



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**SINTONIA DE CONTROLADOR PID APLICADO A UM GRUPO MOTOR
GERADOR COM A UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS BIOINSPIRADOS**

LEONARDO BEZERRA LIBANIO

BRASÍLIA/DF
2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**SINTONIA DE CONTROLADOR PID APLICADO A UM GRUPO MOTOR
GERADOR COM A UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS BIOINSPIRADOS**

LEONARDO BEZERRA LIBANIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia, da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Sistemas Mecatrônicos.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Mauricio Muñoz Arboleda (FGA/UnB)

Coorientador: Prof. Dr. Rudi Henri Van Els (FGA/UnB)

BRASÍLIA/DF
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

LL694s	Libanio, Leonardo Bezerra Sintonia de Controlador PID Aplicado a um Grupo Motor Gerador com a Utilização de Algoritmos Bioinspirados / Leonardo Bezerra Libanio; orientador Daniel Mauricio Muñoz Arboleda; co-orientador Rudi Henri Van Els. -- Brasília, 2023. 108 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) -- Universidade de Brasília, 2023. 1. Sintonia PID. 2. Motor de Combustão Interna . 3. Gerador Elétrico. 4. Otimização . 5. Algoritmos Bioinspirados. I. Arboleda, Daniel Mauricio Muñoz , orient. II. Van Els, Rudi Henri, co-orient. III. Título.
--------	---

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LIBANIO, L. B (2023). SINTONIA DE CONTROLADOR PID APLICADO A UM GRUPO MOTOR GERADOR COM A UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS BIOINSPIRADOS. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 108 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: LEONARDO BEZERRA LIBANIO

TÍTULO: SINTONIA DE CONTROLADOR PID APLICADO A UM GRUPO MOTOR GERADOR COM A UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS BIOINSPIRADOS. GRAU: Mestre em Sistemas Mecatrônicos ANO 2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de ensino, estudo ou pesquisa, desde que citada a fonte.

LEONARDO BEZERRA LIBANIO

Depto. de Engenharia Mecânica (ENM) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

LEONARDO BEZERRA LIBANIO, Sintonia de Controlador PID Aplicado a um Grupo Motor Gerador com a Utilização de Algoritmos Bioinspirados. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília para obtenção do título de Mestre em Sistemas Mecatrônicos.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. Daniel Mauricio Muñoz Arboleda
Orientador, FGA/UnB

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. Rudi Henri Van Els
Coorientador, FGA/UnB

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. Carlos Humberto Llanos Quintero
Examinador Interno, FT/UnB

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. Maurício Figueiredo de Oliveira
Examinador Externo, Petrobras

Julgamento _____ Assinatura _____

DEDICATÓRIA

Esta dissertação é dedicada: aos meus filhos Victor Gabriel e João Lucca; e minha esposa Keyla; por toda paciência e compreensão, eles foram os pilares para que eu pudesse alcançar mais este objetivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter confiado minha alma a um ser tão iluminado e bondoso de nome Maria Lúcia, minha amada mãe, que é minha referência em todos os aspectos. Ao meu pai Manoel Libanio, que ao seu modo conduziu seus 06 filhos a uma vida digna. Aos meus orientadores: professores Daniel e Rudi por me direcionar, por compartilhar o vasto conhecimento e por toda paciência, gratidão imensa que tenho por eles. À Universidade de Brasília, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos, seus funcionários e todos os professores que tive a oportunidade de conviver e tanto pude aprender, assim foi possível a conclusão desta dissertação. À Petrobras, representada pelos seus funcionários e lideranças por ter me dado a oportunidade de utilizar as instalações como laboratório desta pesquisa, em especial aos meus amigos da P-65. Por fim, gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a obtenção do grau de mestre em sistemas mecatrônicos.

EPÍGRAFE

“A primeira regra de qualquer tecnologia utilizada nos negócios é que a automação aplicada a uma operação eficiente aumentará a eficiência. A segunda é que a automação aplicada a uma operação ineficiente aumentará a ineficiência.”

Bill Gates

RESUMO

LEONARDO BEZERRA LIBANIO, Sintonia de Controlador PID Aplicado a um Grupo Motor Gerador com a Utilização de Algoritmos Bioinspirados. 108 p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um controlador proporcional integral derivativo (PID) para um grupo motor gerador com a utilização de algoritmos bioinspirados, e propõe uma alternativa para atender a sintonia em ambientes *offshore*. A sintonização do controlador foi realizada a partir da formulação de um problema de otimização, cuja análise de desempenho é feita fazendo o seguimento de trajetória, aplicando perturbações ao incrementar e decrementar cargas no sistema de potência, fornecendo assim os dados necessários para otimizar o sistema e elevar o potencial mecânico, reduzir instabilidades e manutenção e aumentar a eficiência energética. É apresentada uma análise preliminar dos componentes e variáveis envolvidos no sistema motor gerador, a saber: motor de combustão interna, gerador elétrico, controlador e o sistema de aquisição de dados. Foi feita uma modelagem não linear simplificada, a partir de uma função de transferência de um servossistema. O modelo obtido foi usado para extrair um conjunto de parâmetros de desempenho do controlador que guiam o processo de busca dos algoritmos de otimização por enxame de partículas (PSO) e por evolução diferencial (DE), assim como suas variações, utilizando Matlab/Simulink. Para efeitos comparativos, foi usada a função do *PID Tune*, permitindo avaliar o desempenho dos algoritmos bioinspirados. Com os parâmetros PID obtidos foram realizadas simulações do projeto e discussões. Posteriormente, os parâmetros PID foram implementados no controlador, realizando ensaios de seguimento de trajetória com um motor Wartsila, acoplado a um gerador elétrico Leroy Somer da instalação *offshore* plataforma 65 da Petrobras. Finalmente, é feita uma discussão sobre a validade da proposta de otimização do controlador com a sintonia selecionada e uma análise dos parâmetros do grupo motor gerador é apresentada, assim como as conclusões e sugestões para continuação da pesquisa.

Palavras-chave: sintonia PID; motor gerador; otimização por enxame de partículas; evolução diferencial.

ABSTRACT

LEONARDO BEZERRA LIBANIO, Sintonia de Controlador PID Aplicado a um Grupo Motor Gerador com a Utilização de Algoritmos Bioinspirados. 108 p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

The present work presents the development of a proportional integral derivative (PID) tuning for a motor generator set using bioinspired algorithms, and proposes an alternative to meet the tuning in offshore environments. The tuning of the controller was carried out from the formulation of an optimization problem, whose performance analysis is done by tracking the trajectory of the response in time domain, applying disturbances when increasing and decreasing loads in the power system, thus providing the necessary data to optimize the system and raise the mechanical potential, reducing instabilities and maintenance and increasing the energy efficiency. A preliminary analysis of the components and variables involved in the motor-generator system is presented, namely: internal combustion engine, electric generator, controller and data acquisition system. A simplified non-linear modeling was made, from a transfer function of a servo system. The obtained model was used to extract a set of controller performance parameters that guide the search process of particle swarm optimization (PSO) and differential evolution (DE) algorithms, as well as their variations, using Matlab/Simulink. For comparative purposes, the *PIDTune* function was used, allowing the evaluation of the performance of bioinspired algorithms. With the obtained PID parameters, project simulations and discussions were carried out. Subsequently, the PID parameters were implemented in the controller, following trajectory tracking tests with a Wartsila engine, coupled to a Leroy Somer electric generator from the Petrobras platform 65 offshore installation. Finally, a discussion is made about the effectiveness of the proposed optimization of the controller with the selected tuning and an analysis of the engine-generator set parameters is presented, as well as conclusions and suggestions for further research.

Key-words: PID tuning; motor generator set; particle swarm optimization; differential evolution.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Contextualização	16
1.2 Justificativa	20
1.3 Delimitações do Tema	20
1.4 Objetivo Geral	21
1.4.1 Objetivos Específicos	21
1.5 Organização da Dissertação	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Modelagem do Grupo Motor Gerador	23
2.2 Ensaios de Bancada Dinamométrica	36
2.3 Conclusões do Capítulo	42
3 GRUPO MOTOR GERADOR	45
3.1 Visão Geral do Grupo Motor Gerador	45
3.2 Motor de Combustão Interna – MCI	46
3.2.1 Motor de Combustão Interna - Wartsila	48
3.2.2 Protocolo de Testes - Wartsila 12 V 200 – W200	51
3.3 Gerador	52
3.3.1 Gerador Elétrico	53
3.3.2 Sistema de Potência Unifilar - Aplicação AC	54
3.4 Controlador	56
3.5 Sistema de Supervisão	60
3.5.1 Supervisório - PI – Plant Information	60
3.6 Considerações Finais do Capítulo	62
4 CONTROLADOR PID E ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO	63
4.1 Formulação do Problema de Otimização	63
4.2 Controle PID	65
4.3 Sintonia PID do Grupo Motor Gerador com PIDTUNE	67
4.4 Sintonia PID do Grupo Motor Gerador com Algoritmos PSO e DE	69
4.4.1 Otimização por Enxame de Partículas - PSO	69
4.4.2 Otimização por Evolução Diferencial – DE	73
4.4.3 Técnicas de Melhoria de Desempenho dos Algoritmos PSO e DE	76
4.4.4 Método de Avaliação de Desempenho dos Algoritmos PSO e DE	78
4.4.5 Resultados e Discussões Preliminares da Simulação com PSO e DE	79
4.4.6 Resultados de Convergência das Simulações com PSO e DE	84
4.5 Considerações Finais do Capítulo	85
5 IMPLEMENTAÇÃO FÍSICA NO GRUPO MOTOR GERADOR	87
5.1 Ensaios dos Parâmetros PID no Grupo Motor Gerador	87
5.2 Resultados de Convergência - Variáveis do Gerador	87
5.3 Considerações Finais - Variáveis Elétricas do Gerador	90
5.4 Resultados de Convergência - Variáveis do MCI	91
5.5 Considerações Finais - Variáveis do MCI	95
6 CONCLUSÕES	98
6.1 Sugestões de Trabalho Futuro	99
6.2 Limitações da Pesquisa	99
6.3 Artigos Publicados	99
7 REFERÊNCIAS	100
ANEXOS	104

