CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLOGICA DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, ASSOCIAÇÃO AMPLA ENTRE UFSJ/CEFET-MG

MARCELO FERREIRA GODINHO

SÍNTESE CONJUNTA DO CONTROLADOR E DOS MECANISMOS DE TRANSMISSÃO POR EVENTO EM SISTEMAS DE CONTROLE VIA REDE

MINAS GERAIS

2023

MARCELO FERREIRA GODINHO

SÍNTESE CONJUNTA DO CONTROLADOR E DOS MECANISMOS DE TRANSMISSÃO POR EVENTO EM SISTEMAS DE CONTROLE VIA REDE

Dissertação apresentada ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, associação ampla UFSJ/CEFET-MG.

Área de concentração: Modelagem e Controle de Sistemas. Linha de pesquisa: Sistemas de Controle.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Nunes Gonçalves.

Coorientadora: Profa. Dra. Ana Paula Batista.

Minas Gerais

2023

Godinho, Marcelo Ferreira

G585s Síntese conjunta do controlador e dos mecanismos de transmissão por evento em sistemas de controle via rede / Marcelo Ferreira Godinho. – 2023. 108 f.: il., gráfs, tabs.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em associação ampla entre a UFSJ e o CEFET-MG. Orientador: Eduardo Nunes Gonçalves.

Coorientadora: Ana Paula Batista.

Banca examinadora: Eduardo Nunes Gonçalves, Ana Paula Batista, Márcio Júnior Lacerda e Luciano Antonio Frezzatto Santos.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

 Controle automático – Teses. 2. Sistemas de comunicação sem fio – Teses.
 Redes de sensores – Teses. 4. Otimização matemática – Teses. I. Gonçalves, Eduardo Nunes. II. Batista, Ana Paula. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Universidade Federal de São João del-Rei. V. Título.

CDD 629.8043

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Duarte, CRB 6º 1592 / Cefet/MG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Marcelo Ferreira Godinho

"SÍNTESE CONJUNTA DO CONTROLADOR E DOS MECANISMOS DE TRANSMISSÃO POR EVENTO EM SISTEMAS DE CONTROLE VIA REDE."

Dissertação nº 310 apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João Del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais em 01 de Dezembro de 2023 como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Eduardo Nunes Gonçalves (Orientador) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof^a. Dr^a. Ana Paula Batista (Coorientadora) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Márcio Júnior Lacerda Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ

Prof. Dr. Luciano Antonio Frezzatto Santos Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG



FOLHA DE ASSINATURAS

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 29/2023 - PPGEL (11.52.08)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 04/12/2023 08:07) ANA PAULA BATISTA PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO DEE (11.56.08) Matrícula: ###528#9

(Assinado digitalmente em 03/12/2023 10:38) EDUARDO NUNES GONCALVES PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR DEE (11.56.08) Matrícula: ###15#7

(Assinado digitalmente em 11/12/2023 14:18) MARCIO J LACERDA ASSINANTE EXTERNO CPF: ###.###.186-##

(Assinado digitalmente em 04/12/2023 07:52) LUCIANO ANTONIO FREZZATTO SANTOS ASSINANTE EXTERNO CPF: ###.###.728-##

Visualize o documento original em https://sig.cefetmg.br/documentos/ informando seu número: 29, ano: 2023, tipo: ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO, data de emissão: 02/12/2023 e o código de verificação: d26b9e152b

Agradeço a Deus e a minha família.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma formulação multiobjetivo para a síntese conjunta do controlador e dos mecanismos de transmissão com acionamento por evento, com otimização do período de amostragem, para sistema de controle via rede com objetivo de obter diferentes compromissos entre o valor médio da integral do erro absoluto e o número médio de transmissões de dados. São considerados atrasos aleatórios de transmissão e perdas de pacotes para cada link de comunicação sensor/controlador e controlador/atuador. É aplicado uma versão do algoritmo de otimização evolução diferencial multiobjetivo para obter um conjunto de soluções eficientes que determinam simultaneamente os ganhos do controlador proporcional-integral multivariável, o período de amostragem e os limiares de disparo dos mecanismos de transmissão por evento descentralizados para cada conexão sensor/controlador e controlador/atuador. Considerando o aspecto estocástico dos atrasos e perdas de pacotes, as funções objetivo são calculadas com base na média da integral do erro absoluto e da média do número de transmissões, para diferentes simulações. A metodologia de síntese conjunta proposta é avaliada por meio de simulação computacional utilizando exemplos de sistemas de controle multivariável. Apesar do alto custo computacional requerido pelo método de síntese proposto, os resultados dos estudos de casos demonstram que é possível combinar um bom desempenho do sistema de controle com uma redução significativa do número de transmissões na rede mesmo na presença de atrasos variantes e perdas de pacote.

Palavras-chaves: Sistemas de controle via rede; mecanismos de acionamento por evento; otimização multiobjetivo.

ABSTRACT

This work presents a multi-objective formulation for codesign of controller and event-triggered transmission mechanisms, with sampling period optimization, for networked control systems to obtain different tradeoffs between the average of the absolute error integral and average number of data transmissions. Random transmission delays and packet loss are considered for each sensor/controller and controller/actuator communication link. An version of the multi-objective differential evolution optimization algorithm is applied to obtain a set of efficient solutions that simultaneously determine the gains of the multivariable proportional-integral controller, the sampling period, and the triggering thresholds of the decentralized event transmission mechanisms for each sensor/controller and controller/actuator connection. Considering the stochastic aspect of delays and packet losses, the objective functions are calculated based on the average of the absolute error integral and the average number of transmissions, for different simulations. The proposed joint synthesis methodology is evaluated through computer simulation using examples of multivariable control systems. Despite the high computational cost required by the proposed synthesis method, the results of the case studies demonstrate that it is possible to combine good performance of the control system with a significant reduction in the number of transmissions in the network even in the presence of varying delays and packet losses.

Keywords: Networked control systems, event-triggered mechanisms; multiobjective optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Estrutura de um Sistema de Controle via Rede
Figura 3.1: Diagrama de Bloco do NCS com ETM
Figura 3.2: Conjunto de soluções factíveis e dominância em um problema
multiobjetivo de minimização35
Figura 3.3: Técnica de seleção de acordo com algoritmo NSGA-II
Figura 3.4: Técnica de seleção baseado no NSGA-II com reaproveitamento de
soluções descartadas da Fronteira 1 44
Figura 4.1: Diagrama esquemático do sistema de controle de quatro tanques.48
Figura 4.2: Curvas de Pareto para sistema quatro tanques
Figura 4.3: Região das curvas de Pareto próxima da solução utópica para
sistema quatro tanques51
Figura 4.4: Melhores Soluções obtidas para cada ETM considerando o valor
limite de IAE, para o sistema quatro tanques53
Figura 4.5: Distribuição dos atrasos de transmissão via rede para sistema quatro
tanques em termos de números de períodos de amostragem
Figura 4.6: Comparação das curvas de Pareto próxima da solução utópica para
sistema quatro tanques58
Figura 4.7: Comparação dos transitórios das saídas do sistema, y (tk) , para ETM-
1 x CTP-1 para sistema quatro tanques, solução 28, <i>Ts</i> =0,1366s60
Figura 4.8: Comparação dos regimes estacionários das saídas para ETM-1 x
CTP-1 para sistema quatro tanques, solução 28, <i>Ts</i> =0,1366s61
Figura 4.9: Comparação dos transitórios das entradas para ETM-1x CTP-1 para
sistema quatro tanques, solução 28, para $Ts=0,1366s$ 61
Figura 4.10: Intervalos entre transmissões para sistema quatro tanques, ETM-1,
Ts=0,1366s, em termos de número de períodos de amostragem
Figura 4.11: Intervalos entre transmissões para sistema quatro tanques, ETM-1,
Ts=0,1366s – Sensor 2, em termos de número de períodos de amostragem. 63
Figura 4.12: Diagrama esquemático do sistema de controle da coluna de
destilação binária64
Figura 4.13: Curvas candidatas Pareto-ótima para sistema Coluna Destilação
Binária66

Figura 4.14: Região das curvas de Pareto próximas da solução utópica para sistema Coluna Destilação Binária......66 Figura 4.15: Melhores Soluções obtidas para cada ETM, considerando o valor Figura 4.16: Distribuição dos atrasos de transmissão via rede para sistema Coluna Destilação Binária em termos de números de períodos de amostragem. Figura 4.17: Comparação das curvas de Pareto próxima da solução utópica para sistema Coluna de Destilação Binária.....72 Figura 4.18: Comparação dos transitórios das saídas do sistema, y(tk), para ETM-3 x CTP-3 para sistema Coluna Destilação Binária, solução 23, Ts=0,1362 Figura 4.19: Comparação dos regimes estacionários das saídas para ETM-3 x CTP-3 para sistema Coluna Destilação Binária, solução 28, Ts=0,1362 min. . 74 Figura 4.20: Comparação dos transitórios das entradas para ETM-3 x CTP-3 para sistema Coluna Destilação Binária, solução 23, para Ts=0,1362 min..... 75 Figura 4.21: Intervalos entre transmissões para sistema Coluna Destilação Binária, ETM-3, Ts=0,1362 min, em termos de número de períodos de Figura 4.22: Diagrama esquemático do sistema de controle da Coluna de Destilação de Petróleo Bruto......77 Figura 4.23: Curvas candidatas Pareto-ótima para sistema Coluna Destilação de Figura 4.24: Região das curvas candidatas a Pareto-ótima para sistema Coluna Destilação de Petróleo Bruto...... 80 Figura 4.25: Melhores Soluções obtidas para cada ETM, considerando o valor Figura 4.26:Distribuição dos atrasos de transmissão via rede para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto em termos de números de períodos de Figura 4.27: Comparação das curvas de Pareto próxima da solução utópica para

Figura 4.28: Comparação dos transitórios das saídas $y1$ e $y2$ do sistema para
ETM-3 x CTP-3 para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, solução
39, <i>Ts</i> =0,1237min
Figura 4.29: Comparação dos transitórios das saídas y3 e y4 do sistema para
ETM-3 x CTP-3 para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, solução
39, <i>Ts</i> =0,1237min
Figura 4.30: Comparação dos regimes estacionários das saídas y1 e y2 para
ETM-3 x CTP-3 para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, solução
39, <i>Ts</i> =0,1237min
Figura 4.31: Comparação dos regimes estacionários das saídas y3 e y4 para
ETM-3 x CTP-3 para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, solução
39, <i>Ts</i> =0,1237min
Figura 4.32: Comparação dos transitórios das entradas $u1$ e $u2$ para ETM-3x
CTP-3 para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, solução 39, para
<i>Ts</i> =0,1237min
Figura 4.33: Comparação dos transitórios das entradas $u3$, $u4$ e $u5$ para ETM-3x
CTP-3 para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, solução 39, para
<i>Ts</i> =0,1237min
Figura 4.34: Intervalos entre transmissões em número de amostragens dos
atuadores para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, ETM-3, $Ts =$
0,1237 min, em termos de número de períodos de amostragem
Figura 4.35: Intervalos entre transmissões em número de amostragens dos
sensores para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, ETM-3, $Ts =$
0,1237 min, em termos de número de períodos de amostragem

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Variáveis do processo – Sistema de quatro tanques
Tabela 4.2: Menor erro médio obtido para cada ETM52
Tabela 4.3: Melhores Soluções obtidas para cada ETM, considerando o valor
limite de IAE, para o sistema quatro tanques52
Tabela 4.4: Comparação entre as soluções, considerando o valor limite de IAE,
para o sistema de Quatro Tanques54
Tabela 4.5: Avaliação percentual dos valores médios das soluções em relação
ao CTP, considerando o valor limite de IAE, para o sistema quatro tanques 55
Tabela 4.6: Resultados para diferentes perfis de atraso: Normal x Gamma x Chi-
Square, para Sistema Quatro Tanques57
Tabela 4.7: Controle por Transmissão Periódica – CTP, obtido de BELO (2021)
para sistema Quatro Tanques - IAE, Nt e Npl57
Tabela 4.8: Comparação dos resultados com BELO (2021) para sistema quatro
tanques - IAE, Nt e Npl
Tabela 4.9: Intervalos máximos entre transmissões para sistema quatro tanques,
ETM-1, <i>Ts</i> =0,1366s63
Tabela 4.10: Variáveis do processo – Coluna Destilação Binária
Tabela 4.11: Menor erro médio, obtido para cada ETM, considerando o valor
limite de IAE67
Tabela 4.12: Melhores Soluções obtidas para cada ETM, considerando o valor
limite de IAE, para sistema Coluna Destilação Binária67
Tabela 4.13: Comparação entre as soluções, considerando o valor limite de IAE,
para o sistema Coluna Destilação Binária69
Tabela 4.14: Avaliação percentual dos valores médios das soluções em relação
ao CTP para o sistema Coluna Destilação Binária70
Tabela 4.15: Soluções para perfis de atraso: Normal x Gamma x Chi-Square,
para Sistema Coluna de Destilação Binária71
Tabela 4.16: Controle por Transmissão Periódica – CTP, obtido de BELO (2021)
para sistema Coluna de Destilação Binária - IAE, Nt e Npl
Tabela 4.17: Comparação dos resultados com BELO (2021) para sistema Coluna
Destilação Binária - IAE, Nt e Npl72

Tabela 4.18: Intervalos entre transmissões para sistema Coluna Destilação Binária, ETM-3, *Ts*=0,1362 min......76 Tabela 4.19: Variáveis do processo – Coluna Destilação de Petróleo Bruto ... 77 Tabela 4.20: Menor erro médio obtido para cada ETM, considerando o valor Tabela 4.21: Melhores Soluções obtidas para cada ETM, considerando o valor Tabela 4.22: Comparação entre as soluções, considerando o valor limite de IAE, Tabela 4.23: Avaliação percentual dos valores médios das soluções em relação Tabela 4.24: Soluções para perfis de atraso: Normal x Gamma x Chi-Square, considerando o valor limite de IAE, para Sistema Coluna de Destilação de Tabela 4.25: Controle por Transmissão Periódica – CTP, obtido de BELO (2021) Tabela 4.26: Comparação dos resultados com BELO (2021) para sistema Coluna Tabela 4.27: Intervalo máximo entre transmissões para sistema Coluna de

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- NCS Networked control system
- ETC Event-triggered Control
- ETM Event-triggered mechanism
- PETC Periodic Event-triggered Control
- MIMO Multiple-input, Multiple-output
- ZOH Zero-order hold
- CTP Controle por transmissão periódica
- DE Differential Evolution
- POM Problema de Otimização Multiobjetivo
- DEMO Differential evolution for multi-objective optimization
- IAE Integral Absolute Error
- NSGA-II Nondominated Sorting Genetic Algorithm II

LISTA DE SÍMBOLOS

- P Sistema
- *K* Controlador
- *T_s* Período de amostragem
- $t_k kT_s$
- y Vetor de saída
- f_1 Função objetivo relacionada a integral do erro absoluto
- f_2 Função objetivo relacionada ao do número total de transmissões
- \bar{y} Vetor de saídas recebidas com os valores mais atual
- ŷ Vetor de variáveis medidas enviadas
- *x* Vetor de variáveis de estados
- d Vetor de distúrbios
- \bar{u} Vetor de variáveis manipuladas recebidas com valores mais atuais
- *u* Vetor de variáveis manipuladas
- *û* Vetor de variáveis manipuladas enviadas
- *p* Dimensão do vetor de variáveis manipuladas
- q Dimensão do vetor de saídas medidas
- r Vetor de referências
- η Soma do número de saídas e entradas
- \hat{t}_i Instante de transmissão
- v_i Vetor que armazena as variáveis medidas e manipuladas, obtidos de forma periódica.
- \bar{v}_i Vetor que armazena as variáveis medidas e manipuladas, mais atuais.
- $au_i(\hat{t}_i)$ Atraso de transmissão
 - ψ_i Função da lei de transmissão
- $\mathcal{U}_{(a,b)}$ Número real pseudoaleatório no intervalo [a,b)
 - N Número de indivíduos da população
 - χ_k População na *k-ésima* iteração
 - χ Vetor de variáveis de otimização
 - δ Limite para acionamento do evento. Variável de otimização.
 - F_i Fator de escala do algoritmo evolução diferencial.

- u_k População de teste
- v_k Vetor da população mutante
- C_r Taxa de cruzamento do algoritmo evolução diferencial
- ξ Perda de pacotes
- *N_g* Número máximo fixo de gerações do algoritmo de otimização evolutivo
- \mathcal{F} Região factível do problema de otimização
- χ^* Solução Ótima
- ϕ Variável auxiliar gerada de modo aleatória
- ρ Constante escalar
- *U* Função degrau unitário
- γ Matriz de instantes de transmissão
- *i*_c Instante de amostragem do sinal recebido
- *V* Matriz para armazenar os valores transmitidos
- *ς_i* Valor do instante de tempo de transmissão
- \overline{F}_i Arquivo externo para mecanismo adicional de elitismo no algoritmo Demo
- β Quantidade máxima de simulações
- *N*_t Número de transmissões
- $N_t(\%)$ Valor percentual do número de transmissões em relação ao CTP
- N_{pl} Número de perdas totais (perdas de pacotes + descarte de mensagens obsoletas)
- $N_{pl}(\%)$ Valor percentual do número de perdas totais em relação ao CTP
 - μ Valor médio
 - σ Desvio padrão
 - H_{∞} Norma H infinito
 - *H*₂ Norma H dois
- IAE(%) Valor percentual do IAE em relação ao CTP
- *T_{max}* Tempo final de simulação
- *IAE_{menor}* Menor erro médio encontrado
- *IAE*_{limite} Limite do erro

SUMÁRIO

1	INTI	RODUÇÃO	13			
	1.1	Sistemas de controle via rede	13			
	1.2	Objetivos	16			
	1.3	Metodologia utilizada	17			
	1.4	Organização da dissertação	17			
2	EST	ADO DA ARTE EM ACIONAMENTO POR EVENTOS EM SISTEMAS DE CONTROLE VIA				
R	EDE		19			
	2.1	Visão Geral	19			
	2.2	Análise e Projeto de ETC	20			
3	FOR	MULAÇÃO DO PROBLEMA	26			
	3.1	Modelagem do NCS com ETC descentralizado	26			
	3.2	Otimização multiobjetivo	32			
	3.2.	1 Algoritmo Evolução Diferencial	32			
	3.2.	2 Problema de Otimização multiobjetivo	34			
	3.3	Formulação do problema	36			
	3.4	Simulação do NCS	37			
	3.5	Algoritmo Evolução Diferencial Multiobjetivo	41			
	3.6	Nova abordagem utilizando o DEMO	41			
	3.7	Conclusão	44			
4	EST	UDOS DE CASOS	45			
	4.1	Apresentação do Estudo de Caso	45			
	4.2	Estudo de caso: Quatro Tanques	48			
	4.3	Estudo de caso: Coluna de Destilação Binária	64			
	4.4	Estudo de caso: Coluna de Destilação de Petróleo Bruto	77			
	4.5	Custo Computacional	93			
5	CON	ISIDERAÇÕES FINAIS	94			
	5.1	Conclusões	94			
	5.2	Trabalhos Futuros	96			
	5.3	Trabalhos Publicados em Eventos Científicos e Periódicos	97			
R	EFERÊN	CIAS BIBLIOGRÁFICAS	98			
A	Apêndice A – Soluções					

1 INTRODUÇÃO

1.1 Sistemas de controle via rede

Nos últimos anos, a síntese e análise de sistemas de controle via rede (NCS, *Networked Control Systems*) têm atraído cada vez mais atenção das comunidades industriais e científicas, e muitas contribuições foram publicadas (ZHANG et al., 2019; ZHOU et al., 2022; LI et al., 2023). Com o desenvolvimento das tecnologias de comunicação e computação, o uso de redes de comunicação para interligar os elementos da malha de controle, como atuadores, sensores e controladores, tornou-se muito comum (COUTINHO et al., 2023). Este cenário motiva a pesquisa e aplicação de ferramentas de sistema de controle via rede, que visam lidar com os desafios relacionados à presença de redes de comunicação e comunicação em sistemas de controle (ZHANG et al., 2019; LI et al., 2023).

O Sistema de Controle via Rede consiste em malhas de controle conectadas através de redes de comunicação de dados, como pode ser visto na Figura 1.1. Um controlador envia um sinal de controle via rede para o atuador, enguanto o módulo sensor faz a leitura da saída da planta e envia a informação para o controlador, sendo a informação transportada via rede (BEMPORAD et al., 2010; BATISTA & JOTA, 2018; GAUTAM et al., 2021, ZHANG et al., 2019; LI et al., 2023). Em NCS, os equipamentos interligados devem compartilhar os recursos da rede da melhor forma possível, garantindo a troca de informações e cumprindo as exigências temporais durante a transmissão de dados. Muitos protocolos de comunicação para NCS têm sido estudados e desenvolvidos no intuito de prover soluções mais eficientes, entre eles, Message Queue Telemetry Transport (MQTT), HyperText Transfer Protocol (HTTP), Constrained Application Protocol (CoAP), Data Distribution Service (DDS), Advanced Message Queue Protocol (AMQP) (KAJATI et al., 2019; SANJUAN et al., 2020; MATTATHIL, 2020; AKPAN et al., 2022; CHEN et al., 2022; PRAJAPATI, 2022; HALDORAI et al., 2023; RAJAN, 2023).



Figura 1.1: Estrutura de um Sistema de Controle via Rede.

Fonte: Adaptado de (Godoy, 2011)

A presença da rede de comunicação e de alguns fatores degenerativos como atrasos de comunicação e perdas de pacotes durante as trocas de informação entre sensores, atuadores e controladores, podem afetar a estabilidade e desempenho de um NCS (BAILLIEUL & ANTSAKLIS, 2007; HEEMELS et al., 2010). Estes atrasos são causados pelo compartilhamento da rede de comunicação e devido ao tempo gasto para transmissão e processamento dos sinais (LIAN, MOYNE & TILBURY, 2002; ZHOU et al., 2022).

A implementação de um NCS exige projeto apropriado das estratégias de controle para garantir que a estabilidade e desempenho do sistema sejam alcançados durante a operação (BATISTA, 2014). Em um sistema em malha fechada sob uma rede de transmissão de dados, são introduzidos atrasos e variações de atrasos na troca de mensagens, na amostragem, na ação de controle e durante a atuação (MARTINS, 2009; GAUTAM et al., 2021). Em um NCS, além dos atrasos típicos de um sistema de controle digital, alguns atrasos adicionais podem ocorrer na planta, na leitura dos dados do sensor, no cálculo da ação de controle, na comunicação entre sensor e controlador e entre o controlador e o atuador. Além disso, o sistema de controle via rede também deve lidar com a presença de variações de atrasos, amostragens irregulares, ruídos, perdas de pacotes, perdas de conexão, dados corrompidos e limitações de largura de banda (BATISTA & JOTA, 2013).

A implementação de NCS proporciona novos desafios para as técnicas de projeto e análise de sistemas de controle convencionais. Diferentes métodos têm sido aprimorados para análise e concepção de sistemas de controle via rede sujeitos a irregularidade no período de amostragem (GODOY, 2011; ALVES, 2021). Da mesma forma muitos estudos têm sido realizados com o intuito de analisar malhas de controle sujeitas a atrasos variantes, e a relação destes com o desempenho e estabilidade de sistemas de controle em malha fechada (JOTA et al., 2013; BATISTA & JOTA, 2013; BATISTA, 2014).

Devido à limitação de largura de banda e a demanda crescente do uso das redes de comunicação, uma questão importante a ser considerada no projeto de NCS é a minimização do uso da rede de comunicação sem afetar o desempenho do sistema de controle. Uma das alternativas para minimização do uso da rede é considerar o controle acionado por evento (ETC, Event-Triggered Control) (TABUADA, 2007; MISHRA et al.; 2021; COUTINHO et al., 2023; ANAND et al., 2023). O controle acionado por evento, ETC, é um paradigma de controle que recebe bastante atenção dos pesquisadores (YANG; ER, 2020; LUO; HUANG; LIU, 2021). Nos sistemas de controle baseados em evento, a amostragem da saída da planta e o envio do sinal de controle são acionados por determinadas condições específicas, o que é detectado por meio do mecanismo de disparo por evento (ETM, Event-Triggered Mechanism) (HEEMELS; JOHANSSON; TABUADA, 2012; LIU; YANG; ER, 2020; COUTINHO; PALHARES, 2021; COUTINHO et al., 2023; ANAND et al., 2023). O mecanismo monitora o estado e/ou saídas da planta continuamente e os sinais de realimentação e controle são enviados somente quando a condição de disparo é alcançada. O objetivo é que a transmissão da informação ocorra apenas quando necessário, contribuindo para redução da taxa de ocupação da rede e economia de energia (HU; ZHANG; DU, 2012; LIU; YANG; ER, 2020; GAUTAM et al., 2021).

