

## SINTONIA DOS CONTROLADORES DE UM REATOR SEMIBATELADA DE POLIMERIZAÇÃO

**Alunos:** Ana Carolina Lourenço Maria – anah.cah96@gmail.com; Ana Cristina Lourenço Maria – anah.lm@hotmail.com; Daniele Mesquita – daniele.mq@hotmail.com; Larissa Nascimento da Silva – larissa.silvaa@outlook.com

**Orientador:** Prof. Dr. Luís Fernando Novazzi – Inovazzi@fei.edu.br

### Introdução

Dada a complexidade inerente aos processos industriais químicos, o controle figura de grande importância nos processos industriais a fim de reduzir preços, garantir qualidade de produtos e reduzir impactos ambientais. (SEBORG, EDGARD e MELLICHAMP, 2010). O processo analisado nesse trabalho está instalado numa planta química brasileira que produz soluções de epóxi, resinas do tipo epóxi-fenólica, ésteres de epóxi e epóxi acriladas no reator de polimerização. Atualmente a empresa apresenta problema no sistema de controle de um reator em uma de suas plantas produtoras de resina epóxi. Os controladores das válvulas estão apresentando abertura e fechamento repentinos, comportamento semelhante ao de válvulas *on-off* ocasionando o desgaste mecânico das mesmas.

O projeto teve por objetivo fazer a resintonia dos controladores dessa unidade, além de propor outras estratégias de resfriamento buscando atingir uma maior eficiência do processo.

O controle de sistemas busca otimizar um processo de modo que uma saída específica seja alcançada a partir de uma entrada de referência fornecida. Dessa forma, o controle em malha fechada que rege esse sistema seria a representação em forma de fluxograma dos dados, desde entrada até a saída como mostra a figura 1.

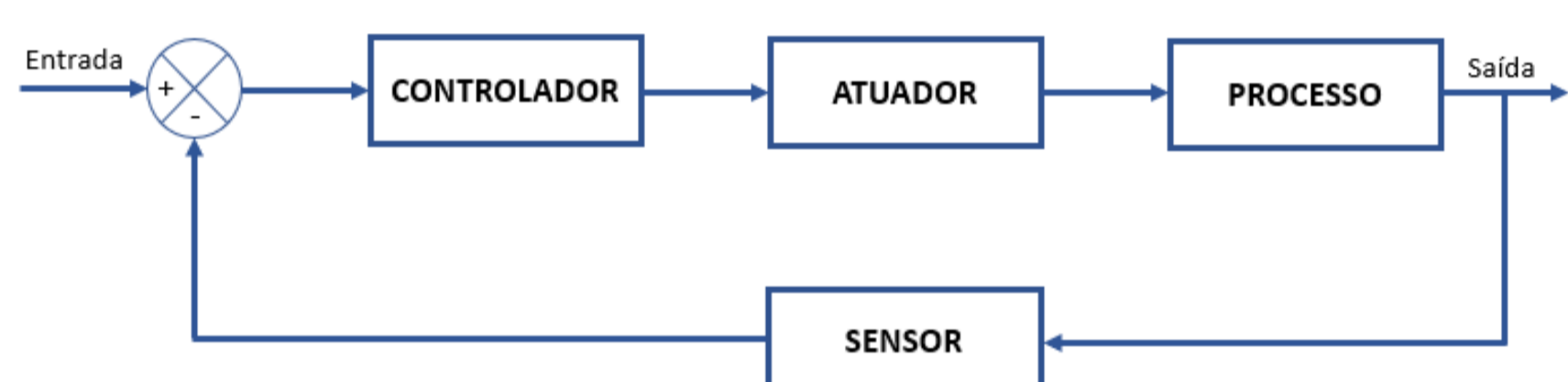


Figura 1 – Representação do sistema em malha fechada

### Metodologia

Neste trabalho foram simuladas duas estratégias de controle visando o resfriamento do reator, sendo a primeira, um sistema existente hoje na planta que envolve o resfriamento com injeção direta da água da torre de resfriamento, e a segunda propondo um sistema de resfriamento utilizando o trocador de calor já presente no processo como mostram as figuras 2 e 3 respectivamente.

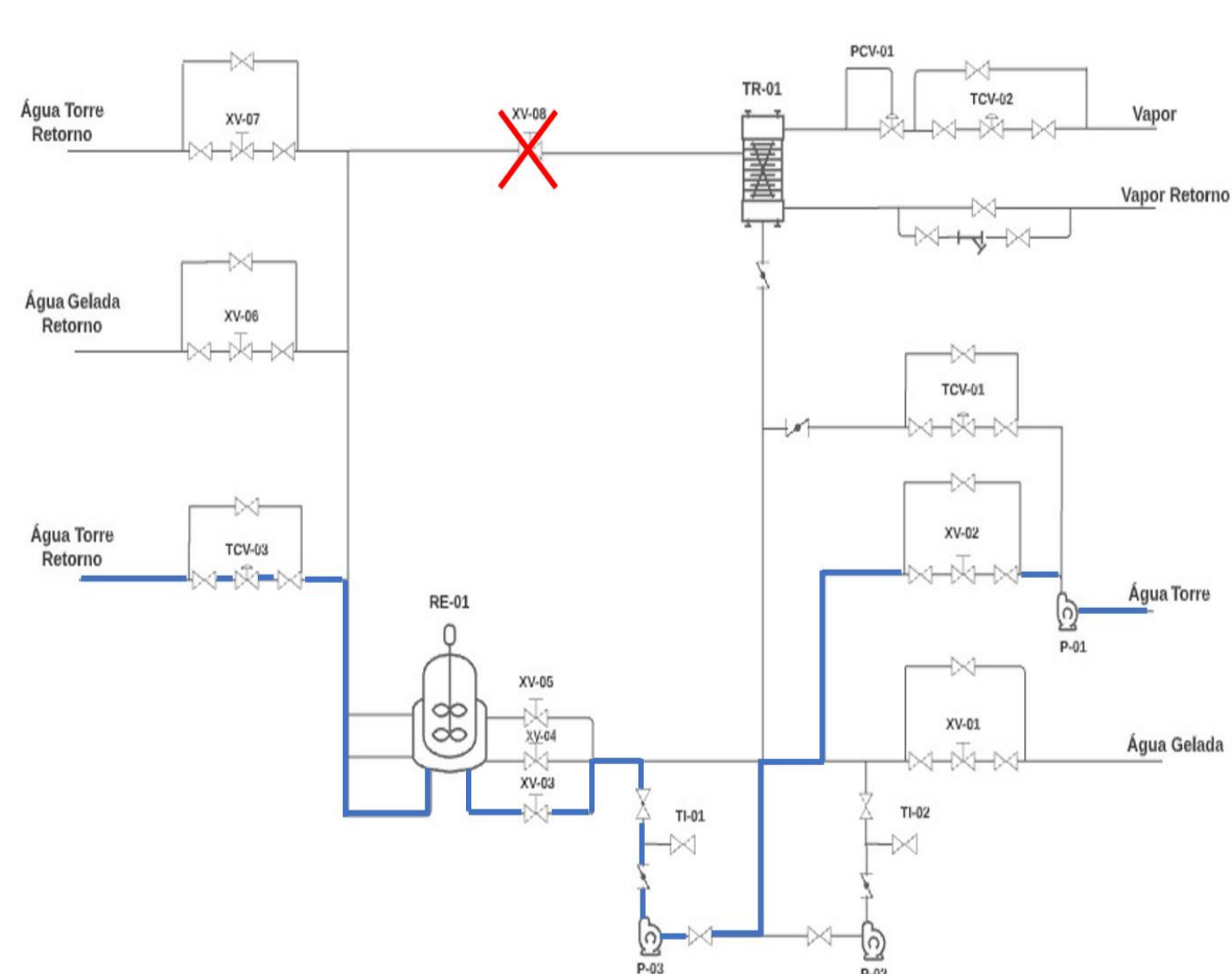


Figura 2 – Fluxograma do sistema de resfriamento por injeção direta de água da torre de resfriamento

