



Universidad
Oriente



Santiago de
Cuba

Trabajo de Diploma

Tema: Control remoto de procesos industriales con controladores predictivos

Autor: Javier Gonzalo González Fontanet

**Tutores: Dra. Ania Lussón Cervantes
Ing. Michel Sanz Pérez**

```
beta = zeros(H,Nu);  
k=0;  
for i=1:Nu:H  
    beta(:,k)=zeros(H,1);  
    for j=1:Nu  
        beta_aux=beta_aux+betak(:,i-1+j);  
    end  
    beta(:,k)=beta_aux;  
end  
Hu = H/Nu  
Tu = 10;  
beta = beta*tril(ones(Hu,Hu));  
  
%  
% Cargo modelo PWL inverso y directo  
%
```

Curso: 2008 - 2009

Año del 50 Aniversario del triunfo de la Revolución

```
load data_pw_inv  
%load data_pw  
  
% Condiciones iniciales del c  
%  
delta_u = zeros(Hu,1);  
xa = [x(1)]'; %vector de condiciones iniciales  
ho = [];  
for i=1:H;  
    ho = [ ho ; [x(1)]'];  
end
```

No progresas mejorando lo que ya esta hecho, sino esforzándote por lograr lo que aun queda por hacer.

Khalil Gibran

De manera general quiero dedicar este trabajo a todas las personas que siempre me han apoyado y confiaron que ese niño, que un día fui, se convertiría a su tiempo en un profesional.

La forma en que está distribuida la dedicatoria no constituye un orden.

- ✚ A mis hermanos Yisel y Gonzalo Abel quienes son fieles representante del refrán “el que persevera triunfa”. Ellos han sido ejemplo para mí.
- ✚ Al frente de todo ejército victorioso siempre hay un general destacado, en mi familia mi mamá es ese jefe que impulsa a todos y obliga a la superación personal y profesional. Gracias vieja.
- ✚ Mi papá es ejemplo de hombre que lucha por sus sueños y no descansa hasta que los realiza. Es un modelo de hombre a seguir. Gracias por estar siempre.
- ✚ A mis abuelos Acela y Fidel por haber creado a alguien casi perfecto, mi mamá.
- ✚ A mis abuelos Nidia e Idalberto por su cariño desmedido, su ejemplo y por supuesto haber traído al mundo a mi papá.
- ✚ A todos mis tíos y tías por su interés y preocupación.
- ✚ A mis tíos Alfonso y Veny por quererme tanto.
- ✚ A mi madrina Lucia y mi tía Gloria por haberme apoyado siempre en todo.
- ✚ A mi tía Daysi y mis primos Yamilia y Juan por su preocupación constante.
- ✚ A mis primos Leticia, Yohandris e Izel.
- ✚ A mis tías Coralia y Herminia por su presencia.
- ✚ A toda mi familia de Guantánamo.
- ✚ A mi tía Meca.
- ✚ A mi mismo.

Luego de culminado este trabajo llega quizás la parte mas difícil, los agradecimientos, pues son tantas las personas que han influido en mi formación académica y social que seria injusto omitir alguna de estas.

- ✚ A mis tutores la Dra. Ania Lussón y el Ing. Michel Sanz por tanta dedicación y esfuerzo en todo momento. También agradezco a la Ing. Irina Bausa por su paciencia.
- ✚ Al Ing. Henry Bory y el MSc. José A. Pullés quienes más que profesores, han sido tutores, ejemplos y amigos.
- ✚ A mi hermano Gonzalo Abel por toda la ayuda prestada para que este trabajo saliera lo mejor posible, en especial con el diseño de portada.
- ✚ A los que me recibieron y me trataron como uno de ellos la primera vez que llegué al departamento: Dra. Mercedes Ramírez, Ing. Ksenia Arias, Ing. Félix V. Roldán, Patricia.
- ✚ A todos los profesores y técnicos del departamento de Control Automático de la FIE.
- ✚ Sin dudas son meritorios de mis agradecimientos mis compañeros de aula, con quienes compartí durante 5 años largas jornadas de estudio y diversión, en especial a R. Novo, G. Borges, Vladimir G., Yoandri N., José M.
- ✚ A los profesores del IPVCE “Antonio Maceo”, especialmente a Mirtha Jhonson.
- ✚ Una persona que no puede faltar, por su importante papel, en mi desarrollo como estudiante es Ramón González quien realmente me introdujo en el mundo de las Ciencias Técnicas al lograr que mirara con otros ojos la Física.
- ✚ Aunque tuve un desempeño podría decirse que excelente, en el mundo deportivo, mis entrenadores Carlos B. y Rosario, fueron los primeros en empujarme al estudio, gracias a ambos por sus enseñanzas más allá de las relacionadas al deporte.
- ✚ A los profesores Ernesto y Dalia F. de la ESBU de Sueño “Alberto Fernández”, por sus enseñanzas.
- ✚ A mis amigos de siempre Yorgenis, Alfredito, Agustín, Lili, Carlitos, Jorge, Dayron S y Amaury.
- ✚ A mis vecinos Renán, Alicia e hijos.

RESUMEN

Actualmente el estudio del acceso remoto a los sistemas automatizados se ha incrementado y su inserción en el mundo industrial ha traído grandes ventajas, como lo es el hecho de poder realizar el control de procesos de gran peligrosidad sin poner en riesgo el factor humano, además de las comodidades que acarrea este.

El presente trabajo aborda el problema relacionado con la necesidad de ampliar y desarrollar en el departamento de Control Automático aplicaciones que permitan el Control Predictivo basado en Modelo y la supervisión de procesos industriales de manera remota, para lo cual se propone como objetivo el diseño de una plataforma informática que permita la supervisión y control remoto de procesos industriales haciendo uso de las herramientas LabVIEW y MATLAB para controladores predictivos.

En este trabajo de diploma se presentan los resultados alcanzados en la aplicación del Control Predictivo basado en Modelo de una Unidad Generadora de Vapor y de un Reactor de Neutralización de manera remota.

ABSTRACT

Today the study of remote access to automated systems has increased and their integration into the industrial world has brought great benefits, such as being able to perform process control of high risk without jeopardizing the human factor, besides the comfort that this brings.

This paper deals with the problem related to the need to expand and develop, in the Department of Automatic Control, applications that permit Predictive Control based on Model and monitoring industrial processes by remote control. It aims at designing an informatics platform that allows monitoring and remote control of industrial processes using LabVIEW and MATLAB tools for predictive controllers.

In this diploma work, the results achieved in implementing the remote control model-based Predictive Control of a Steam Generating Unit and a Neutralization Reactor are presented.

NOTACIONES GENERALES.

API: Application Programming Interface.

CARIMA: Controlled Autoregressive and Integrated Moving Average.

CRCP: Control Remoto con Controladores Predictivos.

DMC: Dynamic Matrix Control.

DSSS: Direct – Sequence Spread – Spectrum.

FC: Función de costo.

GPC: Generalized Predictive Control.

HTTP: Hyper Text Transfer Protocol.

IDCOM: Identification Command.

IMPACT: Integrated Multiple Predictive Algorithm Control.

IP: Internet Protocol.

ISM: Industrial Scientific and Medical radio frequency.

LAN: Local Area Network.

M: Horizonte de Control.

MAC: Medium Access Constrains.

MODEM: Modulator Demodulator.

MPC: Model Predictive Control.

NCS: Network Control System.

P: Horizonte De Predicción.

PC: Personal Computer.

PCsim 2.0: Predictive Control Simulation.

PPP: Point to Point Protocol.

SISO: Simple Input Simple Output.

SMPC_BG 1.0: Simulación de Control Predictivo basado en Modelo _ Blanco González.

TCP/IP: Transfer Control Protocol/Internet Protocol.

TIC: Tecnología de la Información y las Comunicaciones.

URL: Universal Resource Locator.

Wi-Fi: Wireless Fidelity.

WWW: World Wide Web.

ÍNDICE GENERAL

Introducción.....	1
Capitulo I. Caracterización del Control Predictivo Basado en Modelo y de los Sistemas de Control Remoto.	5
Introducción.....	5
1.1 Control Predictivo basado en Modelo.....	5
Caracterización histórica.....	5
1.1.1. Fundamentos teóricos del Control Predictivo Basado en Modelo.....	7
Metodología del MPC.	8
1.2 Control remoto.....	14
1.2.1 Breve historia de la comunicación entre computadoras.....	14
1.2.2 Control remoto moderno.	17
1.2.3 Sistema de control por red.....	19
1.2.4 Sistema de control remoto Cliente/Servidor.....	22
1.2.5 Análisis de retardos en los sistemas de control remoto.	24
Conclusiones.....	24
Capitulo II. Resultados del control remoto de los procesos bajo estudio con controladores predictivos.	25
Introducción.....	25
2.1 Diseño del sistema de control remoto con controladores predictivos.....	25
2.2 Resultados de las simulaciones del MPC en la Unidad Generadora de Vapor.....	29
2.3 Resultados de las simulaciones del MPC en el Reactor de Neutralización.	39
2.4. Valoración de la investigación mediante criterios de expertos.	43

Conclusiones.....	44
Conclusiones.....	45
Recomendaciones	46
Bibliografía	47
Anexos	50

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.1 Metodología del MPC.....	8
1.1.2 Estructura básica del MPC.....	9
1.2.1 Capas de la pila.....	15
1.2.2 Sistema de control remoto con computadora.....	18
2.1 Esquema general del control remoto supervisorio propuesto.....	26
2.2 Dispositivo de conexión inalámbrica WNC 0301USB.....	27
2.3 Salida de presión ante cambios en las referencias del MPC.....	32
2.4. Salida de nivel ante cambios en las referencias del MPC.....	32
2.5. Entrada de flujo de combustible del MPC.....	33
2.6. Entrada de flujo de agua del MPC.....	33
2.7. Salida de presión ante cambios en las referencias del MPC con restricciones.....	35
2.8. Salida de nivel ante cambios en las referencias del MPC con restricciones	35
2.9. Entrada de flujo de combustible ante cambios en las referencias con restricciones.....	36
2.10. Entrada de flujo de agua ante cambios en las referencias con restricciones.....	36
2.11. Salida de presión ante disturbios medidos del MPC con restricciones.....	37
2.12. Salida de nivel de agua ante disturbios medidos del MPC con restricciones.....	37
2.13. Entrada de flujo de combustible ante disturbios medidos.....	38
2.14. Entrada de flujo de agua ante disturbios medidos.....	38
2.15. Salida del reactor ante cambios en la referencia.....	41
2.16. Acción de control ante cambios en la referencia.....	41
2.17. Salida del reactor ante cambios en la referencia con restricciones.....	42

2.18. Acción de control ante cambios en la referencia..... 43

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Característica del dispositivo de conexión inalámbrica WNC-0301USB.....	27
2.2. Parámetros nominales de la Unidad Generadora de Vapor.....	29
2.3. Parámetros de sintonía del MPC sin restricciones de la Unidad Generadora de Vapor.....	31
2.4 Parámetros nominales del Reactor de Neutralización.....	39
2.5 Parámetros de sintonía del MPC sin restricciones.....	40

INTRODUCCIÓN.

El control automático ha jugado un papel vital en el avance de la ingeniería y de la ciencia. Además de su extrema importancia en vehículos espaciales, en el guiado de proyectiles y sistema de pilotaje de aviones, este se ha convertido en parte importante e integral de los procesos industriales y de manufactura modernos. Por ejemplo, el control automático, resulta esencial en operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en la industria de procesos.

El control de procesos involucra aplicar tecnología a una operación que transforma a la materia prima en un producto terminado. Casi todo lo que se usa o consume, ha pasado por algún tipo de control de proceso automatizado en su producción. Los controles de procesos automatizados mejoran la productividad y la terminación del producto, a la vez que reducen los costos de producción.

Aunque en el pasado podía considerarse que el único objetivo del control consistía en mantener una operación estable del proceso, actualmente las industrias se enfrentan a un mercado cambiante y difícil de predecir, lo que les obliga a operar sus procesos productivos en consonancia con la evolución del mercado para poder mantenerse competitivas y rentables.

La competencia en muchos sectores industriales, así como el creciente interés social por los problemas medioambientales relacionados con los procesos de producción provoca la necesidad de disponer de técnicas fiables que permitan la operación del proceso con gran eficiencia y alto grado de flexibilidad.

Actualmente los sistemas de control en la industria de procesos deben satisfacer criterios económicos, asociados con el mantenimiento de las variables del proceso en sus referencias, minimizando dinámicamente una función de costo de operación, criterios de seguridad y medioambientales, y de calidad en la producción, la cual debe satisfacer ciertas especificaciones sujetas a una demanda normalmente variable. Por lo que se puede considerar que en la actualidad el objetivo de todo sistema de control consiste en actuar sobre las variables manipuladas de forma que puedan satisfacerse los cambiantes criterios de funcionamiento mencionados anteriormente. Las técnicas de Control Predictivo Basado en Modelo (Model Based Predictive Control, MPC) constituyen unas poderosas herramientas para afrontar estos retos [4].

La diferencia entre las diversas técnicas radica básicamente en los compromisos hechos en la formulación matemática de estos criterios de funcionamiento y en la elección de la manera de representar el proceso. La representación matemática de muchos de estos criterios se lleva a cabo en la forma de funciones objetivo dinámicas y de restricciones mientras que el proceso se representa como un

modelo dinámico con incertidumbres asociadas. La importancia de las incertidumbres está siendo cada vez más reconocida y por tanto incluida explícitamente en la formulación de los controladores.

MPC, en su forma más general, acepta cualquier tipo de modelos, funciones objetivo o restricciones, siendo la metodología que actualmente puede reflejar más directamente los múltiples criterios de funcionamiento relevantes en la industria de procesos. Esta es la principal razón del éxito de estas técnicas en numerosas aplicaciones de la industria de procesos como en control de motores o robótica.

El MPC está reconocido en el mundo como una herramienta capaz de solucionar una gran cantidad de problemas de control multivariable con restricciones. Este no es una estrategia de control específica, sino que se trata más bien de un campo muy amplio de métodos de control desarrollados en torno a ciertas ideas comunes.

El control predictivo integra control óptimo, control de procesos con tiempos muertos, procesos multivariables y utiliza las referencias futuras cuando están disponibles. Al utilizar una estrategia con horizonte de control finito permite la consideración de restricciones y procesos no lineales [3].

Conforme las técnicas de control ganan en complejidad, así lo hace el uso de recursos de computación que se hace necesario para llevar a cabo su implementación. Este aspecto, sin embargo, no ha sido realmente considerado hasta los últimos años, en los que ha aparecido un verdadero interés dentro de la comunidad del Control Automático por acercar la teoría de control, la computación de tiempo real y las comunicaciones [6].

En las últimas décadas la sociedad ha sufrido un cambio brusco debido a los vertiginosos avances producidos en las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC). De todas las TIC existentes, la más revolucionaria ha sido Internet, sobre todo desde la aparición del sistema de hipertexto (World Wide Web - www) en 1989. Las ventajas que Internet aporta a la sociedad son innumerables: comercio electrónico, banca electrónica, educación a distancia, obtención masiva de la información, tele operación y acceso remoto, entre otras, permitiendo que se convierta en un elemento más dentro de la vida cotidiana.

La complementación entre los sistemas de control y de comunicación ha sido por tiempo un tema de interés entre la comunidad investigadora, esto debido, a la posibilidad de implementar tecnologías que permitan el control remoto de dispositivos electromecánicos. Diversos medios de comunicación como radiofrecuencia, infrarrojo, MODEM, satelital, etc., han sido utilizados durante algún tiempo, hoy en día, el Internet ofrece una alternativa para la operación y el control de dispositivos en forma remota, de modo que esta tecnología ya no es exclusiva sólo de aquellos que podían hacer inversiones importantes, sino que ahora está al alcance aunque no se posea gran capital. Lo anterior permite la

generación de nuevas aplicaciones y campos de investigación en el área de la automática y las comunicaciones.

En el departamento Control Automático de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Oriente, se han realizado trabajos de control remoto y de control predictivo, pero estos dos temas nunca han sido objetivo de una misma investigación, debido principalmente a la poca experiencia teórico – práctica en la aplicación de la técnica de MPC a nivel de pregrado, encaminando las investigaciones de control remoto a otras estrategias de control.

Esta situación hace plantear como **problema** la necesidad de ampliar y desarrollar en el departamento de Control Automático aplicaciones que permitan el Control Predictivo basado en Modelo y la supervisión de procesos industriales de manera remota. Para ello se define como **objeto** de la investigación los Controladores Predictivos basados en Modelo de procesos industriales. El **objetivo** radica en el diseño de una plataforma informática que permita la supervisión y control remoto de procesos industriales haciendo uso de las herramientas LabVIEW y MATLAB para controladores predictivos. Por las razones anteriormente expuestas se establece como **campo de acción** la supervisión y control remoto de procesos industriales con Controladores Predictivos basados en Modelo. Además se plantea como **hipótesis** que si se diseña una plataforma informática para la supervisión y el control remoto de procesos industriales haciendo uso de las herramientas LabVIEW y MATLAB para controladores predictivos se contribuye a la ampliación y desarrollo de aplicaciones en esta temática.

Las **tareas** para dar cumplimiento al objetivo de la presente investigación se relacionan a continuación:

1. Caracterizar el Control Predictivo Basado en Modelo y el Control Remoto de procesos.
2. Realizar el estudio de procesos tecnológicos: Unidad Generadora de Vapor y Reactor de Neutralización.
3. Diseñar el Controlador Predictivo Basado en Modelo en la Unidad Generadora de Vapor y Reactor de Neutralización, utilizando las herramientas del LabVIEW y MATLAB.
4. Simular el diseño elaborado para los procesos bajo estudio y emitir conclusiones.
5. Desarrollar la supervisión y el control remoto para los procesos bajo estudio.
6. Obtener valoración de los resultados de la investigación con expertos.

Métodos y técnicas empleados en la investigación:

1. Análisis de fuentes documentales.
2. Técnicas y métodos empíricos: Observación, Encuestas y Entrevistas.
3. Método histórico-lógico.
4. Método de análisis y Síntesis.
5. Métodos experimentales: Diseño y simulación.

Significación práctica.

