UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

Artículo Académico Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en Electrónica e Instrumentación

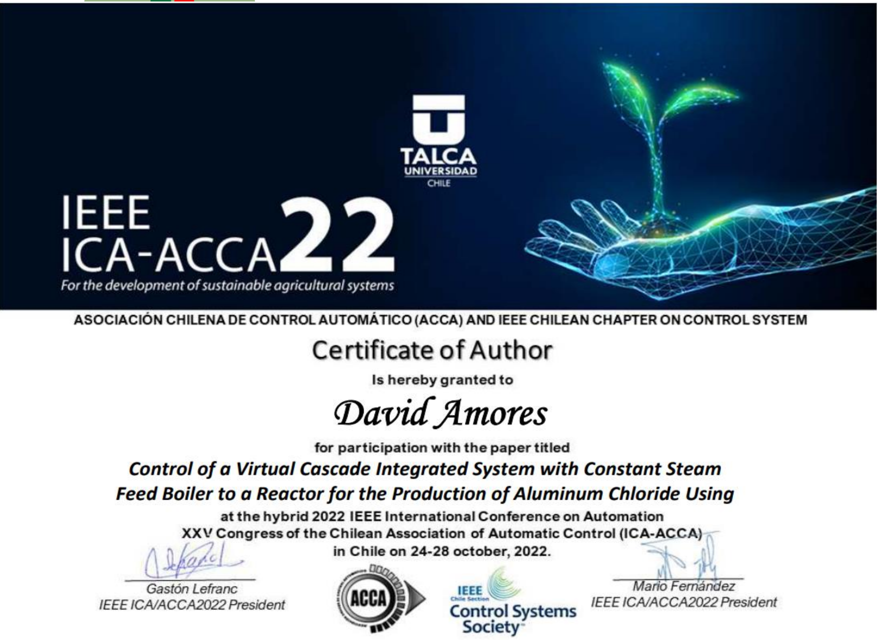
IEEE ICA – ACCA 22

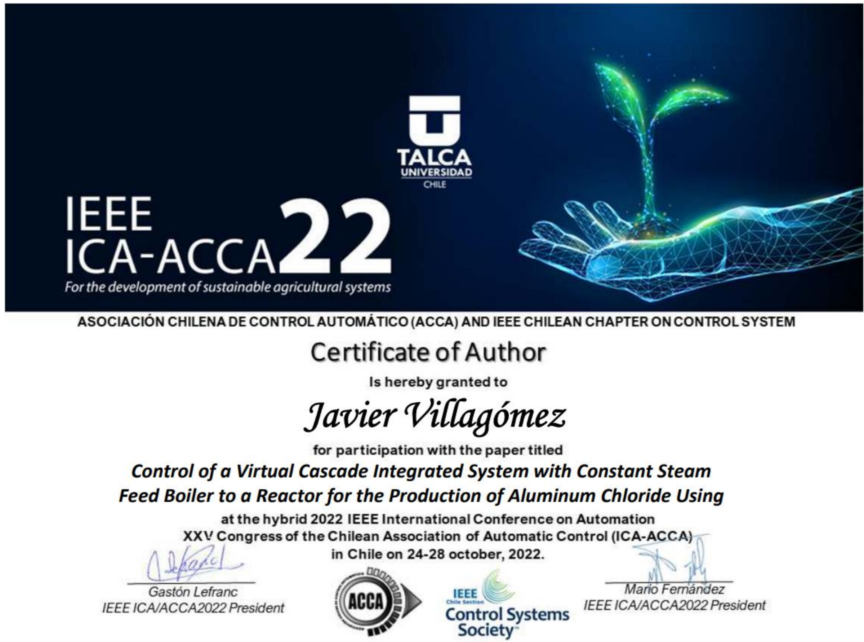
CONTROL DE UN SISTEMA INTEGRADO EN CASCADA CON UN CALDERÍN ALIMENTADOR DE VAPOR CONSTANTE A UN REACTOR, PARA LA PRODUCCION DE CLORURO DE ALUMINIO VIRTUALIZADO USANDO UNA ESTRATEGIA DE CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELOS MPC

Autores:
Amores Molina, Daniel David
Villagómez Gallardo, Javier Alejandro

Tutor. Ing. Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario
Co-Tutor. Ing. Ortiz Villalba, Diego Edmundo

Control of a Virtual Cascade Integrated System with Constant Steam Feed Boiler to a Reactor for the Production of Aluminum Chloride Using a Model Predictive Control MPC

