

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, ASSOCIAÇÃO
AMPLA ENTRE UFSJ/CEFET-MG

MATEUS ALVES RIBEIRO BELO

**MINIMIZAÇÃO DO USO DA REDE DE COMUNICAÇÃO EM
CONTROLE VIA REDE COM TRANSMISSÃO POR EVENTO**

Minas Gerais

2021

MATEUS ALVES RIBEIRO BELO

**MINIMIZAÇÃO DO USO DA REDE DE COMUNICAÇÃO EM
CONTROLE VIA REDE COM TRANSMISSÃO POR EVENTO**

Versão original

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.

Coorientador: Prof^a. Dr^a. Ana Paula Batista.

Minas Gerais

2021

B452m Belo, Mateus Alves Ribeiro
Minimização do uso da rede de comunicação em controle via rede com transmissão por evento / Mateus Alves Ribeiro Belo. – 2021. xii, 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, Erivelton Geraldo Nepomuceno e João Manoel Gomes da Silva Jr.

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

1. Redes de computadores – Controle – Teses. 2. Controle automático – Teses. 3. Otimização matemática – Teses. 4. Computação evolutiva – 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 621.3191



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



Mateus Alves Ribeiro Belo

“Minimização do uso da rede de comunicação em controle via rede com transmissão por evento.”

Dissertação nº 284 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 14 de Fevereiro de 2022 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. Erivelton Geraldo Nepomuceno
Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ

Prof. Dr. João Márcel Gomes da Silva Jr.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

“Tudo o que temos de decidir é o que fazer com o tempo que nos é dado.”

(J. R. R. Tolkien)

RESUMO

O uso de redes de comunicação de dados, especialmente sem fio, é uma opção interessante para redução de custos de instalação e manutenção de sistemas de controle. Por outro lado, o uso de redes de comunicação introduz novos fatores a serem considerados no projeto do sistema de controle tais como atrasos aleatórios de transmissão de mensagens e perdas de pacotes. Esses problemas são acentuados com o maior uso da rede. Em sistemas de controle via rede, por meio de transmissão acionada por eventos, é possível reduzir o uso da rede, mantendo o desempenho do sistema de controle em níveis satisfatórios. Existem vários esquemas para transmissão acionada por eventos de acordo com a lei de disparo. A dificuldade de se aplicar transmissão acionada por eventos é a determinação dos ajustes ótimos da lei de acionamento que resultem em um bom compromisso entre o uso da rede e o desempenho do sistema de controle. No caso de transmissão por evento descentralizada, é necessário ajustar os parâmetros da lei de acionamento para cada *link* sensor/controlador e controlador/atuador. Neste trabalho, propomos um problema de otimização multi-objetivo para ajustar os mecanismos acionados por eventos. Ao resolver o problema proposto por meio da otimização evolutiva multi-objetivo, um conjunto de soluções eficientes é gerado com diferentes compromissos entre o desempenho do sistema de controle e o número de transmissões pela rede de comunicação. Para resolver o problema proposto, um aprimoramento em um algoritmo evolução diferencial multi-objetivo é realizado com um novo método de elitismo da Fronteira Pareto-ótimo. O método proposto é aplicado para ajustar os mecanismos acionados por eventos descentralizados para um controlador dado a priori, considerando atrasos aleatórios induzidos pela rede e perdas de pacotes. Três estudos de caso de sistemas de controle multivariáveis são apresentados, comparando o desempenho de oito diferentes esquemas acionados por eventos descentralizados, analisando a seleção do período de amostragem e demonstrando a eficácia do método de ajuste proposto.

Palavras-chaves: Sistemas de controle via rede; mecanismo de acionamento por evento; otimização multi-objetivo; algoritmo evolução diferencial multi-objetivo.

ABSTRACT

The use of data communication networks, especially wireless, is an interesting option to reduce the costs of installing and maintenance in control systems. On the other hand, the use of communication networks introduces new factors to consider in the control system design such as random message transmission delays and packet dropouts. These problems are accentuated with the increased use of the network. In networked control systems, by means of event-triggered transmission, it is possible to reduce the network usage, keeping the control system performance at satisfactory levels. There are several schemes for transmission triggered by events according to the trigger law. The difficulty in applying event-triggered transmission is determining the optimal settings that result in a good tradeoff between network usage and control system performance. In the case of decentralized event transmission, it is necessary to adjust the parameters of the trigger law for each link sensor/controller and controller/actuator. In this work, a multi-objective optimization problem is proposed to tune the event-triggered mechanisms. On solving the proposed problem by means of multi-objective evolutionary optimization, a set of efficient solutions are generated with different tradeoffs between control system performance and the number of transmissions in the communication network. To solve the proposed problem, an improvement in a multi-objective differential evolution algorithm is developed with a new elitism method of the Pareto-optimal front. The proposed method is applied to tune decentralized event-triggered mechanisms for a controller given a priori, considering random network-induced delays and packet dropouts. Three case studies of multivariable control systems are presented comparing the performance of eight different decentralized event-triggered schemes, analyzing the selection of the sampling period, and demonstrating the efficacy of the proposed tuning method.

Keywords: Networked control systems; event-triggered mechanism; multi-objective optimization; differential evolution for multi-objective optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Diagrama de blocos do sistema de controle via rede com mecanismos de disparo por evento (ETM).	30
Figura 3.2 – Soluções obtidas e Fronteira Pareto-ótima.	38
Figura 3.3 – Seleção baseada no NSGA-II.	45
Figura 3.4 – Proposta de modificação na seleção baseado no NSGA-II - Fronteira 1 maior que N	46
Figura 3.5 – DEMO com seleção igual ao NSGA-II original	46
Figura 3.6 – DEMO com seleção modificada com elitismo da Fronteira 1.	47
Figura 4.1 – Diagrama esquemático do controle de nível do sistema de quatro tanques.	51
Figura 4.2 – Respostas transitórias das saídas do sistema sem atraso de transmissão, $y(t_k)$, sistema de quatro tanques.	52
Figura 4.3 – Curvas candidatas de Pareto para o exemplo do sistema de quatro tanques, caso $T_s = 0,25 s$	53
Figura 4.4 – Curvas candidatas de Pareto para o exemplo do sistema de quatro tanques, caso $T_s = 0,5 s$	54
Figura 4.5 – Distribuição dos atrasos de comunicação via rede para o exemplo do sistema de quatro tanques, caso $T_s = 0,5 s$	54
Figura 4.6 – Respostas transitórias das saídas do sistema, $y(t_k)$, solução ETM-1 #10 e ETM-1 #14 , $T_s = 0,5 s$, para o sistema de quatro tanques.	58
Figura 4.7 – Respostas transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}(t_k)$, solução ETM-1 #10, $T_s = 0,5 s$, para o sistema de quatro tanques.	59
Figura 4.8 – Intervalos entre transmissões em número de amostragens, solução ETM-1 #10, $T_s = 0,5 s$, para o sistema de quatro tanques.	59
Figura 4.9 – Um caso de distribuição dos atrasos para o caso do sistema de quatro tanques para $T_s = 0,25 s$ e Γ_{16}	62
Figura 4.10–Respostas transitórias das saídas do sistema, $y(t_k)$, soluções ETM-4 #8 e ETM-8 #9 , $T_s = 0,25 s$, para o sistema de quatro tanques.	63
Figura 4.11–Respostas transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}(t_k)$, solução ETM-8 #9, $T_s = 0,25 s$, para o sistema de quatro tanques.	63

Figura 4.12–Intervalos entre transmissões em número de amostragens, solução ETM-8 #9, $T_s = 0,25 s$, para o sistema de quatro tanques.	64
Figura 4.13–Comparação entre as curvas candidatas de Pareto com relação ao período de amostragem para o exemplo do sistema de quatro tanques.	65
Figura 4.14–Diagrama do sistema de controle da coluna de destilação Wood & Berry.	66
Figura 4.15–Respostas transitórias das saídas do sistema com controle periódico sem atrasos de transmissão e perdas de pacote, $y(t_k)$, dest. Wood & Berry. .	67
Figura 4.16–Curvas candidatas de Pareto para o exemplo da coluna de destilação Wood & Berry, caso $T_s = 1 min$	68
Figura 4.17–Curvas candidatas de Pareto para o exemplo da coluna de destilação Wood & Berry, caso $T_s = 0,5 min$	68
Figura 4.18–Distribuição dos atrasos para o exemplo da coluna de destilação Wood & Berry, para $T_s = 1 min$	71
Figura 4.19–Respostas transitórias das saídas do sistema, $y(t_k)$, solução ETM-7 #3 e ETM-7 #9, para $T_s = 1 min$, coluna de destilação Wood & Berry. . .	71
Figura 4.20–Respostas transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}(t_k)$, solução ETM-7 #5, $T_s = 1 min$, para a coluna de destilação Wood & Berry.	72
Figura 4.21–Intervalos entre transmissões em número de amostragens, solução ETM-7 #3, $T_s = 1 min$, para a coluna de destilação Wood & Berry.	73
Figura 4.22–Respostas transitórias das saídas do sistema, $y(t_k)$, solução ETM-2 #3 e ETM-3 #4, $T_s = 0,5 min$, para a coluna de destilação Wood & Berry.	75
Figura 4.23–Respostas transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}(t_k)$, solução ETM-3 #4, $T_s = 0,5 min$, para a coluna de destilação Wood & Berry.	76
Figura 4.24–Intervalos entre transmissões em número de amostragens, solução ETM-4 #4, $T_s = 0,5 min$, para a coluna de destilação Wood & Berry.	76
Figura 4.25–Distribuição dos atrasos para o exemplo da coluna de destilação Wood & Berry, com $T_s = 0,5 min$	77
Figura 4.26–Comparação entre as curvas candidatas de Pareto com relação ao período de amostragem para o exemplo da coluna de destilação Wood & Berry.	77
Figura 4.27–Diagrama de Fluxo simplificado de um processo de destilação de petróleo bruto.	78
Figura 4.28–Respostas transitórias das saídas do sistema sem atraso de transmissão, $y_1(t_k)$ e $y_2(t_k)$, processo de destilação de petróleo bruto.	80

Figura 4.29–Curvas candidatas de Pareto para o processo de destilação de petróleo bruto, $T_s = 0,25 \text{ min}$	81
Figura 4.30–Curvas candidatas de Pareto para o processo de destilação de petróleo bruto, $T_s = 0,125 \text{ min}$	81
Figura 4.31–Resp. transitórias das saídas do sistema, $y_1(t_k)$ e $y_2(t_k)$, solução ETM-8 #3 e ETM-2 #8, $T_s = 0,25 \text{ min}$, processo de dest. de petróleo bruto.	84
Figura 4.32–Resp. transitórias das saídas do sistema, $y_3(t_k)$ e $y_4(t_k)$, solução ETM-8 #3 e ETM-2 #8, $T_s = 0,25 \text{ min}$, processo de dest. de petróleo bruto.	84
Figura 4.33–Resp. transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}_1(t_k), \bar{u}_2(t_k)$ e $\bar{u}_3(t_k)$, solução ETM-8 #3, $T_s = 0,25 \text{ min}$, processo de dest. de petróleo bruto.	85
Figura 4.34–Resp. transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}_4(t_k)$ e $\bar{u}_5(t_k)$, solução ETM-8 #3, $T_s = 0,25 \text{ min}$, processo de dest. de petróleo bruto.	85
Figura 4.35–Intervalos entre transmissões em número de amostragens dos atuadores, ETM-8 #3, $T_s = 0,25 \text{ min}$, processo dest. de petróleo bruto.	86
Figura 4.36–Intervalos entre transmissões em número de amostragens dos sensores, ETM-8 #3, $T_s = 0,25 \text{ min}$, processo dest. de petróleo bruto.	86
Figura 4.37–Distribuição dos atrasos para o processo de destilação de petróleo bruto, para $T_s = 0,25 \text{ min}$	87
Figura 4.38–Resp. transitórias das saídas do sistema, $y(t_k)$, ETM-8 #4 e ETM-8 #9, $T_s = 0,125 \text{ min}$, processo de dest. de petróleo bruto.	89
Figura 4.39–Resp. transitórias das saídas do sistema, $y(t_k)$, ETM-8 #4 e ETM-8 #9, $T_s = 0,125 \text{ min}$, processo de dest. de petróleo bruto.	90
Figura 4.40–Resp. transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}_1(t_k), \bar{u}_2(t_k)$ e $\bar{u}_3(t_k)$, solução ETM-8 #4, $T_s = 0,125 \text{ min}$, processo de dest. de petróleo bruto.	90
Figura 4.41–Resp. transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}_4(t_k)$ e $\bar{u}_5(t_k)$, solução ETM-8 #4, $T_s = 0,125 \text{ min}$, processo de dest. de petróleo bruto.	91
Figura 4.42–Intervalos entre transmissões em número de amostragens dos sensores, ETM-8 #4, $T_s = 0,125 \text{ min}$, processo de dest. de petróleo bruto.	92
Figura 4.43–Intervalos entre transmissões em número de amostragens dos atuadores, ETM-8 #4, $T_s = 0,125 \text{ min}$, processo de dest. de petróleo bruto.	92
Figura 4.44–Distribuição dos atrasos para o processo de destilação de petróleo bruto, para $T_s = 0,125 \text{ min}$	93

Figura 4.45—Comparação entre as curvas candidatas de Pareto com relação ao período de amostragem para o processo de Destilação de Petróleo Bruto. 93

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Variáveis de Controle para o sistema de quatro tanques.	50
Tabela 4.2 – Comparação entre diferentes soluções para o caso do sistema de quatro tanques com $T_s = 0,5 s$	55
Tabela 4.3 – Comparação percentual entre diferentes soluções para o caso do sistema de quatro tanques com $T_s = 0,5 s$	56
Tabela 4.4 – Comparação entre diferentes soluções para o caso do sistema de quatro tanques com $T_s = 0,25 s$	60
Tabela 4.5 – Comparação percentual entre diferentes soluções para o caso do sistema de quatro tanques com $T_s = 0,25 s$	61
Tabela 4.6 – Variáveis de Controle para a coluna de destilação Wood & Berry . . .	66
Tabela 4.7 – Comparação entre diferentes soluções para o caso da coluna de destilação Wood & Berry, com $T_s = 1 min$	69
Tabela 4.8 – Comparação percentual entre diferentes soluções para o caso da coluna de destilação Wood & Berry, com $T_s = 1 min$	70
Tabela 4.9 – Comparação entre diferentes soluções para a coluna de destilação Wood & Berry, com $T_s = 0,5 min$	73
Tabela 4.10–Comparação percentual entre diferentes soluções para a coluna de destilação Wood & Berry, com $T_s = 0,5 min$	74
Tabela 4.11–Variáveis de Controle para o processo de destilação de petróleo bruto. .	79
Tabela 4.12–Comparação entre diferentes soluções para o processo de destilação de petróleo bruto, com $T_s = 0,25 min$	82
Tabela 4.13–Comparação entre diferentes soluções para o processo de destilação de petróleo bruto, com $T_s = 0,25 min$	83
Tabela 4.14–Intervalo Máximo entre transmissões para ETM-8 #3 - $T_s = 0,25 min$ - Processo de destilação de petróleo bruto.	87
Tabela 4.15–Comparação entre diferentes soluções para o processo de destilação de petróleo bruto, com $T_s = 0,125 min$	88
Tabela 4.16–Comparação entre diferentes soluções para o processo de destilação de petróleo bruto, com $T_s = 0,125 min$	88

Tabela 4.17–Intervalo Máximo entre transmissões para ETM-3 #4 - $T_s = 0,125 \text{ min}$	
- Processo de destilação de petróleo bruto.	91
Tabela A.1–Conjunto de Soluções na Curva de Pareto ETM-8 e ETM-4 - Quatro	
Tanques para $T_s = 0,25 \text{ s}$	106
Tabela A.2–Conjunto de Soluções na Curva de Pareto ETM-1 e ETM-4 - Quatro	
Tanques para $T_s = 0,5 \text{ s}$	106
Tabela A.3–Conjunto de Soluções na Curva de Pareto ETM-2 e ETM-3 - Wood &	
Barry para $T_s = 0,5 \text{ min}$	107
Tabela A.4–Conjunto de Soluções na Curva de Pareto ETM-7 e ETM-8 - Wood &	
Barry para $T_s = 1 \text{ min}$	107
Tabela A.5–Conjunto de Soluções - Pareto ETM-3 e ETM-8 - Crude para $T_s =$	
$0,125 \text{ min}$	108
Tabela A.6–Conjunto de Soluções - Pareto ETM-3 e ETM-8 - Crude para $T_s =$	
$0,25 \text{ min}$	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NCS	<i>Networked control system</i>
ETC	<i>Event-triggered Control</i>
ETM	<i>Event-triggered mechanism</i>
ETTS	<i>Event-triggered transmission scheme</i>
PETC	<i>Periodic Event-triggered Control</i>
MATI	<i>Maximally Allowable Transmission Interval</i>
MAD	<i>Maximally allowable Delay</i>
MIMO	<i>Multiple-input, Multiple-output</i>
ZOH	<i>Zero-order hold</i>
CTP	Controle por transmissão periódica
DE	<i>Differential Evolution</i>
DEMO	<i>Differential evolution for multi-objective optimization</i>
IAE	<i>Integral of the Absolute magnitude of the Error</i>
NSGA-II	<i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm II</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Sistema
K	Controlador
T_s	período de amostragem
t_k	kT_s
y	vetor de saída medidas
f_1	primeira função objetivo baseada no desempenho integral do erro absoluto
f_2	segunda função objetivo baseada no somatório do número total de transmissões de cada sensor e para cada atuador
\bar{y}	vetor de saídas recebido mais atual
\hat{y}	vetor de variáveis medidas transmitido
x	vetor de variáveis de estados
d	vetor de distúrbios
\bar{u}	vetor de variáveis manipuladas recebido e mais atual
u	vetor de variáveis manipuladas calculado pelo controlador
\hat{u}	vetor de variáveis manipuladas transmitido
p	dimensão do vetor de variáveis manipuladas
q	dimensão do vetor de saídas medidas
x_c	vetor de estados do controlador
r	vetor de sinais de referência
η	somatório do número de saídas e entradas de um sistema
\hat{t}_i	instante de transmissão

v_i	vetor que agrupa as variáveis medidas e as variáveis manipuladas, recebidas pelos controladores.
\bar{v}_i	vetor que agrupa as variáveis medidas e as variáveis manipuladas, recebidas pelos atuadores.
$\tau_i(\hat{t}_i)$	atraso aleatório de comunicação pela rede em cada <i>link</i>
ψ_i	função da lei de transmissão
\mathcal{U}_a^b	número real pseudoaleatório no intervalo [a,b)
\mathcal{I}_m	número inteiro pseudoaleatório no intervalo [1,m]
N	número de indivíduos da população no algoritmo de otimização evolutivo
\mathbf{X}_k	população na <i>k-ésima</i> iteração
χ	vetor de variáveis de otimização
δ	limiar para acionamento do evento
F_i	fator de escala do operador mutação diferencial
\mathcal{U}_k	população teste
\mathbf{v}_k	vetor da população mutante
C_r	taxa de cruzamento do algoritmo evolução diferencial
ϱ_i	índice utilizado no operador de cruzamento do DE
ξ	perda de pacotes
N_g	número máximo fixo de gerações do algoritmo de otimização evolutivo
\mathcal{F}	região factível do problema de otimização
\mathcal{X}^*	conjunto pareto-ótimo
ϕ	variável auxiliar gerada de modo pseudo-aleatória
ρ	constante escalar usada no cálculo do atraso de transmissão
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
ζ_i	valor do instante de tempo de transmissão
\overline{F}_1	arquivo externo para mecanismo adicional de elitismo no algoritmo DEMO
\emptyset	conjunto vazio
Γ	conjunto de simulações
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
$N_{pl}(\%)$	valor percentual do número de perdas totais em relação ao CTP
μ	valor médio
σ	desvio padrão
\mathcal{H}_∞	norma H infinito
\mathcal{H}_2	norma H dois
$IAE(\%)$	valor percentual do IAE em relação ao CTP
T_{max}	tempo final de simulação

SUMÁRIO

1	Introdução	20
1.1	<i>Sistemas de controle via rede</i>	20
1.2	<i>Objetivos</i>	22
1.3	<i>Organização da dissertação</i>	23
2	Estado da arte em Acionamento por Eventos e Sistemas de controle via Redes	25
2.1	<i>Visão Geral</i>	25
2.2	<i>Ferramentas de Análise e Projeto de ETC</i>	26
3	Formulação do Problema	30
3.1	<i>Modelagem do sistema de controle em rede com mecanismo de disparo por evento</i>	30
3.2	<i>Otimização multi-objetivo</i>	35
3.2.1	<i>Algoritmo Evolução Diferencial</i>	35
3.2.2	<i>Problema de otimização multi-objetivo</i>	37
3.3	<i>Formulação do problema de projeto dos ETMs no controle via rede através de POM</i>	39
3.3.1	<i>Simulação do Sistema de Controle</i>	40
3.4	<i>Algoritmo Evolução Diferencial Multi-objetivo</i>	43
3.5	<i>Proposta de melhoria utilizada no DEMO</i>	43
4	Estudos de Caso	48
4.1	<i>Apresentação do Estudo de Caso</i>	48
4.1.1	<i>Estudo de caso: Sistema de Quatro Tanques</i>	50
4.1.2	<i>Estudo de caso: Coluna de Destilação Binária - Wood & Berry</i>	66
4.1.3	<i>Estudo de caso: Coluna de Destilação de Petróleo Bruto</i>	78
4.2	<i>Conclusões</i>	94
5	Considerações Finais	96
5.1	<i>Conclusões</i>	96
5.2	<i>Trabalhos Futuros</i>	97

5.3	<i>Trabalhos Publicados em Eventos Científicos e Periódicos</i>	98
	REFERÊNCIAS	99
	Apêndice A – Conjunto de soluções da Curva de Pareto . . .	106

1 INTRODUÇÃO

1.1 *Sistemas de controle via rede*

A definição de Sistema de Controle via Rede (NCS, do inglês *Networked control systems*) consiste em um sistema em que a informação entre seus componentes, tais como sensores, controladores e atuadores, é transmitida por meio de uma rede de comunicação de dados (PENG; ZHANG, 2015). A configuração do NCS comumente é apresentada na forma de uma planta com diversos subsistemas fisicamente distribuídos, embora interconectados. Ou seja, os componentes são distribuídos espacialmente, mas conectados por meio de uma rede de comunicação compartilhada, de modo que a coordenação de suas tarefas seja conduzida a um objetivo geral ou comum, muitas vezes com recursos de comunicação limitados (WANG R. POSTOYAN; HEEMELS, 2019).

Pesquisas em sistemas de controle via rede de comunicação voltadas ao desempenho de sistemas de controle, têm aumentado nos últimos anos. Com a evolução da tecnologia passa a ser possível incluir recursos adicionais nos elementos do sistema de controle, como, por exemplo, capacidade para tomada de decisão e comunicação sem fio. A possibilidade de integração dos dispositivos em redes de comunicação sem fio tem várias vantagens, como uma arquitetura flexível, facilidade de instalação e manutenção com redução de custos. Os sensores e atuadores podem ser facilmente equipados com uma interface de rede, tornando-se nós independentes em uma rede de controle em tempo real (ZHANG; BRANICKY; PHILLIPS, 2001). Por outro lado, os NCSs também têm vários problemas desafiadores que podem resultar em degradação de desempenho ou mesmo instabilidade dos NCSs. O desenvolvimento de alternativas que buscam aprimorar a utilização dos componentes dos sistemas de controle pode garantir um melhor desempenho sem retirar sua robustez. Esses desafios incluem otimização de desempenho enquanto enfrentam restrições sobre largura de banda de comunicação, congestionamento, contenção para recursos de comunicação, atrasos aleatórios induzidos pela rede, perda de pacotes e gerenciamento de energia de transmissão de sinal (BAILLIEUL; ANTSAKLIS, 2007; HEEMELS *et al.*, 2010).

Alguns desses problemas são ainda amplificados por altas taxas de ocupação da rede com nós de vários sensores, controladores e atuadores. No controle digital tradicional ou acionado pelo tempo, um período de amostragem fixo deve ser selecionado para garantir o desempenho desejado. Nesse método de acionamento, é necessário transmitir sinais

periodicamente, o que geralmente resulta no uso redundante da rede, o qual pode não ser tão apropriado, uma vez que pode acarretar em um uso excessivo do canal de comunicação (TABUADA, 2007; WANG; LEMMON, 2008). Essa utilização desnecessária da largura de banda de comunicação desperdiça recursos de comunicação e recursos energéticos de dispositivos baseados em bateria.

O controle acionado por eventos (ETC, do inglês *Event-triggered Control*) é uma técnica eficiente para reduzir os recursos necessários para o processamento de dados e a comunicação em NCSs que, por consequência, melhora o desempenho geral do NCS. O ETC aplica um mecanismo acionado por eventos (ETM, do inglês *Event-triggered mechanism*) para decidir quando é necessário usar a rede para enviar novas medições ou alterar os sinais do atuador com base no estado do sistema. Além disso, o estado da planta é continuamente monitorado e a malha é fechada sempre que um critério ou condições específicas são satisfeitas (BORGERS; HEEMELS, 2014). A ideia é transmitir a informação somente quando necessário para economia do uso da rede de comunicação bem como economia de energia (HU; ZHANG; DU, 2012). Como resultado, uma alteração no controlador somente é percebida quando algum evento é acionado. Dessa forma, a possibilidade de reduzir o número de transmissões, mas garantindo o desempenho do controle, torna o ETC muito atraente para os NCSs.

A principal motivação deste trabalho é propor uma forma de ajuste dos ETMs através de técnicas de otimização. Ademais, para minimizar o uso da rede, é necessário minimizar o número de transmissões por meio dos mecanismos acionados por eventos, o qual pode afetar o desempenho do sistema de controle. Desta forma, é necessário buscar um compromisso entre o uso da rede e o desempenho do sistema de controle. Para isso, considera-se o caso no qual a condição de acionamento é verificada periodicamente em intervalos de amostragem pré-definidos e de forma descentralizada, cujas transmissões são realizadas de forma individual e independente para cada *link* entre os componentes (sensor/controlador e controlador/atuador). É considerado que os sensores, controladores, atuadores e mecanismos de transmissão por evento são periódicos, isto é, discretos no tempo com período de amostragem fixo. Desse modo, para um dado controlador em tempo discreto, calculam-se as variáveis manipuladas com um período de amostragem fixo, embora a atualização dos atuadores seja realizada somente quando necessária. Se existirem vários sensores e atuadores, a dificuldade de determinar os parâmetros ótimos de ajuste dos ETMs aumenta.

À vista disso, propõe-se um método para calcular os parâmetros de configuração dos ETMs descentralizados associados a cada *link* entre sensor/controlador e controlador/atuador, com base em um problema de otimização multi-objetivo (MOP, do inglês, *multi-objective optimization*). Para se obter diferentes compromissos entre o desempenho do sistema de controle e o uso da rede de comunicação de dados, são propostas duas funções objetivo para o MOP: i) a integral do erro absoluto (IAE, do inglês *Integral Absolute Error*) das saídas do sistema de controle em relação aos sinais de referência; e ii) o número total de transmissões. Para calcular essas funções objetivo é necessário simular o sistema de controle de rede. O cálculo das funções objetivo, baseado em simulações, requer alto custo computacional. Dessa forma, é desejável ter um algoritmo de otimização multi-objetivo eficiente que não requer várias simulações para ajustar seus próprios parâmetros de configuração, conforme proposto no presente trabalho.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é apresentar um método para ajustar mecanismos acionados por eventos para minimizar o uso da rede em NCSs, garantindo o desempenho do sistema de controle. O método proposto é aplicado para comparar diferentes ETMs gerando subsídios para escolha do método mais adequado. Dessa forma, deseja-se determinar os limites ótimos dos detectores de eventos de cada sensor e controlador individualmente, dado um controlador que atende as especificações de desempenho. A estratégia adotada para atender ao objetivo principal é formular um problema de otimização multi-objetivo de tal modo que, através de qualquer algoritmo de otimização evolutivo multi-objetivo, seja possível obter um conjunto de soluções eficientes com diferentes compromissos entre o desempenho do sistema e o uso da rede. Além disso, é proposto escolher, avaliar e aprimorar uma técnica de otimização multi-objetivo que seja mais adequada para o problema específico deste trabalho, de modo que a pesquisa dos resultados seja mais eficaz.

Ao fim, são realizadas comparações, por meio de experimentos estocásticos, de oito esquemas de transmissão acionados por eventos diferentes, otimizados pelo método proposto, utilizando três modelos de sistemas lineares invariantes no tempo multimalhas, com controladores pré-definidos. Ademais, busca-se avaliar se é possível obter um conjunto de soluções eficientes para obter um compromisso entre os dois objetivos e se existem

soluções que geram um desempenho satisfatório com economia do uso da rede, cujo modo de operação está sujeito a atrasos na rede e perda de pacotes. Para tanto, requisitos de desempenho são propostos de modo que a busca de resultados seja direcionada a soluções satisfatórias no que tange uma boa qualidade na resposta transitória do sistema de controle.

Diante do exposto, os principais objetivos deste trabalho podem ser sumarizados como:

1. Formular o problema de projetos dos ETMs como um problema multi-objetivo para obter um conjunto de soluções eficientes com um compromisso entre uso da rede, quantificado pelo número total de transmissões, e o desempenho do sistema de controle, avaliado pela resposta transitória para sinais de teste específicos.
2. Implementar uma forma eficiente de cálculo das funções objetivo pela simulação do sistema via rede, com a planta contínua no tempo, sensores e controladores com período de amostragem fixo, com controlador projetado a priori, com transmissão descentralizada baseada em evento, atrasos aleatórios com distribuição de probabilidade conhecida, e percentual de perda de pacotes nas transmissões.
3. Escolher, avaliar e aprimorar um algoritmo de otimização multi-objetivo para obter de forma eficiente o conjunto de soluções Pareto-ótimo do problema multi-objetivo proposto.
4. Aplicar o método de ajuste dos ETMs no controle via rede periódico com transmissão por evento descentralizada em exemplos de sistemas de controle multivariáveis (vários sensores e atuadores) para avaliar a eficácia do procedimento proposto.
5. Avaliar diferentes métodos de implementação dos ETMs, projetados pelo procedimento proposto, através dos estudos de casos, para balizar futuras escolhas da forma mais adequada de configuração do ETM.

1.3 Organização da dissertação

Este trabalho está dividido em cinco capítulos e um apêndice. Neste Capítulo 1 consta a introdução e são listados os objetivos principais deste trabalho. No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica sobre os sistemas de controle via rede e dos mecanismos de acionamento por eventos.

No Capítulo 3 é descrita a formulação matemática que fundamenta o método proposto de projeto de ETMs aplicado na comunicação dos sistemas de controle via rede.

No Capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos nos estudos de caso, para três sistemas de controle multivariáveis e oito leis de disparos de ETMs. No Capítulo 5 encontram-se as conclusões finais e as propostas de prosseguimento deste trabalho.

No Apêndice A estão as tabelas completas dos ETMs, utilizados para análises gráficas, obtidas nas simulações realizadas para cada estudo de caso.

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

2.1 Visão Geral

É comum em sistemas de controle, tais como controle de processos industriais, apresentar uma topologia na qual a posição dos diversos elementos, sensores, atuadores, controladores, podem estar fisicamente distribuídos. Uma forma de integração desses elementos distribuídos fisicamente é através de redes de comunicação. Caso todos esses elementos, em um momento de pico, transmitam suas respectivas informações, é possível haver uma sobrecarga na rede, situação na qual pode aumentar a probabilidade de perda de pacotes além do aumento do atraso na transmissão (FUNK *et al.*, 2021). As perdas de pacotes e os atrasos de comunicação afetam o comportamento do sistema de controle. Desse modo, existe uma relação direta entre o uso da rede e o desempenho do sistema de controle, com a possibilidade de um menor uso da rede resultar em melhor desempenho (NILSSON, 1998; LIAN; MOYNE; TILBURY, 2002; MONTESTRUQUE; ANTSAKLIS, 2005; MONTESTRUQUE; ANTSAKLIS, 2006).

Tradicionalmente, nos trabalhos e pesquisas em controle digital, a amostragem do sinal é considerada como regular ou periódica no qual os valores amostrados são registrados regularmente e equidistantes no tempo. Já nos anos 60 do século passado, Dorf, Farren e Phillips (1962) demonstravam que o uso de um período de amostragem adaptativo pode resultar no mesmo desempenho do sistema de controle digital, com período de amostragem fixo, com número muito menor de amostragens. Na literatura, Åström e Bernhardsson (1999) repercutem acerca do conceito da amostragem baseada em eventos em sistemas analógicos e digitais no domínio do tempo. Os resultados obtidos por estes autores demonstram diferenças relativamente pequenas quando comparados com sistemas periódicos. Em Årzén (1999), sistemas com amostragem por evento também são referenciados como sistemas de controle aperiódico ou assíncrono, no qual o princípio mais simples utilizado para registro de um evento considera o erro de rastreamento, diferença entre o sinal de referência e o sinal de saída, como condição base para sua ocorrência:

$$|e(t_k) - e(t_s)| > e_{lim} \quad \text{ou} \quad h_{at} \geq h_{max}. \quad (2.1)$$

sendo $e(t_k)$ o erro de rastreamento no instante atual, $e(t_s)$ o erro de rastreamento do último cálculo da ação de controle, e_{lim} o valor limite determinado pelo projetista, h_{at} a última atualização registrada por um evento e h_{max} o período máximo sem que ocorra um evento. As condições apresentadas na Equação (2.1) determinam que o controlador atualize a ação de controle quando a diferença absoluta entre o valor no instante atual $e(t_k)$ e o instante do último cálculo da ação de controle $e(t_s)$ for maior que um determinado limite, e_{lim} , ou quando o período de tempo desde a última atualização, h_{at} , não exceda o limite h_{max} . A estratégia descrita se baseia em uma atualização do sinal de controle que ocorre por evento. Ao contrário de um sistema periódico em que a ação de controle é atualizada por intervalos de tempo fixo e pré-definido.