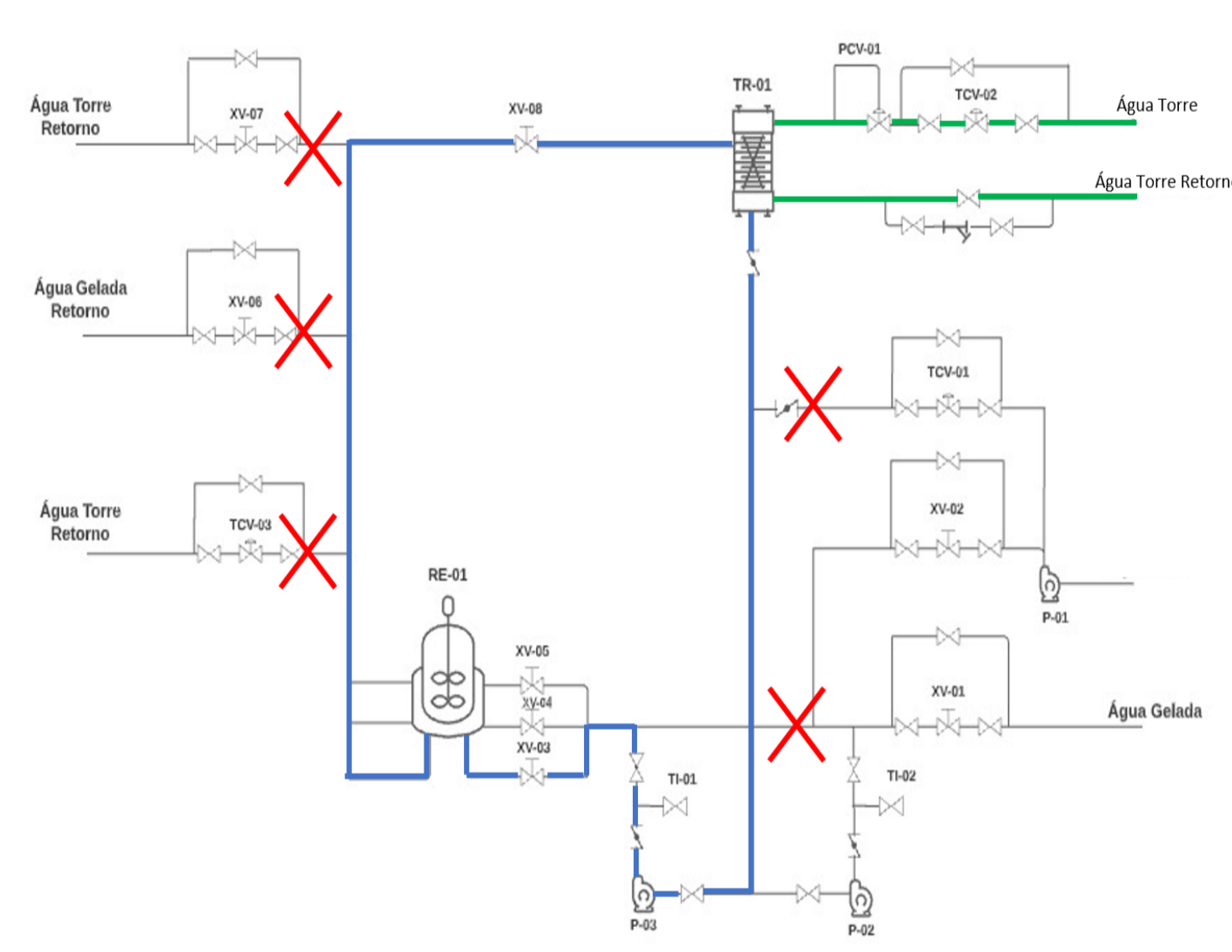


Figura 3 – Fluxograma do sistema de resfriamento com trocador de calor de água da torre de resfriamento

Foram implementados dois tipos de controladores, o proporcional e integral (PI) e o proporcional, integral e derivativo (PID). Para a sintonia foram feitas a aplicação de dois dos principais métodos em malha aberta, sendo estes o método de Ziegler & Nichols e o método de Cohen & Coon.

As tabelas representadas pelas figuras 4 e 5 apresentam as equações para o cálculo dos parâmetros  $k_c$  (ganho proporcional),  $\tau_i$  (ganho integral),  $\tau_D$  (ganho derivativo) nos métodos de Ziegler & Nichols e o método de Cohen & Coon.

Controlador	$K_c$	$\tau_i$	$\tau_D$
PI	$\frac{0,9\tau_p}{t_d k_p}$	$3,33t_d$	-
PID	$\frac{1,2\tau_p}{t_d k_p}$	$2t_d$	$\frac{t_d}{2}$

Figura 4 – Parâmetros do método de Ziegler-Nichols

Controlador	$K_c$	$\tau_i$	$\tau_D$
PI	$\frac{1}{K_p} \left( \frac{\tau_p}{t_d} \right) \left( 0,9 + \frac{t_d}{12\tau_p} \right)$	$\frac{t_d \left( 30 + \frac{3t_d}{\tau_p} \right)}{9 + 20 \left( \frac{t_d}{\tau_p} \right)}$	-
PID	$\frac{1}{K_p} \left( \frac{\tau_p}{t_d} \right) \left( \frac{16\tau_p + 3t_d}{12\tau_p} \right)$	$\frac{t_d \left( 32 + \frac{6t_d}{\tau_p} \right)}{13 + \left( \frac{8t_d}{\tau_p} \right)}$	$\frac{4t_d}{11 + \left( \frac{2t_d}{\tau_p} \right)}$

