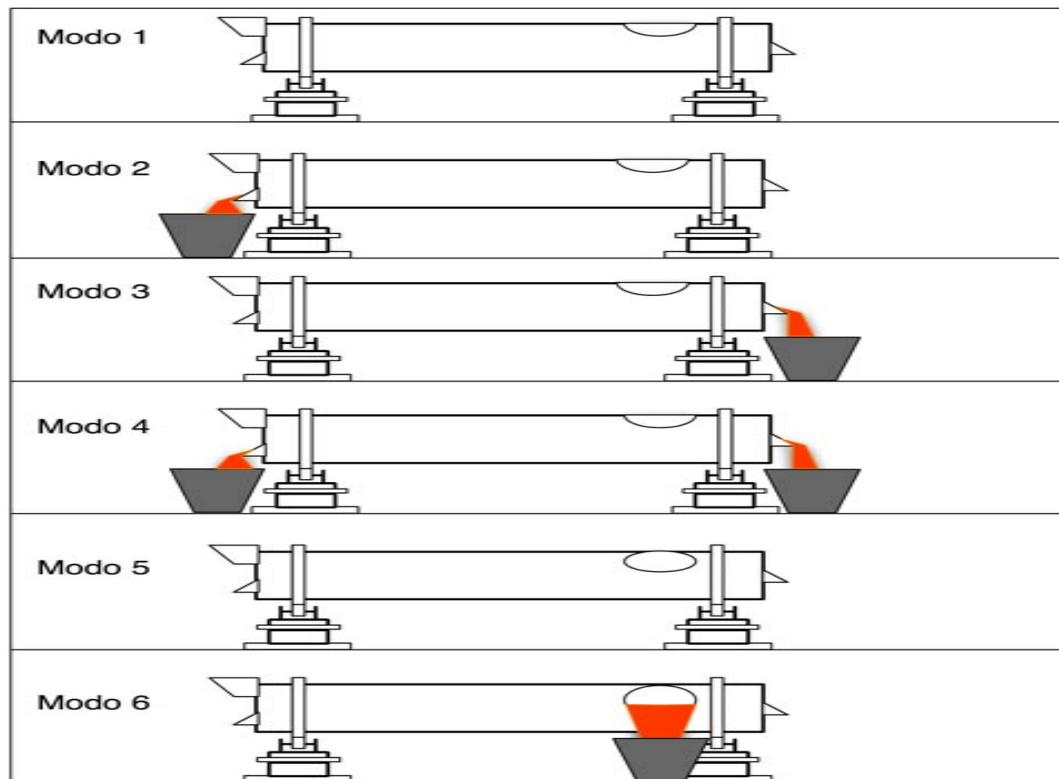
INVESTIGACIONES EN DESARROLLO

Control predictivo híbrido del Convertidor Teniente, UC



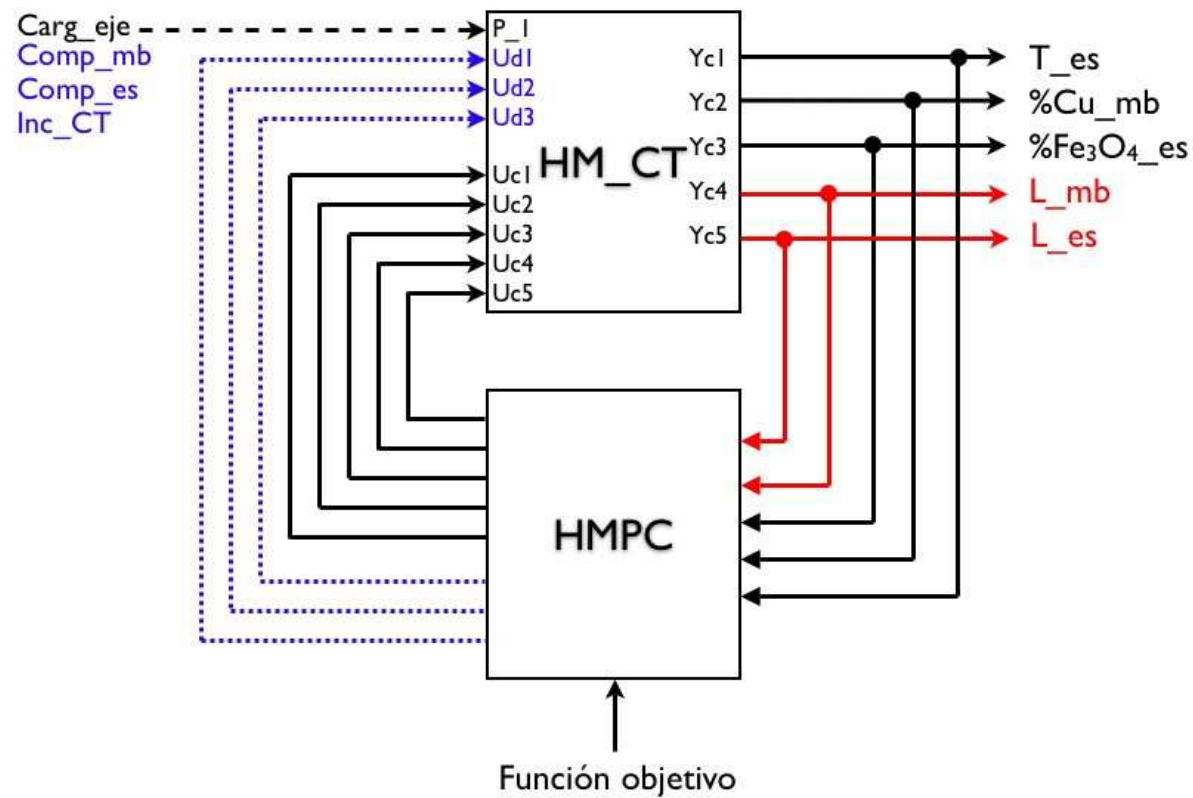
INVESTIGACIONES EN DESARROLLO