La investigación permite mostrar las potencialidades del Control Predictivo basado en Modelo para realizar control remoto. Se controlan dos procesos: Unidad Generadora de Vapor y Reactor de Neutralización. Se ha desarrollado una plataforma en LabVIEW, que permite controlar remotamente el proceso y mostrar el resultado de la simulación del MPC en los casos de estudio. El diseño y simulación del controlador predictivo se realiza utilizando el programa MATLAB. La aplicación desarrollada puede usarse en las prácticas de laboratorio de las disciplinas Automática y Sistemas de Control de la carrera Ingeniería en Automática de la Universidad de Oriente.

La presente investigación se encuentra organizada de la siguiente forma: una introducción general en la que se exponen las principales motivaciones que llevaron a la realización de esta investigación y en la cual se encuentra además, la fundamentación del diseño metodológico de la misma.

Dos capítulos que constan de introducciones parciales para la mejor comprensión de los objetivos de los mismos, estos a su vez, se encuentran organizados por epígrafes, de manera que resulte más fácil su revisión por parte del lector. Finalmente cada capítulo presenta sus conclusiones, además de las conclusiones generales, recomendaciones y bibliografía.

En el Capítulo I se presenta el estudio teórico del presente trabajo de diploma. Para ello se exponen las generalidades sobre el Control Predictivo basado en Modelo, la que esta referida a la metodología, algoritmos y parámetros de sintonía. También se incluye un análisis del control y supervisión de manera remota utilizando las redes globales de información y el protocolo de comunicación DataSocket.

En el Capítulo II se implementa el control y la supervisión remota de los procesos industriales Unidad Generadora de Vapor y Reactor de Neutralización, mediante una interfaz gráfica de usuario. Además se muestran los resultados de diseño y las simulaciones del MPC para dichos procesos.

CAPITULO I. CARACTERIZACIÓN DEL CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO Y DE LOS SISTEMAS DE CONTROL REMOTO.

Introducción

En el presente capítulo se realiza un estudio del origen de los controladores predictivos basados en modelo, además de la teoría que rigen a los mismos.

También se investiga sobre el origen y funcionamiento de las redes globales de información, lo cual nos servirá para realizar el control y supervisión de una Unidad Generadora de Vapor y un Reactor de Neutralización de manera remota, auxiliándose en las herramientas MATLAB y LabVIEW.

1.1 Control Predictivo basado en Modelo.

Caracterización histórica.

El Control Predictivo Basado en Modelo tiene su origen en los desarrollos de la teoría del control óptimo en la última parte de la década del 50 del siglo XX, logrando su consolidación como técnica independiente a finales de la década del 70.

El Control Predictivo se desarrolló en base a dos líneas básicas. Por un lado, a finales de los años setenta surgieron diversos algoritmos que usaban explícitamente un modelo dinámico del proceso para predecir el efecto de las acciones de control futuras en la salida, las cuales eran determinadas minimizando el error predicho sujeto a restricciones de operación. La optimización se repetía en cada instante de muestreo con información actualizada del proceso. Estas formulaciones eran de naturaleza heurística y algorítmica e intentaban aprovechar el creciente potencial de los computadores digitales por aquella época.

Rápidamente el MPC adquirió gran popularidad en las industrias de procesos químicos principalmente debido a la simplicidad del algoritmo y al uso del modelo de respuesta ante un impulso o un escalón, que aunque posea muchos más parámetros que las formulaciones en el espacio de estados o función de transferencia suele ser preferido por ser intuitivo y necesitar menos información a

priori para identificar. La mayoría de las aplicaciones fueron llevadas a cabo sobre sistemas multivariables incluyendo restricciones. Los algoritmos utilizados fueron principalmente el IDCOM (Identification-Command) y el DMC (Dynamic Matrix Control) [20].

Independientemente fue surgiendo otra línea de trabajo en torno a las ideas del control adaptativo, desarrollando estrategias esencialmente para procesos monovariabes formuladas con modelos entrada/salida. En este contexto se extendieron las ideas del Controlador de Mínima Varianza y se desarrolló el Control Predictivo Generalizado (Generalized Predictive Control, GPC) que es uno de los métodos más populares en la actualidad [5].

En la década del 90 se elaboran varias alternativas para la incorporación de no linealidades en MPC [2]; [20]. Muchos autores han utilizado con esta finalidad modelos empíricos, como por ejemplo las redes neuronales [24]. Técnicas basadas en modelos Hammerstein [11], [34]; modelos Wiener [19], y de Volterra [13]; [20] también han sido muy estudiadas.

Actualmente el término MPC, más que designar una estrategia de control, representa un amplio rango de métodos de control basados en la predicción de la salida del sistema, a partir de algún modelo del proceso [4]. Tales predicciones hacen posible establecer los errores futuros del desempeño, los cuales, incluidos en una función, convenientemente definida y la cual incluye las variaciones de la salida conjuntamente con las de las señales de control permiten determinar; mediante un proceso de minimización de dicha función objetivo, el vector de los movimientos del mando. Existen muchos tipos de estos métodos computacionales para el control que incluyen variantes de MPC lineales y no lineales (NMPC), se reportan más de 2000 aplicaciones prácticas de estos algoritmos [23] y más del 90% de las implementaciones de controles en sistemas multivariables con el MPC.

En los últimos años se han desarrollado aplicaciones industriales del MPC en herramientas interactivas, de manera local, que permiten al usuario observar la interrelación entre las distintas variables y visualizar de manera inmediata cómo, al realizar un cambio sobre un determinado parámetro, el comportamiento del sistema se ve modificado. En este sentido, se han obtenido aportes como por ejemplo, en el año 2004 la herramienta IMPACT (Intregrated Multiple Predictive Algorithm Control Tool) en el entorno MATLAB para una columna de destilación [4]. En este mismo año se implementa la interfaz gráfica de Control Predictivo Generalizado para Sistemas Multivariables con Restricciones [15]. Otro de los entornos gráficos creados es la SMPC_BG 1.0 (Simulación del Control Predictivo Basado en Modelo_Blanco González) [14], realizada en el 2008, que permite el control y supervisión local de los procesos Torre de Destilación, Mezclador y Horno de Reducción.

También existen aplicaciones para realizar control remoto utilizando las técnicas de MPC como por ejemplo PCsim 2.0 (Predictive Control Simulation) [32], la cual permite estudiar el control de sistemas haciendo uso de las técnicas de MPC en

sistemas SISO (Single Input-Single Output), esta tiene como desventaja que solo se pueden introducir modelos de la planta en forma de función de transferencia, y la comunicación entre el proceso y el controlador MPC no es en tiempo real.

1.1.1. Fundamentos teóricos del Control Predictivo Basado en Modelo.

Generalmente se conoce como MPC a un conjunto de algoritmos computacionales que controlan la respuesta futura de un proceso mediante el uso explícito de un modelo del mismo. En cada intervalo de control el algoritmo MPC calcula, a lazo abierto, una secuencia de ajustes de la variable manipulada con la finalidad de optimizar la estabilidad del sistema minimizando una función de costo (FC) sobre un horizonte de control finito especificado. La primera entrada de esta secuencia óptima se inyecta a la planta y se repite la optimización completa en el próximo intervalo de control, a esto se le denomina aplicación por horizonte desplazable.

Los diversos algoritmos MPC sólo difieren entre ellos en el modelo usado para representar al proceso y a las perturbaciones y en la función de costo a ser minimizada. Diversos trabajos han demostrado que el MPC es un método basado en el control óptimo, que permite la construcción de leyes de control realimentadas estabilizantes [7].

Esta tecnología fue desarrollada originalmente para refinerías de petróleo y plantas de potencia, pero actualmente pueden encontrarse aplicaciones industriales en los mas diversos campos imaginables [23], que incluyen la industria de cemento, torres de secado, brazos de robot, torres de destilación, entre otras.

Hay una serie de elementos comunes a todos los controladores predictivos:

- El uso de un modelo matemático del proceso que se utiliza para predecir la evolución futura de las variables controladas sobre un horizonte de predicción.
- La imposición de una estructura en las variables manipuladas futuras.
- El establecimiento de una trayectoria deseada futura, o referencia, para las variables controladas.
- El cálculo de las variables manipuladas optimizando una cierta función de costo.
- La aplicación del control siguiendo una política de horizonte móvil.

Algunas ventajas importantes sobre otras técnicas de control:

1. Permite tratar de forma sencilla sistemas multivariables con distintos números de entradas y salidas.
2. Incorpora de forma natural la compensación feedforward, proporciona varianza mínima en las variables controladas y puede utilizarse en sistemas de dinámica difícil, con retardos, respuesta inversa, etc.

3. Es posible la introducción de restricciones en las variables de entrada y de salida.
4. Es conceptualmente simple de comprender y ajustar por el personal técnico.
5. Existen controladores comerciales en el mercado con adecuado soporte técnico.

Pero lógicamente también presenta inconvenientes, uno de ellos es la carga de cálculo necesaria para la resolución de algunos algoritmos. Quizás el mayor inconveniente venga marcado por la necesidad de disponer de un modelo apropiado del proceso. El algoritmo de diseño está basado en el conocimiento previo del modelo y es independiente de este, pero resulta evidente que las prestaciones obtenidas dependerían de las discrepancias existentes entre el proceso real y el modelo usado [3].

Metodología del MPC.

La metodología de todos los controladores pertenecientes a la familia del MPC se caracteriza por la estrategia representada en la figura 1.1.1 [3].

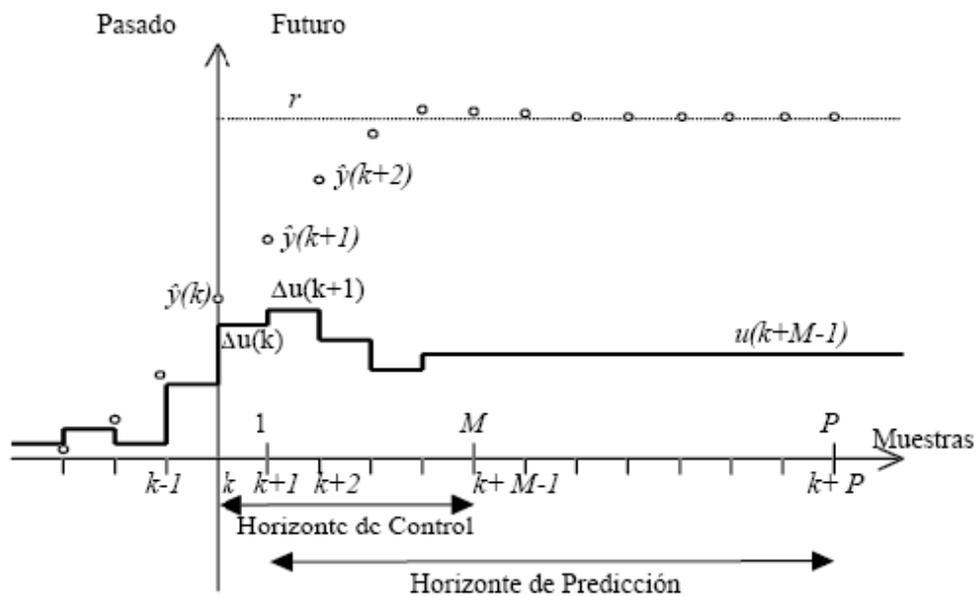


Fig. 1.1.1 Metodología del MPC.

El conjunto de señales de control futuras es calculado optimizando un criterio determinado a fin de mantener el proceso tan cerca como sea posible de la trayectoria de referencia r , como muestra la figura 1.1.1. Este criterio usualmente toma la forma de una función cuadrática de los errores entre la señal de salida predicha y la trayectoria de referencia. El esfuerzo de control $\Delta u(k+i|k)$ es incluido en la función objetivo en la mayoría de los casos.

Una solución explícita puede ser obtenida si el criterio es cuadrático, el modelo es lineal y no hay restricciones, de otra forma se debe usar un método de optimización iterativa. Algunas suposiciones acerca de la estructura de la ley de control futura son también hechas en algunos casos, tales como que ésta será constante desde un instante dado.

A fin de implementar esta estrategia, se usa la estructura básica mostrada en la figura 1.1.2. Un modelo es usado para predecir las salidas futuras de la planta, basadas en valores pasados y actuales y en las acciones futuras óptimas de control propuestas. Estas acciones son calculadas por el optimizador tomando en cuenta la función de costo (donde se considera el error futuro) así como las restricciones.

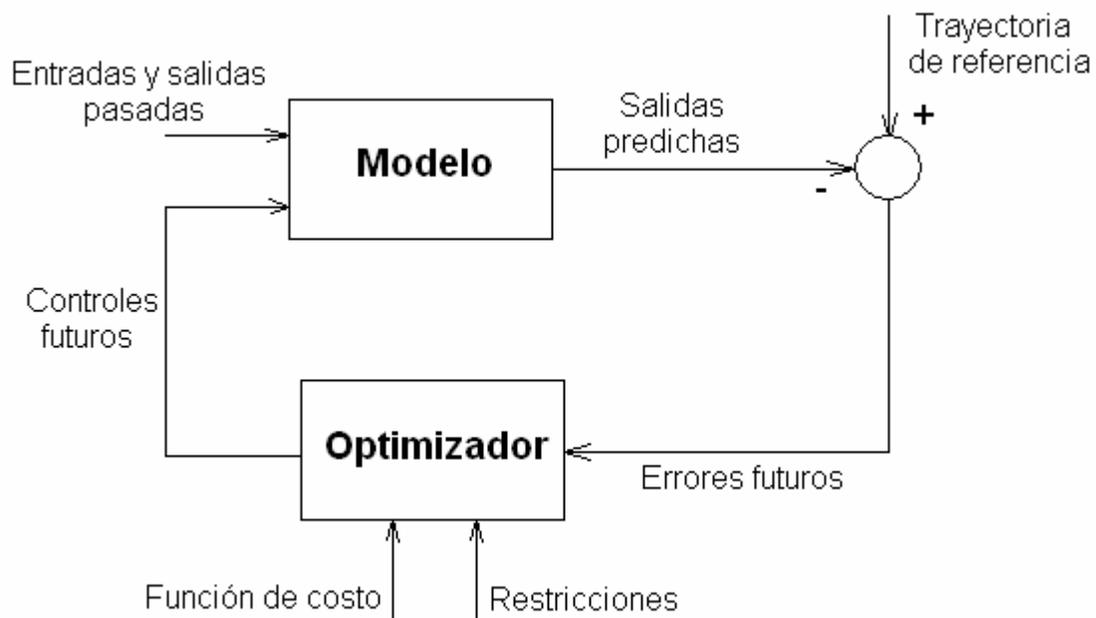


Fig. 1.1.2 Estructura básica del MPC.

El modelo del proceso juega un papel decisivo en el controlador. El modelo escogido debe ser capaz de captar las dinámicas del proceso a fin de predecir exactamente las salidas futuras así como ser simple de implementar y de entender.

El modelo usa la información de la entrada y la salida actual para calcular las predicciones de la salida $\hat{y}(k+1|k), \dots, \hat{y}(k+P|k)$, a lo largo del horizonte de predicción P . En el instante k , y con este modelo como guía, se puede usar un esquema de optimización para calcular el conjunto de acciones de control $u(k|k), \dots, u(k+M-1|k)$, que aplicadas lograrán que la salida siga una trayectoria deseada sobre el horizonte de predicción P y con la variable manipulada u cambiando únicamente en un horizonte de control $M < P$. El optimizador toma en

consideración las restricciones que puedan existir en las entradas y salidas, incorporándolas directamente dentro de la tarea de optimización. De la secuencia de control calculada, sólo se aplica al proceso la primera acción de control $u(k|k)$, lo que provoca la transición del sistema entre k y $k+1$. En el instante $k+1$ se actualizan las mediciones, por lo que el modelo (predictor de salida) puede usar adicionalmente $y(k+1)$ y $u(k|k)$ para calcular nuevas estimas para la salida futura. Los horizontes de predicción P y de control M , se desplazan un paso hacia delante (control por horizonte desplazable).

El optimizador es otra parte fundamental de la estrategia, puesto que provee las acciones de control. Si la función de costo es cuadrática y no existen restricciones, su mínimo puede ser obtenido como una función explícita (lineal) de entradas y salidas pasadas y de trayectoria de referencia futura. El tamaño de los problemas de optimización depende del número de variables y del horizonte de predicción usado. Por lo general resultan ser problemas de optimización relativamente modestos, los cuales no requieren programas sofisticados para ser resueltos.

Los algoritmos del MPC tienen elementos comunes, con particularidades y opciones, dando lugar a la diversidad de algoritmos existentes [17]. Dichos elementos son los siguientes:

- Modelo de Predicción.
- Función Objetivo.
- Ley de Control a obtener.

Modelo de Predicción

La piedra angular del MPC es el modelo; un diseño completo debe incluir los mecanismos necesarios para la obtención del mejor modelo posible, el cual debe ser lo suficientemente rico para capturar al máximo la dinámica del proceso y debe ser capaz de permitir el cálculo de las predicciones a la vez que sea intuitivo y permita un análisis teórico. El uso del modelo del proceso viene determinado por la necesidad de calcular las salidas predichas en instantes futuros $\hat{y}(k+i|k)$. Las diferentes estrategias de MPC pueden usar distintos modelos para representar la relación entre las salidas y las entradas medibles. Algunas de dichas entradas serán variables manipuladas y otras se pueden considerar como perturbaciones medibles, que pueden ser compensadas por acción de realimentación (feedforward). Además se tendrá en cuenta un modelo de las perturbaciones, para intentar describir el comportamiento que no aparece reflejado en el modelo del proceso, englobándose aquí el efecto de las entradas no medibles, el ruido y los errores de modelado.

Para el estudio se puede separar el modelo en dos partes: el modelo del proceso propiamente dicho y el modelo de los disturbios. Cualquier método usará ambas partes para la predicción.

- Modelo del Proceso

Uno de los más populares en la industria es el Modelo de la Respuesta al Impulso Truncado (Truncated Impulse Response Model). Estrechamente relacionado con este tipo de modelo está el Modelo de la Respuesta al Escalón (Step Response Model), obtenido cuando la entrada es un escalón [3].

El Modelo de Función de Transferencia (Transfer Function Model) es usado en la mayoría de los métodos de control, por ser una representación que resulta válida también para procesos inestables y para todo tipo de procesos lineales.

