

**INSTITUTO
FEDERAL**

Minas Gerais

Campus
Betim

ALLEF DE SOUZA

CONTROLE DE VENTILADORES EM TORRE DE RESFRIAMENTO

BETIM

2021



ALLEF DE SOUZA

CONTROLE DE VENTILADORES EM TORRE DE RESFRIAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do Instituto Federal de Minas Gerais campus Betim como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. M.Sc. Victor Alves Silva e Melo

BETIM
2021

S729c Souza, Allef de

Controle de ventiladores em torre de resfriamento/ Allef de Souza. – 2021.

51 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais Campus Betim, 2021.

Orientação: Prof. Victor Alves Silva e Melo.

1. Função de transferência. 2. Sintonia PID. I. Título. II. Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Betim, Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação.

CDU 621.38

Allef de Souza

CONTROLE DE VENTILADORES EM TORRE DE RESFRIAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do Instituto Federal de Minas Gerais campus Betim como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 10 / 12 / 21 pela banca examinadora:

Victor Alves Silva e Melo

Prof. Me Victor Alves Silva e Melo (Orientador)

Michelle Mendes Santos

Prof. Me. Michelle Mendes Santos

L. F. A. A. M.

Prof. Dr. Leandro Freitas de Abreu

RESUMO

Torres de resfriamento são equipamentos que tem como objetivo refrigerar processos industriais e máquinas. Tais equipamentos utilizam a troca de calor por convecção e efeitos evaporativos, por meio do contato entre os fluxos de ar e água. A maioria das torres possuem ventiladores compostos por motor e redutor que são responsáveis por gerar o fluxo de ar em seu interior. Para algumas situações uma menor vazão de ar pode ser suficiente para a troca de calor desejada. O presente trabalho realiza um estudo de caso da aplicação de um controle automático na rotação dos ventiladores da torre de resfriamento instalada na empresa Metalsider. Para este estudo foi proposto a realização do modelo matemático do processo, encontrando a devida função transferência e o projeto do controlador. A entrada do modelo é manipulada variando a rotação do motor do ventilador, utilizando um inversor de frequência. O MATLAB® foi o software usado para o projeto do modelo e controlador, com este software foi possível realizar as simulações e gerações de gráficos do comportamento do processo estudado. Por fim comparou o consumo de energia do ventilador sem e com controle automático. A resposta foi comparada e resultados analisados.

Palavras chaves: função de transferência, sintonia PID, torres de resfriamento, modelagem matemática.

ABSTRACT

Cooling towers are equipment that aim to cool industrial processes and machines. Such equipment uses heat exchange by convection and evaporative effects, through contact between air and water flows. Most towers have fans composed of a motor and a reducer that are responsible for generating the air flow inside. However, for some situations a lower air flow rate may be sufficient for the desired heat exchange. This paper conducts a case study of the application of an automatic control of the rotation of the cooling tower fans installed in the Metalsider company. For this study the mathematical model of the process was proposed, finding the proper transfer function and the controller design. The input of the model is manipulated by varying the rotation of the fan motor, using a frequency inverter. MATLAB® was the software used to design the model and controller, with this software it was possible to perform simulations and generate graphs of the behavior of the studied process. Finally, the energy consumption of the fan without and with automatic control was compared. The response was compared and results analyzed.

Keywords: transfer function, PID tuning, cooling towers, mathematical modeling.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UTE	Usina termoelétrica
FT	Função de transferência
PID	Proporcional, integral e derivativo
PI	Proporcional integral
GAF	Gás de alto forno
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolar de Porta Isolada)
CLP	Controlador lógico programável
LGR	Lugar geométrico das raízes
CHR	Chien, Hrones e Reswick
Z & N	Ziegler e Nichols
SP	Set point

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVOS.....	9
1.2 JUSTIFICATIVA.....	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1 USINA TERMOELÉTRICA (UTE).....	11
2.1.1 CONDENSADOR.....	12
2.1.2 TORRE DE RESFRIAMENTO	13
2.1.2.1 VENTILADORES.....	14
2.2 MALHA DE CONTROLE AUTOMÁTICO.....	18
2.2.1 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA (FT)	19
2.2.2 CONTROLE PID	22
2.3 ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMAS PELO MÉTODO DO LUGAR DAS RAÍZES	25
2.3.1 ESTABILIDADE	27
3. SISTEMA SOB ANÁLISE	28
3.1 DIAGRAMA P&I DA TORRE DE RESFRIAMENTO COM CONDENSADOR.....	28
3.2 DISTÚRBO.....	29
4. MODELAGEM DO SISTEMA.....	31
4.1 PLANTA	31
4.2 DISTÚRBO.....	35
5 CONTROLADOR	37
5.1 PROJETO DO CONTROLADOR	37
6 RESULTADOS	41
6.1 ECONOMIA.....	46
7 CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho de conclusão de curso foi realizado um estudo de caso da aplicação de um controle automático nos ventiladores da torre de resfriamento instalada na termoelétrica da empresa Metalsider.

A história da Metalsider data de 1984 quando, em janeiro daquele ano a empresa iniciou a produção de ferro-gusa em Betim, Minas Gerais. Com produção e comercialização voltadas para o mercado interno e externo a Metalsider começou suas atividades operando com dois altos-fornos. Nos anos seguintes expandiu sua capacidade com a aquisição de outros cinco altos-fornos, consolidando, assim, seu parque industrial. Em 2010 a termoelétrica foi instalada com objetivo de gerar energia para a planta utilizando o gás gerado nos altos forno denominado de gás de alto forno.

Atualmente, nos processos industriais, tem-se várias tecnologias de controle para aumentar a qualidade, reduzir o desperdício de material, reduzir o consumo de energia, dentre outros. A temperatura é uma grandeza que está associada na maioria dos processos, e a manipulação dela em prol da produtividade e melhoria dos fatores citados é de suma importância para que se possa alcançar os objetivos.

A água é utilizada em praticamente todas as indústrias, na estimativa nacional de usos consuntivos da água, a indústria de transformação representa o terceiro maior uso, atrás do abastecimento humano urbano e da agricultura irrigada (NEOMUNDO, 2017). Em função disso, há a necessidade da reutilização. E para algumas atividades é necessário a remoção da carga térmica adquirida. O equipamento que resfria a água utilizada nessas indústrias, em geral, é chamado de torre de resfriamento, local que recebe a água aquecida, a resfria e a envia para o processo novamente.

Cada atividade que relaciona à água em seu processo possui uma temperatura de trabalho característico, portanto na maioria dos casos há a necessidade de controle de temperatura. O controle mais conhecido e mais usado em todo o mundo é o PID (Proporcional-Integral-Derivativo). “Sua popularidade deve-se ao fato de ser simples de ajustar e existir no mercado uma grande variedade de ferramentas que possibilitam sua implementação de maneira fácil e prática” (GUERRA, 2009, p.1).

O tema de estudo “Controle de Ventiladores em torre de resfriamento”, envolve a aplicação de controle em malha de controle fechada (PI) simulada em 3 motores dos ventiladores da torre de resfriamento. Sem a aplicação do controle, os ventiladores trabalhavam

24 horas por dia com a rotação nominal, ou seja, havia um gasto desnecessário, por exemplo, quando às condições climáticas mudam ao longo do dia e dos períodos do ano. Diante disto, se tornou necessário a inserção do controle automático para diminuir o consumo e aumentar a vida útil dos equipamentos.

Serão discutidos neste trabalho de conclusão de curso a fundamentação teórica, métodos utilizados para o estudo de caso, a função transferência do processo, o método da sintonia de controle utilizado e simulações gráficas matemáticas. Através destas simulações gráficas é permitido realizar um comparativo de economia de energia com e sem controle automático

1.1 OBJETIVOS

Este documento constitui um trabalho referente ao requisito final para a disciplina de TCC2. O Trabalho tem como objetivo realizar um estudo de caso na torre de resfriamento da termoeletrica da empresa Metalsider, elaborando o modelamento matemático deste processo. Será estudado o princípio de funcionamento dos equipamentos da torre e o condensador.

O estudo consiste no projeto e análise da função transferência da planta e de um controlador, aplicados a velocidade de rotação dos ventiladores da torre com a finalidade de gerar uma economia de energia elétrica com auxílio de uma plataforma de simulação.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com o grande desenvolvimento da tecnologia em busca de maiores lucros, as indústrias estão cada vez mais aumentando sua produtividade, buscando otimizar em larga escala os seus processos. “Otimizar processos significa realizar auditorias nos fluxos de atividades de trabalho, sejam elas automatizadas ou não, visando encontrar gargalos de produção, erros ou desperdício de tempo e dinheiro” (KRATZ, 2018).

O presente trabalho de conclusão de curso abordará modelos matemáticos para o controle de rotação dos ventiladores aplicados na torre de resfriamento que recebe a água do condensador da turbina da termoeletrica da Metalsider Ltda.

O tema apresenta uma gama de conhecimentos, desde o tratamento da água que entra no condensador, até o controle da rotação dos motores para manter a temperatura no set point especificado. Visto que essa é uma aplicação ligada diretamente à área de controle e automação, o conteúdo usará uma abordagem que agrega um grande conhecimento tanto para o aluno quanto para a empresa, pois o documento resultante será uma fonte de referência futura. Vale

ressaltar também a contribuição que este controle automático gera para o processo, pois há uma redução de horas trabalhadas dos equipamentos ao longo de um período, o que aumenta a vida útil dos componentes eletromecânicos e conseqüentemente gera redução de custos para a empresa.

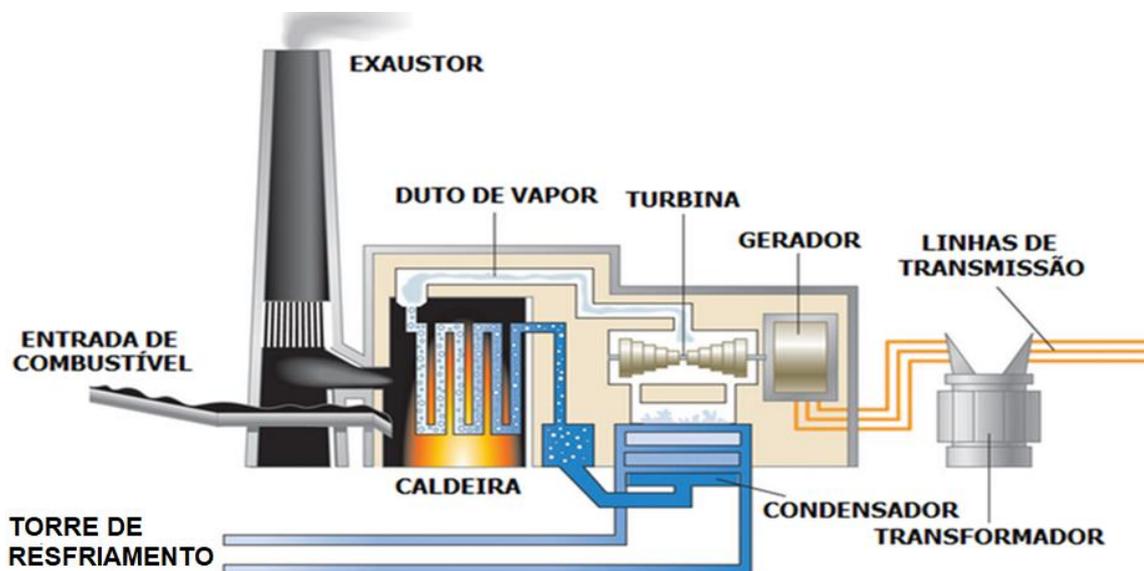
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 USINA TERMOELÉTRICA (UTE)

A usina termoelétrica (UTE) é uma planta de geração de energia e Tolmasquim (2016) aponta a existência de 5 tipos: a vapor, de turbina a gás operando em ciclo simples, de ciclo combinado, com motores de combustão interna alternativos e de cogeração. A UTE da Metalsider é do tipo a vapor, em que “o ciclo a vapor constitui a tecnologia mais antiga para a geração de eletricidade” (TOLMASQUIM, 2016). Neste tipo de máquina é possível utilizar qualquer combustível, como óleo diesel, gás natural e lenha. A planta da Metalsider utiliza o GAF (gás de alto-forno) que é “constituído principalmente de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2) e material particulado” (BATISTA, 2009).

Os principais componentes da termoelétrica são: caldeira, turbina a vapor, condensador e bomba de água de alimentação. A Figura 1 apresenta um esquema simples da planta da usina.

Figura 1 – Esquema simples dos componentes de uma UTE.



Fonte: Retirado de www.cbie.com.br.

O calor obtido pela queima do combustível é transferido para o fluido (água), que altera o seu estado físico de líquido para gasoso, na forma de vapor ela é expandida e adquire uma alta pressão e temperatura. Após essa mudança de estado, o vapor d'água é canalizado até a turbina, que está acoplada ao gerador, girando o seu eixo e transformando a energia mecânica

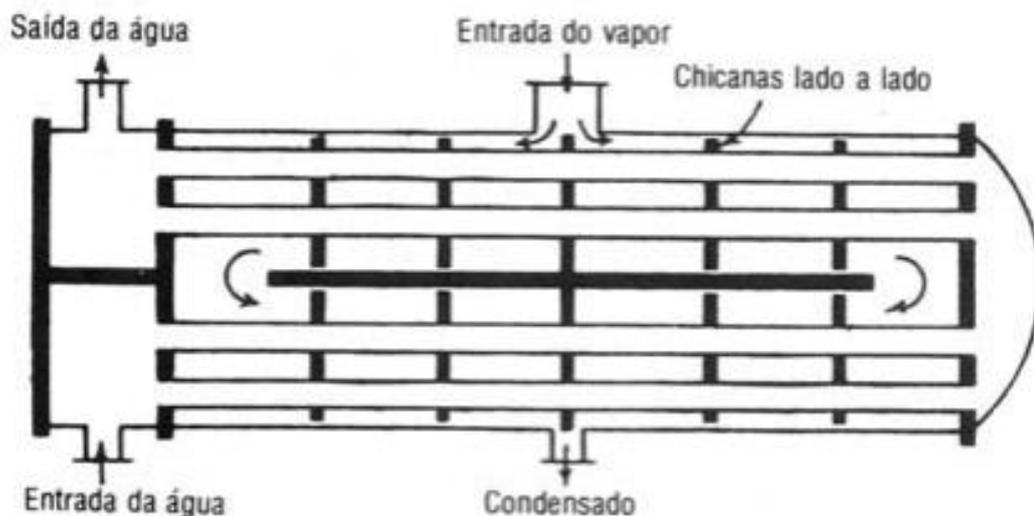
em energia elétrica. O vapor de extração (aquele vapor existente após a passagem pela turbina) passa pelo condensador para retornar para forma líquida através da troca de calor com as paredes internas da carcaça e as paredes externas dos tubos e assim é direcionado para a caldeira fechando o ciclo. O elemento responsável pela troca de calor no condensador é a água fria que é proveniente da torre de resfriamento.