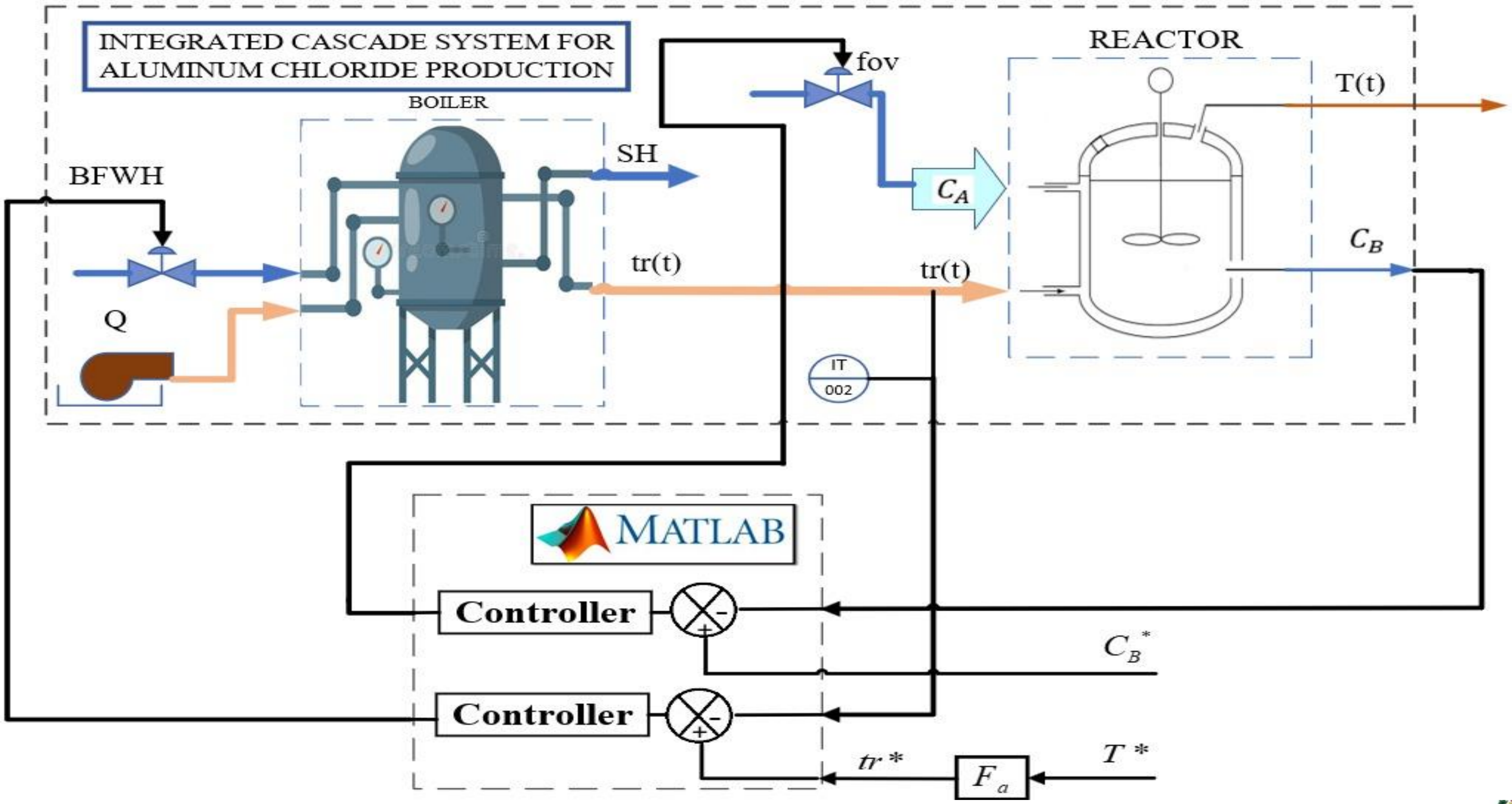

IEEE ICA-ACCA 22
For the development of sustainable agricultural systems
ASOCIACIÓN CHILENA DE CONTROL AUTOMÁTICO (ACCA) AND IEEE CHILEAN CHAPTER ON CONTROL SYSTEM
Certificate of Author
Is hereby granted to
David Amores
for participation with the paper titled
Control of a Virtual Cascade Integrated System with Constant Steam Feed Boiler to a Reactor for the Production of Aluminum Chloride Using
at the hybrid 2022 IEEE International Conference on Automation
XXV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)
in Chile on 24-28 october, 2022.
Gastón Lefranc, IEEE ICA/ACCA2022 President
Mario Fernández, IEEE ICA/ACCA2022 President


IEEE ICA-ACCA 22
For the development of sustainable agricultural systems
ASOCIACIÓN CHILENA DE CONTROL AUTOMÁTICO (ACCA) AND IEEE CHILEAN CHAPTER ON CONTROL SYSTEM
Certificate of Author
Is hereby granted to
Javier Villagómez
for participation with the paper titled
Control of a Virtual Cascade Integrated System with Constant Steam Feed Boiler to a Reactor for the Production of Aluminum Chloride Using
at the hybrid 2022 IEEE International Conference on Automation
XXV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)
in Chile on 24-28 october, 2022.
Gastón Lefranc, IEEE ICA/ACCA2022 President
Mario Fernández, IEEE ICA/ACCA2022 President

Contents

Introduction

Cascade Integrated System with Constant Steam Feed Boiler to a Reactor



Introduction

Variables

Variables Manipuladas		
$BFWH$	Boiler Feed Water High	$[T/h]$
fov	Control Valve	$[mol/m^3]$

Variables a Controlar		
$tr(t)$	Outlet Steam Temperature	$[°C]$
$T(t)$ C_B	Reactor Internal Temperatura Aluminum chloride	$[°C]$ $[mol/m^3]$