Conforme discutido no capítulo introdutório, nos sistemas de controle via rede, através da transmissão por evento, pode-se reduzir o tráfego da rede por meio de uma estratégia que prioriza a transmissão dos sinais amostrados que obedecem a critérios pré-estabelecidos, de modo que a quantidade de informação que circula na rede seja a mais baixa possível dentro do limite de desempenho permitido. Cabe ressaltar que, apesar das primeiras discussões sobre o tema tratar do controle com amostragem aperiódica, a estratégia considerada neste trabalho é baseada na transmissão do sinal ser por evento enquanto os sensores e controladores trabalham de forma periódica com período de amostragem fixo conforme será detalhado na seção 3.1 de descrição da metodologia.

2.2 Ferramentas de Análise e Projeto de ETC

Uma das principais dificuldades com a técnica ETC é que o ETM deve ser projetado de tal forma que a estabilidade e o desempenho do sistema em malha fechada sejam garantidos. Existem diferentes configurações de sistema de controle via rede que utilizam controle acionado por eventos. O processamento e a transmissão da ação de controle podem ser baseadas em mecanismos acionados por eventos (MAZO 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 os controladores podem calcular periodicamente as variáveis manipuladas e apenas as transmissões devem ser baseadas em um esquema de transmissão acionada por eventos (ETTS, do inglês *event-triggered transmission scheme*) (DONKERS; HEEMELS, 2012;

HEEMELS; DONKERS; TEEL, 2013; DOLK; BORGERS; HEEMELS, 2017; ZHANG; HAN, 2014; GUAN; HAN; GE, 2018; KARTAKIS *et al.*, 2018). O ETM pode estar presente tanto na comunicação 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.*, 2020a; COUTINHO; PALHARES, 2021; LI; FU; DU, 2016; GU *et al.*, 2017; YU; HAO, 2017a; YAN *et al.*, 2020) quanto na comunicação entre controladores e atuadores (MAZO JR; TABUADA, 2011; DONKERS; HEEMELS, 2012; HEEMELS; DONKERS; TEEL, 2013; ZHANG; YU; HAO, 2016; DOLK; BORGERS; HEEMELS, 2017; LIU; YANG; ER, 2020).

As transmissões podem ocorrer agrupando todos os sinais dos sensores em um único pacote, com o ETM baseado no vetor de sinais, de forma centralizada (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, 2017a; YAN *et al.*, 2020). Por outro lado, quando os nós do sensor e do atuador são distribuídos fisicamente, os mecanismos acionados por eventos operando de forma centralizada podem ser muitas vezes proibitivos (DONKERS; HEEMELS, 2012). Dessa forma, a operação do ETM de modo descentralizado e de forma assíncrona podem trazer maiores benefícios ao sistema de controle, onde a transmissões de pacotes individuais são permitidas e cada componente individual do NCS decide quando transmitir segundo seu próprio ETM, o qual depende apenas das informações medidas localmente (MAZO 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; MAZO JR; CAO, 2013).

Quanto à operação dos sensores, as saídas do sistema podem ser monitoradas continuamente de modo a decidir quando transmitir a informação (MAZO JR; TABUADA, 2011; WANG; SUN; HOVAKIMYAN, 2012; GIRARD, 2014; DONKERS; HEEMELS, 2012; DOLK; BORGERS; HEEMELS, 2017; ZHANG *et al.*, 2020a; YAN *et al.*, 2020) ou, no caso do ETC periódico (PETC, do inglês *periodic* ETC) ou ETC baseado no período de amostragem, a condição de acionamento é verificada periodicamente em intervalos fixos de amostragem (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).

O PETC é relativamente mais fácil de implementar no controle digital pois evita uma relevante questão do ETC quanto a necessidade do evento ter um tempo mínimo entre eventos, no qual deve ser estritamente maior que zero (DONKERS; HEEMELS, 2012; ZHANG; HAN, 2017). Os ETMs também podem ser diferenciados em termos da função de acionamento como: estático (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.*, 2020a; YAN *et al.*, 2020); adaptativo (MAZO JR; TABUADA, 2011; KARTAKIS *et al.*, 2018; LI; FU; DU, 2016; GU *et al.*, 2017); ou dinâmico, sendo que este utiliza uma variável dinâmica interna (GIRARD, 2014; DOLK; BORGERS; HEEMELS, 2017).

A análise e a síntese do ETC receberam considerável atenção na literatura. Para discutir alguns trabalhos relacionados, em Heemels *et al.* (2010), com base em função de Lyapunov, os autores apresentam um limite prático ao intervalo máximo de transmissão permitido (MATI, do inglês *maximally allowable transmission interval*), bem como o atraso máximo permitido (MAD, do inglês *maximally allowable delay*), o qual garantem a estabilidade dos NCSs na presença de restrições no canal de comunicação, além de analisarem o desempenho dos NCSs, em termos do ganho \mathcal{L}_P , com a presença de perturbação na entrada. No trabalho de Luo, Huang e Liu (2021), por sua vez, é considerado um PETC no qual o ganho do controlador por realimentação de estados é determinado pela solução de uma equação de algébrica de Riccati, sendo determinada a existência de um período de amostragem que garante a estabilidade e um limite superior para o índice de desempenho.

Em Donkers *et al.* (2012) foi apresentado um estudo sobre a estabilidade de NCS sujeito a intervalos de transmissão variáveis no tempo, atrasos de transmissão variáveis, perdas de pacotes, além de restrições na comunicação. Em Donkers e Heemels (2012), é proposto um controle acionado por evento baseado na realimentação dinâmica de saída, com desempenho \mathcal{L}_∞ garantido, ETMs descentralizados, controle discreto e um limitante no intervalo mínimo entre transmissões. Já em Heemels, Donkers e Teel (2013), é considerado um PETC o qual propõe um método de síntese de controle \mathcal{L}_2 para realimentação de estados e controladores dinâmicos por realimentação dinâmica de saída, tanto para ETM centralizado quanto descentralizado, baseados em três diferentes

abordagens: sistemas impulsivos, sistemas discretos lineares por partes e sistemas discretos lineares com perturbações. O trabalho de [Fu e McCann \(2021\)](#) estuda o PETC dinâmico e descentralizado (DDPETC, do inglês *dynamic decentralized PETC*) para sistemas ciber físicos sem fio, baseado na informação local do sensor, com garantia de estabilidade e ganho \mathcal{L}_2 .

Na referência [Zhang, Han e Zhang \(2017\)](#), os autores fazem uma investigação sobre controle acionado por eventos baseado em dados amostrados e estimação de estados aplicados em NCSs. Enquanto que no trabalho de [Dolk, Borgers e Heemels \(2017\)](#) é abordado um novo PETC descentralizado com parâmetros dinâmicos para alcançar diferentes compromissos entre os intervalos entre eventos, atrasos máximos permitidos e ganhos \mathcal{L}_p .

Um fato interessante, salientado em [Guan, Han e Ge \(2018\)](#), é uma abordagem da síntese de controle \mathcal{L}_2 para NCSs descentralizada, sujeito a atrasos de transmissão, além de uma proposta de um ETTS considerando que os nós do sensor local podem amostrar a taxas diferentes e transmitir cada medição de forma assíncrona. De forma mais ampla, [Kartakis et al. \(2018\)](#) forneceu em seu trabalho resultados experimentais para três técnicas diferentes de ETC: ETC periódico na forma centralizada, ETC periódico síncrono e descentralizado e ETC periódico assíncrono e descentralizado.

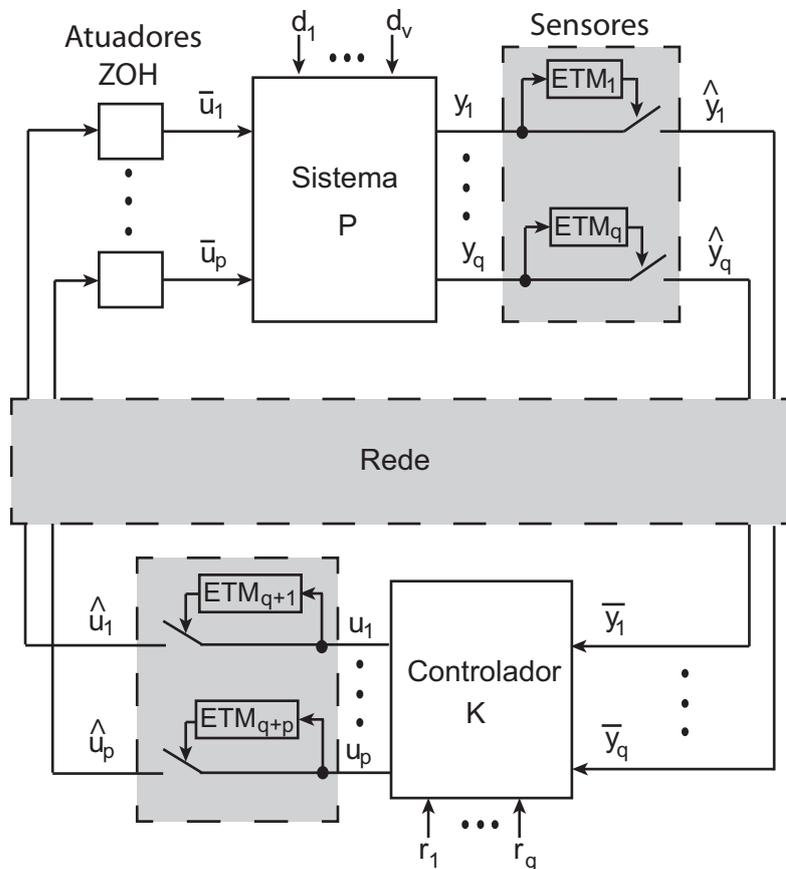
Para obter condições suficientes para garantir o desempenho \mathcal{L}_∞ prescrito em NCSs com atraso de transmissão distribuído, [Yan et al. \(2020\)](#) aplica o método de Lyapunov formulando o problema em termos de desigualdades matriciais lineares. Vários trabalhos tratam de métodos para o projeto conjunto dos controladores e ETMs, designados em inglês por "*co-design*", ([PENG; YANG, 2013](#); [LIU; YANG; ER, 2020](#); [COUTINHO; PALHARES, 2021](#); [GU et al., 2017](#); [TARBOURIECH et al., 2016](#); [GROFF; MOREIRA; SILVA, 2016](#)). Embora alguns desses trabalhos abordam os problemas inerentes das redes de comunicação (atraso e perda de pacotes), em todos foram utilizados a aplicação do ETM de modo centralizado.

3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

3.1 Modelagem do sistema de controle em rede com mecanismo de disparo por evento

Considere o diagrama de blocos do sistema de controle via rede com transmissão por evento apresentado na Figura 3.1. O controlador está em um nó da rede que se comunica com os sensores e atuadores inteligentes os quais estão em nós individuais e independentes entre si. É considerado que o sistema multivariável (MIMO, do inglês *multiple-input, multiple-output*) possui um modelo linear contínuo invariante no tempo ao passo que o controlador é discreto no tempo. Além disso, tanto o controlador quanto os sensores possuem período de amostragem periódico, T_s , e que os instantes de transmissão dos sensores para o controlador e do controlador para os atuadores são independentes para cada sensor e cada atuador em um esquema de transmissão disparado por evento descentralizado.

Figura 3.1 – Diagrama de blocos do sistema de controle via rede com mecanismos de disparo por evento (ETM).



Fonte: Elaborada pelo autor

O sistema linear invariante no tempo contínuo é modelado em tempo discreto no espaço de estados como:

$$\begin{aligned}x(t_{k+1}) &= Ax(t_k) + B_d d(t_k) + B_u \bar{u}(t_k), \\y(t_k) &= Cx(t_k) + D_d d(t_k),\end{aligned}\tag{3.1}$$

sendo $t_k = kT_s, k \in \mathbb{N}, x(t_k) \in \mathbb{R}^{n_x}$ o vetor de variáveis de estados do sistema, $d(t_k) \in \mathbb{R}^v$ o vetor de distúrbios, $y(t_k) \in \mathbb{R}^q$ o vetor de saídas medidas e $\bar{u}(t_k) \in \mathbb{R}^p$ o vetor de variáveis manipuladas, com os valores mais atuais da i -ésima variável, $u_i, i = 1, \dots, p$, recebidos até o instante t_k . O valor de $\bar{u}_i(t_k)$ é diferente do valor calculado pelo controlador periodicamente, $u_i(t_k)$, e também diferente do último valor transmitido, \hat{u}_i , pois depende do tempo de atraso da transmissão do sinal do controlador para o atuador e de possíveis perdas de pacotes na comunicação via rede. As matrizes constantes A, B_d, B_u, C e D_d são precisamente conhecidas e com dimensões apropriadas. O vetor sinais de controle $\bar{u}(t_k)$, por sua vez, é implementado por um segurador de ordem zero (ZOH, do inglês *zero-order hold*), em que o sinal é mantido constante entre amostragens:

$$\bar{u}(t) = \bar{u}(t_k), t \in [t_k, t_{k+1}).\tag{3.2}$$

Os instantes de transmissão são determinados pelos mecanismos de disparo por evento, ETM, de cada sensor ao controlador e do controlador para cada atuador.

O controlador dinâmico em tempo discreto, com período de amostragem, T_s , é modelado no espaço de estados por:

$$\begin{aligned}x_c(t_{k+1}) &= A_c x_c(t_k) + B_c [r(t_k) - \bar{y}(t_k)], \\u(t_k) &= C_c x_c(t_k) + D_c [r(t_k) - \bar{y}(t_k)],\end{aligned}\tag{3.3}$$

sendo $x_c(t_k) \in \mathbb{R}^{n_c}$ o vetor de estados do controlador, $r(t_k) \in \mathbb{R}^q$ o vetor de sinais de referência, $u(t_k) \in \mathbb{R}^p$ o vetor de ação de controle e $\bar{y}(t_k) \in \mathbb{R}^q$ o vetor de variáveis medidas que foram recebidas pelo controlador, com os valores mais atuais até o instante t_k , que irão depender do tempo de atraso da transmissão do sinal do sensor para o controlador e de possíveis perdas de pacotes na comunicação pela rede. É importante ressaltar que, diferentemente do controle acionado por evento (ETC), em que a ação de controle só é atualizada se ocorrer o recebimento de um novo sinal medido, o controlador dinâmico,

com período de amostragem fixo, mesmo não recebendo nenhuma informação nova dos sensores, pode modificar as variáveis do vetor $u(t_k)$, por exemplo, pela integração do erro de rastreamento se ele não for nulo, e conseqüentemente atingir a condição para transmissão de um valor atualizado de $u_i(t_k)$ para o i -ésimo atuador.

Considere o escalar $\eta = q + p$ como sendo o número de *links* de comunicação, isto é, a soma do número de saídas mais entradas. Para facilitar as descrições a seguir, são definidos dois vetores agrupando as variáveis medidas e as variáveis manipuladas, sendo o primeiro composto pelas atualizações periódicas das medições pelos sensores e cálculos pelo controlador e o segundo pelos valores mais atuais recebidos pelo controlador e atuadores:

$$\mathbf{v}(t_k) = \begin{bmatrix} y(t_k) \\ u(t_k) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^\eta, \quad \bar{\mathbf{v}}(t_k) = \begin{bmatrix} \bar{y}(t_k) \\ \bar{u}(t_k) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^\eta. \quad (3.4)$$

Seja \hat{t}_i o instante de transmissão de v_i , que é enviado conjuntamente com o valor do sinal amostrado $\{v_i(\hat{t}_i), \hat{t}_i\}$, conforme protocolos que utilizam o método de estampas de tempo (*timestamp*), mecanismo no qual é adicionada uma “marca de tempo” à mensagem de forma a identificar o instante exato da medição ou cálculo da variável de interesse (NETO, 1997). Devido ao atraso aleatório de comunicação da rede, no intervalo entre duas amostragens, podem chegar ao controlador ou aos atuadores várias mensagens tais que:

$$\hat{t}_i + \tau_i(\hat{t}_i) \in [t_k, t_{k+1}), \quad (3.5)$$

sendo $\tau_i(\hat{t}_i)$ o atraso aleatório de comunicação pela rede em cada *link* de comunicação sensor/controlador e controlador/atuador, cujo valor depende de cada conexão e do instante de tempo \hat{t}_i em que ocorreu a transmissão. Seja ainda $\bar{t}_i(t_{k+1})$ o instante de transmissão do valor atualmente armazenado de $\bar{v}_i(t_{k+1})$, que corresponde a informação mais atualizada, isto é, maior valor de instante de transmissão já recebida. Considera-se que o controlador e os atuadores devem possuir um mecanismo para descartar os valores cujos instantes de transmissão \hat{t}_i sejam inferiores ao valor de $\bar{t}_i(t_{k+1})$, isto é, caso o instante de transmissão seja inferior ao instante de tempo da informação mais atual já recebida, a estratégia de processamento das mensagens adotada deve rejeitar a mensagem de tempo mais antiga. No instante t_k , são fixados os valores iniciais $\bar{v}_i(t_{k+1}) = \bar{v}_i(t_k)$ e $\bar{t}_i(t_{k+1}) = \bar{t}_i(t_k)$ e para cada transmissão com *timestamp*, $\{v_i(\hat{t}_i), \hat{t}_i\}$, que chega no intervalo entre duas amostragens, $[t_k, t_{k+1})$, é avaliada se a informação é a mais atual que a já armazenada:

$$\begin{aligned}
& \text{SE } \hat{t}_i > \bar{t}_i(t_{k+1}) \\
& \text{ENTÃO } \bar{t}_i(t_{k+1}) \leftarrow \hat{t}_i \\
& \bar{v}_i(t_{k+1}) \leftarrow v_i(\hat{t}_i) \\
& \text{SENÃO descartar } \{v_i(\hat{t}_i), \hat{t}_i\}.
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Desse modo, se nenhuma transmissão chegar para a variável v_i , o valor de \bar{v}_i é mantido igual ao instante de amostragem anterior, senão o valor relativo ao instante de transmissão \hat{t}_i mais elevado é utilizado, sendo os valores desatualizados descartados e considerados como perda de pacote. A transmissão de $v_i(t_k)$ ocorre baseada em informação local sem necessidade de todos os sensores transmitirem simultaneamente. Desde modo, economiza-se energia na comunicação entre sensores (MAZO JR; CAO, 2013).

Considera-se ainda \hat{v}_i como o valor da última transmissão de v_i , informação que deve estar disponível em cada sensor, para $i = 1, \dots, q$, e no controlador, para $i = q + 1, \dots, \eta$. O valor de $v_i(t_k)$ é enviado se e somente se o mecanismo de disparo por evento verificar se uma determinada função do erro entre o valor atual, $v_i(t_k)$, e o último valor transmitido, \hat{v}_i , atinge um determinado limiar δ_i . É garantido que o intervalo de tempo entre dois eventos é de pelo menos um período de amostragem, $t_k - \hat{t}_i \geq T_s$, o que evita o problema conhecido como comportamento Zeno, sendo esse nome dado ao sistema que incluir um número infinito de etapas discretas em um período de tempo finito (SCHAFT; SCHUMACHER, 2000; CAMLIBEL; SCHUMACHER, 2001). Serão avaliadas oito possibilidades para implementação dos mecanismos de disparo por evento:

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

$$\psi_i(t_k) = |v_i(t_k) - \hat{v}_i| \geq \delta_i. \tag{3.7}$$

- **ETM-2:** Erro ao quadrado (HEEMELS; DONKERS; TEEL, 2012):

$$\psi_i(t_k) = [v_i(t_k) - \hat{v}_i]^2 \geq \delta_i. \tag{3.8}$$

- **ETM-3.** Integral do valor absoluto do erro (YU; HAO, 2017b):

$$\psi_i(t_k) = \psi_i(t_{k-1}) + T_s |v_i(t_k) - \hat{v}_i| \geq \delta_i. \tag{3.9}$$

- **ETM-4.** Integral do erro ao quadrado (GIRARD, 2015):

$$\psi_i(t_k) = \psi_i(t_{k-1}) + T_s [v_i(t_k) - \hat{v}_i]^2 \geq \delta_i. \tag{3.10}$$

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

$$\psi_i(t_k) = |v_i(t_k) - \hat{v}_i| \geq \delta_i |\hat{v}_i|. \quad (3.11)$$

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

$$\psi_i(t_k) = [v_i(t_k) - \hat{v}_i]^2 \geq \delta_i \hat{v}_i^2. \quad (3.12)$$

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

$$\psi_i(t_k) = |v_i(t_k) - \hat{v}_i| \geq \delta_i |\hat{v}_i| + \delta_{\eta+i}. \quad (3.13)$$

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

$$\psi_i(t_k) = \psi_i(t_{k-1}) + T_s |v_i(t_k) - \hat{v}_i| \geq \delta_i - \delta_{\eta+i} |v_i(t_k) - \hat{v}_i|. \quad (3.14)$$

Dessa forma, cada vez que o limiar é ultrapassado, é transmitido $\{v_i(t_k), t_k\}$ e atualizado $\hat{v}_i \leftarrow v_i(t_k)$. Nos ETMs 7 e 8, o número de parâmetros a serem determinados é o dobro dos demais, com dois parâmetros por *link*. Além disso, nos ETMs 3, 4 e 8, cada vez que o limiar é ultrapassado a integral numérica é reinicializada igual a zero, $\psi(\hat{t}_i) \leftarrow 0$. Os ETMs baseados na integral do erro (IETM, do inglês *integral-based event-triggered mechanism*) são encontrados em Mousavi, Ghodrat e Marquez (2015), Zhang, Yu e Hao (2016), Yu e Hao (2017a), Zhang *et al.* (2020b). Em Tian *et al.* (2019) e Sun *et al.* (2021) são propostos mecanismos de eventos baseados na memória (METM, do inglês, *memory-based event-triggered mechanism*), nos quais consideram diferenças entre valores de instantes anteriores e com pesos especificados pelo projetista.

No que tange a estrutura dos sensores e do controlador é considerado que eles tenham a capacidade de implementar individualmente os mecanismos de disparo por evento, isto é, o cálculo da função ψ , do armazenamento de \hat{v}_i e do protocolo de comunicação com a rede. Além disso, o controlador e os atuadores devem ter capacidade para seleção da informação mais atual como descrito na regra (3.6).

Dado o controlador, o problema de projeto do controle via rede com transmissão por evento é determinar os parâmetros de ajuste dos mecanismos de disparo por evento. Os valores desses parâmetros devem atender a um compromisso entre o número de transmissões, que define o uso da rede, e o desempenho do sistema de controle. Como estes dois objetivos

são conflitantes, uma forma natural de determinar tais parâmetros é através de otimização multi-objetivo. Pela otimização multi-objetivo é possível obter diferentes soluções para os valores dos parâmetros dos ETMs com diferentes compromissos entre os dois objetivos. As próximas seções descrevem a formulação do problema de projeto dos ETMs como um problema de otimização multi-objetivo.

3.2 Otimização multi-objetivo

O algoritmo Evolução Diferencial (DE do inglês *Differential Evolution*) foi proposto por [Storn et al. \(1997\)](#), no qual consiste em um método de otimização heurístico simples e eficiente que se baseia nos mecanismos de seleção de soluções candidatas que evoluem a cada geração conforme algoritmos evolutivos. Uma característica do algoritmo DE está na geração do vetor de mutação, que é calculado baseado na diferença de dois outros indivíduos selecionados de maneira aleatória. São usados operadores de mutação, cruzamento e seleção para gerar novas populações. Para aplicar o algoritmo DE para solução de problemas multi-objetivos, como será descrito na sequência, é necessário adicionar uma nova etapa de seleção, sendo acrescentado uma forma de elitismo baseada na técnica do algoritmo genético com ordenamento por não-dominância II (NSGA-II, do inglês *Nondominated Sorting Genetic Algorithm*), proposto por [Deb et al. \(2002\)](#), para a construção das soluções da fronteira de Pareto. Além disso, é proposto uma modificação no método NSGA-II no qual uma nova técnica de elitismo é incorporada a fim de aprimorar as soluções candidatas do conjunto Pareto-ótimo.

3.2.1 Algoritmo Evolução Diferencial

Seja $\mathcal{U}_{(a,b)}$, um número gerado de modo pseudoaleatório por meio de uma distribuição de probabilidade uniforme no intervalo aberto $[a, b)$; $\mathcal{I}_{(m)}$ um valor inteiro pseudoaleatório extraído da distribuição uniforme discreta do conjunto de números inteiros $\{1, \dots, m\}$; $\boldsymbol{\chi} \in \mathbb{R}^n$ o vetor de variáveis de otimização e N o número de indivíduos (soluções candidatas) da população, geralmente $5\eta \leq N \leq 10\eta$, onde η é o número de variáveis de otimização ([STORN; PRICE, 1997](#)). Para o projeto do sistema de controle via rede com mecanismo de disparo por evento, as variáveis de otimização são os parâmetros dos ETMs, isto é:

$\boldsymbol{\chi} = [\delta_1, \dots, \delta_\eta]^T$, com $\eta = q + p$, com exceção dos ETM-7 e ETM-8, o qual possuem o dobro de variáveis de otimização, $\boldsymbol{\chi} \in \mathbb{R}^{2\eta}$.

A população na k -ésima iteração, $\mathbf{X}_k = \{\boldsymbol{\chi}_{k,i}; i = 1, \dots, N\}$, sendo a i -ésima solução definida por :

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

O algoritmo DE começa com uma população inicial com soluções candidatas, geradas de forma aleatórias e uniformemente distribuídas dentro do espaço de busca, que é restrito pelos limites mínimo e máximo determinados de cada variável, $\boldsymbol{\chi}_{k,i,j} \in [\underline{\chi}_j, \bar{\chi}_j]$:

$$\{\chi_{1,i,j} = \mathcal{U}_{(\underline{\chi}_j, \bar{\chi}_j)}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, \eta\}. \quad (3.16)$$

Em seguida é feita a avaliação dos indivíduos, onde é medido o valor de aptidão dos mesmos, o qual é obtido pela avaliação do indivíduo por meio da função a ser otimizada.

Na sequência do DE ocorre a mutação diferencial, onde os vetores mutantes, $\mathbf{v}_{k,i}$, $i = 1, \dots, N$, são criados. Para tanto, considere os índices $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$ dados por $r_j = \mathcal{I}_{(N)}, j = 1, \dots, 3$. A i -ésima solução mutante é obtida baseada na seguinte operação de mutação diferencial:

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

sendo F_i um fator de escala aplicado sobre o vetor diferença para todo $i = 1, \dots, N$. Neste trabalho, adotou-se $F_i = \mathcal{U}_{(0,5;1)}$ para cada vetor diferença. Em seguida, o operador cruzamento é aplicado entre os indivíduos da k -ésima população, \mathbf{X}_k , e da população mutante, \mathbf{V}_k , no qual gera a população teste, \mathbf{U}_k :

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

sendo $\mathbf{u}_{k,i,j}$ a j -ésima variável da i -ésima solução da população teste, para $j = 1, \dots, \eta$ e $i = 1, \dots, N$, $C_r \in [0,1]$ a taxa de cruzamento, parâmetro esse que depende do problema em estudo. Adotou-se neste trabalho $C_r = 0,9$. O índice $\varrho_i = \mathcal{I}_{(\eta)}$ garante que $\mathbf{u}_{k,i} \neq \boldsymbol{\chi}_{k,i}$.

O próximo passo do algoritmo é a operação de seleção binária, no qual uma avaliação da função objetivo da solução teste, $\mathbf{u}_{k,i}$, é realizada. Caso essa seja melhor que seu correspondente na população atual, a solução atual é substituída pela solução teste, caso contrário, o indivíduo atual é mantido:

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

sendo $\hat{\chi}_{k+1,i}$ a i -ésima solução da próxima população. Geralmente, o critério de parada de algoritmos evolucionários é um número máximo fixo de gerações, N_g , também adotado neste trabalho.

3.2.2 Problema de otimização multi-objetivo

A otimização multi-objetivo inclui a otimização de vários critérios ou funções ao mesmo tempo. Essas funções costumam ter relacionamentos conflitantes de forma a trazer uma complexidade adicional quando comparado com problemas com somente um objetivo. Como será descrito a seguir, diferentemente dos problemas mono-objetivo, nos problemas multi-objetivo existem um conjunto geralmente infinito de soluções eficientes com diferentes compromissos entre os objetivos. A tarefa da otimização multi-objetivo é obter um conjunto representativo do conjunto de soluções eficientes. Considere o problema de otimização multi-objetivo (CHANKONG; HAIMES, 2008):

$$\mathbf{X}^* = \left\{ \chi^* \in \mathbb{R}^n \mid \chi^* = \arg \min_{\chi} \mathbf{f}(\chi) \right\} \quad (3.20)$$

sujeito a: $\chi \in \mathcal{F}_x$,

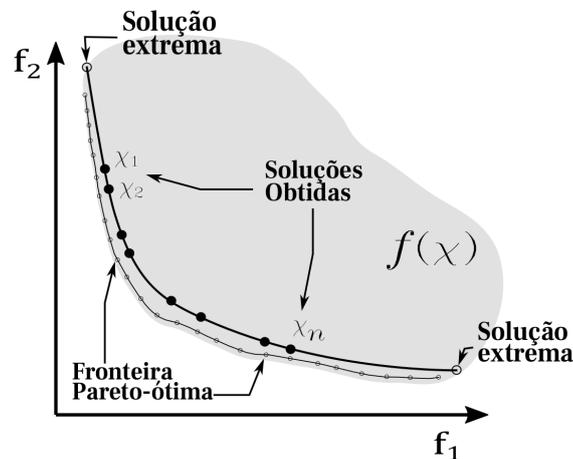
sendo $\mathbf{f}(\cdot) : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}^m$ o vetor de objetivos do problema e $\mathcal{F}_x \subset \mathbb{R}^n$ a região factível. Os vetores $\chi \in \mathbb{R}^n$ são os vetores de parâmetros do problema de otimização multi-objetivo (POM). Os vetores $\mathbf{f}(\chi) \in \mathbb{R}^m$ se encontram no espaço de objetivos. Deseja-se determinar o conjunto \mathbf{X}^* denominado conjunto de soluções eficientes ou conjunto de soluções não-dominadas ou conjunto Pareto-ótimo. Para definição do conceito de dominância, a seguinte notação é empregada para vetores em \mathbb{R}^m :

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\chi} \leq \boldsymbol{y} &\Rightarrow \{\chi_i \leq y_i, i = 1, \dots, m\}, \\ \boldsymbol{\chi} \neq \boldsymbol{y} &\Rightarrow \{\exists i \mid \chi_i \neq y_i\}. \end{aligned} \tag{3.21}$$

Uma solução $\boldsymbol{\chi}_1$ domina uma solução $\boldsymbol{\chi}_2$ se $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\chi}_1) \leq \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\chi}_2)$ e $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\chi}_1) \neq \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\chi}_2)$, isto é, $\boldsymbol{\chi}_1$ não é pior que $\boldsymbol{\chi}_2$ em nenhum objetivo e é melhor em pelo menos um objetivo. O símbolo \prec denota que uma solução $\boldsymbol{\chi}_1$ domina $\boldsymbol{\chi}_2$, ou seja $\boldsymbol{\chi}_1 \prec \boldsymbol{\chi}_2$ ou equivalentemente $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\chi}_1) \prec \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\chi}_2)$. Além disso, diz-se que $\boldsymbol{\chi}^* \in \mathcal{F}_x$ é uma solução Pareto-ótima (ou eficiente ou não dominada) do problema de otimização multi-objetivo, $\boldsymbol{\chi}^* \in \mathbb{X}^*$, se não existe $\boldsymbol{\chi} \in \mathcal{F}_x$ tal que $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\chi}) \leq \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\chi}^*)$ e $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\chi}) \neq \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\chi}^*)$, ou seja, se $\boldsymbol{\chi}^*$ não é dominada por nenhuma outra solução factível.

A Figura 3.2 mostra a representação da fronteira Pareto-ótima no espaço de objetivos \mathbb{R}^2 . A região sombreada é a região factível e a linha sólida mais fina sobre parte da fronteira desta área especifica as soluções Pareto-ótimas. Toda as soluções no interior da região factível no espaço de funções são dominadas por soluções na fronteira da região factível. As soluções internas à região sombreada, os pontos pretos na Figura 3.2, representam as soluções candidatas obtidas. Ou seja, por melhor que seja o método de otimização aplicado para obtenção da curva de Pareto, nem sempre o algoritmo é capaz de determinar a fronteira \mathbb{X}^* . Dessa forma, as soluções não dominadas calculadas não são necessariamente ótimas, mas são as melhores soluções que o método pode identificar e, portanto, representam as candidatas para a resolução do problema (SOARES, 2014).

Figura 3.2 – Soluções obtidas e Fronteira Pareto-ótima.



Fonte: Adaptado de (DEB *et al.*, 2002)

Como mencionado anteriormente, em um POM, não há uma única solução ótima, mas um conjunto de soluções ótimas. Diversas são as formas de obtenção de um conjunto de soluções candidatas para representar a fronteira Pareto-ótima, dentre elas se destacam os algoritmos evolucionários, adaptados para problemas multi-objetivos, que foram aprimorados de modo a aperfeiçoar a técnica sob diferentes perspectivas (ZITZLER, 1999). O método aplicado neste trabalho será descrito na próxima seção.