- ❑ **Modelo híbrido del Convertidor Teniente: modos de operación y restricciones sobre las transiciones entre modos**



INVESTIGACIONES EN DESARROLLO

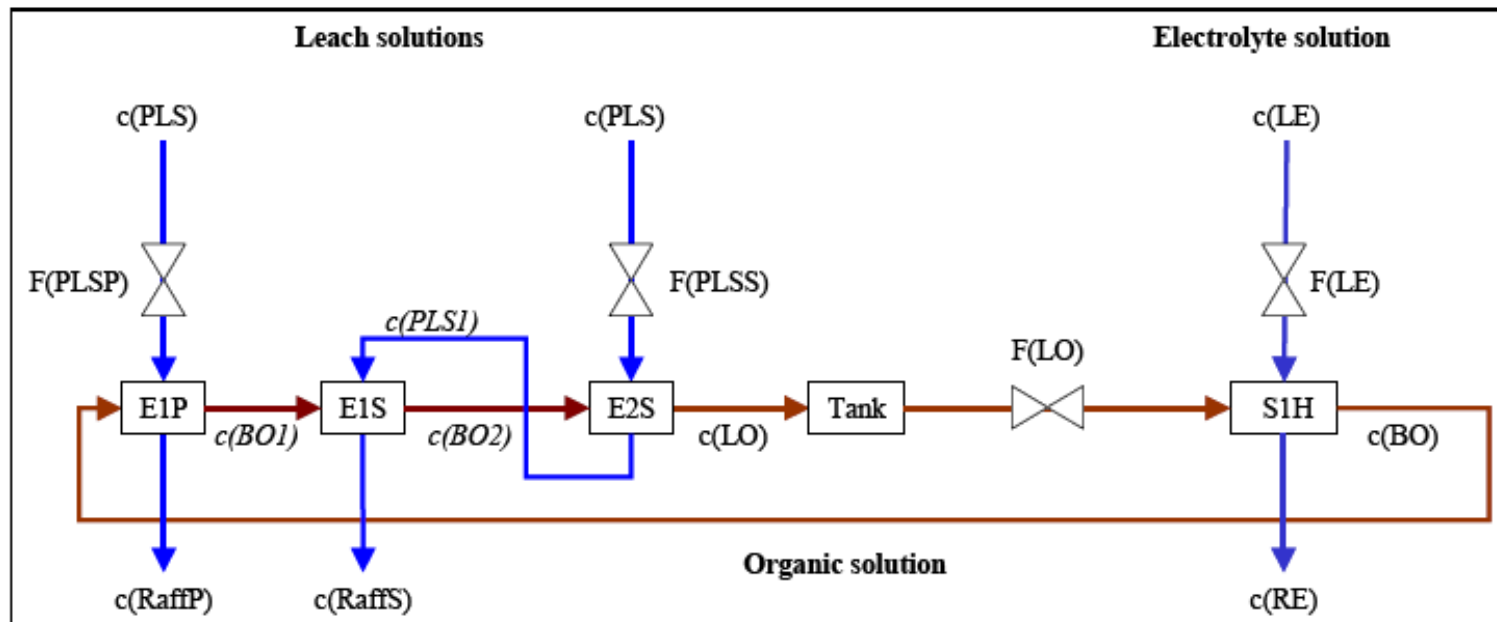
Control Predictivo Híbrido del Convertidor Teniente, UC