Esta dissertação terá como ponto de partida o trabalho desenvolvido por BELO (2021), no qual o autor apresenta um método para determinar os limiares ótimos dos detectores de eventos, baseado em otimização multiobjetivo, com objetivo de minimizar o uso da rede em NCS's, garantindo o desempenho do sistema diante de fatores degenerativos, como atrasos variantes no tempo e perdas de pacotes. O autor avalia diferentes ETM's visando avaliar o impacto no uso da rede e o desempenho do sistema de controle. No trabalho de BELO (2021) é desenvolvido um método de determinação dos limiares ótimos dos detectores de eventos de cada sensor e controlador individualmente, dado um período de amostragem e um controlador previamente definidos, projetados para atender as especificações de desempenho estabelecidas sem considerar os efeitos de uma rede de comunicação.

A contribuição desse trabalho é estender o método desenvolvido por BELO (2021) para a síntese conjunta do controlador e dos mecanismos de transmissão acionados por evento, com otimização do período de amostragem, para sistema de controle via rede, com objetivo de obter diferentes compromissos entre o desempenho do sistema de controle e o uso da rede de comunicação de dados. A estratégia utilizada consiste na formulação de um problema multiobjetivo, que através de algoritmo de otimização evolutivo multiobjetivo (GONÇALVES et al., 2022), seja possível obter um conjunto de soluções eficientes com diferentes compromissos entre o desempenho do sistema e o uso da rede.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é complementar o trabalho apresentado em BELO (2021), utilizando o método de otimização evolutivo multiobjetivo (GONÇALVES et al., 2022), incluindo na otimização além dos parâmetros dos ETM's, os parâmetros dos controladores proporcional-integral (PI) e o período de amostragem. É esperado um melhor desempenho do sistema, visto que a sintonia do controlador levará em conta os efeitos da rede de transmissão, como atrasos variantes, perdas de pacotes, amostragem irregular, entre outros. Em contrapartida é esperado que adicionando mais variáveis de otimização resulte em um aumento no custo computacional e complexidade do problema. Outra proposta do trabalho é investigar a influência do período de amostragem no desempenho dos sistemas baseados em ETC e incluir na otimização a determinação do período de amostragem ótimo.

Em resumo, os principais objetivos do trabalho podem ser definidos como:1. Desenvolver um método de projeto conjunto do controlador e dos mecanismos de transmissão por evento de forma que reduza a taxa de

ocupação da rede em NCS's sem que haja deterioração do desempenho do sistema.

- 2. Adaptar o problema de otimização multiobjetivo proposta em Belo (2021) para síntese conjunta de controladores e ETM's, para que seja possível obter um conjunto de soluções ótimas com diferentes compromissos entre o valor médio da integral de erro absoluto e número médio de transmissões de dados.
- Analisar o impacto da rede de comunicação e de fatores de implementação (atrasos de comunicação, amostragem dos sinais, perda de informações na rede) no desempenho e controle de NCS.

1.3 Metodologia utilizada

A metodologia utilizada foi baseada nas seguintes etapas: pesquisa de trabalhos na área de NCS usando as bases existentes no portal de Periódicos da CAPES; utilização do método de otimização evolutivo multiobjetivo proposto em (GONÇALVES et al., 2022); modificação do cálculo da função objetivo do problema de otimização multiobjetivo, implementado no MATLAB no trabalho de BELO (2021), para síntese conjunta dos controladores e ETM's, com otimização do período de amostragem; aplicação do algoritmo de otimização multiobjetivo em três estudos de caso; definição de novos critérios de seleção da solução mais adequada do conjunto de soluções eficientes geradas pelo algoritmo de otimização para comparação entre os diferentes tipos de ETM e comparação com os resultados obtidos em BELO (2021), em que são utilizados controladores pré-sintonizados com período de amostragem ajustado para esses controladores.

1.4 Organização da dissertação

Essa dissertação é organizada em cinco capítulos e um apêndice. No capítulo 1 foi feita a introdução do trabalho e objetivos a serem alcançados. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre NCS e síntese conjunta dos ETM's e controladores. No Capítulo 3 são apresentados a descrição matemática utilizada no projeto e simulação dos sistemas multivariáveis e o algoritmo de otimização multiobjetivo utilizado. No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e as comparações com a solução proposta por BELO

(2021). No Capítulo 5 estão as conclusões finais e propostas de prosseguimento desse trabalho. No Apêndice A, estão os resultados completos dos ETM's obtidos após simulação.

2 ESTADO DA ARTE EM ACIONAMENTO POR EVENTOS EM SISTEMAS DE CONTROLE VIA REDE

2.1 Visão Geral

A partir dos avanços tecnológicos e da crescente utilização das redes de comunicação digital ocorridas nos últimos anos, foram introduzidas inovações em diversas áreas da ciência e tecnologia. Como exemplo destas mudanças podemos citar o surgimento de sensores inteligentes que transmitem dados por meio de redes digitais como bluetooth, Wi-Fi, etc. (MOREIRA, 2018). Esses avanços também se espalharam para o campo de controle automático, evoluindo para o que é chamado de Networked Control Systems (NCS's). Nesses sistemas, parte da comunicação entre controlador, sensores e atuadores ocorre por meio de uma rede de comunicação de dados compartilhada. Esta estrutura permite a redução do custo do sistema e também aumenta sua flexibilidade, como apontado em HESPANHA; NAGHSHTABRIZI; XU (2007); BATISTA (2014); POSTOYAN et al. (2019). Nesse contexto de rede compartilhada, questões como largura de banda e consumo de energia em sistemas sem fio tornaram-se pontos importantes (DONKERS; HEEMELS, 2012). Além disso, os recursos da rede são limitados e vale a pena desenvolver abordagens de controle que sejam capazes de reduzir o consumo da largura de banda sem comprometer a estabilidade e desempenho do sistema. Entre as abordagens de controle, o controle acionado por eventos (ETC) é conhecido por sua capacidade de reduzir o número de transmissões necessárias para atingir os objetivos de controle por meio de um mecanismo de disparo por evento (COUTINHO et al.; 2023).

Nos sistemas baseados em ETC a amostragem da saída da planta e o recebimento do sinal de controle são acionados por determinadas condições específicas. Devido a restrições de recursos, é desejável executar tarefas de controle apenas quando isso for realmente necessário para garantir a estabilidade e desempenho desejado. Assim, os sistemas ETC's são mais adequados do que os sistemas de controle acionados por tempo quando se trata de equilibrar a utilização de recursos e a garantia de desempenho, (BORGERS & HEEMELS, 2014).

A maior parte do consumo de energia em sistemas sem fio se deve às transmissões de dados (TIBERI; LINDBERG; ISAKSSON, 2012; DA SILVA JR.; LAGES; SBARBARO, 2014), pode-se reduzir o consumo de energia nesses sistemas, reduzindo o número de transmissões. Estas observações levam à pesquisa de técnicas de controle que necessitam de menos atualizações de controle do que os mecanismos tradicionais de amostragem periódica frequentemente aplicados no campo de controle digital. Além das vantagens mencionadas para o NCS, o uso de técnicas que levem a menos atualizações de controle também é adequado para sistemas onde o número de acionamentos do atuador é relevante (MOREIRA, 2018; GAUTAM et al., 2021; ANAND et al. 2023). Com esses objetivos em mente, existem na literatura algumas técnicas de amostragem aperiódica onde a transmissão dos dados dos sensores e a atualização do sinal de controle ocorrem apenas em instantes determinados por variações de estado e/ou saídas dos sistemas. Em particular, existem as abordagens de controle disparado por evento e auto acionado (HEEMELS; JOHANSSON; TABUADA, 2012; MOREIRA, 2018).

No controle acionado por evento, um gerador de eventos monitora continuamente o estado e/ou as saídas do sistema e aciona a transmissão e atualização do sinal de controle quando um critério baseado no valor do estado e/ou saídas é verificado (HESPANHA; NAGHSHTABRIZI; XU, 2007; HEEMELS; JOHANSSON; TABUADA, 2012). No controle auto acionado, cada vez que um evento ocorre, o gerador de eventos calcula o próximo instante do evento, com base nas informações disponíveis do estado atual e a dinâmica do sistema (HEEMELS; JOHANSSON; TABUADA, 2012).

2.2 Análise e Projeto de ETC

Os principais desafios quando se trata de sistemas baseados em ETC se devem ao projeto do ETM, porque este deve ser projetado de forma a garantir o desempenho e estabilidade do sistema em malha fechada. É possível encontrar na literatura muitas configurações de NCS que utilizam em sua estrutura o ETC. O cálculo da ação de controle e a transmissão da informação para os atuadores são baseados em mecanismos acionados por eventos (JR.; TABUADA, 2011; WANG; SUN; HOVAKIMYAN, 2012; YUE; TIAN; HAN, 2013; PENG; YANG, 2013; GIRARD, 2014; ZHANG; HAN; ZHANG, 2017; LIU; YANG; ER, 2020; LUO;

HUANG; LIU, 2021) ou as transmissões ocorrem com acionamento por evento, apesar do controlador calcular de forma periódica a ação de controle (DONKERS; HEEMELS, 2012; HEEMELS; DONKERS; TEEL, 2013; DOLK; BORGERS; HEEMELS, 2017; ZHANG; HAN, 2014; GUAN; HAN; GE, 2018; KARTAKIS et al., 2018). Os mecanismos de disparo por evento se apresentam nos *links* de transmissão entre sensores e controladores (WANG; SUN; HOVAKIMYAN, 2012; YUE; TIAN; HAN, 2013; PENG; YANG, 2013; GIRARD, 2014; ZHANG; HAN; ZHANG, 2017; LUO; HUANG; LIU, 2021; ZHANG; HAN, 2014; ZHANG et al., 2020; COUTINHO; PALHARES, 2021; LI; FU; DU, 2016; GU et al., 2017; YU; HAO, 2017; YAN et al., 2020) e nos *links* de transmissão entre controlador e atuador (JR.; TABUADA, 2011; DONKERS; HEEMELS, 2012; HEEMELS; DONKERS; TEEL, 2013; ZHANG; YU; HAO, 2016; DOLK; BORGERS; HEEMELS, 2017; LIU; YANG; ER, 2020).

A transferência de dados pode ocorrer em conjunto, de forma centralizada, ou seja, um único pacote de dados com os valores lidos das variáveis medidas com o mecanismo de acionamento por evento baseado no vetor de sinais (YUE; TIAN; HAN, 2013; PENG; YANG, 2013; GIRARD, 2014; LUO; HUANG; LIU, 2021; LIU; YANG; ER, 2020; COUTINHO; PALHARES, 2021; LI; FU; DU, 2016; GU et al., 2017; YU; HAO, 2017; YAN et al., 2020). Esta estrutura centralizada pode ser considerada conservadora quando se trata de NCS com os nós dos dispositivos, sensores e atuadores, distribuídos ao longo da rede de comunicação (DONKERS; HEEMELS, 2012). Devido a isso, a utilização de mecanismos de disparo por evento de forma descentralizada e assíncrona pode resultar em maior flexibilidade para o NCS, onde a transferência de dados de forma individual é permitida e cada dispositivo ao longo da rede decide quando será disparado conforme programação preestabelecida (JR.; TABUADA, 2011; WANG; SUN; HOVAKIMYAN, 2012; LIU; YANG; ER, 2020; DONKERS; HEEMELS, 2012; HEEMELS; DONKERS; TEEL, 2013; DOLK; BORGERS; HEEMELS, 2017; GUAN; HAN; GE, 2018; ZHANG; YU; HAO, 2016; JR; CAO, 2013). Em Gonçalves et al. (2022) foi proposta uma forma de determinar os parâmetros dos ETM's em um PETC (PETC, Periodic eventtriggered control), descentralizado, através da solução de um problema multiobjetivo, cujas soluções possuem diferentes compromissos entre o desempenho do sistema de controle e o uso da rede.

Em relação ao monitoramento das saídas, os módulos sensores podem realizar a aquisição dos sinais de forma periódica, mas os ETM's decidem quando transmitir a informação (JR.; TABUADA, 2011; WANG; SUN; HOVAKIMYAN, 2012; GIRARD, 2014; DONKERS; HEEMELS, 2012; DOLK; BORGERS; HEEMELS, 2017; ZHANG et al., 2020; YAN et al., 2020) ou no caso de sistemas com ETC periódicos (PETC), a condição de acionamento é avaliada de forma periódica em intervalos de amostragem previamente definidos (YUE; TIAN; HAN, 2013; PENG; YANG, 2013; ZHANG; HAN; ZHANG, 2017; LIU; YANG; ER, 2020; LUO; HUANG; LIU, 2021; HEEMELS; DONKERS; TEEL, 2013; DOLK; BORGERS; HEEMELS, 2017; ZHANG; HAN, 2014; GUAN; HAN; GE, 2018; KARTAKIS et al., 2018; COUTINHO; PALHARES, 2021; LI; FU; DU, 2016; GU et al., 2017). Para este último caso, ETC's periódicos, a implementação é mais simples e garante haver um intervalo mínimo entre transmissões.

Os ETM's podem ser classificados de acordo com seu disparo. Os ETM's estáticos possuem uma lei de disparo que não se modifica com o tempo que depende do estado atual e da diferença para o último estado transmitido (WANG; SUN; HOVAKIMYAN, 2012; YUE; TIAN; HAN, 2013; ZHANG; HAN; ZHANG, 2017; LIU; YANG; ER, 2020; LUO; HUANG; LIU, 2021; DONKERS; HEEMELS, 2012; HEEMELS; DONKERS; TEEL, 2013; ZHANG; HAN, 2014; GUAN; HAN; GE, 2018; ZHANG et al., 2020; YAN et al., 2020). Nos ETM's dinâmicos, a lei de disparo é baseada em uma variável interna cuja dinâmica é determinada por uma equação diferencial que inclui o estado atual e a diferença para o último estado transmitido (GIRARD, 2014; DOLK; BORGERS; HEEMELS, 2017). Nos ETM's adaptativos, os parâmetros da lei de disparo são auto-ajustados de acordo com a variação do estado e das condições externas (GU et al., 2017; ZHANG, HAO et al., 2018).

Devido à complexidade envolvida, a análise e síntese de sistemas baseados em ETC têm recebido bastante atenção (HEEMELS et al., 2010; PENG & YANG, 2013; LIU et al., 2020; COUTINHO & PALHARES, 2021). É necessário projetar as condições de disparo de forma que o sistema em malha fechada seja estável sob a atualização de controle aperiódica introduzida pela estratégia de controle (MOREIRA, 2018). A atualização aperiódica do sinal de controle traz limitações na representação quando comparada as técnicas tradicionais de discretização (GHIGGI et al., 2015). Devido a isso, têm sido aplicadas técnicas mais elaboradas baseadas na teoria de Lyapunov (KHALIL, 1996), sistemas híbridos (GOEBEL; SANFELICE; TEEL, 2012) e teoria de sistemas com atraso de tempo (FRIDMAN, 2014).

Uma das vantagens da transmissão por ETM centralizado é a maior facilidade de formulação de uma condição de estabilidade baseado no teorema de Lyapunov, que resulta em formulações por desigualdade matriciais lineares (LMI, Linear Matrix Inequality) (YUE et al., 2013; YAN et al., 2020; COUTINHO & PALHARES, 2021; LUO et al., 2021). Alguns trabalhos exploram as técnicas da teoria de Lyapunov para avaliar a estabilidade. Escolhe-se uma função candidata de Lyapunov, ou seja, uma função definida positiva e projeta-se um gerador de eventos que garanta a negatividade da derivada temporal da função candidata de Lyapunov. Entre os trabalhos que utilizam essa técnica pode-se citar (TABUADA, 2007; HEEMELS; DONKERS; TEEL, 2011; HEEMELS; JOHANSSON: TABUADA. 2012: DONKERS: HEEMELS. 2012: TALLAPRAGADA; CHOPRA, 2014; LIU; JIANG, 2015; DA SILVA JR.; LAGES; SBARBARO, 2014; SBARBARO et al., 2014; TARBOURIECH et al., 2016; GROFF et al., 2016; MOREIRA et al., 2016, 2017a,b).

A síntese conjunta é explorada em vários trabalhos. PENG & YANG (2013) desenvolveram uma condição de acionamento combinada com um controlador por realimentação de estados, que mantém o desempenho $H\infty$ desejado do sistema, levando em consideração os atrasos de comunicação e perdas de pacotes a fim de otimizar a utilização da rede. PENG & HAN (2013) criaram um algoritmo de síntese conjunta para obter os parâmetros do ETM e o ganho do controlador simultaneamente. Um critério de estabilidade é obtido utilizando a teoria de Lyapunov-Krasovskii, que utiliza um sinal dente de serra para simular o perfil de atraso da rede artificialmente. Com base neste critério de estabilidade, é dada uma condição suficiente para a existência de um controlador com realimentação de estados. GU, et al. (2013), investiga o problema de controle de rastreamento de sistemas Fuzzy não lineares em uma rede de comunicação limitada. Um esquema de transmissão de dados adaptativo, acionado por evento é proposto para reduzir o uso da rede. Diferente do método convencional que define um valor fixo para o limite de acionamento, o método proposto regula este limite pelo erro de estado dos sistemas não lineares e do

modelo de referência de forma adaptativa. Ao construir uma função de Lyapunov apropriada, utilizando a condição de disparo adaptativa proposta, um método de síntese conjunta para definir os ganhos do controlador Fuzzy e os parâmetros do ETM é desenvolvida. HEEMELS et al. (2013) propõem uma estratégia PETC utilizada tanto para controladores baseados em realimentação de estados estático quanto para controladores baseados em realimentação dinâmica de saída. A estratégia pode ser utilizada para ETM's centralizados ou descentralizados (periódicos). Para analisar a estabilidade e as propriedades de ganho \mathcal{L}_2 dos sistemas PETC resultantes, foram apresentadas três abordagens diferentes baseadas em: sistemas impulsivos, sistemas lineares por partes (Piecewise), e sistemas lineares com perturbações. LI et al. (2016) propõem uma síntese conjunta do ETM que melhora a eficiência da transmissão e controle \mathcal{L}_{∞} para sistemas de controle via rede com atrasos de comunicação e distúrbios externos. Além disso, a síntese em conjunto para projetar o ETM e o controlador desejados fazem com que a ocupação da rede e o desempenho do controlador atinjam um nível esperado. LIU et al. (2020) desenvolveram um modelo de transmissão baseado em acionamento por evento para sistemas Fuzzy Takagi-Sugeno (T-S). Para economizar recursos da rede, dois ETM's foram introduzidos para determinar se a saídas medidas e as variáveis manipuladas devem ser transmitidas pela rede. Além disso, os parâmetros dos ETM's e os ganhos do controlador podem ser projetados em conjunto se as LMI's relacionadas forem compatíveis. COUTINHO & PALHARES (2021) definem com base na teoria de Lyapunov-Krasovskii, uma nova condição baseada em LMI para realizar a síntese conjunta do ETM dinâmico e do ganho do controlador para garantir a estabilidade e o desempenho \mathcal{L}_2 do sistema em malha fechada, para sistemas não lineares sujeitos a distúrbios. LUO et al. (2021) desenvolveram um método de controle subótimo acionado por eventos periódicos (PETSOC, periodic eventtriggered suboptimal control), para sistemas lineares de tempo contínuo. O ganho do controlador por realimentação de estados é baseado na solução da equação algébrica de Riccati. Para reduzir os recursos de comunicação e computação, uma condição de disparo verifica periodicamente em instantes de amostragem ao invés de continuamente. A forma contínua da condição de disparo foi empregada para analisar a existência e a condição do período de amostragem limite.

A contribuição principal desse trabalho é modificar o método apresentado em BELO (2021) e GONÇALVES et al. (2022) para fazer a síntese conjunta do controlador PI multivariável e dos parâmetros dos ETM's. O método é baseado em um problema de otimização multiobjetivo em que as funções objetivo são a integral de erro absoluto e o número de transmissões. Considerando que o controlador PI multivariável será sintonizado para as condições da rede com ETM, isto é, atrasos aleatórios, perdas de pacotes e transmissão por evento. Será aplicada uma versão aperfeiçoada do algoritmo de otimização evolução diferencial multiobjetivo para obter um conjunto de soluções eficientes que determinam simultaneamente os ganhos do controlador proporcional-integral multivariável, o período de amostragem e os parâmetros individuais dos mecanismos de transmissão por evento descentralizados de cada sensor e atuador. É esperado que o controlador tenha um melhor desempenho que um controlador que foi projetado considerando o sistema com amostragem periódica e transmissão de sinais sem os efeitos da rede, como foi considerado em BELO (2021) e GONÇALVES et al. (2022).

3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

3.1 Modelagem do NCS com ETC descentralizado

Considere o digrama de blocos do NCS apresentado na Figura 3.1, para sistema multivariável (MIMO, *multiple-input*, multiple-output), um com transmissão de dados disparada por evento. Na estrutura apresentada, tanto o processo guanto o controlador ficam alocados em locais distintos e são interligados por uma rede de comunicação, criando uma malha de controle remota. O controlador envia os sinais de controle para os atuadores via rede, enquanto os sensores realizam as medições dos sinais de saída do processo e enviam as informações para o controlador também utilizando a rede de comunicação. Os atuadores e sensores podem estar distribuídos em locais físicos distintos. O sistema em tempo contínuo é representado por um modelo linear invariante no tempo. Os sensores e controladores têm período de amostragem T_s e os disparos dos ETM's ocorrem de forma independente descentralizado (GONÇALVES et al., 2022).





Fonte: Reproduzido de BELO, 2021

O modelo discretizado do sistema, utilizando o método de discretização zero-order hold (ZOH) representado em espaço de estados, pode ser escrito como:

$$x(t_{k+1}) = Ax(t_k) + B_d d(t_k) + B_u \bar{u}(t_k),$$

$$y(t_k) = Cx(t_k),$$
(3.1)

sendo $t_k = kT_s$, com $k \in \mathbb{N}$, o vetor de estados definido por $x(t_k) \in \mathbb{R}^{n_x}$, o vetor de distúrbios definido por $d(t_k) \in \mathbb{R}^v$, o vetor de saídas definido por $y(t_k) \in \mathbb{R}^q$ e o vetor de variáveis manipuladas $\bar{u}(t_k) \in \mathbb{R}^p$ com os valores mais atuais recebidos até o instante t_k . As matrizes $A, B_d, B_u e C$ são constantes e previamente definidas. O controlador calcula periodicamente uma nova ação de controle e armazena no vetor $u(t_k)$. O valor do $i - \acute{esimo}$ sinal de controle, $\bar{u}_i(t_k)$, é mantido entre os períodos de amostragem pelo segurador de ordem zero (ZOH, *zero-order hold*), tal que: $\bar{u}_i(t) = \bar{u}_i(t_k), t \in [t_k, t_{k+1})$. O valor do $i - \acute{esimo}$ sinal de controle mantido no segurador, $\bar{u}_i(t)$, é diferente do último sinal de controle transmitido \hat{u}_i , e diferente do valor calculado periodicamente $u_i(t_k)$ devido aos atrasos da rede e perdas de pacote.

O controlador discreto possui período de amostragem, T_s , e é modelado no espaço de estados como:

$$x_{c}(t_{k+1}) = A_{c}x_{c}(t_{k}) + B_{c}[r(t_{k}) - \bar{y}(t_{k})], \qquad (3.2)$$
$$u(t_{k}) = C_{c}x_{c}(t_{k}) + D_{c}[r(t_{k}) - \bar{y}(t_{k})],$$

sendo $x_c(t_k) \in \Re^{n_c}$ o vetor de estados do controlador, $r(t_k) \in \Re^q$ o vetor de referência, $u(t_k) \in \Re^p$, o vetor de ação de controle, e $\bar{y}(t_k) \in \Re^q$ o vetor de saídas medidas com os valores mais atuais recebidos pelo controlador até o instante t_k . Nos parágrafos seguintes é descrita a forma de atualização dos vetores $\bar{u}(t_k)$, e $\bar{y}(t_k)$ que aparecem nas Equações (3.1) e (3.2), respectivamente.

Os mecanismos de disparo por evento ETM's, são responsáveis por definir quando será realizada transmissão das informações: dos sensores ao controlador e do controlador para os atuadores.

Devido à presença da rede é possível que ocorram atrasos de transmissão e perdas de pacotes entre sensores e controlador e controlador e

atuadores. O controlador pode calcular e transmitir uma nova ação de controle mesmo sem ter recebido nenhum sinal novo dos sensores, isso ocorre caso a integração do erro de rastreamento não seja nula, e consequentemente alcançar a condição de acionamento.