2.1.1 CONDENSADOR

O condensador é um equipamento responsável pela condensação da água, ou seja, passagem do estado gasoso para líquido. Os três tipos de condensadores mais utilizados em sistemas de refrigeração são: refrigerados a ar, água e o evaporativo.

O condensador em estudo será o do tipo evaporativo de carcaça e tubo (Shell and tube), que é refrigerado a água e possui uma determinada quantidade de tubos horizontais e paralelos conectados a duas placas dispostas em ambas as extremidades (Figura 2). “A água de resfriamento circula por dentro dos tubos e o vapor de água escoo dentro da carcaça, em volta dos tubos” (VENTURINI E PIRANI, 2005).

Figura 2 – Condensador carcaça e tubo.



Fonte: (ARAÚJO, 2002).

A água utilizada no condensador para resfriar o fluido gasoso (vapor de água) é proveniente da torre de resfriamento e é tratada com produtos químicos para diminuir os danos ocasionados nos componentes do processo, pois esta água contém sais minerais. É necessário

que a água da torre na temperatura correta para que haja a condensação do vapor, permitindo-o retornar para a caldeira em forma líquida para fechar o ciclo.

2.1.2 TORRE DE RESFRIAMENTO

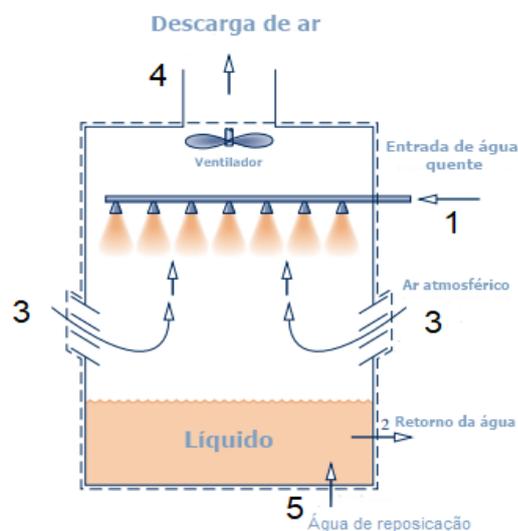
As torres de resfriamento são equipamentos que tem o objetivo trocar calor algum fluido de forma indireta e no presente trabalho a torre será responsável por trocar calor com vapor de água do condensador com a finalidade de condensá-la. “As torres de resfriamento podem operar por tiragem natural ou forçada” (MORAN E SHAPIRO, 1993).

Torres por tiragem natural têm como principal característica a utilização do ar sem auxílio de ventiladores, em que o mesmo circula dentro da torre devido à convecção natural. A água é aspergida por cima da torre através de borrifadores e o ar penetra na mesma, em direção oposta a água cai verticalmente, produzindo um efeito de contra fluxo.

Torres por tiragem forçada têm como principal característica o uso de ventiladores para a movimentação do ar na torre. Suas principais desvantagens são devidas ao uso dos ventiladores, pois requerem manutenção mais frequente e dispendiosa em comparação às torres de tiragem natural.

A Figura 3, mostra o esquema de funcionamento de uma torre por tiragem forçada, objeto de estudo deste trabalho.

Figura 3 – Funcionamento de uma torre de resfriamento de tiragem forçada.



Fonte: (MORAN E SHAPIRO, 1993) – Adaptado pelo autor.

O ar atmosférico entra pela passagem 3 aspirado pela ventilação forçada e flui na direção contrária das quedas das gotículas de água provenientes dos aspersores na entrada 1. A interação dessas duas ações faz com que uma parte da água seja evaporada (em torno de 2%) no ar úmido que sai pela abertura 4 e o restante da água retorna ao processo com uma temperatura menor. A água de reposição dada pela entrada 5 é utilizada para repor parte da perda que ocorre com o arraste dado pelos ventiladores.

2.1.2.1 VENTILADORES

Os ventiladores das torres de resfriamento são utilizados para movimentar grandes volumes de ar, com objetivo de integrar o ar atmosférico com a água (com carga térmica alta) vinda do processo e resfriá-la.

Os ventiladores são compostos basicamente de: pás, eixo de transmissão, redutor e motor elétrico. Na Figura 4, é possível observar este conjunto.

Figura 4 – Ventilador de uma torre de resfriamento.



Fonte: Autor.

As torres podem utilizar dois tipos de ventiladores: axial ou centrífugo. A grande maioria das torres utilizam os axiais. “Os ventiladores axiais permitem a movimentação de grandes volumes de ar com baixas pressões estáticas (da ordem de 20 mmCA). Estes são de custo relativamente baixo, podendo ser utilizados em torres de qualquer tamanho, bem como em torres que deve ser assegurada uma baixa perda de água por arraste. Em termos de

rendimento estático, estes apresentam, em média, valores em torno de 80%” (ALPINA, 1978, p.25).

O motor de corrente alternada pode ser do tipo assíncrono ou síncrono, sendo motor assíncrono com rotor em gaiola o utilizado nos ventiladores em estudo e suas características principais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela das principais características do motor do ventilador da torre de resfriamento.

Características do motor dos ventiladores	
Potência	60HP
Frequência	60Hz
Polos	4
Rotação nominal	1783
Tensão nominal	380/660V
Corrente nominal	85,1/49,0 A

Fonte: Retirado de ecatalog.weg.net e adaptado pelo autor.

O acionamento dos motores pode ser feito de diversas formas, acionamento direto (partida direta), com soft starter, inversor de frequência, dentre outros. O acionamento dos motores dos ventiladores da torre estudada no trabalho era feito com soft starter, via supervisor. O soft starter, que pode ser observado na Figura 5, possui como principal característica a partida suave do motor, através de rampa de tensão ou de corrente. No entanto, não possibilita o controle de rotação, ocasionando consumos que poderiam ser diminuídos.

Figura 5 – Soft starter Allen Bradley.



Fonte: Retirado de www.rockwellautomation.com/en-us/products.

Para inserção do controle de rotação do motor foi necessário trocar o soft starter por um inversor de frequência e realizar algumas adaptações no quadro de comando. O inversor de frequência, Figura 6, é alimentado com tensão alternada e a converte em tensão contínua para logo em seguida fornecer uma tensão alternada com frequência variável ao motor (TORO, 1999).

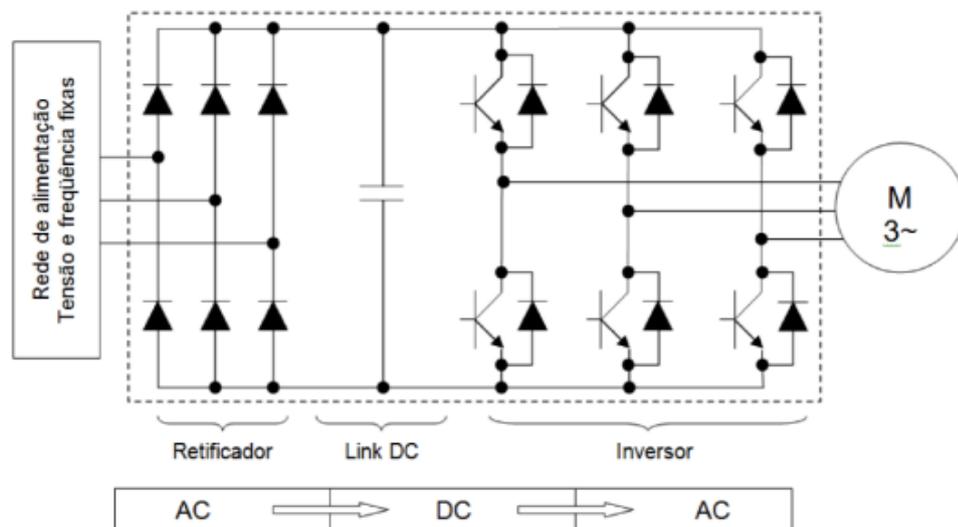
Figura 6 – Inversor de frequência utilizado para acionamento do motor.



Fonte: Retirado de ecatalog.weg.net.

Na Figura 7, observa-se circuito eletrônico básico do inversor de frequência.

Figura 7 - Diagrama do Controle de Chaveamento.

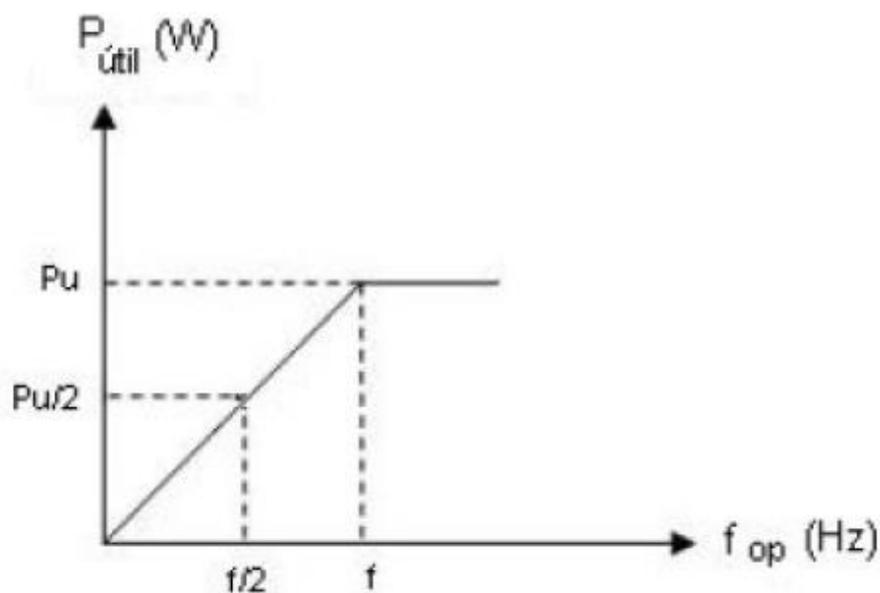


Fonte: (FRANCHI, 2014).

O inversor é alimentado por uma tensão trifásica e o retificador (que utiliza diodos de potência) a transforma em CC pulsante. O link DC (Direct Current) é o circuito intermediário do inversor no qual a tensão em corrente contínua pulsante obtida pela retificação da tensão alternada de alimentação é suavizada pelo seu capacitor. O último estágio do inversor é formado por uma ponte inversora composta por IGBT's que funcionam como chaves eletrônicas nos modos saturado (chave fechada) e cortado (chave aberta). Através do circuito de controle de acionamento dos IGBT's é possível controlar a frequência de saída, resultando na variação da rotação dos motores.

Segundo o guia técnico da Weg (Weg, motores de indução alimentados por inversores de frequência), a potência útil do motor cresce linearmente até a frequência base e permanece constante acima desta, conforme pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Potência útil do motor alimentado por inversor X frequência de operação.



Fonte: weg, motores de indução alimentados por inversores de frequência.

A velocidade síncrona de uma máquina de indução pode ser alterada diretamente a partir da variação da frequência da fonte de tensão que alimenta os enrolamentos do estator (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2005).

A variação da velocidade síncrona ou do campo girante é dada pela Equação 1 (WEG, 2006):

$$n = \frac{120 * f (1-s)}{P} \quad (1)$$

Onde,

n : velocidade de rotação mecânica (rpm);

f : frequência fundamental da tensão de alimentação (Hz);

p : número de polos;

s : escorregamento.

A relação entre a rotação, a frequência de alimentação, o número de polos e o escorregamento de um motor de indução obedece a esta equação.

Observando a Equação 1 é possível verificar que a variação da frequência influencia diretamente na velocidade rotação dos motores a indução, pois o escorregamento e o número de polos são características físicas do motor.

2.2 MALHA DE CONTROLE AUTOMÁTICO

O controle automático de processo é comumente usado em vários setores industriais. Tem por objetivo realizar de forma automática o ajuste de alguma variável ou condição de um valor.

Os tipos de controle automático mais utilizados são: malha aberta e malha fechada. O controle em malha aberta possui como principal característica a falta de realimentação, ou seja, os dados de saída não são considerados pelo controlador, assim não se conhece a diferença entre a entrada e a saída (erro). A Figura 9 exemplifica o funcionamento de uma malha aberta, em que o sinal de entrada recebido é tratado pelo bloco de controle e atua na saída. Na malha aberta, espera-se que a saída responda de acordo com o set point, porém não é possível saber se a saída se comportou de maneira esperada devido à falta de realimentação.