3.3 Formulação do problema de projeto dos ETMs no controle via rede através de POM

O objetivo principal do uso de transmissão baseado em ETM no controle via rede é reduzir o uso da rede por meio da minimização do número de transmissões. A consequência direta da redução do número de transmissões é uma possível deterioração do desempenho do sistema de controle devido a uma redução das informações sobre as saídas e das atualizações dos atuadores. Para se obter um melhor compromisso entre o desempenho do sistema e o uso da rede é proposto neste trabalho um problema de otimização multi-objetivo com duas funções objetivo a serem minimizadas. A primeira é o critério de desempenho integral do erro absoluto¹ com a integral aproximada pela regra dos trapézios:

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

sendo $e_j(t_k) = r_j(t_k) - y_j(t_k)$ o erro de rastreamento e $n_k T_s$ o tempo final de simulação. A segunda função objetivo é o somatório do número total de transmissões de cada sensor e para cada atuador:

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

sendo $N_{t,i}$ o número de transmissões do sinal v_i , para todo $i = 1, \dots, \eta$. Cada vez que um sensor ou o sinal de um atuador atinge o limiar de transmissão então $N_{t,i} \leftarrow N_{t,i} + 1$. A região factível \mathcal{F}_x é definida pelas restrições $0 \leq \delta_i \leq \bar{\delta}_i$, para todo $i = 1, \dots, \eta$ (2η no caso dos ETMs 7 e 8). Os valores máximos, $\bar{\delta}_i$, são definidos pelo projetista para concentrar as

¹ Também foi estudado adotar o critério de desempenho integral do erro ao quadrado (ISE, do inglês *Integral Square Error*) para f_1 , mas a escolha final foi baseada em uma melhor distribuição da curva de Pareto resultante das duas opções.

soluções na região de soluções com bom desempenho das respostas transitórias (valores altos de $\bar{\delta}_i$ podem resultar em valores altos da IAE). Para o cálculo das funções objetivo, são realizadas simulações do sistema, para vetores de sinais $r(t_k)$ e $d(t_k)$ específicos para cada estudo de caso.

3.3.1 Simulação do Sistema de Controle

No sistema de controle proposto, apresentado na Figura 3.1, o sensor realiza medição periodicamente, mas a transmissão é baseada em evento. O controlador, com estrutura conhecida, calcula as variáveis manipuladas periodicamente, independentemente de receber ou não novos valores de medição, e transmite o valor para cada atuador independentemente baseado em evento e cada atuador atualiza a ação de controle periodicamente com o valor mais atualizado recebido, mantendo este valor entre os instantes de amostragem. Entende-se como disparo, a ação de transmitir, no instante t_k , a medição do sensor ou o sinal de controle pelo controlador quando a condição da lei de acionamento do ETM é atingida. Nesse cenário, o atraso de transmissão $\tau_{i,k} = \tau_i(t_k)$ que ocorre no i -ésimo *link* de comunicação e no instante de amostragem t_k , é implementado considerando a seguinte formulação:

$$\tau_{i,k} = \rho |\phi_{i,k}| \quad (3.24)$$

Sendo a variável $\phi_{i,k} \in \mathbb{R}$ um elemento de uma matriz gerada de modo pseudo-aleatório com distribuição normal, média zero, variância unitária e a constante escalar ρ escolhida para se obter o desvio padrão desejado. A constante ρ foi escolhida para que o atraso máximo seja em torno de 20 períodos de amostragem para o período de amostragem de referência. Na simulação, para criar a matriz de atrasos, τ , o atraso é arredondado para cima para se igualar a múltiplo inteiro do período de amostragem, para indicar em qual instante de amostragem o sinal transmitido pode ser utilizado.

Em relação a perda de pacotes, $\xi_{i,k}$, é considerado um valor máximo de 5%, com distribuição uniforme, em relação a todo período de simulação T_{max} , independente das perdas devido aos atrasos na transmissão. É gerada uma matriz ξ , com valores 0 ou 1, sendo que $\xi_{i,k} = 1$ indica que no i -ésimo *link* e no k -ésimo instante de amostragem ocorrerá uma perda de pacote.

Nas definições das entradas externas consideradas nas simulações, é utilizada a função degrau unitário $U(t - t_0)$ deslocado no tempo por t_0 , no qual sua representação, em tempo contínuo, é dada por:

$$U(t - t_0) = \begin{cases} 0, & \text{se } t \leq t_0, \\ 1, & \text{se } t > t_0. \end{cases} \quad (3.25)$$

No processo de otimização, as funções objetivo são calculadas com base em uma única simulação que considera a mesma configuração de atrasos de transmissão e perdas de pacotes, isto é, mesmas matrizes τ e ξ , para cada solução avaliada.

Considerando a formulação proposta, dado um sistema MIMO, conforme Seção 3.1, o pseudocódigo responsável pela simulação do controle via rede com transmissão baseada em ETM, denominado Algoritmo 1, pode ser descrito a seguir. O algoritmo indicado se refere ao ETM-1, mas para os outros ETMs os algoritmos são similares.

São criadas inicialmente uma matriz para armazenar os valores transmitidos, V_t , e uma matriz de instantes de transmissão, γ , com uma linha para cada variável v_i , $i = 1, \dots, \eta$, e uma coluna para cada instante de amostragem. Ambas as matrizes são inicializadas com zeros.

Para implementação da simulação dos atrasos de transmissão aleatórios, se o sinal for transmitido, é calculado em qual instante de amostragem ele poderia ser utilizado, i_c , com base na matriz de atrasos aleatórios previamente construída. O valor do sinal é armazenado na matriz V_t na posição correspondente ao instante de tempo de recebimento, i_c , e o valor do instante de transmissão t_k é armazenado na matriz de instantes de tempo de transmissão γ . Estes valores são armazenados sobre valores anteriores, se existir, uma vez que são mais atuais. Para atualizar os valores de \bar{u} e \bar{y} , são verificados os valores da matriz de instantes de tempo de transmissão para o instante de amostragem a ser tratado. Se o valor é zero, significa que nenhuma transmissão chegou no intervalo entre o instante de amostragem atual e o anterior, desse modo é mantido o valor anterior. Se chegou alguma transmissão, é verificado se o instante da transmissão é mais atual do que o valor utilizado no último instante de amostragem, caso seja, o valor de V_t é mantido e o valor do instante de tempo da transmissão mais atual da variável v_i , ζ_i , é atualizado, senão o valor recebido é descartado sendo substituído pelo valor do último instante de amostragem.

Algoritmo 1: Pseudo-código para implementação do sistema de controle via rede
- ETM-1

```

Dados:  $A; B_d; B_u; C; D_d; A_c; B_c; C_c; D_c; T_s; T_{max}; r;$ 
1  $x(1) \leftarrow 0; x_c(1) \leftarrow 0; N_t \leftarrow 0;$ 
2  $\xi \leftarrow \text{Criar\_Matriz\_Perdas};$ 
3  $\tau \leftarrow \text{Criar\_Matriz\_atrasos};$ 
4  $V_t \leftarrow \text{Criar\_Matriz\_transmissões};$ 
5  $\gamma \leftarrow \text{Criar\_Matriz\_Instantes\_Transmissões};$ 
6 para  $k \leftarrow 1$  até  $T_{max}/T_s$  faça
7   para  $i \leftarrow 1$  até  $q$  faça
8      $\bar{y}_{i,k} \leftarrow V_{t,i,k};$ 
9   fim
10  para  $i \leftarrow 1$  até  $p$  faça
11     $\bar{u}_{i,k} \leftarrow V_{t,q+i,k};$ 
12  fim
13   $x(k+1) \leftarrow Ax(k) + B_d d(k) + B_u \bar{u}(k);$ 
14   $y(k) \leftarrow Cx(k) + D_d d(k);$ 
15   $x_c(k+1) \leftarrow A_c x_c(k) + B_c [r(k) - \bar{y}(k)];$ 
16   $u(k) \leftarrow C_c x_c(k) + D_c [r(k) - \bar{y}(k)];$ 
17   $v(k) \leftarrow [y(k)^T u(k)^T]^T;$ 
18  para  $i \leftarrow 1$  até  $\eta$  faça
19     $\psi_i \leftarrow |v_i(k) - \hat{v}_i|;$  /* Equação (3.7) */
20    se  $\psi_i \geq \delta_i$  então
21       $\hat{v}_i \leftarrow v_i;$ 
22       $N_t \leftarrow N_t + 1;$ 
23      se  $\xi_{i,k} = 0$  então
24         $i_c \leftarrow k + \tau_{i,k};$ 
25        se  $i_c \leq T_{max}/T_s$  então
26           $V_{t,i,i_c} \leftarrow v_{i,k};$ 
27           $\gamma_{i,i_c} \leftarrow k;$ 
28        fim
29      fim
30    fim
31  fim
32  se  $k < T_{max}/T_s$  então
33    para  $i \leftarrow 1$  até  $\eta$  faça
34      se  $\zeta_i > \gamma_{i,k+1}$  então
35         $V_{t,i,k+1} \leftarrow V_{t,i,k}$ 
36      senão
37         $\zeta_i \leftarrow \gamma_{i,k+1}$ 
38      fim
39    fim
40  fim
41 fim
42 retorna
43  $f_1 \leftarrow IAE;$  /* Equação (3.22) */
44  $f_2 \leftarrow N_t;$  /* Equação (3.23) */

```

Para os dados de entrada são considerados além das matrizes dos modelos no espaço de estados do sistema e do controlador discretizados, os parâmetros dos ETMs, determinados a partir das variáveis de otimização do problema multi-objetivo.

3.4 Algoritmo Evolução Diferencial Multi-objetivo

Em [Das e Suganthan \(2011\)](#) são apresentados alguns tipos de implementações do DE, bem como algumas modificações para aplicação em problemas multi-objetivos. Neste trabalho é utilizado o algoritmo DE multi-objetivo (DEMO, do inglês *Differential Evolution for Multi-objective Optimization*) ([ROBIČ; FILIPIČ, 2005](#)). A diferença entre o DEMO e o DE está na operação de seleção. No caso do DEMO, a seleção é baseada no conceito de dominância. Se a solução teste u_i domina a solução atual χ_i , então a solução teste substitui a solução atual na próxima geração. Uma funcionalidade adicional do DEMO é incluir na população a solução teste, sem substituir a solução atual, caso uma solução não domine a outra. Portanto, a população teste, eventualmente incluída na população atual, resulta em uma quantidade de soluções maior que o tamanho fixo da população, N . Diante disso, no algoritmo DEMO é proposto realizar o procedimento de seleção por não dominância e operador de distância de aglomeração baseado no algoritmo NSGA-II para reduzir o tamanho da população para N . O NSGA-II foi uma evolução do algoritmo base, NSGA, apresentado por [Srinivas e Deb \(1994\)](#), cuja premissa foi reduzir o custo computacional, acrescentar elitismo na escolha das soluções e reduzir a quantidade de parâmetros do código. Além disso, o NSGA-II busca melhorar a diversidade das soluções não-dominadas durante o processo, uma vez que tende a aumentar o espalhamento do conjunto de soluções obtidas no que se refere a obtenção da curva de Pareto. Na próxima seção será apresentada a proposta de melhoria na operação de seleção baseada no NSGA-II.

3.5 Proposta de melhoria utilizada no DEMO

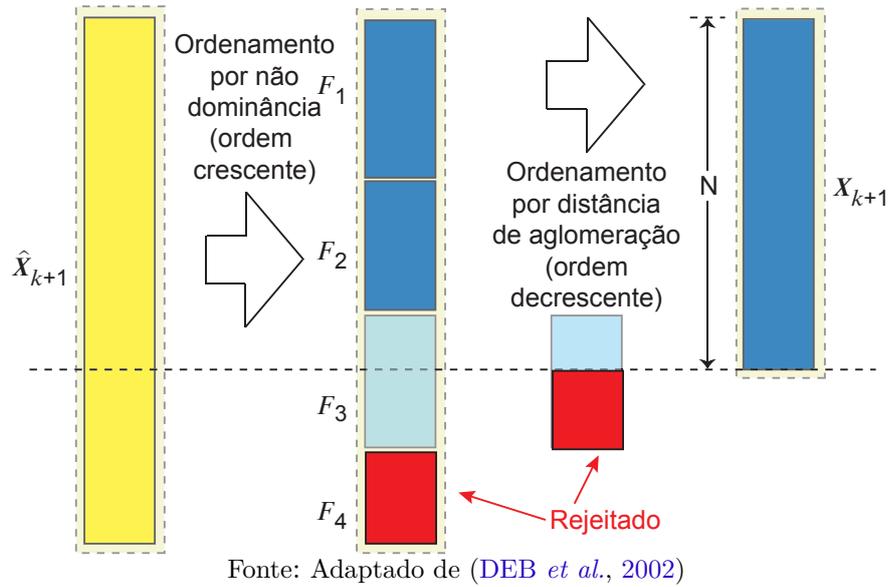
Ao se avaliar as fronteiras Pareto-ótima obtidas pelo algoritmo DEMO em função do número de gerações, foi observado que algumas soluções da fronteira final podem ser dominadas por soluções de gerações anteriores que foram excluídas pelo procedimento de seleção do NSGA-II adotado no DEMO. Tanto no NSGA-II como no DEMO, o objetivo

do procedimento de seleção baseado no ordenamento por não-dominância é ajustar o tamanho da população para o tamanho N após as operações de mutação, cruzamento e seleção binária. No procedimento de seleção do NSGA-II, as soluções são classificadas em fronteiras. As soluções que não são dominadas por outras soluções na população pertencem a Fronteira 1, que é a fronteira candidata a Pareto-ótima. Estas soluções são retiradas da população e as soluções não-dominadas na população restante pertencem a Fronteira 2. O processo se repete até que todas as soluções sejam classificadas em uma Fronteira. As soluções da população da próxima geração são selecionadas pela ordem de classificação por fronteiras, iniciando da Fronteira 1, que é a característica de elitismo desse procedimento. Para obter N soluções para a próxima geração, pode ser necessário incluir parte de uma fronteira. Neste caso, para decidir quais soluções serão selecionadas dentro de uma mesma fronteira, é necessário um segundo critério de decisão. No caso do NSGA-II, também adotado no DEMO, é usado o operador de distância de aglomeração (DEB *et al.*, 2002). Por este operador, as soluções com soluções vizinhas mais distantes no espaço de objetivos serão priorizadas na seleção, o que garante a diversidade das soluções. Quando a Fronteira 1 tem mais soluções que N , então é necessário excluir soluções não-dominadas com base no operador de distância de aglomeração. A exclusão de soluções não-dominadas da Fronteira 1 é que ocasiona o problema observado. Algumas destas soluções excluídas podem dominar soluções da fronteira final candidata a fronteira Pareto-ótima. Para tentar minimizar este problema, neste trabalho é proposto uma forma adicional de elitismo, que é o elitismo da Fronteira 1.

Seja $|F_i|$ o número de soluções na i -ésima fronteira. Se $|F_1| = N$, a próxima geração é $\mathbf{X}_{k+1} = F_1$. Se $|F_1| < N$, então \mathbf{X}_{k+1} é composta pelas soluções de F_1 mais soluções das próximas fronteiras até completar N . Se for necessário selecionar parte das soluções de uma fronteira, é utilizado o operador distância de aglomeração para a escolha de modo a garantir a diversidade, como mostrado na Figura 3.3. Quando $|F_1| > N$, também é necessário o operador distância de aglomeração para escolher as N soluções de F_1 que resultem na melhor diversidade do conjunto candidato a Pareto-ótimo. Nesta última situação, no procedimento do NSGA-II as soluções não selecionadas de F_1 são descartadas.

Como mencionado, foi constatado em experimentos realizados com o DEMO que o conjunto de soluções finais possuía soluções dominadas por soluções da Fronteira 1 descartadas em gerações anteriores. Desse modo, optou-se por alterar a técnica de seleção

Figura 3.3 – Seleção baseada no NSGA-II.



do NSGA-II para reaproveitar pelo menos N soluções a mais da Fronteira 1, salvas em um arquivo externo denominado \bar{F}_1 , como um mecanismo adicional de elitismo da Fronteira 1.

Dessa forma, como ilustrado na Figura 3.4, para o caso em que $|F_1| > N$, ao final de todas as operações, o tamanho da população é mantido igual a N , as próximas N soluções de F_1 , não aproveitadas, são salvas no arquivo externo \bar{F}_1 . As soluções em \bar{F}_1 são incluídas novamente junto com a geração atualizada, \hat{X}_{k+1} , após as operações de mutação, cruzamento e seleção binária, quando parte das soluções teste são acrescentadas. Desse modo, no procedimento de seleção por ordenamento de não dominância são consideradas as soluções atuais agrupadas com as soluções do conjunto \bar{F}_1 . Limitando \bar{F}_1 a N soluções evita um crescimento muito grande no número de soluções de $\hat{X}_{k+1} \cup \bar{F}_1$, que impactaria o custo computacional no processo de seleção por não-dominância, e desse modo, minimiza-se, mas não elimina, o risco de alguma solução da Fronteira 1 que for descartada ser mais eficiente que uma solução futura da Fronteira 1. Se $|F_1| \leq N$, o conjunto $\bar{F}_1 = \emptyset$.

Para demonstrar o benefício da proposta de modificação no procedimento de seleção do NSGA-II, as Figuras 3.5 e 3.6 apresentam as curvas candidatas a Pareto-ótima das gerações 500, 1000, 1500 e 2000, para um dos estudos de casos realizados. São comparados nestas figuras o DEMO com o método de seleção do NSGA-II original e do método DEMO implementado com a modificação proposta com elitismo parcial da Fronteira 1. As setas na Figura 3.5 apontam para seis soluções da geração 2000, mais nítidas visualmente, que são dominadas por soluções de gerações anteriores, que foram eliminadas pelo critério de distância de aglomeração.

Figura 3.4 – Proposta de modificação na seleção baseado no NSGA-II - Fronteira 1 maior que N .

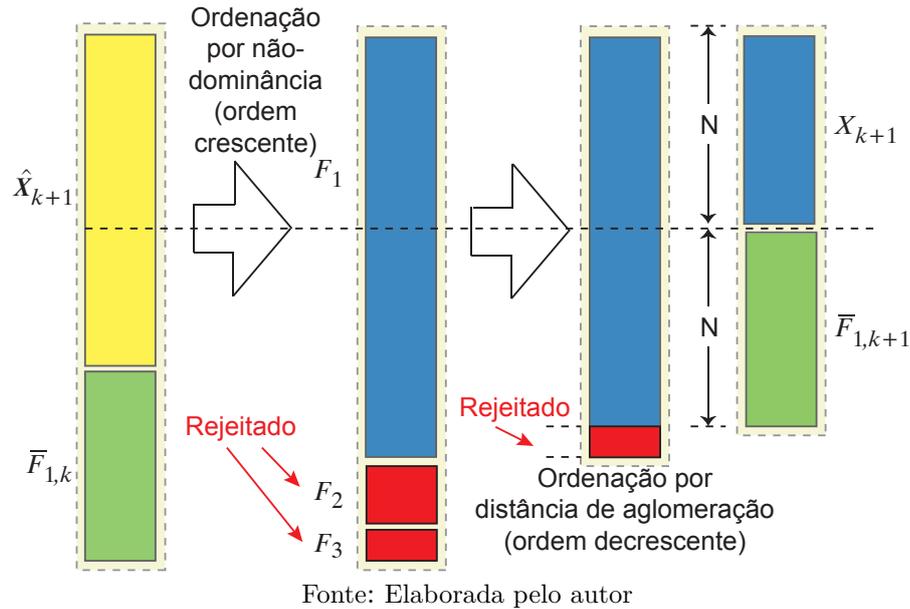
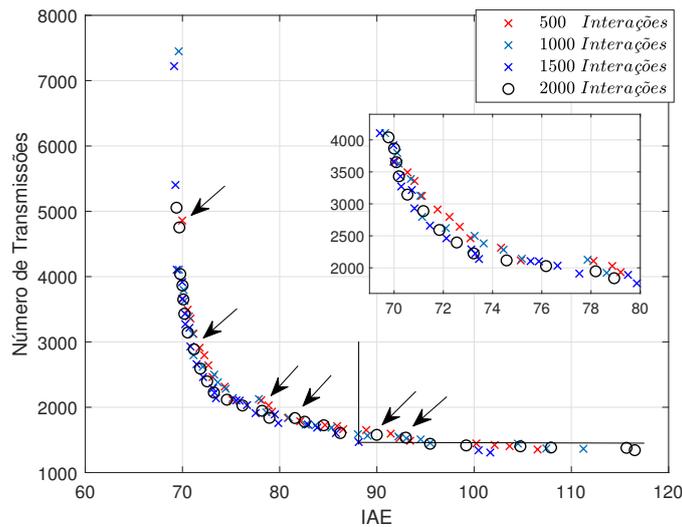


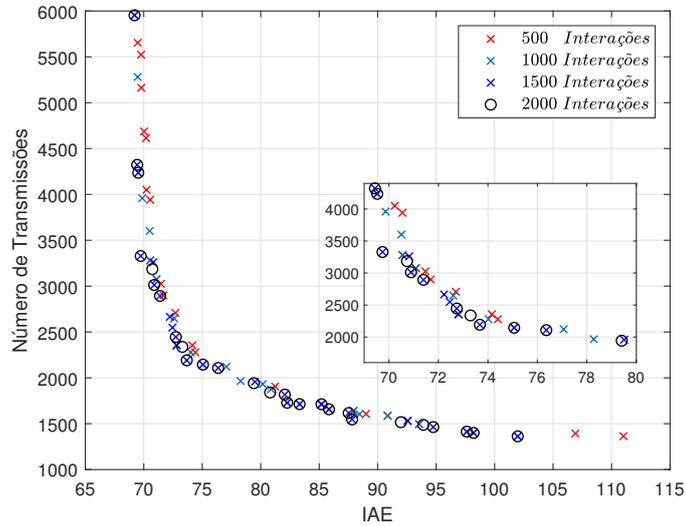
Figura 3.5 – DEMO com seleção igual ao NSGA-II original



Como pode ser visto na Figura 3.6, tal problema não ocorreu com a implementação proposta. A desvantagem da modificação proposta é o maior custo computacional para realizar a seleção pelo ordenamento de não-dominância e pela distância de aglomeração para um conjunto de soluções maiores. Pelo método original, a partir de um certo número de gerações, o número de soluções da Fronteira 1 oscila em torno de N e em muitas gerações o número de soluções é exatamente igual a N , não necessitando do cálculo da distância de aglomeração. Com a modificação proposta, o número de soluções tende para $2N$ aumentando o custo computacional tanto do ordenamento por não dominância (mais soluções para serem classificadas) e do cálculo da distância de aglomeração (mais soluções na Fronteira

1). Para o caso deste trabalho, o aumento do custo computacional do procedimento de seleção não é muito significativo em comparação com o custo computacional para cálculo das funções objetivo por intermédio de simulação.

Figura 3.6 – DEMO com seleção modificada com elitismo da Fronteira 1.



Fonte: Elaborada pelo autor

4 ESTUDOS DE CASO

O presente capítulo tem como objetivo principal avaliar a aplicação do método proposto de projeto dos ETMs no controle via rede, sendo, para tanto, analisado três sistemas de controle multivariáveis distintos, sendo dois com duas entradas e duas saídas, com 4 conexões ao todo, e um com 5 entradas e 4 saídas, com 9 conexões. Para cada estudo de caso, será realizada uma comparação entre os desempenhos dos oito ETMs listados na seção 3.1, projetados pelo método proposto. Também será analisado o efeito do período de amostragem sobre o desempenho do sistema de controle via rede com a transmissão baseada em ETM.

4.1 Apresentação do Estudo de Caso

Serão considerados os seguintes estudos de casos de sistemas multivariáveis da área de controle de processos:

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

Em todos os estudos de caso são considerados modelos que são válidos para um ponto de operação e todas as variáveis são relativas às variações percentuais em torno do ponto de operação.

Nas simulações, em cada estudo de caso, para avaliar cada mecanismo de acionamento por evento e cada solução, foram utilizados o mesmo perfil de atraso e perda de pacotes, sendo cada atraso e perda de pacote específicos determinados pelo índice da variável v_i e o instante de tempo t_k associado. Além disso, para efeito de comparação, são considerados dois períodos de amostragem, no qual um valor de referência foi estabelecido de modo a gerar uma resposta transitória similar ao controle contínuo no tempo, sem considerar os efeitos da rede, e um segundo período de amostragem igual a metade do de referência.

Considerando a natureza estocástica da rede, conforme análise apresentada na seção 3.3, para minimizar o custo computacional, apenas uma simulação é realizada para o cálculo das funções objetivo associadas a cada solução, porém, após a geração

do conjunto de soluções eficientes, são realizadas várias simulações para cada solução obtida para análise com base em valores médios e desvio padrão. Serão analisados três conjuntos de soluções dentro do conjunto de soluções eficientes. Um primeiro conjunto de soluções selecionadas são aquelas que geram valor médio da IAE inferior ao do valor médio da IAE para o caso do controle por transmissão periódica (CTP). Um segundo grupo de soluções é selecionado considerando as melhores soluções cujo valor médio da IAE é superior ao valor médio da IAE da transmissão periódica por um determinado valor percentual, isto é, soluções que privilegiam o desempenho do sistema de controle. O terceiro grupo selecionado corresponde as melhores soluções que apresentam um percentual mínimo de economia no número de transmissões em relação ao caso CTP, isto é, soluções que privilegiam a minimização do uso da rede de comunicação de dados. O CTP possui número de transmissões fixo em função do número de *links* de transmissão, tempo de simulação e período de amostragem, $N_t = \eta T_{max}/T_s$. Além disso, para cada grupo, uma única solução de cada lei de transmissão foi selecionada de tal modo que, ao mesmo tempo que o critério de cada grupo fosse alcançado, um outro critério seja otimizado. Ou seja, o compromisso estaria na solução que ou atingisse maior economia, quando a primeira métrica era a IAE, ou resultasse em um menor desvio da IAE, em relação ao CTP, quando objetivo inicial fosse a economia no número de transmissões. Cabe ressaltar novamente que os valores das tabelas serão valores médios, diferentes do que aparecem nas curvas de Pareto que consideram uma única simulação.

Como mencionado, na análise do conjunto de soluções obtidas pelo método proposto, atentando sobre a natureza estocástica da rede (atraso e perdas de pacotes), para cada lei de transmissão estudada foram executadas um conjunto de T_i simulações, com $i = 1, \dots, \beta$, sendo β o número de simulações. A definição de β foi resultante da tentativa de se encontrar, empiricamente, valores nos quais as médias das variáveis de interesse não se alterassem significativamente após certo incremento em seu valor. Assim, foram realizados experimentos para valores de β iguais a 10, 100, 500, 1000. Identificou-se, para tanto, que após 100 simulações a diferença entre os valores médios sucessivos, para cada valor de β , era menor que 0,5%. Motivo pelo qual β foi adotado igual a 100 para todos os estudos de casos apresentados.

Para cálculo das médias dos resultados das β simulações de uma configuração de ETM, as matrizes de atrasos, τ , e perdas de pacotes, ξ , são diferentes para cada simulação, geradas de forma pseudo-aleatória, de forma que fosse possível realizar comparações, após

seu registro em tabelas, a partir dos valores médio, μ , e dos desvios padrão, σ , das variáveis de interesse: integral do erro absoluto, número de transmissões, N_t , e o número de perdas totais, N_{pl} , no qual essa última variável inclui tanto as perdas pelo descarte de mensagens obsoletas devido aos atrasos da transmissão quanto a perda de pacotes:

$$\bar{f}_1 = \mu_1 = \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^{\beta} f_{1,i}, \quad \sigma_1 = \sqrt{\frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^{\beta} (f_{1,i} - \mu_1)^2}, \quad (4.1)$$

$$\bar{f}_2 = \mu_2 = \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^{\beta} f_{2,i}, \quad \sigma_2 = \sqrt{\frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^{\beta} (f_{2,i} - \mu_2)^2}, \quad (4.2)$$

$$\bar{N}_{pl} = \mu_3 = \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^{\beta} N_{pl,i}, \quad \sigma_3 = \sqrt{\frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^{\beta} (N_{pl,i} - \mu_3)^2}. \quad (4.3)$$

sendo $f_{1,i}$, $f_{2,i}$ e $N_{pl,i}$ os resultados da i -ésima simulação e \bar{f}_1 , \bar{f}_2 e \bar{N}_{pl} os valores médios das β simulações. No texto, a notação μ_n , para $n = 1, 2$ e 3 , será adotada de forma a representar a média conforme as Equações (4.1), (4.2) e (4.3) para $\beta = 100$. Para garantir uma comparação justa, a sequência de números pseudo-aleatórios é reinicializada para cada conjunto de β simulações de modo que as matrizes de atraso e perda de pacotes para cada simulação Γ_i são as mesmas para cada configuração e ajuste do ETM avaliados.

4.1.1 Estudo de caso: Sistema de Quatro Tanques

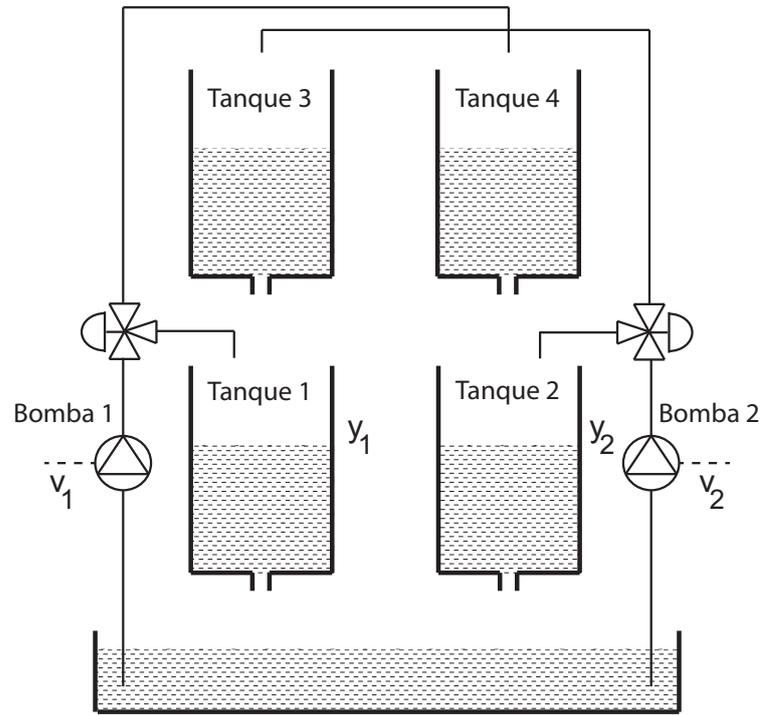
Considere o sistema de controle multivariável de um processo com quatro tanques apresentado na Figura 4.1 (JOHANSSON, 2000). O sistema é composto por duas entradas e duas saídas listadas na Tabela 4.1 e apresentadas na Figura 4.1. Os níveis dos tanques inferiores são controlados pelas duas bombas e as válvulas de 3-vias geram o acoplamento entre as duas malhas de controle.

Tabela 4.1 – Variáveis de Controle para o sistema de quatro tanques.

<i>Descrição da Variável</i>	<i>Símbolo</i>
<i>Entrada</i> - Tensão Bomba 1	u_1
<i>Entrada</i> - Tensão Bomba 2	u_2
<i>Saída</i> - Nível Tanque 1	y_1
<i>Saída</i> - Nível Tanque 2	y_2

Fonte: Traduzido de (JOHANSSON, 2000)

Figura 4.1 – Diagrama esquemático do controle de nível do sistema de quatro tanques.



Fonte: Adaptado de (JOHANSSON, 2000)

Considere o modelo no espaço de estados do sistema linear invariante no tempo em tempo contínuo:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Considerando como variáveis de estados os níveis dos quatro tanques e o ponto de operação de fase mínima apresentado em Johansson (2000), as matrizes do modelo no espaço de estados são:

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

$$C = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Considere o controlador dinâmico PI descentralizado cujo modelo no espaços de estados em tempo contínuo é dado por:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= A_c x_c(t) + B_c[r(t) - y(t)], \\ u(t) &= C_c x_c(t) + D_c[r(t) - y(t)], \end{aligned} \quad (4.5)$$

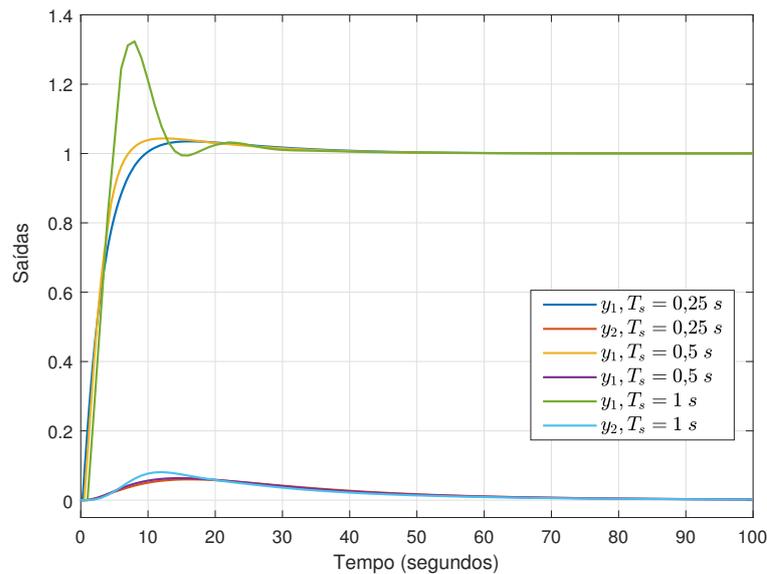
sendo

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_c = \begin{bmatrix} 0,0328 & 0 \\ 0 & 0,0276 \end{bmatrix},$$

$$C_c = \begin{bmatrix} 6,5200 & 0 \\ 0 & 4,2949 \end{bmatrix}, \quad D_c = \begin{bmatrix} 6,5200 & 0 \\ 0 & 4,2949 \end{bmatrix}.$$

A escolha do período de amostragem T_s se baseou em uma análise das respostas transitórias do sistema, apresentadas na Figura 4.2. Ou seja, o período de referência foi definido de tal forma que não houvesse grandes variações na resposta do sistema de controle, em relação a um período de amostragem menor. Essa situação decorre, por exemplo, sobre a observação das saídas y_1 e y_2 , no qual pode ser observado que, para grandes períodos de amostragem, $T_s = 1$ s, a resposta apresenta um grande aumento em sua componente oscilatória.

Figura 4.2 – Respostas transitórias das saídas do sistema sem atraso de transmissão, $y(t_k)$ para $T_s = 0,25$ s, $T_s = 0,5$ s e $T_s = 1$ s, sistema de quatro tanques.