Figura 5 – Parâmetros do método de Cohen & Coon

### Resultados e Discussões

#### Estratégia por Injeção Direta

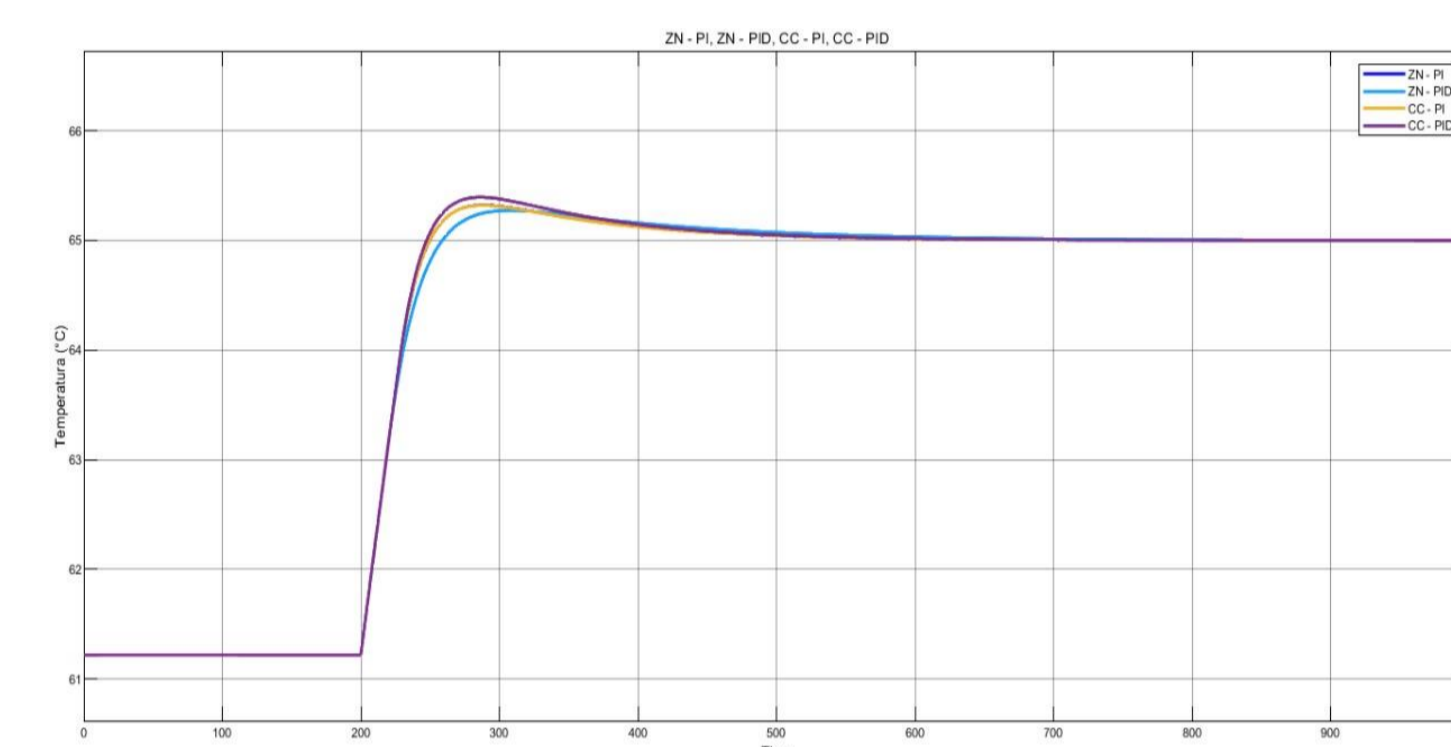


Figura 6 – Gráfico comparativo entre os métodos de Ziegler & Nichols e Cohen & Coon para os controles PI e PID para a variável controlada

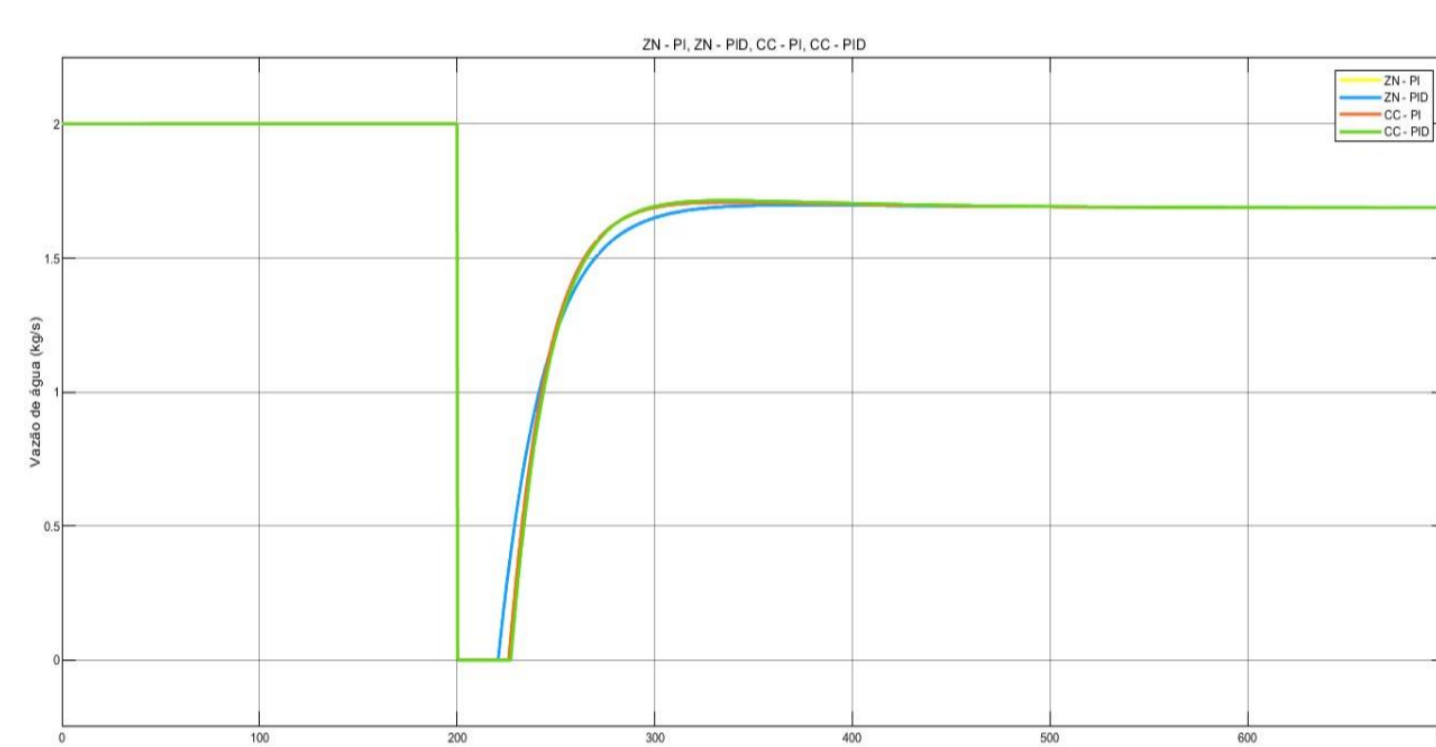


Figura 7 – Gráfico comparativo entre os métodos de Ziegler & Nichols e Cohen & Coon para os controles PI e PID para a variável manipulada

A figura 6 mostra que para o controle PI o ganho proporcional dos dois métodos (Ziegler & Nichols e Cohen & Coon) são bem próximos, em contrapartida, no controle PID, o ganho proporcional do método CC é maior, apresentando um sistema mais oscilatório. Referente ao ganho integral para o controle PI no método CC, o mesmo apresentou valor idêntico que o método ZN, consequência da redução do overshoot. A figura 7 mostra que o método de Ziegler & Nichols para o controle PID apresentou o melhor desempenho, pois demonstrou uma menor sensibilidade a perturbação gerada no sistema, um menor overshoot e um menor tempo de resposta, sendo esse tipo de atuação a representação de uma boa sintonia.

A tabela representada pela figura 8 exprime o quanto o resultado da variável de processo (controlada) ultrapassa o valor final do setpoint (65°C), em termos de porcentagem, aplicado a cada controle e para cada método.