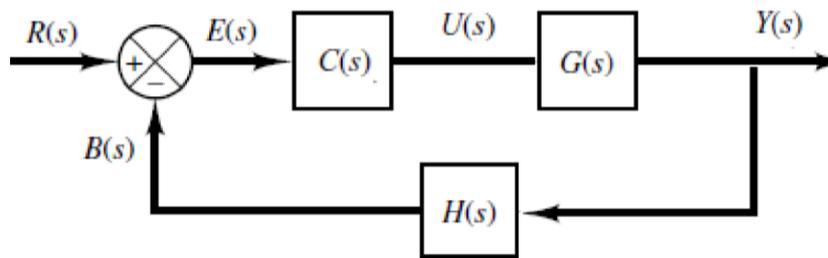
Figura 9 – Exemplo de controle de malha aberta.



Fonte: (OLIVEIRA, 1999).

Já o controle de malha fechada trabalha com o set point (valor desejado na variável de processo) estabelecido que por sua vez a malha possui a realimentação em seu processo, ou seja, há um bloco que realiza o cálculo do erro, subtraindo ao set-point com o valor da saída. Ao receber o valor do erro, o bloco do controlador tenta zerar este erro, buscando tornar a saída igual ao set point. É possível ver a representação em blocos de malha fechada na Figura 10.

Figura 10 – FT de Malha Fechada.



Fonte: Autor.

$R(s)$ é a entrada do processo, $E(s)$ o erro, o bloco $C(s)$ é representa a equação do controlador, $G(s)$ a planta do processo, $H(s)$ é a realimentação (sensor) e por fim o $Y(s)$ é a resposta de saída.

Do diagrama de blocos, foi obtida a Equação 2.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)C(s)}{1 + G(s)C(s)H(s)} \quad (2)$$

Então para obter o controle automático do processo é necessário obter a função transferência da planta, calculada a equação de malha fechada da FT e projetar o controlador.

2.2.1 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA (FT)

A troca de calor é um processo físico que possui muitas variáveis de difícil observação e verificação. Em termos práticos, o modelo matemático, de fato, representa o comportamento aproximado de algumas características dos sistemas reais.

Existem três categorias para realização do modelamento matemático de um sistema: a modelagem caixa branca; modelagem caixa preta e a modelagem caixa cinza.

- A modelagem **caixa branca**, que pode ser chamada de modelagem física, é obtida através das leis físicas e de seus princípios. Esse modelo se preocupa com as variáveis do

processo, com a relação que elas possuem e com as variáveis externas, sendo mais trabalhoso de se obter uma equação;

- Já a modelagem **caixa preta** é aquela que não necessita de conhecimento das equações do sistema. Esta formula seus modelos através da análise dos dados de entrada e saída (AGUIRRE, 2007).

- Na modelagem **caixa cinza**, segundo Aguirre (2007), é a interação dos dois modelos anteriores, o modelo se preocupa com algumas leis físicas e com as entradas e saídas do sistema.

Com a escolha do modelo a ser aplicado é possível dar início a aquisição da FT, avaliando o comportamento do processo durante variações nas suas entradas (alimentação ou carga). Várias plantas industriais são bem representadas por funções de transferência (modelos matemáticos) de primeira ou segunda ordem.

Segundo Castrucci, Bittar e Sales (2011), a função de transferência $G(s)$ é definida como o quociente da transformada de Laplace do sinal de saída, $Y(s)$, pela transformada de Laplace do seu sinal de entrada, $U(s)$, quando todas as condições iniciais são nulas. Por definição uma função de transferência no tempo contínuo pode ser representada pela Equação 3.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (3)$$

Onde:

$G(s)$ é a função transferência;

$Y(s)$ é a transformada de Laplace da resposta do processo;

$U(s)$ é a transformada de Laplace do sinal de entrada do processo.

O modelo térmico possui a característica de **primeira ordem**, sendo bem representado por essas funções de transferência (OGATA, 2003). A Equação 4 apresenta um exemplo destas funções.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (4)$$

Sendo que K é o ganho do sistema e τ é a constante de tempo responsável pela rapidez de resposta para certa entrada.

Existe um parâmetro adicional que é inserido na equação quando há um atraso de tempo de resposta na saída para uma determinada entrada, que é o tempo morto (Θ), conforme função descrita na Equação 5.

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (5)$$

O ganho estático K da função relaciona a variação de saída do sistema quando sujeito a uma variação do tipo degrau na entrada.

O tempo morto (θ) é o tempo a partir do instante em que o processo foi perturbado com um degrau, em que sua variável de saída, por exemplo a temperatura, começa a variar ou sair do regime permanente (CAMPOS E TEIXEIRA, 2010). O tempo morto também é denominado de atraso puro, atraso de transporte ou atraso distância x velocidade. Logo, a medição deste parâmetro foi adquirida de forma experimental, após a variação da variável de controle, foi medido o tempo em segundos em que a variável de processo começou a alterar.

A constante de tempo (τ), tem por definição, o tempo em que um sistema demora para atingir 63,2% o seu valor final, ou seja, a resposta estabilizada correspondente ao estímulo da aplicação do degrau, este parâmetro traz uma informação muito importante do processo: quanto maior a constante de tempo, mais lenta é a resposta da minha planta. A planta do deste trabalho tem característica de resposta lenta.

A função degrau é muito utilizado para a obtenção da função de transferência. Para isso, coloca-se a planta em malha aberta e aplica-se um degrau unitário com amplitude 1 em sua entrada. Como qualquer função multiplicada por 1 é igual a ela mesma, a curva de reposta ao degrau na saída corresponde à função de transferência procurada (OGATA, 2003).

Considere a seguinte função degrau da Equação 6:

$$f(t) = k.u(t) \Leftrightarrow F(s) = k s \quad (6)$$

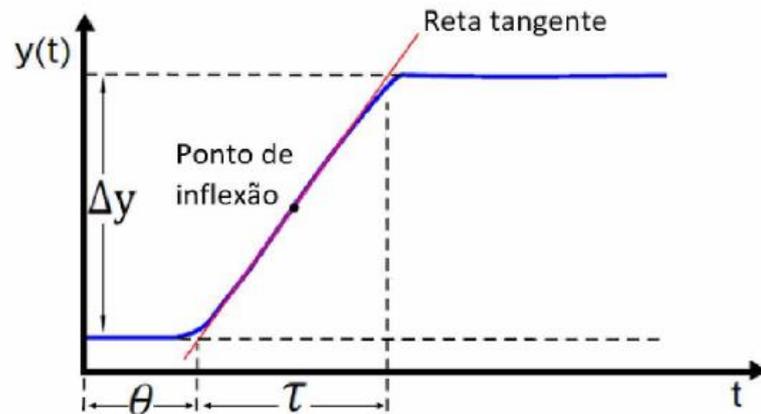
Onde:

$$u(t) = \{1, t \geq 0 \quad 0, t < 0 \quad (7)$$

Ao fazer a integração conclui-se que a transformada de Laplace é válida em todo plano 's' exceto no polo $s = 0$. Fisicamente, uma função degrau ocorrendo em $t = 0$ corresponde a um sinal constante inserido subitamente na entrada do sistema, no instante t igual a zero (OGATA, 2003).

A Figura 11 ilustra o comportamento de uma função hipotética de um processo ao se aplicar um degrau para se obter o tempo morto, a constante de tempo e o ganho do sistema, essas constantes são dadas da função transferência característica do sistema.

Figura 11 – Resposta ao degrau de uma função hipotética de um processo de primeira ordem.



Fonte: (PINTO, 2014).

2.2.2 CONTROLE PID

Para um melhor desempenho de um sistema de malha fechada é aplicado o algoritmo proporcional, integral e derivativo conhecido como PID. O algoritmo faz a leitura do erro e gera um sinal de controle a fim de eliminar os desvios na variável manipulada. Os termos do PID podem ser usados separadamente ou em conjunto e podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 - Descrição do controle PID.

P	Correção proporcional ao erro	A correção a ser aplicada ao processo deve crescer na proporção que cresce o erro entre o valor real e o desejado
I	Correção proporcional ao produto erro x tempo	Erros pequenos, mas que existem há muito tempo requerem correção mais intensa
D	Correção proporcional à taxa de variação do erro	Se o erro está variando muito rápido, esta taxa de variação deve ser reduzida para evitar oscilações.

Fonte: (NOVUS, 2003).

O controlador proporcional (P) calcula uma ação de controle proporcional ao erro, porém pode não ter a capacidade de eliminá-lo completamente. O controlador integral (I) tem

a função de eliminar o erro deixado pela ação proporcional, podendo resultar na redução da estabilidade na ação de controle. Por fim, o controlador derivativo (D) é a ação de controle adicionada para introduzir estabilidade dinâmica no controle, capaz de antecipar o comportamento do processo.

De acordo com Astrom e Hagglun (1995), a Equação 8 é utilizada como objeto de estudo para obtenção do parâmetro de saída do controle PID.

$$u(t) = kp \left(e(t) + \frac{1}{Ti} \int_0^t e(t) dt + Td \frac{de}{dt} \right) \quad (8)$$

Em que, $u(t)$ é a variável controlada, $e(t)$ (erro) é a diferença entre o set point e a saída real ao longo do tempo, Kp é o ganho proporcional, $\frac{1}{Ti} = Ki$ é o ganho integral e $Td = Kd$ é o ganho derivativo.

Na Tabela 3, resume o efeito gerado por cada constante encontrada, o que auxilia o projetista na regulagem manual para alcançar um desempenho mais satisfatório.

Tabela 3 - Efeito de cada parâmetro PID sobre o processo.

Constantes	Ao aumentar, o processo...	Ao diminuir, o processo...
Kp	Torna-se mais lento. Geralmente se torna mais estável ou menos oscilante. Tem menos overshoot	Torna-se mais rápido. Fica mais instável ou mais oscilante. Tem mais overshoot.
Ki	Torna-se mais rápido, atingindo rapidamente o set point. Fica mais instável ou mais oscilante. Tem mais overshoot	Torna-se mais lento, demorando para atingir o set point. Fica mais estável ou mais oscilante. Tem menos overshoot.
Kd	Torna-se mais lento. Tem menos overshoot.	Torna-se mais rápido. Tem mais overshoot.

Fonte: (NOVUS, 2003).

Há diversos critérios de desempenho que podem ser usados para a sintonia de controladores do tipo PID, dentre eles pode-se destacar o menor sobressinal ou overshoot e o menor tempo de assentamento ou settling time (BEGA, 2011).

- **Sobre-sinal máximo percentual** (“overshoot”) é a diferença entre o valor máximo de pico atingido e o valor final em percentual;

- **Tempo de acomodação** é tempo necessário para que as oscilações amortecidas do regime transitório entrem e permaneçam no interior de uma faixa de valores de $\pm 2\%$ em torno do valor de estado estacionário.

Uma vez que o controlador altera o sistema dinâmico da planta, o critério de desempenho é definido através do tratamento desses parâmetros.

As raízes da equação característica da FT do processo são polos de malha fechada e a representação gráfica dessas raízes é determinada pelo método do lugar das raízes para todos os valores de um parâmetro do sistema.

Logo, a função transferência é dada pela Equação 9.

$$Gp(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (9)$$

Os polos da função de transferência são as raízes do denominador e os zeros são as raízes do numerador da fração. Eles são analisados para determinar a estabilidade do sistema.

O método do lugar das raízes é eficiente no projeto de um sistema de controle linear, pois indica o modo pelo qual os polos e zeros de malha aberta devem ser modificados para que a resposta satisfaça às especificações de desempenho do sistema (OGATA, 2010).

A estabilidade da planta depende dos polos, se pelo menos um polo se encontrar na parte real positiva, ela se tornará instável. Mesmo com polo próximo de zero, a planta do processo é estável e sua função de transferência é aproximada de uma FT de um sistema de primeira ordem.

Logo, o método do lugar das raízes é utilizado para verificar se o ganho da planta necessita de um compensador e, havendo necessidade, os ganhos dos controladores são alterados de maneira a atender os parâmetros de estabilidade desejados para o sistema.

Após a análise das raízes no gráfico, foram utilizados dois métodos de sintonia dos controladores a fim de verificar qual apresentará a melhor resposta para o processo. São eles:

- Método de Ziegler & Nichols;
- Método CHR (Chien, Hrones e Reswick).

Segundo Jan Erick, os autores do modelo, J. G. Ziegler e N. B Nichols, baseados em testes práticos manuais, desenvolveram regras empíricas para ajustar o controlador. (PINTO, 2014).

O método Ziegler-Nichols foi o primeiro método de sintonia a ser publicado. Pela sua simplicidade, fácil implementação e bons resultados, foi consolidado nas aplicações de controle. A Tabela 4 apresenta os cálculos dos parâmetros P, PI e PID.

Tabela 4 – Parâmetros do método Ziegler e Nichols.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{\tau}{k \theta}$	-	-
PI	$\frac{0,9}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	$3,33 * \theta$	-
PID	$\frac{1,2}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	$2 * \theta$	$0,5 * \theta$

Fonte: Ziegler e Nichols (1942).

O método CHR propõe regras para o ajuste diferente para problemas na mudança dos sets points e para perturbações externas com o set point constante (tipo regulador). Um dos critérios de desempenho é “a resposta mais rápida possível sem overshoot”, em que se obtém o menor ganho proporcional para o controlador, que é um dos melhores critérios de desempenho para a maioria das malhas de controle. A vantagem de se escolher um ganho mais baixo é que o sistema é mais robusto, ou seja, está mais longe da instabilidade, por ter uma margem de ganho maior (CAMPOS e TEIXEIRA, 2010).

2.3 ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMAS PELO MÉTODO DO LUGAR DAS RAÍZES

Análise e projeto dos sistemas estão relacionados diretamente com a localização dos polos de malha fechada e, como o nome do método sugere, os polos de malha fechada são obtidos através das raízes da equação característica.

Este método permite que as raízes da equação sejam representadas graficamente para todos os valores de um parâmetro do sistema. Então, o projetista pode prever quais os efeitos da variação do valor do ganho ou da adição de polos de malha aberta e/ou zeros de malha aberta sobre a localização dos polos de malha fechada (OGATA,2010).