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01: Matriz energética mundial 2018.	16
Figura 02: Matriz energética brasileira 2020.	17
Figura 03: Consumo de energia na indústria 2020.	18
Figura 04: Servossistema em um sistema de controle.	26
Figura 05: Diagrama de blocos de um servossistema.	28
Figura 06: Diagrama de blocos simplificado de um servossistema.	29
Figura 07: Representação de um sistema eletromecânico.	30
Figura 08: Carregamento típico de um motor.	31
Figura 09: Variáveis de inércia e amortecimento de um sistema típico.	32
Figura 10: Correlação torque – velocidade.	34
Figura 11: Sistema eletromecânico.	35
Figura 12: Diagrama de blocos do sistema de controle do conjunto dinamômetro - MCI.	38
Figura 13: Resposta do seguimento de trajetória de torque do sistema de controle dinamômetro - MCI.	39
Figura 14: Resposta do seguimento de trajetória de rotação do sistema de controle dinamômetro - MCI.	39
Figura 15: Resposta de Rotação para uma rampa de 5,5s.	40
Figura 16: Sintonia fina do controle PD para controle de rotação.	42
Figura 17: Visão geral do grupo motor gerador.	46
Figura 18: Visão geral do motor W200 Wartsila.	48
Figura 19: Motor de combustão interna Wartsila 12V-W200.	49
Figura 20: Visão geral de um gerador Leroy Somer.	53
Figura 21: Diagrama unifilar do sistema elétrico de potência.	55
Figura 22: Representação do sistema de controle do grupo motor gerador.	56
Figura 23: Controlador de carga e velocidade 2301.	58
Figura 24: Curvas de desempenho - MCI - controlador de velocidade e potência.	59
Figura 25: Tela de aquisição de dados do MCI.	61
Figura 26: Tela de aquisição de dados do gerador.	61
Figura 27: Resposta de um sistema PID em malha fechada.	64
Figura 28: Diagrama de blocos controlador PID.	65
Figura 29: Diagrama de blocos de um controlador PID.	66

Figura 30: Diagrama do ciclo de feedback PID TUNE.	67
Figura 31: Resposta do controlador sintonizado com PID TUNE.	68
Figura 32: Conjunto de vetores em movimento.	70
Figura 33: Otimização da posição da partícula.	72
Figura 34: Exemplo bidimensional do processo de mutação.	74
Figura 35: Processo de <i>crossover</i> .	75
Figura 36: Resposta do controlador sintonizado com PSO.	82
Figura 37: Resposta do controlador sintonizado com O-PSO.	82
Figura 38: Resposta do controlador sintonizado com DE.	83
Figura 39 Resposta do controlador sintonizado com O-DE.	83
Figura 40: Resposta do controlador sintonizado com DE, base de tempo 8,00h.	88
Figura 41: Resposta do controlador sintonizado com DE, base de tempo 1,45h.	89
Figura 42: Resposta do controlador sintonizado com DE, base de tempo 14,22m.	89
Figura 43: Gráfico de temperaturas do motor gerador, base de tempo 8,00hs.	92
Figura 44: Gráfico de temperaturas do motor gerador, base de tempo 1,18hs.	92
Figura 45: Gráfico de pressões do MCI, base de tempo 8,00 hs.	93
Figura 46: Gráfico de pressões do MCI, base de tempo 1,52hs	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo das pesquisas selecionadas.	44
Tabela 2: Protocolo de teste - Wartsila 12 V 200 – W200 – MCI.	42
Tabela 3: Parâmetros de configuração dos algoritmos DE, PSO, O-PSO e O-DE	80
Tabela 4: Resultados estatísticos dos algoritmos.	80
Tabela 5: Teste Kolmogorov-Smirnov.	80
Tabela 6: Teste de Kruskal-Wallis.	80
Tabela 7: Teste de Wilcoxon.	81
Tabela 8: Variáveis da resposta ao degrau unitário da planta a ser controlada.	85
Tabela 9: Protocolos de teste do fabricante Wartsila x dados da Pesquisa.	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A (Ampère)

ABS (American Bureau of Shipping)

ANP (Agência Nacional do Petróleo)

Bar (Unidade de Pressão)

BEN (Balanço Energético Nacional)

°C (Grau Celsius)

C (Representação do Controlador PID no Diagrama de Bloco)

CLP (Controlador Lógico Programável)

CC (Corrente Contínua)

CA (Corrente Alternada)

cv (Cavalo Vapor)

CW (Clockwise)

DC (Direct Current)

DE (Differential Evolution)

EGR (Exhaust Gas Circulation)

EPE (Empresa de Pesquisa Energética)

ETC (European Transient Cycle)

fem (Força Eletromotriz)

fcem (Força Contra Eletromotriz)

FPSO (Floating Production Storage and Offloading)

GE (General Electric)

GW (GigaWatt)

HP (Horsepower)

H (Hora)

HZ (Hertz)

HT (High Temperature)

IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás)

IEC (International Electrotechnical Commission)

ISO (International Standard Organization)

KD (Constante Derivativa)

KI (Constante Integral)

kW (Kilowatts)

KP (Constante Proporcional)
kV (Kilovolt)
kVAR (Kilovolt Ampère Reativo)
kVA (Kilovolt Ampère)
LT (Low Temperature)
m (Metro)
MRAC (Model Reference Adaptive Control)
MMboe/d (Milhões de Barris de Óleo Equivalente por Dia)
MCI (Motor de Combustão Interna)
min (Minuto)
mm (Milímetro)
M³/dia (Metro Cúbico por Dia)
MW (Megawatt)
m/s (Metros por Segundo)
Nm (Newton-Metro)
O-PSO (Optimized Particle Swarm Optimization)
O-DE (Optimized Differential Evolution)
OBL (Opposition Based Learning)
PSO (Particle Swarm Optimization)
PID (Proporcional, Integral e Derivativo)
PIDF (Proporcional, Integral e Derivativo Filtrado)
ppm (Parte por Milhão)
P-65 (Plataforma 65)
RPM (Rotações por Minuto)
SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído)
s (Segundo)
SCADA BR (Supervisory Control and Data Acquisition)
SP (Setpoint)
tep (Tonelada Equivalente de Petróleo)
VAC (Tensão em Corrente Alternada)
VP (Variável de Processo)
V (Volt)
ZEE (Zonas Econômicas Exclusivas)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

No mundo, a matriz energética é composta, principalmente, por fontes não renováveis como carvão, petróleo e gás natural. Fontes renováveis como solar, eólica e geotérmica, por exemplo, juntas correspondem a apenas 2% da matriz energética mundial, conforme a figura 1. Somando à participação da energia hidráulica e da biomassa, as renováveis totalizam 14% (EPE, 2021).

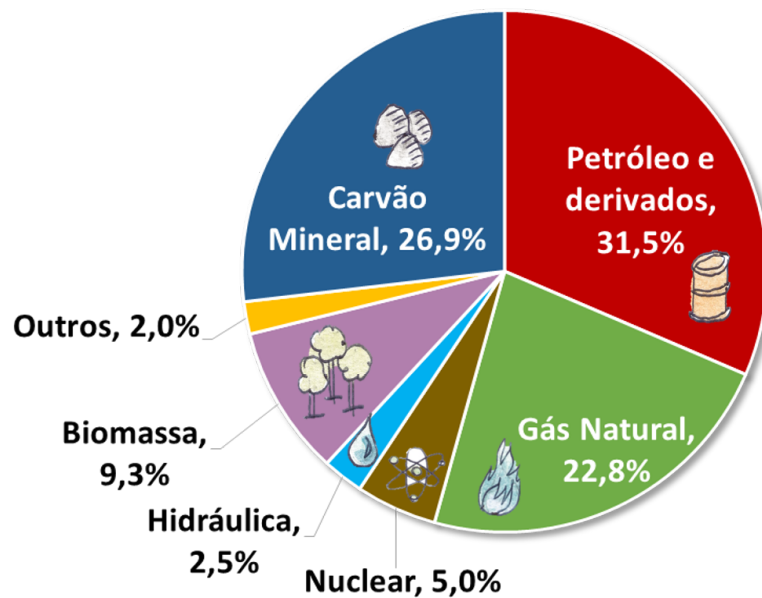


Figura 1: Matriz energética mundial 2018. Fonte: (BEN, 2021).

A matriz energética do Brasil é muito diferente da mundial e apesar do consumo de energia de fontes não renováveis ser maior do que o de renováveis, usa-se mais fontes renováveis que no resto do mundo. Somando lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana e outras, as energias renováveis totalizam 48,3%, quase metade da sua matriz energética, conforme figura 2 (BEN, 2021).

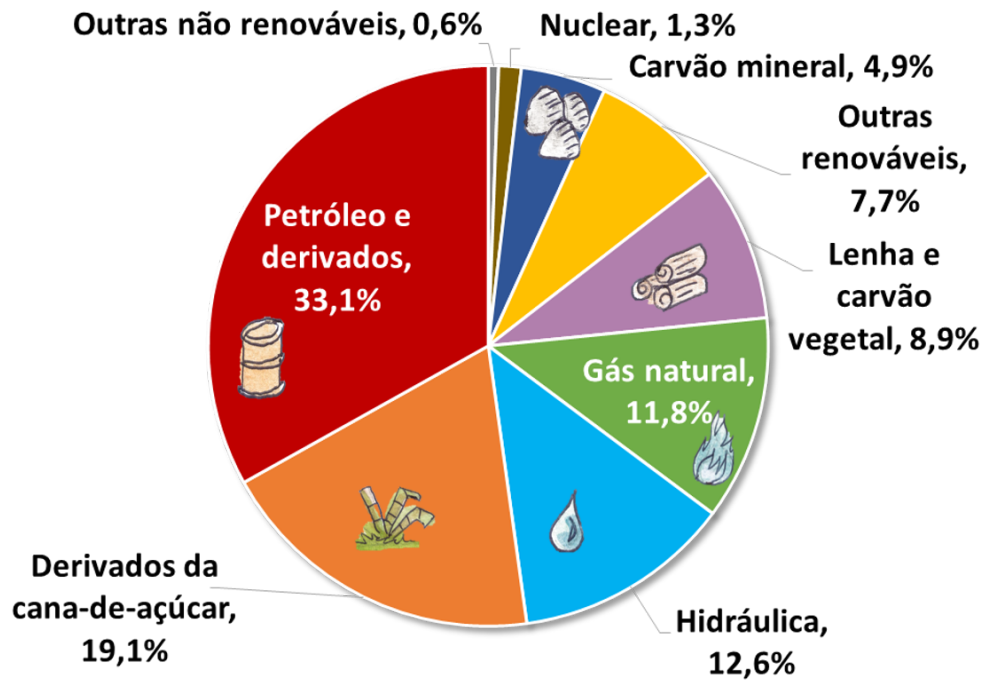


Figura 2: Matriz energética brasileira 2020. Fonte: (BEN, 2021).