	PI		PID	
	Ziegler & Nichols	Cohen & Coon	Ziegler & Nichols	Cohen & Coon
<b>Overshoot</b>	8,5%	8,5%	7,1%	10,3%

Figura 8 – Sobre sinal dos controladores PI e PID para Injeção Direta

#### Estratégia com Trocador de Calor

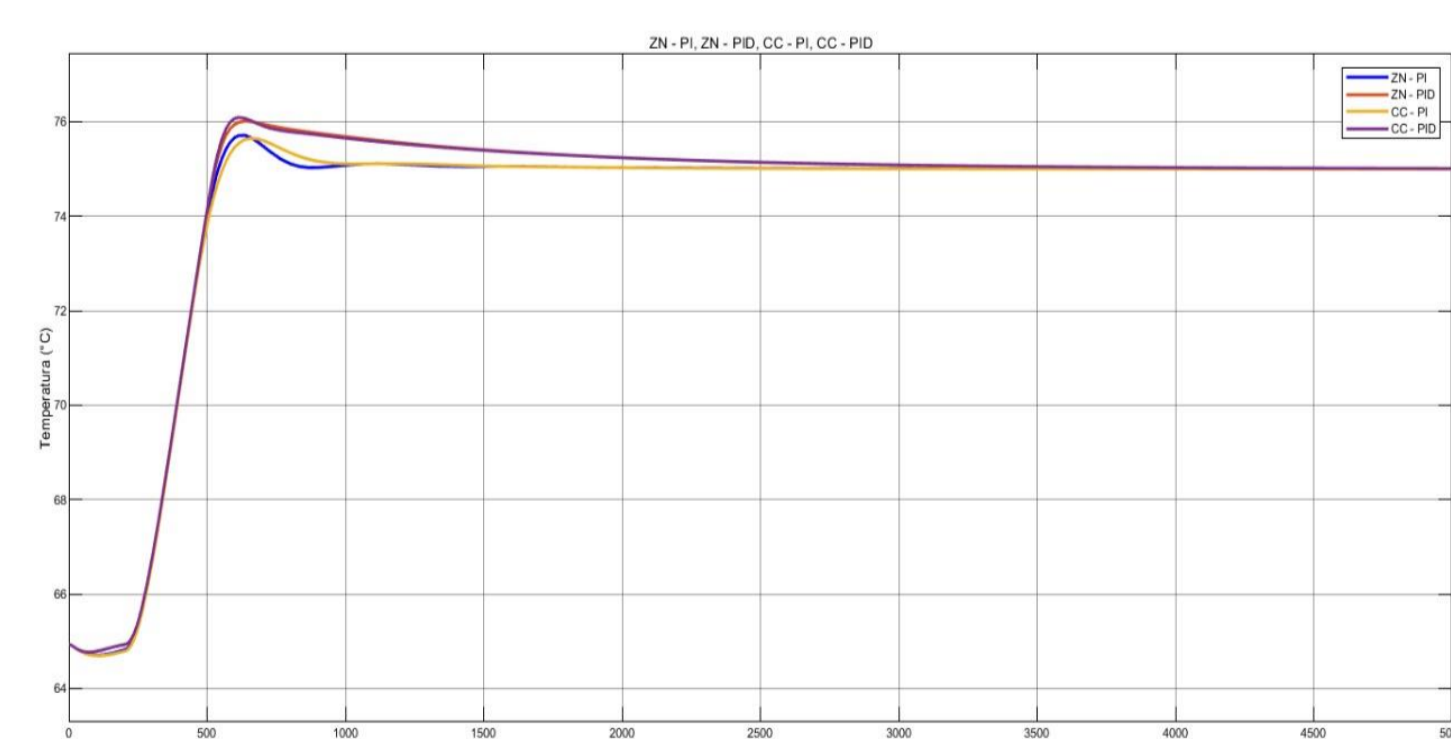


Figura 9 – Gráfico comparativo entre os métodos de Ziegler & Nichols e Cohen & Coon para os controles PI e PID para a variável controlada

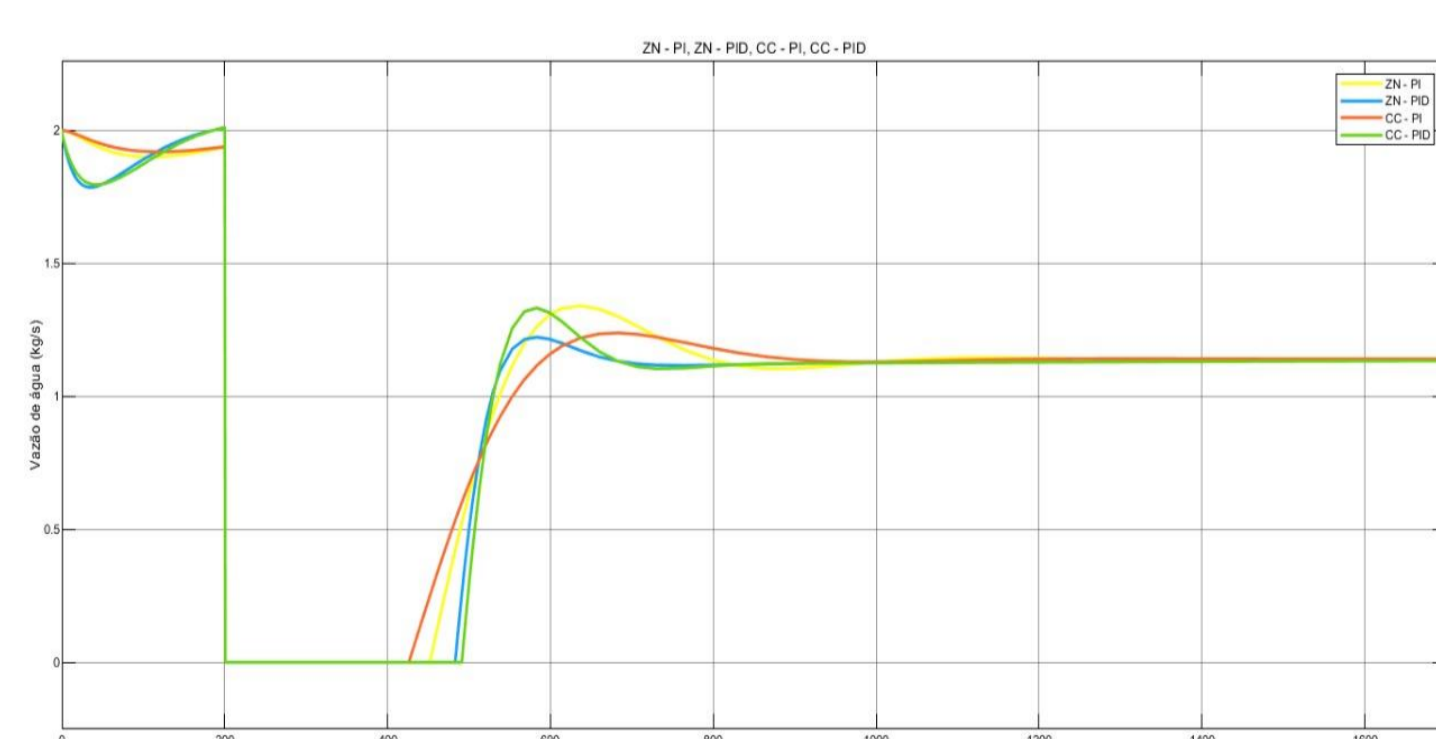


Figura 10 – Gráfico comparativo entre os métodos de Ziegler & Nichols e Cohen & Coon para os controles PI e PID para a variável manipulada

A figura 9 mostra que o ganho proporcional para o controle PI dos dois métodos antes e após a sintonia fina são praticamente iguais apresentando o comportamento das curvas exatamente o mesmo. É válida a mesma análise para o controle PID, pois não houve grande alteração após a sintonia

## SINTONIA DOS CONTROLADORES DE UM REATOR SEMIBATELADA DE POLIMERIZAÇÃO

**Alunos:** Ana Carolina Lourenço Maria – anah.cah96@gmail.com; Ana Cristina Lourenço Maria – anah.lm@hotmail.com; Daniele Mesquita – daniele.mq@hotmail.com; Larissa Nascimento da Silva – larissa.silvaa@outlook.com

**Orientador:** Prof. Dr. Luís Fernando Novazzi – inovazzi@fei.edu.br

finha no valor do ganho proporcional. Referente ao ganho integral, após a sintonia fina houve uma redução nos valores do ganho integral para os controles PI e PID nos métodos ZN e CC. As curvas que apresentaram menor overshoot e menor tempo de resposta foram para o controle PI nos dois métodos, por outro lado, o controle PID apresentou maior valor de overshoot e um maior tempo de resposta. A figura 10 apresenta que independentemente do método utilizado, o mais impactante é o tipo de controle utilizado.