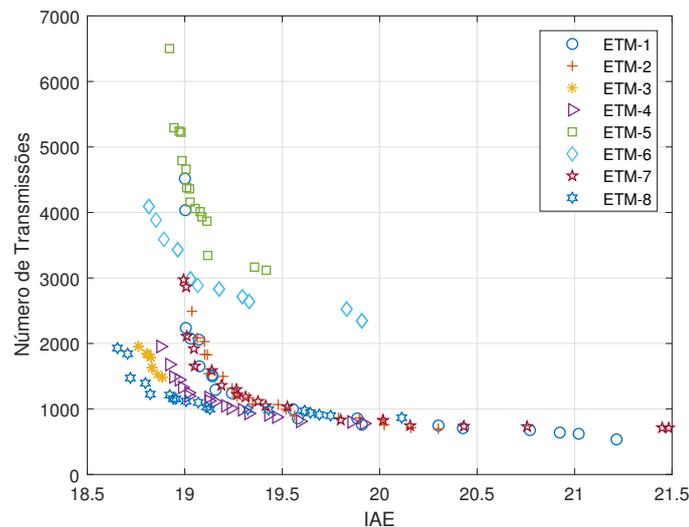
Fonte: Elaborada pelo autor

Considera-se, portanto, a seleção dos dois períodos de amostragem menores, $T_s = 0,25$ s e $T_s = 0,5$ s, sendo que o último será considerado como o período de amostragem

de referência, de modo que as análises subsequentes são a partir da premissa na qual o comportamento do sistema estará adequadamente representado.

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram as curvas candidatas a Pareto-ótima obtidas com cada um dos ETMs para $T_s = 0,25 s$ e $T_s = 0,5 s$, respectivamente, com o conjunto de soluções eficientes com diferentes compromissos entre o desempenho (IAE) e o uso da rede (número total de transmissões). Em ambos os períodos de amostragem observa-se que os ETM's baseados no valor absoluto do erro resultaram em soluções mais eficientes, como destaque o ETM-3 e ETM-8. Na região mais próxima da solução utópica (mínimo das duas funções objetivo simultaneamente), o ETM-8, baseado em integral do erro, é o que apresenta maior número de soluções eficientes.

Figura 4.3 – Curvas candidatas de Pareto para o exemplo do sistema de quatro tanques, caso $T_s = 0,25 s$.

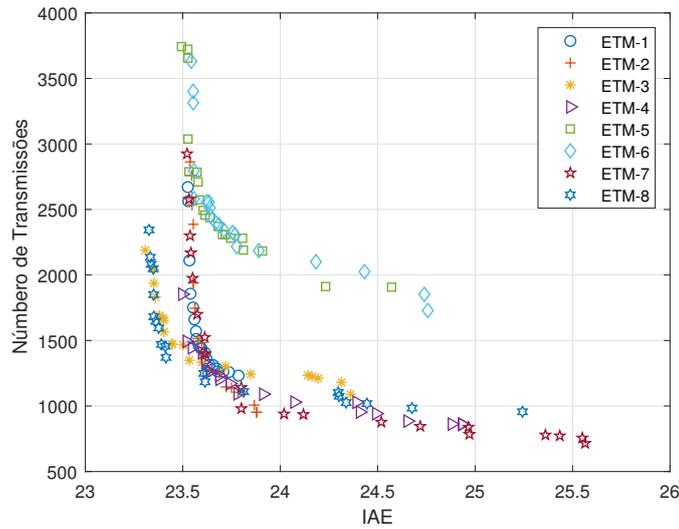


Fonte: Elaborada pelo autor

De forma antagônica, as soluções das leis de transmissões ETM-5 e ETM-6, baseados no valor relativo do valor absoluto e do erro ao quadrado, também caracterizadas nas Figuras 4.3 e 4.4, apresentam a maior quantidade de soluções dominadas e, portanto, não eficientes.

A distribuição dos atrasos, em múltiplos inteiros do período de amostragem, para $T_s = 0,5 s$ pode ser observada na Figura 4.5. Cabe lembrar que o valor do desvio padrão dos atrasos aleatórios foi ajustado para se ter um atraso máximo em torno de 20 instantes de amostragem para o período de amostragem de referência, $T_s = 0,5 s$, ou seja, $\rho = 3$, conforme Equação (3.24). Na análise das soluções obtidas baseada no valor médio das

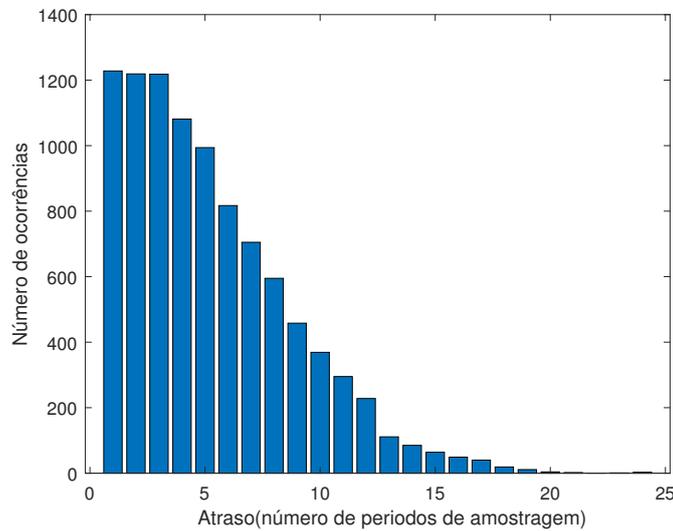
Figura 4.4 – Curvas candidatas de Pareto para o exemplo do sistema de quatro tanques, caso $T_s = 0,5 s$.



Fonte: Elaborada pelo autor

simulações, o máximo pode ser diferente para cada simulação já que a sequência de valores pseudo-aleatórios se modifica.

Figura 4.5 – Distribuição dos atrasos de comunicação via rede para o exemplo do sistema de quatro tanques, caso $T_s = 0,5 s$.



Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 4.2, para $T_s = 0,5 s$, apresenta algumas comparações das soluções estudadas, dividindo-as em três grandes grupos, como mencionado anteriormente. Os primeiros resultados apresentados correspondem às soluções que obtiveram, em média, uma IAE inferior àquele apresentado pelo CTP, denotadas como pertencentes ao Grupo 0. Os próximos resultados apresentados correspondem as soluções que sofreram um aumento da IAE em relação ao CTP de no máximo 1%, referenciadas no texto como Grupo 1. O

terceiro conjunto de soluções apresentadas correspondem aos resultados cuja economia mínima de transmissões a ser atingida, também em relação ao CTP, foi definida em 85%, assim nomeadas como Grupo 2. A definição do valor de referência aplicado ao terceiro grupo leva em consideração o valor máximo e mínimo de todas as leis de transmissões, para o dado período de amostragem, no qual foi somado um pequeno incremento próximo à metade da diferença entre o valor máximo e a média dessa mesma amostra. Critério esse adotado em todos os estudos de casos.

Tabela 4.2 – Comparação entre diferentes soluções para o caso do sistema de quatro tanques com $T_s = 0,5 s$.

	IAE			N_t			N_{pl}	
	μ_1	σ_1	max	μ_2	σ_2	max	μ_3	σ_3
CTP	22,369	2,87	31,914	9.596,00	0,0	9.596	5.885,44	30,0
ETM-3 #3	22,358	2,87	31,986	2.053,31	84,9	2.254	814,61	47,1
ETM-8 #5	22,357	2,87	32,039	2.009,86	97,9	2.240	799,81	56,1
ETM-1 #10	22,579	2,87	32,022	1.564,24	89,5	1.772	692,83	50,1
ETM-2 #9	22,535	2,87	32,047	1.612,81	93,9	1.848	722,76	50,7
ETM-3 #9	22,589	2,89	32,029	1.684,12	93,9	1.886	593,42	49,2
ETM-4 #3	22,575	2,88	32,062	1.623,56	97,7	1.869	633,19	48,8
ETM-5 #8	22,588	2,87	32,072	2.655,50	86,3	2.870	1.383,81	41,9
ETM-6 #7	22,587	2,88	32,137	2.681,07	103,4	2.949	1.403,36	48,4
ETM-7 #7	22,582	2,88	32,019	1.608,91	99,9	1.821	710,25	53,4
ETM-8 #11	22,578	2,90	32,221	1.569,89	94,7	1.790	564,95	46,0
ETM-1#14	22,694	2,88	32,188	1.437,98	82,0	1.663	628,44	46,5
ETM-2 #13	22,737	2,89	32,286	1.388,59	95,1	1.691	604,04	49,8
ETM-3 #16	23,514	2,93	32,941	1.437,91	93,4	1.702	440,66	45,3
ETM-4 #8	22,858	2,91	32,389	1.419,69	89,0	1.638	518,69	45,7
ETM-7 #9	22,962	2,87	32,370	1.303,89	88,2	1.575	541,63	42,7
ETM-8 #12	23,036	2,91	32,596	1.439,32	90,8	1.623	481,95	45,2

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 4.3 apresenta a variação percentual das mesmas soluções listadas na Tabela 4.2, mas, com valores relativos, evidencia a variação em torno da IAE do CTP, além de demonstrar a variabilidade percentual do número de transmissões também em relação ao CTP. Ou seja, a IAE (%) é o desvio percentual da solução indicada em relação ao CTP, $N_t(\%)$ o desvio percentual em relação ao número total de transmissões no CTP e a variável $N_{pl}(\%)$ que representa a relação do número total de pacotes perdidos com o respectivo N_t da própria solução.

Há de se notar que a economia máxima atingida em todo o conjunto de soluções obtidas, inclusive naquelas não apresentada em tabela, pode chegar a 92,5% para $T_s = 0,5 s$.

Tabela 4.3 – Comparação percentual entre diferentes soluções para o caso do sistema de quatro tanques com $T_s = 0,5 s$.

GRUPO 0				GRUPO 2			
	IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)		IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)
ETM-3 #3	-0,05%	21,40%	39,67%	ETM-1 #14	1,45%	14,99%	43,70%
ETM-8 #5	-0,065%	20,94%	39,79%	ETM-2 #13	1,65%	14,47%	43,50%
GRUPO 1				ETM-3 #16	5,12%	14,98%	60,65%
	IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)	ETM-4 #8	2,19%	14,79%	36,54%
ETM-1 #10	0,94%	16,30%	44,29%	ETM-7 #9	2,65%	13,59%	41,54%
ETM-2 #9	0,74%	16,81%	44,81%	ETM-8 #12	2,98%	15,00%	33,48%
ETM-3 #9	0,99%	17,55%	35,24%				
ETM-4 #3	0,92%	16,92%	39,00%				
ETM-5 #8	0,98%	27,67%	52,11%				
ETM-6 #7	0,98%	27,94%	52,34%				
ETM-7 #7	0,95%	16,77%	44,14%				
ETM-8 #11	0,93%	16,36%	35,99%				

Fonte: Elaborada pelo autor

Situação essa que não é necessariamente o melhor resultado já que a IAE corresponde a 17,27% maior quando comparado ao CTP.

Conforme pode ser visto na Tabela 4.2, no Grupo 0, a solução ETM-8 #5 apresentou além de uma menor IAE, uma grande redução no número de transmissões, economia de 79,06% no uso da rede. Ainda na referida tabela, no Grupo 1, as soluções ETM-1 #10 e ETM-8 #11 são as mais vantajosas, uma vez que atendem a exigência de piora da IAE menor que 1% e apresentam a menor quantidade de transmissões, N_t , chegando a uma economia percentual de 83,70%. Já no Grupo 2, também registrado na referida tabela, a solução de destaque é a ETM-1 #14 que apresentou uma economia de transmissão de 85,02% em relação ao CTP, ao mesmo tempo que apresentou a menor IAE com percentual de aumento da IAE de apenas 1,45% em relação ao CTP.

Ainda na Tabela 4.2, as soluções cujos valores estão em destaque (negrito) representam as soluções que não são dominadas por outras soluções de mesmo grupo, isto é, não existe outra solução que é melhor em ambos os objetivos. Ou seja, a solução ETM-3 #9, por exemplo, foi dominada por pelo menos uma outra solução do Grupo 1.

Pode ser observado na Tabela 4.3 que a solução ETM-8 #5, pertencente ao Grupo 0, domina a outra solução dentro do mesmo grupo. Além disso, essa tabela demonstra claramente que, independentemente do ETM, é obtido, em média, uma diferença da IAE muito pequena em relação ao CTP, mantendo o desempenho do controlador, embora o percentual de transmissão seja muito menor, inferior a 30% em todas as soluções listadas.

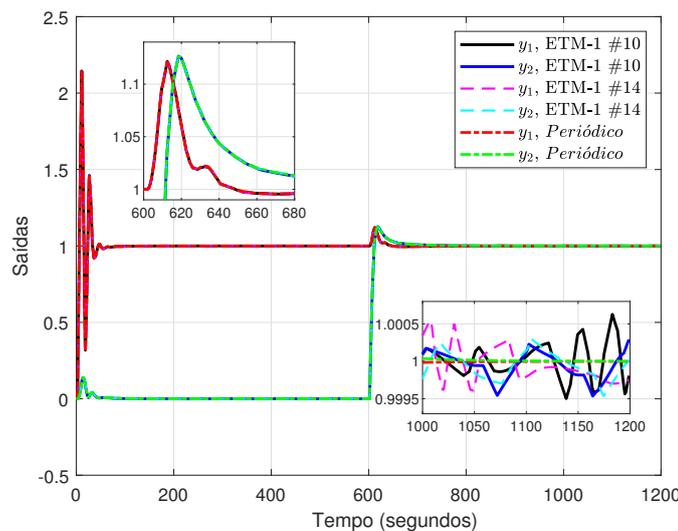
Nas Tabelas 4.2 e 4.3 também é informado o total de perda de pacotes, que é composto pelos 5% de perdas devido à rede, mais as perdas associadas aos atrasos de mensagens que foram descartadas dado que chegou após uma outra mensagem recebida mais atual e se tornou obsoleta. Como é de se esperar, o número total de perdas cresce com o número total de transmissões. Vale destacar que a grande maioria das transmissões do controle periódico sem uso de ETM, o CTP, são perdidas, em média 61,3%, gerando desperdício do uso da rede de comunicação, além do uso desnecessário com transmissão de informação redundante (sinais não alterados).

Para efeito da simulação desse sistema de controle, os sinais de referência $r_1(t)$ e $r_2(t)$ são sinais tipo degrau unitário, conforme Equação (3.25), com $r_1(t) = U(t)$ e $r_2(t) = U(t - 600)$. O tempo final de simulação considerado foi de $T_{max} = 1200 s$. São apresentadas as respostas transitórias das leis de transmissão ETM-1 #10, menor número de transmissões com erro de até 1%, sendo representados pelos limiares $\delta = [0,12903 \ 0,42876 \ 0,51005 \ 0,93554] \times 10^{-3}$; e ETM-1 #14, menor erro com economia de pelo menos 85%, com limiares $\delta = [0,27314 \ 0,41540 \ 0,90870 \ 0,90939] \times 10^{-3}$, conforme assinalado anteriormente. No Apêndice A são apresentados a média μ_1 e μ_2 dos ETMs indicados para todas as N soluções obtidas. Além disso, para cada uma das duas soluções em análise, foi selecionada para apresentação, dentro do conjunto Γ de simulações, àquela que apresentou a pior resposta, ou seja, escolheu-se uma solução com a maior IAE.

Considerando o período de amostragem $T_s = 0,5 s$ e os resultados selecionados nos grupos 1 e 2, observa-se na Figura 4.6 a comparação entre as respostas transitórias do sistema com os esquemas de transmissão por evento e o correspondente CTP. As respostas transitórias do controle com transmissão periódica é relativa à simulação Γ_{95} , das 100 simulações realizadas, no qual corresponde ao maior valor da IAE = 31,914. As repostas transitórias da solução ETM-1 #10 é relativa também à simulação Γ_{95} , que corresponde ao seu máximo valor de IAE = 32,022. Quando comparado aos transitórios apresentados na Figura 4.6, fica claro o efeito dos atrasos aleatórios de comunicação e as perdas de pacotes, independentemente do uso ou não de ETM. Analisando as respostas transitórias, o resultado ficou visualmente parecido em relação ao correspondente CTP, com sobressinal, tempo de subida e tempo de acomodação similares. Com relação ao regime estacionário, enquanto que no CTP as saídas convergem para os valores de referência, com o uso do ETM, as saídas apresentam oscilações de amplitudes bastante reduzidas, na casa de 10^{-4} em torno dos valores de referência. Da mesma forma, ainda na referida figura, é apresentado

o pior caso da lei ETM-1 #14 para simulação Γ_{95} . Em relação a essa solução, o valor médio da simulação apresentou IAE igual a 22,694, menor que o pior caso do CTP. Com relação as respostas transitórias, elas são bastante similares as do CTP, mas com muito menos transmissões. O mesmo problema de oscilações no regime estacionário é também observado para essa solução.

Figura 4.6 – Respostas transitórias das saídas do sistema, $y(t_k)$, solução ETM-1 #10 e ETM-1 #14, $T_s = 0,5$ s, para o sistema de quatro tanques.

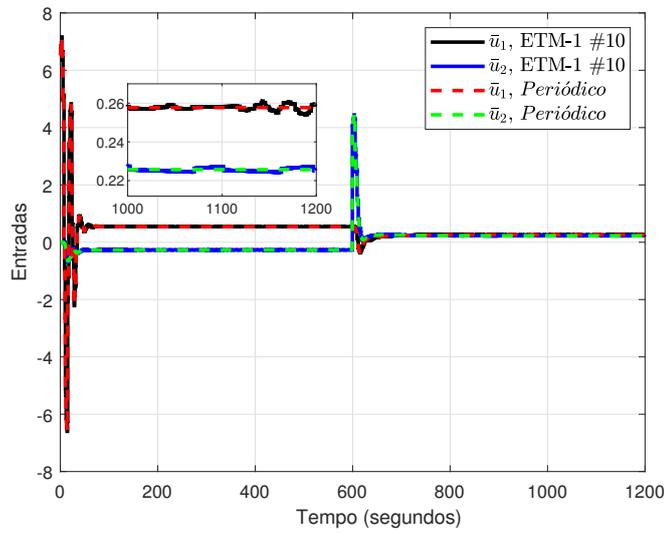


Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 4.7 apresenta as respostas transitória das variáveis manipuladas na entrada da planta (após o amostrador de ordem zero), \bar{u}_1 e \bar{u}_2 , correspondente à solução do Grupo 1, ETM-1 #10 e Γ_{95} . Pode ser observado que as respostas transitórias nas entradas do sistema são similares com e sem ETM, porém em regime estacionário existem as oscilações em torno do valor do ponto de operação, introduzida pelos ETMs, que ocasionam as oscilações nas variáveis de saída do sistema.

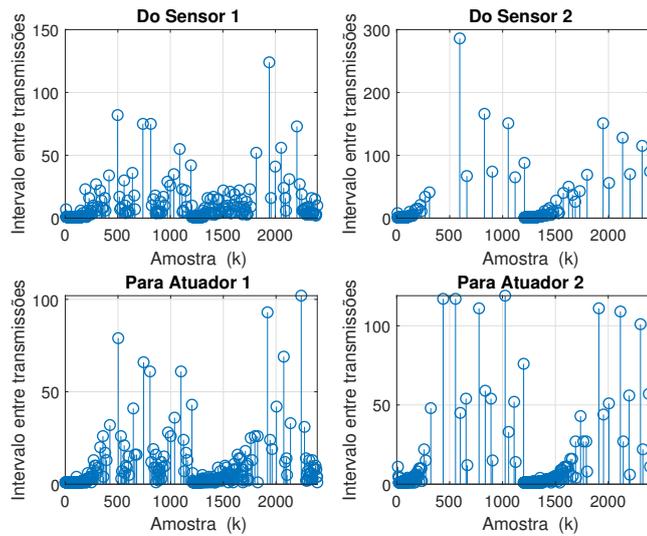
A Figura 4.8 mostra o intervalo entre os eventos de transmissão para a solução ETM-1 #10 e Γ_{95} . A tendência observada corrobora ao esperado, no instante em que os degraus nos sinais de referência ocorrem, a quantidade de transmissões são maiores, ao passo que quando as saídas convergem para os valores dos sinais de referência o intervalo entre transmissões aumenta, fato esse melhor observado nos gráficos *Do Sensor 2*, no qual apresenta 286 amostras consecutivas sem transmissões e em *Para Atuador 2* com 119 amostras sem evento que gerassem a transmissão. Além disso, é observado que as transmissões não param completamente no regime estacionário devido às oscilações das variáveis de entrada e saída do sistema.

Figura 4.7 – Respostas transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}(t_k)$, solução ETM-1 #10, $T_s = 0,5 s$, para o sistema de quatro tanques.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.8 – Intervalos entre transmissões em número de amostragens, solução ETM-1 #10, $T_s = 0,5 s$, para o sistema de quatro tanques.



Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme metodologia anteriormente apresentada, as soluções para $T_s = 0,25 s$ também foram selecionadas e agrupadas e os resultados correspondentes registrados em tabela. A Tabela 4.4, para $T_s = 0,25 s$, apresenta as comparações de algumas soluções, conforme critérios anteriormente adotados. Desta forma, no grupo 0, duas soluções obtiveram, em média, uma IAE inferior ao periódico. No Grupo 1, oito soluções, uma para cada lei, obtiveram um aumento da IAE em relação ao correspondente CTP em no máximo 1%. O terceiro conjunto de soluções, cuja economia mínima de transmissões a ser atingida foi definida em 83%, resultou em cinco soluções para o Grupo 2. A economia máxima atingida

em todo o conjunto de soluções obtidas chegou em 97,2% em detrimento ao aumento da IAE, cujo valor representou 32,42% maior quando comparado ao caso do sistema por transmissão periódica.

Tabela 4.4 – Comparação entre diferentes soluções para o caso do sistema de quatro tanques com $T_s = 0,25 s$.

	IAE			N_t			N_{pl}	
	μ_1	σ_1	max	μ_2	σ_2	max	μ_3	σ_3
CTP	17,462	1,54	21,405	19.188,00	0,0	19.188	13.654,59	31,9
ETM-1 #1	17,456	1,54	21,408	4.354,60	182,4	4.716	2.668,87	134,3
ETM-8 #3	17,435	1,53	21,412	1.894,75	87,2	2.104	779,27	52,7
ETM-1 #3	17,556	1,53	21,523	2.234,71	113,5	2.592	1.225,05	70,9
ETM-2 #2	17,625	1,53	21,564	2.113,71	104,3	2.395	1.116,95	62,8
ETM-3 #12	17,555	1,53	21,419	1.925,73	80,2	2.187	742,45	41,0
ETM-4 #2	17,561	1,54	21,380	1.742,86	82,4	1.958	744,88	42,7
ETM-5 #8	17,560	1,53	21,380	4.381,39	117,0	4.711	2.763,58	70,6
ETM-6 #3	17,637	1,51	21,462	4.391,03	155,4	4.743	2.766,23	102,9
ETM-7 #3	17,622	1,52	21,442	2.086,20	113,8	2.403	1.111,74	66,3
ETM-8 #9	17,604	1,52	21,707	1.584,47	79,8	1.792	614,02	42,7
ETM-1 #10	18,101	1,54	21,889	1.294,57	71,1	1.473	621,26	36,2
ETM-2 #9	18,145	1,52	21,987	1.309,04	67,2	1.522	634,87	39,9
ETM-4 #8	18,031	1,54	21,908	1.336,89	77,5	1.524	504,62	33,3
ETM-7 #9	18,281	1,52	22,183	1.268,18	70,9	1.459	593,97	38,2
ETM-8 #2	18,197	1,47	21,761	1.337,04	83,0	1.546	440,31	35,7

Fonte: Elaborada pelo autor

De forma complementar, a Tabela 4.5 exibe o comparativo percentual dentre as soluções estudadas para $T_s = 0,25 s$. Na Tabela 4.5, o percentual de perdas por transmissão $N_{pl}(\%)$ equivale a representatividade das perdas, para uma solução dada, em relação à sua própria quantidade de transmissão. Ou seja, no Grupo 0, por exemplo, a solução ETM-8 #3 obteve 41,13% de perdas de transmissão, percentual inferior ao percebido no CTP correspondente, cujo percentual foi de 71,16%. Representação essa que busca avaliar a redução das perdas por transmissão em conjunto com a redução da quantidade de dados transmitidos pela rede. O alto percentual de perdas do sistema por transmissão periódica pode ser uma das razões pela qual pode existir solução baseada em ETM com valor da IAE relativamente menor. Não adianta transmitir mais vezes se a maioria das transmissões são perdidas ou descartadas devido aos atrasos de comunicação.

Nas Tabelas 4.4 e 4.5, Grupo 0, a solução ETM-8 #3 apresentou uma economia média no número de transmissões N_t de 90,13%, um pouco inferior à média obtida nos demais grupos, mas, ainda sim, apresentou uma grande economia considerando o fato de

Tabela 4.5 – Comparação percentual entre diferentes soluções para o caso do sistema de quatro tanques com $T_s = 0,25 s$.

GRUPO 0				GRUPO 2			
	IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)		IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)
ETM-1 #1	-0,03%	22,69%	61,29%	ETM-1 #10	3,66%	6,75%	47,99%
ETM-8 #3	-0,15%	9,87%	41,13%	ETM-2 #9	3,91%	6,82%	48,50%
GRUPO 1				ETM-4 #8	3,26%	6,97%	37,75%
	IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)	ETM-7 #9	4,69%	6,61%	46,84%
ETM-1 #3	0,54%	11,65%	54,82%	ETM-8 #2	4,21%	6,97%	32,93%
ETM-2 #2	0,93%	11,02%	52,84%				
ETM-3 #12	0,53%	10,04%	38,55%				
ETM-4 #2	0,56%	9,08%	42,74%				
ETM-5 #8	0,56%	22,83%	63,08%				
ETM-3 #3	1,00%	22,88%	63,00%				
ETM-7 #3	0,92%	10,87%	53,29%				
ETM-8 #9	0,81%	8,26%	38,75%				

Fonte: Elaborada pelo autor

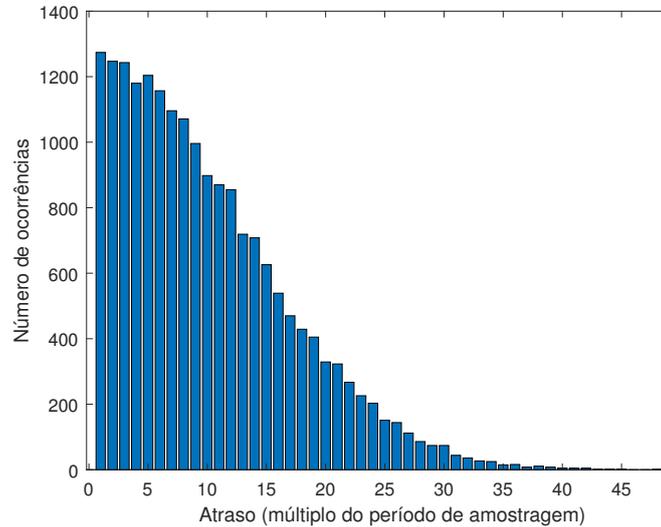
que o valor da IAE é em média menor que o valor da transmissão periódica, além dos valores de pior caso, máximo valor da IAE, serem bem próximos. No Grupo 1, a solução ETM-8 #9 apresentou o melhor resultado dentre os parâmetros propostos, atingindo uma economia N_t de 91,74%, a maior dentre todas do mesmo grupo. Como anteriormente citado, as soluções cujo ETM foram representados pela lei de transmissão 5 e 6 atingiram, ainda nesse grupo, os piores resultados, mas, ainda sim, superando 77% de economia. No segundo grupo foram registradas as soluções cujo percentual de economia excedesse 93%. Nesse conjunto, a solução ETM-4 #8, baseada na integral do erro ao quadrado, além de atender ao critério supracitado, apresentou menor IAE, valor médio de $\mu_1 = 18,031$, ou seja, um valor de 3,26% superior ao caso obtido pelo CTP correspondente, conforme observado também pela Tabela 4.5. Novamente é observado que, com o uso de ETM, é possível ter desempenhos bastante similares ou até mesmo melhores, com base na IAE, com número de transmissões bastante reduzido em relação CTP.

A Tabela 4.4 ainda mostra as soluções, em negrito, que dominaram outras soluções. Como exemplo do Grupo 1, as soluções das leis de transmissões ETM-1, ETM-2, ETM-5, ETM-6, ETM-7 foram dominadas por pelo menos uma outra solução (ETM-3, ETM-4 ou ETM-8) integrada ao mesmo grupo. Exemplos de dominâncias também foram encontrados nos outros grupos.

A distribuição dos atrasos, em múltiplos inteiros do período de amostragem, para $T_s = 0,25 s$ é apresentado na Figura 4.9, observe agora que o valor máximo obtido está

em torno de 45 períodos de amostragem. O valor absoluto do atraso é o mesmo, com o mesmo valor de $\rho = 3$ na Equação (3.24), mas agora o período de amostragem é menor.

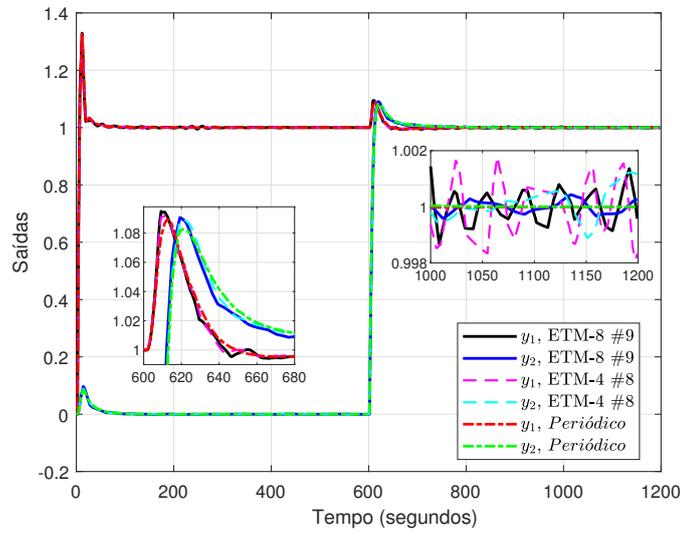
Figura 4.9 – Um caso de distribuição dos atrasos para o caso do sistema de quatro tanques para $T_s = 0,25 s$ e Γ_{16} .



Fonte: Elaborada pelo autor

As respostas transitórias para $T_s = 0,25 s$ são obtidas de forma análoga à do sistema de controle com $T_s = 0,5 s$. A Figura 4.10 apresenta as respostas transitórias das saídas y_1 e y_2 do sistema para as soluções: ETM-8 #9, do Grupo 1, representado pelos limiares de disparo por eventos $\delta = [0,00151 \ 0,00382 \ 0,00446 \ 0,00649 \ 0,32254 \ 0,97899 \ 0,71717 \ 0,05261]$; ETM-4 #8, do Grupo 2, com os respectivos limiares $\delta = [0,04182 \ 0,24639 \ 0,326889 \ 0,950839] \times 10^{-5}$; e para o sistema com controle por transmissão periódica - CTP. No Apêndice A são apresentadas as médias μ_1 e μ_2 dos ETM-4 e ETM-8 para todas as N soluções obtidas. As simulações que representam o pior caso (máximo valor da IAE), inclusive ao CTP associado, correspondem à Γ_{16} , sendo os valores das respectivas IAE relativamente próximos (diferença menor que 1%). Observa-se na figura 4.10 que a resposta transitória de cada simulação, com controle por evento, apresentou um pico de mesmo patamar em relação ao CTP. Além disso, as oscilações em torno do valor de referência em estado estacionário permanecem na casa de 10^{-3} . De acordo com o esperado, uma vez que o valor máximo do índice de desempenho IAE para as duas soluções são muito próximos, as respostas transitórias tendem a ficar bastante parecidas. Quando comparados os transitórios das Figuras 4.6 e 4.10, pode ser observado que os sobresinais são bem menores com a redução do período de amostragem.

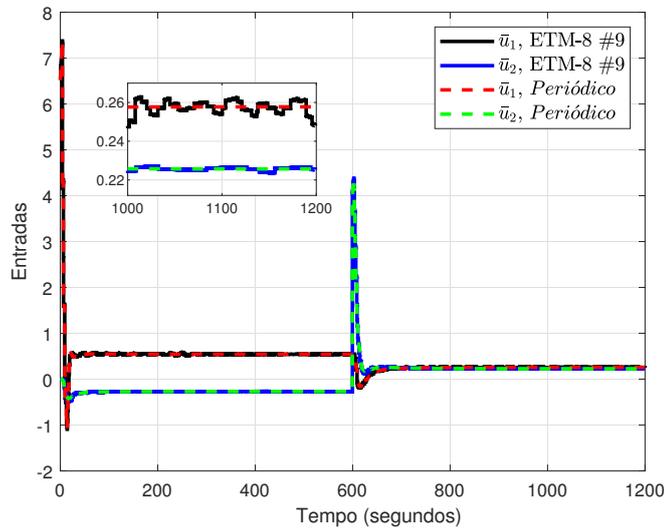
Figura 4.10 – Respostas transitórias das saídas do sistema, $y(t_k)$, soluções ETM-4 #8 e ETM-8 #9, $T_s = 0,25 s$, para o sistema de quatro tanques.



Fonte: Elaborada pelo autor

Os sinais de entrada do sistema, \bar{u}_1 e \bar{u}_2 , correspondente a simulação para solução ETM-8 #9 podem ser vistos na Figura 4.11. Observa-se os picos nos instantes das variações em degrau dos sinais de referência semelhantes aos do CTP.

Figura 4.11 – Respostas transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}(t_k)$, solução ETM-8 #9, $T_s = 0,25 s$, para o sistema de quatro tanques.