BOILER

SH	Steam High	T/h
Q	Heat Transfer	$[°C]$

REACTOR

C_A	Hydrochloric acid	$[mol/m^3]$
F_a	Transfer Factor	$[°C]$

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Controllers Design

MODELAMIENTO MATEMATICO

$$M_c = \int BFWH - SH$$

$$h_c = h_s - h_w$$

$$t_r = 103.67 \cdot P^{0.2392}$$

$$\frac{d(C_A)}{dt} = \frac{F}{V}(C_{A0} - C_A) - k_1(T)C_A - k_3(T)C_A^2$$

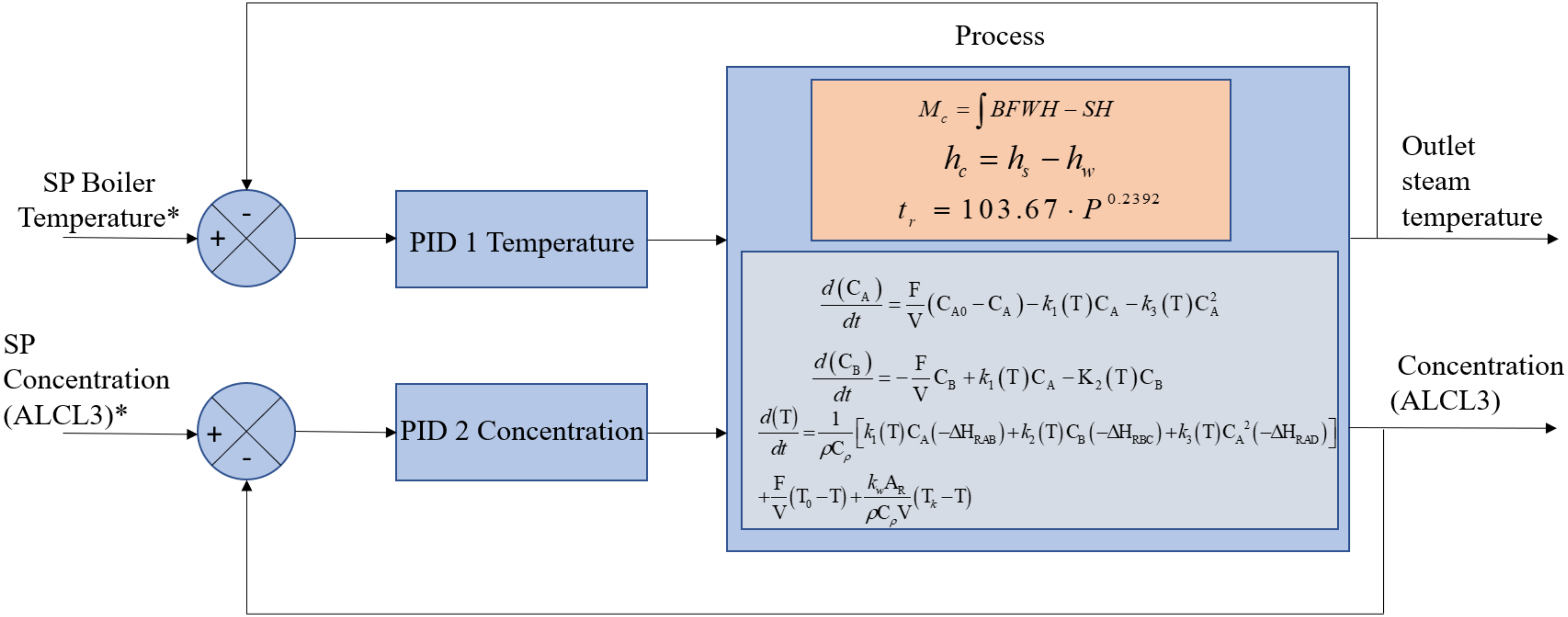
$$\frac{d(C_B)}{dt} = -\frac{F}{V}C_B + k_1(T)C_A - K_2(T)C_B$$

$$\frac{d(T)}{dt} = \frac{1}{\rho C_\rho}\left[k_1(T)C_A(-\Delta H_{RAB}) + k_2(T)C_B(-\Delta H_{RBC}) + k_3(T)C_A{}^2(-\Delta H_{RAD})\right]$$