A tabela representada pela figura 11 exprime o quanto o resultado da variável de processo (controlada) ultrapassa o valor final do setpoint (75°C), em termos de porcentagem, aplicado a cada controle e para cada método.

	PI		PID	
	Ziegler & Nichols	Cohen & Coon	Ziegler & Nichols	Cohen & Coon
<b>Overshoot</b>	7,1%	6,5%	10,1%	10,9%

Figura 11 – Sobre sinal dos controladores PI e PID com trocador de calor

### Controle da Temperatura da água na camisa do reator

As figuras 12 e 13 apresentam que tanto o comportamento da variável controlada, quanto o do setpoint, nas duas estratégias para as sintonias de controle PI e PID utilizando os parâmetros de Ziegler & Nichols e Cohen & Coon foram praticamente idênticos, expondo que a sintonia aplicada no modelo proposto é bastante robusta.

O comportamento da variável manipulada acompanha bem o desempenho do setpoint para as duas estratégias aplicadas no projeto.

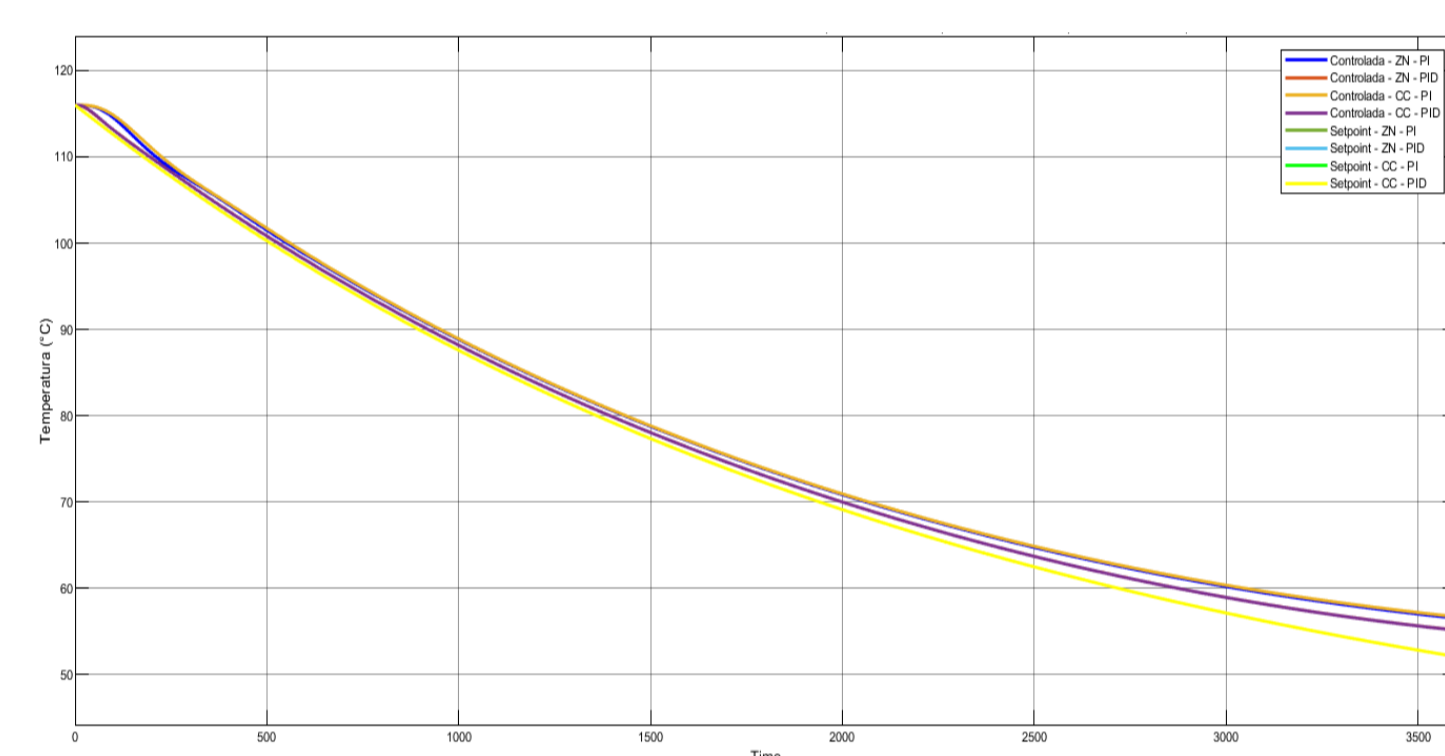


Figura 12 – Análise do comportamento da variável controlada e do setpoint por meio do gráfico comparativo entre os métodos de Ziegler & Nichols e Cohen & Coon para os controles PI e PID usando o trocador de calor

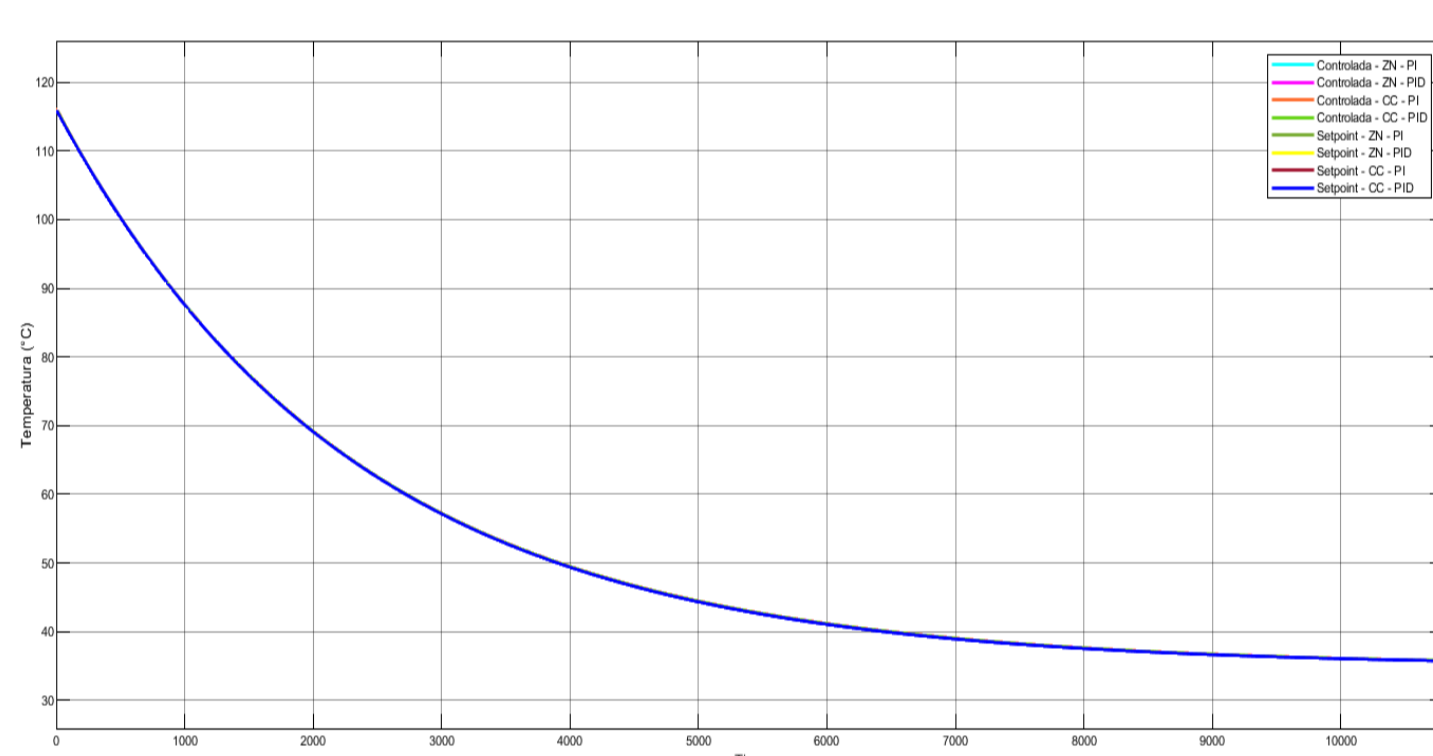


Figura 13 – Análise do comportamento da variável controlada e do setpoint por meio do gráfico comparativo entre os métodos de Ziegler & Nichols e Cohen & Coon para os controles PI e PID na injeção direta