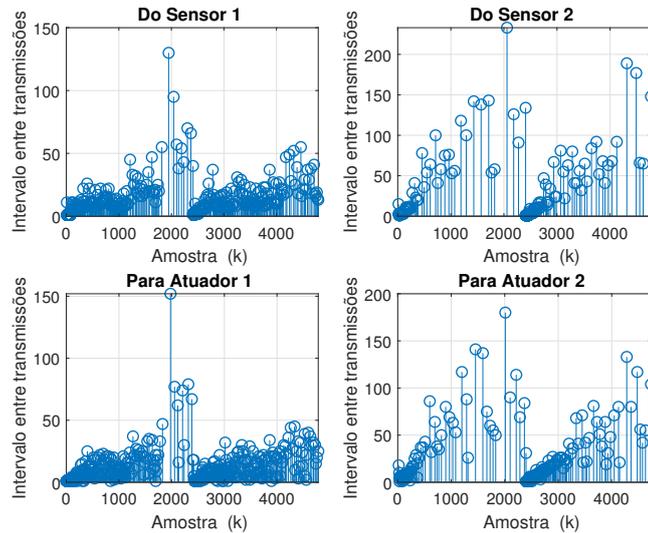


Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 4.12 mostra o intervalo entre eventos de transmissão para a solução ETM-8 #9 e Γ_{16} . Em regime estacionário, pode ser observado menor intervalo entre eventos na malha 1 como a comunicação *Do Sensor 1 e Para Atuador 1*, compatível com os sinais mais oscilatórios de y_1 e \bar{u}_1 . Observa-se que os intervalos entre transmissões são maiores quando a variável atinge o que pode ser caracterizado como regime estacionário. No que

se refere ao máximo intervalo entre eventos, a contagem de amostras consecutivas sem transmissão alcançou 233 entre a segunda saída e o controlador, *Do Sensor 2*, além de 180 amostras sem transmissão do controlador ao segundo atuador, *Para Atuador 2*.

Figura 4.12 – Intervalos entre transmissões em número de amostragens, solução ETM-8 #9, $T_s = 0,25 s$, para o sistema de quatro tanques.

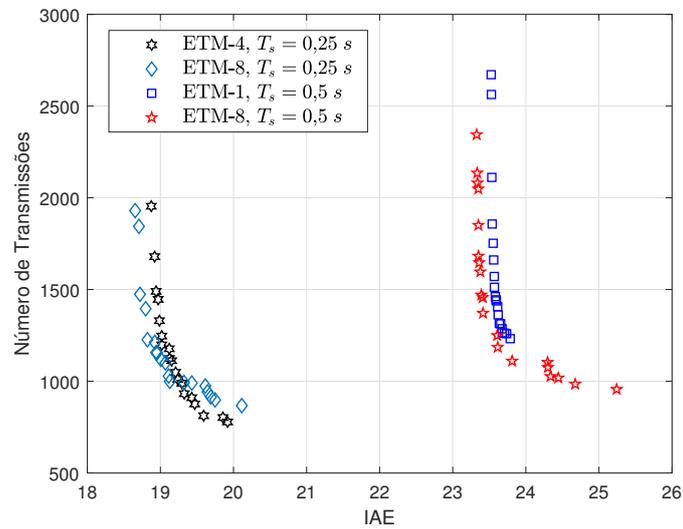


Fonte: Elaborada pelo autor

Considerando a análise do efeito do período de amostragem, a Figura 4.13 apresenta uma comparação entre a curva Pareto-ótima considerando as soluções que alcançaram o desempenho determinados, sejam elas: ETM-4 e ETM-8 para $T_s = 0,25 s$ e o ETM-1 e ETM-8 para $T_s = 0,5 s$. Identifica-se na figura em questão que para $T_s = 0,25 s$, o ETM-8 prevalece com as soluções mais eficientes até um índice da IAE próximo de 19,2 até que o ETM-4 passa a dominar a região da curva. Já para o $T_s = 0,5 s$, o ETM-1 não apresenta soluções eficientes em comparação com o ETM-8, mas, apesar disso, na análise baseada na média de várias simulações ele apresenta melhor desempenho. Além disso, comparando os resultados da Tabela 4.2 e Tabela 4.4, como era de se esperar, a redução no período de amostragem reduz o valor médio da IAE. No caso do CTP, tal redução se dá pelo aumento do número de transmissões (o dobro). Entretanto, se comparadas as soluções ETM-8 #5, na Tabela 4.2, IAE= 22,357 e $N_t = 2.009,86$, com a solução ETM-8 #3, na Tabela 4.4, IAE= 17,435 e $N_t = 1.894,75$, a redução do período de amostragem não significou um aumento no número de transmissões, o que é um resultado bastante interessante. Mesma observação pode ser feita com relação a Figura 4.13, em que a redução do período de amostragem deslocou as curvas para esquerda (menor IAE) mas não para cima (maior número de transmissões). Isto significa que, se for possível reduzir o período de amostragem

com base na capacidade dos sensores e controladores, é possível reduzir o uso da rede e melhorar o desempenho do sistema simultaneamente.

Figura 4.13 – Comparação entre as curvas candidatas de Pareto com relação ao período de amostragem para o exemplo do sistema de quatro tanques.

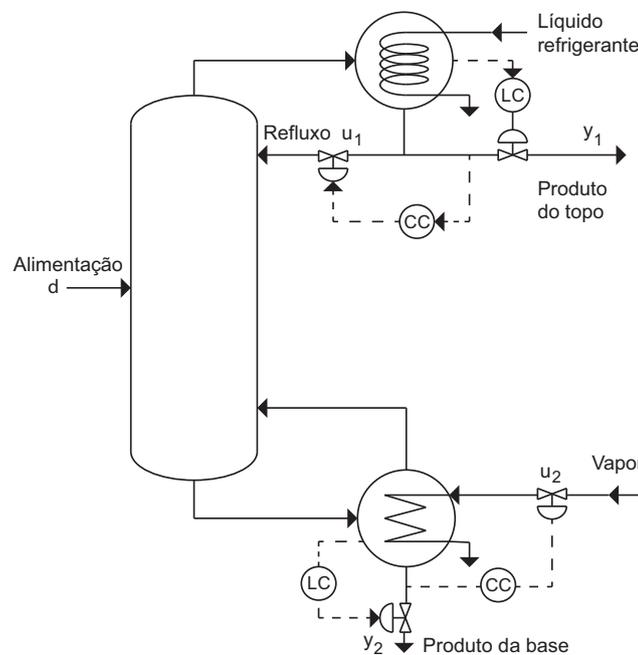


Fonte: Elaborada pelo autor

4.1.2 Estudo de caso: Coluna de Destilação Binária - Wood & Berry

Considere o sistema de controle de uma coluna de destilação binária, apresentado na Figura 4.14 (WOOD; BERRY, 1973). Essa é uma planta MIMO composta de várias entradas e saídas cujo modelo simplificado possui duas entradas e duas saídas com interações entre as malhas de controle, presença de tempo morto e distúrbio. As saídas desse sistema são as composições dos produtos no topo e na base da coluna de destilação e as variáveis manipuladas são a vazão de refluxo e a vazão de vapor no trocador de calor, conforme apresentado na Tabela 4.6.

Figura 4.14 – Diagrama do sistema de controle da coluna de destilação Wood & Berry.



Fonte: Adaptado de (WOOD; BERRY, 1973)

Tabela 4.6 – Variáveis de Controle para a coluna de destilação Wood & Berry

<i>Descrição da Variável</i>	<i>Símbolo</i>
<i>Saída - Composição de topo</i>	y_1
<i>Saída - Composição da base</i>	y_2
<i>Entrada - Vazão de refluxo</i>	u_1
<i>Entrada - Vazão de vapor</i>	u_2
<i>Distúrbio - Vazão de alimentação</i>	d

Fonte: Traduzido de (WOOD; BERRY, 1973).

O modelo simplificado no domínio da frequência, para um determinado ponto de operação, é dado por (WOOD; BERRY, 1973):

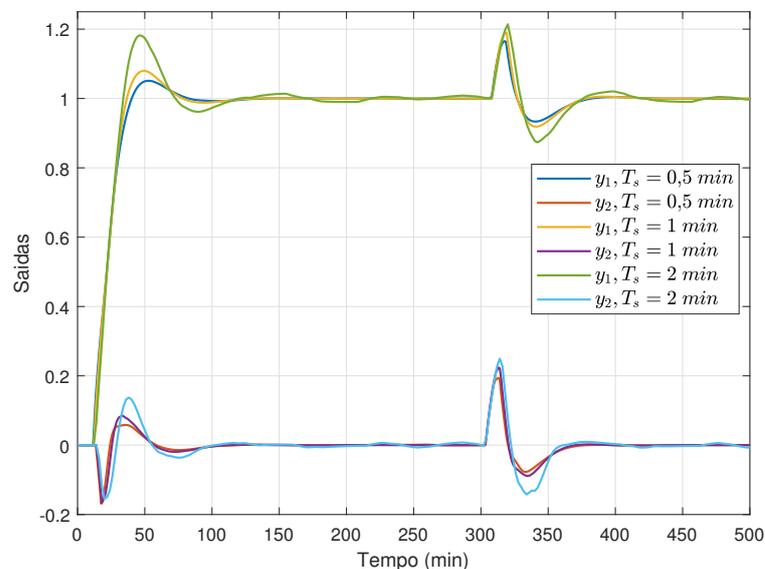
$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12,8e^{-1s}}{16,7s+1} & \frac{-18,9e^{-3s}}{21,0s+1} \\ \frac{6,6e^{-7s}}{10,9s+1} & \frac{-19,4e^{-3s}}{14,4s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3,8e^{-8,1s}}{14,9s+1} \\ \frac{4,9e^{-3,4s}}{13,2s+1} \end{bmatrix} d \quad (4.6)$$

Neste modelo as constantes de tempo e os tempos mortos são expressos em minutos. É considerado o controle PI centralizado, como um bom compromisso entre o rastreamento do sinal de referência e o desacoplamento entre as malhas de controle, dado por:

$$K_{WB} = \begin{bmatrix} \frac{0,0885s+0,0131}{s} & \frac{0,1016s+0,0146}{s} \\ \frac{0,0284s+0,0045}{s} & \frac{0,1039s+0,0099}{s} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Os períodos de amostragem foram escolhidos a partir da análise das respostas transitórias do sistema com controle periódico, apresentadas na Figura 4.15, sem considerar os efeitos da rede de comunicação de dados. Observa-se que para $T_s = 2 \text{ min}$, o comportamento oscilatório do sistema começa a ficar bastante acentuado, fato no qual adotou-se os períodos $T_s = 1 \text{ min}$, valor de referência, e $T_s = 0,5 \text{ min}$ para as análises subsequentes.

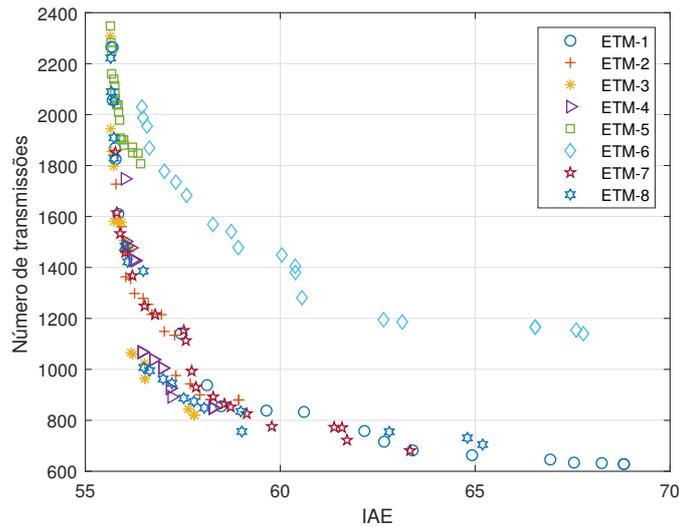
Figura 4.15 – Respostas transitórias das saídas do sistema com controle periódico sem atrasos de transmissão e perdas de pacote, $y(t_k)$, para $T_s = 0,5 \text{ min}$, $T_s = 1 \text{ min}$ e $T_s = 2 \text{ min}$, coluna de destilação Wood & Berry.



Fonte: Elaborado pelo Autor

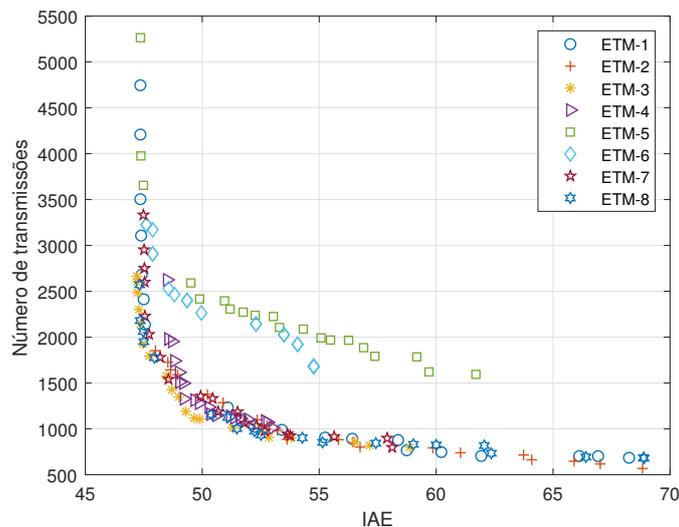
As Figuras 4.16 e 4.17 mostram as curvas candidatas a Pareto-ótima obtidas com cada um dos ETMs, para $T_s = 1 \text{ min}$ e $T_s = 0,5 \text{ min}$, respectivamente. Os limites máximos das variáveis de otimização, neste estudo de caso, foram ajustados de modo que os valores máximos do índice de desempenho IAE fossem menores que 70 para $T_s = 1 \text{ min}$.

Figura 4.16 – Curvas candidatas de Pareto para o exemplo da coluna de destilação Wood & Berry, caso $T_s = 1 \text{ min}$.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.17 – Curvas candidatas de Pareto para o exemplo da coluna de destilação Wood & Berry, caso $T_s = 0,5 \text{ min}$.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para $T_s = 0,5 \text{ min}$ o ETM-3 apresentou uma quantidade maior de soluções eficientes, já para $T_s = 1 \text{ min}$ os ETM-3, ETM-4 e ETM-8, todos baseados na integral do erro, resultaram, com certa alternância, em soluções mais eficientes. Os ETM-5 e ETM-6, por

outro lado, apresentaram as soluções que mais foram dominadas, em relação a todas as outras leis de transmissões.

Considerando o primeiro conjunto de análise sob a perspectiva do período de amostragem de referência, $T_s = 1 \text{ min}$, a Tabela 4.7 apresenta os resultados de algumas dessas soluções. Em cada um dos grupos ao menos seis soluções foram registradas, nas quais obtiveram ou um aumento da IAE em relação ao CTP de no máximo 1%, Grupo 1, ou uma economia mínima de transmissões a ser atingida definida em 63%, Grupo 2. Ainda considerando o conjunto total de soluções obtidas, a economia máxima chegou em 76,64%, embora acompanhada de um grande desvio da IAE, chegando a 29,36% maior quando comparado ao CTP. Nota-se, também, que em todo conjunto de dados no caso Wood & Berry não houve soluções, geradas pelos ETMs, cuja medida média da IAE resultasse em um valor menor daquele registrado no CTP.

Tabela 4.7 – Comparação entre diferentes soluções para o caso da coluna de destilação Wood & Berry, com $T_s = 1 \text{ min}$.

	IAE			N_t			N_{pl}	
	μ_1	σ_1	max	μ_2	σ_2	max	μ_3	σ_3
CTP	64,810	9,09	99,286	3.604,00	0,00	3.604	2.149,80	19,31
ETM-1 #6	65,302	9,18	99,595	1.829,35	93,32	2.112	968,60	58,40
ETM-2 #3	65,366	9,18	99,667	1.788,85	87,41	2.094	940,98	54,56
ETM-3 #4	65,162	9,19	99,485	2.029,41	89,05	2.307	1.051,68	59,27
ETM-4 #1	65,330	9,18	99,650	1.922,49	88,24	2.207	1.000,45	55,12
ETM-5 #12	65,407	9,21	99,759	2.188,79	76,42	2.424	1.206,76	47,60
ETM-7 #3	65,413	9,18	99,650	1.760,47	90,41	2.065	924,25	55,17
ETM-8 #5	65,157	9,19	99,561	2.031,22	91,21	2.293	1.063,97	58,32
ETM-1 #8	71,344	9,12	105,849	1.196,43	80,47	1.392	554,09	47,03
ETM-2 #14	69,875	9,20	103,332	1.266,13	89,03	1.515	603,54	52,51
ETM-3 #11	69,044	9,14	102,777	1.331,83	71,27	1.553	586,01	45,35
ETM-4 #8	68,997	9,08	102,690	1.310,56	73,69	1.487	602,51	46,56
ETM-7 #9	68,072	9,22	103,264	1.315,82	82,89	1.645	635,45	50,44
ETM-8 #9	69,674	9,10	102,207	1.282,71	75,68	1.571	568,32	46,12

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 4.8 mostra as mesmas leis de transmissões indicadas na Tabela 4.7. Mas agora, de modo percentual, se evidencia uma maior diferença da IAE entre os dois grupos. Ou seja, para alcançar um percentual de economia em N_t de no mínimo de 63%, conforme preconizado pela formação do Grupo 2, é necessário um aumento mínimo da IAE de 5,03%, coincidente ao ETM-7 #9. Por outro lado, ajustado um desvio máximo de 1% da IAE, o tráfego na rede de transmissão do ETM-7 #3 representou um quantidade total de 48,85%,

em relação ao CTP, sendo a menor dentro do Grupo 1. Soluções essas as escolhidas como as melhores de cada grupo. No Apêndice A são apresentados as médias μ_1 e μ_2 dos ETMs indicados para todas as N soluções obtidas.

Tabela 4.8 – Comparação percentual entre diferentes soluções para o caso da coluna de destilação Wood & Berry, com $T_s = 1 \text{ min}$.

GRUPO 1				GRUPO 2			
	IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)		IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)
ETM-1 #6	0,76%	50,76%	52,9%	ETM-1 #8	10,08%	33,20%	46,3%
ETM-2 #3	0,86%	49,64%	52,6%	ETM-2 #14	7,82%	35,13%	47,7%
ETM-3 #4	0,54%	56,31%	51,8%	ETM-3 #11	6,53%	36,95%	44,0%
ETM-4 #1	0,80%	53,34%	52,0%	ETM-4 #8	6,46%	36,36%	46,0%
ETM-5 #12	0,92%	60,73%	55,1%	ETM-7 #9	5,03%	36,51%	48,3%
ETM-7 #3	0,93%	48,85%	52,5%	ETM-8 #9	7,51%	35,59%	44,3%
ETM-8 #5	0,54%	56,36%	52,4%				

Fonte: Elaborada pelo autor

Ainda se observa na Tabela 4.7 o destaque das soluções que prevaleceram como dominantes em relação as outras. Assim, as soluções ETM-4 #1 e ETM-5 #12, no Grupo 1, foram dominadas por todas as outras de mesmo grupo. Do modo semelhante, no Grupo 2, apenas a solução ETM-3 #11 foi dominada por pelo menos uma outra solução, motivo esse que todas as outras soluções são concorrentes entre si.

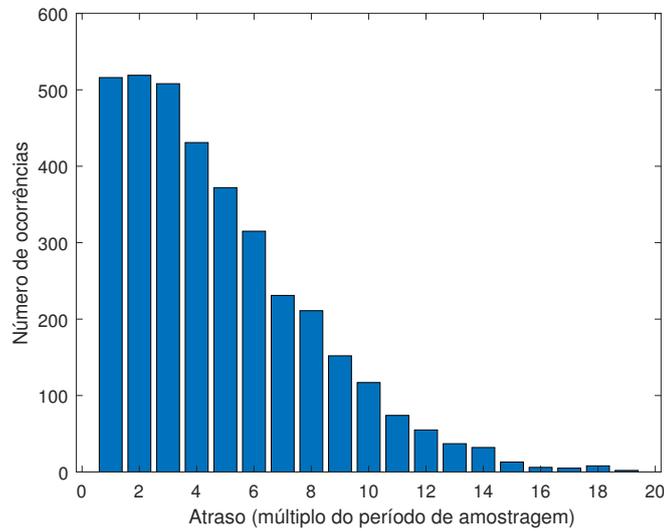
No que se refere as perdas por transmissão na rede, N_{pl} , observou-se uma pequena redução em seus valores percentuais com relação ao valor percentual do CTP. Considera-se para isso o fato de que no caso do sistema por transmissão periódica as perdas de transmissão representaram em média 59,65% da quantidade total de transmissões. Assim, houve uma redução nas perdas por transmissão no Grupo 1 e uma redução ainda maior no Grupo 2.

Diante dos registros expostos acima e de forma a comparar o sistema baseado no CTP e os baseados nas leis de transmissões disparadas por evento, as soluções com melhores desempenhos foram simuladas, conforme critérios estabelecidos. São considerados, para tal, os seguintes sinais de referência: $r_1(t) = U(t - 10)$, $r_2(t) = U(t - 600)$; e o sinal de distúrbio, na forma de pulso, $d(t) = 0,1[U(t - 300) - U(t - 310)]$, que ocorre entre os dois degraus dos sinais de referência, com tempo final de simulação definido em $T_{max} = 900 \text{ min}$.

A distribuição dos atrasos, em múltiplos inteiros do período de amostragem, para $T_s = 1 \text{ min}$ pode ser observado na Figura 4.18. Para esse caso, o valor máximo obtido está em torno de 20 instantes de amostragem. Conforme Equação (3.24), utilizou-se $\rho = 5,5$

para se chegar nessa limitação, além de uma estrutura da matriz ϕ equivalente ao modelo do processo.

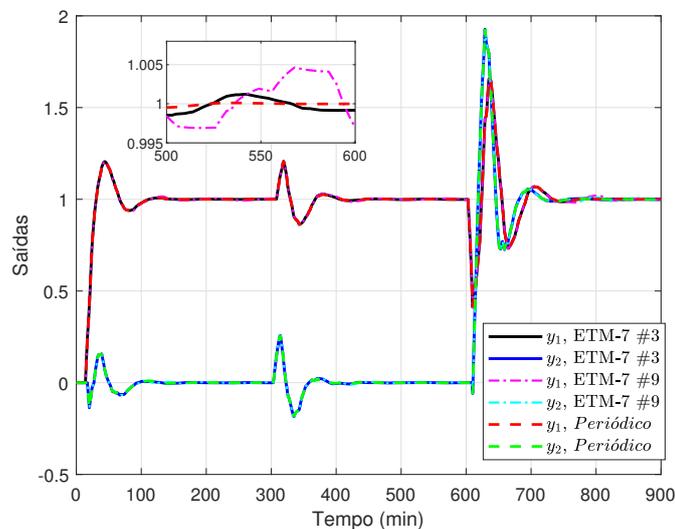
Figura 4.18 – Distribuição dos atrasos para o exemplo da coluna de destilação Wood & Berry, para $T_s = 1 \text{ min}$.



Fonte: Elaborada pelo autor

Inicialmente examinando o período de amostragem de referência, $T_s = 1 \text{ min}$, e tomando como melhor resultado a solução ETM-7 #3, do grupo 1, e ETM-7 #9, do grupo 2, observa-se na Figura 4.19 a comparação entre a resposta transitória do sistema com ETM e o CTP. A simulação apresentada corresponde à simulação Γ_{36} , pior caso (maior IAE) dentre as simulações realizadas.

Figura 4.19 – Respostas transitórias das saídas do sistema, $y(t_k)$, solução ETM-7 #3 e ETM-7 #9, para $T_s = 1 \text{ min}$, coluna de destilação Wood & Berry.



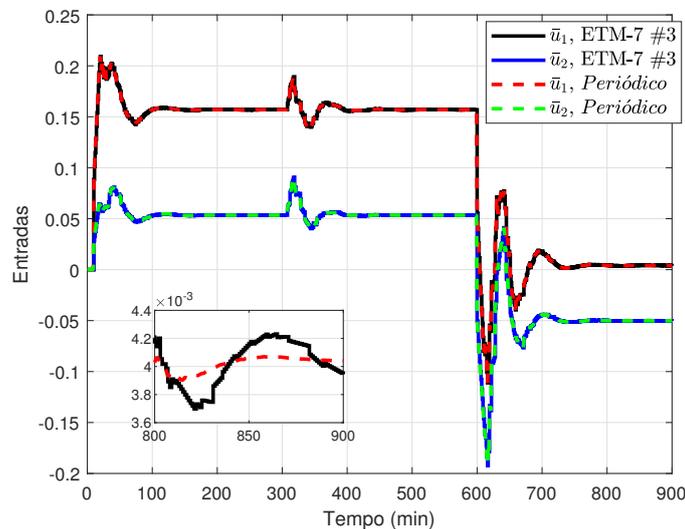
Fonte: Elaborada pelo autor

Nesse cenário, o ETM-7 #9, com o limiar $\delta = [0,5582 \ 0,5169 \ 0,6148 \ 0,9465 \ 0,8267 \ 0,9347 \ 0,4193 \ 0,0877] \times 10^{-3}$, apresentou um IAE máximo de 99,649. Mesmo assim, as oscilações em regime permanente estão na ordem da terceira casa decimal e a resposta apresenta uma evolução satisfatória considerando o modelo do processo. Da mesma forma, ainda na referida figura, é apresentado o pior caso da lei ETM-7 #3 para Γ_{36} e limiares $\delta = [0,1076 \ 0,0368 \ 0,0262 \ 0,1534 \ 0,2175 \ 0,5007 \ 0,0433 \ 0,0099] \times 10^{-3}$.

A Figura 4.20, por sua vez, apresenta o sinal correspondente as entradas manipuladas do sistema, \bar{u}_1 e \bar{u}_2 , da solução ETM-7 #3, observa-se o comportamento aproximado entre a lei de acionamento e o CTP. Nesta simulação os sinais de entrada para o CTP ainda não estabilizaram no intervalo de 800 *min* a 900 *min*.

Já a Figura 4.21 mostra o intervalo entre transmissões da mesma solução supracitada. A representação dos intervalos demonstram que os eventos ocorrem com bastante frequência em todo transitório do sistema, chegando a alcançar, em regime estacionário, o patamar de 40, 52, 26 e 28 intervalos sem transmissões em *Do sensor 1*, *Do Sensor 2*, *Para Atuador 1*, *Para Atuador 2*, respectivamente.

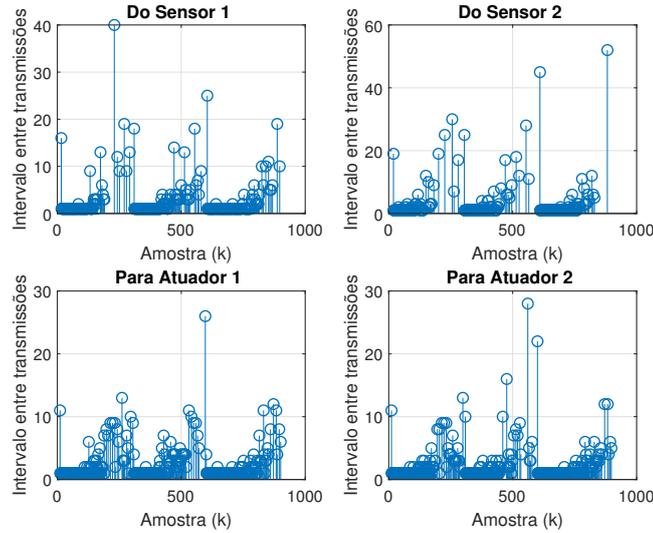
Figura 4.20 – Respostas transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}(t_k)$, solução ETM-7 #5, $T_s = 1 \text{ min}$, para a coluna de destilação Wood & Berry.



Fonte: Elaborada pelo autor

Adotando agora o segundo período de amostragem em estudo, metade em relação ao de referência, $T_s = 0,5 \text{ min}$, foram selecionados os Grupos 1 e 2, apresentados na Tabela 4.9. No Grupo 1, as soluções, em destaque, pertencentes ao ETM-1, ETM-3 e ETM-8, que dominaram as soluções dos ETM-5 e ETM-6. No grupo 2, as soluções ETM-3 e ETM-4 que se mostraram menos eficientes em relação a todas as outras do mesmo grupo. Importante

Figura 4.21 – Intervalos entre transmissões em número de amostragens, solução ETM-7 #3, $T_s = 1 \text{ min}$, para a coluna de destilação Wood & Berry.



Fonte: Elaborada pelo autor

salientar que as outras leis de transmissões, não expostas em tabela, foram omitidas por não atenderem os critérios pré-definidos, sejam eles: desvio máximo de 1% em relação à IAE do controlador periódico - Grupo 1 - e economia mínima no número de transmissões de 75% - Grupo 2.

Tabela 4.9 – Comparação entre diferentes soluções para a coluna de destilação Wood & Berry, com $T_s = 0,5 \text{ min}$.

	IAE			N_t			N_{pl}	
	μ_1	σ_1	max	μ_2	σ_2	max	μ_3	σ_3
Periódico	47,593	4,83	60,774	7.204,00	0,0	7.204	5.029,52	24,1
ETM-1#6	47,926	4,85	61,265	2.493,56	87,2	2.782	1.551,44	63,5
ETM-3 #4	47,980	4,84	60,716	2.400,39	79,1	2.638	1.384,25	59,5
ETM-5 #3	47,845	4,85	61,124	3.732,72	102,3	4.035	2.448,98	67,0
ETM-7 #4	47,886	4,85	61,254	2.689,07	96,1	2.983	1.671,14	65,6
ETM-8 #1	47,770	4,82	60,501	2.661,75	89,6	2.934	1.600,18	65,5
ETM-1#8	53,277	4,99	67,576	1.308,81	77,5	1.522	696,36	51,2
ETM-2 #3	49,762	4,85	62,931	1.717,23	87,1	1.923	987,22	62,1
ETM-3 #8	50,322	4,84	63,701	1.692,50	80,8	1.893	863,02	54,3
ETM-4 #5	50,312	4,83	63,564	1.749,22	79,3	1.988	939,72	54,1
ETM-7 #8	50,118	4,81	62,830	1.650,19	77,0	1.826	936,79	56,5
ETM-8 #6	54,480	4,87	66,376	1.275,67	69,2	1.438	601,18	43,7

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 4.10 apresenta o mesmo conjunto de soluções da Tabela 4.9. Agora, de forma percentual, nota-se características bem delimitadas em relação a cada grupo. No Grupo 1, identifica-se a solução ETM-3 #4 como a que obteve a menor quantidade de transmissões, equivalente a 33,32% do total do CTP. A solução ETM-5 #3 apesar de

apresentar uma menor economia dentre todas as outras, ainda apresenta uma economia de 48,19%.

Tabela 4.10 – Comparação percentual entre diferentes soluções para a coluna de destilação Wood & Berry, com $T_s = 0,5 \text{ min}$.

GRUPO 1				GRUPO 2			
	IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)		IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)
ETM-1 #6	0,70%	34,61%	62,22%	ETM-1 #8	11,94%	18,17%	53,21%
ETM-2 #4	0,81%	33,32%	57,67%	ETM-2 #3	4,56%	23,84%	57,49%
ETM-5 #3	0,53%	51,81%	65,61%	ETM-3 #8	5,73%	23,49%	50,99%
ETM-7 #4	0,61%	37,33%	62,15%	ETM-4 #5	5,71%	24,28%	53,72%
ETM-8 #1	0,37%	36,95%	60,12%	ETM-7 #8	5,31%	22,91%	56,77%
				ETM-8 #6	14,47%	17,71%	47,13%

Fonte: Elaborada pelo autor

Em relação ao Grupo 2, verifica-se que a solução ETM-2 #3 apresentou o menor IAE dentre aquelas pertencentes ao mesmo grupo. Além disso, muito embora a solução ETM-8 #6 apresente uma média maior da IAE(%) = 14,47%, essa solução possui a média menor que o máximo IAE encontrado no CTP.

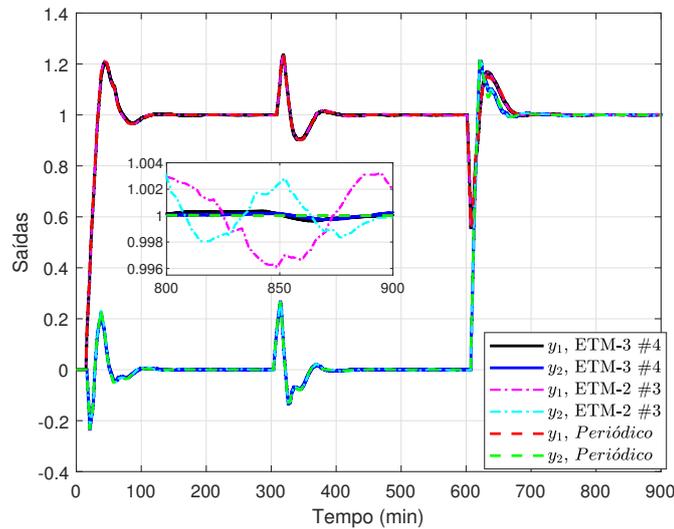
No Apêndice A são apresentados as médias μ_1 e μ_2 do ETM-2 e ETM-3, indicados como melhores de cada grupo, para todas as N soluções obtidas.

Ainda na Tabela 4.10, observa-se o percentual de perdas de transmissão para cada solução, N_{pl} (%), no qual, para efeito de comparação, o caso do CTP obteve um $N_{pl}(\%) = 69,82\%$. Nesse quesito, verifica-se uma menor quantidade de perdas para as soluções com menos transmissões (maior economia). Desse modo, a solução ETM-8 #1 - Grupo 2, além de apresentar o menor percentual de transmissões, apresenta uma menor quantidade de perdas com $N_{pl}(\%) = 47,13\%$. Por outro lado, a solução ETM-5 #3 - Grupo 1, cuja percentual de transmissões é a maior em relação ao sistema por transmissão periódica, apresenta o maior percentual de perdas, $N_{pl}(\%) = 65,61\%$.