Los modelos no lineales pueden ser también usados para representar al proceso. El problema de su uso es que puede causar que el problema de optimización sea más complicado. Redes neuronales así como lógica difusa son otras formas de representación usadas en algunas aplicaciones [1].

- Modelo de los Disturbios

La elección del modelo usado para representar los disturbios es tan importante como la elección del modelo del proceso. Un modelo ampliamente usado es el CARIMA (Controlled Auto-Regresive and Integrated Moving Average), en el cual los disturbios (la diferencia entre la salida medida y la calculada por el modelo) están dados por:

$$n(t) = \frac{C(z^{-1})e(t)}{D(z^{-1})} \quad (1.1.1)$$

Donde el polinomio $D(z^{-1})$ incluye explícitamente al integrador $\Delta = 1 - z^{-1}$, $e(t)$ es un ruido blanco de media cero y el polinomio C normalmente se considera igual a 1.

Este modelo es muy apropiado para aplicaciones industriales en las que las perturbaciones no son estacionarias [5].

Función Objetivo

Los diversos algoritmos de MPC proponen distintas funciones objetivo o de costo (FC) para la obtención de la ley de control. La finalidad general es que la salida futura (y) en el horizonte considerado debe seguir una determinada señal de referencia (r) y, al mismo tiempo, el esfuerzo de control (Δu) necesario para hacerlo debe ser penalizado.

La función de costo más empleada en MPC es la cuadrática, que puede no tener restricciones asociadas (caso ideal) o contar con otro grupo de formulaciones que expresan las restricciones bajo las cuales se debe realizar la optimización. A

continuación se presenta directamente el FC en términos de entrada-salida para sistemas SISO.

$$FC = [y(k), u(k)] = \sum_{i=1}^P \alpha_i (r(k+i) - \hat{y}(k+i|k))^2 + \sum_{i=1}^M \beta_i [\Delta u(k+i-1)]^2 + \sum_{i=1}^P \gamma_i [\Delta \hat{y}(k+i|k)]^2 \quad (1.1.2)$$

donde \hat{y} es la salida predicha, r es el valor de referencia para la salida, $\Delta u(k+i) = [u(k+i) - u(k+i-1)]$ es el cambio en la acción de control. $\Delta \hat{y}(k+i|k) = [\hat{y}(k+i+1|k) - \hat{y}(k+i|k)]$ es el cambio estimado en la salida predicha, α_i , β_i , γ_i son términos de ponderación dependientes de la aplicación, que efectúan un escalado.

Queda abierta la posibilidad de incluir otros términos en el FC, siempre que puedan calcularse a partir de datos disponibles en el instante k . El efecto de la minimización del término relacionado con el error (primer término en el FC) no es más que garantizar una buena regulación (o seguimiento) del proceso. En cambio, la minimización del segundo y tercer término del FC busca disminuir las oscilaciones en la salida, buscando una respuesta lo más suave posible. Particularmente, el tercer término del FC hace una penalización explícita sobre los movimientos bruscos de la salida predicha.

- Parámetros de sintonía:

Los parámetros de operación característicos del MPC son: el intervalo de muestreo T , el horizonte de predicción P , el horizonte de control M y en algunos casos, diversos horizontes utilizados para restricciones particulares. Adicionalmente, se deben sintonizar los parámetros α , β y γ que ponderan los diversos términos en el FC. Idealmente, se debe conocer previamente el intervalo de variación de estos parámetros de modo que garanticen la estabilidad y la robustez nominal del proceso controlado. Esto implica la necesidad de ajustar los parámetros de operación de acuerdo con objetivos de control para el proceso. Por lo general estos vectores son considerados valores constantes o secuencias exponenciales.

- Trayectoria de referencia:

Una de las ventajas del control predictivo es que si se conoce a priori la evolución futura de la referencia, el sistema puede empezar a reaccionar antes de que el cambio se haya efectivamente realizado, evitando los efectos del retardo en la respuesta del proceso. En muchas aplicaciones la evolución futura de la referencia $r(k+i)$ es conocida de antemano, como en robótica, servomotores o procesos por lotes; en otras aplicaciones aunque la referencia sea constante, se puede conseguir una sensible mejora de prestaciones simplemente conociendo el instante de cambio de valor y adelantándose a esa circunstancia.

- Restricciones:

Las restricciones están pensadas para evitar condiciones peligrosas dentro de la operación del proceso. En la práctica todos los procesos están sujetos a restricciones. Los actuadores tienen un limitado campo de acción, así como un determinado tiempo muerto, como es el caso de las válvulas, limitadas por las posiciones de totalmente abiertas o cerradas y por la velocidad de respuesta. Razones constructivas, de seguridad, medioambientales o bien los propios alcances de los sensores pueden causar límites en las variables del proceso, tales como niveles en depósitos, caudales en tuberías o temperaturas y presiones máximas. Además, normalmente las condiciones de operación vienen definidas por la intersección de ciertas restricciones por motivos fundamentalmente económicos, con lo que el sistema de control operará cerca de los límites. Todo lo expuesto anteriormente hace necesaria la introducción de restricciones en la función a ser minimizada, permitiendo la aplicación de métodos de optimización particulares.

En la mayoría de las aplicaciones de control se requiere que se satisfagan restricciones, las cuales pueden ser de dos tipos, restricciones en la entrada y restricciones en la salida, por lo que la posibilidad de incorporar las mismas directamente en la optimización es un hecho fundamental en el MPC, lo cual implica que esta técnica de control tiene la posibilidad de estabilizar globalmente a sistemas lineales y no lineales sujetos a las restricciones antes mencionadas.

Restricciones en la entrada: Las restricciones en las variables de entrada surgen debido a las limitaciones físicas de los actuadores y no pueden ser violadas bajo ningún concepto. En general son restricciones duras (no admiten violaciones ni aún temporarias) que imponen límites superiores e inferiores en la amplitud y en la velocidad de cambio de la señal de control:

$$u_{\min} \leq u(k+i|k) \leq u_{\max} \quad \forall i = 1, \dots, M-1 \quad (1.1.3)$$

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u(k+i|k) \leq \Delta u_{\max} \quad \forall i = 1, \dots, M-1 \quad (1.1.4)$$

Restricciones en la salida: Las restricciones de salida se imponen para satisfacer medidas de seguridad, de calidad de operación u otros aspectos que debe cumplir el sistema a controlar. En general son restricciones blandas pues en algunos casos pueden violarse de forma temporal. Estas restricciones se expresan como:

$$y_{\min} \leq y(k+i|k) \leq y_{\max} \quad \forall i = 1, \dots, P \quad (1.1.5)$$

Adicionando estas restricciones a la función objetivo la minimización se vuelve más compleja, de modo que la solución no puede ser obtenida explícitamente como en el caso sin restricciones.

Obtención de la Ley de Control:

Para obtener los valores de $u(k+i|k)$ es necesario minimizar la función de costo de la ecuación (1.1.2). Para ello se calculan los valores de las salidas predichas $\hat{y}(k+i|k)$ en función de los valores de las entradas y salidas pasadas y de las señales de control futuras, haciendo uso del modelo que se haya elegido y se sustituyen en la función objetivo, obteniendo una expresión cuya minimización conduce a los valores buscados. Para el criterio cuadrático si el modelo es lineal y no existen restricciones se puede obtener una solución analítica, en otro caso se debe usar un método iterativo de optimización.

La estructuración de la ley de control produce una mejora en la robustez y en el comportamiento general del sistema. Esta estructura de la ley de control es basada en el uso del concepto de horizonte de control (M). Esto consiste en considerar que luego de cierto intervalo ($M < P$) no hay variación en las señales de control propuestas, por lo tanto:

$$\Delta u(k+i) = 0 \quad \forall i = M, \dots, P \quad (1.1.6)$$

lo que es equivalente a dar pesos infinitos a los cambios en el control desde un instante determinado. El caso límite sería considerar M igual a 1, con lo cual todas las acciones futuras serían iguales a $u(k)$.

1.2 Control remoto.

La comunicación de datos se ha convertido en parte fundamental de la computación. Las redes globales reúnen información sobre temas diversos, como las condiciones atmosféricas, la producción, el tráfico aéreo entre muchas otras. En el mundo científico las redes de datos son esenciales pues permiten a los científicos enviar y recibir información hacia computadoras remotas para su procesamiento, recuperar los resultados e intercambiar información [6].

1.2.1 Breve historia de la comunicación entre computadoras.

A principios de los años 60, varios investigadores intentaban encontrar una forma de compartir recursos informáticos de una forma más eficiente. En 1961, Leonard Kleinrock introduce el concepto de Conmutación de Paquetes (Packet Switching). La idea era que la comunicación entre ordenadores fuese dividida en paquetes. Cada paquete debería contener la dirección de destino y podría encontrar su propio camino a través de la red.

En 1969 la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada (Defense Advanced Research Projects Agency o DARPA) del Ejército de los EEUU desarrolla la ARPAnet. Aunque dicha red funcionaba bien, estaba sujeta a algunas caídas periódicas del sistema. De este modo, la expansión a largo plazo de esta red podría resultar difícil y costosa. Se inició entonces una búsqueda de un conjunto de protocolos más fiables para la misma. Dicha búsqueda finalizó, a mediados de los 70, con el desarrollo de TCP/IP (Transfer Control Protocol/Internet Protocol) [6]. Las siglas TCP/IP se refieren a dos protocolos de red, que son Transfer Control Protocol e Internet Protocol, respectivamente. Estos pertenecen a un conjunto mayor de protocolos. Dicho conjunto se denomina suite TCP/IP [6].

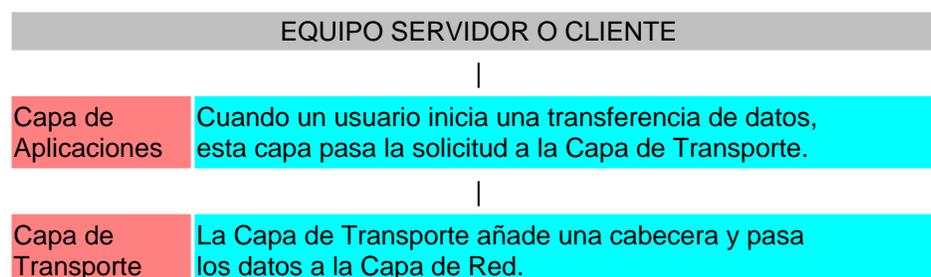
TCP/IP tiene ventajas significativas respecto a otros protocolos. Por ejemplo, consume pocos recursos de red. Además, puede ser implementado a un costo mucho menor que otras opciones disponibles. Gracias a estos aspectos, comenzó a hacerse popular. En 1983, este protocolo se integró en la versión 4.2 del sistema operativo UNIX de Berkeley y la integración en versiones comerciales de UNIX vino pronto. Así es como TCP/IP se convirtió en el estándar de Internet.

En la actualidad, TCP/IP se usa para muchos propósitos, no solo en Internet. Por ejemplo, a menudo se diseñan intranets usándolo. En tales entornos, este protocolo ofrece otras ventajas sobre otros protocolos de red, una de estas es que trabaja sobre una gran variedad de hardware y sistemas operativos. De este modo puede crearse fácilmente una red heterogénea usando dicho protocolo.

Los diferentes protocolos de la suite TCP/IP trabajan conjuntamente para proporcionar el transporte de datos dentro de Internet (o Intranet). En otras palabras, hacen posible que accedamos a los distintos servicios de la red. Estos servicios incluyen: transmisión de correo electrónico, transferencia de ficheros, grupos de noticias, acceso a la World Wide Web, etc.

¿Cómo Trabaja TCP/IP?

TCP/IP opera a través del uso de una pila. Dicha pila es la suma total de todos los protocolos necesarios para completar una transferencia de datos entre dos máquinas (así como el camino que siguen los datos para dejar una máquina o entrar en la otra). La pila está dividida cinco capas: capa de aplicaciones, de transporte, de red, de enlace de datos y la capa física, las mismas se ilustran en la siguiente figura:



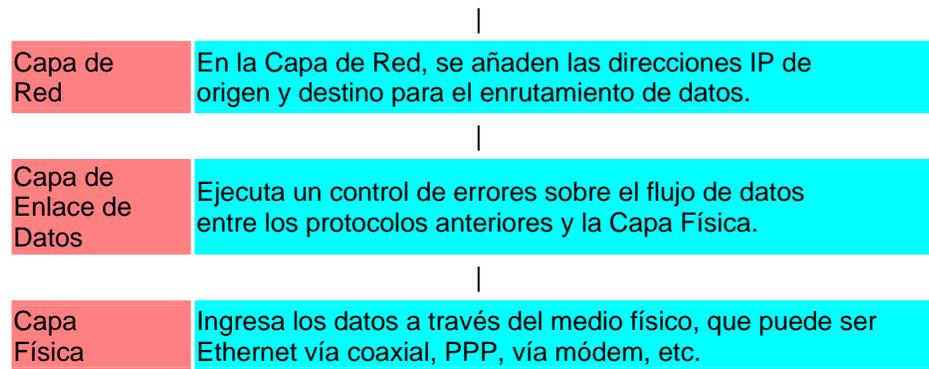


Fig. 1.2.1 Capas de la pila.

Después de que los datos han pasado a través del proceso ilustrado en la figura 1.2.1, viajan a su destino en otra máquina de la red. Allí, el proceso se ejecuta al revés (los datos entran por la capa física y recorren la pila hacia arriba). Cada capa de la pila puede enviar y recibir datos desde la capa adyacente. Cada capa está también asociada con múltiples protocolos que trabajan sobre los datos.

DataSocket es una tecnología de programación de Internet basado en TCP/IP que simplifica el intercambio de datos entre computadoras y aplicaciones [37].

Antes del surgimiento de este protocolo de comunicación había diferentes tipos de hardware, software y protocolos envueltos en varias aplicaciones. Esta complejidad forzó la negociación entre los programadores de estos protocolos de transferencia de datos. Como resultado de esto, National Instrument desarrolló DataSocket. El principal objetivo de su creación es ayudar a eliminar las dificultades de integración de hardware y software específicamente en las aplicaciones de mediciones y para publicar datos en vivo sobre la red.

DataSocket tiene dos partes fundamentales: El servidor DataSocket y la API (Application Programming Interface) para los clientes. De acuerdo con National Instrument este servidor es un simple terminal API basada en URIs (Universal Resource Locator) para conectar datos localizados en cualquier lugar con el objetivo de medirlos y automatizarlos. Esencialmente este protocolo es una tecnología que nos permite mandar y recibir datos a través de una red desde una gran variedad de plataformas sin preocuparnos por los detalles de la programación a bajo nivel.

Uno de los componentes principales del DataSocket es su propio servidor; este es una pequeña aplicación externa al entorno de programación que se encarga de manejar las conexiones TCP/IP. Este protocolo puede trabajar con diferentes tipos de datos como enteros, dobles, cadenas, boléanos etc. y con arreglos de los mismos.

El servidor DataSocket es una aplicación disponible para Windows que se ejecuta en una computadora y manejará las conexiones de los clientes. Los clientes pueden escribir y leer datos en el servidor o viceversa, estos datos son conocidos como *publishers* y *subscribers* respectivamente [9].

Los clientes de DataSocket implementan la API de DataSocket para poder conversar con el servidor. Esta API está disponible en:

- Los instrumentos virtuales del LabVIEW.
- La librería C del Labwindows CVI.
- Los controles Active X.
- JavaBean.

Números IP

Una dirección IP consiste en cuatro números separados por puntos, estando cada uno de ellos en el rango de 0 a 254. Por ejemplo, una dirección IP válida sería 193.146.85.34. Cada uno de los números decimales representa una cadena de ocho dígitos binarios. De este modo, la dirección anterior sería realmente la cadena de ceros y unos:

11000001.10010010.01010101.00100010

1.2.2 Control remoto moderno.

La práctica de control remoto moderno ha evolucionado en los últimos 20 años con el objetivo de dar solución a problemas de control. En este avance ha jugado un papel fundamental el desarrollo de computadoras apropiadas ya que en las aplicaciones de control remoto estas requieren trabajar durante largos períodos de tiempo con extrema confiabilidad [8].

En los últimos años se ha visto un verdadero incremento del interés de los investigadores hacia el tema de control remoto. En el 2001 se presentaron los resultados del estudio del efecto de los tiempos de retraso en redes con Profibus y se propuso una solución este problema [30].

En el año 2003 se presentan las ventajas de los sistemas clientes/servidor y se proponen los lenguajes de programación gráficos para trabajar más fácil con estos sistemas [10]; al mismo tiempo se presenta un trabajo que propone tres niveles de supervisión jerárquica, en este las redes de Petri son utilizadas para modelar, diseñar y verificar el agente supervisorio y la tecnología utilizada para implementar la supervisión y control remoto es Java [17].

Un tiempo después se propone y se pone en marcha un sistema para controlar a través de una red una máquina de empaquetado de tabaco [24]. Este sistema de control realiza la comunicación entre la estación de monitoreo y el autómata S5-135 usando el protocolo Profibus y la red de la empresa al mismo tiempo. Este sistema ha sido instalado a gran escala en la industria tabaquera obteniéndose buenos beneficios económicos.

En el 2006 se presenta el modelado en redes de Petri coloreadas y la descripción de un protocolo de comunicación en tiempo real para sistemas inalámbricos, con aplicaciones de control y monitoreo remoto [26].

Un año más tarde se desarrolla una aplicación en el MATLAB que permite el acceso a través de Internet a procesos industriales para su supervisión y control remoto. En este se utilizan las capacidades del World Wide Web para enviar datos al MATLAB para su procesamiento y luego mostrar los resultados en un navegador Web [31].

El esquema básico del control remoto moderno [8] se ilustra en la figura 1.2.2, donde se observa el lazo de control lento "S" y el lazo de control rápido "F". Además están presentes sus cuatro funciones básicas:

1. Un comando de enlace: los comandos pueden ser transmitidos a una localización remota, procesados y actuar en consecuencia con los equipos de control para controlar el proceso.
2. Un monitor de enlace: donde la información que describe el comportamiento del proceso remoto es retransmitida a la central de control para informar lo que esta pasando.
3. El aseguramiento automático de operaciones razonables.
4. La notificación automática a la central de control de cualquier operación ilógica.