Considere que o sistema possua p entradas e q saídas, então o número de canais de comunicação pode ser contabilizado como a soma das entradas mais saídas, $\eta = q + p$. Para auxiliar no entendimento, foram definidos o vetor $v(t_k)$ empilhando as saídas, medidas periodicamente, e os sinais de controle calculados periodicamente pelo controlador, e o vetor $\bar{v}(t_k)$ como sendo as saídas medidas mais atuais recebidas pelo controlador e sinais de controle mais atuais recebidos pelos atuadores:

$$v(t_k) = \begin{bmatrix} y(t_k) \\ u(t_k) \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{q+p}, \qquad \overline{v}(t_k) = \begin{bmatrix} \overline{y}(t_k) \\ \overline{u}(t_k) \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{q+p}.$$
(3.3)

Seja \hat{t}_i o momento da transmissão de v_i , que é enviado agrupado com o valor do sinal amostrado, { $v_i(\hat{t}_i), \hat{t}_i$ }, utilizando a técnica de estampas de tempo (*timestamp*). Esta estratégia é utilizada em alguns protocolos de comunicação para permitir calcular o atraso real medido na rede. A técnica consiste em acrescentar uma marca de tempo ao pacote de dados com objetivo de evidenciar o momento exato do cálculo da variável investigada (NETO, 1997).

Como mencionado no capítulo anterior, devido aos atrasos aleatórios causados pela presença da rede de comunicação, pode ocorrer que no intervalo entre duas amostragens cheguem ao controlador ou aos atuadores, várias mensagens de forma que:

$$\hat{t}_i + \tau_i(\hat{t}_i) \in [t_k, t_{k+1}),$$
 (3.4)

sendo $\tau_i(\hat{t}_i)$ o atraso aleatório da rede, que depende de cada canal individualmente e do momento \hat{t}_i em que ocorreu a transmissão. Seja $\bar{t}_i(t_{k+1})$ o momento de transmissão do valor atualmente armazenado em $\bar{v}_i(t_{k+1})$. Nas simulações os valores iniciais, no instante t_k , são configurados da seguinte forma: $\bar{v}_i(t_{k+1}) = \bar{v}_i(t_k)$ e $\bar{t}_i(t_{k+1}) = \bar{t}_i(t_k)$. Considere ainda que tanto o controlador quanto os atuadores devem possuir formas de eliminar os valores cujos momentos de transmissão \hat{t}_i sejam menores que $\bar{t}_i(t_{k+1})$, ou seja, caso a estampa de tempo do momento de transmissão da informação recebida seja menor que a estampa de tempo atual armazenada, o controlador ou atuador deve ignorar o pacote recebido com a estampa de tempo antiga. Para cada transmissão com *timestamp* { $v_i(\hat{t}_i), \hat{t}_i$ } que é recebida no intervalo entre dois instantes de amostragem, [t_k, t_{k+1}], é avaliado se o tempo de transmissão é mais recente que o do armazenado, { \bar{v}_i, \bar{t}_i }:

$$SE \hat{t}_{i} > \bar{t}_{i}(t_{k+1}) ENTÃO$$

$$\bar{t}_{i}(t_{k+1}) \leftarrow \hat{t}_{i} \qquad (3.5)$$

$$\bar{v}_{i}(t_{k+1}) \leftarrow v_{i}(\hat{t}_{i})$$

$$SENÃO \ descarta \{v_{i}(\hat{t}_{i}), \hat{t}_{i}\}.$$

Desta forma, se nenhum novo valor chegar para variável v_i , o valor de \bar{v}_i se mantém igual ao valor anterior, caso contrário, o pacote com maior estampa de tempo é utilizado, ou seja, os valores desatualizados são eliminados.

Para economizar o uso da rede de comunicação de dados, pode ser utilizado ETM's para determinar o momento de transmissão dos sinais $v_i(t_k)$. A ideia básica da transmissão definida por ETM é transmitir a informação somente quando existir uma variação significativa entre o dado atual e o último dado transmitido. Deve-se levar em conta \hat{v}_i como o valor da última transmissão de v_i , tal informação deve estar disponível em todos os sensores e no controlador. A informação, $v_i(t_k)$, só é enviada se a condição de disparo for alcançada, ou seja, a diferença entre o valor atual, $v_i(t_k)$, e o último valor transmitido, \hat{v}_i , alcança a condição de disparo do mecanismo, δ_i . Os sensores e atuadores estão espacialmente distribuídos e a decisão da transmissão de $v_i(t_k)$ ou não, é individual, ou seja, não é necessário que todos os sensores e atuadores transmitam de forma simultânea a cada período de amostragem. A forma de mensurar se a informação nova deve ser transmitida ou não, ou condição de disparo, define os diferentes tipos de ETM. Para cada tipo de ETM considerado nesse trabalho existem um ou dois parâmetros que definem os limiares da condição de disparo.

Como este trabalho é uma extensão do trabalho apresentado em BELO (2021), e para efeito de comparação, são considerados os mesmos ETM's:

ETM-1: Valor absoluto do erro (MISKOWICZ, 2006):

$$\psi_i(t_k) = |v_i(t_k) - \hat{v}_i| \ge \delta_i. \tag{3.6}$$

ETM-2: Erro ao quadrado:

$$\psi_i(t_k) = [v_i(t_k) - \hat{v}_i]^2 \ge \delta_i.$$
(3.7)

ETM-3: Integral do valor absoluto do erro:

$$\psi_i(t_k) = \psi_i(t_{k-1}) + T_s |v_i(t_k) - \hat{v}_i| \ge \delta_i.$$
(3.8)

ETM-4: Integral do erro ao quadrado:

$$\psi_i(t_k) = \psi_i(t_{k-1}) + T_s[v_i(t_k) - \hat{v}_i]^2 \ge \delta_i.$$
(3.9)

ETM-5: Valor relativo do valor absoluto do erro (TABUADA, 2007):

$$\psi_i(t_k) = |v_i(t_k) - \hat{v}_i| \ge \delta_i |\hat{v}_i|.$$
(3.10)

ETM-6: Valor relativo do erro ao quadrado (DONKERS; HEEMELS, 2010; JR.; TABUADA, 2011):

$$\psi_i(t_k) = [v_i(t_k) - \hat{v}_i]^2 \ge \delta_i \hat{v}_i^2.$$
(3.11)

ETM-7: Valor relativo do valor absoluto do erro combinado com valor absoluto (TIAN et al., 2019):

$$\psi_i(t_k) = |v_i(t_k) - \hat{v}_i| \ge \delta_i |\hat{v}_i| + \delta_{\eta+i}.$$
(3.12)

ETM-8: Integral do valor absoluto do erro combinado com valor absoluto:

$$\psi_i(t_k) = \psi_i(t_{k-1}) + T_s |v_i(t_k) - \hat{v}_i| \ge \delta_i - \delta_{\eta+i} |v_i(t_k) - \hat{v}_i|. \quad (3.13)$$

Com base na lei de transmissão, sempre que o limite for excedido, é transferido { $v_i(t_k), t_k$ } e $\hat{v}_i \leftarrow v_i(t_k)$. Os ETM's 1 a 6 possuem um parâmetro a ser configurado ao passo que os ETM's 7 e 8 possuem dois parâmetros de configuração. O valor desses parâmetros irá definir o compromisso entre o uso da rede e o desempenho do sistema de controle. Por fim, nos ETM's 3,4 e 8, toda vez que o limite é alcançado a integral numérica é redefinida igual a zero, $\psi_i(t_k) \leftarrow 0$. Pode-se encontrar os mecanismos baseados na integral do erro em MOUSAVI et al. (2015), ZHANG, YU e Hao (2016), YU & HAO (2017), ZHANG et al. (2020).

É considerado que tanto os sensores quanto o controlador devem ser capazes de implementar de forma independente às técnicas de disparo por evento, ou seja, calcular a função ψ_i , armazenar a informação de \hat{v}_i , e transmitir o dado com a estampa de tempo conforme protocolo de comunicação da rede. Por fim, os atuadores e controlador devem ser capazes de armazenar a estampa de tempo da informação atual e comparar esse valor com cada pacote novo recebido para definir se atualiza o valor do sinal ou se descarta a informação obsoleta.

Um dos desafios no projeto de sistemas de controle acionados por eventos é garantir que o gerador de eventos não leve ao comportamento Zeno (HEEMELS; JOHANSSON; TABUADA, 2012), ou seja, a ocorrência de infinitos eventos no mesmo instante, sem intervalo de tempo entre eles, ou a ocorrência de tempos entre eventos que tendem a zero à medida que o tempo tende a infinito. Como nesse trabalho consideramos que a medição é realizada de forma periódica e não contínua, tal efeito é evitado uma vez que o intervalo de tempo entre dois eventos é de pelo menos um período de amostragem.

Para o projeto do sistema de controle via rede, os parâmetros de otimização são os limiares das leis de transmissão, δ_k , $k = 1, ..., \eta$ sendo $\eta = p + q$, para os ETM-1 ao ETM-6 e $k = 1, ..., 2\eta$, para ETM-7 e ETM-8, o período de amostragem, T_s , e os ganhos dos controladores PI, $k_{P,ij}$, e $k_{I,ij}$, i = 1, ..., q, j = 1, ..., p, tal que $\chi = [\delta_1, ..., \delta_k, T_s, k_{P,11}, k_{I,11}, ..., k_{P,qp}, k_{I,qp}]^T$, sendo χ o vetor de variáveis de otimização. Como os parâmetros do controlador e período de amostragem são variáveis de otimização, seus valores irão variar para cada tipo de ETM e solução escolhida.

O conjunto de parâmetros de configuração dos ETM's devem respeitar a um compromisso entre número de transmissões (taxa de ocupação da rede) e o desempenho do sistema. Como estes objetivos são conflitantes, a melhor forma de resolver esta questão é através da otimização multiobjetivo. Ela permite alcançar diferentes soluções tendo diferentes compromissos entre os objetivos. Além disso, como o sistema de controle irá lidar com uma amostragem aperiódica, que depende tanto das configurações dos ETM's quanto do período de amostragem utilizado tanto para medição quanto para atualização da ação de controle, é importante que o controlador também seja otimizado em conjunto com
os parâmetros dos ETM's. Por fim, como o período de amostragem também afeta o compromisso entre o uso da rede e o desempenho do sistema de controle apresentado na Figura 3.1, é importante também considerar o período de amostragem como variável de otimização. Valores menores de período de amostragem a princípio poderiam melhorar o desempenho do controlador. Entretanto, menores períodos de amostragem podem implicar em maior sobrecarga na rede e consequentemente maiores atrasos e perdas de pacote, o que impacta o desempenho do sistema de controle. A inclusão dos parâmetros do controlador e do período de amostragem como variáveis de otimização é uma das principais diferenças em relação ao trabalho de BELO (2021). Uma segunda diferença importante é que diferente do método em BELO (2021), as funções objetivo são calculadas com base em um valor médio para várias simulações, considerando o aspecto estocástico do sistema de controle via rede.

3.2 Otimização multiobjetivo

0 algoritmo Evolução Diferencial (DE, Differential Evolution) foi desenvolvido por STORN E PRICE (1997) para resolver problemas de otimização não lineares com variáveis de otimização reais. O método desenvolvido utiliza operadores de mutação, cruzamento e seleção para gerar uma nova população a cada geração que converge para um mínimo local com possibilidade de convergência para o mínimo global do problema. Para utilizar o algoritmo DE para resolução de problemas multiobjetivos, é acrescentado uma nova forma de seleção baseado em dominância, sendo aplicado um método de elitismo similar ao do algoritmo genético com ordenamento por não dominância II (NSGA-II, Nondominated Sorting Genetic Algorithm) (DEB at al., 2002), para obtenção das soluções candidatas. Além disso, será utilizado uma forma adicional de elitismo sobre a fronteira 1, proposto por GONÇALVES et al. (2022), com intuito de melhorar as soluções candidatas ao conjunto Pareto ótimo. Nas seções a seguir será detalhado o método aplicado.

3.2.1 Algoritmo Evolução Diferencial

Nessa seção será apresentado o algoritmo DE básico, utilizado para resolver problemas mono-objetivo, base do método de otimização multiobjetivo utilizado neste trabalho.

Considere o problema de otimização mono-objetivo:

$$\boldsymbol{\chi}^* = \arg\min_{\boldsymbol{\chi}} \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\chi}), \qquad (3.14)$$

sendo $\chi \in \Re^{\eta}$, o vetor de variáveis de otimização, $f(\chi) : \chi \in \Re^{\eta} \mapsto \Re$, a função objetivo escalar, e χ^* a solução ótima para o problema. Considere ainda $\mathcal{U}_{(a,b)}$, a função que gera um número real aleatório uniformemente distribuído no intervalo [a,b), e *N* o número de indivíduos da população gerados de forma aleatória, que devem conter a área de busca do problema. Uma boa prática para escolha do tamanho da população é adotar $5\eta \leq N \leq 10\eta$, sendo η o número de variáveis de otimização, $\eta = p + q$.

Seja $\chi_k = {\chi_{k,i}; i = 1, ..., N}$ a população da k - ésima iteração, de forma que a i - ésima solução da população é caracterizada por:

$$\boldsymbol{\chi}_{k,i} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\chi}_{k,i,1} \\ \vdots \\ \boldsymbol{\chi}_{k,i,\eta} \end{bmatrix}.$$
 (3.15)

O algoritmo começa com uma população gerada de forma aleatória dentro do espaço de busca definido por:

$$\{\boldsymbol{\chi}_{1,i,j} = \boldsymbol{\mathcal{U}}_{(x_i,\overline{x}_i)}, i = 1, \dots, N, \ j = 1, \dots, \eta\},$$
(3.16)

sendo \underline{x}_i e \overline{x}_i os valores mínimo e máximo, respectivamente, admitidos inicialmente para a variável x_i .

O conceito por trás do algoritmo Evolução Diferencial é a criação de novos indivíduos, pela introdução de um vetor, definido como vetor mutante, calculado como sendo a soma de um indivíduo com a diferença ponderada de outros dois indivíduos, sendo todos eles selecionados de forma aleatória na população atual. Esse cálculo também é conhecido como mutação diferencial.

Definindo números inteiros aleatórios, $r_1, r_2, r_3 \in [1, N]$, de forma que $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$, a mutação do indivíduo *i* pode ser obtida pela seguinte operação:

$$\boldsymbol{\nu}_{k,i} = \boldsymbol{\chi}_{k,r_1} + F_i(\boldsymbol{\chi}_{k,r_2} - \boldsymbol{\chi}_{k,r_3}), \qquad (3.17)$$

sendo F_i o fator de escala aplicado sobre o vetor diferença, usualmente $F_i \in [0,5; 1]$, aleatório para cada operação de mutação.

Após a mutação é executado o operador cruzamento sobre os indivíduos da população χ_k e da população mutante $v_k = \{v_{k,i}; i = 1, ..., N\}$, gerando a população de teste $u_k = \{u_{k,i}; i = 1, ..., N\}$. Este procedimento é denominado *crossover*. A probabilidade de cruzamento $C_r \in [0,1]$. Desta forma, as variáveis das soluções teste são obtidas da seguinte forma:

$$\boldsymbol{u}_{k,i,j} = \begin{cases} \boldsymbol{v}_{k,i,j}, & \text{se } \boldsymbol{\mathcal{U}}_{(0,1)} \leq C_r \\ \boldsymbol{\chi}_{k,i,j}, & \text{caso contrário} \end{cases}$$
(3.18)

sendo $\boldsymbol{\mathcal{U}}_{(0,1)}$, um número aleatório com distribuição uniforme na faixa [0,1).

O método utiliza a função objetivo a ser minimizada para avaliar os novos indivíduos e compará-los com a população atual. Assim como na seleção natural, cada novo indivíduo $u_{k,i}$ sobreviverá quando possuir menor valor de função objetivo do que o indivíduo pai, $\chi_{k,i}$, ou seja:

$$\boldsymbol{\chi}_{k+1,i} = \begin{cases} \boldsymbol{u}_{k,i,} & se \quad \boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}_{k,i}) < \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\chi}_{k,i}) \\ \boldsymbol{\chi}_{k,i,} & caso \ contrário, \ i = 1, \dots, N. \end{cases}$$
(3.19)

3.2.2 Problema de Otimização multiobjetivo

Um problema de otimização multiobjetivo consiste em encontrar um vetor de variáveis de decisão que atendam algumas restrições definidas e otimize uma função constituída por mais de uma função objetivo, (ARROYO, 2002). Essas funções podem ter relacionamentos conflitantes, o que traz uma complexidade maior quando comparados a problemas mono-objetivos. Nos problemas multiobjetivos existem infinitas soluções com diferentes compromissos entre os objetivos. Considere o problema de otimização multiobjetivo (POM):

$$\min_{\chi} f(\chi) \text{ sujeito } a: \chi \in \mathcal{F}_{\chi}, \tag{3.20}$$

sendo $f(\cdot): \mathfrak{R}^{\eta} \mapsto \mathfrak{R}^{m}$ o vetor de objetivos do problema e $\mathcal{F}_{\chi} \subset \mathfrak{R}^{\eta}$ a região factível. Os vetores χ são definidos como vetores de parâmetros do POM. Deseja-se determinar o conjunto \mathbb{X}^{*} denominado conjunto de soluções não dominadas ou conjunto Pareto-ótimo, $\mathbb{X}^{*} \subset \mathcal{F}_{\chi}$.

Para definição do conceito de dominância, a seguinte notação é empregada para vetores em \Re^m :

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &\leq \mathbf{y} \Rightarrow \{ x_i \leq y_i, i = 1, \dots, m \}, \\ \mathbf{x} \neq \mathbf{y} \Rightarrow \{ \exists_i | x_i \neq y_i \}. \end{aligned}$$
 (3.21)

Uma solução x_1 domina uma solução x_2 se $f(x_1) \leq f(x_2)$ e $f(x_1) \neq f(x_2)$ $f(x_2)$, isto é, x_1 não é pior que x_2 em nenhum objetivo e é melhor em pelo menos um objetivo. Uma solução $\chi^* \in \mathcal{F}_{\chi}$, é dita Pareto-ótima, do problema de otimização multiobjetivo, $\chi^* \in \mathbb{X}^*$ se não existe $\chi \in \mathcal{F}_{\chi}$ tal que $f(\chi) \leq f(\chi^*)$ e $f(\chi) \neq f(\chi^*)$, ou seja, se χ^* não é dominada por nenhuma outra solução factível.

Em um problema multiobjetivo, onde os objetivos são conflitantes, não existe apenas uma solução ótima quando avaliados todos os objetivos. Considere a Figura 3.2, a qual refere-se a minimização das funções objetivos $f_1 e f_2$. A redução de uma função objetivo f_1 , implica no aumento da f_2 , e viceversa. Desta forma, a avaliação da melhor solução deve ser realizada através do conceito de Dominância de Pareto (PARETO; 1896). É possível perceber na Figura 3.2 que o ponto C é dominado pelos pontos A e B, em contrapartida o ponto C domina os pontos E e F. Os pontos C, D e G estão na mesma fronteira, ou seja, não existe relação de dominância entre si.

O conjunto de soluções não dominadas geradas por um algoritmo de otimização multiobjetivo são denominadas soluções candidatas ao conjunto Pareto-ótimo, pois nem sempre o algoritmo é capaz de determinar a fronteira Pareto ótima.

Figura 3.2: Conjunto de soluções factíveis e dominância em um problema multiobjetivo de minimização.



Fonte: Adaptado de (HASHIMOTO, 2004)

3.3 Formulação do problema.

O principal ganho da utilização da transmissão de dados utilizando ETM's em NCS é a redução da taxa de ocupação da rede. O efeito da redução do número de transmissões pode ser a degradação do desempenho do sistema de controle ou até mesmo levar a instabilidade do sistema, visto que há menor número de atualizações das informações das saídas e atuadores. Seguindo a mesma ideia do trabalho desenvolvido por BELO (2021), para se atingir o melhor desempenho do sistema e menor utilização da rede, é considerado neste trabalho formular o problema de projeto do NCS, que inclui a determinação do período de amostragem, a sintonia dos controladores PI e o ajuste dos parâmetros dos ETM's, como um problema de otimização multiobjetivo. As funções objetivo a serem minimizadas (BELO, 2021, GONÇALVES et al., 2022) são:

1. Integral do erro absoluto (IAE, *Integral Absolute Error*), aproximada pela regra dos trapézios:

$$f_1 = \frac{1}{2T_s} \sum_{k=1}^{n_k} \sum_{j=1}^{q} [|e_j(t_k)| + |e_j(t_{k-1})|], \qquad (3.22)$$

em que $e_j(t_k) = r_j(t_k) - y_j(t_k)$ é o erro de rastreamento e $n_k T_s$ o tempo máximo de simulação.

2. Número total de transmissões via rede:

$$f_2 = N_t = \sum_{i=1}^{\eta} N_{t,i}, \qquad (3.23)$$

em que $N_{t,i}$ é o número total de transmissões de cada sinal v_i .

Para avaliação das funções objetivos $f_1 e f_2$, são realizadas simulações com o vetor de sinais de referência, $r(t_k)$ e vetor de distúrbios, $d(t_k)$, exclusivos para cada estudo de caso.

O tempo máximo de simulação T_{max} , foi escolhido de forma que a simulação permaneça durante um período significativo em regime estacionário

para que o erro de regime estacionário tenha influência sobre o cálculo da função objetivo f_1 .

A definição da função objetivo é a mesma apresentada em BELO (2021) e GONÇALVES et al. (2022), o que muda nesse trabalho são as variáveis de otimização que, além dos parâmetros dos ETM's, incluem os parâmetros do controlador e o período de amostragem. Considerando que os atrasos induzidos pela rede e as perdas de pacote são aleatórias, diferente de BELO (2021) e GONÇALVES et al. (2022), foi adotado nesse trabalho calcular as funções objetivo como sendo o valor médio de vinte simulações, em que cada simulação possui um perfil de atrasos e perdas de pacotes diferentes. O maior custo computacional envolvido com a necessidade de realizar múltiplas simulações é justificado porque foi observado que o valor médio pode ser significativamente diferente do resultado de uma única simulação. Cabe ressaltar que para cada solução avaliada teremos diferentes matrizes de atrasos e perdas, pois estas variáveis dependem do período de amostragem, que pode ser diferente para cada solução. Somente a sequência de números aleatórios é a mesma. Esse fato justifica ainda mais usar média para calcular a função objetivo.

3.4 Simulação do NCS

Para calcular as funções objetivos apresentadas na seção anterior, é necessário simular o NCS considerando os atrasos aleatórios nas transmissões de sinais e as perdas de pacotes. No sistema de controle apresentado na Figura 3.1, é possível perceber que os elementos sensores realizam a medição de acordo com o período de amostragem, mas a transmissão da informação acontece baseada em evento. O controlador, com os parâmetros otimizados, calcula uma nova ação de controle de forma periódica, tendo recebido ou não a atualização dos sensores. A transmissão da ação de controle é baseada em evento e os atuadores atualizam esta informação a cada período de amostragem. Caso os atuadores não recebam uma atualização, é mantido o valor da última ação de controle mais atual recebida. Tanto a transmissão da informação dos sensores para o controlador, quanto do controlador para os atuadores é baseada em evento, de forma independente (decentralizada), quando a condição de acionamento do ETM específico é alcançada. Para este

trabalho foram considerados atrasos de transmissão $\tau_{i,k} = \tau_i(t_k)$ que acontecem no *i* – *ésimo link* de transmissão no momento de amostragem t_k , tal que:

$$\tau_{i,k} = \rho \left| \frac{\phi_{i,k}}{T_s} \right|. \tag{3.24}$$

A matriz de atrasos $\tau_{i,k}$ foi concebida utilizando a variável aleatória $\phi_{i,k}$, que possui distribuição normal, média zero e variância unitária. A constante ρ , que determina a variância do atraso, foi definida em BELO (2021), a fim de ter atrasos em torno de 20 períodos de amostragem, mas para este trabalho o período de amostragem não é conhecido (é otimizado). Apesar disso, foram mantidos os mesmos valores do trabalho de BELO (2021). Desta forma, para cada solução obtida, haverá um período de amostragem diferente e para menores períodos de amostragem maiores serão os atrasos em termos de número de períodos de amostragem. Para fins de simulação, os elementos da matriz de atrasos, $\tau_{i,k}$ são arredondados para cima, a fim de gerar múltiplos inteiros do período de amostragem e indicar em qual instante de amostragem o sinal transmitido chegará ao destino.