No ano de 2020 destaca-se o crescimento de 41,3% na produção de açúcar, impactando o segmento de alimentos e bebidas e aumentando seu consumo total energético em 26,9% em relação a 2019. Outro setor que contribuiu para o aumento do consumo na indústria foi o de cimento (9,4%), alavancado por uma maior produção de clínquer (11%) em relação a 2019 (BEN, 2021).

Define-se que a tep – Tonelada Equivalente de Petróleo é utilizada na comparação do poder calorífico de diferentes formas de energia com o petróleo, sendo que uma tep corresponde à energia que se pode obter a partir de uma tonelada de petróleo padrão (BEN, 2021). No setor industrial, o acréscimo do consumo foi de 3 milhões de tep em valores absolutos em 2020 com relação a 2019 e teve 63% de renovabilidade na sua matriz energética, conforme apresenta a figura 3:

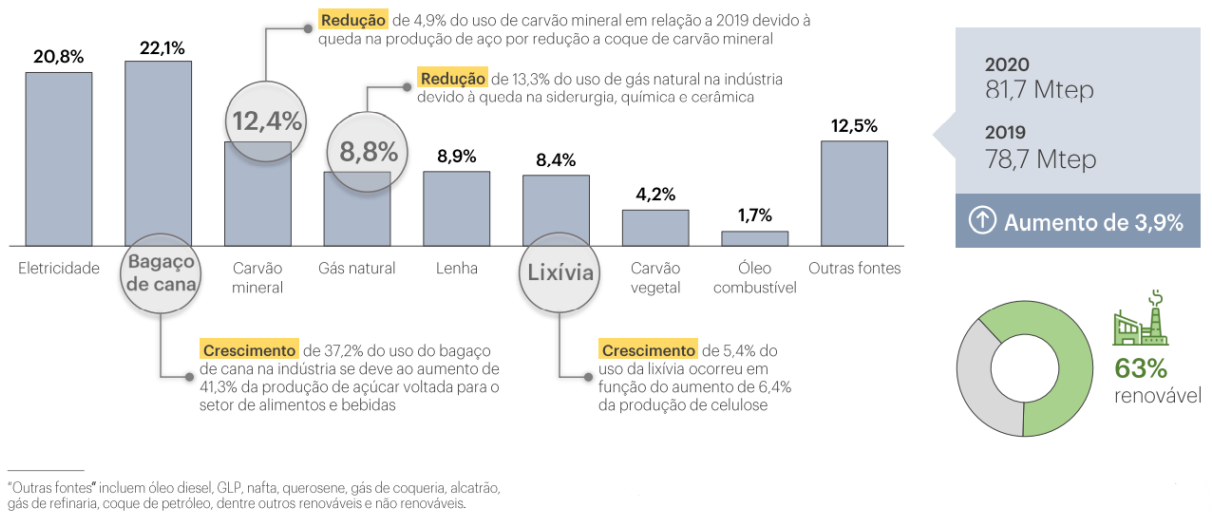


Figura 3: Consumo de energia na indústria 2020. Fonte: (BEN, 2021).

Observa-se que a matriz de consumo de energia na indústria brasileira é composta por 63% de fontes renováveis e 37% de fontes não renováveis como o carvão, petróleo e derivados, como o óleo diesel e gás natural. Neste cenário destaca-se a indústria do petróleo *offshore* (afastado da costa) que, devido a logística complexa, utiliza de meios próprios para geração de energia elétrica sendo base da matriz de consumo de energia as fontes não renováveis, as quais utilizam, predominantemente, gás natural e óleo diesel como combustível para impulsionar o conjunto de máquinas motrizes dos geradores elétricos.

Até o ano de 2019, a costa brasileira tinha 190 plataformas associadas à indústria do petróleo, destas, 144 estão em operação e 46 fora de operação, o que demanda elevada capacidade de geração de energia (MARINHA DO BRASIL, 2019).

Nas plataformas do tipo FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), a potência instalada corresponde a 1,8 GW, o suficiente para prover energia elétrica a uma cidade de 11,5 milhões de pessoas, correspondendo a 34 plataformas, o que representa 18,89% da totalidade das plataformas associadas à indústria do petróleo (PEREIRA, 2013). Estima-se que até o final de 2027 entrem em operação 40 unidades do tipo FPSO's de exploração e produção de petróleo e gás natural alcançando aproximadamente 4 GW de potência instalada somente nas unidades

tipo FPSO's e saltando de uma produção de 3,257 MMboe/d (milhões de barris de óleo equivalente por dia) para 5,1 MMboe/d (PEREIRA, 2013).

As fontes de energia renováveis na indústria de petróleo *offshore* ainda estão em fase experimental, porém há potencial de crescimento em projetos futuros (OLIVEIRA, 2013).

A matriz energética *offshore* não é considerada no inventário nacional pela EPE – Empresa de Pesquisa Energética, bem como os sistemas de geração de energia elétrica não possuem nenhum tipo de regulação específica das agências governamentais, apesar de possuir função crítica nas plataformas de exploração e produção, a regulação existente deve atender diversas normas de construção, projeto, segurança, estatutárias e as pertinentes à bandeira existente na embarcação.

Dentre estas normas, podemos citar a IEC (*International Electrotechnical Commission*) 60034 (ISO 8528-3) e as determinadas pela Sociedade Classificadora. Este conjunto normativo prescreve as condições de projeto e aplicação em unidades fixas e móveis na indústria marítima, portanto há oportunidades de melhoria da eficiência energética em um universo de 100 unidades da indústria do petróleo que operam em águas brasileiras (IBP, 2021). Neste cenário, os campos marítimos produziram 97,2% do petróleo e 81,7% do gás natural no Brasil, a média para o mês de setembro de 2021 (ANP, 2021).

Os grupos motores geradores são utilizados nas mais diversas aplicações devido à sua confiabilidade, eficiência, versatilidade e facilidade de manutenção. Eles se destacam na indústria *offshore* nos sistemas de geração de energia.

Estudos de inúmeras variáveis que influenciam os conjuntos motores geradores são essenciais para os usuários. Estudos que buscam verificar a potencialidade de aproveitamento das fontes de energia a fim de otimizar ou substituir (parcialmente e/ou totalmente) os combustíveis fósseis, com vistas às fontes menos poluentes e mais eficientes em motores de combustão estão sendo realizados. No ambiente acadêmico há uma carência de pesquisas de ensaios

característicos para emissões atmosféricas, para a melhoria de desempenho e validação de sintonias em grupos motor geradores que fornecem dados para avaliação do ciclo de vida destes equipamentos.

1.2 Justificativa

Há informação limitada na literatura para o desenvolvimento de metodologias de sintonização dos controladores e de ensaios de grupos moto geradores, validando as características de projeto, aumentando o potencial mecânico e elétrico, reduzindo o consumo de combustível e contrapondo o ciclo de vida, inclusive a decisões de investimentos com base nos dados reais de performance do sistema.

A Plataforma semi-submersível P-65, localizada no Campo de Enchova – Bacia de Campos, apresenta uma planta de tratamento (água e óleo) de 27.000 m³/dia. O óleo, depois de tratado, apresenta um teor inferior a 1% de água, e a água descartada para o mar apresenta um teor de óleo inferior a 20 ppm. Está ancorada em lâmina d'água de 110 m, a 95 km da cidade de Macaé no estado do Rio de Janeiro. O sistema de geração de energia elétrica da unidade dispõe de conjuntos motores geradores e acessórios disponíveis para avaliação das características do projeto de controladores que utilizam a técnica PID (proporcional integral derivativo) para os motores de combustão interna da plataforma. Esta pesquisa se apresenta como alternativa para sintonizar os controladores, satisfazendo a necessidade do setor industrial e as necessidades das empresas do setor de petróleo *offshore*.

1.3 Delimitações do Tema

Propõe-se a sintonia de um controlador PID que seja capaz de realizar acelerações e desacelerações do conjunto motor gerador, atuando diretamente no controle do fluxo de combustível que entra na câmara de combustão, onde seja possível parametrizar as variáveis de controle PID e seja capaz de manipular a variável de saída a partir das variáveis de entrada mantendo a estabilidade do sistema e reduzindo sobrepassos positivos e negativos sempre que houver variações de carga. Acredita-se que seja possível a implementação deste sistema,

contribuindo assim a preservação de seus componentes elétricos, mecânicos e aumentando a eficiência energética. Neste cenário, as perguntas de pesquisa que norteiam o início do presente trabalho são as seguintes:

- Como analisar e representar o comportamento dinâmico do grupo motor gerador?
- Como otimizar o controlador existente no sistema grupo motor gerador?

1.4 Objetivo Geral

Desenvolver uma sintonia PID para o controlador de um grupo motor gerador elétrico da plataforma semi-submersível P-65 da Petrobras com a utilização de algoritmos de otimização por enxame de partículas e de evolução diferencial.

1.4.1 Objetivos Específicos

- Obtenção do modelo simplificado do grupo motor gerador;
- Formulação de um problema de otimização para desenvolver a sintonia PID do controlador de um MCI (motor de combustão interna) acoplado a um gerador elétrico;
- Configuração do sistema de aquisição de dados e a interface gráfica;
- Desenvolvimento de um modelo de controle do grupo motor gerador usando Matlab/Simulink que permita realizar simulações numéricas e avaliar o desempenho da sintonia através do seguimento de trajetória e da análise comportamental das respostas a perturbações do sistema de potência; e
- Demonstração experimental com aplicação real no grupo motor gerador dos parâmetros PID obtidos pelos algoritmos de otimização PSO e DE, realizando ensaios característicos para o seguimento de trajetória do sistema de potência. Com avaliação das variáveis pressão e temperatura do MCI.