Nos primeiros 45 minutos de reação ocorreu uma menor liberação da taxa de calor, fazendo com que a troca térmica fosse menor, sendo mais eficiente a utilização da estratégia com trocador de calor, dessa forma alcançando um setpoint de cerca de 50°C, como mostra a figura 12. A partir dos 45 minutos até o tempo final de reação (3 horas), onde houve o maior pico de liberação de calor, a estratégia com injeção direta foi mais viável, por ter uma maior troca de calor e alcançar o setpoint desejado de 35°C como mostra a figura 13.

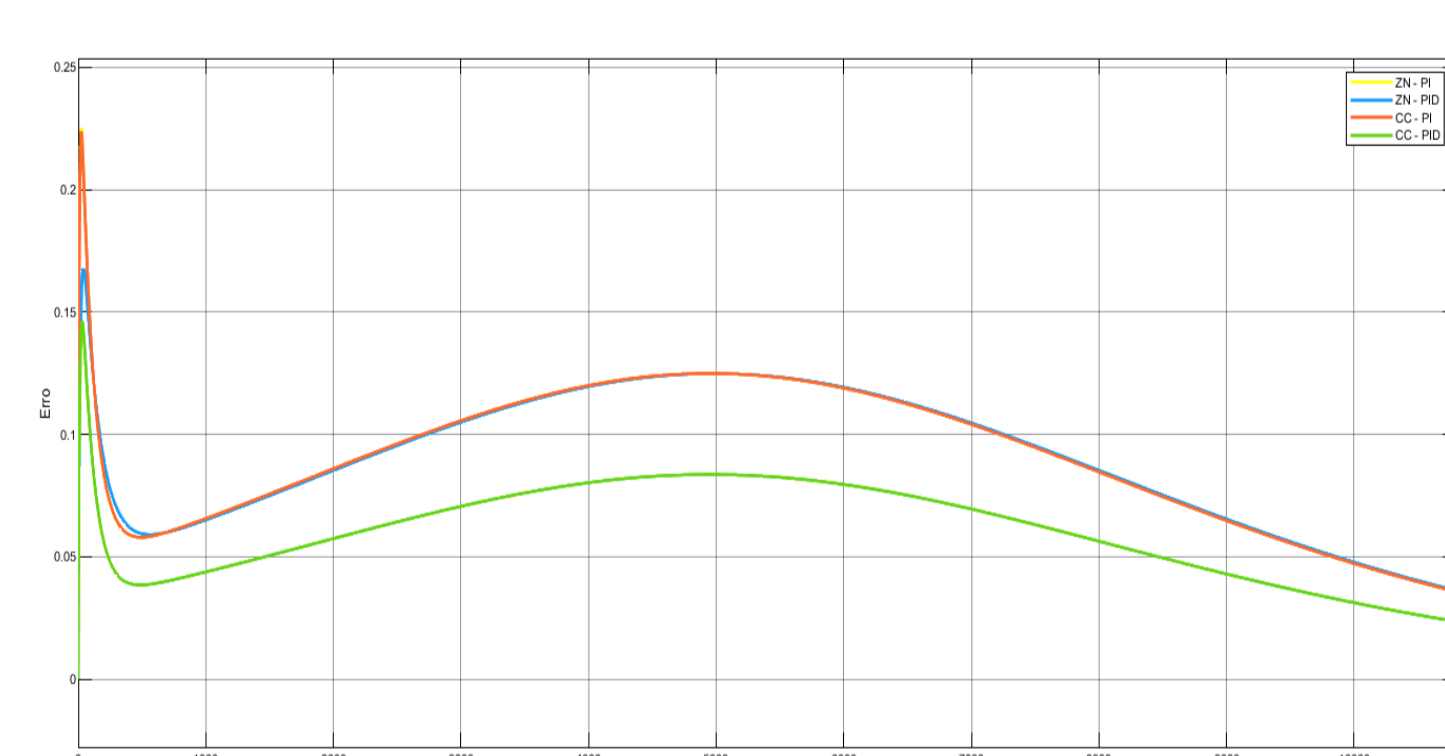


Figura 14 – Análise do erro por meio do gráfico comparativo entre os métodos de Ziegler & Nichols e Cohen & Coon para os controles PI e PID na injeção direta