INVESTIGACIONES EN DESARROLLO

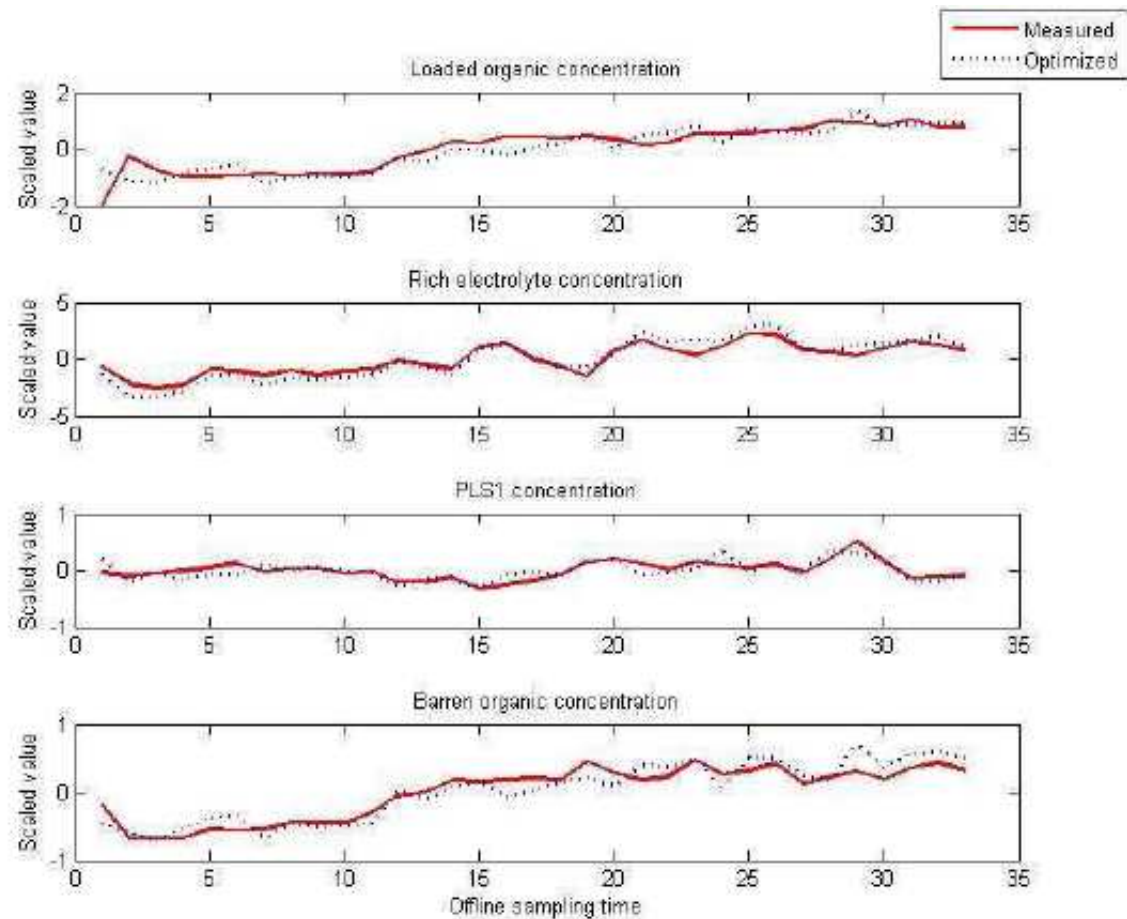
❑ MPC para procesos de extracción por solvente, HUT

- PLS: Pregnant Leach Solution; LE: Lean Electrolyt
- LO: Loaded Organic; Raff: Raffinate
- RE: Reach Electrolyte; BO: Barren Organic
- C: Concentration; F: Flow