$$+\frac{F}{V}(T_0 - T) + \frac{k_w A_R}{\rho C_\rho V}(T_k - T)$$

Controllers Design

PID Controller Design



Controllers Design

PID Controller Design

$$G(s) = \frac{K}{1 + Ts} e^{-\tau s}$$

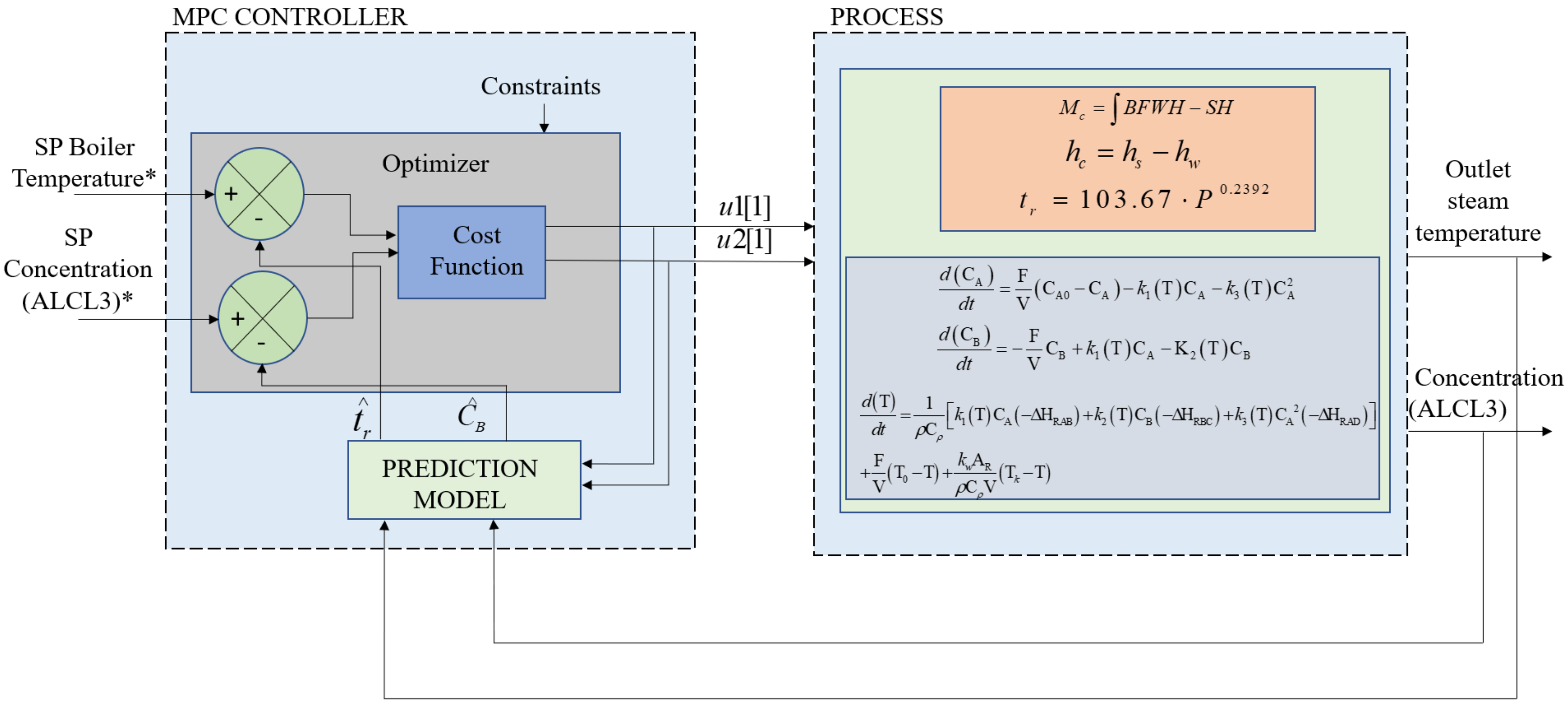
$$U(s) = K_p e(s) + K_i \frac{e(s)}{s} + sK_d e(s)$$

$$K_p = \left(\frac{1}{K}\right)\left(\frac{\frac{\tau}{2} + \lambda}{\frac{\tau}{2} + \lambda}\right) \qquad T_i = \frac{\mathrm{K_p}}{T + \frac{\tau}{2}} \qquad T_d = \frac{\tau\lambda}{\tau + 2\lambda}$$

$$\lambda = T$$

Controllers Design

Model Predictive Controller Design



Controllers Design

Model Predictive Controller Design

Objective function is defined by:

$$J\left(k\right)_{u1,u2}=\sum_{i=1}^{N_p}\left[\begin{array}{l}\delta_1(k)\left[\hat{tr}\left(k+i|k\right)-tr^*\left(k+i|k\right)\right]^2+\\ \delta_2(k)\left[\hat{C_B}\left(k+i|k\right)-C_B^*\left(k+i|k\right)\right]^2\end{array}\right]+\sum_{i=1}^{N_u}\lambda_1(k)$$

$$\left[\Delta_{u1}\left(k+i-1\right)\right]^2+\lambda_2(k)\left[\Delta_{u2}\left(k+i-1\right)\right]^2.$$

Restrictions:

$$\Delta_{umin}\leq\Delta_{u1}\leq\Delta_{umax}$$
$$\Delta_{umax}\leq\Delta_{u2}\leq\Delta_{umax}.$$