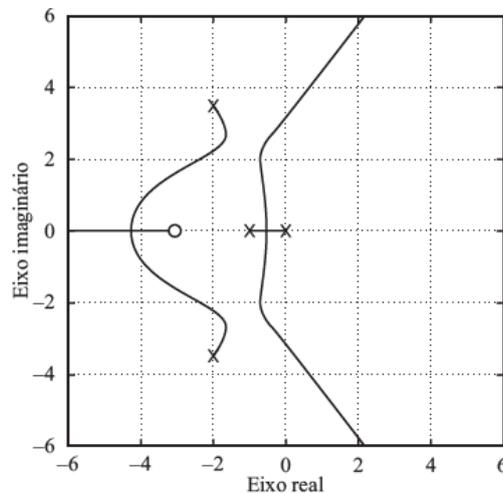
O gráfico pode ser traçado manualmente ou com auxílio computacional. O MATLAB®, por exemplo, fornece seus próprios valores de ganho utilizado no cálculo para traçar o gráfico através de uma rotina interna de passo variável (OGATA, 2010).

Para melhor entendimento temos por exemplo a seguinte função transferência, determinada pela Equação 10. Sendo o denominador equação característica:

$$G(s) = \frac{K(s+3)}{s(s+1)(s^2 + 4s + 16)} \quad (10)$$

Com o comando no MATLAB® `rlocus(num,dem)` é obtido o gráfico do zeros e polos da função transferência em malha aberta. É possível analisar através do gráfico a direção dos zeros e polos, se houver uma variação do ganho da função. Na Figura 12, são observados os pontos em que os zeros e polos estão localizados e sua rota de direção. Foi utilizado uma equação para exemplificação.

Figura 12 - Lugar das raízes da função transferência $K(s+3)/[s(s+1)(s^2+4s+16)]$.



Fonte: (OGATA, 2010).

Nota-se que a figura ilustra os polos com “X” e os zeros com “o” que resultou em:

Zero de malha aberta: $s = -3$

Polos de malha aberta: $s = 0, s = -1, s = -2 \pm j3,4641$

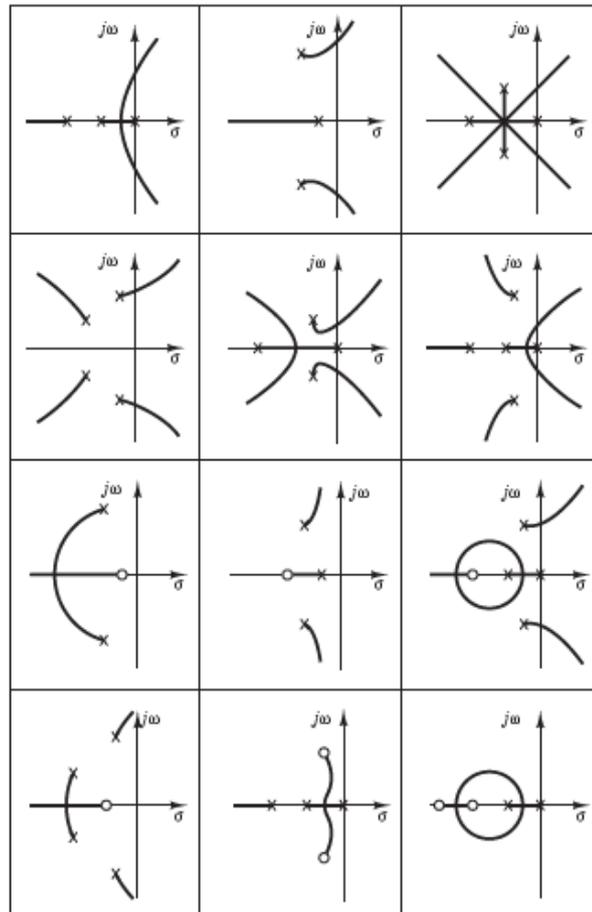
Com esses dados e o gráfico do lugar das raízes é possível avaliar a estabilidade da função e realizar seus devidos tratamentos para buscar melhorá-lo.

2.3.1 ESTABILIDADE

Com o método do lugar das raízes é possível também verificar a estabilidade do sistema. Se o número de polos exceder os números de zeros finitos em três ou mais unidades, haverá um valor do ganho K além do qual o lugar das raízes entrará no lado direito do plano s e, assim, o sistema se tornará instável (OGATA, 2010). Logo, para que o sistema seja estável, todos os polos de malha fechada devem estar situados no lado esquerdo do plano s .

Verifica-se que na Figura 13 apresenta algumas configurações de localização de polos e zeros de diversas funções de transferência. Veja que nos exemplos com 3 ou mais polos que excedem os zeros, dependendo do ganho da função transferência, o sistema se torna instável.

Figura 13 - Configurações de polos e zeros de malha aberta e os lugares das raízes correspondentes.



Fonte: (OGATA, 2010).

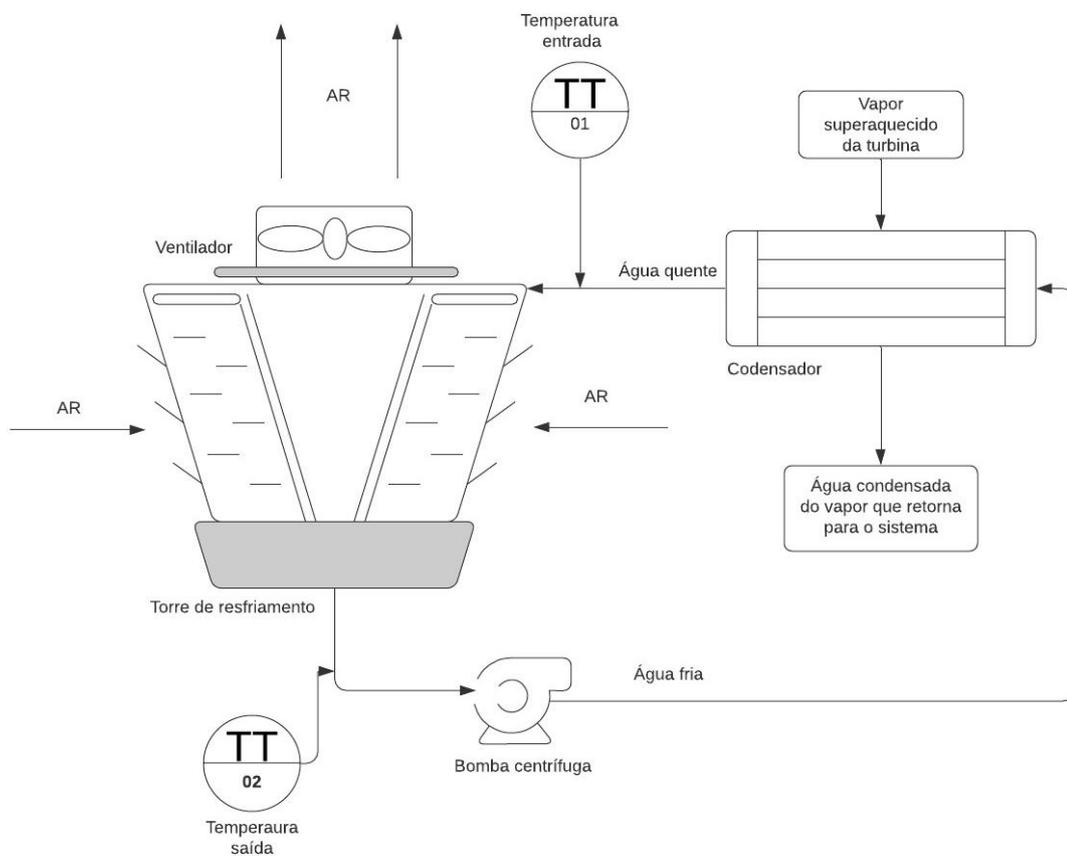
Conclui-se que o gráfico do lugar das raízes é uma importante ferramenta para avaliação da estabilidade do sistema, tornando fácil e rápida a detecção.

3. SISTEMA SOB ANÁLISE

3.1 DIAGRAMA P&I DA TORRE DE RESFRIAMENTO COM CONDENSADOR

O diagrama P&ID (Process and Instrumentation Diagram) auxilia na visualização e entendimento do sistema, na Figura 14 é possível visualizar o esquema do processo em estudo.

Figura 14 – Diagrama P&ID do conjunto torre de resfriamento – condensador.



Fonte: Autor.

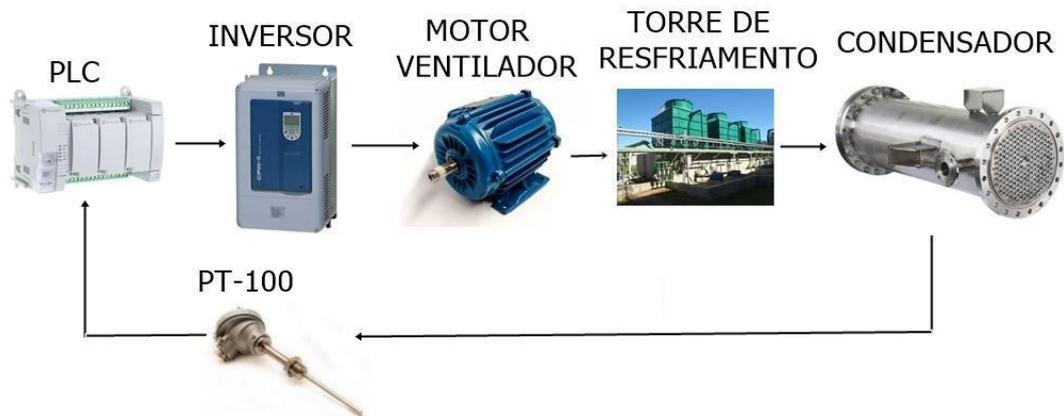
O funcionamento do sistema é bem simples: o vapor superaquecido é canalizado até o condensador para que seja condensado. A água advinda da torre de resfriamento troca calor com as paredes externas dos tubos do condensador com o objetivo de resfriar o fluido interno e alterar o estado físico de gasoso para líquido. Na saída do condensador, a água está a uma temperatura mais alta e retorna para a torre de resfriamento em direção aos aspersores instalados na parte superior da torre. O ar é insuflado da atmosfera pelos ventiladores, entra em contato

com as gotículas de água dos aspersores, realizando a troca de calor por convecção e sendo depositada no reservatório de enchimento. Desta maneira a água está pronta para reutilização. A torre de resfriamento possui um PT100 (sensor de temperatura) na água de entrada e um na saída da água, ambos estão conectados ao CLP central. A bomba d'água possui um motor para realizar o deslocamento da água da torre até o condensador, operando sob regime contínuo, com rotação máxima. O ventilador está funcionando sob regime também.

A proposta é que a alimentação do motor do ventilador seja dada pelo inversor de frequência que recebe o sinal de controle do CLP, modula a frequência de saída a fim de alterar o valor da rotação do motor e altera o valor de temperatura da água de retorno devido à variação da troca térmica que é o objetivo da malha de controle.

A Figura 15 representa o sistema de malha fechada de resfriamento do processo estudado.

Figura 15 – Malha de controle de rotação dos ventiladores da torre de resfriamento.



Fonte: Autor.

3.2 DISTÚRBIO

Existem várias perturbações no sistema, como por exemplo a variação vazão de vapor de água que passa pelo feixe de serpentinas do trocador de calor. Este vapor entra em alta pressão e alta temperatura na entrada da turbina, após sair da turbina ela é direcionada para o condensador ainda com pressão e temperatura considerável o que torna a variação da vazão deste vapor um distúrbio no sistema de troca de calor do ondensador. É possível mensurar somente está perturbação, pois ela é conhecida. Os seus valores são monitorados online via supervisório e podem também ser encontrados nos relatórios de produção no banco de dados termoelétrica.

É importante saber que o vapor da caldeira possui um comportamento dinâmico. Quanto mais GAF sendo introduzido na caldeira, maior deverá ser a produção de vapor. Então, para encontrar a função transferência da perturbação foi considerada apenas essa dinâmica.

Outro ponto a observar é o limite máximo de vazão para o qual a termoeletrica foi projetada. Neste trabalho será considerada essa recomendação e o valor de vazão máxima é de $44\text{m}^3/\text{h}$.

Considerando que, segundo Aguirre (2007), o modelo desenvolvido para um determinado processo é apenas uma aproximação de algumas características do sistema real, logo para uma maior confiabilidade é sugerido que considere os distúrbios que causam grandes interferências na resposta do processo.

4. MODELAGEM DO SISTEMA

Foi utilizado o método caixa preta para a aquisição do modelo matemático da planta, pela sua facilidade de aplicação e pelo uso difundido entre os profissionais da área. Tal método requer a verificação dos sinais de entrada capazes de excitar o sistema e que satisfaçam uma série de propriedades a fim de garantir dados condizentes. Outro ponto importante é o conhecimento prévio do sistema combinado à sensibilidade do projetista para se determinar a melhor estratégia a ser adotada na aquisição da função.

Para o estudo em questão aplicou-se um degrau na entrada, ou seja, alterou-se o valor da rotação do ventilador. Foi registrada a variação da temperatura da água de saída da torre de resfriamento e, a partir destes dados, foi possível obter o ganho, a constante de tempo e tempo morto, resultando em uma função de resposta ao degrau de 1º ordem. Foram aplicados vários degraus no sistema da planta, a fim de se obter uma função transferência de cada uma e analisar o efeito causado.