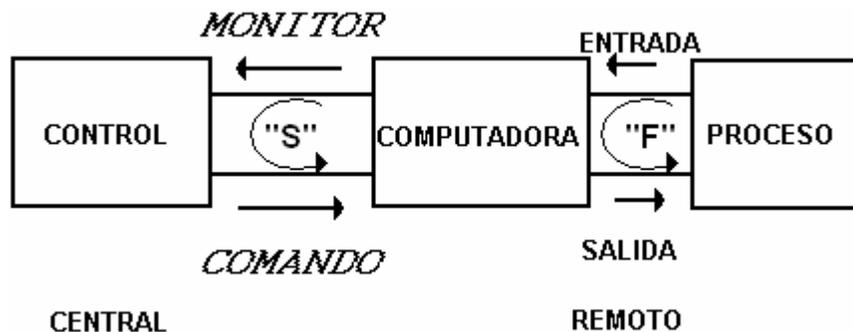


Fig. 1.2.2 Sistema de control remoto con computadora

La computadora ha sido añadida a la localización remota para hacerse cargo de todos los problemas que requieran respuesta de control inmediata y para implementar la notificación automática al control central de cualquier operación ilógica.

Por ejemplo, si el sistema es el control remoto de una aeronave, la computadora sería el piloto automático y su equipo asociado, los cuales mantienen a la aeronave en un vuelo estable a pesar de las turbulencias tales como ráfagas de viento.

1.2.3 Sistema de control por red.

Un sistema de control remoto es aquel en el que la planta y el controlador están conectados a través de una de red [33]. Un tipo específico de estos son los sistemas de control remoto desde Internet, en el que entre el controlador y la planta existe un número de equipos desconocido que inducen retardos al sistema.

Cuando la planta se encuentra enlazada al controlador a través de una red, principalmente ethernet, al sistema se le denomina Sistema de Control en Red, del Ingles Network Control Systems y se conoce por sus siglas NCS. Dichos sistemas acaparan gran atención por parte de la comunidad científica por sus amplias posibilidades de aplicación, reconfiguración y su estandaricidad [33].

El concepto de Sistema de Control en Red, comenzó a llamar la atención de los investigadores en la última década del siglo XX. Desde entonces un volumen considerable de herramientas teóricas han sido producidas. El campo de los dispositivos, sensores, actuadores y controladores de un NCS están interconectados sobre una red ya sea alambrada o sin alambres [8]. La ventaja primaria del NCS es la reducción del sistema de cableado, la facilidad del diagnóstico del sistema y mantenimiento, incrementando la flexibilidad y la reconfigurabilidad del mismo [28].

Específicamente se plantean las siguientes ventajas de los NCS [18]:

- Entorno de trabajo en Red: Los sistemas de control remoto soportan varias topologías, como la de buses, la de tipo estrella, árbol, entre otras. Se pueden además mezclar entre ellos e incluso integrar con otras tecnologías como la Wi-Fi (Wireless Fidelity), etc.
- Nodos Inteligentes: Cada componente del sistema que se encuentre conectado a la red es considerado un nodo, los cuales se consideran una unidad capaz de realizar funciones relativamente independientes. Estos nodos son capaces de transmitir información con un alto grado de confiabilidad a través de la red.
- Perfeccionamiento de las funciones de control: En un NCS se pueden implementar varios tipos de estrategias de control, desde las más sencillas hasta las más complejas.
- Control localizado y descentralización: En un entorno en red se hacen las asignaciones realizadas por la unidad de control antes de ser ejecutadas por los configuradores locales que pueden concluir algunas de las tareas de control. Esto provoca una descentralización de los factores de riesgo y por consiguiente se aumenta la confiabilidad y la seguridad de los sistemas.

- Estructura de comunicación integrada en red: La introducción de la comunicación en red en los sistemas de control resuelve el complejo problema de control de los sistemas de gran escala, hasta cierto punto, y garantiza la transmisión de información de control de tiempo real y la síntesis de la automatización de todo el sistema.
- Alta confiabilidad del sistema: Los NCS adoptan la redundancia y la tecnología de tolerancia a errores y tienen muchas funciones como el autodiagnóstico, autochequeo y el autorestablecimiento, estos pueden reconfigurar sistemas de acuerdo a cambios en las circunstancias y en los objetos.
- Sistemas abiertos e integración de productos: Los NCS son sistemas abiertos y pueden desarrollarse basándose en estándares, esto trae como consecuencia que se pueden integrar productos y soluciones de diferentes fabricantes para el diseño de un sistema de control.

Los sistemas de control remoto presentan por supuesto un conjunto de desventajas propias del empleo de la red debido fundamentalmente a las restricciones en la comunicación que esta impone. Además la carencia de un reloj global y la presencia en la red de un tráfico que no es propiamente de señales de control, provoca que no se pueda tener como válidos los tiempos de muestreo para algunas aplicaciones. Todos estos factores provocan retardos en la transmisión de información, los cuales pueden ser fijos o aleatorios, la existencia de estos retardos hace el análisis y el diseño de los sistemas mucho más complejo.

Las principales desventajas de los sistemas de control remoto son las siguientes [18]:

- Pérdida de la determinabilidad: El tiempo de llegada de los datos a su destino no es regular ni determinable, lo que hace imposible el uso de los períodos de muestreo para describir los sistemas. De aquí que dicha descripción se deba realizar en función del momento en que los datos arriban a su destino.
- Pérdida de la integridad: Debido a que puede haber pérdida de datos u ocurrir algún error en la transmisión no existe seguridad de que los datos estén completos.
- Pérdida del principio de causa y efecto: Debido a la incertidumbre en los tiempos de transmisión, los datos no necesariamente llegan a su destino en el orden en que fueron producidos.
- Pérdida de la constancia: Debido al efecto aleatorio de la llegada de los datos el proceso de control deja de ser un sistema constante y se convierte en un sistema estocástico.

Control remoto con MPC.

Un método eficiente para manejar la retroalimentación de los controladores en una NCS, el cual está siempre expuesto a varias fuerzas impuestas por el medio de

comunicación, es el empleo de la estrategia de control predictivo. El uso de MPC tiene dos ventajas principales:

1. Tiene mejores propiedades estabilizantes y de control.
2. Es capaz de manejar MACs (Medium Access Constraints) de manera más eficiente en comparación con otras estrategias de control. Cuando se aplica a un NCS tiene de ventaja que el controlador predictivo determina la variable de control unos cuantos pasos adelante. Esto ayuda en el caso de errores en la red ya que el sistema puede continuar funcionando hasta que la próxima acción de control sea determinada [28].

Control remoto con redes inalámbricas.

Los NCS pueden realizarse tanto con redes alambradas como inalámbricas, en la presente sección se detallan las ventajas y características de esta última.

Las redes inalámbricas (en inglés wireless network) son aquellas que se comunican por un medio de transmisión no guiado (sin cables) mediante ondas electromagnéticas. La transmisión y la recepción se realizan a través de antenas [35].

Algunas de las principales ventajas de las redes inalámbricas son la rápida instalación de la red sin la necesidad de usar cableado, permiten la movilidad y tienen menos costos de mantenimiento que una red convencional [35].

Características de la red inalámbrica:

- La reducción del cableado, trae como consecuencia que se facilite su instalación.
- Al utilizarse radiofrecuencias para la comunicación, nos permite conectar zonas a las cuales no podemos llegar utilizando cableado, ya sea por costo o por ubicación.
- Permite la transmisión en tiempo real a usuarios, lo cual aumenta las posibilidades de servicio y productividad.

En este trabajo se realiza la comunicación inalámbrica con los dispositivos WNC-0301USB, la señal que ellos transmiten es conocida como DSSS (Direct-Sequence Spread-Spectrum), dicho dispositivo fue desarrollado para fines militares y su funcionamiento consta en dividir las señales informativas en varias frecuencias, estas comúnmente son las de 902-928 MHz y de 2.4-2.484 GHz (también llamada ISM, Industrial-Scientific and Medical radio frequency), este último rango de frecuencias es utilizado por teléfonos inalámbricos (no celulares), controles de puertas eléctricas, entre otros; la ventaja de operación en

esta frecuencia es que no requiere permiso gubernamental para ser utilizada a diferencia de otras frecuencias [36].

1.2.4 Sistema de control remoto Cliente/Servidor.

El control remoto de instalaciones y sistemas ha sido una realidad técnica en los laboratorios de investigación e industrias automatizadas, particularmente en la industria de control de procesos.

Debido a la estricta demanda de la industria, una variedad de sistemas de buses han sido desarrollados para operar a diferentes niveles jerárquicos que se encuentran en sistemas automatizados. Al nivel más alto (Internet) los sistemas basados en ethernet son frecuentemente utilizados para transferir datos usando diferentes protocolos. Con el rápido desarrollo de Internet en los últimos diez años, y su protocolo asociado TCP/IP, así como el uso de la documentación hipertexto como una técnica básica en el World Wide Web, han aparecido nuevas posibilidades de utilizar la red para el control remoto.

Con la ayuda de paquetes de desarrollo de softwares gráficos tales como el LabVIEW, ahora es posible diseñar HTTP (HyperText Transfer Protocol) basado en la solución cliente/servidor y sistemas de entrada para problemas de control remoto con gastos moderados [10].

Los sistemas clientes/servidor tienen algunas ventajas generales si se comparan con los sistemas de acceso remoto simples (RAS). Estos tienen mejor seguridad, mayor funcionalidad y pueden ser administrados más fácil y efectivamente desde el servidor.

El modelo cliente/servidor es común para aplicaciones de redes. En este modelo un grupo de procesos denominados *clientes* solicitan servicios a otro grupo de procesos denominados *servidores*. Un servidor normalmente está esperando por un cliente para iniciar una conexión y en la mayoría de los casos puede conectarse con varios clientes al mismo tiempo [9].

Clientes.

Los pasos básicos que debe ejecutar un subVI (instrumento virtual) cliente son los siguientes:

1. Abrir una conexión con el servidor.
2. Mandar un comando.
3. Recibir una respuesta.
4. Cerrar la conexión.

Servidores.

Los programas servidores se clasifican en dos tipos: servidores que se conectan con un sólo cliente en un momento determinado y servidores que se pueden conectar con varios clientes. El segundo es más complicado que el primero, un ejemplo de este tipo de aplicación son los Servidores Web.

Servidores de un solo cliente.

Estos servidores atienden un cliente a tiempo completo y cuando terminan con este pasan a realizar la próxima conexión con el otro si es que existe. Cuando un cliente 1 pretende conectarse a un servidor y este ya está conectado a otro cliente, el cliente 1 espera un tiempo y si al cabo de este tiempo no se ha podido conectar se genera un error o un mensaje que dice que el servidor está ocupado.

Un servidor de un solo cliente debe seguir los siguientes pasos para establecer una conexión:

1. Escuchar por conexiones entrantes.
2. Cuando se conecta un cliente recibir el comando que este envía.
3. Responder al cliente.
4. Repetir los pasos 1 y 2 si es necesario.
5. Cuando el cliente se desconecta debe seguir escuchando por nuevas conexiones.

Servidores de múltiples clientes.

Estos tipos de servidores deben permitir que un usuario se conecte aun si existe una conexión activa. En sistemas que permitan crear nuevos procesos dinámicamente como es el caso de UNIX se crearía un nuevo proceso cada vez que se abra un nuevo socket por un cliente. No obstante en LabVIEW se puede crear una referencia para cada nueva conexión y ubicarlas en cola y dejar entonces que el servidor vaya atendiendo cada conexión durante un tiempo determinado según su orden en la cola.

Un servidor de múltiples clientes debe seguir los siguientes pasos para establecer una conexión:

1. Escuchar por conexiones entrantes.
2. Cuando se conecte un cliente ubicarlo en una cola.
3. Seguir escuchando por conexiones.
4. Mientras escucha procesar el comando del primer cliente en la cola.
5. Cerrar la conexión del cliente procesado y pasar al próximo.

1.2.5 Análisis de retardos en los sistemas de control remoto.

El hecho de tener un entorno de red compartido, en el que los datos de control no son los únicos que viajan a través de la red, la competencia por los recursos entre los nodos que transmiten información y el congestionamiento que se produce en el medio de transmisión inducen retardos que afectan a todos los datos que se transmiten en la red.

Desde el punto de vista del control estos retardos provocan un deterioro en el comportamiento y pueden hacer inestable el sistema. La toma de muestras también se ve afectada por los retardos, que provocan que la información llegue fuera de tiempo, e incluso que se produzca un efecto dominó haciendo que todo el proceso de recepción de la información, cálculo de la acción de control, y transmisión de dicha acción se vaya desplazando en el tiempo.

Los retardos inducidos en la red se componen por la suma de varios de ellos, tales como:

- Retardo de acceso al medio, que es el tiempo desde que la información está en el transmisor hasta que este tiene acceso al medio para transmitirla.
- Retardos en la transmisión, este depende de ciertas características de la red como la velocidad de transmisión.
- Retardos debido a un alto tráfico de información en la red que provoca que esta se congestione.

Conclusiones

Las conclusiones del capítulo son las siguientes:

- Se estudiaron los aspectos que caracterizan la estructura de Control Predictivo Basado en Modelo, posicionada como una de las técnicas de mayor aplicación en los procesos industriales.
- Se estudiaron los aspectos principales de la comunicación entre máquinas a través de las redes de computadoras, tanto alámbricas como inalámbricas, determinándose las ventajas y desventajas del control remoto con estas; dentro de este tema también fueron tratados los sistemas cliente/servidor y se hace un análisis de los retardos. Además se presenta la estrategia de MPC como una forma eficiente de manejar los NCS.

CAPITULO II. RESULTADOS DEL CONTROL REMOTO DE LOS PROCESOS BAJO ESTUDIO CON CONTROLADORES PREDICTIVOS.

Introducción

En el presente capítulo se diseña el controlador predictivo de una Unidad Generadora de Vapor y un Reactor de Neutralización, los cuales se controlan de manera remota. Mediante una interfaz gráfica se realizan las simulaciones de dichos procesos mostrando los resultados de estos.

A través de esta herramienta se presenta y se estudia el control de sistemas haciendo uso de las técnicas de control predictivo, de forma tal que utilizando un entorno amigable los estudiantes -ya sea pregrado o postgrado- o los operadores de la industria puedan fácilmente estudiar, conocer, formular y proponer aplicaciones empleando esta estrategia de control avanzado con un acercamiento de cómo es su implementación industrial. Para la realización de este trabajo se utilizan los programas LabVIEW y MATLAB.

2.1 Diseño del sistema de control remoto con controladores predictivos.

Los contenidos teóricos de las asignaturas de la carrera de automática pueden ser transmitidos por los docentes de forma tradicional en clase, pero lo que no es sencillo, es poder aportar a los alumnos la habilidad e intuición a la hora de hacer frente a los problemas reales. Las herramientas interactivas constituyen un elemento muy potente que permite reflejar la componente visual subyacente al control automático bajo la abstracción de conceptos matemáticos, así como estimular la intuición de los estudiantes. De esta forma un alumno puede trabajar sobre un problema de forma gráfica y observar cómo el cambio en un determinado elemento se ve reflejado de forma inmediata en el resto, cómo si estuviera ante el proceso real.

En este trabajo se desarrolla la herramienta interactiva Control Remoto con Controladores Predictivos (CRCP), a través de la cual se puede estudiar el control de sistemas remotos, haciendo uso de las técnicas de control predictivo, desde un entorno asequible, tanto para estudiantes como para operadores de la industria.

Desde la interfaz creada se manejan los principales conceptos de MPC, con la inclusión de restricciones, disturbios y cambios en la referencia.

El diseño del sistema de control supervisorio remoto propuesto se muestra en la figura 2.1 y está basado en el modelo cliente/servidor, este cuenta con los elementos adecuados para proveer al controlador la información necesaria para tomar decisiones oportunas y obtener la respuesta deseada del proceso. En el módulo servidor se encuentran los modelos dinámicos de los procesos: Unidad Generadora de Vapor (Caldera) y Reactor de Neutralización y en el cliente el controlador predictivo.

Inicialmente el módulo servidor debe encontrarse en ejecución y posteriormente el usuario desde cualquier PC, vía LAN (Local Area Network) a la PC servidor podrá ejecutar el programa CRCP que en primera instancia encuestará por la dirección IP (ver anexo 1a) del servidor e intentará comunicarse, en caso de no haber conexión el usuario tendrá la opción de salir o intentar una nueva. Una vez lograda la conexión aparece la ventana principal en el módulo cliente en la cual se tendrá la opción de escoger el proceso a estudiar o de salir como se puede observar en el anexo 1b.

Luego de seleccionado el proceso aparece en pantalla una ventana con el nombre del mismo, esta brinda la posibilidad de variar los parámetros nominales del proceso y los de sintonía del MPC con la opción de variar o no el modelo lineal con el que trabaja el controlador, así como el empleo o no de restricciones y disturbios y la referencia a seguir. En el anexo 2 se muestran dichas ventanas para la Unidad Generadora de Vapor y en el anexo 3 las ventanas correspondientes al Reactor de Neutralización.

En ambos módulos (cliente y servidor), se utilizan los programas MATLAB y LabVIEW. El primero se emplea para el diseño del control predictivo y la simulación del modelo del proceso y el segundo para realizar la interfaz gráfica y la comunicación entre el proceso y el controlador.

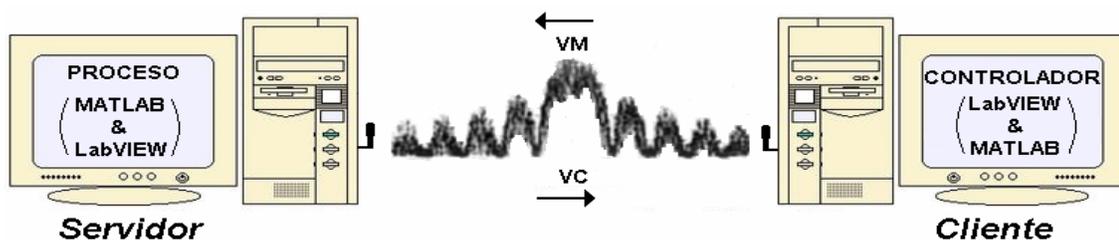


Fig. 2.1 Esquema general del control remoto supervisorio propuesto.