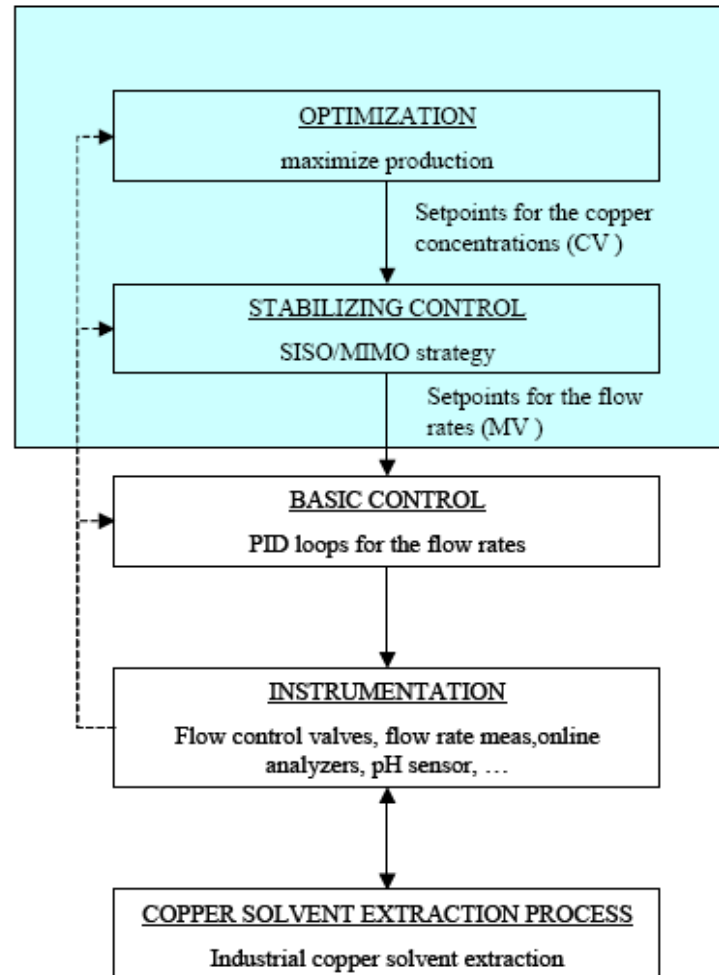
INVESTIGACIONES EN DESARROLLO

❑ MPC para procesos de extracción por solvente, HUT



INVESTIGACIONES EN DESARROLLO

□ MPC, HUT



INVESTIGACIONES EN DESARROLLO

- ❑ **MPC para procesos de extracción por solvente, Helsinki University of Technology**
- Con control PI control, la variabilidad de la concentración de cobre del electrolito rico disminuyó en 70-80 %.
- Con MPC, la variabilidad de la concentración de cobre en el electrolito rico disminuyó en 80-90%.
- La producción másica de cobre aumentó en 3 a 5% con ambas estrategias.

SINTESIS: ESTADO DE LA AUTOMATIZACION EN MINERIA

- Impulsados por el desarrollo de la microelectrónica, se ha producido un acercamiento y creciente integración de las tecnologías de información, comunicaciones y automatización.
- Las capacidades y potencialidades que ofrecen los sensores y los sistemas de automatización y control han aumentado significativamente, facilitando su aplicación.
- Los sensores basados en visión para chancado, molienda y flotación se han consolidado tanto en términos de desarrollo como de aplicación.
- Los sistemas robóticos y autónomos se encuentran en pleno desarrollo y aplicación incipiente.
- Los sistemas de control basados en conocimiento han alcanzado un importante grado de madurez.

SINTESIS: ESTADO DE LA AUTOMATIZACION EN MINERIA

- Se han realizado aplicaciones exitosas de sistemas de control que emplean lógica difusa y redes neuronales.
- Se ha popularizado la utilización de modelos, fenomenológicos o empíricos, para estimación, predicción y control.
- Los sensores virtuales han mostrado su potencial, en especial aquellos que emplean modelos no lineales.
- A pesar del mayor conocimiento que requiere, se han implantado soluciones exitosas de control predictivo en molienda y flotación.
- Se han desarrollado simuladores dinámicos de molienda y flotación para prueba y validación de sistemas de control.

SINTESIS: ESTADO DE LA AUTOMATIZACION EN MINERIA

- La utilización de simuladores para entrenamiento de operadores no se ha masificado como en otros sectores.
- Se han informado beneficios significativos de las aplicaciones de automatización y control en procesamiento de minerales.
- Estos beneficios no son transferibles directamente, por lo que se debe estudiar las condiciones bajo las cuales fueron logrados.
- Se están formulando y aplicando metodologías de evaluación de proyectos de automatización y control, generando en conjunto con otras iniciativas, como mejores prácticas, excelencia operacional y benchmarking, una nueva disciplina de Gestión de la Automatización.

DESAFIOS PENDIENTES

- Las favorables condiciones en que se desarrolla la minería mundial ha motivado a importantes empresas proveedoras de productos y servicios de automatización y control a incrementar sus esfuerzos por introducir estas tecnologías en la industria de procesamiento de minerales, por diversas vías: creatividad en la forma de hacer negocios, generando nuevos productos de automatización y control, o transfiriendo a la minería tecnologías exitosas de otras industrias.
- La minería ha atraído también a empresas proveedoras sistemas y servicios que originalmente centraban su actividad en otros sectores productivos. Asimismo, están ingresando al mercado nacional empresas proveedoras que hasta hace poco no tenían representación en el país.
- Como consecuencia, la minería dispone de una oferta creciente en calidad y cantidad, la que abarca desde nuevos sensores y sistemas robotizados hasta avanzados sistemas de control orientados a la estabilización y optimización de los procesos, pasando por sofisticados sistemas de comunicación y automatización.