$$\hat{tr}_{min}\leq\hat{tr}\leq\hat{tr}_{max}.$$

$$\hat{C}_{Bmin}\leq\hat{C_B}\leq\hat{C}_{Bmax}.$$

Controllers Design

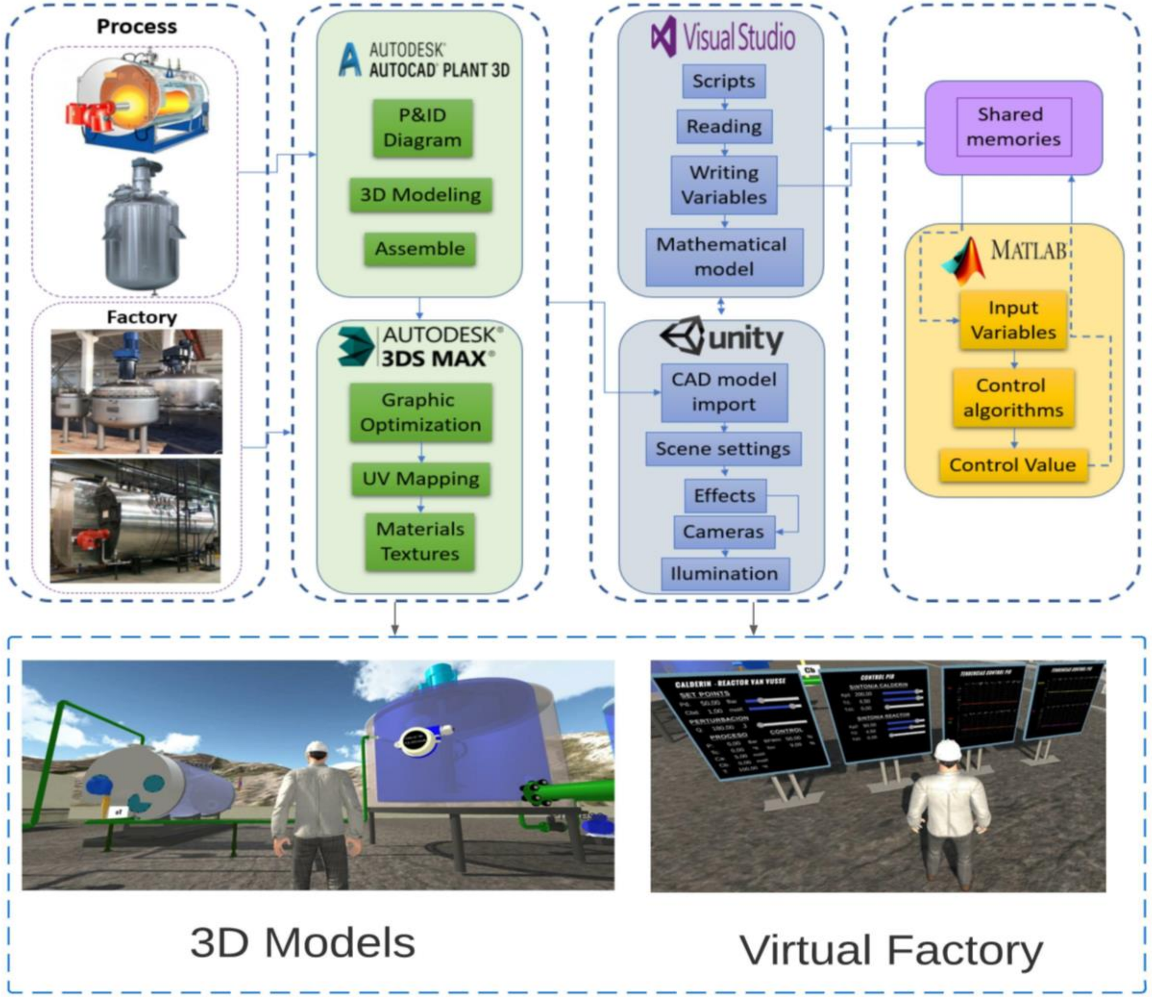
Model Predictive Controller Design

MPC design parameters	Variable
	tr, C_B
N_p	12 s
N_u	4 s
Phe	30
Pcv	0,0000001

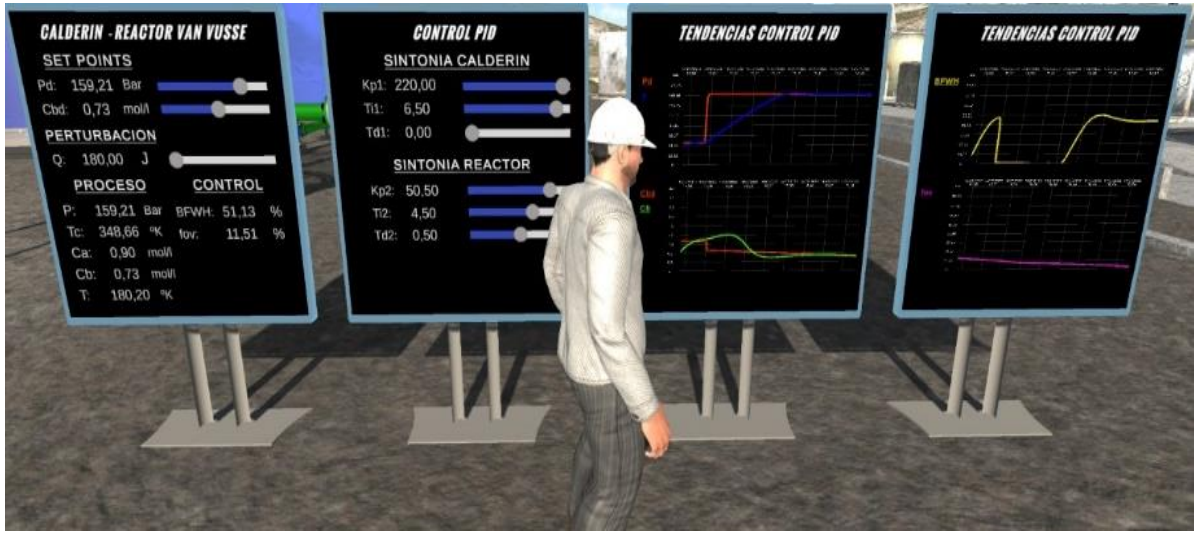
Constrains	Variable
	tr, C_B
Δ_{min}	0
Δ_{max}	1
tr_{min}	140 [°C]
tr_{max}	395 [°C]
C_{Bmin}	0 [mol/m^3]
C_{Bmax}	2,5 [mol/m^3]