La comunicación entre cliente/servidor se realiza a través del protocolo de comunicación Datasocket, vía inalámbrica con el dispositivo WNC-0301USB de LevelOne que se muestra en la figura 2.2, este transmite una señal conocida como

DSSS (Direct-Sequence Spread-Spectrum), la cual es una técnica de propagación de espectro.

La transmisión DSSS multiplica el dato que esta siendo transmitido por una señal de ruido, este ruido es una secuencia pseudo aleatoria de ± 1 con una frecuencia mucho mas elevada que la señal original. El resultado se asemeja a una señal de ruido blanco, los datos se reconstruyen en el lado receptor multiplicando exactamente por el mismo código pseudo aleatorio [36].



Fig. 2.2 Dispositivo de conexión inalámbrica WNC-0301USB.

Las características técnicas del dispositivo de conexión inalámbrica WNC-0301USB se muestran en la tabla 2.1 [36]:

Tabla 2.1. Características del dispositivo WNC-0301USB.

Características	Tipo
➤ Tipo de Bus:	USB 2.0 tipo A
➤ Tipo de emisión:	DSSS
➤ Banda de frecuencia:	(2.4~2.483) MHz
➤ Antena	interna
➤ Infraestructura del modo de trabajo:	Ad – hoc
➤ Consumo eléctrico:	Transmisor: 340 mA

	Receptor: 150 mA
➤ Temperatura óptima de operación:	(0 ~ 50) °C
	(32 ~122) °F
➤ Humedad óptima de operación:	(0 ~ 95) %
➤ Dimensiones:	Alto: 9 mm
	Ancho: 29 mm
	Profundidad: 87 mm
➤ Peso:	20 g

En la especificación del modo de trabajo, el término Ad – hoc hace referencia a una red inalámbrica en la que no hay un nodo central, sino que todos los ordenadores están en igualdad de condiciones. Ad – hoc es el modo más sencillo para el armado de una red, sólo se necesita contar con dos placas o tarjetas de red inalámbricas (de la misma tecnología).

Entre los principales requerimientos de la herramienta creada se encuentran los siguientes:

Software:

- Instalación del MATLAB 6.5.
- Instalación del LabVIEW 7.1 o superior.
- Instalación de los drivers de los dispositivos de conexión inalámbrica WNC-0301USB.

Hardware:

- Al estar funcionando los programas LabVIEW 7.1 y MATLAB 6.5 al mismo tiempo en una PC los requerimientos mínimos de esta son: 512 MB (o más) de memoria RAM, 1.8 GHz como mínimo de frecuencia del microprocesador y más de 1.5 GB de espacio libre en la partición del disco duro donde se instalarán los software.
- Dispositivos de conexión inalámbrica WNC-0301USB.

2.2 Resultados de las simulaciones del MPC en la Unidad Generadora de Vapor.

Se implementa el control predictivo en una Unidad Generadora de Vapor [19], para controlar la presión y el nivel de agua en el interior de esta. Las ecuaciones diferenciales no lineales que describen su comportamiento son:

$$\frac{dPr}{dt} = -0.193 \cdot S \cdot P_r^{1/8} + 0.014524 \cdot F - 0.000736 \cdot Wc + 0.00121 \cdot L + 0.000176 \cdot Te \quad (2.1)$$

$$\frac{dS}{dt} = 0.1 \cdot cv \cdot P_r^{1/2} - 0.785716 \cdot S \quad (2.2)$$

$$\frac{dL}{dt} = 0.00863 \cdot Wc + 0.002 \cdot F + 0.463 \cdot cv - 6 \cdot e^{-6} \cdot P_r^2 - 0.00914 \cdot L - 8.2 \cdot e^{-5} \cdot L^2 - 0.7328 \cdot S \dots (2.3)$$

Donde (S) es el caudal de vapor, las variables manipuladas son el flujo de combustible (F) y el flujo de entrada de agua (Wc), y las variables controladas son la presión (Pr) y el nivel de agua (L) en el interior de la caldera. Las perturbaciones son la demanda de vapor (cv) y la temperatura de entrada del agua (Te).

En la tabla 2.2 se muestran los parámetros nominales de la Unidad Generadora de Vapor:

Tabla 2.2. Parámetros nominales de la Unidad Generadora de Vapor.

Parámetro	Valor
P_r	175.8020 kg/cm ²
L	63.9997 cm
cv	0.8
Te	310 °K
Wc	190.962 kg/s
F	38.5736 kg/s

Existen diferentes opciones para ser usadas en la representación del modelo lineal dinámico, entre ellas se encuentran, los modelo tipos convolución, los modelo AR-MAX y ARX, la representación en variables de estado, entre otros.

En esta aplicación, la dinámica del sistema se describe por un sistema de ecuaciones de estado discreta como se muestra a continuación:

El modelo en espacio estado que se obtiene mediante identificación experimental [19] es el siguiente:

$$A = \begin{bmatrix} 0.8363 & 0.0073 & 0 & 0.0854 & 0 & -0.0105 & -0.0203 & 0.0162 & -0.0180 & -0.0305 \\ -0.0067 & 1.3792 & 0 & -0.5448 & 0 & 0.0541 & -0.1201 & -0.4748 & 0.0754 & 0.1382 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1.3301 & -0.0395 \\ -0.0985 & 0.3881 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C^T = \begin{bmatrix} 0.8363 & 0.0073 & 0 & 0.0854 & 0 & -0.0105 & -0.0203 & 0.0162 & -0.0180 & -0.0305 \\ -0.0067 & 1.3792 & 0 & -0.5448 & 0 & 0.0541 & -0.1201 & -0.4748 & 0.0754 & 0.1382 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 1.3301 & -0.0395 \\ -0.0985 & 0.3881 \end{bmatrix}$$

Resultados del MPC sin restricciones.

Se implementa el problema de control descrito en la ecuación (1.1.2) para controlar presión y nivel de agua en una Unidad Generadora de Vapor.

Los parámetros de sintonía establecidos para la simulación de dicho proceso sin restricciones se presentan en la tabla 2.3:

Tabla 2.3. Parámetros de sintonía del MPC en la Unidad Generadora de Vapor.

Parámetro	Valor	
<i>P</i>	350	
<i>M</i>	35	
<i>T_s</i>	10 s	
<i>Q para P_r</i>	10 l	
<i>Q para L</i>	5 l	
<i>R para F</i>	0.1 l	
<i>R para W_c</i>	1 l	
	<i>P_r</i>	<i>L</i>
<i>r1</i>	180 kg/cm ²	50 cm
<i>r2</i>	175.8 kg/cm ²	64 cm

En las figuras 2.3 a la 2.6 se muestran los resultados de las simulaciones realizadas a la Unidad Generadora de Vapor sin restricciones. En las figuras 2.3 y 2.4 se observan la salida de la presión y el nivel de agua ante diferentes cambios en la referencia y se puede ver como los valores de nivel y presión siguen dichas referencias.

En las figuras 2.5 y 2.6 se observa el comportamiento de las variables manipuladas flujo de combustible y flujo de agua para este controlador, respectivamente, ante cambios en las referencias.

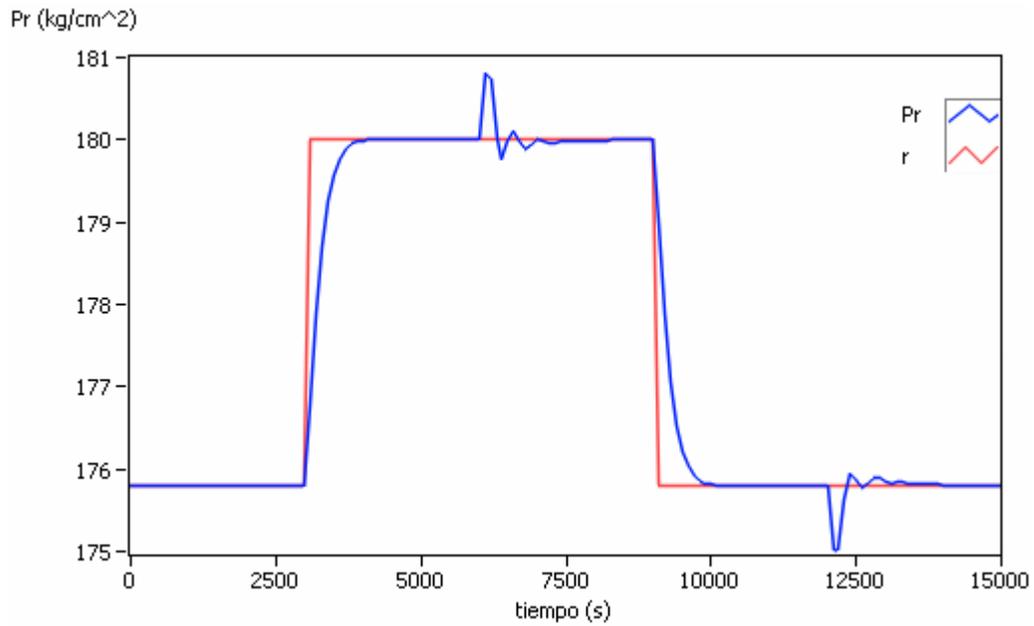


Fig. 2.3. Salida de presión ante cambios en las referencias del MPC.

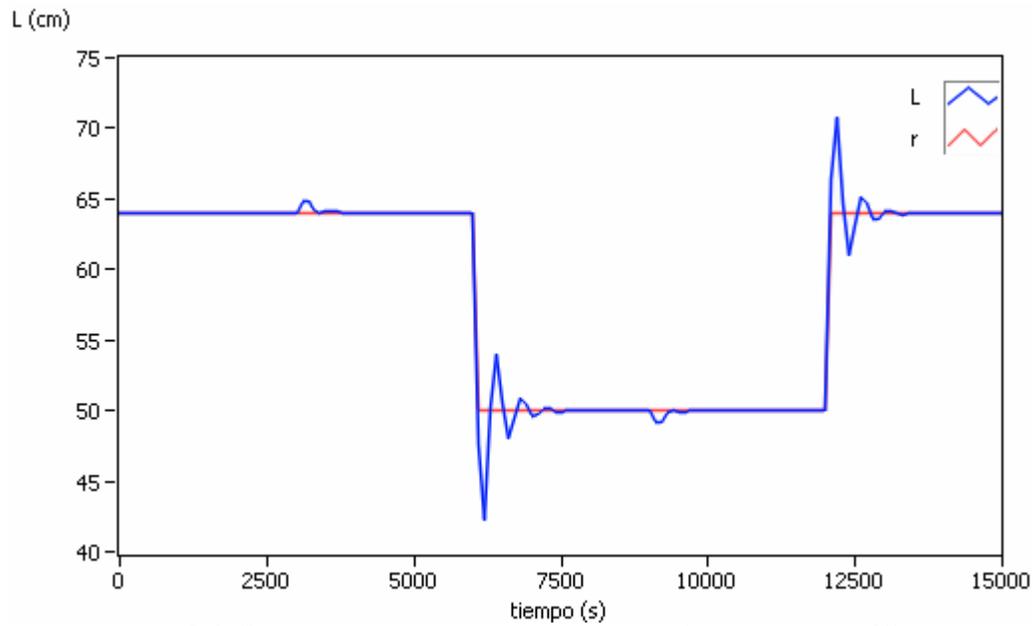


Fig. 2.4. Salida de nivel ante cambios en las referencias del MPC.

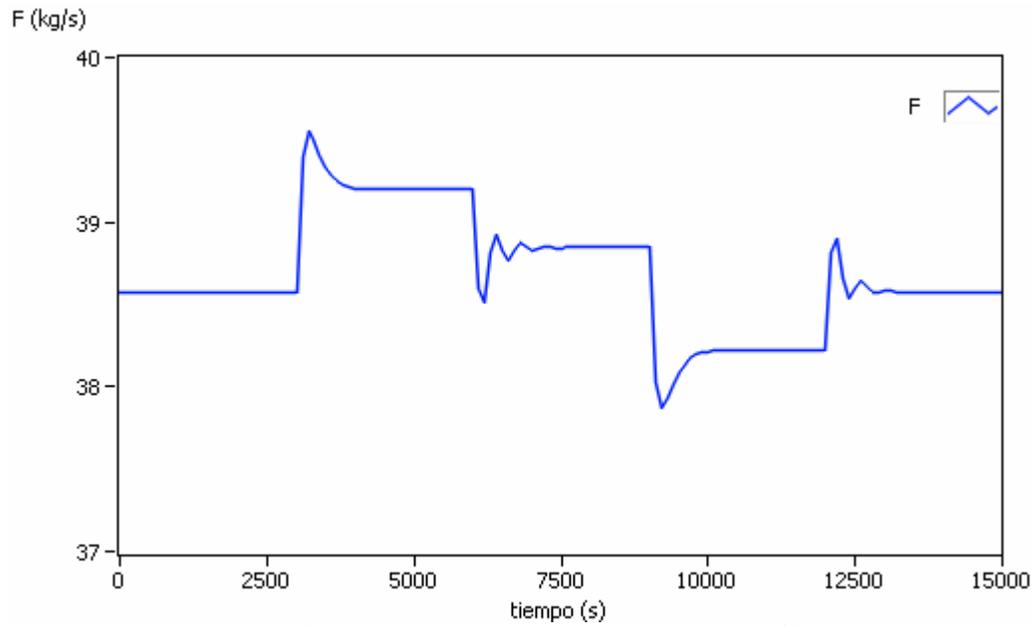


Fig. 2.5. Entrada de flujo de combustible del MPC.

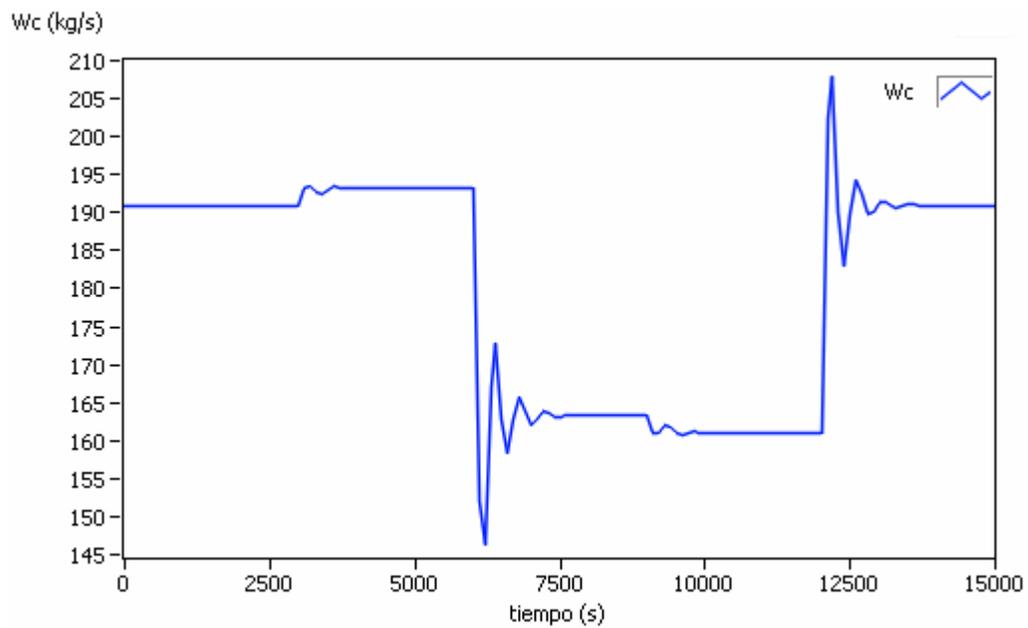


Fig. 2.6. Entrada de flujo de agua del MPC.

Resultados del MPC con restricciones.

Se implementa el problema de control descrito en la ecuación (1.1.2) para controlar presión y nivel de agua en una Unidad Generadora de Vapor.

Los parámetros de sintonía del MPC utilizado son los mismos que se muestran en la tabla 2.3. Los valores de los cambios de referencia para la presión son 185 kg/cm^2 y 160 kg/cm^2 y para el nivel 44 cm y 79 cm , y las restricciones utilizadas son las siguientes:

$$\begin{aligned} 150 \text{ kg/cm}^2 &\leq P_r \leq 200 \text{ kg/cm}^2 \\ 40 \text{ cm} &\leq L \leq 80 \text{ cm} \\ 30 \text{ kg/s} &\leq F \leq 60 \text{ kg/s} \\ 100 \text{ kg/s} &\leq W_c \leq 250 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Los resultados de las simulaciones obtenidos para el MPC con restricciones en las variables controladas y manipuladas se muestran en las figuras 2.7 a la 2.14. En las figura 2.7 a la 2.10 se muestran las respuestas de la salida del proceso y de sus acciones de control ante cambios en las referencias. Se observa como dichas salidas siguen los cambios realizados en las referencias y cumplen las restricciones establecidas.

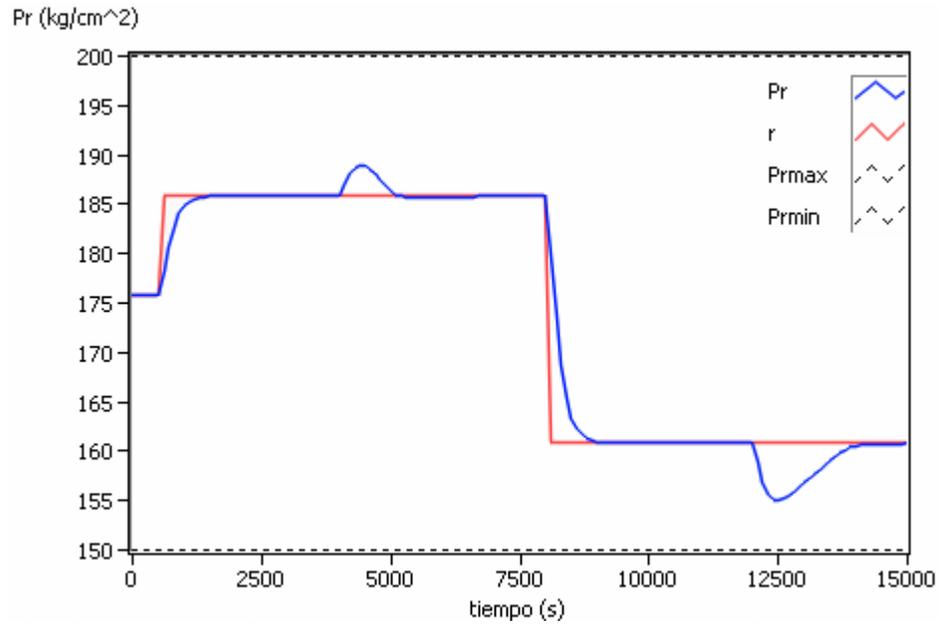


Fig. 2.7. Salida de presión ante cambios en las referencias del MPC con restricciones.