De forma similar ao estudo do sistema com a amostragem de referência, as respostas transitórias para $T_s = 0,5 \text{ min}$ foram obtidas. A Figura 4.22 apresenta as respostas transitórias das saídas y_1 e y_2 do sistema pelo CTP, além das soluções ETM-3 #4, do Grupo 1, e ETM-2 #3, do Grupo 2. Os limiares de acionamento de cada lei são $\delta = [0,2206 \ 0,8765 \ 0,0342 \ 0,0213] \times 10^{-3}$, para o ETM-3 e $\delta = [0,2086 \ 0,3028 \ 0,0037 \ 0,0005] \times 10^{-5}$, referente ao ETM-2. As respostas obtidas foram a partir do pior caso, no conjunto de 100 simulações, todas representadas pela simulação Γ_{98} . Verifica-se na referida figura que as oscilações em regime permanente do ETM-2 #3 está na ordem de 10^{-3} enquanto

que na solução ETM-3 #4 as oscilações está na ordem 10^{-4} . Comparando as Figuras 4.19 e 4.22, novamente se observa uma melhoria nas respostas transitórias com a redução do período de amostragem, em especial no momento do degrau na referência r_2 .

Figura 4.22 – Respostas transitórias das saídas do sistema, $y(t_k)$, solução ETM-2 #3 e ETM-3 #4, $T_s = 0,5 \text{ min}$, para a coluna de destilação Wood & Berry.



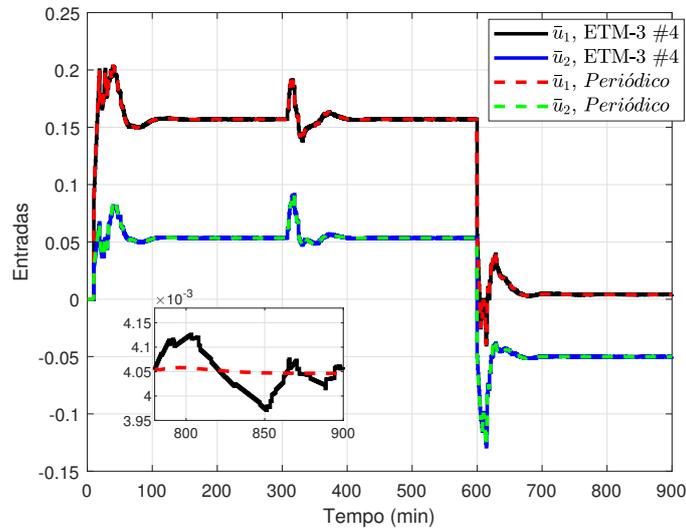
Fonte: Elaborada pelo autor

Em seguida, a Figura 4.23 mostra as entradas manipuladas \bar{u}_1 e \bar{u}_2 nas mesmas condições expostas para o ETM-3 #4. Observa-se uma boa reprodução do sinal de controle, mesmo considerando o pior caso da simulação. A Figura 4.24, por sua vez, apresenta os respectivos intervalos entre transmissões do ETM-3 #4. A quantidade máxima de instantes sem transmissões foi observada na conexão entre o segundo sensor e controlador, *Do Sensor 2*, atingindo a marca de 83 instantes. Já as outras conexões atingiram 32, 26 e 21 instantes sem transmissões em *Do Sensor 1*, *Para Atuador 1* e *Para Atuador 2*, respectivamente.

A distribuição dos atrasos, para $T_s = 0,5 \text{ min}$, observada ao longo de uma simulação está registrada na Figura 4.25, no qual os valores dos parâmetros definidos para $T_s = 1 \text{ min}$ foram mantidos, $\rho = 5.5$, conforme Equação (3.24). A distribuição normal apresenta desde 500 ocorrências de somente um atraso na transmissão até poucas dezenas de ocorrências para atrasos na transmissão superior a 25 períodos de amostragem, limitando-se, no entanto, a 45.

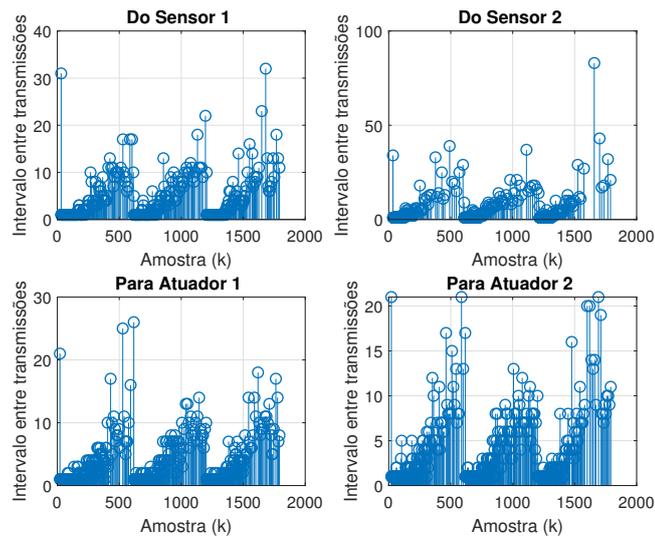
Considerando os dois cenários de períodos de amostragem estudados, a Figura 4.26 apresenta a comparação entre a curva Pareto-ótima para os ETMs que alcançaram os desempenhos determinados. Para $T_s = 0,5 \text{ min}$, o ETM-2 e ETM-3 configuraram entre os escolhidos e para $T_s = 1 \text{ min}$, o ETM-7 alcançou bons resultados. Além disso, vale

Figura 4.23 – Respostas transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}(t_k)$, solução ETM-3 #4, $T_s = 0,5 \text{ min}$, para a coluna de destilação Wood & Berry.



Fonte: Elaborada pelo autor

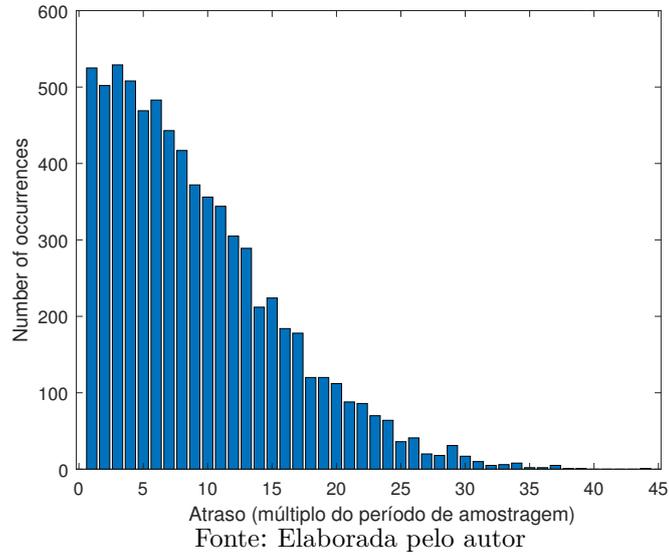
Figura 4.24 – Intervalos entre transmissões em número de amostragens, solução ETM-4 #4, $T_s = 0,5 \text{ min}$, para a coluna de destilação Wood & Berry.



Fonte: Elaborada pelo autor

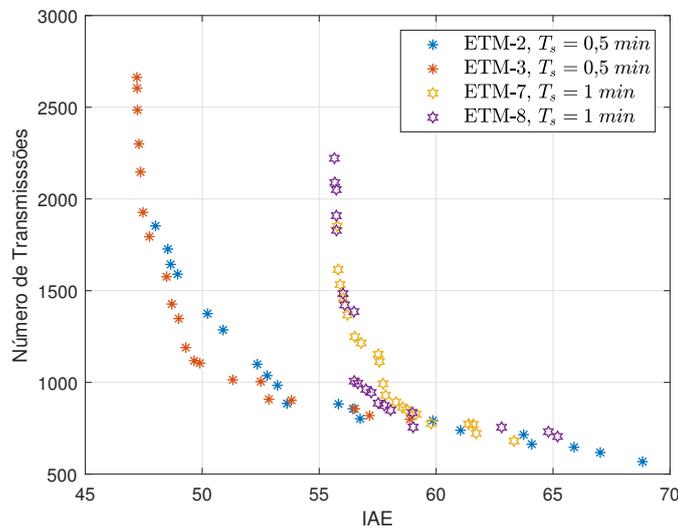
uma menção ao ETM-8 que, apesar de não ter sido a melhor nos quesitos pré-definidos, foi a única que se destacou em todas as tabelas, ou seja, as soluções registradas não foram dominadas por nenhuma outra. Ainda na Figura 4.26, observa-se que o ETM-3 prevaleceu com a maior quantidade de soluções eficientes quando $T_s = 0,5 \text{ min}$ e, do mesmo modo, o ETM-8 apresentou uma maior quantidade de soluções que dominaram o ETM-7, apesar desse último, na região com menor IAE, apresentar algumas soluções dominantes. Também neste estudo de caso é observado que, com o uso do ETM, pode se ter desempenho muito melhor, com mesmo número de transmissões, com a redução do

Figura 4.25 – Distribuição dos atrasos para o exemplo da coluna de destilação Wood & Berry, com $T_s = 0,5 \text{ min}$.



período de amostragem, como pode ser verificado na Figura 4.26. No caso do CTP, ao reduzir o período de amostragem o desempenho é melhorado ao custo de maior número de transmissões.

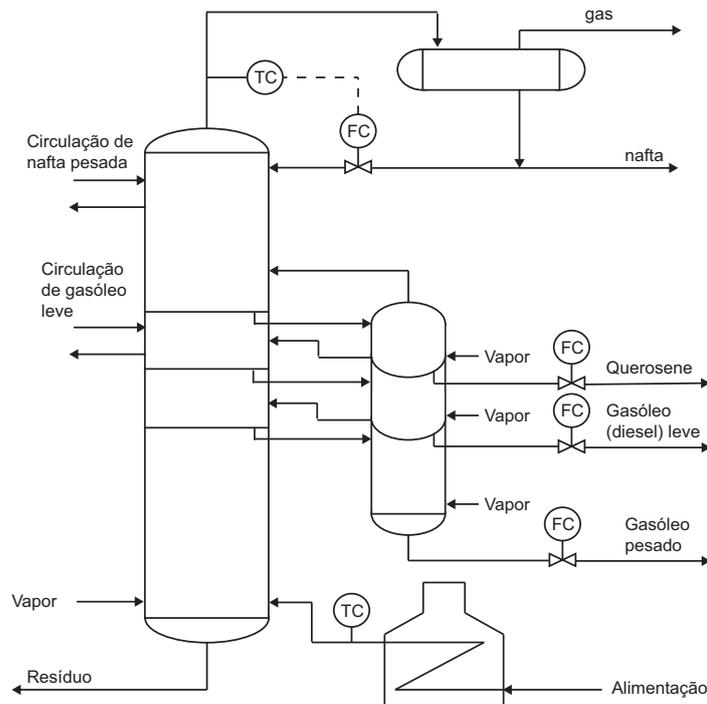
Figura 4.26 – Comparação entre as curvas candidatas de Pareto com relação ao período de amostragem para o exemplo da coluna de destilação Wood & Berry.



4.1.3 Estudo de caso: Coluna de Destilação de Petróleo Bruto

O terceiro estudo de caso representa um processo de destilação de petróleo bruto, apresentado na Figura 4.27 (MUSKE *et al.*, 1991).

Figura 4.27 – Diagrama de Fluxo simplificado de um processo de destilação de petróleo bruto.



O sistema é composto por cinco variáveis manipuladas e quatro saídas controladas, sendo que as três primeiras devem seguir os respectivos sinais de referência estabelecidos por sistemas de controle de nível hierárquico mais alto (controle de qualidade) ao passo que a última deve ser mantida em uma determinada faixa. As descrições das variáveis bem como sua identificação podem ser vistas na Tabela 4.11.

O modelo multivariável $P_{MYFT}(s)$ é dado pela seguinte matriz de transferência, que corresponde ao segundo modelo identificado em Muske *et al.* (1991):

Tabela 4.11 – Variáveis de Controle para o processo de destilação de petróleo bruto.

<i>Descrição da Variável</i>	<i>Símbolo</i>
Temperatura do topo da coluna	u_1
Vazão de Querosene	u_2
Vazão de Gasóleo Leve	u_3
Vazão de Gasóleo Pesado	u_4
Temperatura de Saída do Trocador de Calor	u_5
Temperatura do Ponto de corte do Nafta/Querosene	y_1
Temperatura do Ponto de corte do Querosene/Gasóleo Leve	y_2
Temperatura do Ponto de corte do Gasóleo Leve/Pesado	y_2
<i>Overflash</i>	y_4

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

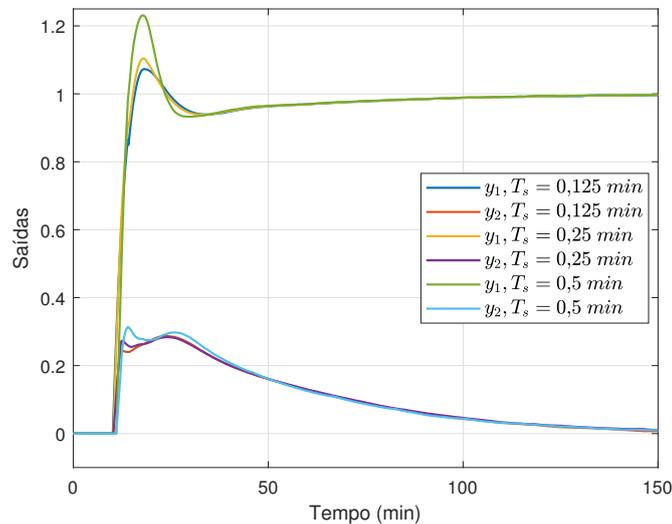
$$P_{MYGT}(s) = \begin{bmatrix} \frac{3,8(16s+1)}{140s^2+14s+1} & \frac{2,9e^{-6s}}{10s+1} & 0 & 0 \\ \frac{3,9(4,5s+1)}{96s^2+17s+1} & \frac{6,3}{20s+1} & 0 & 0 \\ \frac{3,8(0,8s+1)}{23s^2+13s+1} & \frac{6,1(12s+1)e^{-s}}{37s^2+34s+1} & \frac{3,4e^{-2s}}{6,9s+1} & 0 \\ \frac{-1,62(5,3s+1)e^{-s}}{13s^2+13s+1} & \frac{-1,5(3,1s+1)}{5,1s^2+7,1s+1} & \frac{-1,3(7,6s+1)}{4,7s^2+7,1s+1} & \frac{-0,6e^{-s}}{2s+1} \\ & & \frac{-0,73(-16s+1)e^{-4s}}{150s^2+20s+1} & \\ & & \frac{16se-2s}{(5s+1)(14s+1)} & \\ & & \frac{22se^{-2s}}{(5s+1)(10s+1)} & \\ & & \frac{0,32(-9,1s+1)e^{-s}}{12s^2+15s+1} & \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Considera-se o controlador PI esparsos $K(s)$ apresentado em Soares, Silva e Goncalves (2018), no qual a sua configuração, isto é, quais elementos são nulos e quais possuem um controlador PI, foi definida com base no arranjo de ganhos relativos. Os parâmetros do controlador PI foram obtidos por otimização para minimizar a norma \mathcal{H}_∞ da diferença entre o sistema em malha-fechada e um modelo de referência. O resultado desse projeto apresentou uma resposta mais rápida para a primeira saída do processo, um melhor desacoplamento das variáveis de saída, além da ausência de altos picos quando comparado a resposta apresentada em Shen, Sun e Xu (2014):

$$K(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.76997(s+0,05683)}{s} & \frac{-0.1611(s+0,08692)}{0,22801\frac{s}{s+0,08983}} & \frac{-0.096374(s+0,1504)}{s} \\ 0 & \frac{s}{0} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{0.24873(s+0,1662)}{s} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{-0,45818(s+0,2125)}{s} & 0 & 0 \\ & & \frac{-1,4678(s+0,1607)}{s} \\ & & \frac{0,023633\frac{s}{s+0,02884}}{s} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Considerando as respostas transitórias do sistema sem a presença de uma rede de comunicação, apresentadas na Figura 4.28, observa-se que, para o período de amostragem $T_s = 0,5 \text{ min}$, as respectivas saídas passam a ter uma oscilação acentuada. Por isso, os períodos de amostragem $T_s = 0,25 \text{ min}$, definido como período de referência, e $T_s = 0,125 \text{ min}$ foram os escolhidos para as análises subsequentes. O modelo do sistema $P(s)$ e o controlador $K(s)$ são discretizados considerando amostrador de ordem zero com os períodos de amostragem supracitados.

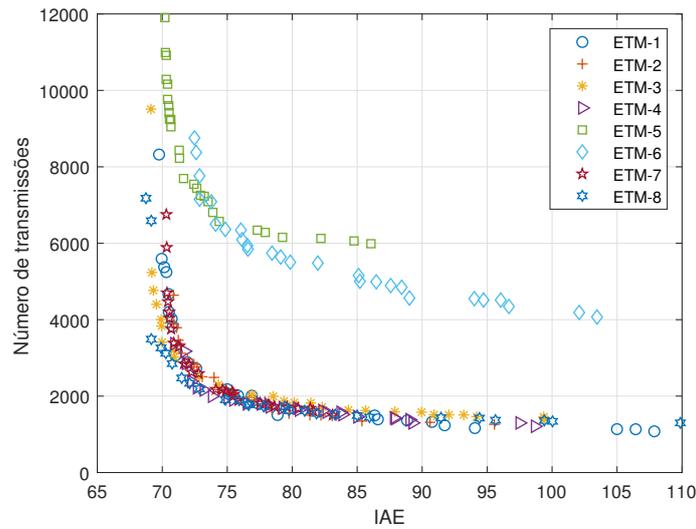
Figura 4.28 – Respostas transitórias das saídas do sistema sem atraso de transmissão, $y_1(t_k)$ e $y_2(t_k)$, para $T_s = 0,125 \text{ min}$, $T_s = 0,25 \text{ min}$ e $T_s = 0,5 \text{ min}$, processo de destilação de petróleo bruto.



Fonte: Elaborada pelo autor

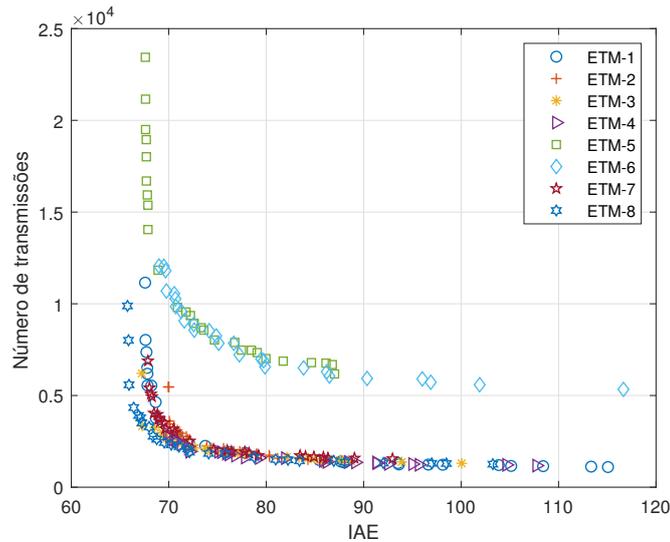
Considerando o sistema de controle via rede, as Figuras 4.29 e 4.30 apresentam as curvas candidatas a Pareto-ótima obtidas para cada uma das leis para $T_s = 0,25 \text{ min}$ e $T_s = 0,125 \text{ min}$, respectivamente. Os limites máximos das variáveis de otimização, neste terceiro estudo de caso, foram ajustados de modo que os valores máximos da IAE fossem menores que 110 para $T_s = 0,25 \text{ min}$.

Figura 4.29 – Curvas candidatas de Pareto para o processo de destilação de petróleo bruto, $T_s = 0,25 \text{ min}$.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.30 – Curvas candidatas de Pareto para o processo de destilação de petróleo bruto, $T_s = 0,125 \text{ min}$.



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 4.29, para $T_s = 0,25 \text{ min}$, o ETM-8 prevaleceu em quantidade de soluções eficientes, mas algumas soluções pertencentes ao ETM-4 e ETM-1 também podem ser vistas em uma região de dominância. Os ETM-5 e ETM-6, mais uma vez, apresentaram grande

disparidade em relação aos outros de modo que as curvas foram totalmente dominadas por quase todas as outras leis. Já na Figura 4.30, com $T_s = 0,125 \text{ min}$, tanto o ETM-3 quanto o ETM-8 apresentaram as maiores quantidades de soluções eficientes.

A Tabela 4.12 mostra os resultados das principais soluções considerando $T_s = 0,25 \text{ min}$. No Grupo 0, duas soluções corresponderam a uma IAE médio inferior ao CTP correspondente. No Grupo 1, cinco soluções obtiveram um aumento da IAE, em relação ao CTP, de no máximo 1%. De outro lado, no Grupo 2, foram registradas as soluções cuja economia mínima de transmissões foi de 89%. Ademais, no conjunto total de soluções obtidas, uma solução do ETM-8 alcançou uma economia de 95,5%, mas o respectivo indicador da IAE representou um desvio de 62% superior ao CTP. Ainda na referida tabela, somente as soluções da oitava lei de transmissão se destacaram como dominantes nos Grupos 0 e 1. No Grupo 2, por outro lado, as soluções ETM-3 e ETM-4 que se mostraram dominadas por todas as outras.

Tabela 4.12 – Comparação entre diferentes soluções para o processo de destilação de petróleo bruto, com $T_s = 0,25 \text{ min}$.

	IAE			N_t			N_{pl}	
	μ_1	σ_1	max	μ_2	σ_2	max	μ_3	σ_3
CTP	70,435	1,21	73,697	27.009,00	0,00	27.009	16.406,95	43,36
ETM-3 #1	70,280	1,37	73,941	9.694,93	159,46	10.075	4.919,70	101,28
ETM-8 #2	69,865	1,30	73,457	6.666,43	95,24	7.082	2.999,57	55,40
ETM-1 #4	71,016	1,23	74,619	5.345,58	105,21	5.682	2.320,25	46,11
ETM-3 #6	70,861	1,39	74,342	3.854,90	69,93	4.032	1.260,51	35,69
ETM-5 #5	71,057	1,22	74,290	10.331,80	147,22	10.732	5.452,11	73,46
ETM-7 #2	70,960	1,25	74,416	6.004,23	120,60	6.354	2.727,06	60,58
ETM-8 #3	70,841	1,26	74,350	3.650,68	68,62	3.861	1.268,99	36,58
ETM-1 #11	73,740	1,32	77,347	2.879,84	78,39	3.090	1.042,60	37,78
ETM-2 #8	73,612	1,36	77,036	2.936,79	68,13	3.093	1.071,21	34,04
ETM-3 #10	74,440	1,74	80,723	2.627,51	62,11	2.834	648,50	28,16
ETM-4 #3	73,613	1,44	77,342	2.969,03	63,31	3.110	922,30	29,36
ETM-7 #12	73,760	1,37	76,977	2.794,00	68,73	2.988	995,05	37,33
ETM-8 #7	74,142	1,42	78,184	2.570,65	58,99	2.754	755,59	28,42

Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Tabela 4.13 é apresentado o registro percentual das soluções ainda para $T_s = 0,25 \text{ min}$. No Grupo 1, a solução ETM-8 #3 atingiu a menor quantidade de transmissões, com cerca de 13,52% da quantidade total observada no CTP quando considerado o mesmo período de amostragem. De forma semelhante, o ETM-2 #8, no Grupo 2, teve o menor desvio da IAE quando comparado às soluções de mesmo grupo, com $\mu_1 = 73,612$.

Considerando o Grupo 0, o ETM-8 #2 além de apresentar, em média, uma menor IAE, com $\mu_1 = 69,865$, apresenta uma grande economia na quantidade de transmissões, chegando a representar 24,68% em relação ao CTP. As soluções supracitadas, portanto, foram as escolhidas para as próximas análises e simulações. Sendo que, no Apêndice A, são apresentados a média μ_1 e μ_2 , de todas as soluções obtidas do ETM-2 e ETM-8.

Tabela 4.13 – Comparação entre diferentes soluções para o processo de destilação de petróleo bruto, com $T_s = 0,25 \text{ min}$.

GRUPO 0				GRUPO 2			
	IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)		IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)
ETM-3 #1	-0,22%	35,90%	50,75%	ETM-1 #11	4,69%	10,66%	36,20%
ETM-8 #2	-0,81%	24,68%	45,00%	ETM-2 #8	4,50%	10,87%	36,48%
GRUPO 1				ETM-3 #10	5,69%	9,73%	24,68%
	IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)	ETM-4 #3	4,51%	10,99%	31,06%
ETM-1 #4	0,82%	19,79%	43,41%	ETM-7 #12	4,72%	10,34%	35,61%
ETM-3 #6	0,61%	14,27%	32,70%	ETM-8 #7	5,26%	9,52%	29,39%
ETM-5 #5	0,88%	38,25%	52,77%				
ETM-7 #2	0,75%	22,23%	45,42%				
ETM-8 #3	0,58%	13,52%	34,76%				

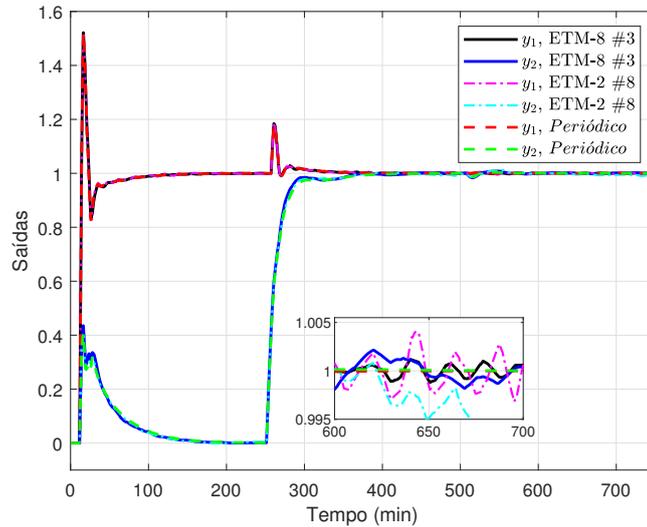
Fonte: Elaborado pelo Autor

Quanto as perdas por transmissão na rede, N_{pl} , a situação se repete ao observado no primeiro estudo de caso, ou seja, quanto menos transmissões na rede, menor a quantidade de perdas. No caso da simulação com transmissão periódica, as perdas na rede atingiu um valor de $N_{pl}(\%) = 60,75\%$. Ainda conforme Tabela 4.13, os casos de limites antagônicos, com máximo e mínimo, correspondem respectivamente a solução ETM-5 #5 com o maior percentual de perdas, equivalente a $N_{pl}(\%) = 52,77\%$ - Grupo 1 - e ETM-3 #10 com o menor percentual com $N_{pl}(\%) = 24,68\%$ - Grupo 2.

Considerando as soluções escolhidas após a verificação dos requisitos, utilizou-se para efeito de simulação três degraus, $r_1(t) = 1(t-10)$, $r_2(t) = 1(t-250)$ e $r_3(t) = 1(t-500)$, lembrando que a quarta saída é para ser mantida no ponto de operação. O tempo final de simulação foi definido em $T_{max} = 750 \text{ min}$. Dessa forma, as Figuras 4.31 e 4.32 mostram as respostas transitórias do sistema com CTP, bem como as soluções ETM-8 #3, do Grupo 1, com IAE máximo de 74,350 e limiares $\delta = [0,0006 \ 0,0417 \ 0,0046 \ 0,0078 \ 0,0007 \ 0,0025 \ 0,0013 \ 0,0084 \ 0,0038 \ 0,2107 \ 0,0632 \ 1,8497 \ 0,8075 \ 1,6713 \ 0,3183 \ 1,7946 \ 1,3496 \ 0,3879]$, e o ETM-2 #8, do Grupo 2 com uma IAE máximo de 77,036 e limiares $\delta = [0,0109 \ 0,8973 \ 0,0499 \ 0,5878 \ 0,0093 \ 0,0109 \ 0,0147 \ 0,5756 \ 0,0999] \times 10^{-4}$. O pior caso em todas as situações correspondem a simulação Γ_{42} . Observa-se na figura a paridade entre as respostas, além

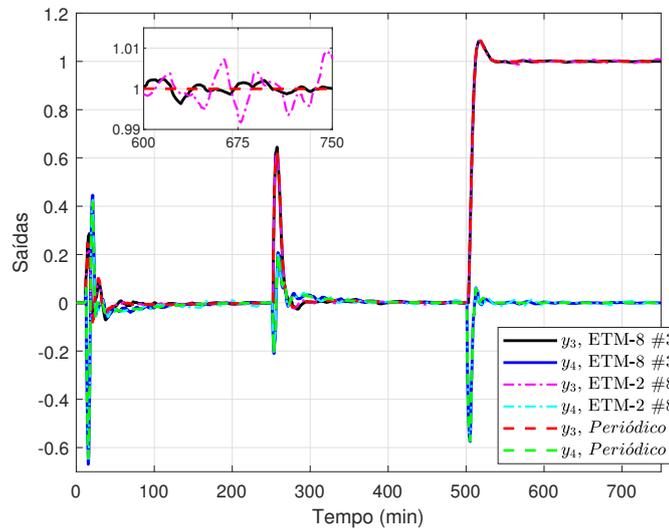
das oscilações em regime estacionário em torno do ponto de operação que, mais uma vez, se torna presente. As oscilações em regime permanente estão na ordem da terceira casa decimal.

Figura 4.31 – Respostas transitórias das saídas do sistema, $y_1(t_k)$ e $y_2(t_k)$, solução ETM-8 #3 e ETM-2 #8, $T_s = 0,25 \text{ min}$, para o processo de destilação de petróleo bruto.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.32 – Respostas transitórias das saídas do sistema, $y_3(t_k)$ e $y_4(t_k)$, solução ETM-8 #3 e ETM-2 #8, $T_s = 0,25 \text{ min}$, para o processo de destilação de petróleo bruto.

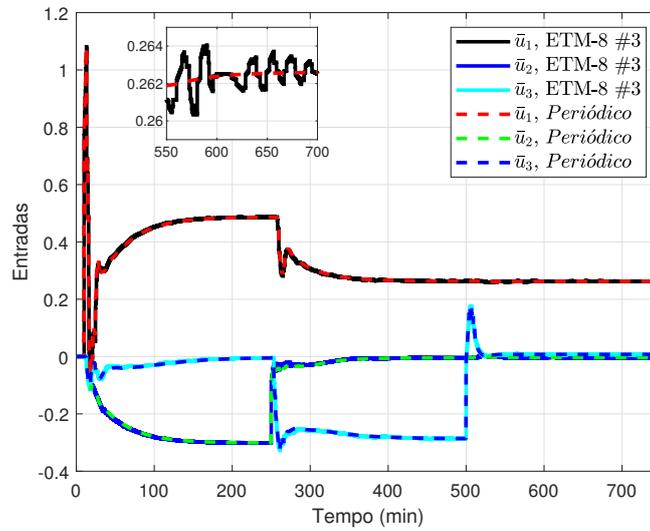


Fonte: Elaborada pelo autor

Os respectivos sinais, \bar{u}_1 , \bar{u}_2 , \bar{u}_3 , \bar{u}_4 e \bar{u}_5 , das entradas manipuladas do sistema (Solução ETM-8 #3) podem ser observados nas Figuras 4.33 e 4.34.

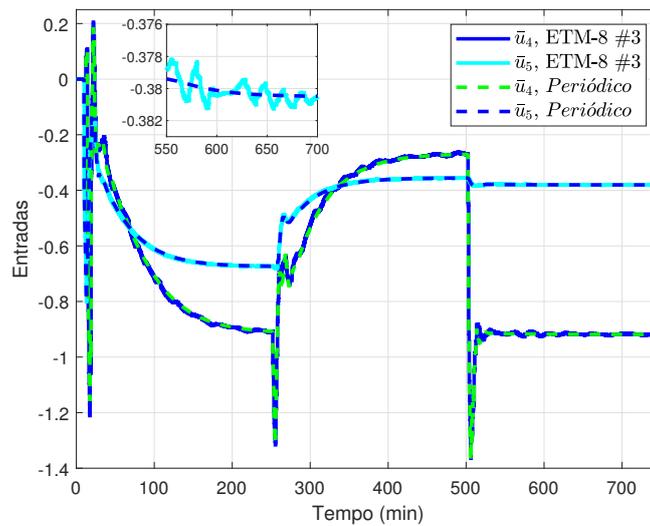
Os respectivos intervalos entre transmissões estão apresentados nas Figuras 4.35 e 4.36. Em *Do Sensor 2*, 256 instantes de amostragem ocorreram sem eventos no respectivo nó. Já a conexão entre o controlador e o primeiro atuador (*Para Atuador 1*), a quantidade

Figura 4.33 – Respostas transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}_1(t_k), \bar{u}_2(t_k)$ e $\bar{u}_3(t_k)$, solução ETM-8 #3, $T_s = 0,25 \text{ min}$, para o processo de destilação de petróleo bruto.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.34 – Respostas transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}_4(t_k)$ e $\bar{u}_5(t_k)$, solução ETM-8 #3, $T_s = 0,25 \text{ min}$, para o processo de destilação de petróleo bruto.



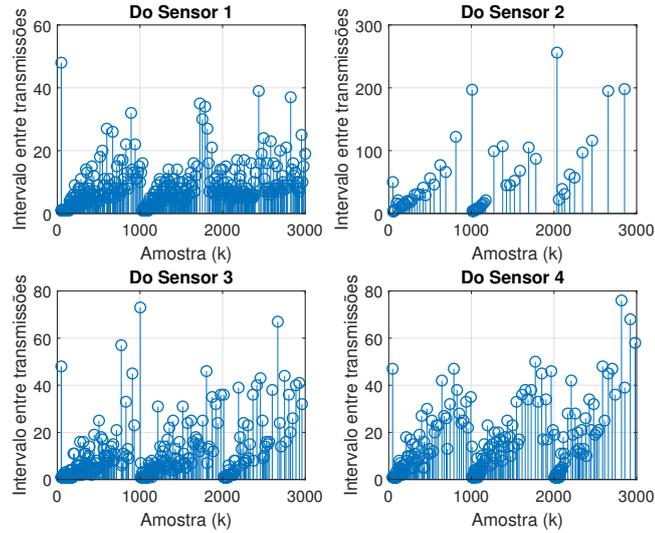
Fonte: Elaborada pelo autor

máxima de instantes sem eventos se limitou a 50. A Tabela 4.14 apresenta os valores máximos de intervalos entre eventos para todos os *links* entre sensores e controlador e controlador e atuadores.