Virtualization

Virtual Environment



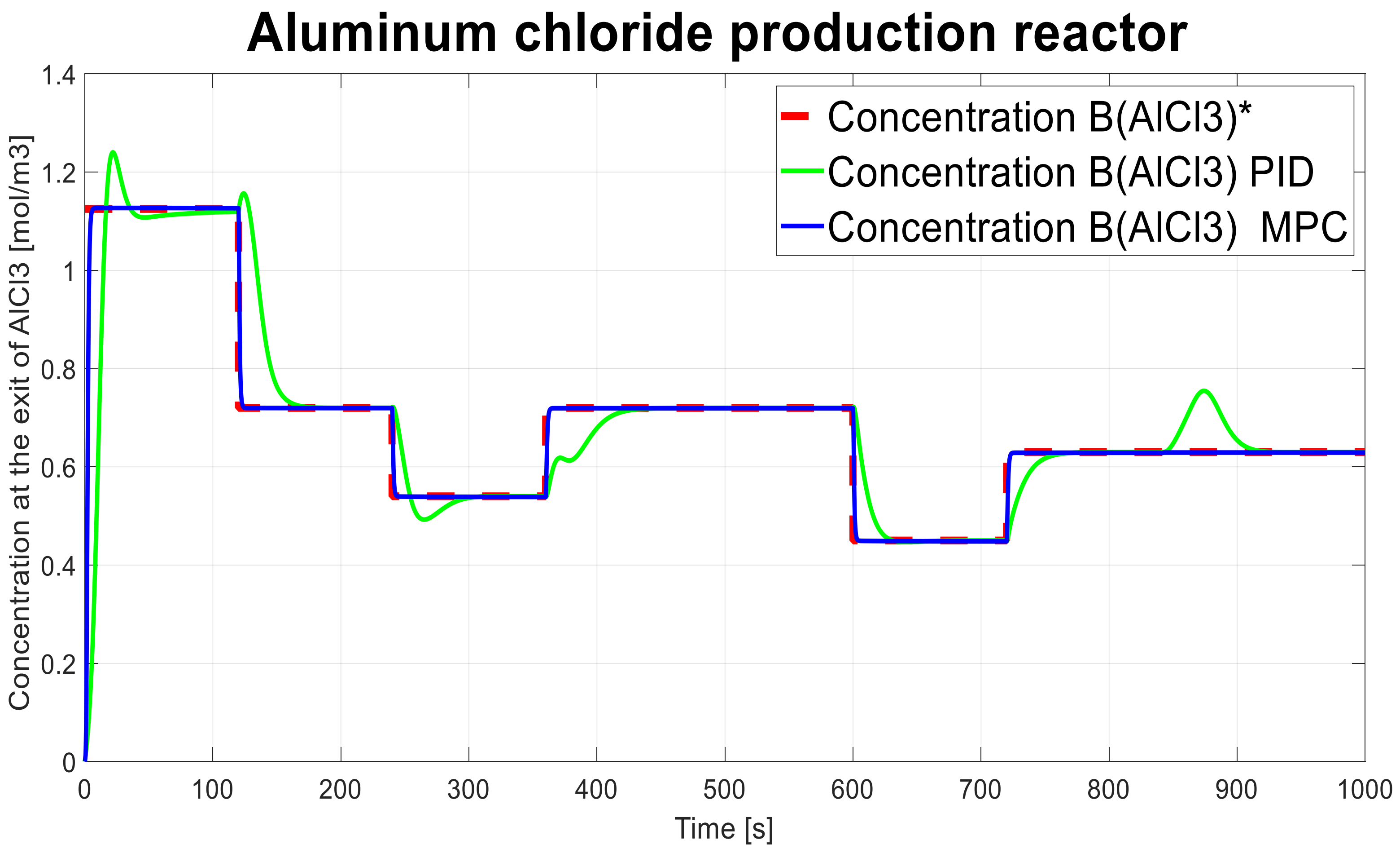
Monitoring and Control Area



UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Results

PID and MPC controller for Aluminum chloride production reactor

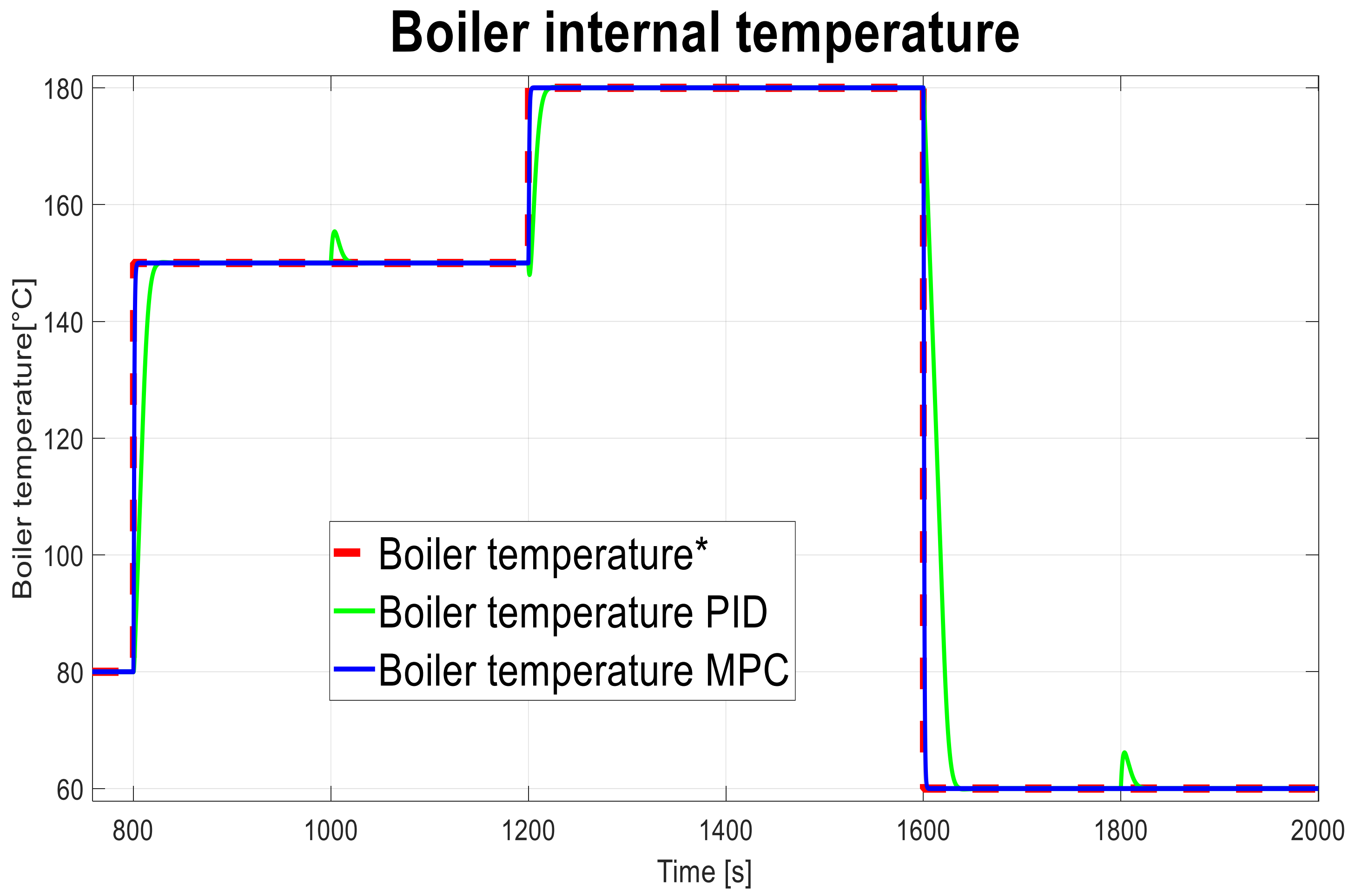


Dynamic Characteristics of the Reactor Concentration