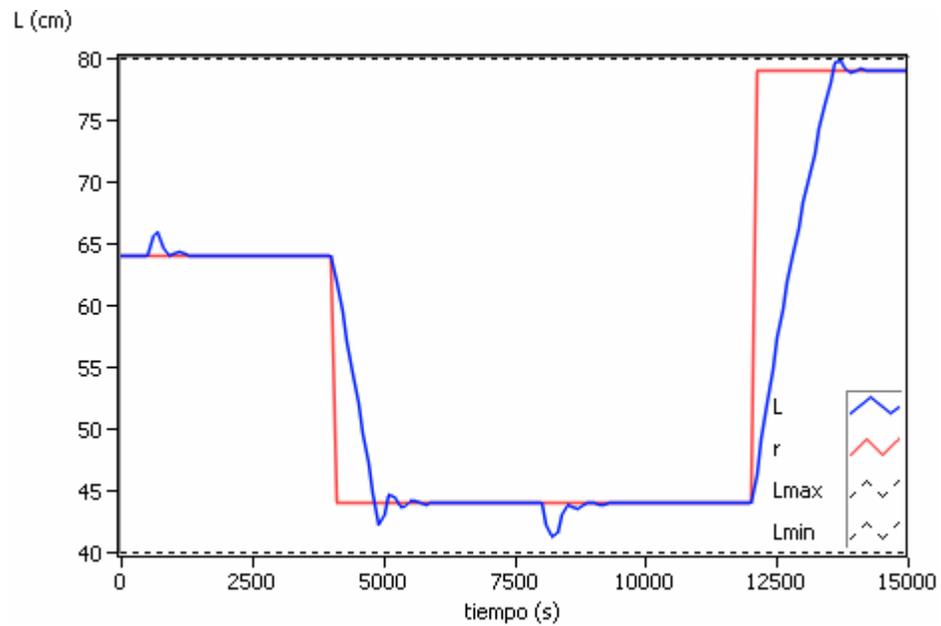


Fig. 2.8. Salida de nivel ante cambios en las referencias del MPC con restricciones.

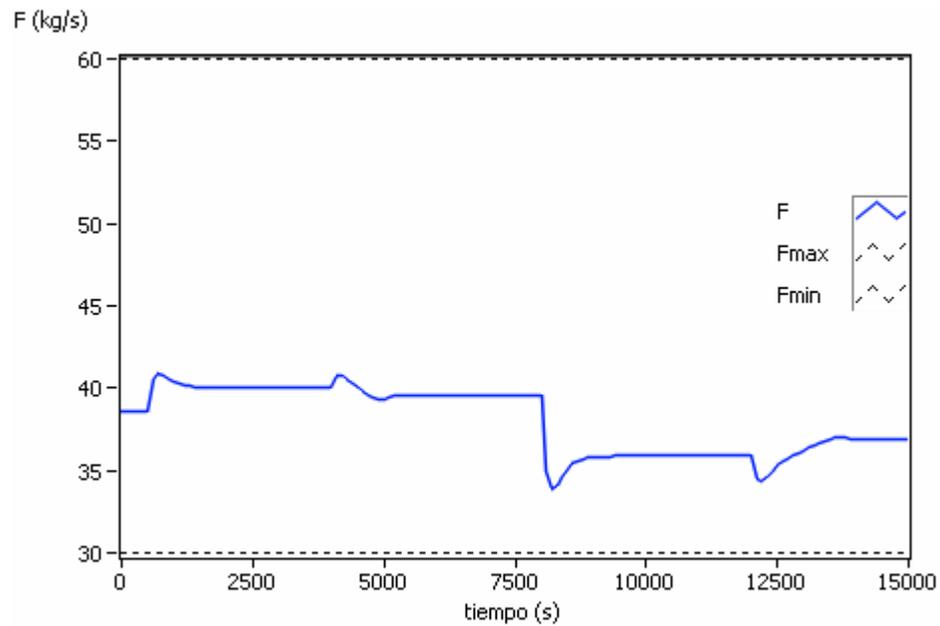


Fig. 2.9. Entrada de flujo de combustible con restricciones.

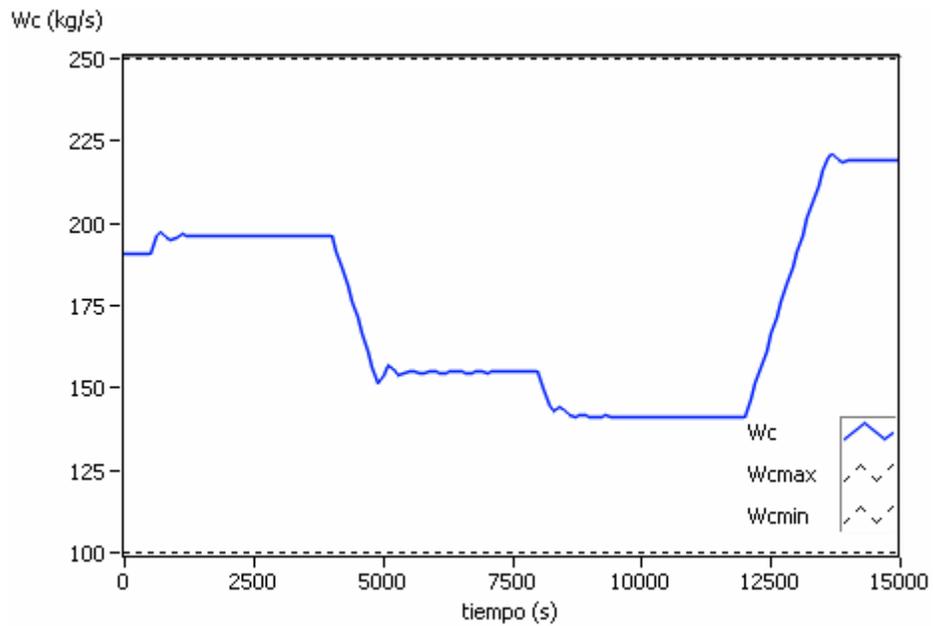


Fig. 2.10. Entrada de flujo de agua con restricciones.

Se aplica un disturbio en forma de escalón de un 5 % de demanda de vapor y uno de -5 % de temperatura de entrada de agua, y se obtienen las respuestas de las variables controladas P_r y L , así como de sus variables manipuladas F y W_c , las cuales se muestran en las figuras 2.11 a la 2.14. Se puede apreciar como el controlador rechaza estos disturbios y cumple con las restricciones establecidas en las entradas y salidas

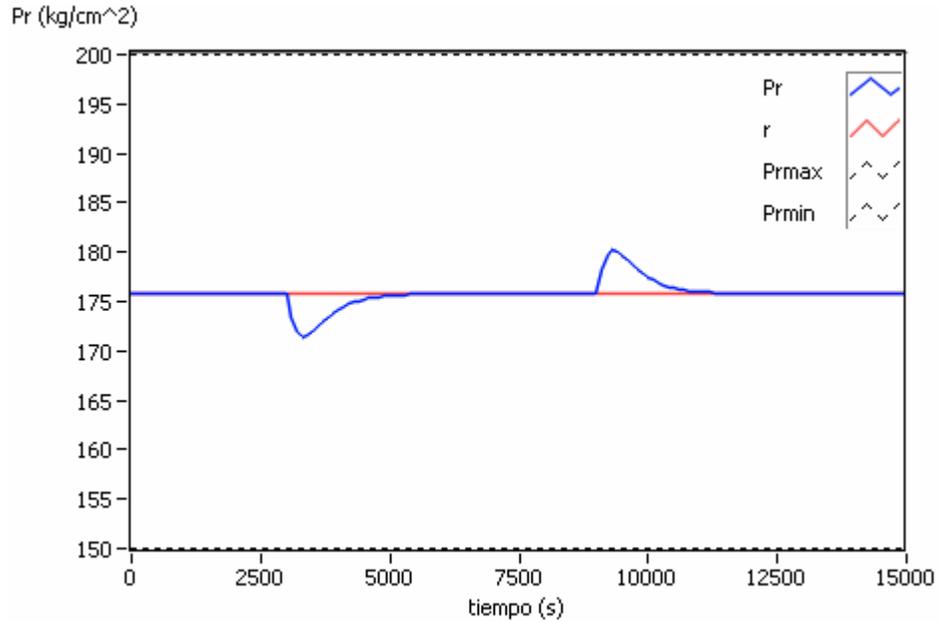


Fig. 2.11. Salida de presión ante disturbios medidos del MPC con restricciones.

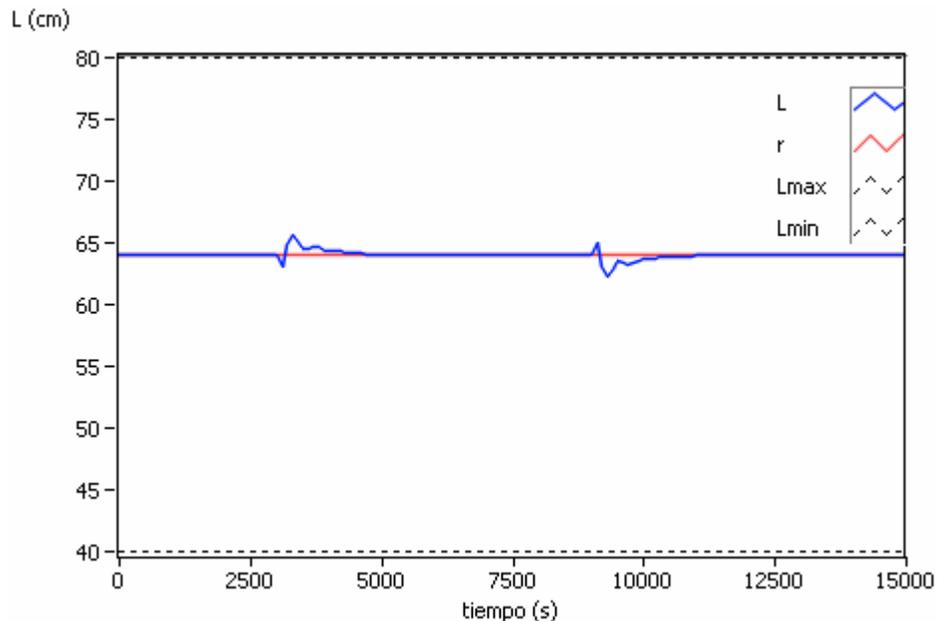


Fig. 2.12. Salida de nivel de agua ante disturbios medidos del MPC con restricciones.

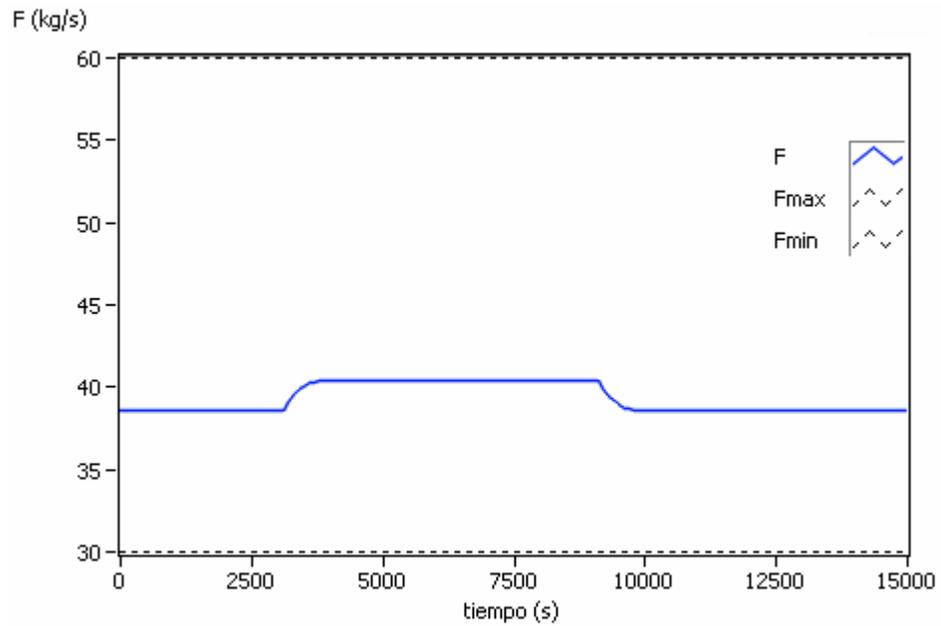


Fig. 2.13. Entrada de flujo de combustible ante disturbios medidos.

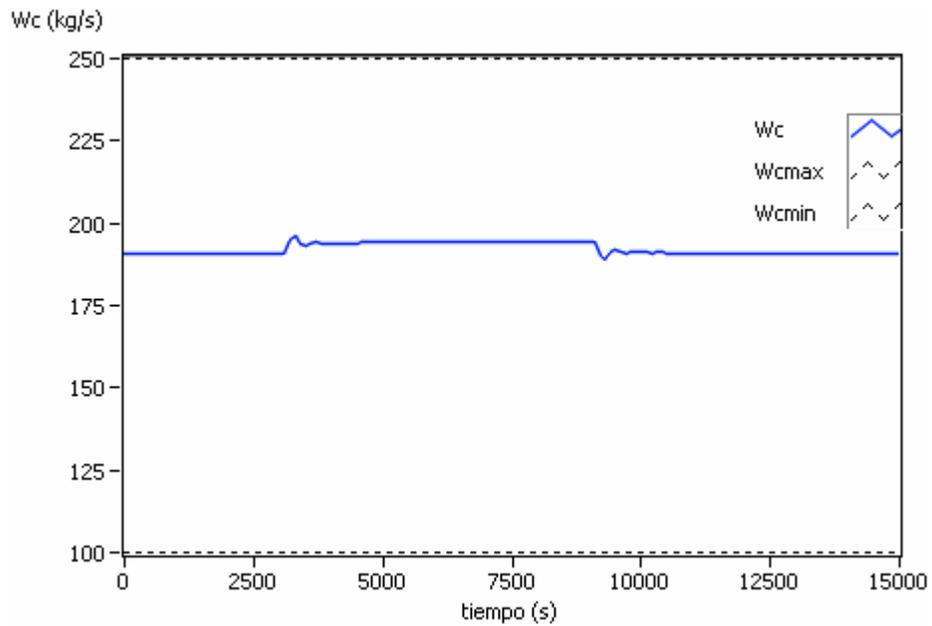


Fig. 2.14. Entrada de flujo de agua ante disturbios medidos.

2.3 Resultados de las simulaciones del MPC en el Reactor de Neutralización.

Se implementa el control predictivo a un reactor de neutralización [19], de volumen constante V , donde una solución ácida con un caudal volumétrico $q_A(t) \neq 0$ y con una composición constante $x_{1,i}$ (ácido) es neutralizada con una solución alcalina con caudal volumétrico $q_B(t)$ de composición conocida formada por una base ($x_{2,i}$), y un agente regulador ($x_{3,i}$). Las ecuaciones diferenciales que rigen este proceso son las siguientes:

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{\theta}(x_{1,i} - x_1) - \frac{1}{\theta}x_{1u} \quad (2.4)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{\theta}x_2 + \frac{1}{\theta}(x_{2,i} - x_2)u \quad (2.5)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{1}{\theta}x_3 + \frac{1}{\theta}(x_{3,i} - x_3)u \quad (2.6)$$

$$h(x, y) \equiv \xi + x_2 + x_3 - x_1 - \frac{K_w}{\xi} - \frac{x_3}{1 + \frac{K_x \xi}{K_w}} = 0 \quad (2.7)$$

Donde $\xi = 10^{-y}$, $\theta = V/q_A$ y $u = q_B/q_A$. Las ecuaciones 2.4 y 2.6 son los balances de masa de las especies de equivalentes químicos, conocidos como Invariantes Químicos y la ecuación 2.7 es la ecuación de neutralización del pH . En este proceso la variable manipulada es u y la variable controlada es $y=pH$.

En la tabla 2.4 se muestran los parámetros nominales del reactor de neutralización:

Tabla 2.4. Parámetros nominales del Reactor de Neutralización.

Parámetro	Valor
$x_{1,i}$	0.0012 mol HCL/l
$x_{2,i}$	0.002 mol NaOH/l
$x_{3,i}$	0.0025 mol NaHCO ₃ /l
K_x	10 ⁻⁷ mol/l

$$\begin{array}{l|l} K_w & 10^{-14} \text{ mol}^2/\text{l}^2 \\ q_A & 1 \text{ l/min} \\ V & 2500 \text{ ml} \end{array}$$

El modelo en espacio estado del Reactor de Neutralización se obtiene mediante identificación experimental [19] y es el siguiente:

$$A = \begin{bmatrix} 1.4479 & 1 \\ -0.4880 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0.5098 \\ -0.1718 \end{bmatrix} \quad C = [1 \quad 0] \quad D = 0.3521$$

Resultados del MPC sin restricciones.

Se implementa el problema de control descrito en la ecuación (1.1.2) para controlar el *pH* en un Reactor de Neutralización. Los parámetros de sintonía establecidos para la simulación del reactor sin restricciones se presentan en la tabla 2.5:

Tabla 2.5. Parámetros de sintonía del MPC sin restricciones.

Parámetro	Valor
<i>P</i>	200
<i>M</i>	20
<i>T_s</i>	0.1s
<i>r1</i>	7
<i>r2</i>	10
<i>r3</i>	9.5
<i>Q</i>	10 l
<i>R</i>	0.01 l

En las figuras 2.15 y 2.16 se muestran los resultados de las simulaciones realizados al reactor de neutralización sin restricciones en la variable controlada ni en la manipulada. En la figura 2.15 se puede ver como la salida de *pH* sigue los cambios realizados en su referencia.