1.5 Organização da Dissertação

Os capítulos seguintes desta dissertação se organizam da seguinte maneira:

- O capítulo 2 apresenta o levantamento bibliográfico e as contribuições mais relevantes que esta pesquisa traz para o setor industrial e o setor de petróleo *offshore*;
- O capítulo 3 conceitua e caracteriza os componentes, sistemas e variáveis envolvidas nesta pesquisa;
- O capítulo 4 descreve uma modelagem não linear simplificada com representação a partir de uma função de transferência de um servossistema, apresenta o desenvolvimento de um controlador PID no qual serão implementadas diferentes sintonias: otimização por enxame de partículas, otimização por evolução diferencial, e suas variações de aprendizagem por oposição (OBL), e PID *Tune*. Este capítulo também apresenta os resultados e discussões preliminares das simulações realizadas com a ferramenta Matlab/Simulink;
- O capítulo 5 apresenta a implementação dos parâmetros PID encontrados no capítulo 4 no controlador de carga e velocidade do grupo motor gerador elétrico. Neste capítulo também se apresentam os resultados para o seguimento de trajetória quando perturbações no sistema de potência são inseridas, assim como discussões para as variáveis elétricas, de temperatura e de pressão;
- O capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões de trabalhos futuros e publicações realizadas, o capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas; e
- Os anexos apresentam documentação complementar para validação das argumentações, estas estão referenciadas no texto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o levantamento bibliográfico e contribuições do trabalho quanto às técnicas de controle e os tipos de sintonia utilizados.

2.1 Modelagem do Grupo Motor Gerador

Em 1984 Koustas e Watson (KOUSTAS e WATSON - 1984) desenvolveram um controlador via software para testes transitórios de motores a diesel no qual um dinamômetro foi utilizado com excitação por tensão pulsada para resposta rápida. Um motor de passo foi utilizado para controle da aceleração a partir da geração de pulsos via software. O projeto traz um controlador PID adaptativo com um mapa que relaciona três dimensões: excitação do sistema, rotação e torque.

Nos ciclos de testes foram apresentados resultados para entradas do tipo degrau no controle de velocidade, analisando a potência gerada e as capacidades de rejeição de perturbações, com ênfase especial na interação entre as características do motor e do sistema de controle. Os objetivos alcançados foram uma resposta rápida, boa precisão, repetibilidade, flexibilidade para testar diferentes mecanismos, custo mínimo de hardware e registro rápido e simultâneo de dados para fins de pesquisa (KOUSTAS e WATSON - 1984).

Em 1995 Weeks e Moskwa (WEEKS e MOSKWA - 1995) utilizaram softwares de simulação gráfica para avaliar a dinâmica de sistemas de controle. O uso de métodos de controle baseados em modelos, projetados para atender futuros regulamentos de emissão e diagnóstico, aumentou a necessidade de uso de modelos de motores validados.

A técnica de controle utilizou um modelo de mecanismo preditivo de torque médio não linear previamente validado, o qual foi convertido em MATLAB/SIMULINK para ilustrar os benefícios de um ambiente de simulação gráfica. O modelo simula um motor de ignição por centelha com injeção de combustível e inclui a dinâmica do ar, do combustível e do EGR (*exhaust gas recirculation*) no coletor de admissão,

bem como os atrasos de processo inerentes a um motor de ciclo de quatro tempos. O modelo do motor pode ser usado de cinco maneiras:

- Como um modelo de mecanismo não real para testar algoritmos de controle do mecanismo;
- Como um modelo de mecanismo em tempo real para testes de *hardware-in-the-loop*;
- Como um modelo incorporado dentro de um algoritmo de controle ou observador;
- Como um modelo de sistema para avaliar modelos de sensores e atuadores do motor; e
- Como um subsistema em um modelo de *powertrain* ou dinâmica de veículo.

Embora desenvolvido e validado para um motor específico, o modelo é genérico o suficiente para ser usado em uma ampla gama de motores de ignição por centelha (WEEKS, e MOSKWA - 1995).

Bunker em 1997 (BUNKER, *et al*, 1997) apresentou o projeto de um controlador multivariável de um sistema dinamométrico de motor diesel acoplado não linear. A meta de desempenho foi maximizar o rastreamento de curvas pré-especificadas de velocidade e torque do motor, reduzindo as variações de saída devido a não-linearidades e incertezas do sistema.

As dificuldades em controlar sistemas dinamométricos de motores diesel incluem o elevado número de ciclos, atrasos nos primeiros momentos da combustão, incertezas de combustão e não linearidades de motores. A sintonia do controlador utilizou um modelo representativo a partir de quatro funções de transferência com parâmetros variáveis que relacionam as saídas desejadas de torque e rotação com a posição do atuador e tensão do dinamômetro. As soluções padrão de alto ganho e alta largura de banda não podem ser usadas para esse

projeto, pois o sistema contém atrasos puros e a implementação do controlador tem limitações de taxa de amostragem.

Ainda no trabalho de Bunker, os modelos de motor-dinamômetro usados no projeto do controlador foram desenvolvidos a partir de técnicas de estimação espectral e respostas ao degrau, onde os efeitos das não-linearidades do sistema foram considerados por amostragem. Os controladores foram implementados em um motor a diesel de 8,3 litros com turbocompressor e dinamômetro de correntes parasitas mantido na *Cummins Engine Company, Columbus*. Os controladores foram avaliados com base na capacidade do sistema em malha fechada de rastrear as entradas de velocidade e torque durante o período de tempo em que ocorrem as transições (BUNKER, *et al*, 1997).

Yanakiev em 1998 descreve o aumento da eficiência e da qualidade do processo de teste de motores a diesel em células de teste automatizadas. Os autores concluíram que as plantas dinamométricas de motores não lineares, fortemente acopladas, podem ser controladas com mais sucesso através da aplicação de técnicas multivariadas em vez de usar controladores PID independentes. No entanto, as soluções existentes não são aplicáveis a uma multiplicidade de cenários de testes, justificando assim esforços adicionais.

Neste trabalho, apresenta-se uma abordagem de controle adaptativo baseado em modelo (MRAC – *Model Reference Adaptive Control*) para o problema de controle de velocidade e torque do motor. Em particular, a lei de atualização de parâmetros é derivada usando a teoria da estabilidade de Lyapunov (D. YANAKIEV, 1998).

Ogata descreve um servossistema projetado para ser utilizado em um sistema de controle, como mostrado na figura 4, (OGATA, 2010).

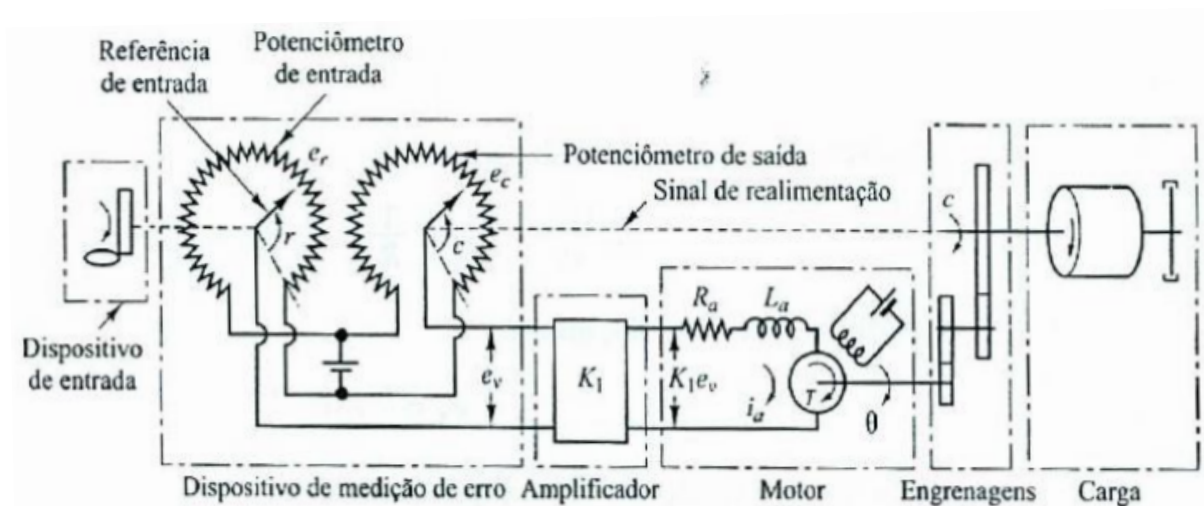


Figura 4: Servossistema em um sistema de controle. Fonte: (OGATA, 2010).

Um par de potenciômetros atua como dispositivo detector de erros, convertendo as posições de entrada e saída em sinais elétricos. O dispositivo de entrada determina a posição angular r do braço cursor do potenciômetro de entrada, compondo a referência do sistema. A posição do eixo de saída determina a posição angular c do cursor do braço do potenciômetro de saída. A diferença entre a posição angular de entrada r e a posição angular de saída c é o sinal de erro e ,

$$e = r - c. \quad (1)$$

A diferença de potencial $e_r - e_c = e_v$ é o erro da tensão, onde e_r é proporcional a c ; isto é, $e_r = k_0 r$ e $e_c = k_0 c$, onde k_0 é a constante de proporcionalidade. O erro de tensão que aparece nos terminais do potenciômetro é amplificado pelo amplificador cuja constante de ganho é k_1 . A tensão de saída do amplificador é aplicada ao circuito da armadura do motor c.c. Uma tensão fixa é aplicada ao enrolamento de campo. Se existir erro o motor desenvolve um torque para girar a carga, de modo que reduza o erro a zero. Para a corrente de campo constante, o torque desenvolvido pelo motor é:

$$T = k_2 i_a, \quad (2)$$

onde k_2 é a constante de torque do motor e i_a é a corrente de armadura.

Quando a armadura gira, uma tensão proporcional ao produto do fluxo pela velocidade angular é induzida na armadura. Para um fluxo constante, a tensão induzida e_b é diretamente proporcional à velocidade angular $\frac{\partial\theta}{\partial t}$,

$$e_b = k_3 \frac{\partial\theta}{\partial t} \quad (3)$$

onde e_b é a fcm (força contra eletromotriz), k_3 é a constante de fcm do motor e θ é o deslocamento angular do eixo do motor.