Para simulação também foram consideradas as perdas de pacotes, $\xi_{i,k}$, limitadas a 5% em relação ao número total de transmissões periódicas. Estas perdas não têm relação com as mensagens descartadas pelo controlador e atuador devido aos atrasos de transmissão. A matriz é definida com valores 0 ou 1, uniformemente distribuídos e $\xi_{i,k}$ indica o *k*-ésimo instante de amostragem, do *i*-ésimo sensor ou atuador, no qual ocorrerá a perda.

As entradas externas utilizadas são representadas pela função degrau unitário $U(t - t_0)$ deslocado no tempo por t_0 , e cuja representação no tempo contínuo é dada por:

$$U(t - t_0) = \begin{cases} 0, \ se \ t < t_0, \\ 1, \ se \ t \ge t_0. \end{cases}$$
(3.25)

Para registrar os valores mais atuais em cada instante de tempo, que são utilizados nas Equações (3.1) e (3.2), foi criada inicialmente a matriz V_t e para registro dos instantes de transmissão foi criada a matriz γ . Essas duas matrizes possuem uma linha para cada canal de comunicação e uma coluna para cada instante de amostragem. As matrizes V_t e γ recebem inicialmente o valor zero.

Quando um sinal é transmitido, é calculado o instante em que ele será recebido, i_c . Como existe atraso na transmissão, o instante de recebimento fica deslocado do valor do atraso, $\tau_{i,k}$, ou seja, $i_c = k + \tau_{i,k}$, $\tau_{i,k} \ge 1$. Vale ressaltar que o atraso controlador-atuador só é conhecido depois da execução da ação de controle quando a mensagem de ACK (*acknowledgement*) retorna com o valor do instante do recebimento. O valor do sinal transmitido é alocado na matriz V_t na posição i_c , e o valor do instante de transmissão t_k é alocado na matriz γ , na posição correspondente. Como mencionado, os valores de \bar{u} e \bar{y} são determinados a partir da *k*-ésima coluna da matriz V_t de acordo com o instante de amostragem em avaliação. Caso o valor seja zero, então é possível concluir que não chegou nenhuma transmissão e então é mantido o valor anterior. Se alguma transmissão foi recebida, é avaliado se o instante de transmissão é mais atual do que o anterior, se sim, o valor de V_t se mantém, e o valor do instante de tempo de transmissão, ς_i , é atualizado, caso não, o valor recebido é desprezado e substituído pelo último instante de amostragem.

No trabalho de BELO (2021), o autor propõe a utilização de 8 tipos de ETM's, e para efeito de comparação, serão utilizados os mesmos. O autor apresenta o algoritmo responsável pela simulação do NCS, dado um sistema MIMO, com transmissão de dados baseada em ETM. O Algoritmo 1, considerando o ETM-1 é reproduzido a seguir. Os parâmetros dos ETM's, controlador e período de amostragem são obtidos previamente, mediante as variáveis de otimização do problema multiobjetivo.

Algoritmo 1: ETM-1, reproduzido de BELO (2021).

Dados: $A; B_d; B_u; C; D_d; A_c; B_c; C_c; D_c; T_s; T_{max}; r;$ $x(1) \leftarrow 0; x_c(1) \leftarrow 0; N_t \leftarrow 0; \gamma \leftarrow 0; \hat{v}_i \leftarrow 0;$ 1 2 $\xi \leftarrow Matriz_de_Perdas;$ 3 $\tau \leftarrow Matriz_de_atrasos;$ 4 $V_t \leftarrow Criar_Matriz_de_transmissões;$ 5 para $k \leftarrow 1$ até T_{max}/T_s faça 6 para i ← 1 até q faça 7 8 fim

9 para i ← 1 até p faça $\overline{u}_{i,k} \leftarrow V_{t,q+1,k}$; 10 fim 11 $x(k+1) \leftarrow Ax(k) + B_d d(k) + B_u \overline{u}(k);$ 12 $y(k) \leftarrow Cx(k);$ 13 $x_c(k+1) \leftarrow A_c x_c(k) + B_c[r(k) - \bar{y}_k(k)];$ 14 $u(k) \leftarrow C_c x_c(k) + D_c[r(k) - \bar{y}_k(k)];$ 15 $v(k) \leftarrow [y(k)^T u(k)^T]^T;$ 16 **para** *i* ← 1 **at**é η **faça** 17 $\psi_i \leftarrow |v_i(k) - \hat{v}_i|;$ 18 19 se $\psi_i \geq \delta_i$ então $\hat{v}_i \leftarrow v_i(k);$ 20 $N_t \leftarrow N_t + 1;$ 21 se $\xi_{i,k} = 0$ então 22 $i_c \leftarrow k + \tau_{i,k};$ 23 se $i_c \leq T_{max}/T_s$ então 24 $V_{t,i,i_c} \leftarrow v_i(k);$ $\gamma_{i,i_c} \leftarrow k;$ 25 26 27 fim 28 fim 29 fim 30 fim se k < T_{max}/T_s então 31 **para** i ← 1 **at**é η **faça** 32 33 se $\varsigma_i > \gamma_{i,k+1}$ então $V_{t,i,k+1} \leftarrow V_{t,i,k}$ 34 35 senão 36 $\varsigma_i \leftarrow \gamma_{i,k+1}$ 37 fim 38 fim 39 fim 40 fim

41 retorna 42 $f_1 \leftarrow IAE;$ 43 $f_2 \leftarrow N_t;$

3.5 Algoritmo Evolução Diferencial Multiobjetivo

Para obtenção dos parâmetros dos ETM's, assim como os parâmetros do controlador e período de amostragem, foi utilizado o método proposto em GONÇALVES et al. (2022) que utiliza como base o DE multiobjetivo (DEMO, Differential Evolution for Multi-objetive Optimization) (ROBIC; FILIPIC, 2005). O que destaca o DEMO em relação ao DE é o processo de seleção baseado em dominância. Caso a solução de teste domine a solução atual, então a solução teste substitui a solução atual. Caso a solução teste não domine a solução atual mas também não é dominada pela solução atual, ela é acrescentada na população sem remover a solução atual, aumentando o tamanho da população. Caso a solução teste seja dominada pela solução atual, ela é descartada. Para contornar a questão do aumento da população é utilizado parte do algoritmo NSGA-II, que tem como premissa a redução o tamanho da população, avaliando o índice da fronteira e a distância de aglomeração entre as soluções dentro de uma mesma fronteira. O algoritmo NSGA-II foi proposto por SRINIVAS E DEB (1994), cujos objetivos foram a redução do custo computacional, acrescentar o elitismo no processo de seleção das soluções e redução do número de parâmetros do código. O NSGA-II também busca melhorar a diversidade das soluções, promovendo o espalhamento de soluções ao longo da curva de Pareto.

3.6 Nova abordagem utilizando o DEMO

Observando as fronteiras Pareto-ótimas calculadas pelo algoritmo DEMO em relação ao número de gerações, N_g , foi evidenciado que algumas soluções da fronteira final podem ser dominadas por soluções de gerações anteriores que foram descartadas pela técnica do NSGA-II utilizada no DEMO. O objetivo final da técnica de ordenamento por não-dominância é reduzir o tamanho da população para o tamanho N após a operação de seleção. No processo de triagem do NSGA-II, as soluções são ordenadas em fronteiras. O conjunto de soluções que não são dominadas por outras fazem parte da fronteira 1, que é a fronteira mais próxima da Pareto-ótima. Estas soluções pertencentes a fronteira 1 são removidas da população atual e as soluções não dominadas remanescentes são classificadas na fronteira 2. O procedimento se repete até que todas as soluções sejam ordenadas em uma fronteira. As soluções da população da geração seguinte são escolhidas pela ordem de classificação por fronteiras, iniciando da fronteira 1, que é a característica do elitismo desta técnica. Para preencher as N soluções para a geração seguinte, pode ser necessário adicionar parte de uma fronteira caso o total de soluções da próxima geração fique maior que N com a inclusão das soluções dessa fronteira. Quando isto ocorre, para definir quais soluções serão escolhidas dessa fronteira, é utilizado um outro método de seleção. Para o NSGA-II e no DEMO, é utilizado o operador de distância de aglomeração (DEB et al., 2002). De acordo com este método, as soluções mais distantes no espaço de objetivos serão priorizadas na seleção, o que garante uma melhor distribuição das soluções. A remoção destas soluções cria um problema, pois entre as soluções removidas pode haver soluções que dominem soluções de uma futura fronteira Pareto-ótima. Para tentar solucionar este problema, será utilizado uma forma adicional de elitismo sobre a fronteira 1, proposto por GONÇALVES et al. (2022), que será replicada neste trabalho.

Considere $|F_i|$ como o número de soluções contidas na i - ésimafronteira. Caso $|F_1| = N$, então a geração seguinte é definida como $X_{k+1} = F_1$. Caso $|F_1| < N$, então X_{k+1} é formada pelas soluções de F_1 mais soluções das fronteiras seguintes até atingir N. Caso seja necessário selecionar parcialmente uma fronteira, é empregada a técnica da distância de aglomeração para a escolha de modo a garantir a distribuição das soluções, como evidenciado na Figura 3.3. Por fim, caso $|F_1| > N$, também é empregada a técnica da distância de aglomeração para definir as N soluções de F_1 que resultem na melhor distribuição de soluções, mas neste caso, de acordo com a técnica do NSGA-II, as soluções não escolhidas de F_1 são eliminadas.

Foi observado que algumas das soluções obtidas ao fim da simulação eram dominadas por soluções pertencentes a fronteira 1 que foram removidas em iterações anteriores. Desta forma, foi proposto modificar o processo de seleção do NSGA-II, reutilizando mais N soluções da fronteira 1, guardando as soluções descartadas em um arquivo $\overline{F_1}$, de tamanho limitado a N, como forma complementar de elitismo da fronteira 1.



Figura 3.3: Técnica de seleção de acordo com algoritmo NSGA-II.

Fonte: Adaptado de DEB et al., 2002.

Como pode ser visto na Figura 3.4, para a situação em que $|F_1| > N$, ao fim da operação de seleção, a população é mantida igual a N, e as próximas N soluções de F_1 não utilizadas, são guardadas no arquivo $\overline{F_1}$. As soluções mantidas em $\overline{F_1}$ são reinseridas na nova geração, \hat{X}_{k+1} , após as operações de mutação, cruzamento e seleção binária (seleção entre a solução atual e teste). Desta forma, na técnica de seleção por ordenação de não dominância são consideradas as soluções atuais e as soluções do arquivo $\overline{F_1}$. Caso $|F_1| \le N$, o conjunto $\overline{F_1} = \emptyset$. O objetivo de se limitar $\overline{F_1}$ a N soluções é evitar um crescimento no número de soluções que impactaria diretamente no custo computacional no procedimento de seleção por não dominância.

Figura 3.4: Técnica de seleção baseado no NSGA-II com reaproveitamento de soluções descartadas da Fronteira 1.



Fonte: Reproduzido de GONÇALVES et al. (2022)

3.7 Conclusão

Nesse capítulo foi apresentado a formulação do problema de projeto do NCS com transmissão baseada em eventos como um problema de otimização multiobjetivo, foi descrito como é realizada a simulação do NCS para cálculo das funções objetivos e foi apresentado o método de otimização empregado para solução do problema multiobjetivo. No próximo capítulo, o método descrito nesse capítulo será empregado para o projeto do NCS sendo avaliado em três exemplos ilustrativos.

4 ESTUDOS DE CASOS

Neste capítulo será avaliada a utilização do método proposto de projeto conjunto dos ETM's e sintonia dos controladores no controle via rede, sendo analisados três sistemas multivariáveis distintos. Será avaliado o desempenho de cada sistema para os oito ETM's descritos na seção 3.1, observando sempre o número de transmissões e o índice de desempenho integral do erro absoluto (IAE). Diferente do que foi apresentado em BELO (2021), para cada ETM o algoritmo retorna a melhor sintonia dos controladores e também o melhor período de amostragem utilizado para sintonia. O objetivo é verificar se a melhoria no desempenho do sistema de controle via rede, ao se projetar conjuntamente os ETM's e controladores, além da determinação do período de amostragem, compensa o aumento do custo computacional com o número maior de variáveis de otimização. Por fim, são expostos e comentados os resultados obtidos.

4.1 Apresentação do Estudo de Caso

Serão utilizados três sistemas multivariáveis, sendo os dois primeiros com 2 entradas e 2 saídas com 4 conexões ao todo, e o último com 5 entradas e 4 saídas, com total de 9 conexões:

- Sistema de Quatro Tanques (JOHANSSON, 2000)
- Coluna de Destilação Binária (WOOD; BERRY, 1973)
- Coluna de Destilação de Petróleo Bruto (MUSKE et al., 1991)

Os modelos obtidos experimentalmente são válidos para um ponto de operação e as variáveis são definidas como sendo suas variações em torno deste ponto de operação.

Para cada sistema avaliado foram utilizados os mesmos perfis de atrasos e percentuais de perdas, independente do ETM utilizado. Os atrasos são caracterizados pelo índice da variável v_i e o instante de tempo t_k correspondente.

Em cada estudo de caso, através do algoritmo de otimização multiobjetivo, descrito na seção 3.4, para cada ETM serão geradas 50 soluções diferentes de configurações do ETM, sintonia de controladores e períodos de

amostragem, com diferentes compromissos entre as duas funções objetivo: valor médio do total de transmissões e valor médio do IAE. Para efeito de comparação entre os resultados das simulações, foi estabelecido um critério em comum para todos os estudos de casos apresentados: as soluções devem possuir o menor número de transmissões para um IAE médio limite, definido como IAE_{limite} . Este é obtido utilizando o menor IAE encontrado, IAE_{menor} , considerando os resultados de todos os ETM's, multiplicado por 1,6, ou seja,

$$IAE_{limite} = IAE_{menor} \times 1,6. \tag{4.1}$$

Como comentado, os parâmetros dos controladores e o período de amostragem também são variáveis a serem otimizadas, não havendo valores fixos para os mesmos. Ou seja, para cada ETM existem 50 soluções diferentes com diferentes controladores e períodos de amostragem. Para cada ETM foi escolhida uma solução para avaliação do desempenho do projeto, que é comparada com o mesmo controlador e período de amostragem, mas sem o uso de ETM.

Para o cálculo das funções objetivo são realizadas 20 simulações, com diferentes perfis de atrasos e perdas de pacotes, e calculados os valores médios. No entanto, após o cálculo das soluções ótimas, são realizadas 200 simulações para cada solução encontrada, para uma avaliação mais precisa dos valores médios e desvio padrão.

Para análise dos resultados serão avaliados os oito ETM's e seus respectivos controladores por transmissão periódica (CTP), para uma solução escolhida. As variáveis a serem observadas serão: erro médio, *IAE*, número médio de transmissões, N_t , e número médio de perdas mais descarte de mensagens, N_{pl} . Diferente do que foi proposto em BELO (2021), no qual o CTP possuía número de transmissões fixas de acordo com o período de amostragem fixo, para a proposta atual o CTP, que serve de base de comparação, é aquele com sintonia dos controladores e período de amostragem da solução específica sendo avaliada. Isto se deve ao fato de o período de amostragem e parâmetros do controlador também serem variáveis de otimização.

Para análise dos resultados obtidos, foi levado em consideração os fatores degenerativos da rede como atrasos e perdas de pacotes. Para uma simulação mais próxima da rede de comunicação são utilizados valores de atrasos, τ , e perdas, ξ , calculados de forma aleatória, e são diferentes em cada nova simulação. Cabe ressaltar que a sequência de perfis de atrasos e perdas de pacotes é a mesma considerada em cada projeto de ETM.

Para cada solução selecionada para avaliação foram realizadas um total de β simulações. A escolha do valor de β baseou-se na análise empírica dos resultados das simulações, observando os valores médios das variáveis otimizadas, e observando que os valores médios não se alteraram significativamente após 100 simulações. Foi estipulado para este trabalho β = 200.

Seja $\overline{f_1}$ o erro médio, $\overline{f_2}$ o número médio de transmissões e \overline{N}_{pl} o número médio de perdas de pacotes mais as mensagens descartadas pelo controlador e atuador devido ao atraso. O cálculo das médias das funções, μ_1 , μ_2 e μ_3 do desvio padrão, σ_1 , σ_2 e σ_3 e perdas totais, N_{pl} , são apresentados pelas equações a seguir:

$$\overline{f}_{1} = \mu_{1} = \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^{\beta} f_{1,i} , \qquad \sigma_{1} = \sqrt{\frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^{\beta} (f_{1,i} - \mu_{1})^{2}} , \qquad (4.2)$$

$$\overline{f_2} = \mu_2 = \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^{\beta} f_{2,i} , \qquad \sigma_2 = \sqrt{\frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^{\beta} (f_{2,i} - \mu_2)^2} , \qquad (4.3)$$

$$\overline{N}_{pl} = \mu_3 = \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^{\beta} N_{pl,i} , \qquad \sigma_3 = \sqrt{\frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^{\beta} (N_{pl,i} - \overline{N}_{pl})^2} .$$
(4.4)

Os valores de $f_{1,i}$, $f_{2,i} \in N_{pl,i}$, $\forall i = 1, ..., \beta$, são os resultados da $i - \acute{esima}$ simulação, e $\overline{f_1}$, $\overline{f_2} \in \overline{N}_{pl}$ os valores médios correspondentes a β simulações.

4.2 Estudo de caso: Quatro Tanques

Considere o sistema de controle multivariável de quatro tanques apresentado na Figura 4.1, conforme adaptação de Johansson (2000). O objetivo é controlar os níveis dos tanques inferiores através das tensões aplicadas nas duas bombas. As válvulas de três vias introduzem interações entre as duas malhas de controle. Se a vazão de qualquer uma das bombas for direcionada mais para a outra malha de controle, o sistema passa a ter um comportamento de fase não-mínima (com zero positivo). A Tabela 4.1 apresenta as variáveis de interesse, conforme representação indicada na referida figura. O sistema, portanto, é composto por duas entradas e duas saídas.



Figura 4.1: Diagrama esquemático do sistema de controle de quatro tanques.

Fonte: Adaptado de (JOHANSSON, 2000)

Considerando o modelo linear invariante no tempo representado em espaço de estados descrito por:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \qquad (4.5)$$
$$y(t) = Cx(t).$$

Descrição	Tipo	Símbolo
Tensão Bomba 1	Entrada	$u_1 = v_1$
Tensão Bomba 2	Entrada	$u_2 = v_2$
Nível Tanque 1	Saída	<i>y</i> ₁
Nível Tanque 2	Saída	<i>y</i> ₂

Tabela 4.1: Variáveis do processo - Sistema de quatro tanques

Definindo os níveis dos quatro tanques como varáveis de estado e considerando o ponto de operação de fase mínima tal qual apresentado em Johansson (2000), as matrizes do modelo (4.5) são dadas por:

$$A = \begin{bmatrix} -0,0161 & 0 & 0,0435 & 0 \\ 0 & -0,0111 & 0 & 0,0333 \\ 0 & 0 & -0,0435 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,0333 \end{bmatrix}, \qquad B = \begin{bmatrix} 0,0833 & 0 \\ 0 & 0,0628 \\ 0 & 0,0479 \\ 0,0312 & 0 \end{bmatrix},$$
$$C = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

O controlador PI dinâmico em tempo discreto, com amostragem regular, T_s , com $t_k = kT_s$, $k \in \mathbb{N}$, e matrizes A_c , B_c , C_c , e D_c , é representado em espaço de estados da seguinte forma:

$$x_{c}(t_{k+1}) = A_{c}x_{c}(t_{k}) + B_{c}[r(t_{k}) - \bar{y}(t_{k})], \qquad (4.6)$$
$$u(t_{k}) = C_{c}x_{c}(t_{k}) + D_{c}[r(t_{k}) - \bar{y}(t_{k})].$$

Sendo $x_c(t_k) \in \Re^{n_c}$ o vetor de estados do controlador, $r(t_k) \in \Re^q$ o vetor de sinais de referência, $u(t_k) \in \Re^p$ o vetor de ação de controle e $\overline{y}(t_k) \in \Re^q$ o vetor de variáveis medidas com os valores mais atuais recebidos pelo controlador multivariável até o instante t_k .

O algoritmo proposto retorna os parâmetros dos controladores, que são apresentados por meio de funções de transferência:

$$K_{4T} = \begin{bmatrix} \frac{\chi_{k+2}S + \chi_{k+3}}{S} & \frac{\chi_{k+4}S + \chi_{k+5}}{S} \\ \frac{\chi_{k+6}S + \chi_{k+7}}{S} & \frac{\chi_{k+8}S + \chi_{k+9}}{S} \end{bmatrix},$$
(4.7)

sendo $k = 1, ..., \eta$, para os ETM-1 ao ETM-6 e $k = 1, ..., 2\eta$, para ETM-7 e ETM-8, e $\eta = p + q$. Após a obtenção dos parâmetros, o controlador K_{4T} é discretizado (ZOH) e é obtida uma realização no espaço de estados em tempo discreto, que é utilizada na simulação para o cálculo das funções objetivo.

Para cada ETM, são obtidos por meio de otimização multiobjetivo 50 ajustes diferentes dos parâmetros do controlador, do ETM e do período de amostragem capaz de estabilizar o sistema e atender a diferentes compromissos entre os dois objetivos especificados. Cabe ao projetista escolher a solução que mais se adequa às suas necessidades, observando o compromisso entre número de transmissões e IAE. Como o período de amostragem é uma das variáveis de otimização, foi definida uma faixa para os valores admissíveis: $T_s \in$ [0,1; 0,5] s, para o sistema de quatro tanques. A faixa de período de amostragem foi escolhida com base no estudo realizado no trabalho de BELO (2021), e foi adotado um intervalo mais abrangente que engloba os dois valores utilizados: $T_s = 0,25$ s e $T_s = 0,5$ s.

Para caracterização da rede, foram introduzidos atrasos de transmissão e perdas de pacotes. A técnica proposta neste trabalho utiliza valores de atrasos aleatórios com distribuição Normal, média zero e variância unitária para obtenção dos parâmetros dos ETM's, controladores e período de amostragem. Além disso foi considerado para o sistema de quatro tanques a constante escalar $\rho = 3$, Equação (3.24), mantendo o valor estabelecido por BELO (2021). Em relação as perdas de pacotes durante as transmissões, foi utilizado no sistema Quatro Tanques uma perda de 1% do total de transmissões se as mesmas fossem periódicas, seguindo o mesmo valor estabelecido no trabalho anterior.

A Figura 4.2 apresenta as curvas candidatas a Pareto-ótima para os 8 ETM's mostrando todas as 50 soluções, e a Figura 4.3 apresenta as soluções próximas da região utópica (mínimo das duas funções objetivo simultaneamente) obtidas através do processo de otimização para o sistema quatro tanques. É possível perceber o conjunto de soluções eficientes com diferentes relações entre o número médio de transmissões e o erro médio de rastreamento do sistema (IAE). Observando a Figura 4.3, nota-se que os ETM-1, ETM-2 e ETM-4 obtiveram os melhores resultados, com soluções mais próximas da solução utópica. O ETM-1 é melhor (domina os outros) para valores menores de IAE e pior para números menores de transmissões. Em contrapartida, avaliando

as leis de transmissão ETM-5 e ETM-6, é possível notar que elas apresentam um maior número de soluções dominadas, ou seja, soluções não eficientes.



Figura 4.2: Curvas de Pareto para sistema quatro tanques.

Figura 4.3: Região das curvas de Pareto próxima da solução utópica para sistema quatro tanques.



Para avaliação dos resultados foi definido como referência o IAE_{limite} , de acordo com a Equação (4.1). Este foi selecionado a partir do menor erro entre todos os ETM's, como pode ser visto na Tabela 4.2. De acordo com os dados obtidos, o ETM-8 apresenta o menor erro médio, logo, o $IAE_{menor} = 5,751$, e desta forma, o $IAE_{limite} = 9,202$. Pode ser observado pela Tabela 4.2 que os menores valores de IAE são obtidos para períodos de amostragem quase iguais ao valor mínimo admissível.

Transmissão:	ETM-1	ETM-2	ETM-3	ETM-4	ETM-5	ETM-6	ETM-7	ETM-8
Menor IAE:	5,879	5,890	5,799	6,318	5 , 827	6,584	6,165	5,751
Nt	15.930	25.922	6.596	24.758	28.062	27.447	2.715	25.509
Ts	0,1040	0,1019	0,1004	0,1024	0,1000	0,1000	0,1027	0,1033

Tabela 4.2: Menor erro médio obtido para cada ETM.