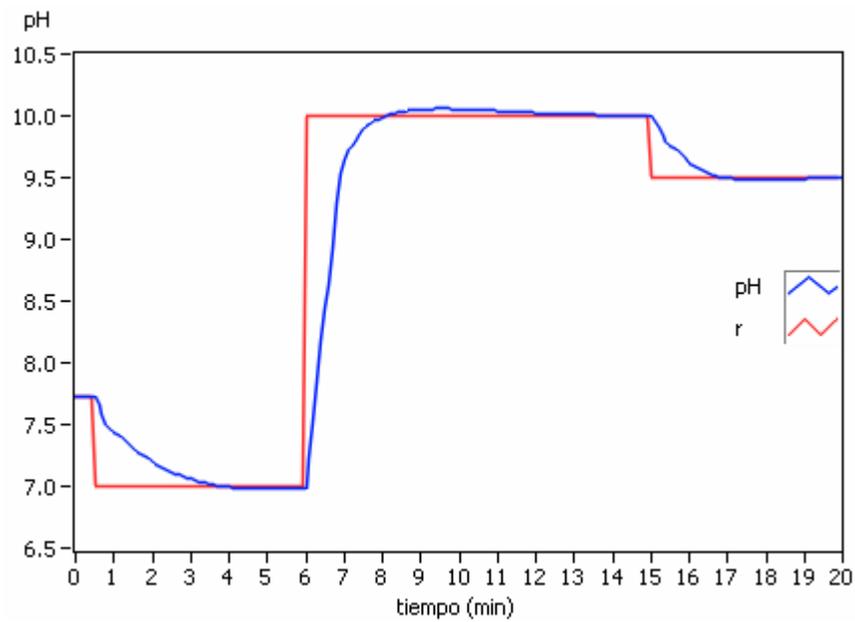


Fig. 2.15. Salida del reactor ante cambios en la referencia.

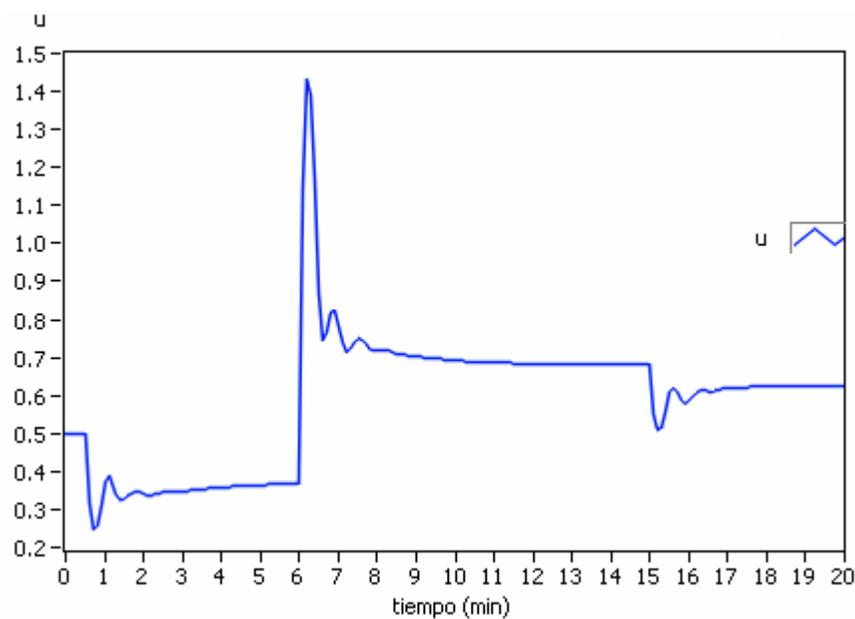


Fig. 2.16. Acción de control ante cambios en la referencia.

Resultados del MPC con restricciones.

Se implementa el problema de control descrito en la ecuación (1.1.2) para controlar el pH en un Reactor de Neutralización. Los valores de los parámetros de sintonía del MPC con restricciones son los mismos mostrados en la tabla 2.5 y las restricciones son las siguientes:

$$5 \leq pH \leq 11$$

$$0.2 \leq u \leq 0.95$$

Las figuras 2.17 y 2.18 muestran las respuestas de la salida del proceso (pH) y su correspondiente variable manipulada (u). Se puede observar como el MPC copia los cambios efectuados en la señal de referencia y cumple con las restricciones establecidas.

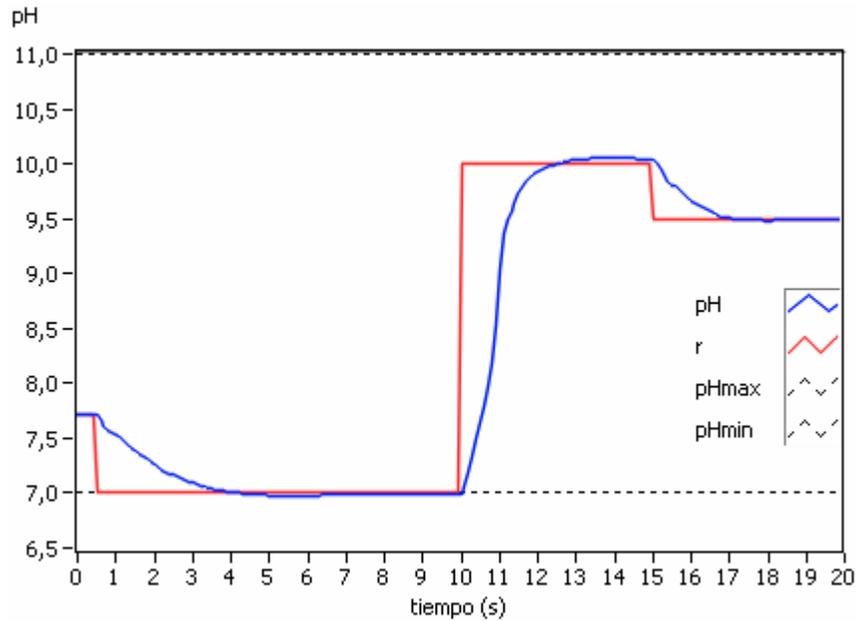


Fig. 2.17. Salida del reactor ante cambios en la referencia con restricciones.

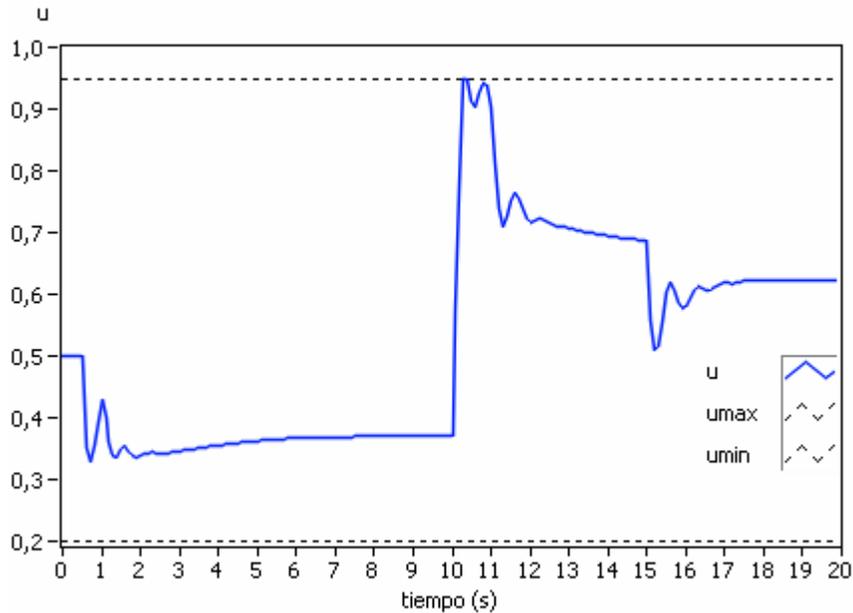


Fig. 2.18. Acción de control ante cambios en la referencia con restricciones.

2.4. Valoración de la investigación mediante criterios de expertos.

Como parte de las acciones para la valoración de la aplicación en la práctica educativa de la plataforma informática para la supervisión y el control remoto de procesos industriales con controladores predictivos, se tuvieron en cuenta las valoraciones de expertos.

Para la selección de los expertos fueron consideradas las siguientes condiciones: experiencia en el trabajo en la industria, experiencia en la formación de los estudiantes de la carrera Ingeniería Automática, resultados alcanzados en el desempeño como profesor universitario y experiencias investigativas relacionadas con el desarrollo de aplicaciones con fines docentes.

La muestra de 10 expertos, quedó conformada por 3 Doctores en Ciencias, 3 Master en Ciencias y 4 ingenieros con experiencia en el trabajo en la industria, de ellos 3 son Profesores Titulares, 4 son Profesores Auxiliares y 3 son asistentes.

Los indicadores que fueron sometidos a evaluación por los expertos aparecen en el anexo 4.

Como resultado de la evaluación de los indicadores en la encuesta realizada a los expertos (Anexo 5), se pudo constatar que:

- El noventa por ciento de los expertos valoran de muy adecuada la actualidad y eficiencia del método de control propuesto.
- La valoración tecnológica de la plataforma en la industria fue valorada de muy adecuada por ocho de los diez expertos entrevistados.
- La utilización y aplicabilidad de la plataforma informática en las diferentes disciplinas de la carrera Ingeniería Automática y en la docencia de postgrado, resultó muy adecuada a consideración de más del setenta por ciento de los expertos encuestados.
- La totalidad de los expertos consideran muy adecuada la aplicación de la plataforma informática en el nuevo plan de estudio de la carrera Ingeniería Automática, ya que contribuye al logro de una mayor independencia en el estudio y a la semipresencialidad.
- El setenta por ciento de los expertos coinciden que la herramienta es muy adecuada para el trabajo de usuarios con escasos conocimientos de Control Predictivo basado en Modelo; pero invitan a un mejoramiento de dicha aplicación.

En los anexos 6 y 7 se muestra el certificado de participación en el XVIII Forum Nacional de Estudiantes de Ciencias Técnicas y avales realizados al trabajo por la dirección de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Oriente, el Centro de Estudios de Gestión de la Información, Redes y Tecnologías Educativas y la Refinaría Hermanos Díaz respectivamente.

Conclusiones.

Las conclusiones del capítulo son:

- Se diseñó el controlador predictivo basado en modelo de una Unidad Generadora de Vapor y de un Reactor de Neutralización, utilizando los lenguajes de programación LabVIEW y MATLAB.
- Se realizó el control y supervisión remota de los proceso bajo estudio, demostrándose las potencialidades de la estrategia de control usada.
- Se implementó una interfaz gráfica de usuario Control Remoto con Controladores Predictivos (CRCP), la cual es empleada para el control y supervisión remota, presentándose esta como una plataforma de apoyo a la enseñanza del MPC, pues permite modificar sus parámetros de diseño para ver como afectan estos al proceso en estudio.
- Se obtuvo una valoración del trabajo mediante criterios de expertos, los cuales resaltaron la importancia del desarrollo de aplicaciones informáticas que facilitan la aplicación del Plan de Estudio D, así como la actualidad y eficiencia del método de control propuesto.

CONCLUSIONES.

Las conclusiones del presente trabajo de diploma son las siguientes:

1. Se realizó un estudio de las temáticas de Control Predictivo Basado en Modelo y de los protocolos de transferencia de datos a través de redes de computadora TCP/IP y DataSocket.
2. Se estudiaron los procesos tecnológicos Unidad Generadora de Vapor y Reactor de Neutralización
3. Se diseñó el controlador predictivo basado en modelo de los procesos tecnológicos, utilizando los lenguajes de programación LabVIEW y MATLAB.
4. Utilizando las facilidades que ofrece el programa LabVIEW se creó una interfaz gráfica, que permite variar los parámetros de mayor influencia en la salida de los procesos, además de los parámetros de sintonía del controlador diseñado, y se logró la comunicación entre los procesos y el controlador predictivo.
5. Se realizaron las simulaciones de una Unidad Generadora de Vapor y de un Reactor de Neutralización demostrándose las potencialidades del Control Predictivo, sin y con restricciones, así como su efectividad ante cambios en la referencia y rechazo a disturbios.
6. Se obtuvo una valoración del trabajo mediante criterios de expertos, los cuales valoran de muy adecuada la aplicación en la práctica educativa de la carrera Ingeniería Automática, la plataforma informática para la supervisión y el control remoto de procesos industriales con controladores predictivos.

RECOMENDACIONES

Al culminar este trabajo de diploma, y desarrolladas todas las tareas propuestas en el mismo, particularmente lo concerniente al control remoto, aun quedan puntos de vital importancia que deben ser tratados en investigaciones posteriores:

- ❖ Perfeccionar gráficamente la interfaz creada.
- ❖ Implementar la comunicación de tiempo real de los procesos y del MPC, aproximando con esto cada vez más las respuestas de las simulaciones a un proceso real.
- ❖ Implementar la posibilidad de introducir modelos nuevos para su estudio.
- ❖ Utilizar un solo lenguaje de programación para realizar las simulaciones del proceso, el controlador predictivo y la comunicación entre estos.
- ❖ Incluir la posibilidad de trabajar con MPC no lineal.

BIBLIOGRAFÍA

1. Álvarez, Z. H. (2000). Control Predictivo Basado en Modelo Borroso para el control del pH. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan. Argentina.
2. Bequette, B. W. (1991). "Nonlinear control of chemical processes: A review". *Industrial Engineering Chemical Research*, vol.30, pp. 1391-1413.
3. Bordóns C., (2000) Control Predictivo: Metodología, tecnología y nuevas perspectivas. I Curso de Especialización en Automática. pp. 12-14.
4. Camacho, E. F y Bordons, C. (2004). "Control Predictivo: Presente, Pasado y Futuro". Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla. España.
5. Clarke, D. W. y Mothadi, C. (1987). "Properties of generalized predictive control". En *Proc. 10th IFAC World Congress*, pp. 63-70. Alemania.
6. Comer, Douglas E. Redes globales de informacion con INTERNET y TCP/IP, principios basicos, protocolos y arquitectura.
7. de Oliveira, S. L. y Morari, M. (1996). "Contractive model predictive control with local linearization for nonlinear systems". En *Nonlinear Model Based Process Control*. Proc. Of the NATO Advanced Study Institute, pp. 403-431.
8. Doersam, C. H. (2005). Automatic remote control and telemetering by telephone.
9. Durades Fernández, Y & Alemán Calzadilla, E. (2008). Control remoto de la plataforma de estudio del sistema mecatrónico. Trabajo de diploma. Dpto. de Control Automático, Fac. Ing. Eléctrica Univ. de Oriente.
10. Ewald, Hartmunt y F. Page, George. (2003). Client – Server and Gateway – Systems for Remote Control.
11. Fruzzetti, K. P., Palazoglu, A., y McDonald, K. A. (1997). Nonlinear model predictive control using Hammerstein models. *Journal of Process Control*, vol.7, pp. 31-41.
12. Galan, O. (2000). Robust Multi – Linear Model – Based Control for Nonlinear Plants. Tesis Doctoral. The University of Sydney.
13. Genceli, H. y Nikolaou, M. (1995). "Design of robust constrained model-predictive controllers with Volterra series". *AIChE Journal*, vol.41, pp. 2098-2107.
14. González Fonseca, Y. & Blanco Perera, R. (2008). Control Predictivo Basado en Modelo con empleo de una herramienta informática. Trabajo de diploma. Dpto. de Control Automático, Fac. Ing. Eléctrica Univ. de Oriente.
15. Guzmán, J. L., Berenguer, M., Dormido, S. (2004). MIMO-GPCIT. Herramienta Interactiva de Control Predictivo Generalizado para Sistemas Multivariables con Restricciones. Disponible en:

<http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=2227110>

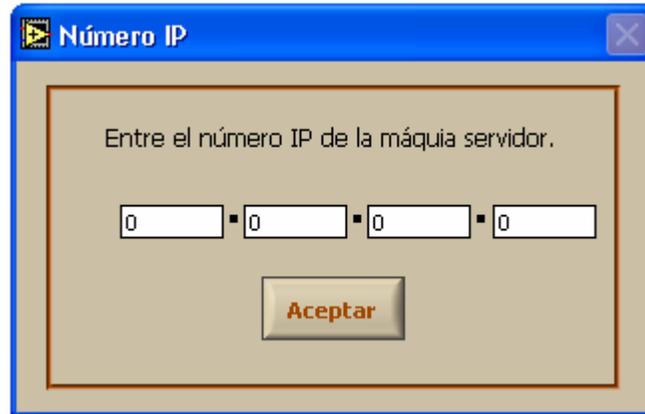
16. Henson, M. A. (1998). Nonlinear model predictive control: current status and future directions. *Computer and Chemical Engineering*, vol.23, pp. 187-202.
17. Lee, Jin – Shyan y Hsu, Pau – Lo. (2003). A Petri – net approach to hierarchical supervision for remoted – controlled processes.