Parameters	PID	MPC
% Over impulse	7.73 %	0 %
Settlement time	877.9 s	7.8 s
Rise time	41 s	2 s
Error in stable state	0.08 mol/m^3	0.0004 mol/m^3

Results

PID and MPC controller Boiler internal temperature



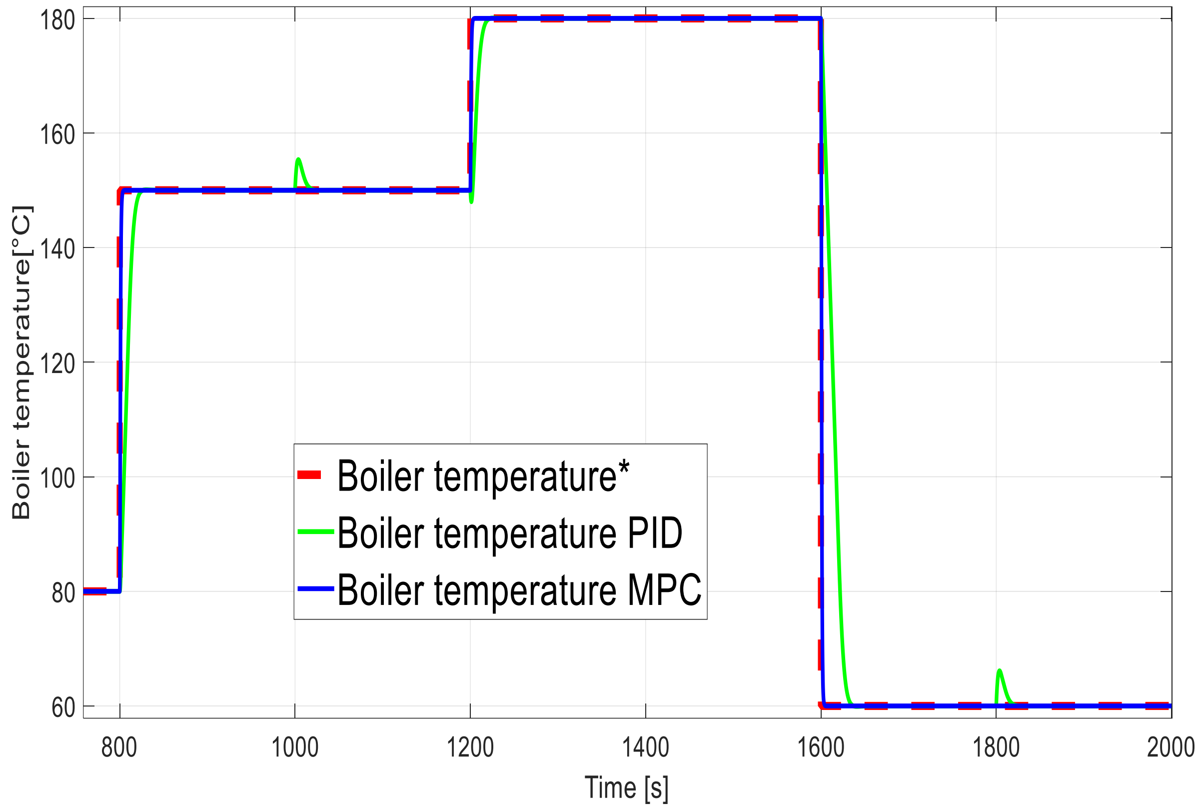
Dynamic Boiler Temperature Characteristics