De posse do IAE_{limite} , o próximo passo é buscar pelas soluções que atendam ao requisito de valor limite de *IAE* com menor número médio de transmissões possível. A Tabela 4.3 e Figura 4.4 apresentam as melhores soluções obtidas para os oito modelos de ETM's utilizados para o sistema de quatro tanques. Cada ETM produziu 50 soluções eficientes, e foi escolhida apenas uma solução que atendesse ao compromisso: possuir o menor número de transmissões para um *IAE* \leq 9,202. As soluções apresentadas na Tabela 4.3 serão utilizadas como referências para análise dos resultados nesta seção. Pela Tabela 4.3 pode ser observado que o período de amostragem ótimo não é necessariamente o valor mínimo admissível. É importante ressaltar que quanto menor o período de amostragem, maior o uso da rede e consequentemente pode resultar em maiores atrasos e probabilidade de perdas de pacote, impactando o desempenho do sistema de controle.

Tabela 4.3: Melhores Soluçõe	s obtidas para	cada ETM,	considerando	o valor
limite de IAE, para o sistema o	uatro tanques.			

Transmissão:	ETM-1	ETM-2	ETM-3	ETM-4	ETM-5	ETM-6	ETM-7	ETM-8
IAE	9,183	8,835	9,173	8,952	8,534	9,179	9,049	9,076
N_t	826	843	1.030	1.013	3.178	2.805	861	884
Melhor Solução:	28	19	38	14	14	12	25	33
Ts	0,1366	0,1409	0,1401	0,1354	0,1853	0,1767	0,1391	0,1033

Fonte: Elaborada pelo autor

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.4: Melhores Soluções obtidas para cada ETM considerando o valor limite de IAE, para o sistema quatro tanques.



Fonte: Elaborada pelo autor

Os ETM's com soluções eficientes em relação aos outros variam de acordo com o IAE e o número de transmissões. Dentre os resultados obtidos na Tabela 4.3, todas as soluções são consideradas aceitáveis quando avaliado apenas o erro médio, mas, quando avaliado o número de transmissões, segundo critério de seleção, os destaques positivos vão para os ETM-1 com $N_t = 826$ e ETM-2 com $N_t = 843$. Os piores resultados foram obtidos para os ETM-5 e ETM-6, que apresentaram um maior número de transmissões. A diferença percentual entre os ETM-5 e ETM-1 em relação ao número de transmissões é de aproximadamente 74% a mais para o primeiro.

A Tabela 4.4, apresenta para cada ETM: o erro médio, μ_1 , número de transmissões médias, μ_2 , e número de pacotes perdidos e mensagens descartadas pelo controlador e atuador durante a transmissão de dados, μ_3 . Além disso foram apresentados os desvios padrão, σ_1 , σ_2 , σ_3 , e os valores máximos, max_1 e max_2 respectivamente. A solução denominada CTP corresponde ao mesmo controlador e período de amostragem da solução selecionada para o ETM, mas com transmissão baseada em tempo, periódica, e não em evento. Importante ressaltar que os valores médios apresentados, μ_1 , μ_2 e μ_3 , correspondem a média da soma das variáveis, IAE, N_t e N_{pl} , respectivamente, em cada canal de comunicação para β simulações.

			IAE			N _t			N _{pl}	
Transmissão	Solução	$T_s(s)$	μ_1	σ_1	max_1	μ2	σ_2	max ₂	μ_3	σ_3
ETM-1	28	0,1366	9,183	0,485	10,066	826	56	902	321	19
CTP-1	28	0,1366	8,363	0,389	<mark>8,98</mark> 3	34.288	0	34.288	24.976	55
ETM-2	19	0,1409	8,835	0,722	10,639	843	72	1.005	295	36
CTP-2	19	0,1409	7,532	0,642	8,882	34.288	0	34.288	24.976	55
ETM-3	38	0,1401	9,173	0,575	10,280	1.030	47	1.119	227	17
CTP-3	38	0,1401	8,958	0,573	9,852	34.288	0	34.288	24.976	55
ETM-4	14	0,1354	8,952	0,626	10,349	1.013	49	1.106	288	16
CTP-4	14	0,1354	8,433	0,665	9,776	34.288	0	34.288	24.976	551
ETM-5	14	0,1853	8,534	0,608	9,493	3.178	79	3.288	1.798	72
CTP-5	14	0,1853	7,950	0,691	9,221	25.264	0	25.264	17.398	45
ETM-6	12	0,1767	9,179	0,844	10,473	2.805	108	3.029	1.565	71
CTP-6	12	0,1767	8,403	0,750	10,049	26.668	0	26.668	18.569	56
ETM-7	25	0,1391	9,049	0,527	10,401	861	56	1.004	318	23
CTP-7	25	0,1391	7,964	0,436	8,960	34.288	0	34.288	24.976	55
ETM-8	33	0,1033	9,076	0,340	9,786	884	29	937	266	19
CTP-8	33	0,1033	8,235	0,411	9,193	48.004	0	48.004	36.797	58

Tabela 4.4: Comparação entre as soluções, considerando o valor limite de IAE, para o sistema de Quatro Tanques.

Fonte: Elaborada pelo autor

A tabela 4.5 apresenta o mesmo resultado da Tabela 4.4, mas observando a variação percentual dos valores médios das soluções em relação aos CTP's respectivos. Ou seja, o IAE(%) é a variação percentual em torno do IAE apresentado pelo CTP. Da mesma forma temos o N_t (%), que é a variação percentual do número de transmissões da rede comparada com a mesma informação obtida no CTP, e, por fim, o N_{pl} (%) que apresenta o número percentual de perdas de pacotes e mensagens descartadas durante as transmissões de dados, quando comparado a transmissão no CTP. Analisando os dados é possível concluir que houve redução significativa no número de transmissões para todos os ETM's, assim como redução no número de perdas de pacotes e mensagens descartadas durante a transmissão. Em relação ao erro médio, considerando as soluções listadas com o IAE respeitando o limite estabelecido, houve aumento em todos os ETM's quando comparado ao CTP, mas apesar disso, em algumas situações a diferença foi menor que 10%, como é o caso do ETM-3 com 2,4%.

Transmissão	IAE(%)	$N_t(\%)$	$N_{pl}(\%)$
ETM-1	9,8%	-97,6%	-98,7%
ETM-2	17,3%	-97,5%	-98,8%
ETM-3	2,4%	-97,0%	-99,1%
ETM-4	6,2%	-97,0%	-98,8%
ETM-5	7,3%	-87,4%	-89,7%
ETM-6	9,2%	-89,5%	-91,6%
ETM-7	13,6%	-97,5%	-98,7%
ETM-8	10,2%	-98,2%	-99,3%

Tabela 4.5: Avaliação percentual dos valores médios das soluções em relação ao CTP, considerando o valor limite de IAE, para o sistema quatro tanques

Fonte: Elaborada pelo autor

Avaliando os resultados das perdas de pacotes informados nas Tabelas 4.4 e 4.5 é importante reforçar que estas são compostas pelas perdas devido à rede e pelas mensagens descartadas devido aos atrasos nas transmissões dos dados. As perdas de pacote são proporcionais ao número de transmissões, e devido a isso, o número de perdas do CTP é muito maior quando comparado a transmissão com ETM. Fica claro que o maior número de transmissões do CTP não resulta em um desempenho muito melhor uma vez que um percentual muito elevado dessas transmissões é perdido.

Os atrasos aleatórios são apresentados em valores no tempo, e a distribuição deles em termos de número de períodos de amostragens varia com o período de amostragem. Como evidenciado na Figura 4.5, menores períodos de amostragem resultam em maiores atrasos em termos de número de instantes de amostragem, Equação (3.24). O aumento do atraso em termos de número de períodos de amostragem a partir da redução do período de amostragem faz com que a período de amostragem mínimo não resulte necessariamente no melhor desempenho para o sistema de controle via rede.

Figura 4.5: Distribuição dos atrasos de transmissão via rede para sistema quatro tanques em termos de números de períodos de amostragem.





Para avaliar o ganho da técnica atual, outras distribuições de atrasos foram simuladas: *Gamma* e *Chi-Square*. Os parâmetros foram ajustados de forma que os atrasos gerados estivessem dentro da mesma faixa de valores da distribuição Normal. Para a distribuição *Gamma* foi utilizado um parâmetro de forma $\omega = 4$, e um parâmetro de escala $\theta = 1$. Para distribuição *Chi-Square* foi considerado g = 5 graus de liberdade. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 4.6. De forma geral, os resultados para as distribuições de atrasos testadas foram satisfatórios com valores de *IAE* e N_t próximos para as três distribuições. Desse modo é possível concluir que os controladores e ETM's obtidos pelo procedimento proposto teriam desempenho adequado para os diferentes tipos de distribuição de probabilidade dos atrasos de comunicação analisados neste estudo de caso.

Transmissão	IAE _{normal}	Nt_{normal}	IAE _{gamma}	Nt _{gamma}	$IAE_{Chi-Square}$	Nt _{Chi-Square}	T_s
ETM-1	<mark>9,18</mark> 3	826	9,071	915	8,967	897	0,1366
ETM-2	<mark>8,</mark> 835	843	8,108	876	7,999	822	0,1409
ETM-3	9,173	1030	9,193	956	9,019	931	0,1401
ETM-4	8,952	1013	8,857	997	8,653	968	0,1354
ETM-5	8,534	3178	7,011	3151	7,268	3160	0,1853
ETM-6	9,179	2805	8,280	2810	8,041	2759	0,1767
ETM-7	9,049	861	8,634	888	8,487	847	0,1391
ETM-8	9,076	884	8,897	983	8,816	957	0,1033

Tabela 4.6: Resultados para diferentes perfis de atraso: Normal x *Gamma* x *Chi-Square*, para Sistema Quatro Tanques.

Fonte: Elaborada pelo autor

Outra forma de avaliar os resultados é a comparação com o trabalho apresentado em BELO (2021). Importante ressaltar que no trabalho do autor é adotado um controlador projetado para sistemas contínuos no tempo que foi discretizado com base em um período de amostragem pré-determinado, que resulta em um desempenho aproximado do controlador contínuo. No trabalho atual o controlador é projetado para o sistema discreto com ETM e período de amostragem otimizado.

A análise a seguir tem o objetivo de comparar o número de transmissões e perdas de pacotes para uma mesma faixa de erro. Para comparação foi utilizado como base o *IAE* da transmissão periódica, CTP, obtido no trabalho de BELO (2021), ou seja, $IAE_{limite} = 17,46$, e $T_s = 0,25 s$, Tabela 4.7, que corresponde ao melhor resultado alcançado pelo autor quando avaliado apenas o erro médio sem a presença dos ETM's.

Tabela 4.7: Controle por Transmissão Periódica – CTP, obtido de BELO (2021) para sistema Quatro Tanques - IAE, $N_t \in N_{pl}$.

Transmissão	IAE	N_t	N _{pl}	$T_s(s)$
$CTP_{Belo(2021)}$	17,46	19.188	13.655	0,2500

Fonte: Adaptado de BELO (2021)

Na Tabela 4.8 é possível visualizar tanto os resultados obtidos por BELO (2021), classificados como Grupo 1, quanto os resultados obtidos pelas soluções atuais. É possível notar que em todas as avaliações, seja *IAE*, N_t ou N_{pl} as soluções atuais se mostraram mais eficientes que todas as soluções do Grupo 1, obtidas no trabalho de BELO (2021). Observando o ETM-2 é possível perceber uma redução de 82% no número de transmissões e consequentemente, uma redução de 92% no número de perdas totais de pacotes. Note também que o

período de amostragem é maior para a solução atual, e, apesar disto, foi obtido resultado melhor, devido a técnica atual que otimiza o controlador e período de amostragem conjuntamente.

Tabela 4.8: Comparação dos resultados com BELO (2021) para sistema quatro tanques - IAE, N_t e N_{pl} .

Transmissão	IAE	$IAE_{Belo(2021)}$	Nt	N _{t Belo(2021)}	$N_t(\%)$	N _{pl}	N _{pl Belo (2021)}	$N_{pl}(\%)$	<i>T_s</i> (s)	$T_{s Belo (2021)}(s)$
ETM-1	16,355	17,56	495	2.235	-78%	141	1.225	-88%	0,3501	0,25
ETM-2	16,645	17,63	389	2.114	-82%	92	1.117	-92%	0,3907	0,25
ETM-3	15,789	17,56	447	1.926	-77%	45	742	-94%	0,1645	0,25
ETM-4	16,205	17,56	409	1.743	-77%	74	745	-90%	0,4889	0,25
ETM-5	15,599	17,56	1.213	4.381	-72%	509	2.764	-82%	0,4685	0,25
ETM-6	16,916	17,64	1.109	4.391	-75%	411	2.766	-85%	0,4925	0,25
ETM-7	16,820	17,62	464	2.086	-78%	118	1.112	-89%	0,4072	0,25
ETM-8	14,459	17,60	462	1.584	-71%	59	614	-90%	0,1860	0,25

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 4.6 mostra os resultados obtidos para os ETM-4 e ETM-8, próximos da solução utópica, utilizando a técnica atual e a técnica desenvolvida em BELO (2021). É possível concluir que a técnica de síntese conjunta do controlador e dos mecanismos de transmissão por evento obteve valores de *IAE* e N_t melhores que a técnica anterior.

Figura 4.6: Comparação das curvas de Pareto próxima da solução utópica para sistema quatro tanques.



Para análise completa da técnica aplicada, foi avaliado o transitório do sistema utilizando o ETM-1 e comparado com a transmissão periódica, CTP-1.

Para simulação do sistema de quatro tanques foram utilizados os sinais de referência do tipo degrau unitário, $r_1(t) = U(t - 10)$ e $r_2(t) = U(t - 300)$, sendo U(t - T) = 0 para t < T e U(t - T) = 1 para t $\ge T$. A simulação ocorreu num período de $T_{max} = 1.200 s$. Para avaliação foi utilizado o ETM-1, solução 28, $T_s = 0,136s$, IAE = 9,183, $N_t = 826$, as matrizes do controlador discreto são dadas por:

$$A_{c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B_{c} = \begin{bmatrix} 0,2500 & 0 \\ 0 & 0,2500 \end{bmatrix},$$
$$C_{c} = \begin{bmatrix} 0,1119 & -0,0608 \\ -0,0541 & 0,0854 \end{bmatrix}, D_{c} = \begin{bmatrix} 7,1317 & -0,2719 \\ -0,0461 & 8,6869 \end{bmatrix}.$$

A Figura 4.7 traz a comparação dos transitórios entre o ETM-1 x CTP-1 para a solução de número 28 com período de amostragem $T_s = 0,1366s$. Os atrasos aleatórios da rede independem da utilização do ETM. Em relação ao sobressinal, tempo de subida e acomodação, não existem diferenças significativas, sendo os resultados similares na escala em que o gráfico é apresentado. Desse modo, pode-se concluir que o uso de ETM com objetivo de reduzir o número de transmissões não afeta significativamente o desempenho do sistema de controle.





A Figura 4.8 apresenta uma ampliação da resposta temporal no intervalo de tempo final da simulação. Quando avaliado o regime estacionário é possível observar pela Figura 4.8 que as saídas do sistema baseado em CTP acabam convergindo para o valor de referência, o que não acontece com as saídas no caso do ETM, pois as saídas continuam com pequenas oscilações em torno da referência. Como o IAE devido a essas oscilações no regime estacionário é muito pequeno, uma tentativa de reduzir essas oscilações foi considerar um tempo de simulação maior que o necessário para atingir o regime permanente para que o erro acumulado devido a essas oscilações fosse mais significativo no valor total do IAE (tempo final de simulação igual a 1.200s).

Figura 4.8: Comparação dos regimes estacionários das saídas para ETM-1 x CTP-1 para sistema quatro tanques, solução 28, T_s =0,1366s.



Avaliando a resposta transitória das variáveis manipuladas, $\bar{u}_1 \in \bar{u}_2$, após o ZOH, Figura 4.9, observa-se que os valores das respostas com ETM são similares aos CTP. Já no regime estacionário ocorrem as oscilações em torno do ponto de operação durante a transmissão com ETM, que acarretam as oscilações na saída do sistema.

Figura 4.9: Comparação dos transitórios das entradas para ETM-1x CTP-1 para sistema quatro tanques, solução 28, para T_s =0,1366s.



A Figura 4.10 apresenta o intervalo entre eventos de transmissão de dados para o sistema quatro tanques, referente ao ETM-1 solução 28, com $T_s = 0,1366s$. É possível perceber que o número de transmissões aumenta quando ocorre a variação no *setpoint*. De forma oposta, quando as saídas convergem para o valor da referência, o número de transmissões reduz.







A Figura 4.11 apresenta de forma mais detalhada o intervalo entre transmissões do Sensor 2. Note que para o instante destacado, o sistema ficou 2.526 instantes de amostragem consecutivos sem transmissão de dados, o que representa uma economia considerável do uso da rede. A Tabela 4.9 mostra os intervalos máximos alcançados, sem transmissão, para cada elemento sensor e atuador do sistema. Também é importante destacar que as transmissões não pararam de acontecer mesmo em regime estacionário, isso se dá devido as oscilações das variáveis manipuladas e saídas do sistema, introduzidas pelo ETM. Pode ser observado que a malha de controle 2 apresentou intervalos

maiores entre transmissões, para a solução considerada, e por isso o nível do tanque 2 oscila mais no intervalo de tempo destacado pela Figura 4.8.



Figura 4.11: Intervalos entre transmissões para sistema quatro tanques, ETM-1, T_s =0,1366s – Sensor 2, em termos de número de períodos de amostragem.

Tabela 4.9: Intervalos máximos entre transmissões para sistema quatro tanques, ETM-1, T_s =0,1366s.

Conexão	Intervalo Máximo
Do sensor 1	422
Do sensor 2	2526
Para atuador 1	419
Para atuador 2	2397

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3 Estudo de caso: Coluna de Destilação Binária

Considere o sistema de controle multivariável de uma coluna de destilação binária apresentado na Figura 4.12, proposto por Wood & Berry (1973). O sistema MIMO é constituído por 2 entradas e duas saídas com interação entre as malhas de controle, presença de atrasos de transporte e distúrbio. As entradas e saídas da planta são listadas na Tabela 4.10.

Figura 4.12: Diagrama esquemático do sistema de controle da coluna de destilação binária.



Fonte: Adaptado de (WOOD & BERRY, 1973)

Tabela 4.10: Variáveis do	processo - Coluna	Destilação Binária
---------------------------	-------------------	--------------------

Descrição	Tipo	Símbolo		
Vazão de refluxo	Entrada	u_1		
Vazão de vapor	Entrada	u_2		
Vazão de alimentação	Distúrbio	d		
Composição de topo	Saída	$y_1 = c_1$		
Composição de base	Saída	$y_2 = c_2$		

Fonte: Adaptado de (WOOD & BERRY, 1973)

Será considerado o seguinte modelo para um dado ponto de operação (Wood & Berry, 1973):

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12,8e^{-1s}}{16,7s+1} & \frac{-18,9e^{-3s}}{21,0s+1} \\ \frac{6,6e^{-7s}}{10,9s+1} & \frac{-19,4e^{-3s}}{14,4s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3,8e^{-8,1s}}{14,9s+1} \\ \frac{4,9e^{-3,4s}}{13,2s+1} \end{bmatrix} d.$$
(4.8)

As constantes de tempo e atrasos são apresentadas em minutos. O controlador PI centralizado pode ser representado de acordo com as funções de transferência:

$$K_{WB} = \begin{bmatrix} \frac{\chi_{k+2}S + \chi_{k+3}}{S} & \frac{\chi_{k+4}S + \chi_{k+5}}{S} \\ \frac{\chi_{k+6}S + \chi_{k+7}}{S} & \frac{\chi_{k+8}S + \chi_{k+9}}{S} \end{bmatrix},$$
(4.9)

sendo $k = 1, ..., \eta$, para os ETM-1 ao ETM-6 e $k = 1, ..., 2\eta$, para ETM-7 e ETM-8, e $\eta = p + q$.

Foi definido para o período de amostragem uma faixa para os valores admissíveis: $T_s \in [0,1; 1] \text{ min}$, para o sistema Wood & Berry (1973). Esta faixa foi escolhida baseada nas análises realizadas por BELO (2021), que utilizou em seu trabalho os seguintes valores para os períodos de amostragem: $T_s = 1 \text{ min}$ e $T_s = 0,5 \text{ min}$.

Da mesma forma que apresentado no estudo de caso 1, para simulação da rede de comunicação, foram introduzidos atrasos de transmissão e perdas de pacotes. Para este estudo de caso foi mantido o valor de $\rho = 5,5$, Equação (3.24). Em relação ao percentual de perdas, foi mantido o valor de 5%.

A Figura 4.13 apresenta as curvas candidatas a Pareto-ótima com as diferentes relações entre o N_t e o *IAE*, obtidas através do processo de otimização para o sistema Coluna Destilação Binária. Observando a Figura 4.14, com as soluções próximas da solução utópica, nota-se que o ETM-3 obteve os melhores resultados, tanto para a faixa com menor erro médio, quanto para a faixa de menor número de transmissões. Além disso, o ETM-3 é o que possui soluções mais próximas da solução utópica. O ETM-1 também apresenta soluções eficientes para valores menor número de transmissões de *IAE* ao passo que o ETM-4 apresenta soluções eficientes para menor número de transmissão ETM-5 e ETM-6, novamente apresentam o maior número de soluções dominadas em relação as outras leis de transmissão.

Figura 4.13: Curvas candidatas Pareto-ótima para sistema Coluna Destilação Binária.



Figura 4.14: Região das curvas de Pareto próximas da solução utópica para sistema Coluna Destilação Binária.



Assim como empregado no estudo de caso anterior, para avaliação dos resultados obtidos no sistema, foi empregada a Equação (4.1) para obtenção do *IAE*_{limite}. Os menores valores de *IAE* para cada ETM foram listados na Tabela

4.11. De acordo com os dados obtidos, o ETM-5 apresenta o menor erro médio, desta forma, o $IAE_{menor} = 29,729$, e $IAE_{limite} = 47,256$. Para esse estudo de caso, a menos dos ETM-3 e ETM-4, os períodos de amostragem das soluções com mínimo *IAE* são iguais ou bem próximo (ETM-8) do valor mínimo estabelecido.

Tabela 4.11: Menor erro médio, obtido para cada ETM, considerando o valor limite de IAE.

Transmissão:	ETM-1	ETM-2	ETM-3	ETM-4	ETM-5	ETM-6	ETM-7	ETM-8
Menor IAE:	31,032	32,229	33,940	42,229	29,729	29,913	31,989	29,764
Nt	6.098	25.711	11.036	5.413	37.273	42.182	6.147	18.765
Ts	0,1000	0,1000	0,1362	0,2609	0,1000	0,1000	0,1000	0,1038

Fonte: Elaborada pelo autor

Definido o *IAE*_{limite} foram selecionadas as melhores soluções para os oito modelos de ETM's utilizados para o sistema Coluna Destilação Binária. As melhores soluções para cada ETM são apresentadas na Tabela 4.12. Note que o ETM-3, solução 23, obteve o menor número de transmissões em comparação com as outras soluções. Para este estudo de caso também é observado valores variados para os períodos de amostragem sendo todos eles no interior do intervalo estabelecido. Maior período de amostragem não significa menor número de transmissões. Considerando as soluções listadas na Tabela 4.12, o ETM-3, com o menor período de amostragem, resultou no menor número de transmissões. O ETM-2 seria uma solução interessante por apresentar um período de amostragem maior mas com número de transmissões e *IAE* comparáveis com os ETM-3 e ETM-4.

Tabela 4.12: Melhores Soluções obtidas para cada ETM, considerando o valor limite de IAE, para sistema Coluna Destilação Binária.

Transmissão:	ETM-1	ETM-2	ETM-3	ETM-4	ETM-5	ETM-6	ETM-7	ETM-8
IAE	45,430	47,338	47,218	46,674	47,178	46,446	46,569	46,538
Nt	1.035	996	738	879	1.837	2.375	1.172	1.436
Melhor Solução:	28	18	23	10	28	20	29	26
T_s	0,5307	0,5274	0,1362	0,2609	0,8789	0,5151	0,3265	0,1941

Fonte: Elaborada pelo autor


Figura 4.15: Melhores Soluções obtidas para cada ETM, considerando o valor limite de IAE, para sistema Coluna Destilação Binária.

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 4.15 apresenta de forma gráfica os resultados obtidos após definição do erro limite. Note que os melhores resultados foram alcançados para o ETM-3 com $N_t = 738$ e ETM-4 com $N_t = 879$. Os ETM's 5 e 6 apresentaram valores elevados de número de transmissões, tornando-se pouco interessante quando comparado principalmente com os ETM-3 e ETM-4. A diferença percentual entre os ETM-3 e ETM-6 em relação ao número de transmissões é de aproximadamente 69%.

A Tabela 4.13, apresenta os valores médios obtidos para cada solução listada na Tabela 4.12 e a comparação com o CTP respectivo. Além disso, traz os valores relativos ao número de perdas médias e período de amostragem de cada solução. Note que a estratégia de transmissão baseada em ETM reduz consideravelmente o número de transmissões quando comparado ao CTP, e consequentemente o número de perdas em cada *link* de transmissão.