De forma a obter a função de transferência entre o deslocamento angular θ do eixo do motor e a tensão de erro e_v aplica-se o conceito de que a velocidade de um servomotor c.c. controlado pela armadura é controlada pela tensão da armadura e_b (a tensão da armadura $e_b = k_1 e_v$ é a saída do amplificador). A equação diferencial do circuito de armadura é,

$$R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a}{dt} + e_b = e_a \quad (4)$$

A equação de equilíbrio de torque é,

$$J_0 = \frac{d^2\theta}{dt^2} + b_0 \frac{d\theta}{dt} = T = k_2 i_a, \quad (5)$$

onde J_0 é o momento de inércia da combinação motor, carga e o conjunto de engrenagens, referente ao eixo do motor, e b_0 é o coeficiente de atrito viscoso do conjunto motor, carga e conjunto de engrenagens do referido eixo do motor. Eliminando i_a das equações 4 e 5, obtém-se (OGATA, 2010),

$$\frac{\theta(s)}{E_v(s)} = \frac{K_1 K_2}{s(L_a s + R_a)(J_0 s + b_0) + (K_2 K_3)s} \quad (6)$$

Supondo que a relação de engrenagens seja tal que o eixo de saída gira n vezes para cada volta do eixo do motor, temos:

$$C(s) = n\theta(s) \quad (7)$$

A relação entre $E_v(s)$, $R(s)$ e $C(s)$ é:

$$E_v(s) = K_0[R(s) - C(s)] = K_0E(s) \quad (8)$$

O diagrama de blocos deste sistema pode ser construído a partir das equações 6, 7 e 8, conforme figura 5. A função de transferência do ramo direto desse sistema é:

$$G(s) = \frac{C(s)}{\theta(s)} \frac{\theta(s)}{E_v(s)} \frac{E_v(s)}{E(s)} = \frac{K_0K_1K_2n}{s[(L_a s + R_a)(J_0 s + b_0) + K_2K_3]} \quad (9)$$

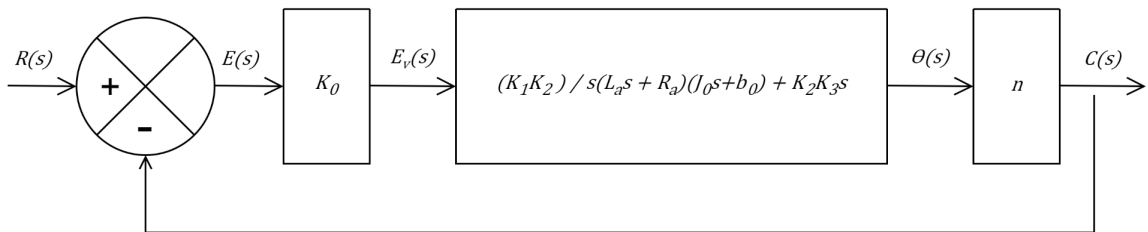


Figura 5: Diagrama de blocos de um servossistema. Fonte: (Adaptado de OGATA, 2010).

Quando L_a é pequeno, pode ser desprezado e a função de transferência $G(s)$ do ramo direto torna-se:

$$G(s) = \frac{K_0K_1K_2n}{s[R_a(J_0s + b_0) + (K_2K_3)]} = \frac{K_0K_1K_2n/R_a}{J_0s^2 + (b_0 + \frac{K_2K_3}{R_a})s} \quad (10)$$

O termo $[b_0 + (\frac{K_2K_3}{R_a})]s$ indica que a fcm do motor aumenta efetivamente o atrito viscoso do sistema. A inércia J_0 e o coeficiente de atrito viscoso $b_0 + \frac{K_2K_3}{R_a}$ referem-se ao eixo do motor.

Quando J_0 e $b_0 + \frac{K_2K_3}{R_a}$ são multiplicados por $1/n^2$, a inércia e o coeficiente de atrito viscoso são expressos em termos do eixo de saída. Assim, podem ser introduzidos os seguintes parâmetros:

$J = J_0/n^2$: momento de inércia referente ao eixo de saída

$B = [b_0 + \frac{K_2 K_3}{R_a}] / n^2$: coeficiente de atrito viscoso referente ao eixo de saída

$$K = K_0 K_1 K_2 / n R_a$$

A função de transferência $G(s)$ dada pela equação 10 pode ser simplificada, resultando em (Ogata, 2010):

$$G(s) = \frac{K}{Js^2 + Bs} \quad \text{ou} \quad G(s) = \frac{k_m}{s(T_m s + 1)}$$

$$\text{Onde } k_m = \frac{K}{B}, \quad T_m = \frac{J}{B} = \frac{R_a J_0}{R_a b_0 + K_2 K_3}$$

O diagrama de blocos do sistema indicado na figura 5, pode ser simplificado como mostra a figura 6.

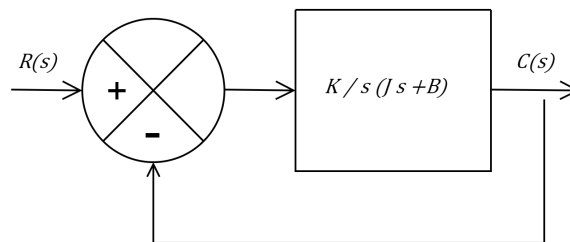


Figura 6: Diagrama de blocos simplificado de um servossistema. Fonte: (Adaptado de OGATA, 2010).

Quevedo, *et al.* (QUEVEDO, 2012) aplica o que foi descrito por (Ogata, 2010) em um exemplo em que o motor fornece um deslocamento de saída para uma tensão de entrada. A figura 7(a) demonstra o sistema eletromecânico e a figura 7(b) a representação de deslocamento de saída gerado por uma entrada elétrica.

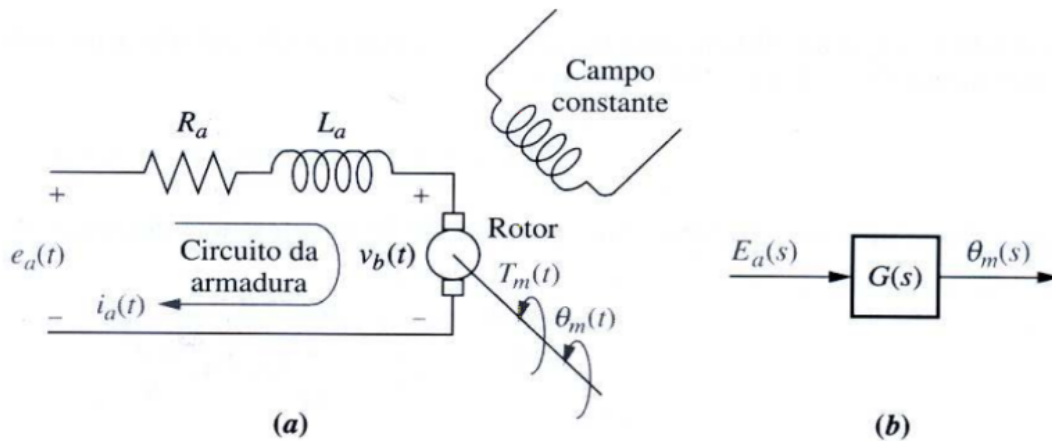


Figura 7: Representação de um sistema eletromecânico. Fonte: (QUEVEDO, 2012).

O campo magnético é produzido por ímãs permanentes estacionários ou por meio de um eletroímã estacionário chamado de campo fixo.

Um circuito rotativo denominado armadura, através do qual circula a corrente $i_a(t)$, corta o campo magnético segundo um ângulo reto e experimenta uma força $F = Bli_a(t)$, sendo B a intensidade do campo magnético e l o comprimento do condutor.

O torque resultante aciona o rotor, o qual é o elemento girante do motor, representado pela equação (11)

$$V_b(t) = K_b \frac{\partial \theta_m(t)}{\partial t}, \quad (11)$$

sendo $V_b(t)$ a força contra eletromotriz (fcem), K_b a constante de fcem e $\frac{\partial \theta_m(t)}{\partial t}$ a velocidade angular ($\omega_m(t)$).

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação 11, considerando-se as condições iniciais nulas, tem-se a equação 12,

$$V_b(s) = K_b s \theta_m(s), \quad (12)$$

A equação 13 mostra a transformada de Laplace, considerando-se as condições iniciais nulas, da equação de malha do circuito de armadura (vide equação 4),

$$R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + V_b(s) = E_a(s) \quad (13)$$

O torque produzido pelo motor é proporcional à corrente de armadura, conforme equação 14,

$$T_m(s) = K_t I_a(s) \quad (14)$$

sendo K_t uma constante de torque do motor.

Reescrevendo, tem-se a equação 15

$$I_a(s) = \frac{T_m(s)}{K_t} \quad (15)$$

Substituindo 12 e 15 em 13, tem-se a equação 16.

$$\frac{(R_a + L_a s) T_m(s)}{K_t} + K_b s \theta_m(s) = E_a(s) \quad (16)$$

A figura 8 demonstra o carregamento típico de um motor.

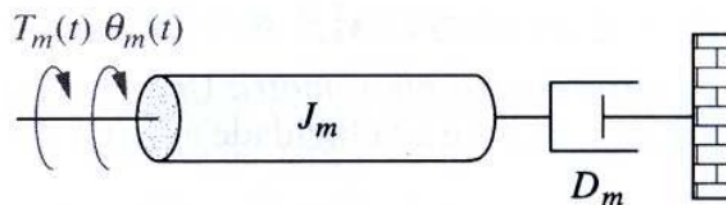


Figura 8: Carregamento típico de um motor. Fonte: (QUEVEDO, 2012).

A equação 17 representa o movimento de um motor, sendo J_m o momento de inércia equivalente na armadura e D_m o amortecimento viscoso equivalente na armadura.

$$T_m(s) = (J_m s^2 + D_m s)\theta_m(s) \quad (17)$$

Substituindo 17 em 16, tem-se a equação 18.

$$\frac{(R_a + L_a s)(J_m s^2 + D_m s)}{K_t} \theta_m(s) + K_b s \theta_m(s) = E_a(s) \quad (18)$$

Considerando $R_a \gg L_a$, tem-se a equação 19.

$$\left[\frac{R_a}{K_t} (J_m s + D_m + K_b) \right] s \theta_m(s) = E_a(s) \quad (19)$$

Dessa forma, é possível determinar a função de transferência desejada $\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)}$, conforme apresentado na equação 20,

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{\frac{K_t}{(R_a J_m)}}{s \left[s + \frac{1}{J_m} \left(D_m + \left(\frac{K_b K_t}{R_a} \right) \right) \right]} \quad (20)$$

A figura 9 demonstra um motor de inércia J_a e de amortecimento D_a na armadura acionando uma carga de inércia J_L e amortecimento viscoso D_L .