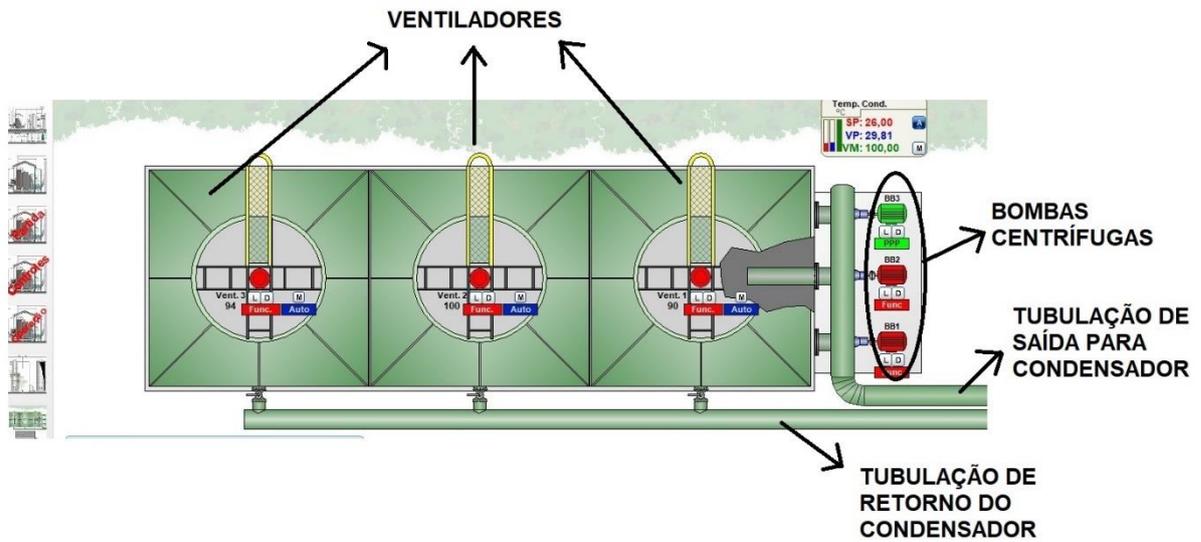
A função de transferência do distúrbio também foi obtida com o mesmo método, porém com apenas um degrau devido este teste impactar diretamente na geração de energia elétrica da empresa.

4.1 PLANTA

Para realizar a coleta de dados do processo, foi utilizada a resposta ao degrau que identifica o sistema. Devido à planta estar em operação houve restrições na aplicação do degrau. Duas vezes ao dia é possível realizar essas operações com um pouco menos de limitação, pois nesses horários realiza-se a limpeza da fuligem (espécie de poeira do GAF) no interior da caldeira e é reduzida a geração de energia da termelétrica.

Para realizar a aplicação do degrau no sistema em estudo, inicialmente os ventiladores da torre de resfriamento estavam com 90% da rotação, pois existe um problema interno na termoelétrica em que quando a rotação do motor atinge 100% de rotação a proteção de sobrecarga atua, então não possível iniciar os testes em condições normais de rotação. Através da tela da torre de resfriamento no supervisório, Figura 16, é possível observar a disposição dos elementos da planta.

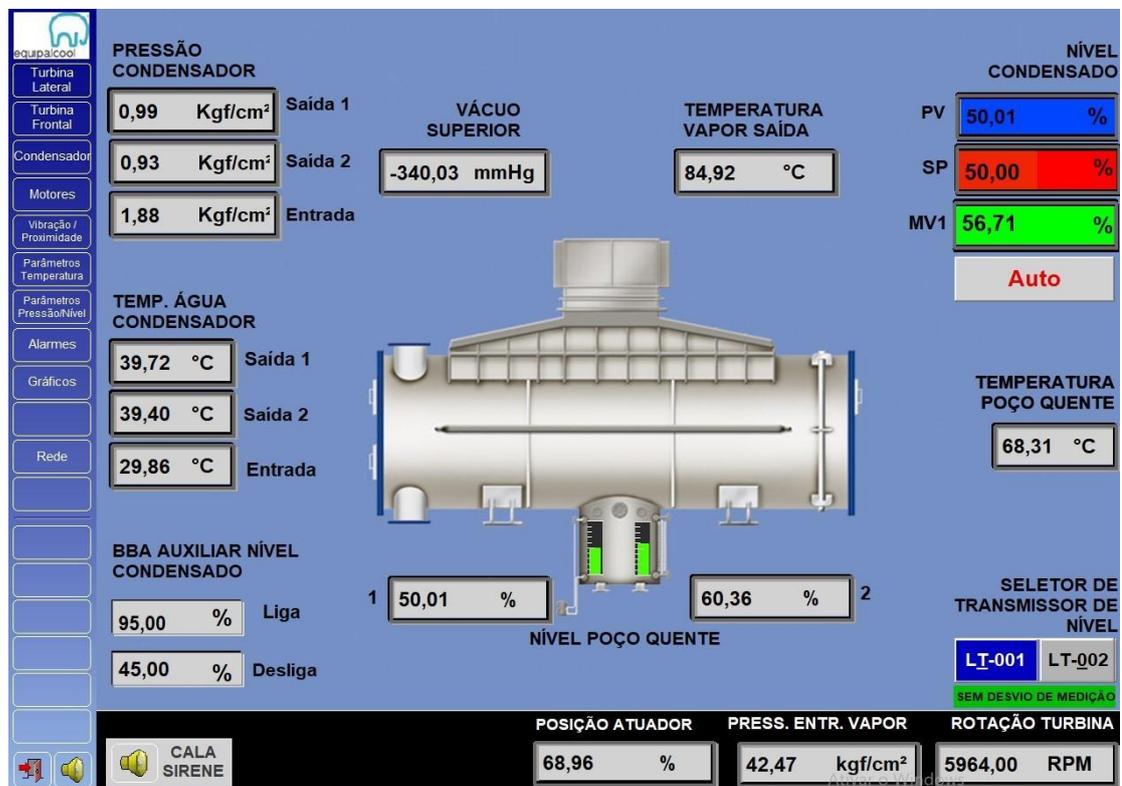
Figura 16 - Tela da vista superior da torre de resfriamento no supervisório.



Fonte: Supervisório da termelétrica da Metalsider.

Na Figura 17, pode-se observar a tela do condensador da termelétrica, componente que faz parte do sistema.

Figura 17 - Tela do condensador no supervisório.



Fonte: Supervisório da termelétrica da Metalsider.

Após a temperatura de saída da água da torre estabilizar, foi dado o degrau na rotação dos ventiladores e observado o comportamento da temperatura. Os dados foram salvos no relatório do supervisor da termoeletrica e anotados em uma planilha no Excel para manipulação no MATLAB®.

Preocupou-se em aplicar vários degraus para uma melhor análise. Como resultado, chegou-se a quatro a funções, dois realizando o degrau de descida da rotação e os outros dois o degrau de subida.

- **Função G1:** obtido com variação da rotação dos ventiladores de 90% para 80%;
- **Função G2:** obtido com variação da rotação dos ventiladores de 90% para 70%;
- **Função G3:** obtido com variação da rotação dos ventiladores de 70% para 80%;
- **Função G4:** obtido com variação da rotação dos ventiladores de 70% para 90%;

Os parâmetros obtidos para as funções são mostrados na Tabela 5.

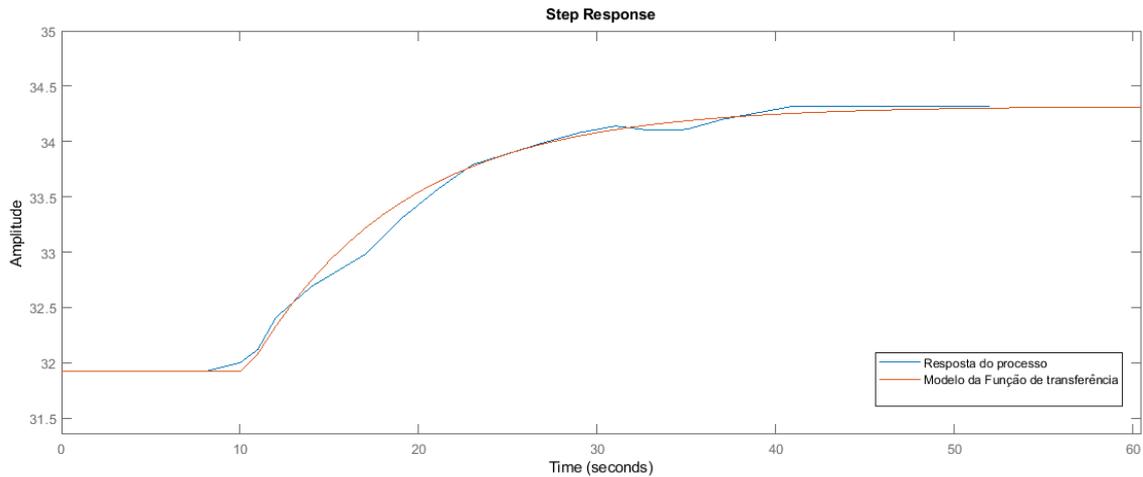
Tabela 5 - Tabela de parâmetros dos Funções obtidos com variação da Rotação do ventilador.

Funções	Parâmetros		
	K	τ	θ
Função G1	$-190,7 e^{-3}$	10,5	-7.4
Função G2	$-8,735 e^{-5}$	8.5	-3,4
Função G3	$131 e^{-3}$	5	-1.6
Função G4	$9.463 e^{-5}$	8	-2.6

Essas constantes foram obtidas para diferentes tipos de operação

A aquisição das constantes foi feita da seguinte forma: foi criado no editor do MATLAB® a programação do modelo da função de transferência através dos dados obtidos em cada uma das funções e através do modelo obtido foi comparado com o gráfico da FT da planta. Foram feitos ajustes na constante de tempo morto no modelo obtido para garantir um menor erro em relação aos dados da planta. Na figura 18 pode ser observado o resultado dos gráficos referentes aos testes realizado para a função G2.

Figura 18 – Gráficos dos testes x modelo para a função G2.



Fonte: Autor

Na figura 19 apresenta a janela de resposta da pelo MATLAB® e é verificado a função de transferência do modelo.

Figura 19 – Função de transferência referente a função G2.

```
Command Window

sys =

          -8.735e-05
exp(-3.4*s) * -----
              8.5 s + 1

Continuous-time transfer function.
```

Fonte: Autor.

Para validar o modelo, foi simulado o comportamento do sistema para sua transferência de calor máxima, veja na Figura 20. Foi inserido na simulação uma temperatura inicial de 38°C e os ventiladores em rotação máxima.

De acordo com o manual do equipamento, a torre tem capacidade máxima para resfriamento de 10°C, o modelo obteve uma variação de aproximadamente 10.35°C. O modelo da planta encontrado, possui boas aproximações.

Figura 20 - Resultado da temperatura de saída da torre de resfriamento com transferência máxima de calor.



Fonte: Autor.

4.2 DISTÚRPIO

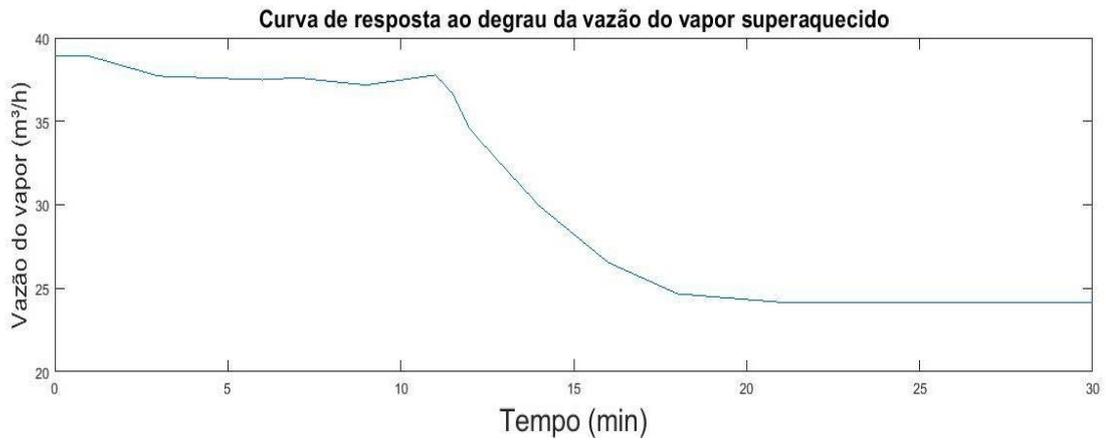
Para tratamento do distúrbio, houve a necessidade de encontrar a sua função de transferência devido ao seu comportamento dinâmico e para isso, utilizou-se o mesmo método do capítulo anterior.

Foi aplicado um degrau na vazão do vapor água com a intenção de observar o comportamento da saída (temperatura da água de entrada no condensador), com esse procedimento foi obtida a curva de reação do distúrbio.

Para o gerenciamento dos dados da curva de reação as informações foram salvas no relatório do supervisório da termoelétrica e anotadas em uma planilha do Excel para manipulação via MATLAB®. Porém foi obtida apenas uma função.