Parameters	PID	MPC
% Over impulse	0.0873%	0%
Settlement time	42 s	6.9 s
Rise time	10.8 s	1.3 s
Error in stable state	0 bar	0 bar

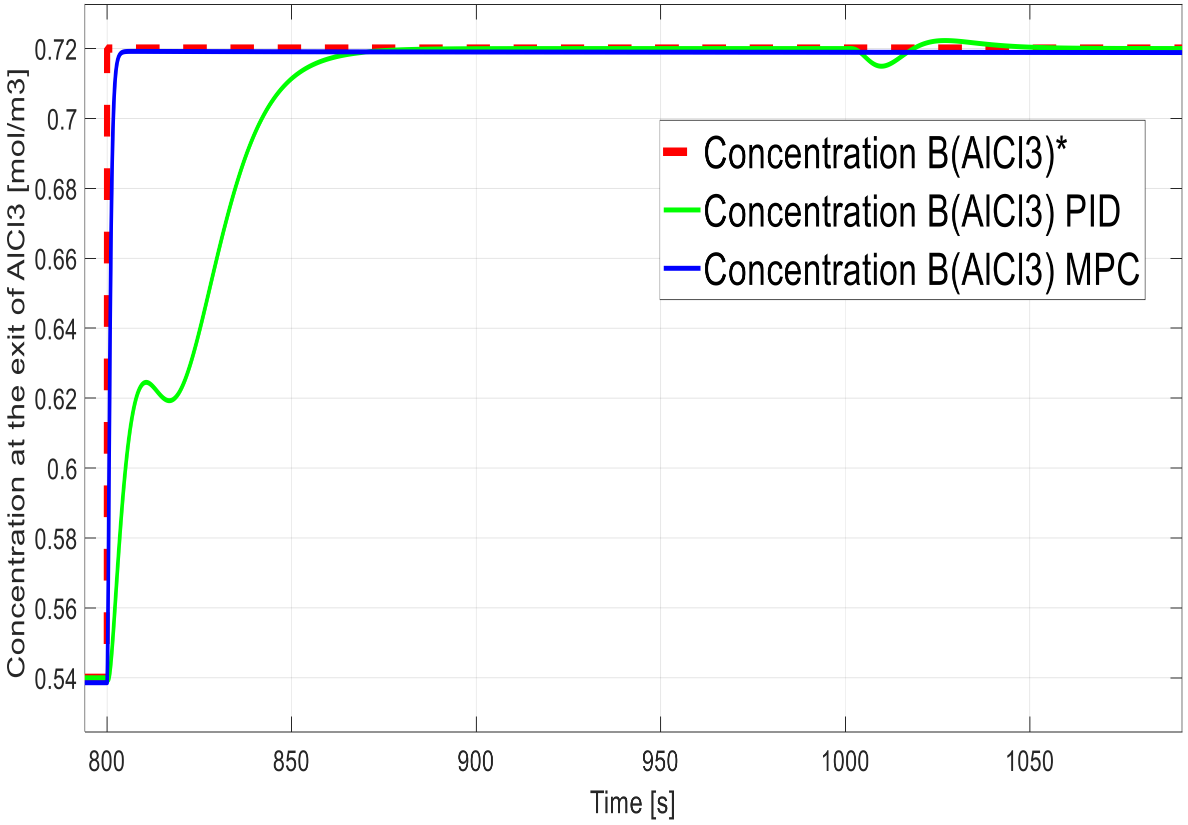
Results

PID and MPC controller performance against constrains introduced in the cascade system.

Boiler internal temperature



Aluminum chloride production reactor



Conclusions

- En este trabajo, se evalúa el desempeño de un sistema integrado en cascada de dos procesos, un calderín conectado a un reactor de agitación continua para producir cloruro de aluminio, el sistema es virtualizado observando la dinámica de las variables cercanas a la real en un entorno industrial inmersivo, amigable con el usuario, para logarlo es necesario de un modelo matemático no lineal del sistema integrado.
- El sistema es flexible a operar en lazo abierto, así como en lazo cerrado.
- La planta virtual es utilizada para evaluar algoritmos de control tradicionales y avanzados, con el uso de variables compartidas.
- Al aplicar dos técnicas de control PID y MPC, se puede evidenciar que el controlador avanzado MPC presenta un mejor desempeño en términos de máximo sobre impulso, tiempo de establecimiento y error en estado estable, en comparación a un controlador tradicional PID.
- Además, las acciones de controles no son tan bruscas lo que permite incrementar la vida útil del actuador.
- Por otra parte, se evalúa a los controladores frente a perturbaciones externas tanto en el calderín como en el reactor, notándose una rápida recuperación de la temperatura del vapor de salida del calderín, así como también la concentración de cloruro de aluminio en la salida del reactor e indirectamente la temperatura interna del reactor con el controlador MPC a diferencia del control PID.

Control of a Virtual Cascade Integrated System with Constant Steam Feed Boiler to a Reactor for the Production of Aluminum Chloride Using a Model Predictive Control MPC

David Amores, Javier Villagómez, Jacqueline Llanos, and Diego Ortiz-Villalba,
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Diciembre 2022