18. Ling, Wei & Ding – yu, Xue. (2007). Some basic issues in networked control systems.
19. Lussón, A. (2002). *Control Predictivo basado en Modelos con estructura Wiener-LAT*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca. Argentina.
20. Maner, B. R., Doyle, F. J., Ogunnaike, B. A., y Pearson, R. K. (1996). Nonlinear model predictive control of a simulated multivariable polymerization reactor using second-order Volterra models. *Automática*, vol.32, pp. 1285-1301.
21. Norquay, S. J., Palazoglu, A., y Romagnoli, J. A. (1998). "Model predictive control based on Wiener models". *Chemical Engineering Science*, vol.53, pp. 75-84.
22. Prett, D. M. y Gillette, R. D. (1979). Optimization and constrained multivariable control of a catalytic cracking unit. En *Proc. AIChE National Meeting-Proc. of Joint Automatic Control Conference*. San Francisco, California.
23. Qin, S. J. y Badgwell, T. A. (1997). "An overview of industrial model predictive control technology". En *Proc. Chemical Process Control (V) and AIChE Symposium Series*, vol.93, pp. 232-257, New York, USA.
24. Qingyu, Y. w., Hongjiang. (2006). Development of network control system of tobacco packing machine.
25. Ray, K. S. y Majumder, D.D. (1983). Simulation of a nonlinear steam generation unit. En *Proc. International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 705 - 708, Bombay and New Delhi, India.
26. Rodríguez Legname, Martín; González Pote, Apolinar; Aquino Santos, R.; Farías Mendoza, N. (2006). Modelado de un protocolo inalámbrico de tiempo real para aplicaciones de control y monitoreo remoto.
27. Roldan Jiménez, F., Tamayo, J.(2002) Paquete de programas para realizar el control remoto de instalaciones de laboratorio desde una intranet local e Internet. Trabajo de diploma. Dpto. de Control Automático, Fac. Ing. Eléctrica Univ. de Oriente.
28. S. Klinkhieo, C. Kambhampati & R. J. Patton. Fault Tolerant Control in NCS Medium Access Constraints.
29. Su, H. T. y McAvoy, T. J. (1997). Artificial neural networks for nonlinear process identification and control". En *Nonlinear Process Control*, pp. 371-428. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.
30. Suk Lee y Kyung Chang. (2001). Remote Controller Desing of Networked Control System Using Genetic Algorithm.
31. Sysel, M. y Pomykacz, I. (2007). Remote Process control and monitoring using MATLAB.
32. Vaquero, J., González, A. I., Contino, Y. (2007). PCSim herramienta interactiva de control predictivo en la enseñanza de la automática. *Informática Virtual 2007*. Cuba.
33. Zhang, W. M.S. Branicky, S.M. Philips. (2001). Stability of networked control system. *IEEE control systems Magasine*, vol. 21, pp 84-96.
34. Zhu, X. y Seborg, D. E. (1994). Nonlinear model predictive control based on Hammerstein models. En *Proc. International Symposium on System Engineering*, pp. 995-1000. Korea.

35. http://download.level1.com/level1/datasheet/WNC-0301USB_v3
36. <http://en.wikipedia.org/wiki/DSSS>
37. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3543>

ANEXO 1

Anexo 1a: Ventana para introducir el IP del módulo servidor.

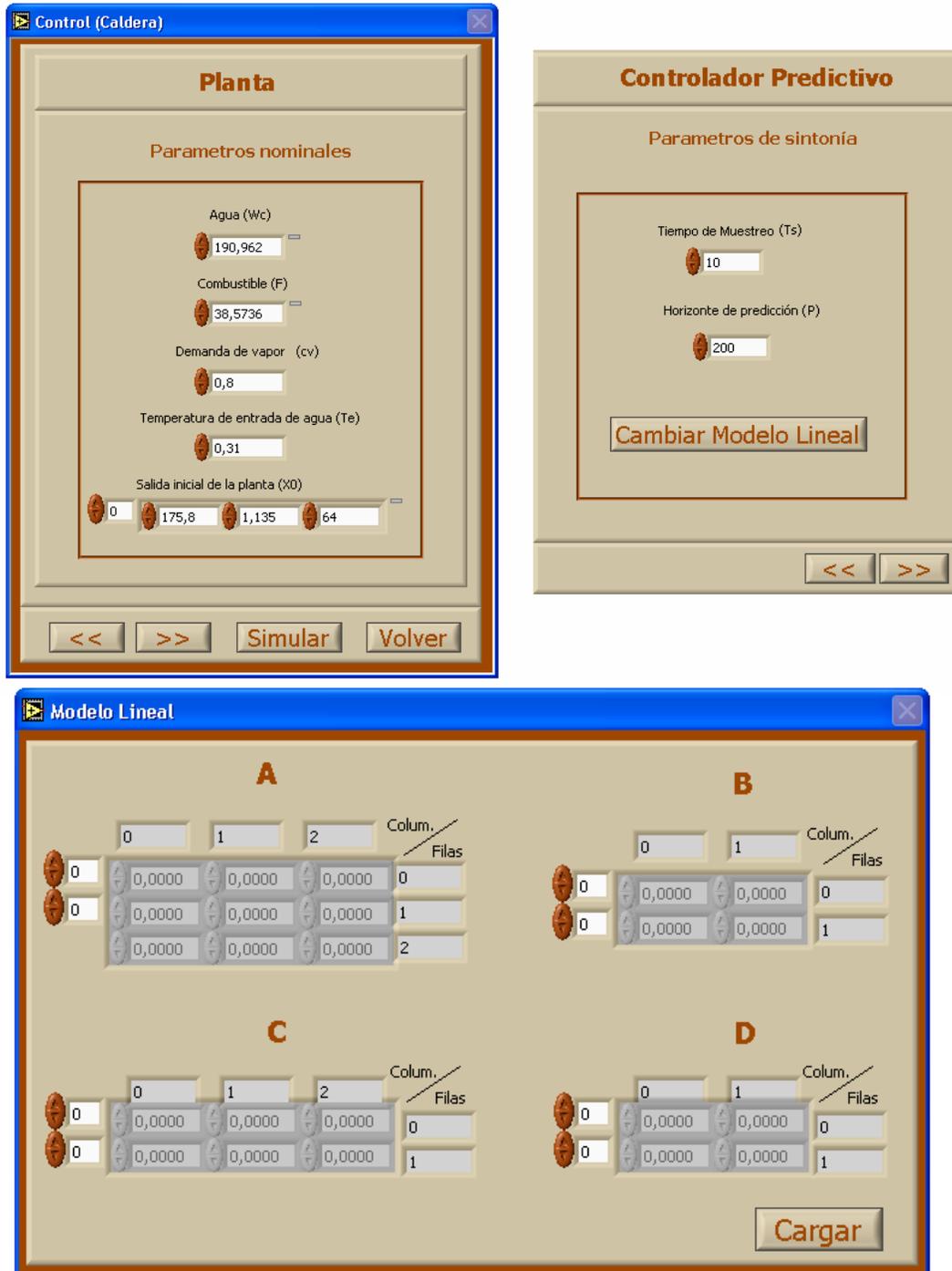


Anexo 1b: Ventana principal para seleccionar el proceso a controlar.



ANEXO 2

Anexo 2a: Ventanas para configurar los parámetros de sintonía del MPC y las condiciones iniciales de la Unidad Generadora de Vapor.



Referencias		
	Presion	Nivel
Referencia 1	180	64
Referencia 2	180	50
Referencia 3	176	50
Referencia 4	176	64

Restricciones		
<input checked="" type="radio"/> Restricciones		
Cotas		
	superior	inferior
P max	200	P min 150
L max	80	L min 40
F max	60	F min 30
Wc max	250	Wc min 100

Anexo 2b: Selección y configuración de los disturbios en la Unidad Generadora de Vapor.

Disturbios

Disturbios

	cv	Te
Disturbio 1	0,8	0,31
Disturbio 2	0,8	0,31
Disturbio 3	0,8	0,31
Disturbio 4	0,8	0,31
Disturbio 5	0,8	0,31

ANEXO 3: Ventanas para configurar los parámetros de sintonía del MPC y las condiciones iniciales del Reactor de Neutralización.



ANEXO 4: Encuesta a expertos.

Institución a la cual pertenece: _____.

Cargo actual: _____.

Años de experiencia en el cargo: _____.

Clasificación profesional, grado científico o académico: _____.

Ingeniero: __ Doctor: __ Master: __

Años de experiencia docente - investigativa: _____

Estimado Profesor:

Usted ha sido seleccionado por su calificación científica técnica, sus años de experiencia y los resultados alcanzados en su labor profesional, para evaluar los resultados de esta investigación, por lo que se le solicita que ofrezca sus ideas y criterios sobre las bondades e insuficiencias que presenta la aplicación en la práctica educativa de la carrera Ingeniería en Automática la plataforma informática para la supervisión y el control remoto de procesos industriales con controladores predictivos.

Marque, con una cruz (x) la casilla que se corresponda con el nivel de factibilidad que usted le otorga a los indicadores declarados.

Se le agradece el esfuerzo que realizará para colaborar con esta investigación.

Escala:

MA – Muy adecuado.

A – Adecuado.

PA – Poco adecuado.

I – Inadecuado

Elementos a evaluar de la aplicación en la práctica educativa de la carrera Ingeniería Automática de la plataforma informática para la supervisión y el control remoto de procesos industriales con controladores predictivos.				
Indicadores	MA	A	PA	I
1- Actualidad y eficiencia del método de control propuesto.				
2- Valoración tecnológica de la plataforma en la industria.				
3- Utilización de la aplicación desarrollada en la docencia de pregrado y postgrado de la carrera Ingeniería en Automática.				
4- Aplicabilidad de la plataforma informática en las diferentes disciplinas de la carrera Ingeniería en Automática.				
5- Facilidad de aplicación en el Plan de Estudios D de la carrera Ingeniería en Automática.				
6- La interfaz gráfica de usuario CRCP ofrece facilidades para los usuarios con escasos conocimientos de MPC.				

ANEXO 5: Resultados de las valoraciones de expertos.

Indicadores	MA		A		PA		I	
	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%
1- Actualidad y eficiencia del método de control propuesto.	9	90	1	10			-	-
2- Valoración tecnológica de la plataforma en la industria.	8	80	2	20				
3- Utilización de la aplicación desarrollada en la docencia de pregrado y postgrado de la carrera Ingeniería en Automática.	8	80	2	20				
4- Aplicabilidad de la plataforma informática en las diferentes disciplinas de la carrera Ingeniería en Automática.	7	70	3	30				
5- Facilidad de aplicación en el Plan de Estudios D de la carrera Ingeniería en Automática.	10	100						
6- La interfaz gráfica de usuario CRCP ofrece facilidades para los usuarios con escasos conocimientos de MPC.	7	70	3	30				

ANEXO 6: Certificado de participación en el XVIII Forum Nacional de Estudiantes Ciencias Técnicas.

The certificate is a rectangular document with a decorative border. At the top center, it reads "Se otorga el presente" (This is granted). Below this, the name "Javier Jorge González Tristán" is written in cursive. To the right of the name is a large, stylized identification number "02R079790400". The text "Por su destacada participación como **PONENTE** en el XVIII Fórum Científico Nacional De Estudiantes Universitarios de Ciencias Técnicas" is printed in bold. Below the name, it says "Dado en Matanzas a los 3 días del mes de junio del 2009". On the left side, there is a signature of "Miguel Sorreal González" with the title "Rector UMCe". On the right side, there is a signature of "David García Díaz" with the title "Presidente FEU". The certificate features two circular logos: one at the top left for "UNIVERSIDAD DE MATANZAS" (founded 1972) and one at the bottom right for "FEU" (Federation of University Students). A dark vertical bar on the right side contains the text "Universidad de Matanzas" and "Campus Cienfuegos".

ANEXO 7: Avalu.**Anexo 7a: Aval de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Oriente.****AVAL**

Título del trabajo: Control remoto de procesos industriales con controladores predictivos.

Estudiante: Javier Gonzalo González Fontanet.

Tutores: Dra. Ania Lussón Cervantes.

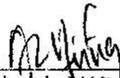
Ing. Michel Sanz Pérez

El trabajo "Control remoto de procesos industriales con controladores predictivos" consta de Resumen, Introducción, dos capítulos, Conclusiones y Recomendaciones. El mismo cumple con los requerimientos de redacción y estructura correspondientes a un trabajo de investigación de este tipo.

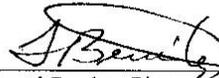
En este proyecto se presentan los resultados alcanzados sobre el Control Predictivo basado en Modelo de una torre de destilación, de una unidad generadora de vapor y de un reactor de neutralización de manera remota, demostrando así las potencialidades de esta técnica de control. Para el cual fue necesario el estudio de la estrategia de control mencionada, además de la teoría de la comunicación utilizando redes de computadora, todo esto haciendo uso de los programas MATLAB y LabView. La aplicación desarrollada puede usarse en las prácticas de laboratorio de las disciplinas Automática y Sistemas de Control de la carrera Ingeniería en Automática de la Universidad de Oriente.

El tema tratado es de actualidad, y constituye un aporte a las investigaciones realizadas en el departamento en esta área.

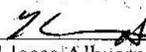
El estudiante ha consultado bibliografía actualizada y en idioma inglés. El uso del Matlab y el LabView como herramienta programativa le permitió el desarrollo de habilidades en el uso de técnicas computacionales, además ha demostrado un significativo grado de independencia en el tema.



MSc. Ricardo Núñez
Jefe del Dpto. Control Automático.
FIE-Univ. de Oriente.



Dr. Israel Benítez Pina
Vicedec. de investigaciones y postgrado.
FIE-Univ. de Oriente.



Dra. Yolanda Llosas Albuérne
Decana Fac. Ing. Eléctrica
Universidad de Oriente.

Aval 7b: Centro de Estudios de Gestión de la Información, Redes y Tecnologías Educativas.



AVAL

Título del trabajo: Control remoto de procesos industriales con controladores predictivos.

Estudiante: Javier Gonzalo González Fontanet.

Tutores: Dra. Ania Lussón Cervantes.

Ing. Michel Sanz Pérez.

La investigación permite mostrar las potencialidades del Control Predictivo basado en Modelo (MPC) para realizar control remoto. Se presenta en la misma el control de tres procesos: Torre de Destilación, Unidad Generadora de Vapor y Reactor de Neutralización. Se ha desarrollado una plataforma en LabVIEW, que permite controlar remotamente los procesos y mostrar los resultados de las simulaciones del MPC en los casos de estudio. El diseño y simulación del controlador predictivo se realiza utilizando el programa MATLAB. La aplicación desarrollada puede utilizarse en las prácticas de laboratorio de las disciplinas Automática y Sistemas de Control de la carrera Ingeniería en Automática de la Universidad de Oriente y en la Maestría en Automática.

El control de procesos en la actualidad exige disponer de técnicas fiables que permitan la operación del proceso con gran eficiencia y alto grado de flexibilidad. Dentro de las tecnologías consideradas avanzadas, el Control Predictivo Basado en Modelo es una de las más utilizadas en la industria, y con muchas expectativas de desarrollo.

En el presente trabajo se controlan remotamente tres procesos industriales con controladores predictivos, a fin de ampliar la utilización de técnicas avanzadas de control en la formación de pregrado y postgrado de la carrera Ingeniería en Automática. La actualidad de la investigación radica en que su solución se inserta dentro del proceso de transformaciones en que se encuentra inmersa la educación superior, cuando el modelo de formación del profesional tiende a la semipresencialidad, al logro de una mayor independencia en el estudio, y ofrece la posibilidad de incluir asignaturas optativas que respondan a los intereses y necesidades específicas de los estudiantes. Unido a esto, el conocimiento de técnicas avanzadas de control, permitiría adquirir una preparación acorde a las necesidades y tendencias actuales del control de procesos a nivel mundial.


MSc. José Cuza Freyre
Director del Centro de Estudios de Gestión de la Información, Redes y
Tecnologías Educativas



Aval 7c: Refinería Hermanos Díaz.

“Refinería Hermanos Díaz”

AVAL

Título del trabajo: Control remoto de procesos industriales con controladores predictivos.

Estudiante: Javier Gonzalo González Fontanet.

Tutores: Dra. Ania Lussón Cervantes.

Ing. Michel Sanz Pérez.

El trabajo “Control remoto de procesos industriales con controladores predictivos” incluye una herramienta informática que permite la supervisión y el control remoto de procesos industriales haciendo uso de las herramientas LabVIEW y MATLAB con controladores predictivos.

El control de procesos involucra aplicar tecnología a una operación que transforma a la materia prima en un producto terminado. Casi todo lo que se usa, o consume, ha pasado por algún tipo de control de proceso automatizado en su producción. Los controles de procesos automatizados mejoran la productividad y la terminación del producto, a la vez que reducen los costos de producción.

Aunque en el pasado podía considerarse que el único objetivo del control consistía en mantener una operación estable del proceso, actualmente las industrias se enfrentan a un mercado cambiante y difícil de predecir, lo que les obliga a operar sus procesos productivos en consonancia con la evolución del mercado para poder mantenerse competitivas y rentables.

La competencia en muchos sectores industriales, así como el creciente interés social por los problemas medioambientales relacionados con los procesos de producción provoca la necesidad de disponer de técnicas fiables que permitan la operación del proceso con gran eficiencia y alto grado de flexibilidad.

Actualmente los sistemas de control en la industria de procesos deben satisfacer criterios económicos, asociados con el mantenimiento de las variables del proceso en sus referencias, minimizando dinámicamente una función de costo de operación, criterios de seguridad y medioambientales, y de calidad en la producción, la cual debe satisfacer ciertas especificaciones sujetas a una demanda normalmente variable. Por lo que se puede considerar que en la actualidad el objetivo de todo sistema de control consiste en actuar sobre las variables manipuladas de forma que puedan satisfacerse los cambiantes criterios de funcionamiento mencionados anteriormente. Las técnicas de Control Predictivo Basado en Modelo (Model Based Predictive Control, MPC) constituyen unas poderosas herramientas para afrontar estos retos.

La provincia Santiago de Cuba posee una zona industrial de gran importancia para el desarrollo del país, que incluye procesos tan diversos como los del sector petroquímico, la generación eléctrica, la fabricación de cemento, los relacionados con la industria alimenticia, entre otros. Todos estos procesos industriales están sujetos al cumplimiento de determinadas normas de operación y criterios económicos, que requieren del diseño de sistemas de control altamente confiables y eficientes. La preparación de los ingenieros en Automática, por consiguiente, debe estar acorde con el desarrollo alcanzado por la ciencia y la técnica, y en particular con las exigencias actuales en el campo del control de procesos de nuestro entorno.

En este trabajo se realiza el control predictivo de una torre de destilación y de una unidad generadora de vapor, ambos claves en el proceso de refinación de petróleo en la refinería "Hermanos Díaz". Con la herramienta propuesta se pueden realizar simulaciones variando parámetros a dichos procesos, de forma tal que utilizando un entorno amigable los operadores de la industria puedan fácilmente estudiar, conocer, formular y proponer soluciones para aumentar la eficiencia y productividad en dicho centro, además se propone una estrategia de control fiable y que cumple con los estándares de producción de la actualidad.



Especialista en SAD

MSc. Juan Carlos Rivera

Dirección Técnica, Refinería "Hermanos Díaz".