				IAE		N _t			N _{pl}		
Transmissão	Solução	$T_s(min)$	μ_1	σ_1	max ₁	μ ₂	σ_2	max ₂	μ_3	σ_3	
ETM-1	28	0,5307	45,430	3,021	54,628	1.035	45	1.126	515	26	
CTP-1	28	0,5307	40,377	3,134	50,603	9.060	0	9.060	6.219	25	
ETM-2	18	0,5274	47,338	2,256	55,042	996	57	1.095	471	22	
CTP-2	18	0,5274	40,972	2,201	48,509	9.060	0	9.060	6.219	25	
ETM-3	23	0,1362	47,218	3,094	54,452	738	28	787	231	15	
CTP-3	23	0,1362	41,947	0,453	42,825	34.288	0	34.288	28.389	40	
ETM-4	10	0,2609	46,674	1,989	50,370	879	41	941	371	18	
CTP-4	10	0,2609	41,038	1,031	43,512	18.464	0	18.464	14.233	41	
ETM-5	28	0,8789	47,178	3,200	56,113	1.837	67	1.952	993	42	
CTP-5	28	0,8789	44,994	2,983	52,576	5.456	0	5.456	3.331	25	
ETM-6	20	0,5151	46,446	3,096	53,269	2.375	110	2.531	1.442	64	
CTP-6	20	0,5151	42,752	2,672	48,824	9.232	0	9.232	6.367	27	
ETM-7	29	0,3265	46,569	2,852	53,420	1.172	68	1.388	611	52	
CTP-7	29	0,3265	39,267	2,335	45,851	14.548	0	14.548	10.837	34	
ETM-8	26	0,1941	46,538	2,598	51,450	1.436	73	1.549	596	39	
CTP-8	26	0,1941	37,083	1,926	41,509	25.264	0	25.264	20.238	29	

Tabela 4.13: Comparação entre as soluções, considerando o valor limite de IAE, para o sistema Coluna Destilação Binária.

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 4.14 apresenta a variação percentual dos valores médios das soluções em torno dos CTP's respectivos. Note a redução significativa no número de transmissões para todos os ETM's, assim como redução no número de perdas de pacotes durante a transmissão. Em nenhuma lei de transmissão houve obtenção de erro médio menor que o CTP, mas apesar disso, em algumas situações a diferença foi menor que 10%, como é o caso do ETM-5 com 5%. Os ETM-5 e ETM-6 são os que impactam menos o *IAE* mas em contrapartida são os que reduzem menos o número de transmissões. O ETM-3 se destaca pela maior redução percentual do número de transmissões e com variação percentual de IAE maior apenas em relação aos ETM-1, ETM-5 e ETM-6. Cabe ressaltar que existem outras soluções para todos os ETM's cuja diferença de *IAE* em relação ao CTP é muito menor mas que resultaria em uma menor redução do número de transmissões.

Transmissão	IAE(%)	$N_t(\%)$	$N_{pl}(\%)$
ETM-1	12,5%	-88,6%	-91,7%
ETM-2	15,5%	-89,0%	-92,4%
ETM-3	12,6%	-97,8%	-99,2%
ETM-4	13,7%	-95,2%	-97,4%
ETM-5	4,9%	-66,3%	-70,2%
ETM-6	8,6%	-74,3%	-77,3%
ETM-7	18,6%	-91,9%	-94,4%
ETM-8	25,5%	-94,3%	-97,1%

Tabela 4.14: Avaliação percentual dos valores médios das soluções em relação ao CTP para o sistema Coluna Destilação Binária.

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 4.16, apresenta a distribuição dos atrasos para sistema coluna destilação binária referente ao ETM-3, solução 23. Perceba que foram gerados atrasos maiores que 100 períodos de amostragem e, apesar disso, o controlador projetado foi capaz de estabilizar o sistema.

Figura 4.16: Distribuição dos atrasos de transmissão via rede para sistema Coluna Destilação Binária em termos de números de períodos de amostragem.



Fonte: Elaborada pelo autor

Assim como no primeiro estudo de caso, também foram testadas outras distribuições de atraso: *Gamma* e *Chi-Square*, e os resultados podem ser

visualizados na Tabela 4.15. Para a distribuição *Gamma* foi utilizado um parâmetro de forma $\omega = 1$, e um parâmetro de escala $\theta = 1$. Para distribuição *Chi-Square* foi considerado g = 1 graus de liberdade. Note que os valores de *IAE* e N_t para as distribuições *Gamma* e *Chi-Square* se mantiveram próximos aos da distribuição Normal, reforçando a robustez da técnica desenvolvida.

Tabela 4.15:	Soluções pa	ira perfis de	e atraso:	Normal	Х	Gamma x	Chi-Square,
para Sistema	a Coluna de E	estilação B	inária.				

Transmissão	IAE _{normal}	Nt _{normal}	IAEgamma	Nt _{gamma}	$IAE_{Chi-Square}$	Nt _{Chi-Square}	T_s
ETM-1	45,430	1035	47,320	1120	45,997	1042	0,5307
ETM-2	47,338	996	49,310	1058	47,538	955	0,5274
ETM-3	47,218	738	50,117	794	46,560	738	0,1362
ETM-4	46,674	879	48,683	938	48,063	906	0,2609
ETM-5	47,178	1837	48,421	1882	48,362	1813	0,8789
ETM-6	46,446	2375	48,104	2451	44,693	2386	0,5151
ETM-7	46,569	1172	47,828	1231	44,425	1120	0,3265
ETM-8	46,538	1436	49,278	1558	43,609	1338	0,1941

Fonte: Elaborada pelo autor

Para realizar a comparação com o trabalho apresentado em BELO (2021) foi utilizado como base o *IAE* da transmissão periódica, CTP, obtido no trabalho do autor, ou seja, $IAE_{limite} = 47,59$, Tabela 4.16, que corresponde ao melhor resultado alcançado quando avaliado apenas o erro médio, sem a presença dos ETM's. Na Tabela 4.17 é possível observar os resultados obtidos por BELO (2021) e os resultados obtidos pelas soluções atuais. Note que para uma mesma faixa de erros as soluções atuais apresentam melhores resultados em relação ao número de transmissões, como pode ser visto no ETM-3, o número de transmissões foi de $N_t = 766$ para solução atual e $N_t = 2.400$ para a solução proposta por BELO (2021). Além disso é possível perceber que um período de amostragem maior pode retornar valores menores em relação ao erro médio e número de transmissões média.

Tabela 4.16: Controle por Transmissão Periódica – CTP, obtido de	BELO (2021)
para sistema Coluna de Destilação Binária - IAE , N_t e N_{pl} .	

Transmissão	IAE	N _t	N_{pl}	$T_s(min)$
$CTP_{Belo(2021)}$	47,59	7.204	5.030	0,5000

Fonte: Adaptado de BELO (2021)

Transmissão	IAE	$IAE_{Belo(2021)}$	N _t	N _{t Belo(2021)}	N_{pl}	N _{pl Belo (2021)}	$T_s(min)$	T _{s Belo (2021)} (min)
ETM-1	45,430	47,926	1.035	2.494	515	1.551	0,5307	0,50
ETM-3	46,256	47,980	766	2.400	256	1.384	0,2693	0,50
ETM-5	46,517	47,845	2.596	3.733	1.608	2.449	0,5092	0,50
ETM-7	46,569	47,886	1.172	2.689	611	1.671	0,3265	0,50
ETM-8	46,538	47,770	1.436	2.662	596	1.600	0,1941	<mark>0,50</mark>

Tabela 4.17: Comparação dos resultados com BELO (2021) para sistema Coluna Destilação Binária - IAE, N_t e N_{pl} .

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 4.17 apresenta os resultados obtidos para os ETM-2 e ETM-3, próximos da solução utópica, utilizando a técnica atual, e a técnica desenvolvida em BELO (2021). Note que, para um mesmo valor de *IAE*, os ETM's obtidos pela solução atual alcançaram valores menores em relação ao número de transmissão. Conforme informado anteriormente, o motivo é que a técnica atual otimiza os parâmetros do controlador e período de amostragem de forma conjunta com os parâmetros dos ETM's, o que propicia valores melhores que a técnica anterior.







Para simulação e avaliação do transitório do sistema Coluna Destilação Binária foram utilizados os sinais de referência, $r_1(t) = U(t - 10)$ e $r_2(t) = U(t - 600)$, e sinal de distúrbio d(t) = 0,1[U(t - 300) - U(t - 310)], sendo U(t - T) = 0 0 para t < T e U(t – T) = 1 para t \ge T. A simulação ocorreu num período de $T_{max} = 1.200 min$. As matrizes do controlador discreto são definidas como:

$$A_{c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B_{c} = \begin{bmatrix} 0,0625 & 0 \\ 0 & 0,0625 \end{bmatrix},$$
$$C_{c} = \begin{bmatrix} 0,0306 & -0,0216 \\ 0,0122 & -0,0143 \end{bmatrix}, D_{c} = \begin{bmatrix} 0,1450 & -0,0557 \\ 0,0566 & -0,0697 \end{bmatrix}.$$

A Figura 4.18 traz a comparação dos transitórios entre o ETM-3 x CTP-3 para a solução de número 23 com período de amostragem $T_s = 0,1362 min$. O controlador e período de amostragem obtidos por otimização resultaram em uma boa resposta de rastreamento, com um desacoplamento eficiente entre as malhas de controle e uma boa rejeição ao distúrbio para um sistema difícil de ser controlado devido aos atrasos e alto acoplamento entre malhas. É possível observar que a redução significativa no número de transmissões não altera significativamente a ação de controle já que as respostas transitórias são similares.

Figura 4.18: Comparação dos transitórios das saídas do sistema, y(t_k), para ETM-3 x CTP-3 para sistema Coluna Destilação Binária, solução 23, T_s =0,1362 min.





Figura 4.19: Comparação dos regimes estacionários das saídas para ETM-3 x CTP-3 para sistema Coluna Destilação Binária, solução 28, T_s =0,1362 min.

Observando o regime estacionário, Figura 4.19, é possível notar que as saídas do sistema baseado em CTP convergem para o valor de referência, enquanto as saídas dos ETM continuam com pequenas oscilações em torno da referência, assim como evidenciado no estudo de caso anterior. A mesma situação ocorre para os demais ETM's.

A Figura 4.20 apresenta a resposta transitória das variáveis manipuladas, $\bar{u}_1 \in \bar{u}_2$, após o ZOH. Nota-se que os valores das respostas com ETM são similares aos CTP, não havendo alterações significativas. Já no regime estacionário ocorrem as oscilações em torno do ponto de operação durante a transmissão com ETM, que acarretam as oscilações na saída do sistema. Figura 4.20: Comparação dos transitórios das entradas para ETM-3 x CTP-3 para sistema Coluna Destilação Binária, solução 23, para T_s =0,1362 min.



A Figura 4.21 apresenta o intervalo entre eventos de transmissão de dados, da rede de comunicação, para o sistema Coluna Destilação Binária, referente ao ETM-3 solução 23, com $T_s = 0,1362 min$. É possível perceber que o número de transmissões aumenta quando ocorre variação de *setpoint* e também no momento do degrau de distúrbio. De forma oposta, quando as saídas convergem para o valor da referência, o número de transmissões reduz.

A Tabela 4.18 apresenta o intervalo máximo entre transmissões para cada conexão. Note que o sensor 2 alcançou 439 amostras consecutivas sem transmissão, e o atuador 2, 405 amostras consecutivas, o que representa redução significativa na taxa de ocupação da rede. Lembrando que as transmissões não pararam de acontecer mesmo em regime estacionário, devido as oscilações das variáveis manipuladas e saídas do sistema, introduzidas pelo ETM.

Figura 4.21: Intervalos entre transmissões para sistema Coluna Destilação Binária, ETM-3, T_s =0,1362 min, em termos de número de períodos de amostragem.



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 4.18: Intervalos entre transmissões para sistema Coluna Destilação Binária, ETM-3, T_s =0,1362 min.

Conexão	Intervalo Máximo
Do sensor 1	439
Do sensor 2	495
Para atuador 1	360
Para atuador 2	405

Fonte: Elaborada pelo autor

4.4 Estudo de caso: Coluna de Destilação de Petróleo Bruto

Considere o sistema de controle multivariável de uma coluna de destilação de petróleo bruto apresentado na Figura 4.22, apresentado em MUSKE *et al.*, (1991). O sistema MIMO é constituído por 5 entradas e 4 saídas, possui conexões entre as malhas de controle e presença de atrasos de transporte. As entradas e saídas da planta são apresentadas na Tabela 4.19.

Figura 4.22: Diagrama esquemático do sistema de controle da Coluna de Destilação de Petróleo Bruto.



Fonte: Adaptado de (MUSKE et al., 1991)

Tabela 4.19: Variáveis do processo – Coluna Destilação de Petróleo Bruto

Descrição	Tipo	Símbolo
Temperatura do topo da coluna	Entrada	u_1
Vazão de Querosene	Entrada	<i>u</i> ₂
Vazão de Petróleo Leve	Entrada	<i>u</i> ₃
Vazão de Petróleo Pesado	Entrada	u_4
Temperatura de Saída no Trocados de Calor	Entrada	u_5
Temperatura do Ponto de Corte do	Saída	<i>y</i> ₁
Nafta/Querosene		
Temperatura do Ponto de Corte do	Saída	y_2
Querosene/Gasóleo Leve		
Temperatura do Ponto de Corte do	Saída	<i>y</i> ₃
Querosene/Gasóleo Leve		
Overflash	Saída	y_4

Fonte: Adaptado de (MUSKE et al., 1991)

Considere o sistema multivarável para um ponto de operação, dado pela matriz de transferência:

$$P = \begin{bmatrix} \frac{3,8(16s+1)}{140s^2+14s+1} & \frac{2,9e^{-6s}}{10s+1} & 0 & 0 & \frac{-0,73(-16s+1)e^{-4s}}{150s^2+20s+1} \\ \frac{3,9(4,5s+1)}{96s^2+17s+1} & \frac{6,3}{20s+1} & 0 & 0 & \frac{16se^{-2s}}{(5s+1)(14s+1)} \\ \frac{3,8(0,8s+1)}{23s^2+13s+1} & \frac{6,1(12s+1)e^{-s}}{37s^2+34s+1} & \frac{3,4e^{-2s}}{6,9s+1} & 0 & \frac{22se^{-2s}}{(5s+1)(10s+1)} \\ \frac{-1,62(5,3s+1)e^{-s}}{13s^2+13s+1} & \frac{-1,5(3,1s+1)}{5,1s^2+7,1s+1} & \frac{-1,3(7,6s+1)}{4,7s^2+7,1s+1} & \frac{-0,6e^{-s}}{2s+1} & \frac{0,32(-9,1s+1)e^{-s}}{12s^2+15s+1} \end{bmatrix},$$
(4.10)

sendo as constantes de tempo e atrasos apresentados em minutos. O controlador esparso K_{PB} , apresentado em SOARES (2018), é representado como:

$$K_{PB} = \begin{bmatrix} \frac{\chi_{k+2}s + \chi_{k+3}}{s} & \frac{\chi_{k+4}s + \chi_{k+5}}{s} & \frac{\chi_{k+6}s + \chi_{k+7}}{s} & 0\\ 0 & \frac{\chi_{k+8}s + \chi_{k+9}}{s} & 0 & 0\\ 0 & \frac{\chi_{k+10}s + \chi_{k+11}}{s} & 0\\ 0 & 0 & \frac{\chi_{k+10}s + \chi_{k+11}}{s} & 0\\ \frac{\chi_{k+14}s + \chi_{k+15}}{s} & 0 & 0 & \frac{\chi_{k+16}s + \chi_{k+17}}{s} \end{bmatrix},$$
(4.12)

sendo $k = 1, ..., \eta$, para os ETM-1 ao ETM-6 e $k = 1, ..., 2\eta$, para ETM-7 e ETM-8, e $\eta = p + q$.

Uma vez obtido o controlador PI esparso contínuo a partir das variáveis de otimização, o mesmo é discretizado de acordo com o período de amostragem, também obtido por otimização, para depois ser convertido para uma representação no espaço de estados que é utilizada para a simulação do NCS.

Foi considerado para o período de amostragem uma faixa de valores que variam entre $T_s \in [0,1; 0,5]$ para o sistema MUSKE *et al.*, (1991). Conforme mencionado anteriormente, os valores foram escolhidos de forma a contemplar a faixa utilizada no trabalho de BELO (2021), no qual o autor utilizou $T_s = 0,25 min \text{ e } T_s = 0,125 min$.

Para simulação dos atrasos da rede foi utilizado a constante escalar ρ = 1,25, Equação (3.24), e uma perda de pacotes de 5% do total de transmissões, mantendo os valores estabelecidos por BELO (2021).

A Figura 4.23 apresenta as curvas candidatas a Pareto-ótima para o sistema Coluna Destilação de Petróleo Bruto considerando todas as leis de transmissão e todas as soluções obtidas. Observando a região próxima a solução utópica, Figura 4.24, nota-se que o ETM-4 apresenta soluções não dominadas mais próximas da solução utópica, os ETM-1 e ETM-8 apresentam soluções não dominadas para valores menores de *IAE* com maior número de transmissões para o primeiro. O ETM-3 apresenta soluções não dominadas na região de menor número de transmissões. Em contrapartida, os demais ETM's apresentam soluções dominadas ou não eficientes, especialmente os ETM-5 e ETM-6. Note que a medida que cresce o número de transmissões há uma redução no erro médio do sistema, quando avaliado o ETM individualmente.

Figura 4.23: Curvas candidatas Pareto-ótima para sistema Coluna Destilação de Petróleo Bruto.





Figura 4.24: Região das curvas candidatas a Pareto-ótima para sistema Coluna Destilação de Petróleo Bruto.

A Tabela 4.20 apresenta os menores valores de *IAE* para cada ETM, assim como o N_t , e T_s respectivo. Para obtenção do IAE_{limite} foi selecionado o menor erro de cada ETM, e conforme dados obtidos, o ETM-1 apresenta o menor erro médio, $IAE_{menor} = 56,885$, e desta forma o $IAE_{limite} = 91,015$, Equação (4.1). Note que, apesar do ETM-1 possuir menor erro, este não possui o maior número de transmissões nem o menor período de amostragem quando comparado aos demais ETM's. Para esse estudo de caso, cinco ETM's apresentam períodos de amostragens iguais ou próximos do limite inferior.

Tabela 4.20:	Menor	erro	médio	obtido	para	cada	ETM,	considerando	0	valor
limite de IAE.										

Transmissão:	ETM-1	ETM-2	ETM-3	ETM-4	ETM-5	ETM-6	ETM-7	ETM-8
Menor IAE:	56,885	60,845	60,287	60,941	58,778	75,761	66,977	57,779
Nt	4.574	20.165	<mark>8.</mark> 922	2.573	12.998	4.581	2.794	4.670
T _s	0,1048	0,1000	0,1412	0,1053	0,1001	0,4909	0,1418	0,1019

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 4.21 e Figura 4.25 apresentam as melhores soluções, considerando o IAE_{limite} para os oito modelos de ETM's utilizados para o sistema

Coluna de Destilação de Petróleo Bruto. Nesse caso existem períodos de amostragem próximos do limite inferior e também próximos do limite superior, mostrando novamente que, para o controle via rede, menor período de amostragem não significa melhor desempenho. Considerando as soluções com maiores períodos de amostragem, Ts > 0,4, o ETM-1 apresenta o menor número de transmissões.

Tabela 4.21: Melhores Soluções obtidas para cada ETM, considerando o valor limite de IAE, para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto.

Transmissão:	ETM-1	ETM-2	ETM-3	ETM-4	ETM-5	ETM-6	ETM-7	ETM-8
IAE	89,864	89,542	90,710	86,608	86,130	88,678	90,740	90,769
Nt	1.052	1.147	849	939	3.073	3.417	1.070	945
Melhor Solução:	36	14	39	29	21	7	19	43
T _s	0,4267	0,4492	0,1237	0,1508	0,4944	0,4959	0,4985	0,1019

Fonte [.]	Flaborada	nelo a	autor
i onte.			iutoi

Figura 4.25: Melhores Soluções obtidas para cada ETM, considerando o valor limite de IAE, para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto.



Fonte: Elaborada pelo autor

Dentre os resultados visualizados na Figura 4.25, é possível perceber que o ETM-3 obteve o menor número de transmissões com $N_t = 849$, e o ETM-6 obteve o maior, $N_t = 3.417$. A diferença percentual entre os ETM-3 e ETM-6 em relação ao número de transmissões é de aproximadamente 75%. Quando avaliados o *IAE*, o menor valor é obtido para o ETM-5 e o maior é alcançado para o ETM-8.

A Tabela 4.22 apresenta os valores de erro médio, número de transmissão, período de amostragem e número de perdas para cada ETM e seu CTP correspondente. Note que valores menores em relação ao período de amostragem não garantem *IAE* ou N_t menores.

			IAE				N _t	N _{pl}		
Transmissão	Solução	$T_s(min)$	μ	σ_1	max ₁	μ2	σ_2	max ₂	μ_3	σ_3
ETM-1	36	0,4267	89,864	1,762	92,761	1.052	33	1.121	247	15
CTP-1	36	0,4267	80,829	1,657	84,508	8.908	28	8.964	4.191	35
ETM-2	14	0,4492	89,542	1,656	93,206	1.147	61	1.265	240	18
CTP-2	14	0,4492	79,979	1,105	81,904	8.530	15	8.663	3.923	27
ETM-3	39	0,1237	90,710	1,972	94,671	849	28	894	64	8
CTP-3	39	0,1237	88,896	0,727	90,674	30.421	12	30.442	20.855	52
ETM-4	29	0,1508	86,608	1,565	89,055	939	29	989	132	7
CTP-4	29	0,1508	85,613	1,069	87,795	24.475	13	24.498	15.990	47
ETM-5	21	0,4944	86,130	2,584	89,461	3.073	92	3.236	1.093	37
CTP-5	21	0,4944	82,451	3,427	88,806	8.039	21	8.074	3.571	31
ETM-6	7	0,4959	88,678	1,508	92,210	3.417	117	3.595	1.195	49
CTP-6	7	0,4959	83,026	0,879	84,436	8.030	17	8.073	3.521	23
ETM-7	19	0,4985	90,740	1,937	93,642	1.070	37	1.132	217	11
CTP-7	19	0,4985	85,348	1,230	87,561	1.376	41	1.463	308	15
ETM-8	43	0,1019	90,769	1,945	94,495	945	34	1.021	94	13
CTP-8	43	0,1019	<mark>83,88</mark> 9	0,464	84,827	72.063	1	72.065	51.694	72

Tabela 4.22: Comparação entre as soluções, considerando o valor limite de IAE, para o sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto.

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 4.23 apresenta a variação percentual dos valores médios das soluções, em comparação aos CTP's respectivos. Perceba que a variação percentual do erro médio em relação ao CTP apresenta valores baixos, ou seja, quanto menor os valores, mais próximo a solução com ETM se aproxima da solução com transmissão periódica. Os ETM-3 e ETM-4 apresentam valores próximos em relação ao IAE(%), o que evidencia que a técnica atual apresenta bons resultados quando comparado ao CTP. Um ponto importante é avaliar a redução significativa em relação ao número de transmissões, ou seja, é possível ter um erro próximo da transmissão periódica com baixa taxa de ocupação da rede de transmissão, o que também irá ocasionar uma redução significativa do número de perdas durante transmissão. Nesse aspecto, o ETM-3 se destaca por apresentar a maior redução percentual e apenas a segunda maior variação percentual do IAE.

Transmissão	IAE(%)	$N_t(\%)$	$N_{pl}(\%)$
ETM-1	11,2%	-88,2%	-94,1%
ETM-2	12,0%	-86,6%	-93,9%
ETM-3	2,0%	-97,2%	-99,7%
ETM-4	1,2%	-96,2%	-99,2%
ETM-5	4,5%	-61,8%	-69,4%
ETM-6	6,8%	-57,4%	-66,1%
ETM-7	6,3%	-22,2%	-29,6%
ETM-8	8,2%	-98,7%	-99,8%

Tabela 4.23: Avaliação percentual dos valores médios das soluções em relação ao CTP para o sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto.

Fonte: Elaborada pelo autor

Assim como apresentado nos estudos de caso anteriores, a Figura 4.26, apresenta a distribuição dos atrasos para o ETM-3, solução 39, para o sistema coluna destilação de petróleo bruto. Note que devido ao período de amostragem, Equação (3.24), são gerados atrasos de até 50 períodos de amostragem.