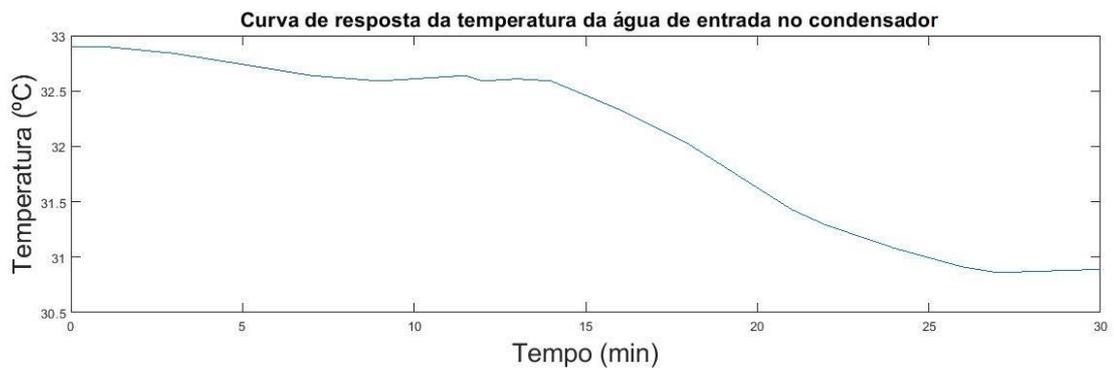
O degrau foi aplicado no horário em que a planta realiza um procedimento de limpeza interna da caldeira, em que a geração de energia é reduzida e com isso é possível realizar os testes, porém existe um problema: o degrau aplicado não pode ser muito grande. Então aplicou-se pequenos degraus em curto espaço de tempo para alcançar o resultado desejado. O degrau aplicado na vazão do vapor foi de 37,61 m³/h para 32,21 m³/h em 3,5 minutos e depois até 24 m³/h, totalizando 10 minutos, com esses procedimentos foi possível observar que o gráfico de resposta da temperatura de entrada do condensador da Figura 22 obedeceu a curva do degrau Figura 21.

Figura 21 - Curva de reação do distúrbio após o degrau na vazão de vapor superaquecido.



Fonte: autor.

Figura 22 - Curva de temperatura da água de entrada no condensador com degrau na vazão do vapor de água.



Fonte: autor.

Os parâmetros obtidos para a FT do distúrbio são os seguintes:

$$K = -0,1551;$$

$$\tau = 7;$$

$$\theta = 2,4;$$

Logo tem-se a equação 11 como a função de transferência do distúrbio:

$$D(s) = \frac{-0.1551e^{-2.4s}}{7s+1} \quad (11)$$

5 CONTROLADOR

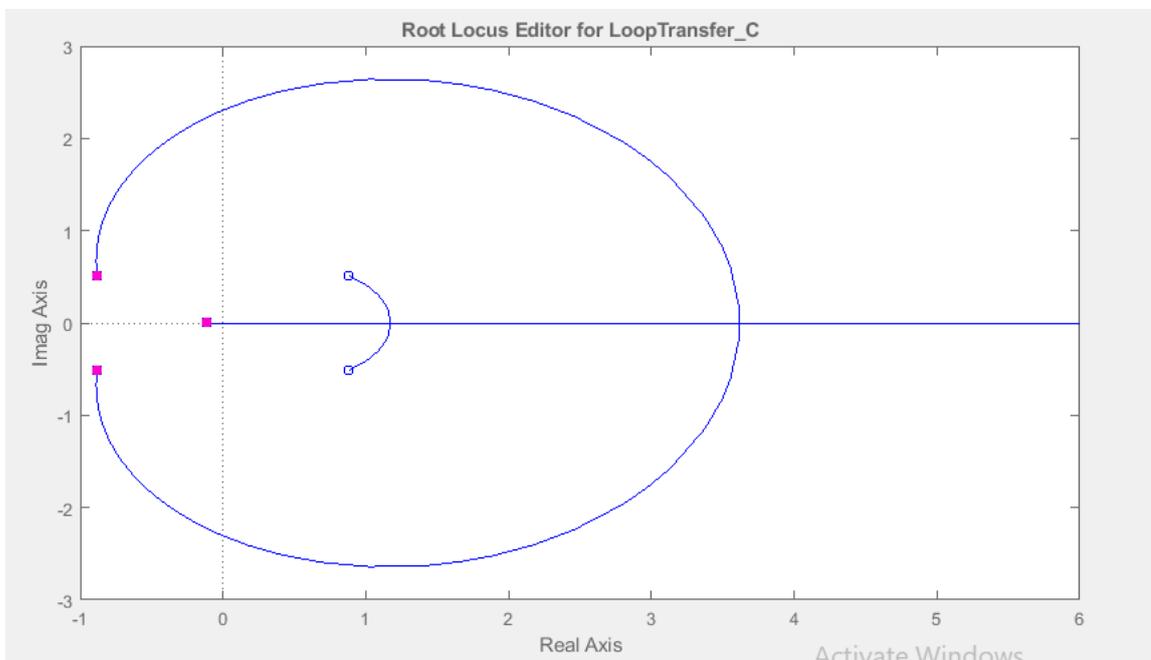
Como a maioria dos controladores são ajustados em campo, várias regras de sintonia vêm sendo estudadas. Com a utilização dessas regras, é possível fazer os ajustes destes controladores em campo com mais facilidade. Para a área de controle de processos, o controle PID são preferidos por razões óbvias: são mais fáceis de entender, explicar e implementar, demandam um menor esforço computacional, possuem boa confiabilidade e estão amplamente difundidos no meio industrial (FACCIN, 2004).

5.1 PROJETO DO CONTROLADOR

Com auxílio da ferramenta computacional do MATLAB®, o Control System Designer, foi obtido o lugar das raízes das 4 funções apresentadas.

Nota-se que, no lugar das raízes obtido na Figura 23, a FT do processo tem um polo e o seu LGR tem três polos e dois zeros.

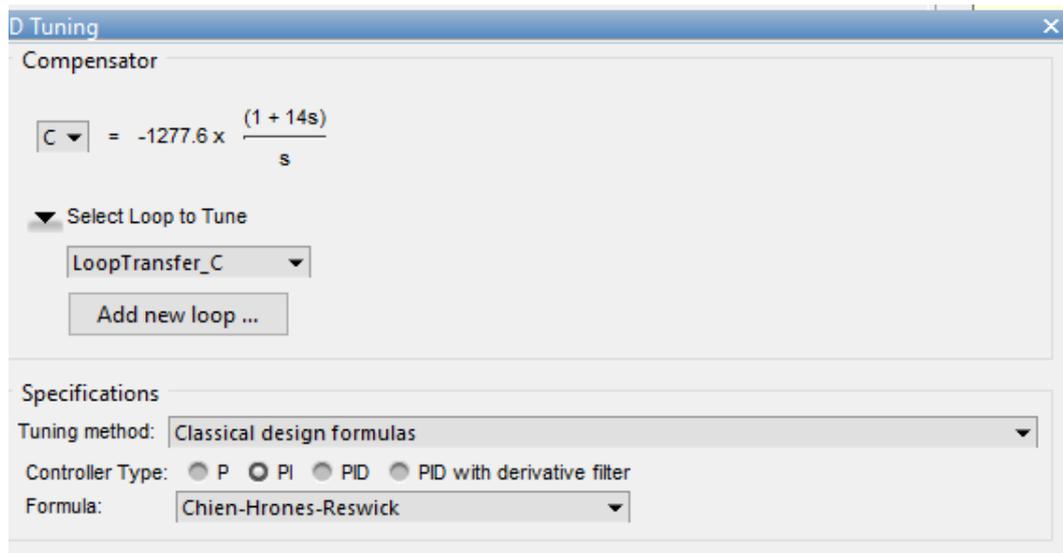
Figura 23 - Lugar das raízes do sistema para a função G2.



Fonte: Autor.

Com a ferramenta PID tuning no Control System Designer é possível especificar os controladores de forma simples: o programador escolhe a opção de qual método utilizar para aquisição do controlador e o software responde com o gráfico. É verificada a janela de configuração na Figura 24.

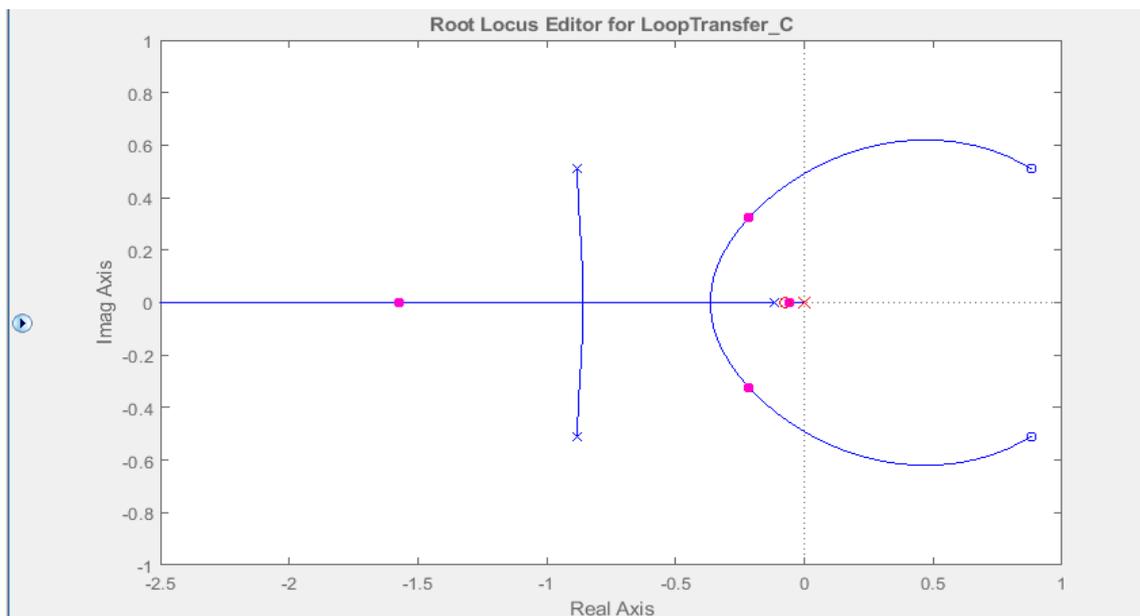
Figura 24 - Função transferência do controlador.



Fonte: Autor.

A Figura 25 é uma representação gráfica do lugar das raízes após a compensação que utilizou o método CHR.

Figura 25 - Lugar das raízes com compensador pelo método CHR.



Fonte: Autor.

Note que com a compensação pelo método CHR foi inserido ao lugar das raízes dois zeros devido a aproximação de Padé.

Com a obtenção do controlador, é possível obter os ganhos K_p , K_i e K_d . Em razão da planta em estudo ter características de resposta lenta e o ganho derivativo possuir a finalidade de compensar as variações rápidas do sistema, foram usados apenas os ganhos K_p e K_i .

Para cada função obtida, buscou-se obter a sintonia do controlador com os métodos citados na seção 2.2.2. No Control System Designer, em PID Tuning, foi obtida a compensação do sistema e disponibilizada a função transferência do controlador. Com o comando $\text{pid}(C)$, foram obtidos os ganhos K_p e K_i e apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Ganhos pelo método CHR e Ziegler & Nichols para todas as funções.

Função	Métodos			
	CHR		Z & N	
	K_p	K_i	K_p	K_i
Função G1	-88,18	-148	-122,52	-315
Função G2	-95	-25,71	-114,65	-44,19
Função G3	78,08	44,79	92,81	74,32
Função G4	65,52	23,30	85,17	44,19

Fonte: Autor.

Sendo assim, a estratégia utilizada para se definir qual controlador utilizar no sistema foi a seguinte: testar todas as sintonias em todas as 4 funções obtidas e verificar qual sintonia obteve os menores sobressinais e tempos de assentamento. Definiu-se cada sintonia da seguinte maneira:

- Sintonia 1 – Ganhos obtidos por CHR com modelo 1;
- Sintonia 2 – Ganhos obtidos por CHR com modelo 2;
- Sintonia 3 – Ganhos obtidos por CHR com modelo 3;
- Sintonia 4 – Ganhos obtidos por CHR com modelo 4;
- Sintonia 5 – Ganhos obtidos por Z & N com modelo 1;
- Sintonia 6 – Ganhos obtidos por Z & N com modelo 2;
- Sintonia 7 – Ganhos obtidos por Z & N com modelo 3;
- Sintonia 8 – Ganhos obtidos por Z & N com modelo 4;

Após adquirir os ganhos dos dois métodos para todas as funções, foi aplicado um degrau considerando cada controlador em cada uma das 4 funções. Foram definidos os desempenhos de cada um e a Tabela 7 apresentam o tempo de assentamento (T_s) e o percentual de overshoot (MO).

Tabela 7 – Resultados dos overshoot e tempos de assentamento para todas as funções.

Sintonias	Função 1		Função 2		Função 3		Função 4	
	MO	T_s (s)						
Sintonia 1	0%	196	0%	359	0%	270	0%	345
Sintonia 2	0%	24	0%	46,3	0%	44,3	0%	50,2
Sintonia 3	0%	24	17%	26,1	3%	15,1	1%	15,5
Sintonia 4	0%	17,5	0%	37,5	0%	39,4	0%	44
Sintonia 5	0%	93,3	0%	168	0%	133	0%	167
Sintonia 6	0%	8,92	19%	25,1	19%	24,8	0%	23,8
Sintonia 7	0%	18,9	47%	43	25%	12	6%	25
Sintonia 8	33%	55,2	52%	119	32%	46	19%	50

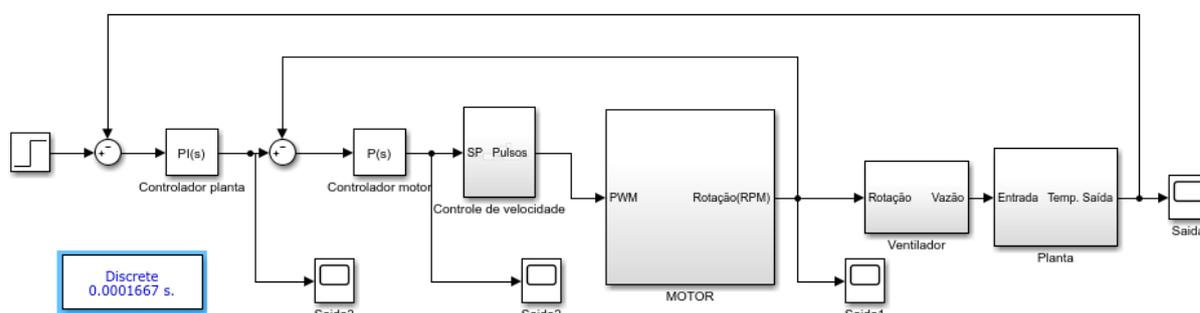
Fonte: Autor.