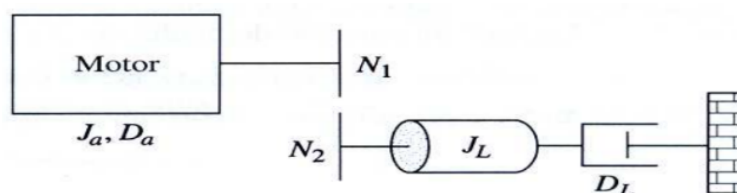


Figura 9: Variáveis de inércia e amortecimento de um sistema típico. Fonte: (QUEVEDO, 2012).

Considerando as impedâncias da carga para a entrada resulta na equação 21.

$$J_m = J_a + J_L \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2; D_m = D_a + D_L \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (21)$$

Considerando a equação 16, com $R_a \gg L_a$, tem-se a equação 22.

$$\left(\frac{R_a}{K_t} \right) T_m(s) + K_b s \theta_m(s) = E_a(s) \quad (22)$$

Aplicando-se a transformada inversa de Laplace na equação 22, tem-se a equação 23.

$$\frac{R_a}{K_t} T_m(t) + K_b \omega_m(t) = e_a(t) \quad (23)$$

Isolando-se $T_m(t)$, tem-se a equação 24

$$T_m(t) = - \frac{K_b K_t}{R_a} \omega_m + \frac{K_t}{R_a} e_a(t) \quad (24)$$

Da equação 24, encontra-se o torque de partida, conforme equação 25 e figura 10.

$$T_{bloq} = \frac{K_t}{R_a} e_a(t) \quad (25)$$

E a velocidade angular sem carga, conforme equação 26.

$$\omega_{vazio} = \frac{e_a(t)}{k_b} \quad (26)$$

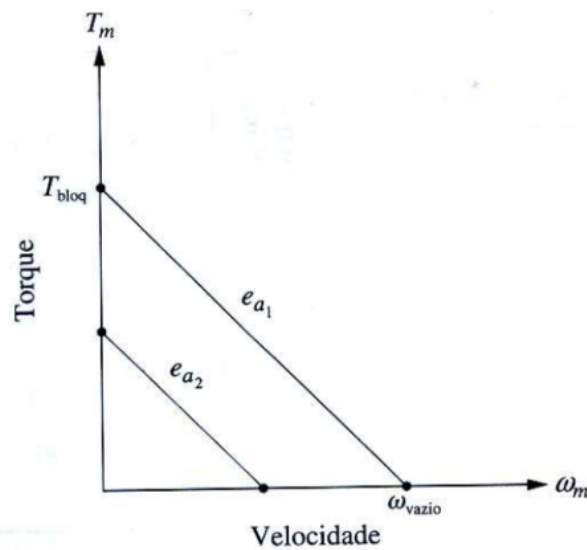


Figura 10: Correlação torque – velocidade. Fonte: (QUEVEDO, 2012).

As constantes elétricas da função de transferência do motor podem ser determinadas a partir de:

$$\frac{K_t}{R_a} = \frac{T_{bloq}}{e_a(t)} \quad \text{e} \quad K_b = \frac{e_a(t)}{\omega_{vazio}}$$

As constantes elétricas $\frac{K_t}{R_a}$ e K_b , podem ser determinadas a partir de um teste dinamométrico do motor, o qual forneceria T_{bloq} e ω_{vazio} para um dado valor de $e_a(t)$.

A título de exemplo, observe-se o sistema eletromecânico descrito na figura 11. A sua função transferência é obtida conforme a dedução e aplicação da equação 30, em termos de $\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)}$, como segue.

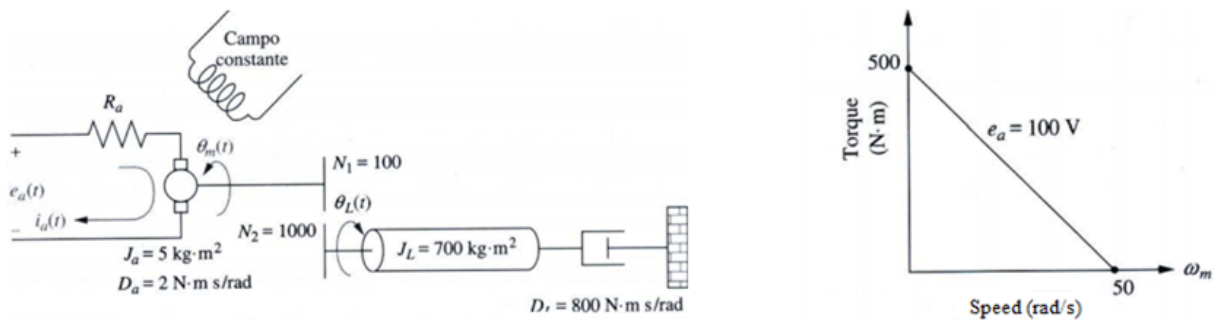


Figura 11: Sistema eletromecânico. Fonte: (QUEVEDO, 2012).

Inicialmente, calculam-se as impedâncias da carga e armadura do motor, conforme equações 27 e 28;

$$J_m = J_a + J_L \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = 5 + 700 \left(\frac{1}{10} \right)^2 = 12 \quad (27)$$

$$D_m = D_a + D_L \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = 2 + 800 \left(\frac{1}{10} \right)^2 = 10 \quad (28)$$

Da figura 11 tem-se a representação do gráfico de torque x velocidade; $T_{bloq} = 500$, $\omega_{vazio} = 50$, e $e_a(t) = 100$. Portanto, as constantes elétricas são:

$$\frac{K_t}{R_a} = \frac{T_{bloq}}{e_a(t)} = \frac{500}{100} = 5$$

$$K_b = \frac{e_a(t)}{\omega_{vazio}} = \frac{100}{50} = 2$$

Assim a função de transferência $\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)}$ da equação (22), resulta em,

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{5/12}{s[s + \frac{1}{12}(10 + (5)(2))]} \quad (29)$$

Para determinar $\frac{\theta_L}{E_a}$, usamos a relação $\frac{N_1}{N_2} = 1/10$, e resulta na função de transferência do sistema eletromecânico da equação (30) (QUEVEDO, 2012).

$$\frac{\theta_L}{E_a} = \frac{0.0417}{s(s+1.667)} \quad (30)$$

Esta função de transferência será usada no processo de sintonização do controlador PID através de algoritmos bioinspirados PSO, DE e suas respectivas variações de aprendizagem por oposição (OBL).

2.2 Ensaio de Bancada Dinamométrica

Gruenbacher entre 2003 e 2008 (GRUENBACHER, 2008) desenvolveu pesquisas aplicadas ao controle de bancadas dinamométricas e ao problema de rastreamento de trajetória para uma classe de sistemas não lineares caracterizados por estados e entradas estáticas - mapa não linear estático representativo do motor e posição do atuador do acelerador, torque e velocidade angular do dinamômetro, e por uma função não linear representativa das não linearidades do motor, central eletrônica, dentre outros.

O modelo utilizado é capaz de capturar as características essenciais de diversos sistemas reais, dentre eles o modelo de um banco de provas para motores a combustão interna (GRUENBACHER, 2008). O sistema descrito pertence à classe de sistemas Hammerstein que é caracterizado por uma parte estática não linear representativa das entradas do sistema seguido por um modelo dinâmico linear (BLOEMEN, *et al*, 2001). O problema de rastreamento de trajetória, torque e rotação, é realizado em duas etapas:

Na primeira etapa três técnicas de inversão de modelos foram utilizadas: cancelamento das dinâmicas internas, abordagem por inversão estável e rastreamento da saída através de sinais exógenos. As três inversões são adaptadas ao problema assumindo um conhecimento exato de seu modelo. Cada uma dessas técnicas assume a inversão de um mapa estático não linear, o que as tornam

imprecisas. Os erros associados a estas inversões são considerados como perturbações ao modelo e tratados na segunda etapa.

Na segunda etapa um compensador de retroalimentação de estados é introduzido no sistema a fim de torná-lo robusto devido à imprecisão do controle *feedforward* (inversão do mapa - primeira etapa). Dois tipos de compensadores foram utilizados. O primeiro responsável por compensar os erros da dinâmica do sistema (rápida). O segundo é responsável por realizar a adaptação do algoritmo de *feedforward* que inclui a inversão do modelo não linear (lento).

O controle por retroalimentação é de fundamental importância pois é o responsável por ajustar o erro de rastreamento da trajetória devido à imprecisão da inversão do modelo. A trajetória ótima, que deve ser seguida pelo sistema, é dada pelo modelo do *feedforward*. Gruenbacher descreve que o controlador tem sua ação limitada a fim de não afetar o sistema negativamente quando o erro de trajetória for zero, ou seja, quando a inversão do modelo é exata. Portanto, caso o sistema entre em uma região onde o modelo não pode ser invertido exatamente, como por exemplo um ponto do modelo inverso onde uma entrada corresponde a várias saídas, o controle por retroalimentação é utilizado, caso contrário o compensador não é utilizado.

O modelo representativo do sistema motor - dinamômetro é representado pelas equações 31, 32, 33 e 34 dos sistemas envolvidos: Motor de combustão interna, dinamômetro e acoplamento.

$$T'_{Eixo} = -\rho(m(\omega E, \alpha))TE + \rho(m(\omega E, \alpha), \omega E)m(\omega E, \alpha) \quad (31)$$

$$\Delta' \varphi = \omega E - \omega D \quad (32)$$

$$\omega' E = 1/\theta E (TE - c\Delta\varphi - d(\omega E - \omega D)) \quad (33)$$

$$\omega' D = 1/\theta D (c\Delta\varphi + d(\omega E - \omega D) - \eta 1) \quad (34)$$

$$\dot{\eta}1 = \eta2 \quad (35)$$

$$\dot{\eta}2 = -a0\eta1 - a1\eta2 + TDset \quad (36)$$

onde TE é o torque produzido pelo MCI, ωE , θE , ωD e θD são as velocidades angulares e momentos de inércia do MCI e do dinamômetro, respectivamente, ρ e a são a rigidez e o amortecimento do acoplamento, $\Delta\varphi$ é a diferença entre a posição do MCI e do dinamômetro, $\eta1$ e $\eta2$ são as variáveis representativas da dinâmica do dinamômetro e $a0$ e $a1$ são as constantes do modelo do dinamômetro.