DESAFIOS PENDIENTES

- Si bien esta situación es muy positiva, por los beneficios susceptibles de obtenerse con la instalación de modernas tecnologías de automatización y control, la amplitud de componentes que incluye la actual oferta en automatización, y la diversidad de tecnologías en que estos componentes se encuentran sustentados, plantean serios problemas a los profesionales de las empresas mineras.
- Por una parte, deben aprender a interactuar con las tecnologías base de estos productos, algunas de las cuales eran desconocidas al momento en que recibieron su formación inicial.
- Deben diferenciar las soluciones existentes en el mercado para definir cuáles son los más apropiados para las condiciones particulares de sus procesos.
- Deben cuantificar los beneficios esperados, con el fin de justificar ante la alta gerencia los recursos necesarios para su adquisición.
- Deben realizar seguimiento y control en las etapas de implantación y evaluación, y enfrentar retrasos inesperados debidos a la falta de madurez de la tecnología o a la inexperiencia de sus implantadores.

DESAFIOS PENDIENTES

- Cómo está enfrentándose esta realidad?
- AMIRA International y un consorcio de empresas mineras decidió investigar el tema y financió el proyecto P893A, Training in Automation for Optimizing the Profitability of Technology Investments. Las conclusiones del estudio son preocupantes.
- Encuestas realizadas indican que existe unanimidad en cuanto a que las tecnologías de automatización y control instaladas no están siendo aprovechadas al máximo.
- La razón principal para esta situación es la falta de conocimientos técnicos y la imposibilidad de satisfacer las necesidades de formación y entrenamiento en estas tecnologías.

DESAFIOS PENDIENTES

- En Chile, los programas de estudio de Ingeniería de 6 años generalmente incluyen cursos on automatización y control.
- En las especializaciones en Ingeniería Eléctrica y Electrónica esta formación es de cierta profundidad en los aspectos teóricos, pero débiles en procesos y aplicaciones.
- En Minería y Metalurgia la formación en automatización es superficial.
- En programas de Ingeniería de cuatro y cinco años, las especializaciones en Metalurgia y Minería generalmente no incluyen formación en automatización y control.
- La oferta de entrenamiento es también escasa, y como generalmente está restringida a productos o servicios que las empresas adquieren, es muy dirigida y específica.
- La falta de tiempo y la distancia a las faenas dificultan fuertemente la asistencia a actividades de entrenamiento, seminarios, o conferencias.

POSIBLES SOLUCIONES

- ❑ Para superar esta situación, se proponen acciones que requieren esfuerzos conjuntos:
 - Mayor comunicación entre las empresas y los centros de formación, con el fin de incorporar los temas de automatización y control en los currícula de todos los programas de estudio cuyos egresados se desempeñan profesionalmente en el sector minero, combinando apropiadamente los aspectos de teoría, procesos y aplicación.
 - Esta mayor comunicación aportará también a la solución de problemas estructurales que enfrentan otras iniciativas, por ejemplo relacionadas con formación de postgrado, investigación e innovación.
 - Aprovechar las posibilidades que la misma tecnología está ofreciendo a través de nuevas metodologías de educación continua (Computer based learning, E-learning, Problem-Based-Learning, Simuladores, Web-based learning, Laboratorios Virtuales). En internet existe abundante información técnica que facilita el autoaprendizaje.
 - Sin embargo, esta misma abundancia hace necesaria una cierta tutoría para seleccionar la información de mayor relevancia.

RESUMEN FINAL

- El potencial que ofrecen las Tecnologías de Automatización y Control ha permeado hacia la Alta Gerencia, como lo comprueban diversos hechos: asociación con el negocio y la innovación, nuevas organizaciones, presupuestos específicos, etc.
- Las empresas proveedoras están potenciando significativamente su oferta de productos y servicios, obligando a las empresas productivas a reforzar y actualizar sus cuadros profesionales.
- Siendo el recurso humano calificado fundamental para la aplicación exitosa de las Tecnologías de Automatización y Control, en Chile la formación y el entrenamiento en estos temas presenta falencias evidentes.
- Para superarlas se requiere una mayor y mejor comunicación entre empresas y centros de formación, y aprovechar más eficientemente las potencialidades que la misma tecnología pone a disposición.