Observa-se que a Sintonia 6, do controlador obtido por Z&N com a função G1, é a que apresentou menor overshoot e tempo de assentamento. É possível que seja o melhor controlador para o processo. Isto é verificado nos testes na planta.

6 RESULTADOS

Para simular a vazão de ar do ventilador, foi acoplado à FT da planta a um conjunto motor + inversor. Não foi considerada a dinâmica do motor, pois sua resposta é muito mais rápida que a da planta. Na Figura 26 é possível ver o diagrama de blocos utilizado para simulação.

Figura 26 - Diagrama de blocos da torre de resfriamento.



Fonte: Autor.

O controlador escolhido foi o obtido com o método de sintonia 6 do Z&N com a função de transferência $G1$ que apresentou os ganhos $K_p = -114,65$ e $K_i = -44,19$. Este controlador apresentou melhores índices de desempenho quanto ao critério de tempo de assentamento e sobressinal, conforme observado na Tabela 6.

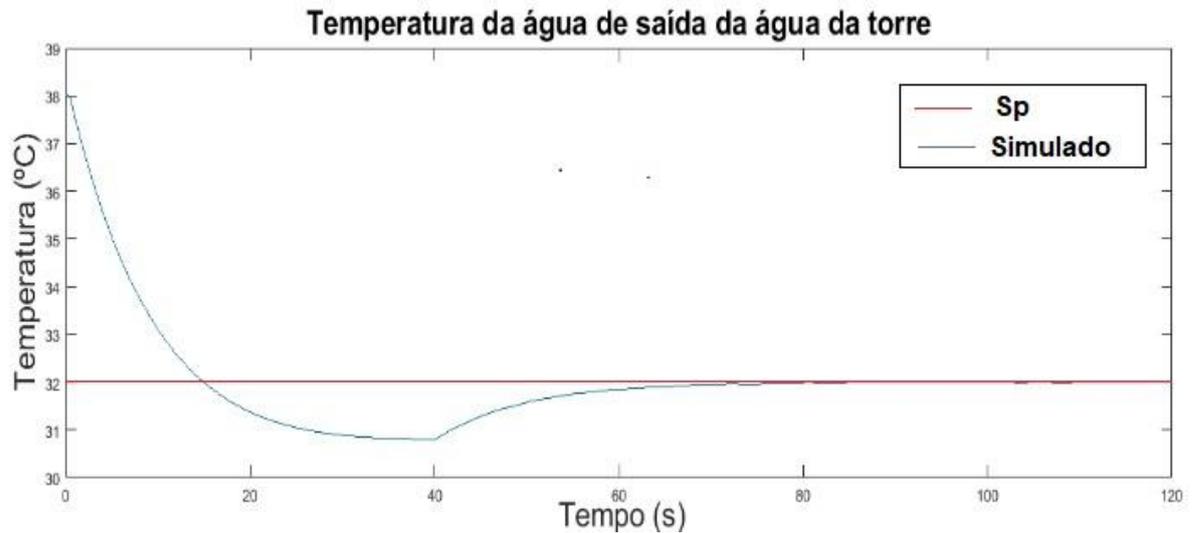
Para realizar a validação do controlador e função de transferência da planta escolhido, foi desenvolvido na plataforma do *simulink* do MATLAB®, o modelo simulado do processo e realizado 4 testes para diferentes situações. Para todos os resultados o modelo simulado está em malha fechada.

1º teste:

Neste teste, foi colocada a temperatura inicial a 38°C com uma vazão de $22\text{m}^3/\text{h}$ (vazão de vapor superaquecido) e o SP de 32°C , que é normalmente a temperatura de trabalho utilizada no condensador da termoelétrica. O modelo consegue alcançar a temperatura de trabalho definida, ficando abaixo do SP, atingindo em torno de 31°C , e por volta 40s ela sobe até estabilizar no set point. Isso ocorreu possivelmente pelo fato de que a resposta de temperatura é muito lenta e o resfriamento da água também, logo, o controlador ao perceber que a saída já

havia atingido o set point, diminuiu a rotação do motor para a temperatura aumentar, fazendo com que a resposta atingisse o set point. O resultado deste teste é apresentado na Figura 27.

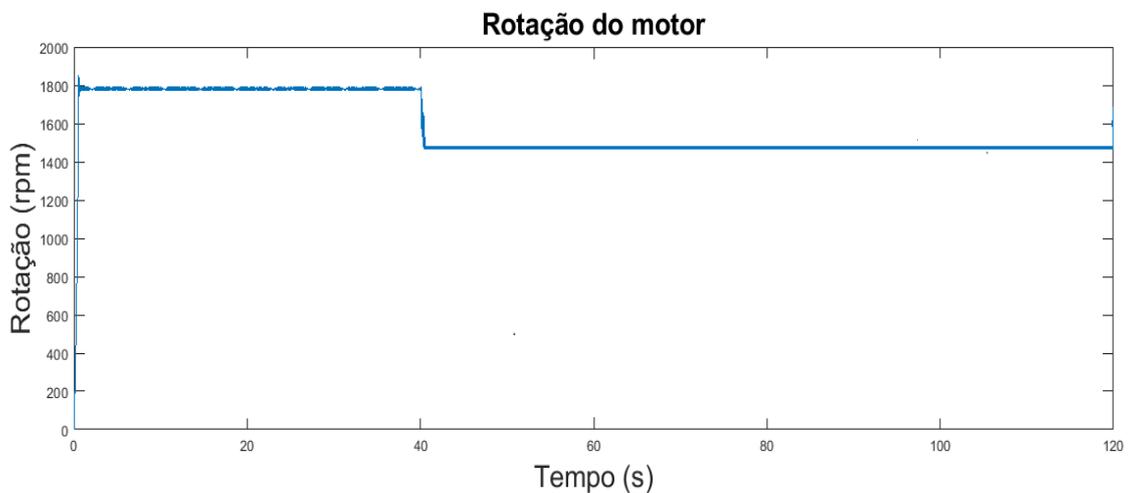
Figura 27 - Resultado da temperatura com controlador para o teste 1.



Fonte: Autor.

O comportamento da rotação do motor é visto na Figura 28. A rotação do motor diminui, gerando um consumo menor de energia elétrica, menor evaporação da água da torre e menores desgastes nos componentes eletromecânicos dos ventiladores.

Figura 28 - Curva da rotação do motor para o teste 1.



Fonte: Autor.

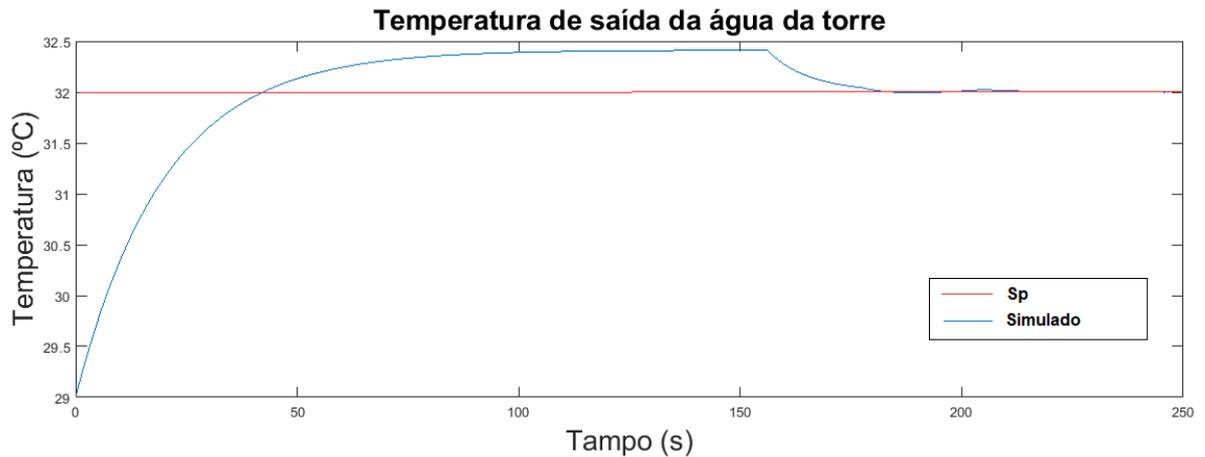
O motor trabalha com a rotação de 1500 rpm após a planta entrar em regime permanente e conseqüentemente atinge um dos objetivos da inserção da malha de controle, a diminuição de consumo de energia elétrica.

2º teste:

Neste segundo teste foi inserido no modelo a temperatura inicial a 29º e foi aplicado um set point de temperatura de 32ºC.

A perturbação é a variável que aquece a água, então foi simulado uma vazão de 22m³/h para esse teste. Na Figura 29 observa-se a resposta para esse teste.

Figura 29 - Resultado da temperatura com controlador para o teste 2.



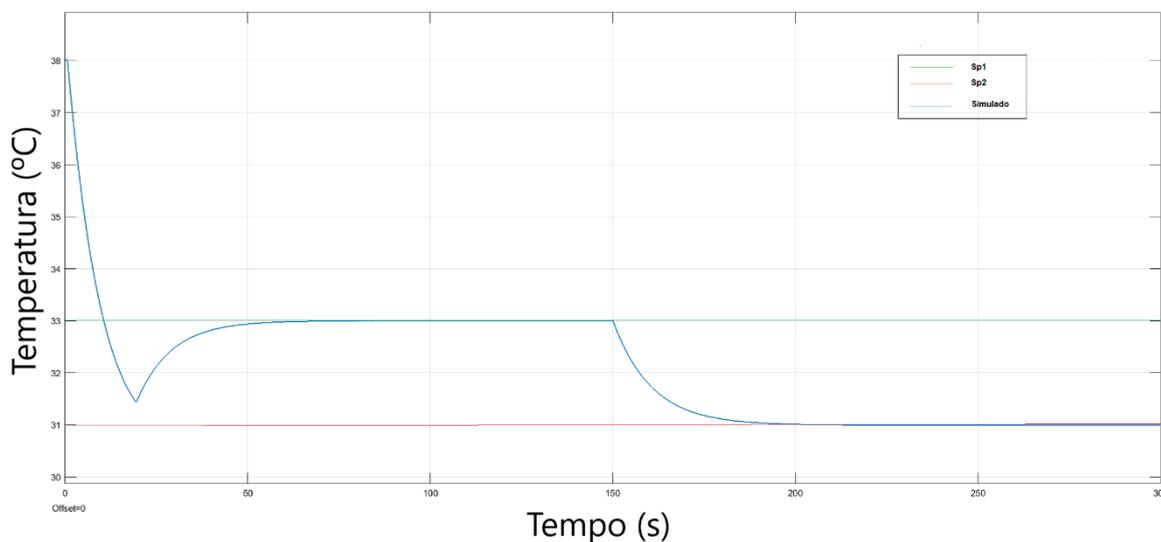
Fonte: Autor.

3º teste:

No terceiro teste, visto na Figura 30, a temperatura inicial foi 38ºC e o primeiro set point com 33ºC, no tempo 150s o set point foi alterado para 31ºC a fim de avaliar a resposta do sistema.

Figura 30 - Resultado da temperatura para aplicação de dois sets points.

Temperatura da água de saída da torre de resfriamento

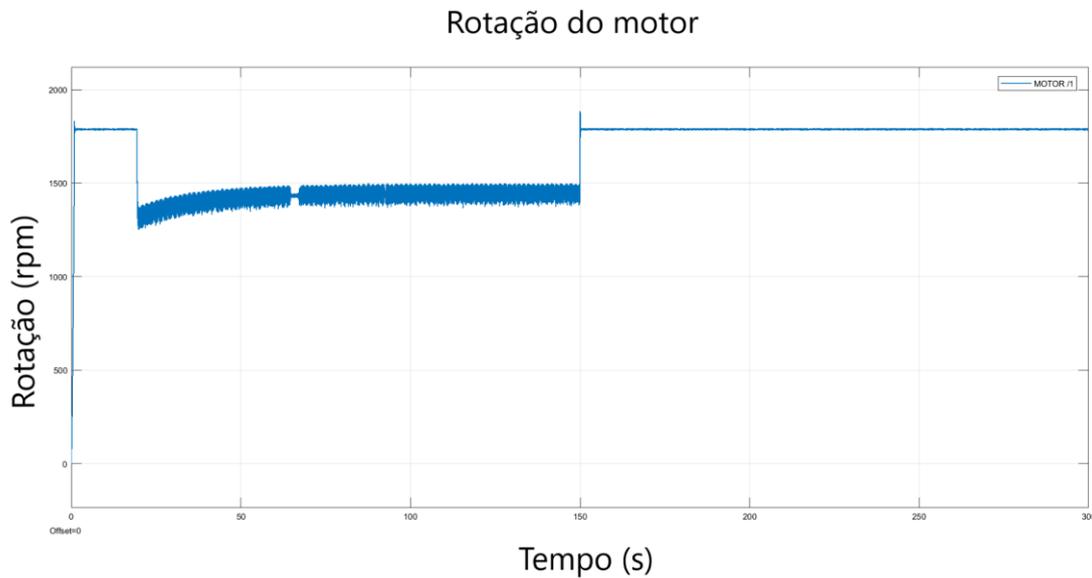


Fonte: Autor.

Como esperado, o resultado da resposta do modelo foi satisfatório para os dois sets points alterados, o controlador regula bem a saída desejada. Após a partida, o controlador busca alcançar o primeiro set point desejado, porém ele consegue alcançá-lo apenas em torno de 50s. Esta resposta não demonstra ser ruim, já que a temperatura fica abaixo do set point, pois ela não traz problemas para o sistema e como o objetivo é diminuir a rotação, na Figura 31 é ilustrado o resultado da rotação do motor para essa simulação.