Gruenbacher em 2008 (GRUENBACHER, 2008) demonstra através da análise dos pólos do sistema que, pelo fato da dinâmica do dinamômetro ser significativamente mais rápida do que a dos outros equipamentos, seu modelo dinâmico pode ser desprezado (equações 35 e 36). Com isso o sistema se reduz a quarta ordem (GRUENBACHER, 2008). A figura 12 apresenta o diagrama de blocos do sistema de controle.

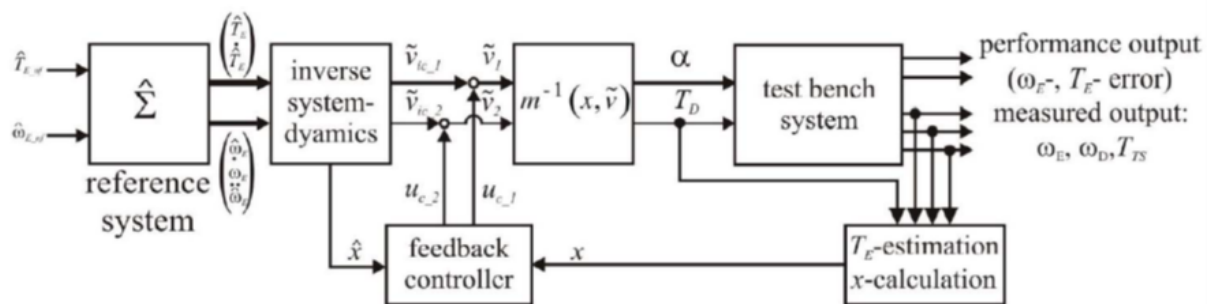


Figura 12: Diagrama de blocos do sistema de controle do conjunto dinamômetro - MCI.
Fonte: (GRUENBACHER, 2008).

A aplicação do sistema de controle desenvolvido em uma bancada de teste de motores dinâmica foi capaz de realizar testes transientes em um motor BMW M47D. As figuras 13 e 14 descrevem as curvas de torque e rotação, respectivamente, da resposta do sistema em relação a uma trajetória pré-determinada. Observa-se que o sistema foi capaz de seguir as trajetórias pré-determinadas dentro de uma pequena tolerância com relação a entrada tanto para torque quanto para rotação.

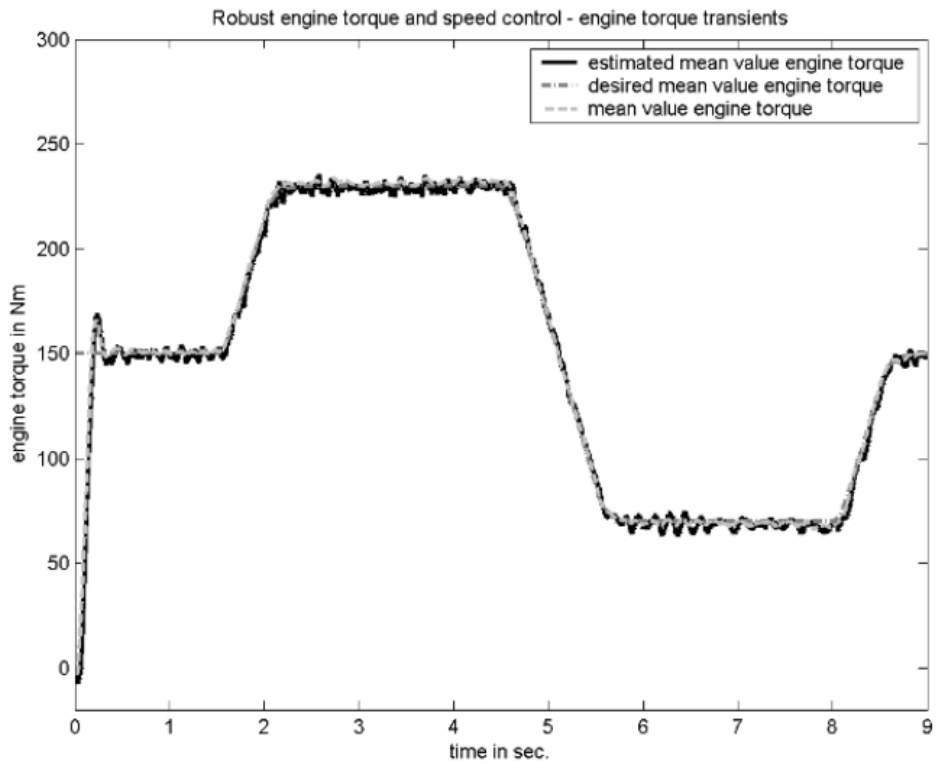


Figura 13: Resposta do seguimento de trajetória de torque do sistema de controle dinamômetro - MCI.
Fonte: (GRUENBACHER, 2008).

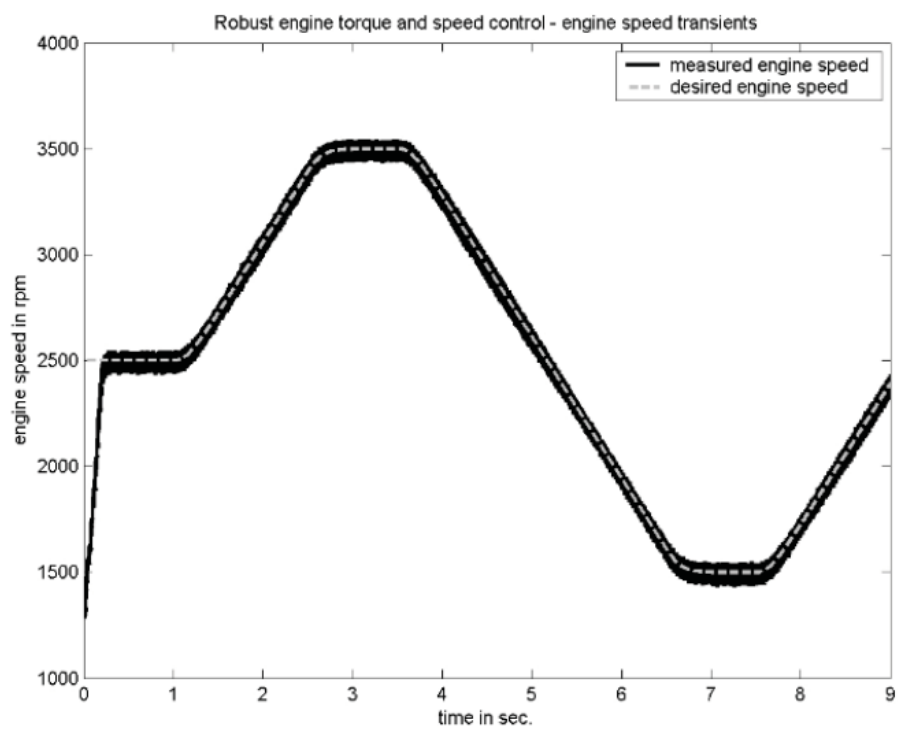


Figura 14: Resposta do seguimento de trajetória de rotação do sistema de controle dinamômetro-MCI.
Fonte: (GRUENBACHER, 2008).

Cezar em 2012 (CEZAR, 2012), construiu e integrou equipamentos e instrumentos, em sua grande maioria nacionais, através do desenvolvimento de um sistema de controle que é capaz de operar o conjunto motor de combustão interna - bancada dinamométrica (elétrico - corrente alternada). A solução apresentada contribuiu com a redução de custos dos bancos de prova e, ao mesmo tempo, possibilitou a realização de testes confiáveis. Os autores descrevem as etapas do projeto e construção de uma bancada para ensaios de motores até 175 cv, 587 Nm e 4620 rpm, e apresentam resultados de testes conduzidos a fim de verificar o comportamento do banco de provas em diferentes situações de operação. Os resultados obtidos mostraram que o sistema é capaz de realizar com precisão e robustez os mais diversos ensaios aos quais um banco de provas está sujeito.

Ainda no trabalho de Cezar (CEZAR, 2012), observou-se que os testes de seguimento de trajetória (rotação) se mostraram eficientes para qualquer valor de referência configurado na interface do usuário, conforme visto na figura 15. Destaca-se que o sistema proposto é capaz de realizar os ciclos de emissões proposto pela norma europeia e atender a ETC – *European Transient Cycle*.

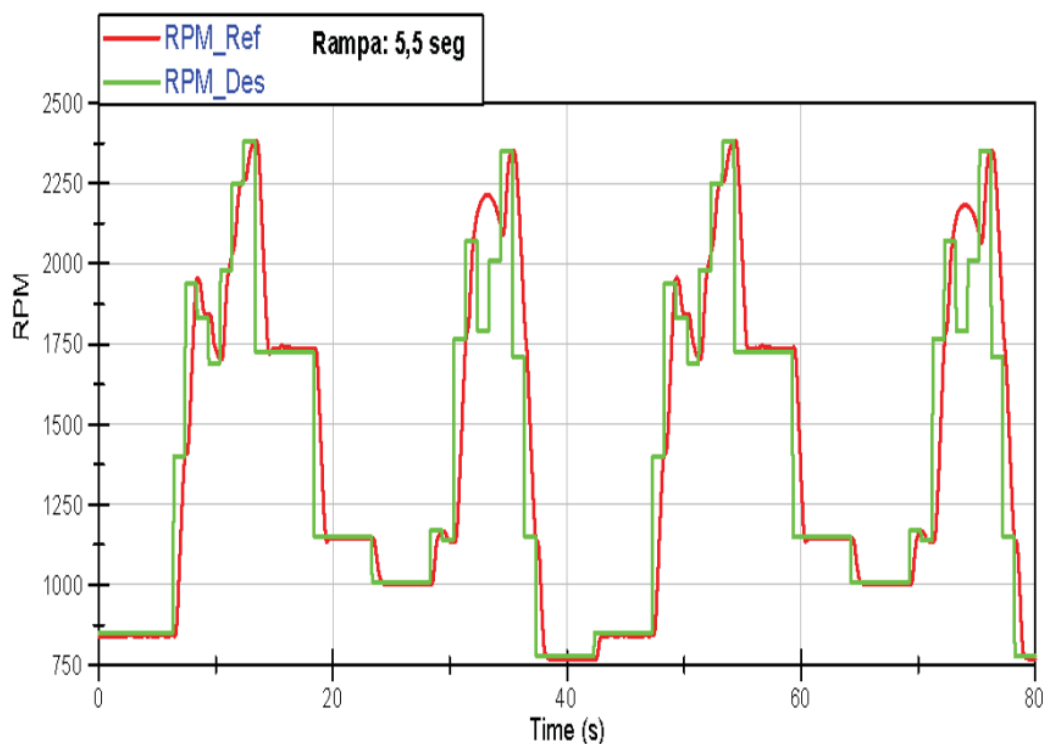


Figura 15: Resposta de rotação, para uma rampa de 5,5s. Fonte: (CEZAR, 2012).