Figura 4.26:Distribuição dos atrasos de transmissão via rede para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto em termos de números de períodos de amostragem.



Assim como avaliado nos estudos de casos anteriores, foram simuladas outras distribuições de atrasos: *Gamma* e *Chi-Square*, e os resultados podem ser visualizados na Tabela 4.24. Para a distribuição *Gamma* foi utilizado um

parâmetro de forma $\omega = 1$, e um parâmetro de escala $\theta = 1$. Para distribuição *Chi-Square* foi considerado g = 1 graus de liberdade. A escolha destes parâmetros foi definida de forma a obter um valor máximo em minutos aproximado do atraso. A distribuição Normal obteve resultados melhores quando avaliado o *IAE* e N_t , apesar disso, as demais distribuições obtiveram resultados satisfatórios, reforçando a robustez da técnica atual frente a outras distribuições de atraso.

Tabela 4.24: Soluções para distribuições de atraso: Normal x *Gamma* x *Chi-Square*, considerando o valor limite de IAE, para Sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto.

Transmissão	IAE _{normal}	Nt _{normal}	IAEgamma	Nt _{gamma}	IAE _{Chi-Square}	Nt _{Chi-Square}	T_s
ETM-1	89,864	1052	91,733	1105	90,904	1073	0,4267
ETM-2	89,542	1147	92,741	1229	90,696	1177	0,4492
ETM-3	90,710	849	94,843	913	94,668	916	0,1237
ETM-4	86,608	939	89,160	998	88,216	992	0,1508
ETM-5	86,130	3073	86,803	3174	84,865	3184	0,4944
ETM-6	88,678	3417	90,546	3440	89,454	3397	0,4959
ETM-7	90,740	1070	92,694	1154	92,489	1123	0,4985
ETM-8	90,769	945	93,072	984	92,139	969	0,1019

Fonte: Elaborada pelo autor

Realizando a comparação dos resultados com o trabalho apresentado em BELO (2021) foi utilizado o mesmo critério dos estudos de caso anteriores. Foi utilizado como base o *IAE* da transmissão periódica, CTP, obtido no trabalho do autor, ou seja, $IAE_{limite} = 66,49$, Tabela 4.25. Na Tabela 4.26 é possível visualizar tanto os resultados obtidos por BELO (2021), Grupo 1, quanto os resultados obtidos pelas soluções atuais. Perceba que, para uma mesma faixa de erro, o número de transmissões e número de perdas caem significantemente quando comparado a técnica anterior, mesmo com valores maiores de períodos de amostragem. Essas observações reforçam a importância da síntese conjunta dos controladores e ETM's além da otimização do período de amostragem.

Tabela 4.25: Controle por Transmissão Periódica – CTP, obtido de BELO (2021) para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto - IAE, N_t e N_{pl} .

Transmissão	IAE	N _t	N _{pl}	$T_s(min)$
$CTP_{Belo(2021)}$	66,49	54.009	38.238	0,1250

Fonte: Adaptado de BELO (2021)

Tabela 4.26: Comparação dos resultados com BELO (2021) para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto - IAE, N_t e N_{pl} .

Transmissão	IAE	$IAE_{Belo(2021)}$	N _t	$N_{t \ Belo(2021)}$	N_{pl}	N _{pl Belo (2021)}	<i>T_s</i> (min)	$T_{sBelo(2021)}(min)$
ETM-1	65,470	66,837	2.321	8.148	885	4.362	0,1686	0,1250
ETM-3	65,373	66,755	1.745	6.148	309	2.714	0,1387	0,1250
ETM-5	64,923	66,9 <mark>7</mark> 6	7.007	14.156	3.370	8.599	0,2343	0,1250
ETM-7	66,977	67,066	2.794	6.983	1.046	3.518	0,1418	0,1250
ETM-8	65,875	66,842	1.774	4.288	373	1.781	0,1019	0,1250

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 4.27 apresenta as curvas de Pareto para os ETM-3 e ETM-8, próximos da solução utópica, utilizando a técnica atual e a técnica desenvolvida em BELO (2021). Perceba que o ETM-3 atual domina as soluções a medida que o erro cresce. Em contrapartida, para menores valores de erro, o ETM-8 atual apresenta soluções melhores em comparação as demais soluções.

Figura 4.27: Comparação das curvas de Pareto próxima da solução utópica para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto.



Para avaliar as respostas temporais do sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto foram utilizados os sinais de referência do tipo degrau unitário, $r_1(t) = U(t - 10)$ e $r_2(t) = U(t - 250)$, $r_3(t) = U(t - 500)$ e $r_4(t) = 0$, sendo U(t - T) = 0 para t < T e U(t - T) = 1 para t $\ge T$. A simulação ocorreu para um período de $T_{max} = 900 min$. Foi utilizado para avaliação dos transitórios o ETM- 3 e solução de número 39 com período de amostragem $T_s = 0,1237min$ As matrizes do controlador discreto são dadas por:

	[1	0	0	0]		[0,125	0		0	0]
$A_c =$		1	0 1	0,	$B_c =$		0,06	025	0 0625	0	,
		0	1	1		0	0		0,0023	0.12	5
	Lo	Ū	Ũ			L -	-		-	-,	
	г 0,0	234	4	-0,	0193	-0,00)18	0	1		
	(0		0,0	350	0		0			
$C_c =$	(0			0	0,05	16	0	,		
	(0			0	0		-0,09	951		
	L-0,()84	-5		0	0		0,004	47 J		
	гОБ	(11	8	_0	0487	-0.0	081	0	г		
		0	0	0	275	0,0	001	0			
$D_{-} =$		0		0,0	0	0 19	24	0			
- c		0			Õ	0		-0.8	820		
	L-0,	40 [.]	47		0	0		0,08	29		

As Figura 4.28 e 4.29 trazem a comparação dos transitórios entre o ETM-3 x CTP-3 para as quatro saídas do sistema. Esse sistema de controle é o mais complexo entre os estudos de casos considerados, e a presença dos atrasos aleatórios e perdas de pacote na comunicação via rede dificultam ainda mais, mas apesar disso, a resposta de rastreamento e o acoplamento entre as malhas de controle é satisfatório. O uso de ETM, com a minimização do número de transmissões, não afeta o desempenho do sistema de controle.

Figura 4.28: Comparação dos transitórios das saídas y_1 e y_2 do sistema para ETM-3 x CTP-3 para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, solução 39, T_s =0,1237min.



Figura 4.29: Comparação dos transitórios das saídas y_3 e y_4 do sistema para ETM-3 x CTP-3 para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, solução 39, T_s =0,1237min.



Observando o regime estacionário para as quatro saídas, Figura 4.30 e 4.31, é possível perceber que as saídas do sistema têm dificuldades para

estabilização, mesmo aquelas baseadas em CTP. A dificuldade para convergir para um valor constante pode estar relacionada com os diferentes atrasos existentes, tanto os do modelo do sistema quando aos introduzidos pela rede de comunicações. A simulação ocorreu para um período de $T_{max} = 900 min$, e mesmo aumentando o tempo de simulação não houve alteração nos resultados.

Figura 4.30: Comparação dos regimes estacionários das saídas y_1 e y_2 para ETM-3 x CTP-3 para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, solução 39, T_s =0,1237min.



Figura 4.31: Comparação dos regimes estacionários das saídas y_3 e y_4 para ETM-3 x CTP-3 para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, solução 39, T_s =0,1237min.



As Figura 4.32 e 4.33, apresentam os transitórios das entradas manipuladas do sistema, comparando o ETM e CTP correspondente.

Figura 4.32: Comparação dos transitórios das entradas \bar{u}_1 e \bar{u}_2 para ETM-3x CTP-3 para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, solução 39, para T_s =0,1237min.



Figura 4.33: Comparação dos transitórios das entradas \bar{u}_3 , \bar{u}_4 e \bar{u}_5 para ETM-3x CTP-3 para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, solução 39, para T_s =0,1237min.



A Figura 4.34 e Figura 4.35 apresentam os intervalos entre transmissões de dados, da rede de comunicação, para o sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, referente ao ETM-3 solução 39, com $T_s = 0,1237$ min.

Figura 4.34: Intervalos entre transmissões em número de amostragens dos atuadores para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, ETM-3, $T_s = 0,1237 \text{ min}$, em termos de número de períodos de amostragem.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.35: Intervalos entre transmissões em número de amostragens dos sensores para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto, ETM-3, $T_s = 0,1237 \text{ min}$, em termos de número de períodos de amostragem.



Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 4.27 apresenta o intervalo máximo entre transmissões para o sistema coluna de destilação de petróleo bruto. Note que para o sensor 2, ocorreram 388 instantes de amostragem consecutivas sem transmissão no respectivo *link*. Já para a conexão entre o controlador e o primeiro atuador 2, o controlador ficou 417 instantes de amostragem se transmissão.

Tabela 4.27: Intervalo máximo entre transmissões para sistema Coluna de Destilação de Petróleo Bruto ETM-3, T_s =0,1237 min.

Conexão	Intervalo Máximo
Do sensor 1	308
Do sensor 2	388
Do sensor 3	268
Do sensor 4	269
Para atuador 1	271
Para atuador 2	417
Para atuador 3	283
Para atuador 4	216
Para atuador 5	352

Fonte: Elaborada pelo autor

4.5 Custo Computacional

A implementação de otimizações multiobjetivo em problemas complexos pode apresentar desafios significativos devido ao custo computacional associado. Ao lidar com múltiplos objetivos, as soluções ótimas muitas vezes residem em um espaço de busca mais amplo, resultando em uma busca mais intensiva e demorada. A avaliação de múltiplos objetivos para cada indivíduo na população pode ser computacionalmente intensiva, uma vez que requer a avaliação de várias funções objetivo. Algoritmos de otimização multiobjetivo, podem demandar iterações extensivas para convergir para soluções de Paretoótimas. Portanto, é crucial considerar o custo computacional ao escolher abordagens de otimização multiobjetivo, equilibrando a complexidade do problema com os recursos disponíveis para garantir uma busca eficiente e eficaz no espaço de soluções.

Para este trabalho foi utilizado para simulações o seguinte equipamento: Computador com processador Intel Core i5 – 8G RAM – Windows 10.

Os tempos médios de simulação para cada sistema são:

- Quatro Tanques
 - 0 14h/(ETM 1 a 6) Total: 84 horas ≈ 3,5 dias.
 - 17h/(ETM 7 a 8) Total: 34 horas ≈ 1,4 dias.
- Coluna de Destilação Binária
 - 25h/(ETM 1 a 6) Total: 150 horas ≈ 6,3 dias.
 - 74h/(ETM 7 a 8) Total: 148 horas ≈ 6,1 dias.
- Coluna de Destilação de Petróleo Bruto
 - o 44h/(ETM 1 a 6) Total: 262 horas ≈ 10,9 dias.
 - 50h/(ETM 7 a 8) Total: 100 horas ≈ 4,16 dias.

Apesar de os tempos das simulações serem elevados na fase de projeto o sistema será utilizado em uma indústria por vários anos com eficiência e desempenho otimizados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Neste trabalho foi avaliado o problema da transmissão de dados em sistemas de controle via rede com transmissão acionada por evento. A estratégia abordada trouxe uma opção à arquitetura de rede convencional, baseada em transmissão periódica.

Em sistemas de controle via rede com transmissão baseada em evento – ETC, o envio da informação via rede, só acontece após a diferença entre o sinal no instante de amostragem atual e seu último valor transmitido alcançar o valor limite, ou também chamado de limiar. É esperado que os sensores e controladores sejam capazes de calcular de forma individual os limiares dos mecanismos de disparo por evento. Os controladores e atuadores devem ter capacidade de selecionar qual a mensagem recebida é mais atual, descartando as mensagens que se tornaram obsoletas.

A estratégia utilizada neste trabalho consiste em uma síntese conjunta dos mecanismos de disparo por evento e parâmetros do controlador PI, descentralizado, através de otimização multiobjetivo. Além disso a técnica atual também otimiza o período de amostragem do sistema para obter um bom compromisso entre minimização do uso da rede e o desempenho do sistema de controle. Foram testadas oito possibilidades para cálculos dos mecanismos de disparo por evento, e, para cada mecanismo foram obtidas 50 soluções eficientes com diferentes compromissos entre o número de transmissões e a integral de erro absoluto. É considerado controle periódico com mecanismos de transmissão por evento descentralizados. O método proposto é baseado em um problema de otimização multiobjetivo em que as funções objetivo são a integral de erro absoluto e o número de transmissões. As funções objetivo são calculadas pelo valor médio de várias simulações considerando o efeito de atrasos variantes aleatórios e perdas de pacote.

Através dos estudos de caso de três sistemas multivariáveis foi verificado que o método proposto produz soluções que geram uma redução significativa do número de transmissões sem perda de desempenho. Foi verificado que a síntese conjunta dos controladores e ETM's, com a otimização do período de amostragem, produz resultados melhores que projetar apenas os ETM's para controladores e período de amostragem determinados a priori. Também é observado que, no caso do controle via rede, o menor período de amostragem não significa melhor desempenho do sistema de controle. Dependendo do ETM, pode se obter melhor resultados com períodos de amostragem mais elevados.

O método apresenta como principal desvantagem o alto custo computacional associado a otimização baseada em simulações. Por outro lado, o uso das simulações permite tratar situações mais complexas como ETM's decentralizados, atrasos aleatórios e perdas de pacotes.

Quando comparados os ETM's, podemos descartar os ETM-5 e ETM-6 por não apresentarem soluções eficientes. De forma geral os ETM-1, ETM-3, ETM-4 e ETM-8, com destaque para o ETM-1 e ETM-3, são aqueles que apresentam as soluções mais eficientes.

5.2 Trabalhos Futuros

O desenvolvimento de estratégias para análise e síntese de sistemas de controle via rede é uma área de pesquisa com muitas oportunidades a serem exploradas. Desta forma, as seguintes sugestões de trabalhos para desenvolvimento são apresentadas:

 Compensação do atraso: um campo de pesquisa futuro é considerar a utilização dos controladores PI em conjunto com Preditores de Smith Adaptativos para compensação dos efeitos dos atrasos. O Preditor de Smith é capaz de prover melhorias relevantes no desempenho da malha fechada, mas para sua utilização é necessário que os pacotes de dados tenham estampas de tempo para que os valores de atrasos possam ser definidos.

 Síntese conjunta para diferentes perfis de atraso: um campo de pesquisa futuro para aplicar o método proposto é considerar a utilização de outros perfis de atraso para síntese conjunta. Importante avaliar como o sistema se comporta para diferentes perfis de atraso, comparando outras distribuições.

 Avaliação do modelo em um NCS real: Aplicar a técnica proposta em uma malha de controle real e avaliar o desempenho do sistema na presença de ruídos de medição, perdas de pacotes e atrasos reais.

 Inclusão de outros fatores degenerativos da rede na simulação do controle via rede: incluir na simulação, por exemplo, o efeito de ruídos de medição, erros de discretização na conversão analógico/digital, e variação da distribuição dos atrasos durante a simulação.

• **Prova de estabilidade:** definir uma condição para análise de estabilidade considerando o modelo de controle via rede abordado neste trabalho, levando em conta as transmissões por evento, perdas de pacotes e atrasos aleatórios.

 Nova metodologia de cálculo para ETM-5 e ETM-6: os métodos implementados nos ETM-5 (Valor relativo do valor absoluto do erro) e ETM-6 (Valor relativo do erro ao quadrado) não retornaram valores satisfatórios e poderiam ser trocados por novos métodos.

5.3 Trabalhos Publicados em Eventos Científicos e Periódicos

O seguinte trabalho foi publicado no Congresso Brasileiro de Automática, 2022 a partir dos estudos realizados nesta dissertação:

GODINHO, M. F.; BELO, M. A. R.; BATISTA, A. P.; GONÇALVES, E. N. Título: Síntese conjunta do controlador e dos mecanismos de transmissão por evento em sistemas de controle via rede. Congresso Brasileiro de Automática-CBA, 2022.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKPAN, Vincent A.; SAMARAS, Ioakeim K.; HASSAPIS, George D. Implementation of Distributed Network Control System over a Service-Oriented-Architecture Computer Network Based on Device Profile for Web Services for Industrial Control Applications. International Journal of Control, v. 12, n. 1, p. 1-25, 2022.

ALVES, Rodrigo Gualberto Rodrigues. Sistemas de controle extremal em rede com dados amostrados. 2021. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

ANAND, S., Kumar, M., & Kumar, S. Discrete-time prediction based eventtriggered controller design: An application to networked multi-area power system with time delays. IFAC Journal of Systems and Control, p. 100220, 2023.

ARROYO, José Elias Claudio. Heurísticas e metaheuristicas para otimização combinatória multiobjetivo. 2002. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado)-FEEC, Universidade Estadual de Campinas.

BAILLIEUL, John; ANTSAKLIS, Panos J. Control and communication challenges in networked real-time systems. Proceedings of the IEEE, v. 95, n. 1, p. 9-28, 2007.

BATISTA, Ana Paula; JOTA, Fábio Gonçalves. On the effects of time delay variations in the design of networked control system. International Journal of Systems, Control and Communications, v. 5, n. 2, p. 120-139, 2013.

BATISTA, Ana Paula. Projeto e análise de estabilidade de sistemas reais de controle via redes. 2014. Tese de Doutorado, UFMG, Belo Horizonte, MG.

BATISTA, Ana Paula; JOTA, Fábio Gonçalves. Analysis of the Most Likely Regions of Stability of an NCS and Design of the Corresponding Event-driven Controller. International Journal of Automation and Computing, v. 15, n. 1, p. 39-51, 2018.

BELO, M. A. R., Batista, A. P., & Gonçalves, E. N.. Minimização do número de transmissões em controle discreto com amostragem por evento. In: Congresso Brasileiro de Automática-CBA. 2020.

GODINHO, M. F.; BELO, M. A. R.; BATISTA, A. P.; GONÇALVES, E. N. Título: Síntese conjunta do controlador e dos mecanismos de transmissão por evento em sistemas de controle via rede. Congresso Brasileiro de Automática-CBA, 2022. BEMPORAD, A., Heemels, M., & Johansson, M. Networked control systems, volume 406. Springer, 2010.

BELO, M. A. R. Minimização do uso da rede de comunicação em controle via rede com transmissão por evento. Dissertação de Mestrado. PPGEE – CEFET. p. 1-109, 2021.

BORGERS, Dominicus Paulus; HEEMELS, WP Maurice H. Event-separation properties of event-triggered control systems. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 59, n. 10, p. 2644-2656, 2014.

CHEN, H. M., Lu, Y. F., Jhang, J. H., & Sun, H. S. An OpenDDS cross-platform data exchange module for cloud-edge-based industrial internet of things. In: Proceedings of the Conference on Research in Adaptive and Convergent Systems. 2022. p. 153-158.

COUTINHO, Pedro Henrique Silva; PALHARES, Reinaldo Martínez. Dynamic periodic event-triggered gain-scheduling control co-design for quasi-LPV systems. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, v. 41, p. 101044, 2021.

COUTINHO, P. H. S., Bessa, I., Pessim, P. S., & Palhares, R. M. A switching approach to event-triggered control systems under denial-of-service attacks. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, v. 50, p. 101383, 2023.

DA SILVA JR, JM Gomes; LAGES, W. F.; SBARBARO, Daniel. Event-triggered PI control design. IFAC Proceedings Volumes, v. 47, n. 3, p. 6947-6952, 2014.

DOLK, V. S.; BORGERS, Dominicus P.; HEEMELS, W. P. M. H. Output-based and decentralized dynamic event-triggered control with guaranteed Lp-gain performance and zeno-freeness. IEEE Transactions on automatic control, v. 62, n. 1, p. 34-49, 2016.

DONKERS, M. C. F., Heemels, W. P. M. H., Bernardini, D., Bemporad, A., & Shneer, V. Stability analysis of stochastic networked control systems. Automatica, v. 48, n. 5, p. 917-925, 2012.

FRIDMAN, Emilia. Tutorial on Lyapunov-based methods for time-delay systems. European Journal of Control, v. 20, n. 6, p. 271-283, 2014.

GAUTAM, M. K., Pati, A., Mishra, S. K., Appasani, B., Kabalci, E., Bizon, N., & Thounthong, P. A comprehensive review of the evolution of networked control system technology and its future potentials. Sustainability, v. 13, n. 5, p. 2962, 2021.

GIRARD, Antoine. Dynamic triggering mechanisms for event-triggered control. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 60, n. 7, p. 1992-1997, 2014.

GOEDEL, Rafal; SANFELICE, Ricardo G.; TEEL, Andrew R. Hybrid dynamical systems: modeling stability, and robustness. Princeton, NJ, USA, 2012.

GIRARD, Antoine. Dynamic triggering mechanisms for event-triggered control. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 60, n. 7, p. 1992-1997, 2014.

GODOY, Eduardo Paciência. Desenvolvimento de sistemas de controle via rede (NCS) para aplicações em redes com protocolo CAN. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GONÇALVES, Eduardo Nunes; BELO, Mateus Alves Ribeiro; BATISTA, Ana Paula. Self-adaptive multi-objective differential evolution algorithm with first front elitism for optimizing network usage in networked control systems. Applied Soft Computing, v. 114, p. 108112, 2022.

GROFF, L. B., Moreira, L. G., da Silva, J. G., & Sbarbaro, D. Observer-based event-triggered control: A discrete-time approach. In: 2016 American Control Conference (ACC). IEEE, 2016. p. 4245-4250.

GU, Z., Yue, D., Liu, J., & Ding, Z. H∞ tracking control of nonlinear networked systems with a novel adaptive event-triggered communication scheme. Journal of the Franklin Institute, v. 354, n. 8, p. 3540-3553, 2017.

GUAN, Yanpeng; HAN, Qing-Long; GE, Xiaohua. On asynchronous eventtriggered control of decentralized networked systems. Information Sciences, v. 425, p. 127-139, 2018.

HALDORAI, A., Mahdi, Q. S., & Nehru, G. J. Advanced Communication in Cyber Physical System Infrastructure, Protocols, and Challenges. In: 2023 Fifth International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT). IEEE, 2023. p. 1-10.

HASHIMOTO, Kleber. Técnicas de otimização combinatória multiobjetivo aplicadas na estimação do desempenho elétrico de redes de distribuição. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

HESPANHA, Joo P.; NAGHSHTABRIZI, Payam; XU, Yonggang. A survey of recent results in networked control systems. Proceedings of the IEEE, v. 95, n. 1, p. 138-162, 2007.

HEEMELS, W. M. H., Teel, A. R., Van de Wouw, N., & Nešić, D. Networked control systems with communication constraints: Tradeoffs between transmission intervals, delays and performance. IEEE Transactions on Automatic control, v. 55, n. 8, p. 1781-1796, 2010.

HEEMELS, W. P. M. H.; DONKERS, M. C. F.; TEEL, Andrew R. Periodic eventtriggered control based on state feedback. In: 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. IEEE, 2011. p. 2571-2576.

HEEMELS, Wilhelmus PMH; JOHANSSON, Karl Henrik; TABUADA, Paulo. An introduction to event-triggered and self-triggered control. In: 2012 ieee 51st ieee conference on decision and control (cdc). IEEE, 2012. p. 3270-3285.

HEEMELS, WPM Heemels; DONKERS, M. C. F.; TEEL, Andrew R. Periodic event-triggered control for linear systems. IEEE Transactions on automatic control, v. 58, n. 4, p. 847-861, 2012.

HESPANHA, Joo P.; NAGHSHTABRIZI, Payam; XU, Yonggang. A survey of recent results in networked control systems. Proceedings of the IEEE, v. 95, n. 1, p. 138-162, 2007.

JOTA, F. G., Batista, A. P., Herzog, M. M., Jota, P. R., Martins, E. C., & Venâncio, J. R. Effective energy management through on-line monitoring and control: A case study in cooling chambers of a Blood Center. In: 2013 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE). IEEE, 2013. p. 1-9.

JR, Manuel Mazo; TABUADA, Paulo. Decentralized event-triggered control over wireless sensor/actuator networks. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 56, n. 10, p. 2456-2461, 2011.

JR, Manuel Mazo; CAO, Ming. Asynchronous decentralized event-triggered control. Automatica, v. 50, n. 12, p. 3197-3203, 2014.

KAJATI, E., Papcun, P., Liu, C., Zhong, R. Y., Koziorek, J., & Zolotova, I. Cloud based cyber-physical systems: Network evaluation study. Advanced engineering informatics, v. 42, p. 100988, 2019.

KARTAKIS, S., Fu, A., Mazo, M., & McCann, J. A. Communication schemes for centralized and decentralized event-triggered control systems. IEEE Transactions on Control Systems Technology, v. 26, n. 6, p. 2035-2048, 2017.