Ainda considerando o período de amostragem de referência, $T_s = 0,25 \text{ min}$, a Figura 4.37 mostra a distribuição média dos atrasos considerando a simulação Γ_{42} . Nota-se que o máximo atraso na rede está em torno de 20, conforme planejado.

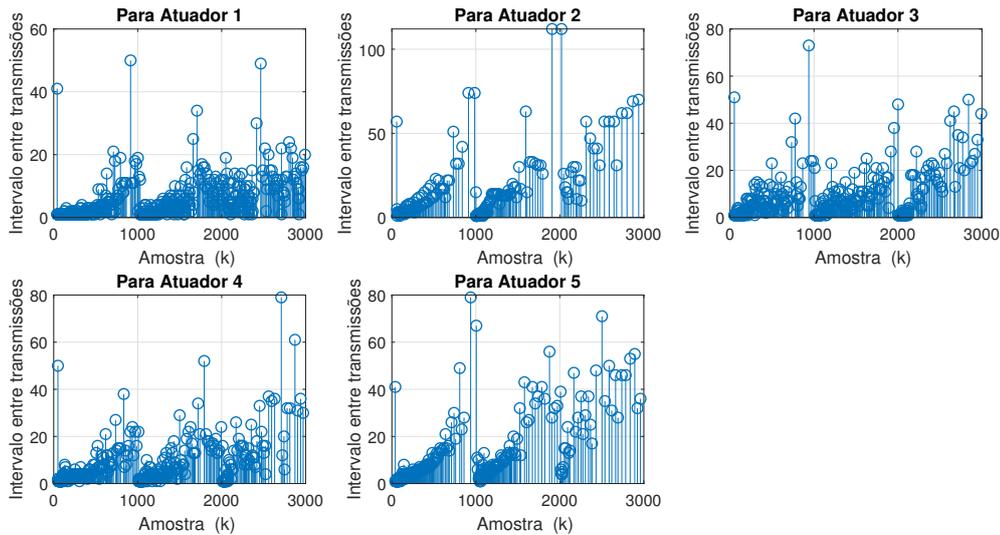
Posteriormente, partindo para o conjunto de soluções cujo período de amostragem é a metade do de referência, $T_s = 0,125 \text{ min}$, a Tabela 4.15 apresenta os resultados

Figura 4.35 – Intervalos entre transmissões em número de amostragens dos atuadores, solução ETM-8 #3, $T_s = 0,25 \text{ min}$, para o processo de destilação de petróleo bruto.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.36 – Intervalos entre transmissões em número de amostragens dos sensores, solução ETM-8 #3, $T_s = 0,25 \text{ min}$, para o processo de destilação de petróleo bruto.



Fonte: Elaborada pelo autor

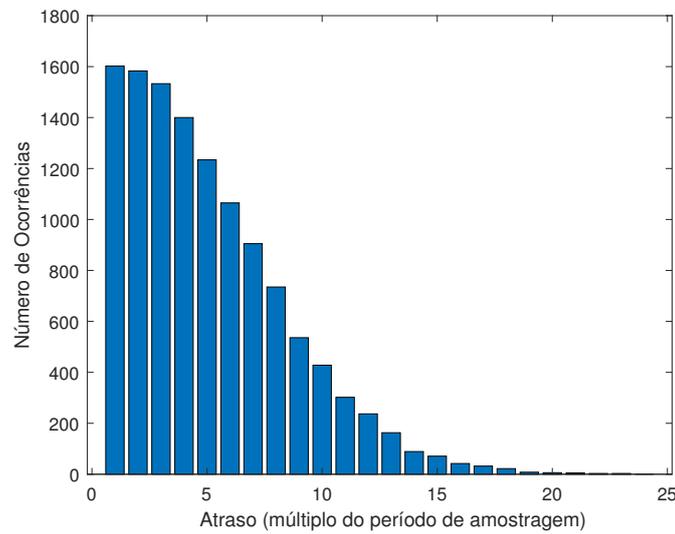
obtidos. No Grupo 0, três soluções registraram, em média, uma IAE menor que o sistema com transmissão periódica ($\mu_1 = 66,493$). Nos outros dois grupos, cinco e seis soluções atenderam aos requisitos definidos: desvio máximo de 1% em relação à IAE do caso CTP - Grupo 1; economia mínima no número de transmissões de 94% - Grupo 2. Importante salientar que os ETMs que não aparecem na tabela, foram omitidos por não atenderem aos critérios supramencionados. A maior economia alcançada foi obtida como uma solução do ETM-1, com 97,47% de redução no número de transmissões, embora também acompanhado pelo desvio de 104,06% da IAE. Além disso, as soluções dominantes foram colocadas em

Tabela 4.14 – Intervalo Máximo entre transmissões para ETM-8 #3 - $T_s = 0,25 \text{ min}$ - Processo de destilação de petróleo bruto.

<i>Conexão</i>	<i>Intervalo máximo</i>
<i>Do sensor 1</i>	48
<i>Do sensor 2</i>	256
<i>Do sensor 3</i>	73
<i>Do sensor 4</i>	76
<i>Para atuador 1</i>	50
<i>Para atuador 2</i>	112
<i>Para atuador 3</i>	73
<i>Para atuador 4</i>	79
<i>Para atuador 5</i>	79

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.37 – Distribuição dos atrasos para o processo de destilação de petróleo bruto, para $T_s = 0,25 \text{ min}$.



Fonte: Elaborada pelo autor

destaque: no Grupo 0, somente a solução relativa ao ETM-8; no Grupo 1, o ETM-3 e ETM-8; e referente ao Grupo 2 a solução do ETM-8.

Seguindo a metodologia de apresentação de resultados, a Tabela 4.10 mostra, de forma percentual, o conjunto de soluções da Tabela 4.9. De uma forma geral, todas as soluções listadas apresentam uma redução considerável no número de transmissões com pequeno aumento do índice de desempenho IAE, menos que 10% em relação ao CTP. No Grupo 0 a solução ETM-8 #3 apresentou uma menor IAE, em relação ao correspondente CTP, com uma redução de 0,12% e ainda com uma quantidade de transmissões que representa 10,51% da quantidade total observada também no CTP. No Grupo 1, por sua vez, a solução ETM-8 #4 além de possuir um erro da IAE(%) < 1%, apresentou uma menor quantidade de transmissões. Já no Grupo 2, a solução ETM-8 #9 obteve economia

Tabela 4.15 – Comparação entre diferentes soluções para o processo de destilação de petróleo bruto, com $T_s = 0,125 \text{ min}$.

	IAE			N_t			N_{pl}	
	μ_1	σ_1	max	μ_2	σ_2	max	μ_3	σ_3
Periódico	66,493	0,65	68,233	54.009,00	0,00	54.009	38.238,72	64,54
ETM-1 #1	66,447	0,67	68,387	11.089,87	158,56	11.511	6.321,27	82,96
ETM-5 #1	66,455	0,65	68,175	23.238,06	148,26	23.577	15.179,76	105,44
ETM-8 #3	66,417	0,82	68,231	5.675,92	83,89	5.912	2.697,28	48,62
ETM-1 #2	66,837	0,76	68,881	8.147,92	134,81	8.458	4.361,94	61,51
ETM-3 #1	66,755	0,86	68,853	6.147,54	78,68	6.375	2.714,43	38,45
ETM-5 #9	66,976	0,68	68,720	14.155,66	144,28	14.500	8.599,04	91,83
ETM-7 #1	67,066	0,69	68,938	6.982,86	106,84	7.313	3.518,00	57,77
ETM-8 #4	66,842	0,85	69,090	4.287,54	70,38	4.460	1.781,11	39,87
ETM-1 #10	71,889	0,96	74,144	2.976,63	65,80	3.169	1.197,47	36,44
ETM-2 #7	71,790	0,84	73,599	3.163,10	76,75	3.372	1.332,29	32,36
ETM-3 #4	69,599	1,18	72,273	3.023,10	71,17	3.294	800,00	32,58
ETM-4 #1	69,998	1,02	73,651	2.990,63	66,16	3.157	982,52	27,46
ETM-7 #12	70,325	0,89	72,412	3.242,83	68,14	3.437	1.388,32	37,34
ETM-8 #9	68,972	0,82	71,250	2.905,23	60,09	3.042	1.007,03	31,25

Fonte: Elaborado pelo Autor

superior a 94% e ainda menor desvio da IAE = 3,73%. A partir dessa análise, essas soluções foram elencadas como as melhores de cada grupo. No Apêndice A são apresentados a média μ_1 e μ_2 dos ETMs indicados como melhores dos grupos 1 e 2, para todas as N soluções obtidas.

Tabela 4.16 – Comparação entre diferentes soluções para o processo de destilação de petróleo bruto, com $T_s = 0,125 \text{ min}$.

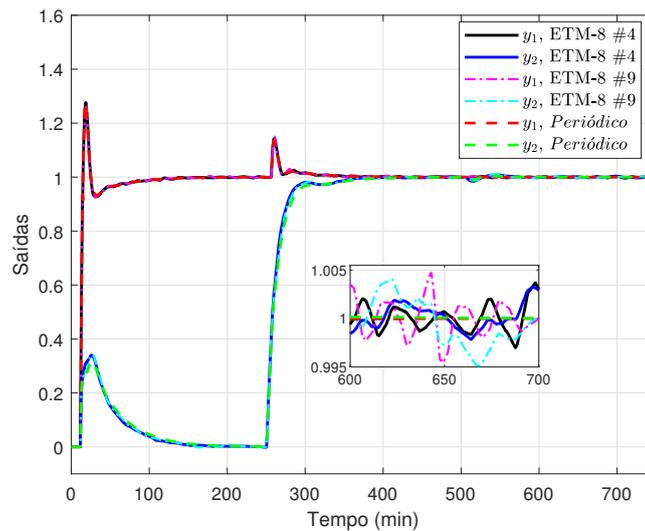
GRUPO 0				GRUPO 2			
	IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)		IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)
ETM-1 #1	-0,07%	20,53%	57,00%	ETM-1 #10	8,11%	5,51%	40,23%
ETM-5 #1	-0,06%	43,03%	65,32%	ETM-2 #7	7,97%	5,86%	42,12%
ETM-8 #3	-0,12%	10,51%	47,52%	ETM-3 #4	4,67%	5,60%	26,46%
GRUPO 1				ETM-4 #1	5,27%	5,54%	32,85%
	IAE (%)	N_t (%)	N_{pl} (%)	ETM-7 #12	5,76%	6,00%	42,81%
ETM-1 #2	0,52%	15,09%	53,53%	ETM-8 #9	3,73%	5,38%	34,66%
ETM-3 #1	0,39%	11,38%	44,15%				
ETM-5 #9	0,73%	26,21%	60,75%				
ETM-7 #1	0,86%	12,93%	50,38%				
ETM-8 #4	0,52%	7,94%	41,54%				

Fonte: Elaborado pelo Autor

Considerando as perdas por transmissão na rede, o CTP contabilizou uma média de perdas, N_{pl} , $\mu_3 = 70,80\%$. Com cerca de 26,46%, por outro lado, a solução ETM-3 #4 apresentou a menor quantidade de perdas percentual de todos.

Retomando as soluções consideradas as melhores de cada grupo, para $T_s = 0,125 \text{ min}$, e utilizando do mesmo modelo de simulação em relação ao período de amostragem de referência, a Figura 4.38 mostra as respostas transitórias do sistema CTP, bem como as soluções ETM-8 #4, do Grupo 1 com limiares $\delta = [0,0039 \ 0,0550 \ 0,0083 \ 0,0212 \ 0,0010 \ 0,0009 \ 0,0011 \ 0,0095 \ 0,0028 \ 1,9691 \ 0,2868 \ 1,8083 \ 1,8252 \ 1,4636 \ 0,9999 \ 1,2907 \ 1,1426 \ 1,0395]$, e o ETM-8 #9, do Grupo 2 cujo limiares de transmissão são $\delta = [0,0037 \ 0,0442 \ 0,0046 \ 0,0161 \ 0,0029 \ 0,0065 \ 0,0050 \ 0,0486 \ 0,0095 \ 1,4168 \ 0,7709 \ 1,1034 \ 1,4352 \ 1,7427 \ 1,4589 \ 1,9733 \ 1,7305 \ 1,2943]$. O pior caso, máximo IAE, em todas as situações correspondem a simulação Γ_{30} . A Figura 4.38 indica a proximidade entre as respostas de tal forma que não há diferenças significativas no modo de operação. As oscilações em regime permanente com a transmissão baseada em ETM, nesse caso, está na ordem de 10^{-3} .

Figura 4.38 – Respostas transitórias das saídas do sistema, $y(t_k)$, solução ETM-8 #4 e ETM-8 #9, $T_s = 0,125 \text{ min}$, para o processo de destilação de petróleo bruto.

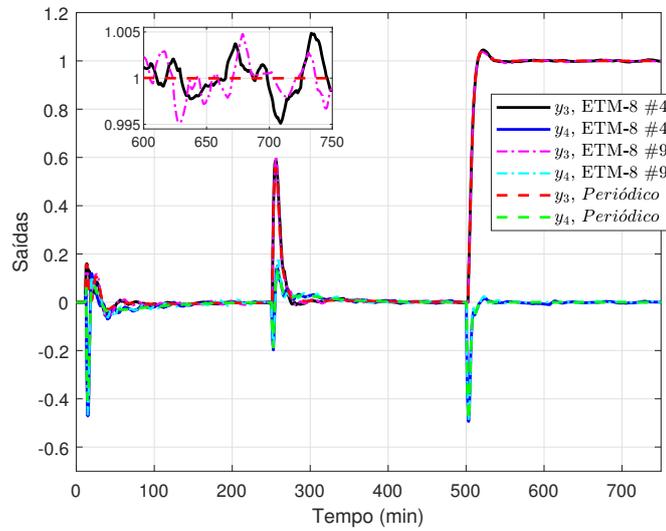


Fonte: Elaborada pelo autor

As Figuras 4.40 e 4.41 mostram as entradas manipuladas $\bar{u}(t_k)$ da simulação Γ_{30} do ETM-8 #4. Considerando o pior caso dentre o conjunto de 100 simulações é observado as oscilações nas variáveis de entrada com o uso do ETM que não ocorrem no CTP. Como as amplitudes destas oscilações são muito pequenas, a presença das mesmas só são observadas ampliando o gráfico na região.

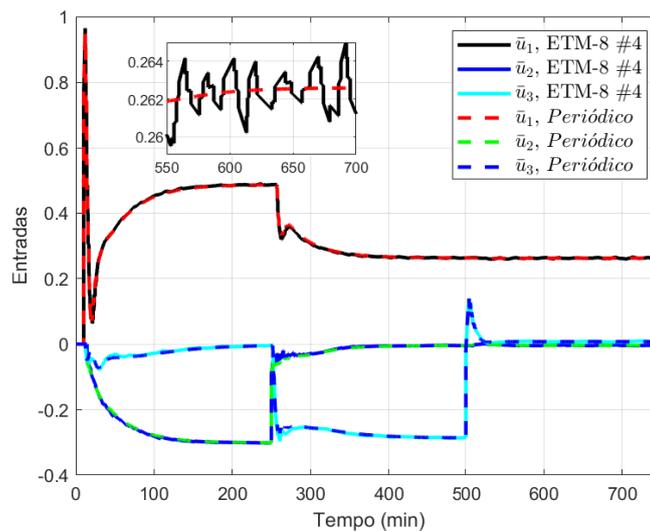
As Figuras 4.42 e 4.43 mostram os respectivos intervalos entre transmissões da simulação do ETM-8 #4 para as conexões entre sensores e controlador e controlador e atuadores, respectivamente. A Tabela 4.17, por sua vez, apresenta os maiores intervalos entre transmissões que ocorreram em cada *link*. Observa-se, por exemplo, que em *Do*

Figura 4.39 – Respostas transitórias das saídas do sistema, $y(t_k)$, solução ETM-8 #4 e ETM-8 #9, $T_s = 0,125 \text{ min}$, para o processo de destilação de petróleo bruto.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.40 – Respostas transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}_1(t_k)$, $\bar{u}_2(t_k)$ e $\bar{u}_3(t_k)$, solução ETM-8 #4, $T_s = 0,125 \text{ min}$, para o processo de destilação de petróleo bruto.

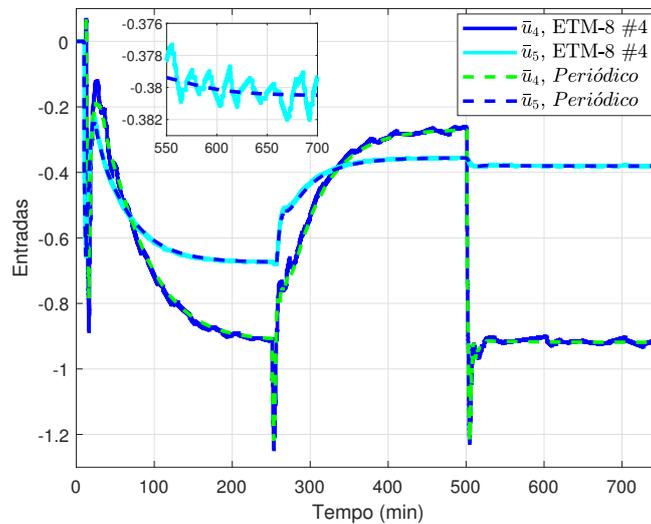


Fonte: Elaborada pelo autor

Sensor 2 foi registrado o maior intervalo com 551 instantes sem disparos de eventos. Essa situação pode ser observada na Figura 4.42 onde, inclusive, podem ser vistos vários intervalos espaçados entre si, denotando, portanto, a menor taxa de transmissão dentre todos os sensores.

Em relação a distribuição dos atrasos, a Figura 4.44 mostra graficamente a distribuição de probabilidade para $T_s = 0,125 \text{ min}$ em uma simulação. O número de ocorrências para pequenos atrasos são em torno de 1600, ao passo que para grandes atrasos, valores em torno de 45, poucas dezenas de ocorrências são registradas.

Figura 4.41 – Respostas transitórias das entradas do sistema, $\bar{u}_4(t_k)$ e $\bar{u}_5(t_k)$, solução ETM-8 #4, $T_s = 0,125 \text{ min}$, para o processo de destilação de petróleo bruto.



Fonte: Elaborada pelo autor

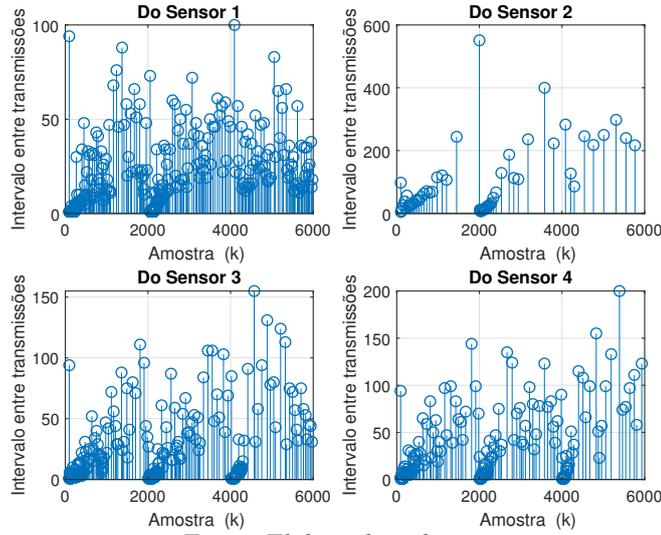
Tabela 4.17 – Intervalo Máximo entre transmissões para ETM-3 #4 - $T_s = 0,125 \text{ min}$ - Processo de destilação de petróleo bruto.

<i>Conexão</i>	<i>Intervalo máximo</i>
<i>Para atuador 1</i>	81
<i>Para atuador 2</i>	114
<i>Para atuador 3</i>	99
<i>Para atuador 4</i>	109
<i>Para atuador 5</i>	86
<i>Do sensor 1</i>	100
<i>Do sensor 2</i>	551
<i>Do sensor 3</i>	155
<i>Do sensor 4</i>	200

Fonte: Elaborada pelo autor

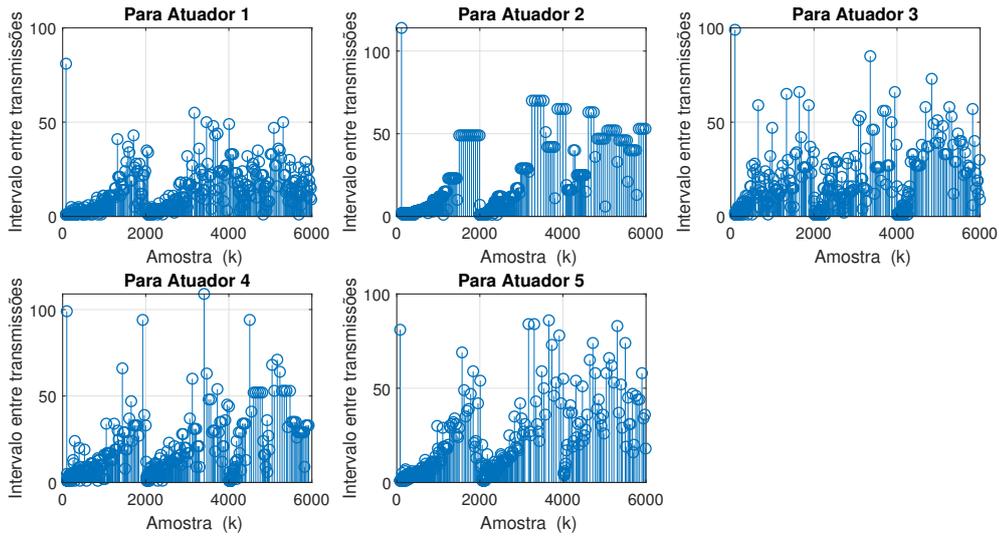
A fim de comparar as leis de transmissão que mais se destacaram conforme soluções apresentadas em seus respectivos períodos de amostragem, a Figura 4.45 apresenta a curva de Pareto-ótima tanto para o período de referência, $T_s = 0,25 \text{ min}$, com ETM-2 e ETM-8, quanto para $T_s = 0,125 \text{ min}$ com ETM-3 e ETM-8. Avalia-se que o ETM-8 se sobressai quanto a quantidade de soluções dominantes, principalmente na região de menores valores da IAE. No entanto, a partir de $IAE = 80$, por exemplo, as soluções começam a se intercalarem quanto a dominância entre as curvas. Vale a pena destacar que para uma IAE superior a 75, as soluções cujas curvas foram geradas a partir de períodos de amostragem diferentes começam a coexistirem, de modo que, ao contrário dos estudos de casos anteriores, a metade do período de amostragem, em relação ao de referência, não necessariamente reduz de maneira significativa a IAE. Nota-se, também, que para valores

Figura 4.42 – Intervalos entre transmissões em número de amostragens dos sensores, solução ETM-8 #4, $T_s = 0,125 \text{ min}$, para o processo de destilação de petróleo bruto.



Fonte: Elaborada pelo autor

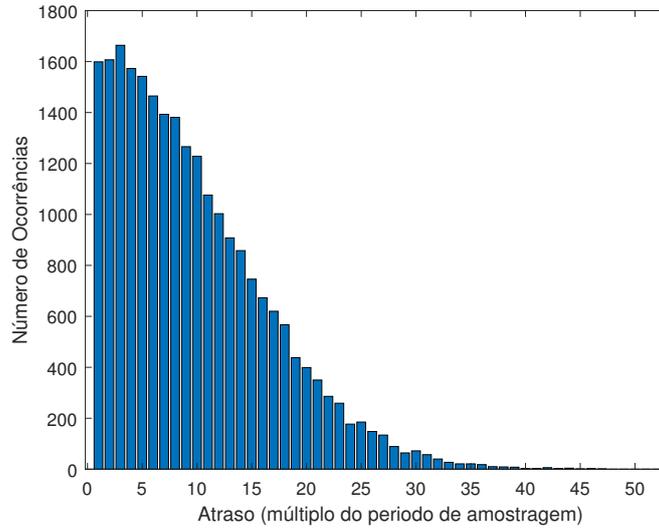
Figura 4.43 – Intervalos entre transmissões em número de amostragens dos atuadores, solução ETM-8 #4, $T_s = 0,125 \text{ min}$, para o processo de destilação de petróleo bruto.



Fonte: Elaborada pelo autor

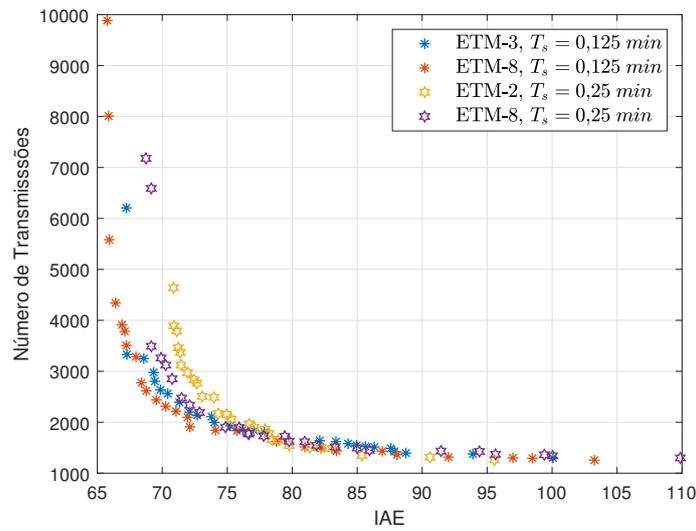
da IAE inferiores a 73, o N_t , para $T_s = 0,125 \text{ min}$, é relativamente menor comparando à IAE similar para o mesmo ETM e período de amostragem de referência, ao passo que para o caso do CTP a aludida redução dobra a quantidade de transmissões pela rede. Este fato é justificado em parte pelo número muito maior de perdas sendo que o número de transmissões efetivas do CTP para os dois períodos de amostragens não tem a mesma proporção de duas vezes.

Figura 4.44 – Distribuição dos atrasos para o processo de destilação de petróleo bruto, para $T_s = 0,125 \text{ min}$.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.45 – Comparação entre as curvas candidatas de Pareto com relação ao período de amostragem para o processo de Destilação de Petróleo Bruto.



Fonte: Elaborada pelo autor

4.2 Conclusões

Ao contrário da transmissão periódica, para transmissão baseada em ETM, com a redução do período de amostragem é possível obter uma melhor resposta transitória, com valores menores da IAE, simultaneamente com menor número de transmissões. Desse modo, é interessante reduzir o período de amostragem, se possível, dentro dos limites de hardware dos sensores, atuadores, controlador e rede de comunicação.

De forma geral, considerando os resultados das curvas de soluções candidatas a Pareto-ótimo, obtidas após o DEMO, os ETMs que apresentaram uma maior quantidade de soluções que dominaram as outras foram os ETM-3 e ETM-8, ambos baseados na integral do valor absoluto do erro. Sendo que o ETM-8 apresentou maior número de soluções eficientes na região mais próxima da solução utópica. Os ETM-5 e ETM-6, baseados somente no valor relativo do erro, de forma oposta, apresentaram as curvas com uma quantidade de soluções que mais foram dominadas por todos os demais ETMs.

Quando se considera a média das mesmas soluções, sob a perspectiva de conjunto de cem simulações, no qual também acrescentou critérios de seleção por grupos, é observada uma maior variabilidade quanto aos ETMs que se posicionaram como melhores ou com maior quantidade de soluções dominantes. Ocorrências essas consideradas aceitáveis, uma vez que, dentre os oito ETMs, com exceção do quinto e sexto, houve situações que em que pelo menos uma vez alguma solução prevaleceu como dominante em algum estudo de caso. Além disso, as soluções correspondentes aos ETM-1, ETM-2, ETM-3, ETM-7 e ETM-8 foram registradas em todos os estudos de casos como soluções dominantes.

Ainda considerando as condições mínimas de desempenho, a economia na quantidade de transmissões, para o período de amostragem de referência, chegou a 83,70%, 50,36% e 86,48%, para os estudos de caso 1, 2 e 3, respectivamente. Sendo que para o período de amostragem metade do de referência, a economia, ainda maior, atingiu cerca de 90,92%, 66,68% e 92,06% para os estudos de caso 1, 2 e 3, respectivamente. Ou seja, a redução do período de amostragem trouxe vantagens para o sistema de controle já que, além de acarretar uma maior economia na rede de comunicação de dados, reduziu as perdas por transmissão.

Como já mencionado, foi verificado que uma redução no período de amostragem reduz os valores N_t para valores similares de IAE nos sistemas com transmissão baseada

em ETM ao passo que para o caso do CTP a aludida redução dobra a quantidade de transmissões pela rede, enquanto seu desempenho não melhora de forma proporcional.

Quanto a resposta transitória de cada sistema, os resultados não foram tão discrepantes tendo em vista que os sinais, tanto das saídas quanto das entradas, se mostraram similares em relação ao correspondente controle por transmissão periódica, com sobressinal, tempo de subida e tempo de acomodação com a mesma ordem de grandeza. No entanto, considerando o regime estacionário do controle por transmissão por evento, observa-se uma oscilação em torno do valor de referência, situação essa inerente dos mecanismos de transmissão por evento baseados em erro absoluto, que foram os avaliados neste trabalho por razão dos melhores desempenhos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Nesta dissertação abordou-se o problema de sistemas de controle via rede de comunicação. O estudo procurou apresentar alternativas à implementação do sistema de controle via rede convencional, no qual a transmissão de sinais entre sensores/controladores e controladores/atuadores é realizada de forma periódica. Nas implementações com transmissão baseada em mecanismos de acionamento por eventos, considera-se a transmissão somente após a diferença em módulo, ou ao quadrado, entre o sinal no instante de amostragem atual e seu último valor transmitido ultrapasse determinado valor limite, limiar de disparo do evento, de modo a tornar eficiente o uso da rede ao custo, a princípio, de um pior desempenho do sistema de controle. Além disso, no que tange a estrutura dos sensores, atuadores e do controlador, considera-se que sejam inteligentes de forma que tenham a capacidade de implementar, localmente e individualmente, os mecanismos de disparo por evento e seleção da mensagem mais atual.

No Capítulo 3 é apresentada a modelagem do sistema de controle via rede considerado neste trabalho. Além disso, são apresentadas diferentes formas de mecanismos de acionamento por eventos para controle da transmissão de sinais entre os componentes do sistema na forma descentralizada, sendo o problema de ajuste dos mecanismos de disparo por evento formulado como um problema de otimização multi-objetivo. Ademais, também são propostas as funções objetivo para obtenção de um compromisso entre uso da rede e o desempenho do sistema de controle, bem como é realizado o cálculo das funções objetivo através da simulação do sistema de controle via rede, onde são considerados os atrasos aleatórios e as perdas de pacotes. É proposto usar o método evolução diferencial para problemas multi-objetivo e ainda é proposto um aperfeiçoamento no método, incluindo um mecanismo de elitismo adicional da primeira fronteira, para evitar que as soluções eficientes finais fossem dominadas por soluções descartadas em gerações anteriores.

No Capítulo 4 o método proposto de ajuste dos mecanismos de acionamento por evento foi avaliado para três estudos de caso com o intuito de validar a sua eficiência. Para os três estudos de casos verificou-se que o método proposto oferece um conjunto de soluções eficientes com diferentes compromissos entre os dois objetivos. Além disso, por meio do método proposto para ajustar os mecanismos de transmissão disparados

por eventos, comparamos oito esquemas diferentes considerando os três estudos de caso, sendo dois casos com quatro sensores/atuadores e um caso com nove sensores/atuadores. Por conseguinte, verificou-se que, considerando os três estudos de caso e os critérios de desempenho, o ETM com base na combinação de erro absoluto e integral do erro absoluto resulta, na maioria das vezes, em melhor desempenho com menos transmissões em comparação com as outras opções estudadas ou ainda melhor do que o tradicional sistema de controle por transmissão periódica.

5.2 Trabalhos Futuros

A análise e síntese de sistemas de controle via rede é um campo de pesquisa bastante amplo e complexo e ainda há muito a ser estudado e desenvolvido. Nesse sentido, as seguintes propostas de trabalhos futuros podem ser consideradas:

- **Problema de co-design:** um campo de pesquisa futuro para aplicar o método proposto é considerar o *co-design* onde os parâmetros do controlador também são otimizados junto com os parâmetros dos mecanismos acionados por eventos. Espera-se que atinja melhor desempenho de controle, uma vez que o ajuste do controlador considerará o efeito da rede e das transmissões não-periódicas ao passo que, adicionar mais variáveis de otimização aumentará a complexidade do problema e o custo computacional para resolvê-lo.
- **Modelagem de incertezas:** neste trabalho foram considerados sistemas lineares invariantes no tempo precisamente conhecidos. O método proposto pode ser estendido para tratar sistemas incertos, utilizando estratégias iterativas de síntese e análise, porém, no momento, o custo computacional poderia ser inviável.
- **Inclusão de outros fatores relevantes na simulação do controle via rede:** incluir na simulação, por exemplo, o efeito de ruídos de medição, erros de discretização na conversão analógico/digital (ligado ao número de bits da representação binária dos sinais medidos), adoção de períodos de amostragens diferentes para cada nó da rede e variação da distribuição de probabilidade dos atrasos durante a simulação.
- **Prova de estabilidade:** desenvolver uma condição de estabilidade considerando o modelo de controle via rede considerado neste trabalho, considerando as transmissões por evento, o problema de perda de pacotes e atrasos aleatórios.

- **Utilizar métodos de otimização diferentes:** neste trabalho foi utilizado para o cálculo dos limiares dos eventos o métodos DEMO com uma modificação na técnica de seleção para obtenção da fronteira de Pareto-ótimo. Uma comparação entre diferentes métodos de otimização por população pode ser realizada, como exemplo, tem-se o enxame de partículas (PSO, do inglês *Particle Swarm Optimization*) e o algoritmo colônia de abelhas artificiais (ABC, do inglês *Artificial Bee Colony*), ambos baseados no comportamento social dos animais.