Logo no início do teste o motor inicia a rotação a 1800 rpm, com essa velocidade a temperatura da água diminui e por volta 20s a rotação reduz em torno de 1500 rpm. Em 150s a rotação retorna para rotação nominal devido a diminuição do set point, quando a planta atinge regime permanente e a rotação estabiliza em 1800 rpm, então é perceptível a economia nesse intervalo de tempo.

Figura 31 - resultado da rotação do motor para aplicação de dois sets points.

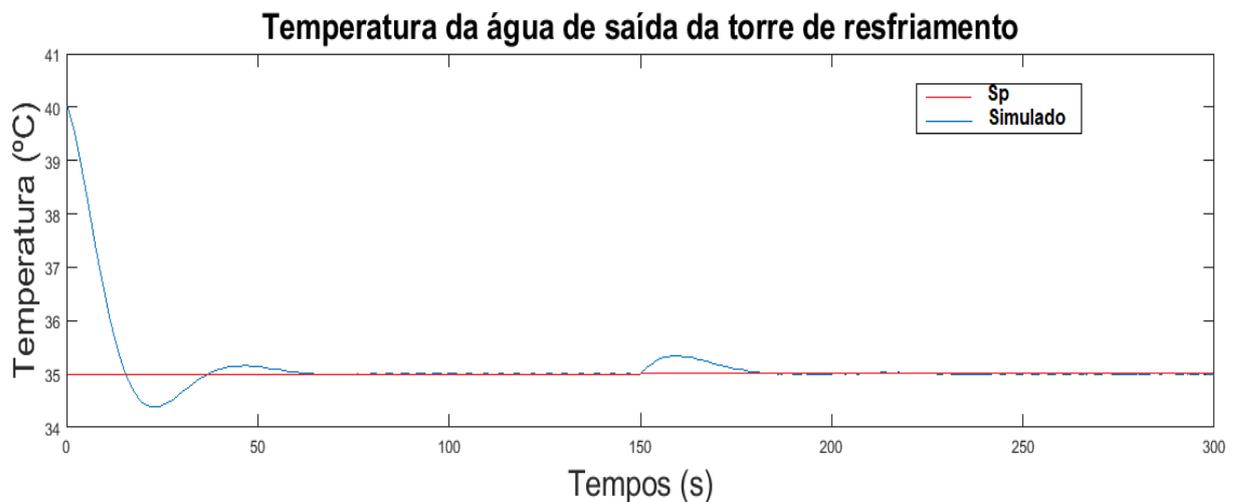


Fonte: Autor.

4º teste:

Foi aplicado um degrau no distúrbio para avaliar o comportamento do processo para variação na perturbação. A Figura 32 ilustra o comportamento do sistema perante esse teste. O set point de temperatura inserido foi de 35°C, a temperatura inicial foi de 40°C e aplicou um degrau de 20 para 30m³/h no tempo 150s.

Figura 32 - Resultado da temperatura para aplicação de um degrau no distúrbio.

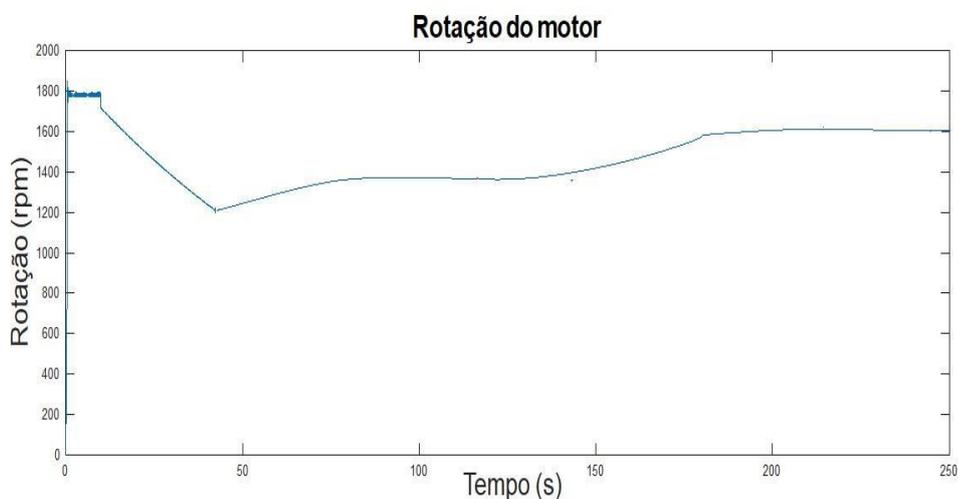


Fonte: Autor.

Na Figura 33 é observada a resposta da rotação do motor para teste efetuado. Nota-se

que houve uma redução de rotação do motor devido a ação do controle.

Figura 33 - resultado da rotação do motor para o quarto teste.



Fonte: Autor.

6.1 ECONOMIA

Nesta seção será abordado um quadro comparativo do uso do controle PI no motor do ventilador da torre e o funcionamento do motor em manual com rotação máxima. Espera-se que ocorra uma diminuição no uso de energia elétrica devido ao controle da rotação com o controlador.

Além dessa redução proporcionar uma economia no uso de energia elétrica, é esperado um aumento da vida útil dos componentes mecânicos e elétricos que se aplicam ao ventilador e menor consumo de produtos químicos utilizados na água da torre.

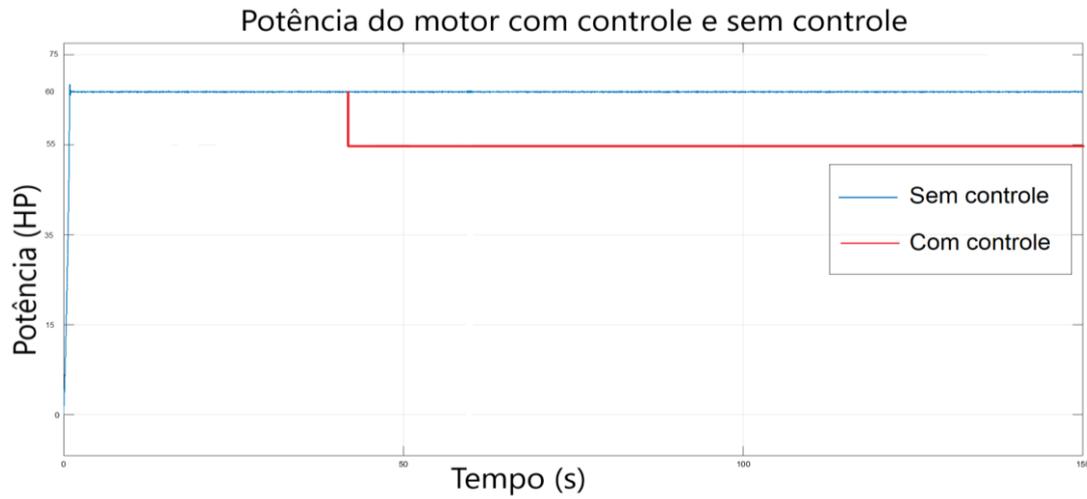
A redução dos produtos químicos se dá devido à redução da evaporação da água da torre, ou seja, quanto menos a água é perdida (evaporada), menor será a quantidade de produtos utilizados na água que reabastece a torre de resfriamento.

É importante observar então que o controle de velocidade é fundamental na redução de gastos de um sistema. Torres sem o método de controle, atuam sempre em sua velocidade máxima, independente do resfriamento necessário. Isso faz com que a operação tenha gastos desnecessários.

Baseando no primeiro teste executado e comparando-o com funcionamento em manual (com a rotação máxima do motor), foi feito um comparativo entre os dois tipos de

acionamentos. A Figura 34 apresenta os resultados de potência absorvida em que a cor vermelha representa o modelo com controle e o azul sem.

Figura 34 - Comparativo de consumo de potência do motor com e sem controle.



Fonte: Autor.

Nota-se que com o controle, uma menor transferência de calor foi exigida (a partir de 40 segundos), portanto, menos ar é insuflado, resultando numa redução de rotação do motor. Através da razão entre as áreas do gráfico é possível observar a economia gerada do controle para este caso.

Por aproximação das áreas, para figuras geométricas conhecidas, e fazendo a razão entre a potência controlada, e a não controlada, observou-se uma economia de 7,22% de energia, demonstrando a utilidade do controle. Para tempos mais prolongados e ou temperaturas ambientes mais amenas, poderão ser observadas economias ainda maiores.

7 CONCLUSÃO

Neste projeto foi apresentada os principais equipamentos da torre de resfriamento instalados na Metalsider, utilizou-se ferramentas computacionais para simular o processo de resfriamento da água do trocador de calor (condensador) da termoelétrica, buscando otimizá-lo e por fim foi apresentado a economia energética devido a inserção da malha de controle automática.

Foi apresentado os diferentes tipos de torre de resfriamento, as características dos ventiladores, o funcionamento do inversor de frequência e o funcionamento do condensador da termoelétrica.

No MATLAB® foi projetado modelo matemático da torre de resfriamento, distúrbio, controlador e o diagrama de blocos. Devido o sistema ser térmico, era esperado uma resposta lenta em relação a outros processos. Logo, a resposta da planta desejada foi alcançada para os vários testes efetuados ao longo do trabalho.

Um dos objetivos do trabalho era verificar a redução do consumo de energia elétrica nos ventiladores da torre de resfriamento com a inserção da malha de controle automático, isso foi alcançado. Para ilustrar esse resultado, foi apresentado um gráfico comparando o funcionamento com o sistema sem e com a malha de controle, resultando, para um dos testes, uma economia de 7,22% de consumo de energia elétrica. Conseqüentemente, essa ação traz redução no consumo de produtos químicos na água, pois há uma menor evaporação da água, aumenta a vida útil dos equipamentos eletromecânicos da torre e diminuição no consumo de água.

Então conclui-se que, com a aplicação da malha de controle automático, torna-se possível otimizar o processo de resfriamento da água do trocador de calor, trazendo benefícios a curto e a longo prazo, além de reduzir o consumo de água, que mundialmente está sendo levado em consideração em relação à sustentabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALPINA. **Torres de resfriamento de água**. Alpina S/A Indústria e Comércio, São Bernardo do Campo, SP, 1978.

ANDREAS,J.C. **Energy Efficient Electric Motors Selection and Applications**, Marcel Deckker Inc, New York,1982.

ARAÚJO, E. C. da C. **Trocador de Calor**. 1. ed. São Carlos: Editora da Universidade Federal de São Carlos (EdUFSCar), 2002.

ASTROM,K.J.; HANGGLUND,T. **PID controllers: theory, design, and tuning**. Instrument Society of América, North Carolina, 1995.

BATISTA, Arnaldo Abranches Mota. **Utilização do gás de alto forno para produção de energia na indústria siderúrgica de Minas Gerais** /Arnaldo Abranches Mota Batista. – 2009.

BEZERRA, José Henrique. **Estudo de sistema de controle usando controlador PID em processos industriais**. Campinas, SP: [s.n.], 2007.

BEGA, E. A. **Instrumentação Industrial**. [S.l.]: Interciência, 2011.

CASTRUCCI, P. D. L.; BITTAR, A.; SALES, R. **Controle automático**. Editora LTC, 2011.

VENTURINI, Osvaldo José. PIRANI, Marcelo José. **Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

CHIEN, K. L., A. HRONES & J.B. RESWICK. **On the automatic control of generalized passive systems**. 1952.

COHEN, G. H. & G. A. Coon. **Theoretical Considerations of retarded control**. 1953.

COMO FUNCIONAM USINAS TÉRMICAS? Retirado de www.cbie.com.br, 2020.

DADALTO, F. O.. **Projeto e sintonização de controladores digitais tipo pid: controle automático de temperatura em uma unidade de secagem**, Uberlândia, MG,2018.

FACCIN, F.. **Abordagem inovadora no projeto de controladores PID**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2004.

FITZGERALD, ARTHUR ERNEST; KINGSLEY, CHARLES; UMANS, STEPHEN D. **Electric Machinery**. 6ª. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2005.

FRANCHI, Claiton. **Acionamentos Elétricos**. 3. Ed São Paulo: Érica, 2008.

GUERRA, Wladimir de Andrade. **Implementação de Controle Proporcional, Integral e Derivativo Digital em Controladores Lógico Programáveis**, monografia retirada de www2.ee.ufpe.br. Pernambuco, 2009.

LAGE, Matheus Sales. **Implantação de sistema de controle de temperatura da água utilizando trocador de calor aplicado em uma planta industrial**, 2018.

KRATZ, Edirlaine. **Como planejar e executar a otimização de processos na sua empresa**, retirado de www.helioprint.com.br, Santa Catarina, 2018.

MORAN, M.J. and SHAPIRO, H.N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. John Wiley & Sons, Inc., 1993.

NEOMUNDO. **Uso da água na indústria**, retirado de www.neomundo.org.br, Set/2017.

NOVUS. **Controle PID básico**. Retirado de www.novus.com.br. 2003.

OLIVEIRA, Adalberto Luiz de Lima. **Instrumentação, Fundamentos de controle de processo**. Apostila SENAI, Espírito Santo,1999.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 4ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

PINTO, Jan Erik Mont Gomery. **Aplicação prática do método de controladores PID utilizando o método do relé com histerese.** Natal/RN, 2014.

ROVIRA, Daniel E., P.W. Murrill & C. L. Smith (1969). **Tuning controllers for setpoint changes.** Instrumentation and Control Systems.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear.** Rio de Janeiro, 2016.

TORO, Vicent Del. **Fundamentos de máquinas elétricas.** Rio de Janeiro: LTC, 1999.

ZIEGLER, J. B. & NICHOLS (1942). **Process lags in automatic control circuits.**

WEG. (s.d.). **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM.**

WEG. **Motores de corrente alternada.** Jaraguá do Sul: WEG, 2006.