LI, Fuqiang; FU, Jingqi; DU, Dajun. An improved event-triggered communication mechanism and L^{∞} control co-design for network control systems. Information Sciences, v. 370, p. 743-762, 2016.

LI, H., Yang, Q., Zhan, X., Wu, J., & Yan, H. Hybrid-Triggered H∞ Control for Networked Control Systems with Deception Attacks. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2023.

LIAN, Feng-Li; MOYNE, James; TILBURY, Dawn. Network design consideration for distributed control systems. IEEE transactions on control systems technology, v. 10, n. 2, p. 297-307, 2002.

LIAN, F. L., Yook, J. K., Tilbury, D. M., & Moyne, J. Network architecture and communication modules for guaranteeing acceptable control and communication performance for networked multi-agent systems. IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 2, n. 1, p. 12-24, 2006.

LIU, Tengfei; JIANG, Zhong-Ping. A small-gain approach to robust eventtriggered control of nonlinear systems. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 60, n. 8, p. 2072-2085, 2015.

LIU, Dan; YANG, Guang-Hong; ER, Meng Joo. Event-triggered control for T–S fuzzy systems under asynchronous network communications. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, v. 28, n. 2, p. 390-399, 2019.

LUO, Biao; HUANG, Tingwen; LIU, Derong. Periodic event-triggered suboptimal control with sampling period and performance analysis. IEEE Transactions on Cybernetics, v. 51, n. 3, p. 1253-1261, 2019.

MATTATHIL, Gemith. Networked Control Systems With Communication Delays. 2023.

MISHRA, S. K., Jha, A. V., Verma, V. K., Appasani, B., Abdelaziz, A. Y., & Bizon, N. An optimized triggering algorithm for event-triggered control of networked control systems. Mathematics, v. 9, n. 11, p. 1262, 2021.

MISKOWICZ, Marek. Send-on-delta concept: An event-based data reporting strategy. sensors, v. 6, n. 1, p. 49-63, 2006.

MOREIRA, L. G., Groff, L. B., da Silva, J. G., & Tarbouriech, S. Event-triggered PI control for continuous plants with input saturation. In: 2016 American Control Conference (ACC). IEEE, 2016. p. 4251-4256.

MOREIRA, Luciano Goncalves; GROFF, Leonardo Boering; GOMES DA SILVA JR, J. M. Event-triggered state-feedback control for continuous-time plants subject to input saturation. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, v. 27, n. 5, p. 473-484, 2016.

MOREIRA, Luciano Goncalves; GROFF, Leonardo Boering; GOMES DA SILVA JR, J. M. Event-triggered state-feedback control for continuous-time plants subject to input saturation. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, v. 27, n. 5, p. 473-484, 2016.

MOREIRA, L. G., Groff, L. B., da Silva Jr, J. G., & Coutinho, D. Event-triggered control for nonlinear rational systems. IFAC-PapersOnLine, v. 50, n. 1, p. 15307-15312, 2017.

Moreira, L. G., Groff, L. B., da Silva Jr, J. G., & Tarbouriech, S. PI event-triggered control under saturating actuators. International Journal of Control, v. 92, n. 7, p. 1634-1644, 2019.

MOREIRA, Luciano Goncalves. Event-triggered control for rational and Lur'e type nonlinear systems. 2018.

MOYNE, James R.; TILBURY, Dawn M. The emergence of industrial control networks for manufacturing control, diagnostics, and safety data. Proceedings of the IEEE, v. 95, n. 1, p. 29-47, 2007.

PARETO, Vilfredo. Cours d'économie politique: professé à l'Université de Lausanne. F. Rouge, 1896.

PENG, Chen; HAN, Qing-Long. A Novel Event-Triggered Transmission Scheme and L2 Control Co-Design for Sampled-Data Control Systems. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 58, n. 10, p. 2620-2626, 2013.

PENG, Chen; YANG, Tai Cheng. Event-triggered communication and H∞ control co-design for networked control systems. Automatica, v. 49, n. 5, p. 1326-1332, 2013.

PRAJAPATI, Ambar. Reliable Multicast of Dynamic Content Streams from AMQP to NORM Protocol-based Systems. In: 2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC). IEEE, 2022. p. 0907-0914.

RAJAN, M. S., Weldcherkos, T., Khan, S. A., Baig, M. A. A., & Reddy, C. A. Integration of IOT and control systems for industry 4.0 applications. In: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2023.

RICHARD, Jean-Pierre. Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems. automatica, v. 39, n. 10, p. 1667-1694, 2003.

SANJUAN, E. B., Cardiel, I. A., Cerrada, J. A., & Cerrada, C. Message queuing telemetry transport (MQTT) security: A cryptographic smart card approach. IEEE Access, v. 8, p. 115051-115062, 2020.

SIQUEIRA, Paulo Henrique. Metaheurísticas e aplicações, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ – Departamento de Expressão Gráfica, 2014. 83p. Notas de Aula.

SO, Jimmy Kin Cheong. Delay Modeling and Controller Design for Networked Control Systems. 147p., Masters Thesis, University of Toronto, Toronto, 2003.

SOARES, Raphael Frediani. Síntese de controladores PI multivariáveis centralizados e esparsos. Dissertação de Mestrado. PPGEE – CEFET. p. 1-90, 2018.

TABUADA, Paulo. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks. IEEE Transactions on Automatic control, v. 52, n. 9, p. 1680-1685, 2007.
TALLAPRAGADA, Pavankumar; CHOPRA, Nikhil. Decentralized eventtriggering for control of nonlinear systems. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 59, n. 12, p. 3312-3324, 2014.

TARBOURIECH, S., Seuret, A., Manoel Gomes da Silva Jr, J., & Sbarbaro, D. Observer-based event-triggered control co-design for linear systems. IET Control Theory & Applications, v. 10, n. 18, p. 2466-2473, 2016.

SBARBARO, Daniel; TARBOURIECH, Sophie; DA SILVA, JM Gomes. An eventtriggered observer based control strategy for SISO systems. In: 53rd IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2014. p. 2789-2794.

TIBERI, Ubaldo; ARAÚJO, José; JOHANSSON, Karl Henrik. On event-based PI control of first-order processes. IFAC Proceedings Volumes, v. 45, n. 3, p. 448-453, 2012.

TIBERI, Ubaldo; LINDBERG, Carl-Fredrik; ISAKSSON, Alf J. Dead-band selftriggered PI control for processes with dead-time. IFAC Proceedings Volumes, v. 45, n. 3, p. 442-447, 2012.

YAN, S., Shen, M., Nguang, S. K., & Zhang, G. Event-triggered H_{∞} control of networked control systems with distributed transmission delay. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 65, n. 10, p. 4295-4301, 2019.

YANG, Tai C. Networked control system: a brief survey. IEE Proceedings-Control Theory and Applications, v. 153, n. 4, p. 403-412, 2006.

YU, Hao; HAO, Fei. Input-to-state stability of integral-based event-triggered control for linear plants. Automatica, v. 85, p. 248-255, 2017.

YUE, Dong; TIAN, Engang; HAN, Qing-Long. A delay system method for designing event-triggered controllers of networked control systems. IEEE Transactions on automatic control, v. 58, n. 2, p. 475-481, 2012.

WANG, Xiaofeng; SUN, Yu; HOVAKIMYAN, Naira. Asynchronous task execution in networked control systems using decentralized event-triggering. Systems & Control Letters, v. 61, n. 9, p. 936-944, 2012.

WANG, W., Postoyan, R., Nešić, D., & Heemels, W. P. M. H. Periodic eventtriggered control for nonlinear networked control systems. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 65, n. 2, p. 620-635, 2019.

WOOD, R. K.; BERRY, M. W. Terminal composition control of a binary distillation column. Chemical Engineering Science, v. 28, n. 9, p. 1707-1717, 1973.

ZHANG, Xian-Ming; HAN, Qing-Long. Event-triggered dynamic output feedback control for networked control systems. IET Control Theory & Applications, v. 8, n. 4, p. 226-234, 2014.

ZHANG, Hongguang; YU, Hao; HAO, Fei. Decentralized integral-based eventtriggered stabilization for linear plant with actuator saturation and output feedback. Applied Sciences, v. 7, n. 1, p. 11, 2016.

ZHANG, Xian-Ming; HAN, Qing-Long; ZHANG, Bao-Lin. An overview and deep investigation on sampled-data-based event-triggered control and filtering for networked systems. IEEE Transactions on industrial informatics, v. 13, n. 1, p. 4-16, 2016.

ZHANG, H., Wang, Z., Yan, H., Yang, F., & Zhou, X. Adaptive event-triggered transmission scheme and H∞ filtering co-design over a filtering network with switching topology. IEEE transactions on cybernetics, v. 49, n. 12, p. 4296-4307, 2018.

ZHANG, X. M., Han, Q. L., Ge, X., Ding, D., Ding, L., Yue, D., & Peng, C. Networked control systems: A survey of trends and techniques. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, v. 7, n. 1, p. 1-17, 2019.

ZHANG, L., Nguang, S. K., Ouyang, D., & Yan, S. Synchronization of delayed neural networks via integral-based event-triggered scheme. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, v. 31, n. 12, p. 5092-5102, 2020.

ZHOU, Weixiang; WANG, Yueying; LIANG, Yinzheng. Sliding mode control for networked control systems: A brief survey. ISA transactions, v. 124, p. 249-259, 2022.

Apêndice A – Soluções

Conjunto de Soluções – Curvas de Pareto – Sistema Quatro Tanques.

Tabela A.1: Melhores soluções para Sistema Quatro Tanques: ETM-1, ETM-2 e ETM-7

	ETM-1					ETM-2		ETM-7			
Solução	IAE	N _t	T _s		IAE	N _t	T _s	IAE	N _t	T _s	
1	5 <i>,</i> 88	15.930	0,1040		5,89	25.922	0,1019	6,17	2.715	0,1027	
2	5 <i>,</i> 89	6.456	0,1040		5,89	25.274	0,1019	6,22	2.501	0,1027	
3	5,91	4.196	0,1045		5,90	25.034	0,1023	6,28	2.169	0,1034	
4	5,93	4.091	0,1010		5,94	13.984	0,1019	6,41	2.145	0,1034	
5	5,94	3.978	0,1008		5,94	13.974	0,1019	6,63	2.090	0,1027	
6	5 <i>,</i> 95	3.706	0,1010		5,98	3.114	0,1019	6,72	2.011	0,1034	
7	5,97	3.455	0,1008		6,31	2.960	0,1023	6,74	1.918	0,1027	
8	5,99	3.386	0,1008		6,36	2.818	0,1023	6,75	1.890	0,1027	
9	6,02	3.153	0,1008		6,38	2.737	0,1023	6,83	1.831	0,1027	
10	6,06	2.915	0,1047		6,45	2.637	0,1023	6,93	1.795	0,1027	
11	6,09	2.664	0,1010		6,46	2.095	0,1048	7,15	1.591	0,1027	
12	6,15	2.451	0,1010		7,11	1.855	0,1023	7,23	1.558	0,1027	
13	6,20	2.381	0,1003		7,15	1.555	0,1000	7,44	1.528	0,1027	
14	6,26	1.846	0,1010		7,28	1.451	0,1013	7,55	1.236	0,1008	
15	6,40	1.772	0,1040		7,53	1.298	0,1018	7,73	1.214	0,1004	
16	6,62	1.636	0,1010		7,67	1.205	0,1018	7,77	1.174	0,1004	
17	6,67	1.547	0,1044		7,99	1.102	0,1018	7,81	1.132	0,1004	
18	6,88	1.390	0,1040		8,36	1.010	0,1018	8,07	1.104	0,1004	
19	7,00	1.348	0,1000		8,83	843	0,1409	8,19	1.048	0,1391	
20	7,17	1.270	0,1040		9,88	729	0,1409	8,45	1.027	0,1391	
21	7,38	1.173	0,1040		10,48	677	0,1794	8,47	1.000	0,1391	
22	7,64	1.123	0,1032		10,93	622	0,1399	8,60	947	0,1391	
23	8,04	1.050	0,1040		11,61	589	0,1888	8,77	906	0,1391	
24	8,13	1.003	0,1040		12,45	542	0,1897	8,95	878	0,1391	
25	8,37	938	0,1369		13,01	509	0,2586	9,05	861	0,1391	
26	8,62	887	0,1386		14,51	457	0,3915	9,44	817	0,1391	
27	8,84	859	0,1386		16,03	405	0,3929	10,02	747	0,1747	
28	9,18	826	0,1366		16,65	389	0,3907	10,31	707	0,1754	
29	9,50	774	0,1366		18,12	373	0,4897	10,53	692	0,1754	
30	9,76	759	0,1794		21,03	335	0,4959	10,75	665	0,1754	
31	10,17	717	0,1946	ļ	23,75	332	0,5000	10,98	639	0,1754	
32	10,87	672	0,1945		23,82	328	0,5000	11,58	611	0,1754	
33	11,21	637	0,2613		27,44	324	0,4953	12,06	596	0,1754	
34	11,72	615	0,2613	ļ	27,87	317	0,4959	13,23	561	0,1754	
35	11,88	593	0,2613	ļ	29,24	310	0,4959	14,00	539	0,1754	
36	12,75	590	0,2613	ļ	38,14	307	0,4917	15,12	520	0,3849	
37	12,93	578	0,2613	ļ	43,42	304	0,4959	15,59	495	0,3849	
38	13,71	576	0,2613	ļ	44,67	298	0,4959	16,02	486	0,3849	
39	14,08	555	0,3710	ļ	57,15	287	0,4959	16,41	470	0,3849	
40	14,34	544	0,3775	ļ	59,86	281	0,4959	16,82	464	0,4072	
41	14,66	520	0,3775	ļ	60,51	278	0,4959	17,43	436	0,4072	
42	15,80	507	0,4975	ļ	63,48	277	0,4959	18,06	418	0,4072	
43	16,36	495	0,3501		72,41	271	0,4655	18,65	408	0,4072	
44	17,36	470	0,5000	ļ	73,21	267	0,4655	19,72	397	0,5000	
45	17,80	460	0,4961	ļ	94,70	266	0,5000	21,18	384	0,4072	
46	18,35	439	0,4961	ļ	100,36	264	0,5000	21,84	371	0,4654	
47	19,96	438	0,5000	ļ	102,07	261	0,5000	22,08	366	0,4654	
48	20,17	432	0,5000	ļ	112,77	257	0,5000	24,60	363	0,5000	
49	47,52	428	0,4991	ļ	219,41	256	0,4959	25,24	350	0,5000	
50	47,72	419	0,4991		316,50	255	0,4985	29,25	345	0,5000	

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela A.2: Melhores soluções Sistema Wood & Berry: ETM-2, ETM-3 e ETM-4

	ETM-2					ETM-3		ETM-4			
Solução	IAE	N _t	T _s		IAE	N _t	T _s	IAE	N _t	T _s	
1	32,23	25.711	0,1000		33,94	11.036	0,1362	42,23	5.413	0,2609	
2	32,53	25.605	0,1000		34,57	3.229	0,1100	42,50	5.338	0,2609	
3	33 <i>,</i> 53	25.092	0,1000		34,57	3.116	0,1362	42,77	5.315	0,2609	
4	34,40	4.989	0,1001		34,65	2.430	0,1362	42,80	1.126	0,2151	
5	34,84	3.214	0,1000		34,97	2.259	0,1316	43,73	1.088	0,2609	
6	35,22	2.933	0,1000		35,18	2.184	0,1316	44,06	1.021	0,2293	
7	35,69	2.763	0,1221		35,36	2.126	0,1316	44,93	997	0,2151	
8	35,77	2.536	0,1113		35,60	2.005	0,1362	45,83	946	0,2609	
9	36,67	2.429	0,1113		35,91	1.854	0,1865	46,50	912	0,2609	
10	37,44	2.322	0,1113		36,85	1.755	0,1865	46,67	879	0,2609	
11	37,68	2.111	0,1174		36,86	1.706	0,1865	47,62	823	0,2609	
12	39,24	1.921	0,2343		38,32	1.525	0,1865	48,31	795	0,2609	
13	39 <i>,</i> 55	1.756	0,2343		38,80	1.313	0,2254	49,65	762	0,2609	
14	40,88	1.567	0,2343		39,16	1.254	0,2254	50,80	741	0,2609	
15	42,44	1.452	0,2279		40,68	1.136	0,2254	52,18	702	0,2713	
16	44,96	1.273	0,3777		41,15	1.108	0,2254	54,42	642	0,1449	
17	46,02	1.089	0,5274		41,61	1.080	0,2254	55 <i>,</i> 86	613	0,1449	
18	47,34	996	0,5274		43,48	1.016	0,2693	56,05	582	0,1449	
19	48,21	914	0,5274		43,67	919	0,2562	57,20	547	0,1449	
20	51,64	818	0,5274		43,97	895	0,2562	59,12	488	0,2671	
21	56,76	671	0,9846		45,31	835	0,2561	62,49	471	0,9796	
22	59,42	600	0,9846		46,26	766	0,2693	66,53	436	0,9842	
23	64,17	514	0,9420		47,22	738	0,1362	70,43	417	0,9833	
24	72,30	444	0,9298		48,57	699	0,1362	76,23	406	0,9542	
25	80,92	425	0,9309		49,54	649	0,1362	80,12	399	0,9807	
26	85,40	400	0,9256		51,83	624	0,1426	86,78	378	0,9796	
27	110,30	377	0,9870		53,17	562	0,1426	96,56	372	0,9643	
28	117,41	366	0,9870		55,56	543	0,1410	104,03	364	0,9807	
29	129,92	351	0,9420		58,38	475	0,1041	531,11	364	0,9791	
30	132,56	346	0,9420		63,19	439	0,1041	550 <i>,</i> 86	361	0,9807	
31	166,88	345	1,0000		68,10	424	0,1747	558 <i>,</i> 45	360	0,9807	
32	195,45	336	0,9420		70,21	414	0,3923	567,52	356	0,9807	
33	430,23	328	1,0000		80,77	409	0,4260	571,68	353	0,9791	
34	522,27	326	0,9420		86,68	375	0,2695	596,41	351	0,9807	
35	524,35	323	0,9420		815,55	370	0,1796	638,35	345	0,9807	
36	631,63	323	0,9420		830,78	362	0,1976	647,35	339	0,9807	
37	652,74	317	0,9420		853,29	359	0,2328	661,68	336	0,9807	
38	766,39	317	0,9420		872,75	356	0,1796	677,04	334	0,9960	
39	773,94	309	1,0000		886,17	354	0,1796	684,72	331	0,9807	
40	799,16	305	1,0000		892,77	352	0,2328	732,86	327	0,9807	
41	806,80	300	1,0000		904,02	345	0,3240	802,08	324	1,0000	
42	936,88	299	1,0000		944,32	333	0,2100	862,69	320	0,2979	
43	1068,80	299	0,9420		969,11	330	0,2695	912,73	313	1,0000	
44	1120,90	296	0,9420		1070,90	324	0,1877	935,10	308	0,9997	
45	1160,20	292	0,9420	l	10/2,90	321	0,3789	988,25	305	0,9997	
46	1209,80	288	0,9420	1	1185,90	320	0,4260	1.000,30	305	0,9997	
47	1249,80	287	0,9420		1206,60	320	0,3469	1.013,50	302	0,9997	
48	12/0,/0	284	0,9420		1223,20	318	0,3469	1.152,60	301	0,9997	
49	1316,70	282	0,9420		1335,50	316	0,1975	1.247,00	298	0,9997	
50	1370,80	273	0,9420		1458,60	314	0,1975	1.265,50	293	0,9947	

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela A.3: Melhores soluções para Sistema Destilaria de Petróleo Bruto: ETM-3, ETM-4 e ETM-8

	ETM-3				ETM-4		ETM-8			
Solução	IAE	N _t	T _s	IAE	N _t	T _s	IAE	N _t	T _s	
1	60,29	8.922	0,1412	60,94	2.573	0,1053	57,78	4.670	0,1019	
2	60,83	8.876	0,1412	61,54	2.119	0,1053	57,81	3.540	0,1019	
3	60,95	2.859	0,1412	61,94	2.094	0,1053	57,98	3.454	0,1019	
4	61,40	2.769	0,1412	62,11	2.039	0,1053	58,22	3.274	0,1019	
5	61,63	2.711	0,1412	62,70	2.004	0,1377	58,31	3.138	0,1019	
6	61,75	2.592	0,1412	62,89	1.974	0,1377	58,44	3.062	0,1019	
7	61,98	2.470	0,1412	63,29	1.939	0,1707	58,47	2.910	0,1019	
8	62,15	2.347	0,1412	63,48	1.881	0,1053	59 <i>,</i> 40	2.855	0,1019	
9	62,50	2.212	0,1412	64,06	1.853	0,1053	59,81	2.731	0,1020	
10	62,93	2.166	0,1412	64,42	1.805	0,1053	60,25	2.617	0,1019	
11	63,45	2.004	0,1412	64,46	1.768	0,1053	60,49	2.550	0,1019	
12	64,14	1.938	0,1449	64,97	1.745	0,1053	60,60	2.472	0,1019	
13	64,52	1.813	0,1387	65 <i>,</i> 66	1.701	0,1053	61,16	2.411	0,1019	
14	64,95	1.775	0,1430	65 <i>,</i> 69	1.638	0,1053	61,35	2.218	0,1019	
15	65,37	1.745	0,1387	67,19	1.606	0,1053	62,94	2.101	0,1017	
16	66,10	1.633	0,1387	67,43	1.546	0,1048	63,60	2.001	0,1017	
17	66,84	1.571	0,1400	68,11	1.499	0,1674	64,23	1.978	0,1018	
18	67,14	1.534	0,1400	68,38	1.408	0,1447	64,58	1.910	0,1019	
19	67,69	1.506	0,1387	70,23	1.384	0,1674	65,15	1.833	0,1019	
20	68,88	1.418	0,1355	70,70	1.344	0,1696	65,88	1.774	0,1019	
21	70,18	1.359	0,1387	72,18	1.296	0,1051	66,34	1.745	0,1019	
22	70,49	1.324	0,1085	73,47	1.261	0,1674	68,05	1.698	0,1019	
23	71,52	1.279	0,1085	74,81	1.227	0,1593	69,42	1.609	0,1019	
24	71,84	1.255	0,1387	74,93	1.145	0,1245	69,82	1.593	0,1019	
25	72,90	1.213	0,1387	77,97	1.092	0,1074	72,30	1.521	0,3325	
26	74,03	1.185	0,1387	80,87	1.026	0,1089	74,38	1.488	0,3804	
27	74,90	1.136	0,1387	83,52	987	0,1181	75,07	1.453	0,3804	
28	75,50	1.108	0,1175	84,16	973	0,1508	75,49	1.428	0,3804	
29	76,46	1.088	0,1257	86,61	939	0,1508	75,89	1.410	0,1018	
30	77,46	1.076	0,1257	92,18	886	0,1213	76,83	1.381	0,1019	
31	78,93	1.033	0,1300	93,92	853	0,1252	77,43	1.316	0,1019	
32	79,63	1.017	0,1436	98,61	827	0,1214	78,64	1.283	0,1019	
33	80,28	1.006	0,1436	103,21	803	0,1219	79,97	1.243	0,1019	
34	83,01	926	0,1240	122,70	785	0,1178	81,36	1.223	0,1020	
35	85,68	918	0,1239	123,51	785	0,1178	82,46	1.180	0,1349	
36	85,96	904	0,1239	204,28	785	0,1178	82,99	1.121	0,1349	
37	87,50	892	0,1239	209,44	760	0,1453	83,70	1.103	0,1349	
38	89,23	868	0,1736	212,48	747	0,1453	85,71	1.078	0,1637	
39	90,71	849	0,1237	216,78	742	0,1453	86,27	1.038	0,3175	
40	92,30	830	0,1002	223,96	722	0,2281	87,68	1.010	0,3175	
41	93,02	810	0,1736	233,09	713	0,1453	89,31	976	0,3176	
42	97,11	809	0,1330	233,67	707	0,1453	90,29	965	0,3176	
43	98,09	803	0,1028	237,86	695	0,1213	90,77	945	0,1019	
44	100,68	796	0,1080	243,52	685	0,1178	91,73	927	0,3176	
45	103,05	796	0,1384	255,57	683	0,1178	95,46	920	0,4050	
46	108,66	790	0,1384	260,81	672	0,1178	96,29	908	0,4050	
47	121,06	/79	0,1384	2/1,09	664	0,1977	97,66	896	0,3976	
48	123,67	/69	0,1384	272,91	652	0,1977	98,79	881	0,3976	
49	130,63	/66	0,1384	275,86	640	0,1053	99,85	875	0,3976	
50	132,50	/62	0,1384	318,87	638	0,1378	100,69	870	0,4050	

Fonte: Elaborada pelo autor