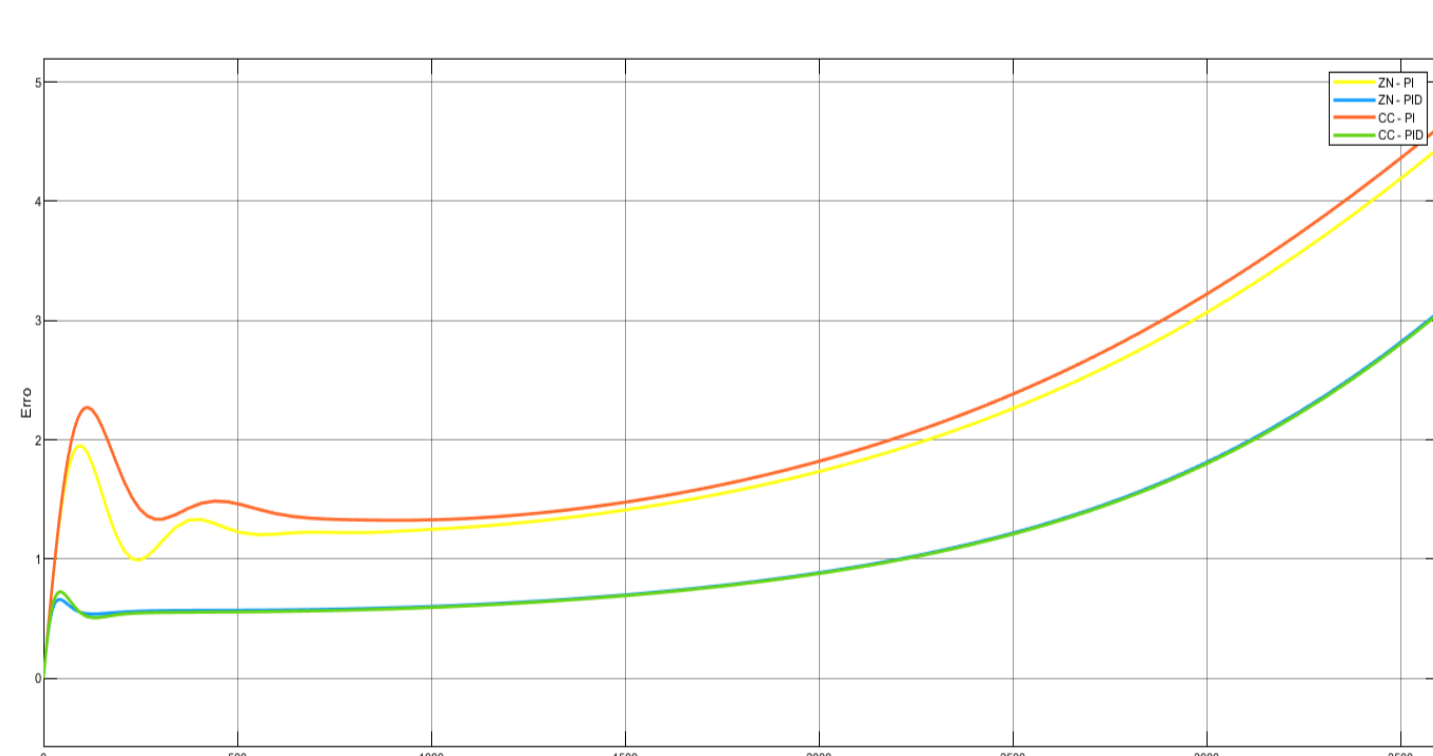


Figura 15 – Análise do erro por meio do gráfico comparativo entre os métodos de Ziegler & Nichols e Cohen & Coon para os controles PI e PID usando o trocador de calor

O gráfico do erro apresentado na figura 14 mostra o quanto a sintonia do modelo proposto foi bem executada e que os controladores estão atuando de forma robusta. Este erro apresenta-se extremamente baixo, numa variação de 0,225°C.

A figura 15 apresenta um erro em torno de 3 a 4,5°C, um pouco maior quanto comparado com a estratégia de injeção direta, porém relativamente baixo. Ao comparar as diferentes sintonias do controlador, apesar de terem apresentado uma diferença de 1,5°C, elas mostram boa robustez.