5.3 Trabalhos Publicados em Eventos Científicos e Periódicos

Os seguintes trabalhos foram publicados a partir dos estudos desenvolvidos nesta dissertação:

GONÇALVES, E. N.; BELO, M. A. R.; BATISTA, A. P. Self-adaptive multi-objective differential evolution algorithm with first front elitism for optimizing network usage in networked control systems. **Applied Soft Computing**, 2021. ISSN 1568-4946, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108112>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1568494621009972>>.

BELO, M. A. R.; BATISTA, A. P.; GONÇALVES, E. N. Minimização do número de transmissões em controle discreto com amostragem por evento. **Congresso Brasileiro de Automática**, 2020. DOI: 10.48011/asba.v2i1.1470. Disponível em: <https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sba/issue/view/13>.

REFERÊNCIAS

- ÅRZÉN, K.-E. A simple event-based PID controller. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 32, n. 2, p. 8687–8692, jul. 1999. ISSN 14746670. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474667017574820>. Citado na página 25.
- ÅSTRÖM, K. J.; BERNHARDSSON, B. Comparison of periodic and event based sampling for first-order stochastic systems. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 32, n. 2, p. 5006–5011, jul. 1999. ISSN 14746670. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474667017568524>. Citado na página 25.
- BAILLIEUL, J.; ANTSAKLIS, P. J. Control and Communication Challenges in Networked Real-Time Systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 1, p. 9–28, jan. 2007. ISSN 0018-9219. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4118454/>. Citado na página 20.
- BORGERS, D. P. N.; HEEMELS, W. P. M. H. M. Event-separation properties of event-triggered control systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 59, n. 10, p. 2644–2656, OCTOBER 2014. Citado na página 21.
- CAMLIBEL, M.; SCHUMACHER, J. On the zeno behavior of linear complementarity systems. In: **Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.01CH37228)**. [S.l.: s.n.], 2001. v. 1, p. 346–351 vol.1. Citado na página 33.
- CHANKONG, V.; HAIMES, Y. Y. **Multiobjective decision making: theory and methodology**. [S.l.]: Courier Dover Publications, 2008. Citado na página 37.
- COUTINHO, P. H. S.; PALHARES, R. M. Dynamic periodic event-triggered gain-scheduling control co-design for quasi-LPV systems. **Nonlinear Analysis: Hybrid Systems**, v. 41, p. 101044, ago. 2021. ISSN 1751570X. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751570X21000340>. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 29.
- DAS, S.; SUGANTHAN, P. N. Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 15, n. 1, p. 4–31, fev. 2011. ISSN 1089-778X, 1941-0026. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5601760/>. Citado na página 43.
- DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182–197, abr. 2002. ISSN 1089778X. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/996017/>. Citado 4 vezes nas páginas 35, 38, 44 e 45.
- DOLK, V. S.; BORGERS, D. P.; HEEMELS, W. P. M. H. Output-Based and Decentralized Dynamic Event-Triggered Control With Guaranteed \mathcal{L}_p -Gain Performance and Zeno-Freeness. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 62, n. 1, p. 34–49, jan. 2017. ISSN 0018-9286, 1558-2523. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7422711/>. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 28 e 29.

DONKERS, M.; HEEMELS, W. Output-Based Event-Triggered Control with Guaranteed \mathcal{L}_∞ – Gain and Improved event-triggering. In: **49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)**. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2010. p. 3246–3251. ISBN 978-1-4244-7745-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5718032/>>. Citado na página 34.

DONKERS, M.; HEEMELS, W.; BERNARDINI, D.; BEMPORAD, A.; SHNEER, V. Stability analysis of stochastic networked control systems. **Automatica**, v. 48, n. 5, p. 917–925, maio 2012. ISSN 00051098. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0005109812000805>>. Citado na página 28.

DONKERS, M. C. F.; HEEMELS, W. P. M. H. Output-based and event-triggered control with guaranteed \mathcal{L}_p – gain and improved and decentralized event-triggering. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 57, n. 6, p. 1362–1376, jun. 2012. ISSN 0018-9286, 1558-2523. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6069816/>>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.

DORF, R.; FARREN, M.; PHILLIPS, C. Adaptive sampling frequency for sampled-data control systems. **IRE Transactions on Automatic Control**, IEEE, v. 7, n. 1, p. 38–47, January 1962. Citado na página 25.

FU, A.; MCCANN, J. A. Dynamic Decentralized Periodic Event-Triggered Control for Wireless Cyber–Physical Systems. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 29, n. 4, p. 1783–1790, jul. 2021. ISSN 1063-6536, 1558-0865, 2374-0159. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9173567/>>. Citado na página 29.

FUNK, N.; BAUMANN, D.; BERENZ, V.; TRIMPE, S. Learning event-triggered control from data through joint optimization. **IFAC Journal of Systems and Control**, p. 100144, fev. 2021. ISSN 24686018. ArXiv: 2008.04712. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/2008.04712>>. Citado na página 25.

GIRARD, A. Dynamic Triggering Mechanisms for Event-Triggered Control. **arXiv:1301.2182 [cs, math]**, set. 2014. ArXiv: 1301.2182. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1301.2182>>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.

GIRARD, A. Dynamic triggering mechanisms for event-triggered control. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 60, n. 7, p. 1992–1997, 2015. Citado na página 33.

GROFF, L. B.; MOREIRA, L. G.; SILVA, J. M. G. da. Event-triggered control co-design for discrete-time systems subject to actuator saturation. In: **2016 IEEE Conference on Computer Aided Control System Design (CACSD)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1452–1457. Citado na página 29.

GU, Z.; YUE, D.; LIU, J.; DING, Z. \mathcal{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, maio 2017. ISSN 00160032. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016003217300935>>. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 29.

GUAN, Y.; HAN, Q.-L.; GE, X. On asynchronous event-triggered control of decentralized networked systems. **Information Sciences**, v. 425, p. 127–139, jan. 2018. ISSN 00200255. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020025517310125>>. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 28 e 29.

- HEEMELS, W. H.; DONKERS, M.; TEEL, A. R. Periodic event-triggered control for linear systems. **IEEE Transactions on automatic control**, IEEE, v. 58, n. 4, p. 847–861, 2012. Citado na página 33.
- HEEMELS, W. P. M. H.; DONKERS, M. C. F.; TEEL, A. R. Periodic Event-Triggered Control for Linear Systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 58, n. 4, p. 847–861, abr. 2013. ISSN 0018-9286, 1558-2523. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6310015/>>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.
- HEEMELS, W. P. M. H.; TEEL, A. R.; WOUW, N. van de; 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, ago. 2010. ISSN 0018-9286, 1558-2523. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5409530/>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 28.
- HU, S.; ZHANG, Y.; DU, Z. Network-based \mathcal{H}_∞ tracking control with event-triggering sampling scheme. **IET Control Theory & Applications**, v. 6, n. 4, p. 533–544, 2012. Citado na página 21.
- JOHANSSON, K. The quadruple-tank process: a multivariable laboratory process with an adjustable zero. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 8, n. 3, p. 456–465, maio 2000. ISSN 10636536. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/845876/>>. Citado 3 vezes nas páginas 48, 50 e 51.
- KARTAKIS, S.; FU, A.; MAZO, M.; MCCANN, J. A. Communication Schemes for Centralized and Decentralized Event-Triggered Control Systems. p. 14, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 28 e 29.
- LI, F.; FU, J.; DU, D. An improved event-triggered communication mechanism and \mathcal{L}_∞ control co-design for network control systems. **Information Sciences**, v. 370-371, p. 743–762, nov. 2016. ISSN 00200255. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020025516300093>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- LIAN, F.-L.; MOYNE, J.; TILBURY, D. Network design consideration for distributed control systems. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 10, n. 2, p. 297–307, mar. 2002. ISSN 1063-6536, 1558-0865. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/987076/>>. Citado na página 25.
- LIU, D.; YANG, G.-H.; ER, M. J. Event-Triggered Control for T-S Fuzzy Systems Under Asynchronous Network Communications. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 28, n. 2, p. 390–399, fev. 2020. ISSN 1063-6706, 1941-0034. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8675473/>>. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 28 e 29.
- LUO, B.; HUANG, T.; LIU, D. Periodic Event-Triggered Suboptimal Control With Sampling Period and Performance Analysis. **IEEE Transactions on Cybernetics**, v. 51, n. 3, p. 1253–1261, mar. 2021. ISSN 2168-2267, 2168-2275. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8695763/>>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.

- MAZO JR, M.; CAO, M. Asynchronous Decentralized Event-triggered Control. **arXiv:1206.6648** [cs, math], maio 2013. ArXiv: 1206.6648. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1206.6648>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 33.
- MAZO JR, M.; TABUADA, P. Decentralized event-triggered control over wireless sensor/actuator networks. **arXiv:1004.0477** [cs, math], fev. 2011. ArXiv: 1004.0477. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1004.0477>>. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 28 e 34.
- MISKOWICZ, M. Send-On-Delta Concept: An Event-Based Data Reporting Strategy. **Sensors**, v. 6, n. 1, p. 49–63, jan. 2006. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/6/1/49>>. Citado na página 33.
- MONTESTRUQUE, L. A.; ANTSAKLIS, P. J. Networked Control Systems: A Model-Based Approach. In: HRISTU-VARSAKELIS, D.; LEVINE, W. S. (Ed.). **Handbook of Networked and Embedded Control Systems**. Boston, MA: Birkhäuser Boston, 2005. p. 601–625. ISBN 978-0-8176-3239-7 978-0-8176-4404-8. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/0-8176-4404-0_26>. Citado na página 25.
- MONTESTRUQUE, L. A.; ANTSAKLIS, P. J. Performance Evaluation for Model-Based Networked Control Systems. In: ANTSAKLIS, P. J.; TABUADA, P. (Ed.). **Networked Embedded Sensing and Control**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. v. 331, p. 231–249. ISBN 978-3-540-32794-3. Series Title: Lecture Notes in Control and Information Science. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/11533382_16>. Citado na página 25.
- MOUSAVI, S. H.; GHODRAT, M.; MARQUEZ, H. J. Integral-based event-triggered control scheme for a general class of non-linear systems. **IET Control Theory & Applications**, v. 9, n. 13, p. 1982–1988, ago. 2015. ISSN 1751-8652, 1751-8652. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-cta.2014.1322>>. Citado na página 34.
- MUSKE, K.; YOUNG, J.; GROSDIDIER, P.; TANI, S. Crude unit product quality control. **Computers & Chemical Engineering**, v. 15, n. 9, p. 629–638, set. 1991. ISSN 00981354. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0098135491870244>>. Citado 3 vezes nas páginas 48, 78 e 79.
- NETO, A. Ferreira da R. **Protocolos para difusão confiável de mensagens em grupos de comunicação**. Tese (Mestre em Ciência da Computação) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, ago. 1997. Disponível em: <http://acervus.unicamp.br/index.asp?codigo_sophia=118671>. Citado na página 32.
- NILSSON, J. Real-Time Control Systems with Delays. p. 142, 1998. Citado na página 25.
- PENG, C.; YANG, T. C. Event-triggered communication and \mathcal{H}_∞ control co-design for networked control systems. **Automatica**, v. 49, n. 5, p. 1326–1332, maio 2013. ISSN 00051098. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0005109813000393>>. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 28 e 29.
- PENG, C.; ZHANG, J. Event-triggered output-feedback \mathcal{H}_∞ control for networked control systems with time-varying sampling. **IET Control Theory & Applications**, v. 9, n. 9, p. 1384–1391, 2015. Citado na página 20.

- ROBIČ, T.; FILIPIČ, B. DEMO: Differential Evolution for Multiobjective Optimization. In: **Evolutionary Multi-Criterion Optimization**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. v. 3410, p. 520–533. ISBN 978-3-540-24983-2 978-3-540-31880-4. Series Title: Lecture Notes in Computer Science. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-31880-4_36>. Citado na página 43.
- SCHAFT, A. J. V. D.; SCHUMACHER, J. M. **An introduction to hybrid dynamical systems**. [S.l.]: Springer London, 2000. v. 251. Citado na página 33.
- SHEN, Y.; SUN, Y.; XU, W. Centralized PI/PID Controller Design for Multivariable Processes. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 25, p. 10439–10447, jun. 2014. ISSN 0888-5885, 1520-5045. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie501541s>>. Citado na página 79.
- SOARES, C. A. d. O. **Uma Formulação Multiobjetivo para o Cálculo de Equilíbrios de Nash não Pareto-dominados**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, jun. 2014. Citado na página 38.
- SOARES, R. F.; SILVA, S. J. e; GONCALVES, E. N. Differential Evolution algorithm applied to sparse PI control synthesis for non-square multivariable systems. In: **2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)**. Thessaloniki: IEEE, 2018. p. 893–898. ISBN 978-1-5386-5065-3. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8394956/>>. Citado na página 79.
- SRINIVAS, N.; DEB, K. Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. **Evolutionary Computation**, v. 2, n. 3, p. 221–248, set. 1994. ISSN 1063-6560, 1530-9304. Disponível em: <<https://direct.mit.edu/evco/article/2/3/221-248/1396>>. Citado na página 43.
- STORN, R.; Differential Evolution – A Simple and Efficient; Heuristic for Global Optimization over Continuous; Price, Kenneth. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. **DIFFERENTIAL EVOLUTION**, p. 19, 1997. Citado na página 35.
- STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. **Journal of Global Optimization**, v. 11, n. 4, p. 341–359, December 1997. Citado na página 35.
- SUN, X.; GU, Z.; YANG, F.; YAN, S. Memory-event-trigger-based secure control of cloud-aided active suspension systems against deception attacks. **Information Sciences**, v. 543, p. 1–17, jan. 2021. ISSN 00200255. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020025520306447>>. Citado na página 34.
- TABUADA, P. Event-Triggered Real-Time Scheduling of Stabilizing Control Tasks. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 52, n. 9, p. 1680–1685, set. 2007. ISSN 0018-9286. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4303247/>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 34.
- TARBOURIECH, S.; SEURET, A.; SILVA, J. M. G. da; SBARBARO, D. Observer-based event-triggered control co-design for linear systems. **IET Control Theory & Applications**, IET, v. 10, n. 18, p. 2466–2473, 2016. Citado na página 29.

- TIAN, E.; WANG, K.; ZHAO, X.; SHEN, S.; LIU, J. An improved memory-event-triggered control for networked control systems. **Journal of the Franklin Institute**, v. 356, n. 13, p. 7210–7223, set. 2019. ISSN 00160032. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016003219304922>>. Citado na página 34.
- WANG R. POSTOYAN, D. N. W.; HEEMELS, W. Periodic event-triggered control for nonlinear networked control systems. 2019. Citado na página 20.
- WANG, X.; LEMMON, M. D. Decentralized Event-Triggered Broadcasts over Networked Control Systems. In: EGERSTEDT, M.; MISHRA, B. (Ed.). **Hybrid Systems: Computation and Control**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. v. 4981, p. 674–677. ISBN 978-3-540-78928-4 978-3-540-78929-1. ISSN: 0302-9743, 1611-3349 Series Title: Lecture Notes in Computer Science. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-78929-1_62>. Citado na página 21.
- WANG, X.; SUN, Y.; HOVAKIMYAN, N. Asynchronous task execution in networked control systems using decentralized event-triggering. **Systems & Control Letters**, v. 61, n. 9, p. 936–944, set. 2012. ISSN 01676911. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167691112001156>>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.
- WOOD, R.; BERRY, M. Terminal composition control of a binary distillation column. **Chemical Engineering Science**, v. 28, n. 9, p. 1707–1717, set. 1973. ISSN 00092509. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0009250973800259>>. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 66.
- YAN, S.; SHEN, M.; NGUANG, S. K.; ZHANG, G. Event-triggered \mathcal{H}_∞ control of networked control systems with distributed transmission Delay. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 65, n. 10, p. 4295–4301, out. 2020. ISSN 0018-9286, 1558-2523, 2334-3303. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8901398/>>. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 29.
- YU, H.; HAO, F. Input-to-state stability of integral-based event-triggered control for linear plants. **Automatica**, v. 85, p. 248–255, nov. 2017. ISSN 00051098. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000510981730417X>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 34.
- YU, H.; HAO, F. Practical stability of integral-based event-triggered control systems. In: **2017 36th Chinese Control Conference (CCC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 7874–7879. Citado na página 33.
- YUE, D.; TIAN, E.; HAN, Q.-L. 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, fev. 2013. ISSN 0018-9286, 1558-2523. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6228518/>>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.
- ZHANG, H.; YU, H.; HAO, F. Decentralized Integral-Based Event-Triggered Stabilization for Linear Plant with Actuator Saturation and Output Feedback. **Applied Sciences**, v. 7, n. 1, p. 11, dez. 2016. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2076-3417/7/1/11>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 34.

ZHANG, H.; ZHENG, X.; LI, H.; WANG, Z.; YAN, H. Active Suspension System Control With Decentralized Event-Triggered Scheme. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 67, n. 12, p. 10798–10808, dez. 2020. ISSN 0278-0046, 1557-9948. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8931686/>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

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, dez. 2020. ISSN 2162-237X, 2162-2388. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8963855/>>. Citado na página 34.

ZHANG, W.; BRANICKY, M. S.; PHILLIPS, S. M. Stability of networked control systems. **IEEE Control Systems**, v. 21, n. 1, p. 84–99, fev. 2001. ISSN 1066-033X, 1941-000X. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/898794/>>. Citado na página 20.

ZHANG, X.; HAN, Q. Event-triggered dynamic output feedback control for networked control systems. **IET Control Theory & Applications**, v. 8, n. 4, p. 226–234, mar. 2014. ISSN 1751-8652, 1751-8652. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-cta.2013.0253>>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.

ZHANG, X.-M.; HAN, Q.-L. Event-triggered \mathcal{H}_∞ control for a class of nonlinear networked control systems using novel integral inequalities. **International Journal of Robust and Nonlinear Control**, v. 27, n. 4, p. 679–700, mar. 2017. ISSN 10498923. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rnc.3598>>. Citado na página 28.

ZHANG, X.-M.; HAN, Q.-L.; ZHANG, B.-L. 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, fev. 2017. ISSN 1551-3203, 1941-0050. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7563411/>>. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 28 e 29.

ZITZLER, E. **Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications**. [S.l.]: Citeseer, 1999. v. 63. Citado na página 39.

Apêndice A – CONJUNTO DE SOLUÇÕES DA CURVA DE PARETO

Conjunto de soluções Curva de Pareto para Estudo de Caso 1 - Planta Quatro Tanques

Tabela A.1 – Conjunto de Soluções na Curva de Pareto ETM-8 e ETM-4 - Quatro Tanques para $T_s = 0,25 s$.

ETM-8					ETM-4				
Per.	IAE	IAE (%)	N_t	$N_t(\%)$	Per.	IAE	IAE (%)	N_t	$N_t(\%)$
	17,81	-	19188	-		17,81	-	19188	-
#1	18,65	0,066	1930	-89,65	#1	18,88	0,021	1954	-89,84
#2	18,71	-0,155	1844	-90,13	#2	18,92	0,564	1679	-90,92
#3	18,72	0,811	1474	-91,74	#3	18,94	1,143	1490	-0,92
#4	18,80	1,860	1395	-91,95	#4	18,97	1,397	1446	-91,82
#5	18,82	2,238	1226	-92,18	#5	18,99	1,825	1330	-92,38
#6	18,92	3,361	1212	-92,89	#6	19,02	2,204	1246	-92,45
#7	18,94	3,943	1156	-92,93	#7	19,02	2,544	1198	-92,60
#8	18,95	5,046	1155	-92,88	#8	19,12	3,260	1177	-93,03
#9	19,01	4,210	1119	-93,03	#9	19,12	3,500	1124	-93,17
#10	19,07	4,739	1100	-93,11	#10	19,15	3,450	1112	-93,15
#11	19,11	7,606	1028	-93,19	#11	19,21	5,253	1048	-93,57
#12	19,13	8,125	999	-93,37	#12	19,24	5,486	1010	-93,56
#13	19,32	10,789	993	-93,35	#13	19,294	7,297	989	-93,54
#14	19,43	10,046	990	-93,49	#14	19,327	7,800	932	-93,68
#15	19,61	10,488	974	-93,65	#15	19,429	9,583	910	-93,95
#16	19,64	15,909	942	-93,38	#16	19,470	10,643	876	-94,08
#17	19,69	16,770	914	-93,68	#17	19,592	13,411	812	-94,40
#18	19,75	16,778	898	-93,80	#18	19,856	14,342	802	-94,54
#19	20,11	23,552	867	-93,91	#19	19,919	15,736	778	-94,50

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela A.2 – Conjunto de Soluções na Curva de Pareto ETM-1 e ETM-4 - Quatro Tanques para $T_s = 0,5 s$.

ETM-1					ETM-4				
Per.	IAE	IAE (%)	N_t	$N_t(\%)$	Per.	IAE	IAE (%)	N_t	$N_t(\%)$
	47,593	-	7204	-		47,593	-	7204	-
#1	48,857	2,66	1915,87	-73,4	#1	47,848	0,53	2880,30	-60,02
#2	49,612	4,24	1844,89	-74,4	#2	47,876	0,60	2852,89	-60,40
#3	49,762	4,56	1717,23	-76,2	#3	47,901	0,65	2692,99	-62,62
#4	50,156	5,39	1641,40	-77,2	#4	47,980	0,81	2400,39	-66,68
#5	51,861	8,97	1462,38	-79,7	#5	48,188	1,25	2247,74	-68,80
#6	53,706	12,84	1377,19	-80,9	#6	49,148	3,27	2041,06	-71,67
#7	55,688	17,01	1181,08	-83,6	#7	49,369	3,73	1948,20	-72,96
#8	56,490	18,69	1173,25	-83,7	#8	50,322	5,73	1692,50	-76,51
#9	56,973	19,71	1124,98	-84,4	#9	51,155	7,48	1577,59	-78,10
#10	61,111	28,40	1007,31	-86,0	#10	51,436	8,07	1511,11	-79,02
#11	61,238	28,67	1004,12	-86,1	#11	53,786	13,01	1305,54	-81,88
#12	60,781	27,71	1004,24	-86,1	#12	55,947	17,55	1283,39	-82,19
#13	67,786	42,43	992,61	-86,2	#13	55,502	16,62	1247,65	-82,68
#14	64,733	36,01	910,35	-87,4	#14	58,680	23,30	1153,40	-83,99
#15	71,410	50,04	820,45	-88,6	#15	59,180	24,35	1133,68	-84,26
#16	70,246	47,60	827,77	-88,5	#16	61,595	29,42	1058,62	-85,31
#17	75,771	59,21	806,56	-88,8	#17	61,271	28,74	1053,71	-85,37
#18	78,305	64,53	781,20	-89,2	#18	66,938	40,65	1003,82	-86,07
#19	80,830	69,83	755,82	-89,5	#19	74,507	56,55	1006,48	-86,03
#20	85,566	79,79	732,68	-89,8	#20	76,145	59,99	1004,92	-86,05

Fonte: Elaborada pelo autor

Conjunto de soluções Curva de Pareto para Estudo de Caso 2 - Planta Wood & Barry

Tabela A.3 – Conjunto de Soluções na Curva de Pareto ETM-2 e ETM-3 - Wood & Barry para $T_s = 0,5 \text{ min.}$

ETM-2					ETM-3				
	IAE	IAE (%)	N_t	$N_t(\%)$		IAE	IAE (%)	N_t	$N_t(\%)$
CTP	47,593	-	7204	-	Per.	47,593	-	7204	-
#1	48,857	2,66	1916	-73,4	#1	47,848	0,53	2880	-60,02
#2	49,612	4,24	1845	-74,4	#2	47,876	0,60	2853	-60,40
#3	49,762	4,56	1717	-76,2	#3	47,901	0,65	2693	-62,62
#4	50,156	5,39	1641	-77,2	#4	47,980	0,81	2400	-66,68
#5	51,861	8,97	1462	-79,7	#5	48,188	1,25	2248	-68,80
#6	53,706	12,84	1377	-80,9	#6	49,148	3,27	2041	-71,67
#7	55,688	17,01	1181	-83,6	#7	49,369	3,73	1948	-72,96
#8	56,490	18,69	1173	-83,7	#8	50,322	5,73	1693	-76,51
#9	56,973	19,71	1125	-84,4	#9	51,155	7,48	1578	-78,10
#10	61,111	28,40	1007	-86,0	#10	51,436	8,07	1511	-79,02
#11	61,238	28,67	1004	-86,1	#11	53,786	13,01	1306	-81,88
#12	60,781	27,71	1004	-86,1	#12	55,947	17,55	1283	-82,19
#13	67,786	42,43	993	-86,2	#13	55,502	16,62	1248	-82,68
#14	64,733	36,01	910	-87,4	#14	58,680	23,30	1153	-83,99
#15	71,410	50,04	820	-88,6	#15	59,180	24,35	1134	-84,26
#16	70,246	47,60	828	-88,5	#16	61,595	29,42	1059	-85,31
#17	75,771	59,21	807	-88,8	#17	61,271	28,74	1054	-85,37
#18	78,305	64,53	781	-89,2	#18	66,938	40,65	1004	-86,07
#19	80,830	69,83	756	-89,5	#19	74,507	56,55	1006	-86,03
#20	85,566	79,79	733	-89,8	#20	76,145	59,99	1005	-86,05

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela A.4 – Conjunto de Soluções na Curva de Pareto ETM-7 e ETM-8 - Wood & Barry para $T_s = 1 \text{ min.}$

ETM-7					ETM-8				
	IAE	IAE (%)	N_t	$N_t(\%)$		IAE	IAE (%)	N_t	$N_t(\%)$
CTP	64,810	-	3604	-	Per.	64,810	-	3604	-
#1	65,174	0,56	2.121,54	-41,13	#1	65,038	0,35	2.393,53	-33,59
#2	65,261	0,70	1.855,27	-74,25	#2	65,051	0,37	2.300,96	-36,16
#3	65,413	0,93	1.760,47	-75,56	#3	65,060	0,39	2.224,18	-38,29
#4	65,581	1,19	1.685,09	-76,61	#4	65,138	0,51	2.112,34	-41,39
#5	65,984	1,81	1.575,77	-78,13	#5	65,157	0,54	2.031,22	-43,64
#6	66,429	2,50	1.458,34	-79,76	#6	65,659	1,31	1.690,77	-53,09
#7	66,619	2,79	1.460,00	-79,73	#7	65,933	1,73	1.627,66	-54,84
#8	67,332	3,89	1.370,88	-80,97	#8	66,149	2,07	1.588,97	-55,91
#9	68,072	5,03	1.315,82	-81,73	#9	69,674	7,51	1.282,71	-64,41
#10	70,109	8,18	1.222,48	-83,03	#10	69,883	7,83	1.242,81	-65,52
#11	70,370	8,58	1.197,31	-83,38	#11	71,197	9,86	1.225,71	-65,99
#12	71,404	10,17	1.135,24	-84,24	#12	71,904	10,95	1.171,46	-67,50
#13	72,440	11,77	1.126,92	-84,36	#13	74,068	14,28	1.137,19	-68,45
#14	71,636	10,53	1.116,73	-84,50	#14	74,745	15,33	1.120,84	-68,90
#15	72,000	11,09	1.099,24	-84,74	#15	77,130	19,01	1.122,66	-68,85
#16	73,740	13,78	1.008,65	-86,00	#16	77,569	19,69	1.053,40	-70,77
#17	75,624	16,69	953,75	-86,76	#17	78,659	21,37	992,82	-72,45
#18	75,992	17,25	953,51	-86,76	#18	82,712	27,62	953,80	-73,53
#19	78,303	20,82	991,76	-86,23	#19	83,878	29,42	911,47	-74,71
#20	82,041	26,59	920,35	-87,22	#20	90,757	40,04	893,53	-75,21

Fonte: Elaborada pelo autor

*Conjunto de soluções Curva de Pareto para Estudo de Caso 3 - Planta Crude*Tabela A.5 – Conjunto de Soluções - Pareto ETM-3 e ETM-8 - Crude para $T_s = 0,125 \text{ min.}$

ETM-3					ETM-8				
	IAE	IAE (%)	N_t	$N_t(\%)$		IAE	IAE (%)	N_t	$N_t(\%)$
CTP	66,493	-	54009	-	-	66,493	-	54009	-
#1	66,755	0,39	6.147,54	-88,62	#1	65,696	-1,200	10.056,58	-81,38
#2	68,266	2,67	3.464,31	-93,59	#2	65,806	-1,033	8.064,44	-85,07
#3	68,932	3,67	3.264,89	-93,95	#3	66,417	-0,115	5.675,92	-89,49
#4	69,599	4,67	3.023,10	-94,40	#4	66,842	0,524	4.287,54	-92,06
#5	70,532	6,07	2.863,31	-94,70	#5	67,375	1,326	4.042,25	-92,52
#6	71,189	7,06	2.695,72	-95,01	#6	67,458	1,451	3.893,86	-92,79
#7	71,360	7,32	2.631,36	-95,13	#7	67,320	1,244	3.547,19	-93,43
#8	72,023	8,32	2.517,07	-95,34	#8	68,007	2,276	3.334,43	-93,83
#9	73,796	10,98	2.310,12	-95,72	#9	68,972	3,728	2.905,23	-94,62
#10	74,592	12,18	2.236,97	-95,86	#10	70,045	5,342	2.709,48	-94,98
#11	75,586	13,67	2.185,70	-95,95	#11	70,270	5,680	2.508,10	-95,36
#12	76,412	14,92	2.082,55	-96,14	#12	71,017	6,804	2.417,83	-95,52
#13	78,564	18,15	2.031,37	-96,24	#13	72,237	8,638	2.318,26	-95,71
#14	78,946	18,73	1.993,88	-96,31	#14	73,053	9,865	2.217,57	-95,89
#15	79,731	19,91	1.954,98	-96,38	#15	75,780	13,967	2.032,49	-96,24
#16	81,357	22,35	1.956,25	-96,38	#16	76,078	14,414	1.972,27	-96,35
#17	87,826	32,08	1.716,75	-96,82	#17	76,912	15,669	1.950,25	-96,39
#18	90,276	35,77	1.742,55	-96,77	#18	82,834	24,574	1.754,08	-96,75
#19	91,129	37,05	1.722,85	-96,81	#19	86,855	30,623	1.687,82	-96,87
#20	92,008	38,37	1.780,50	-96,70	#20	89,354	34,380	1.609,62	-97,02
#21	93,717	40,94	1.654,46	-96,94	#21	89,930	35,247	1.613,85	-97,01
#22	94,395	41,96	1.698,03	-96,86	#22	95,407	43,484	1.585,89	-97,06
#23	97,144	46,10	1.618,45	-97,00	#23	96,635	45,330	1.531,48	-97,16
#24	96,755	45,51	1.636,51	-96,97	#24	103,163	55,147	1.496,99	-97,23
#25	98,050	47,46	1.608,96	-97,02	#25	105,910	59,278	1.453,15	-97,31
#26	103,940	56,32	1.545,98	-97,14	#26	109,305	64,386	1.425,41	-97,36
#27	113,921	71,33	1.526,77	-97,17	#27	112,407	69,051	1.397,86	-97,41

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela A.6 – Conjunto de Soluções - Pareto ETM-3 e ETM-8 - Crude para $T_s = 0,25 \text{ min.}$

ETM-3					ETM-8				
	IAE	IAE (%)	N_t	$N_t(\%)$		IAE	IAE(%)	N_t	$N_t(\%)$
Per	70,699	-	27.009	-	-	70,699	-	27.009	-
#1	71,891	2,07	4.680	-82,67	#1	69,790	-0,92	7523,51	-72,14
#2	71,614	1,67	3.985	-85,25	#2	69,865	-0,81	6666,43	-75,32
#3	71,756	1,88	3.908	-85,53	#3	70,841	0,58	3650,68	-86,48
#4	72,349	2,72	3.535	-86,91	#4	71,527	1,55	3412,71	-87,36
#5	72,520	2,96	3.451	-87,22	#5	71,848	2,01	3212,21	-88,11
#6	72,814	3,38	3.194	-88,17	#6	72,191	2,49	2980,88	-88,96
#7	73,412	4,23	3.030	-88,78	#7	74,142	5,26	2570,65	-90,48
#8	73,613	4,51	2.937	-89,13	#8	73,685	4,61	2506,15	-90,72
#9	74,063	5,15	2.863	-89,40	#9	74,840	6,25	2319,15	-91,41
#10	75,271	6,87	2.694	-90,03	#10	77,486	10,01	2082,27	-92,29
#11	75,173	6,73	2.680	-90,08	#11	78,412	11,33	1995,44	-92,61
#12	76,920	9,21	2.380	-91,19	#12	80,281	13,98	1984,78	-92,65
#13	78,604	11,60	2.312	-91,44	#13	80,216	13,89	1869,87	-93,08
#14	78,088	10,87	2.343	-91,32	#14	80,521	14,32	1882,69	-93,03
#15	79,631	13,06	2.181	-91,92	#15	81,857	16,22	1841,47	-93,18
#16	81,389	15,55	2.237	-91,72	#16	83,799	18,97	1790,55	-93,37
#17	81,652	15,93	2.045	-92,43	#17	83,908	19,13	1804,63	-93,32
#18	81,838	16,19	2.059	-92,38	#18	85,634	21,58	1750,19	-93,52
#19	83,747	18,90	1.971	-92,70	#19	88,770	26,03	1665,14	-93,83
#20	86,322	22,56	1.889	-93,01	#20	89,676	27,32	1646,28	-93,90
#21	84,840	20,45	1.854	-93,13	#21	92,206	30,91	1629,82	-93,97
#22	87,672	24,47	1.906	-92,94	#22	95,187	35,14	1571,95	-94,18
#23	88,888	26,20	1.785	-93,39	#23	98,584	39,96	1578,3	-94,16
#24	89,750	27,42	1.748	-93,53	#24	100,551	42,76	1522,45	-94,36
#25	92,907	31,90	1.664	-93,84	#25	108,140	53,53	1541,26	-94,29
#26	98,242	39,48	1.595	-94,10	#26	108,973	54,71	1499,17	-94,45
#27	99,585	41,39	1.627	-93,97	#27	114,306	62,29	1470,99	-94,55

Fonte: Elaborada pelo autor