### Análise do Esforço de Controle

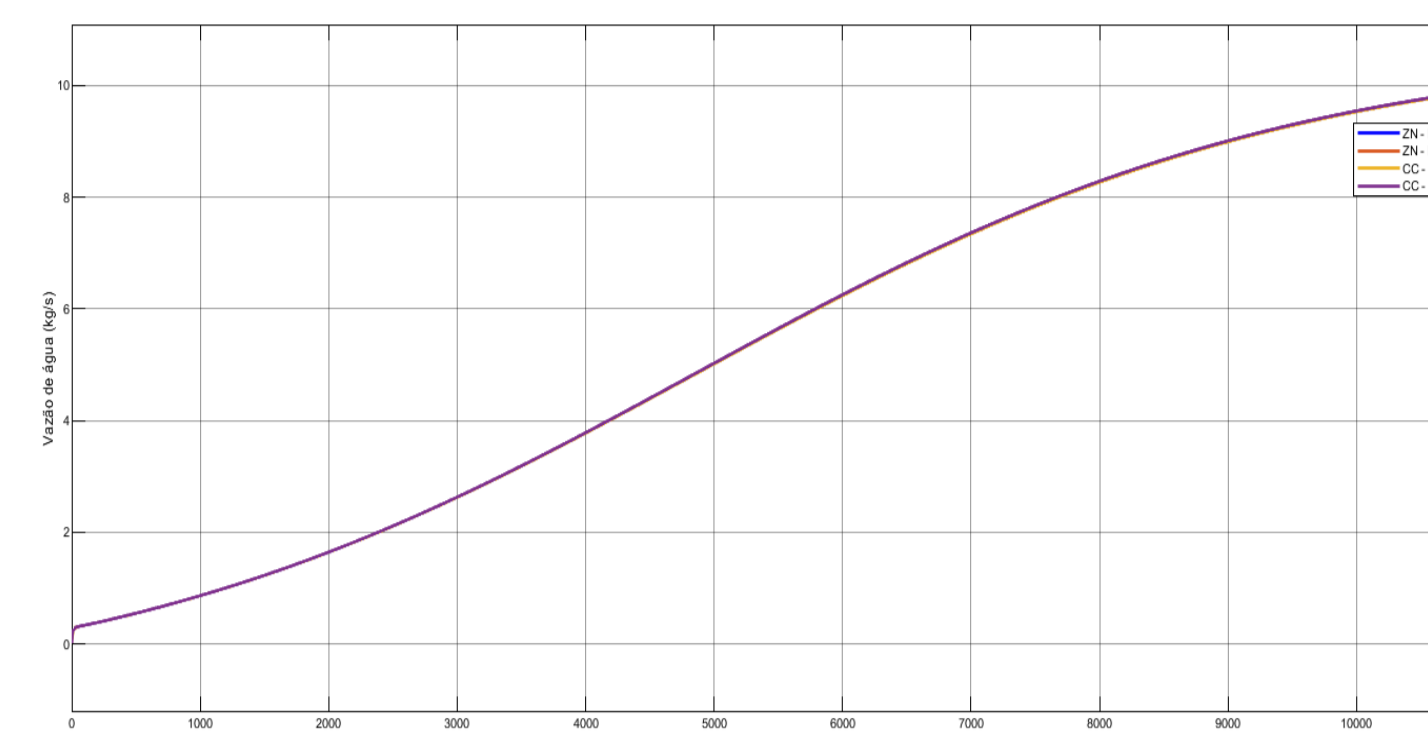


Figura 16 – Esforço de controle para estratégia de Injeção Direta

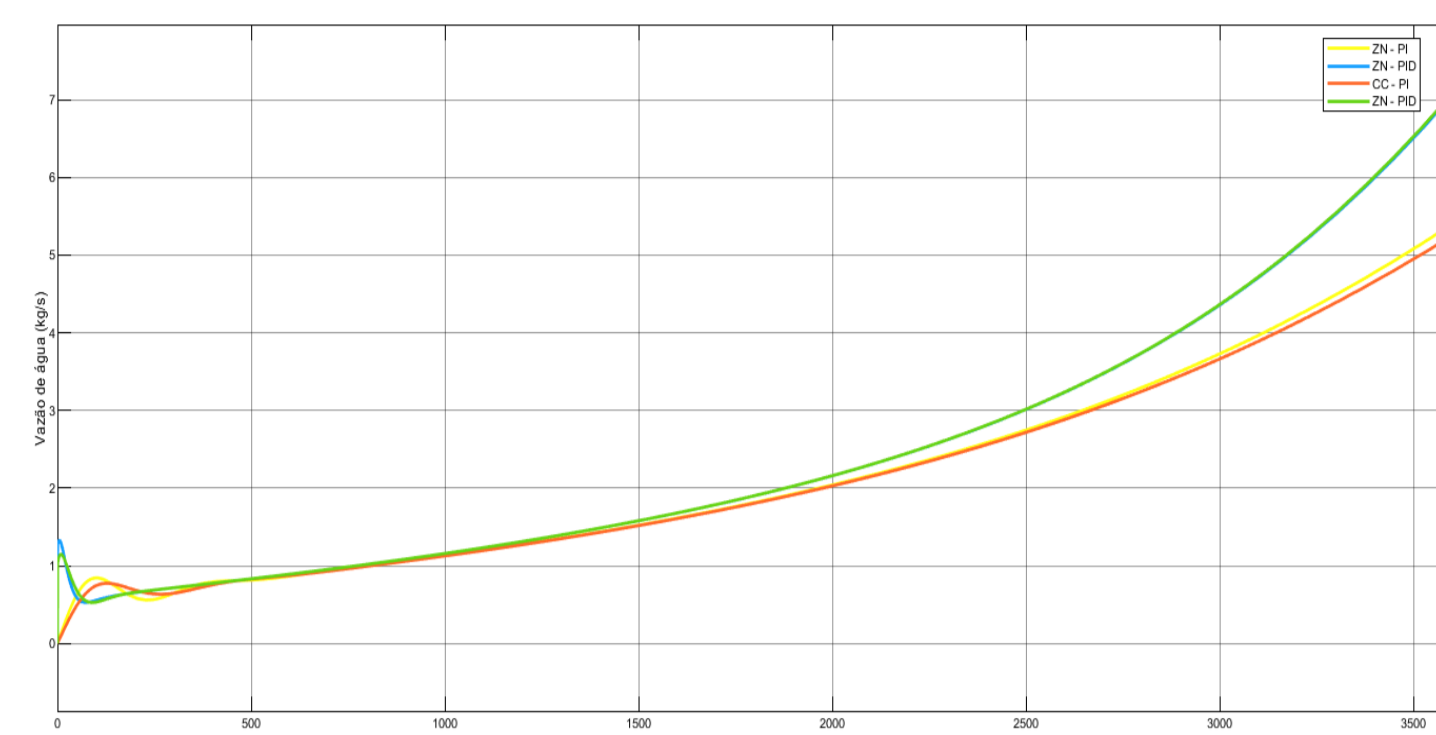


Figura 17 – Esforço de controle para estratégia com Trocador de Calor

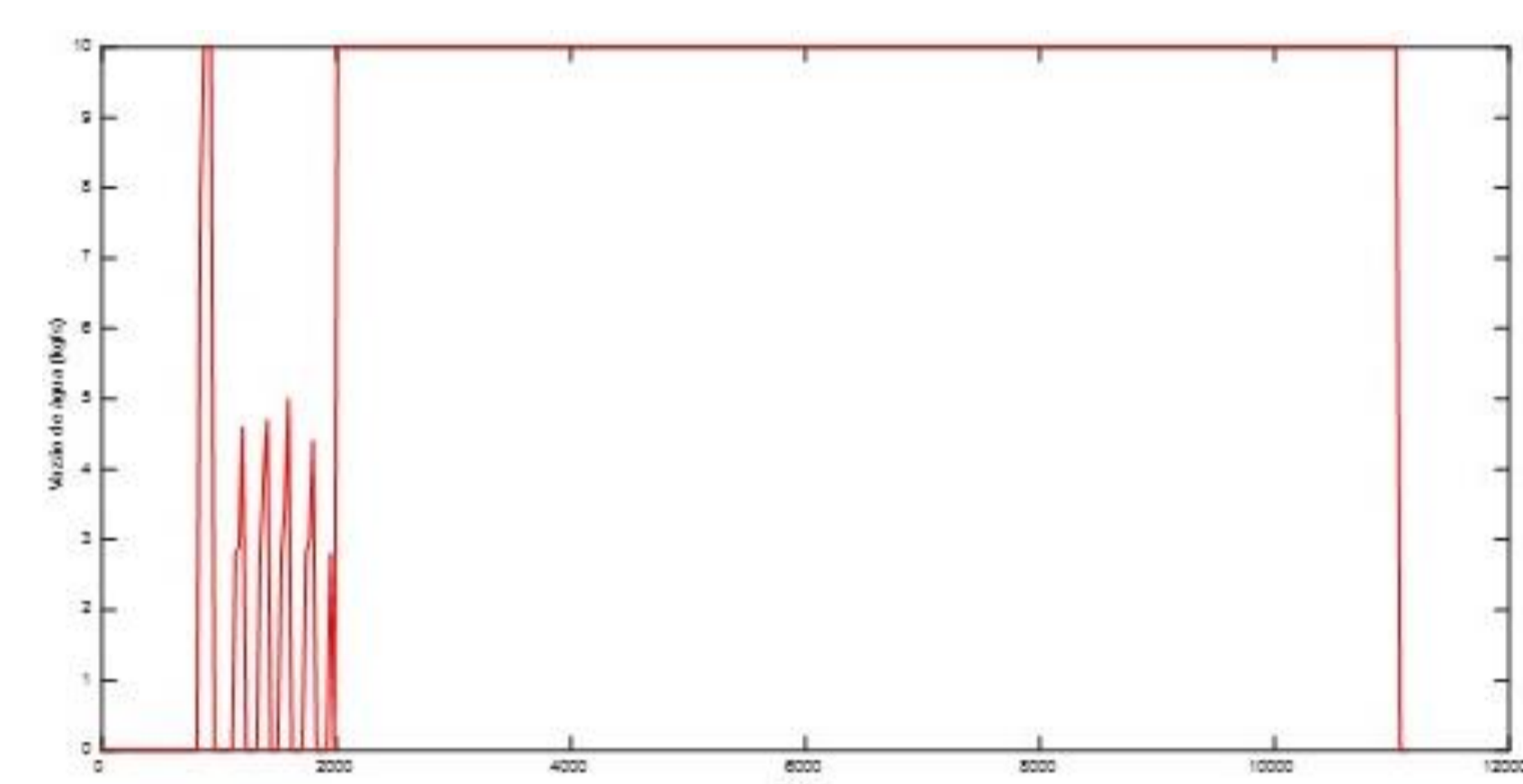


Figura 18 – Esforço de controle na planta industrial

A figura 18 apresenta um período de oscilações da vazão de água nos primeiros 30 minutos de reação, aproximadamente, e que após esse intervalo ela se mantém aberta com a capacidade máxima de 10 kg/s. Esse comportamento agressivo da válvula para a tentativa de controle da temperatura ocasiona o seu rápido desgaste levando a manutenções ou até mesmo a substituições mais recorrentes desses instrumentos.

A figura 16 aponta um comportamento mais suave da válvula de controle. É possível notar que a vazão varia ao longo das 3 horas de reação de acordo com a necessidade de resfriamento do reator.

A estratégia de resfriamento apresentada na figura 17 se mostrou muito eficiente durante aproximadamente os primeiros 46 minutos de adição do monômero/iniciador. Apesar dessa proposta não se mostrar eficaz durante todo o processo ela apresentou uma ótima sintonia justamente para o período de maior oscilação presente hoje na planta.

### Conclusões

O desempenho do controlador PID sintonizado a partir de Ziegler & Nichols foi melhor para a estratégia por injeção direta apresentando um valor de overshoot de 7,1% e menor sensibilidade a perturbação gerada no sistema. Já para o procedimento com trocador de calor, o controlador PI se mostrou mais conveniente independente do método de sintonia aplicado apresentando valores de overshoot de 7,5% para Ziegler & Nichols e 6,5% para Cohen & Coon e menor tempo de resposta. A ressintonia sugerida se mostrou eficaz já que a válvula controladora de vazão apresentou um comportamento suave durante as 3 horas de adição do monômero/iniciador. Assim, o cenário ideal seria a utilização dos dois métodos objetivando o total controle do resfriamento do reator, sendo em primeiro momento utilizada a técnica com trocador de calor para a diminuição da temperatura da água de aquecimento do reator que está em circuito fechado, evitando-se assim o flashamento na válvula de saída do sistema para a torre de refrigeração. Em seguida o processo por refrigeração direta entraria em operação para o controle da temperatura reacional.

### Referências

- [1] ÅSTRÖM, Karl J; HÄGGLUND, Tore. PID Controllers: Theory, Design and Tuning, Instrument Society of America – 2ª Edição, Durham, NC, EUA, 1995
- [2] CANEVAROLO Jr., Sebastião V. Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2.ed. São Paulo: Artliber, 2006. 280 p.
- [3] SEBORG, D.E.; EDGAR, T.F.; MELLICHAMP, D.A. Process Dynamics and Control. 3ed. John Wiley & Sons, 2010.
- [4] ZIEGLER, J., & NICHOLS, N., 1942, "Optimum Settings for Automatic Controllers", Transactions of ASME, 759-768.