A pesquisa traz considerável relevância uma vez que com o aumento das restrições às emissões e uma busca contínua pela melhora no desempenho dos motores a combustão interna, agrega-se valor e amplia-se as alternativas de modelos de ensaios de motores de combustão interna (Adaptado de CEZAR, 2012).

Albuquerque em 2015 (ALBUQUERQUE, 2015) apresenta a automatização de um dinamômetro hidráulico instalado na cabine de testes de motores de combustão interna do laboratório de máquinas térmicas da Universidade de Brasília. O dinamômetro é operado por meio de um controlador analógico que comanda o freio do equipamento pela variação da pressão interna gerada pelo vórtice da água no circuito hidráulico. A pressão interna, por sua vez, é controlada por uma válvula borboleta acoplada a um servo motor de corrente contínua comandado por um controlador PID analógico.

O estudo de Albuquerque buscou substituir o sistema analógico por um sistema de controle digital. Para entender o funcionamento do dinamômetro, os autores levantaram seu modelo usando a teoria unidimensional integrada e a modelagem do fluxo de vórtice simplificado. A automatização do dinamômetro é implementada com microcomputador em um sistema supervisório SCADABR que se comunica com subsistemas de medição de torque e de rotação digitais, e um subsistema de controle do servomotor CC implementado com micro-controlador Arduino. O controle do dinamômetro é implementado com um algoritmo de controle com ganho Proporcional Derivativo, sintonizado por meio do segundo método de Ziegler-Nichols (ALBUQUERQUE, 2015), vide figura 16.

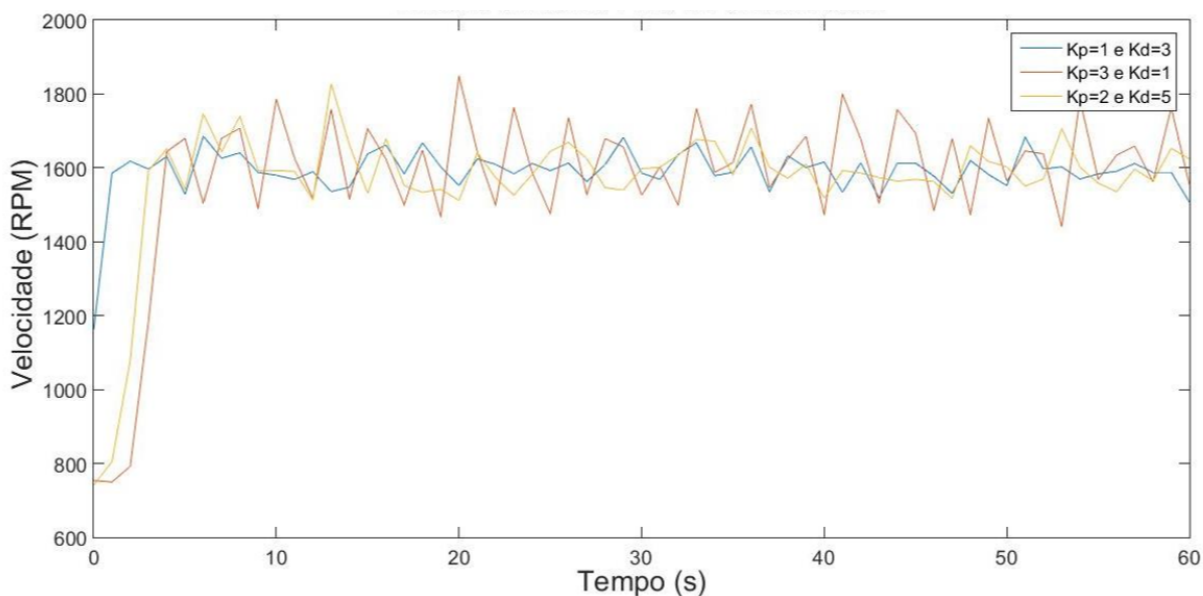


Figura 16: Sintonia fina do controle PD para controle de rotação.
Fonte: (Adaptado de ALBUQUERQUE, 2015).

A figura 16 apresenta resultados parciais para a variável rotação e os valores mais adequados para os parâmetros de controle, e apresenta a comparação entre três ensaios variando os parâmetros proporcional (K_p) e derivativo (K_d) para rotação desejada de 1500 RPM. O sistema foi usado no ensaio de velocidade constante de um motor Diesel e os resultados, comparados com o sistema analógico, apresentaram respostas mais rápidas nos testes de altas e baixas rotações do motor. O sistema desenvolvido se mostrou robusto e versátil e permitirá a implementação de novos tipos de ensaios no dinamômetro (Adaptado de ALBUQUERQUE, 2015).

2.3 Conclusões do Capítulo

O levantamento bibliográfico apresentado neste capítulo mostrou as diversas formas para o controle das variáveis dos motores de combustão interna, seja em ambiente de simulação e ou em ensaios dinâmicos. A análise do levantamento bibliográfico demonstra que a técnica de controle mais utilizada é o controle PID – Proporcional, Integral e Derivativo. As técnicas de sintonia dos controladores utilizam mapeamento das funções de transferência, modelos de referência, compensadores e determinação de ganhos. A tabela 1 mostra um quadro comparativo dos principais trabalhos estudados selecionados na literatura científica. A eq. (30), proposta por (OGATA, 2010), e posteriormente exemplificada por

(QUEVEDO, 2012), será aplicada como modelo do grupo motor gerador usado nesta pesquisa, o qual é detalhado no seguinte capítulo.

Tabela 1: Comparativo das pesquisas selecionadas.

Ano de Publicação	Autor	Objetivos	Técnica de Controle	Tipo de Sintonia
UNB / 2015	ALBUQUERQUE, Luiz E. N.	Automatização de um dinamômetro hidráulico para ensaios de motores de combustão interna - MCI.	MCI com Dinamômetro Hidráulico PID - Proporcional, Integral e Derivativo.	Ziegler - Nichols.
PUC-RJ / 2012	CEZAR, G. V.	Desenvolver um sistema de controle para bancos de prova de MCI.	MCI com Dinamômetro Elétrico - PID.	Ziegler - Nichols.
PR / 2012	Quevedo, C.	Modelagem de um sistema eletromecânico, conforme Ogata, 2010.		
RJ / 2010	OGATA, Katsuhiko.	Modelagem de um sistema de controle em um Servosistema.		
University linz, Áustria / 2008	Gruenbacher, E.	Controle inverso robusto de uma classe de sistemas não-lineares caracterizados por estados e entradas estáticas.	MCI com dinamômetro - Controle por retroalimentação.	Dois tipos de compensadores: 1 - Erros da dinâmica do sistema (rápida); 2 - Adaptação do algoritmo de retroalimentação que inclui a inversão do modelo não linear (lento).
Cummins Engine Co. Inc., Columbus, IN, USA / 1998	Yanakiev, D.	Controle adaptativo de sistemas de MCI's ciclo diesel - Dinamômetro.	MCI com dinamômetro - MRAC - <i>Model Reference Adaptive Control</i> , utilizando a teoria de estabilidade de Lyapunov.	Modelo de referência, alterados conforme tipos de ensaios.
West Lafayette - USA / 1997	Bunker, B.J; Franchek, M. A and Thomason, B.E.	Controle multivariável de um sistema MCI - Dinamômetro.	MCI com Dinamômetro de Correntes Parasitas (Focault) - QFT - <i>Quantitative Feedback Theory</i> .	Estimação do modelo representativo a partir de quatro funções transferência com parâmetros variáveis (relacionar as saídas desejadas torque e rotação com posição do atuador e tensão do dinamômetro).
Wisconsin - USA 1995	Weeks, R. W. and Moskwa, J.J.	Modelagem de MCI's para controle em tempo real, utilizando Matlab/Simulink.	Predição de torque do MCI, baseados em modelos físicos.	Programação modular para modelos.
Imperial College - UK / 1984	Koustas, J. and Watson, N.	Atualização de Hardware e Software para operações complexas, dentre elas testes de transientes no controle de ensaios de MCI.	MCI com Dinamômetro de Correntes Parasitas (Focault) - PID adaptativo.	Mapa com um vetor de três dimensões (rotação, torque e excitação do sistema), utilizando interpolação linear.

3 GRUPO MOTOR GERADOR

Neste capítulo apresenta-se as características do motor de combustão interna, do gerador elétrico, do controlador de carga e velocidade, da malha de instrumentação e do sistema de aquisição de dados usado nesta pesquisa.

3.1 Visão Geral do Grupo Motor Gerador

A figura 17 apresenta o diagrama de blocos que representa o grupo motor gerador. As suas principais características são as seguintes:

- O motor de combustão interna é do tipo ciclo a diesel. A malha de instrumentação está interligada a um CLP (Controlador Lógico Programável) do fabricante Telemecanique – Schneider, modelo TSX Modicon;
- Gerador elétrico trifásico em corrente alternada, interligado a sistema de potência com predominância de cargas indutivas. Os parâmetros elétricos do gerador são monitorados por relé de proteção inteligente do fabricante *General Electric* – GE, modelo 489 Multilin;
- Controlador de velocidade e carga analógico. O *setpoint* de velocidade é fixo e definido em 1200 rpm, a variável de processo é monitorada por sensor magnético tipo *pick up*;
- Barramento Modbus. Os dados do grupo motor gerador são transferidos do relé Multilin e CLP - TSX via protocolo de comunicação Modbus a um CLP central do fabricante *General Electric* – GE, modelo 9030;
- Barramento Ethernet – O barramento *Ethernet* concentra a leitura e escrita de dados no CLP central para os sistemas supervisórios;
- SDCD – Sistema digital de controle distribuído é do fabricante *General Electric* – GE, modelo *Cimplicity* e realiza a interface do operador com o grupo motor gerador; e

- *PI-System* - Ferramenta de aquisição de dados que foi utilizada para criar as telas gráficas e armazenar os dados do grupo motor gerador, fabricante OSIsoft. Dados capturados do SDCD Cimplicity.

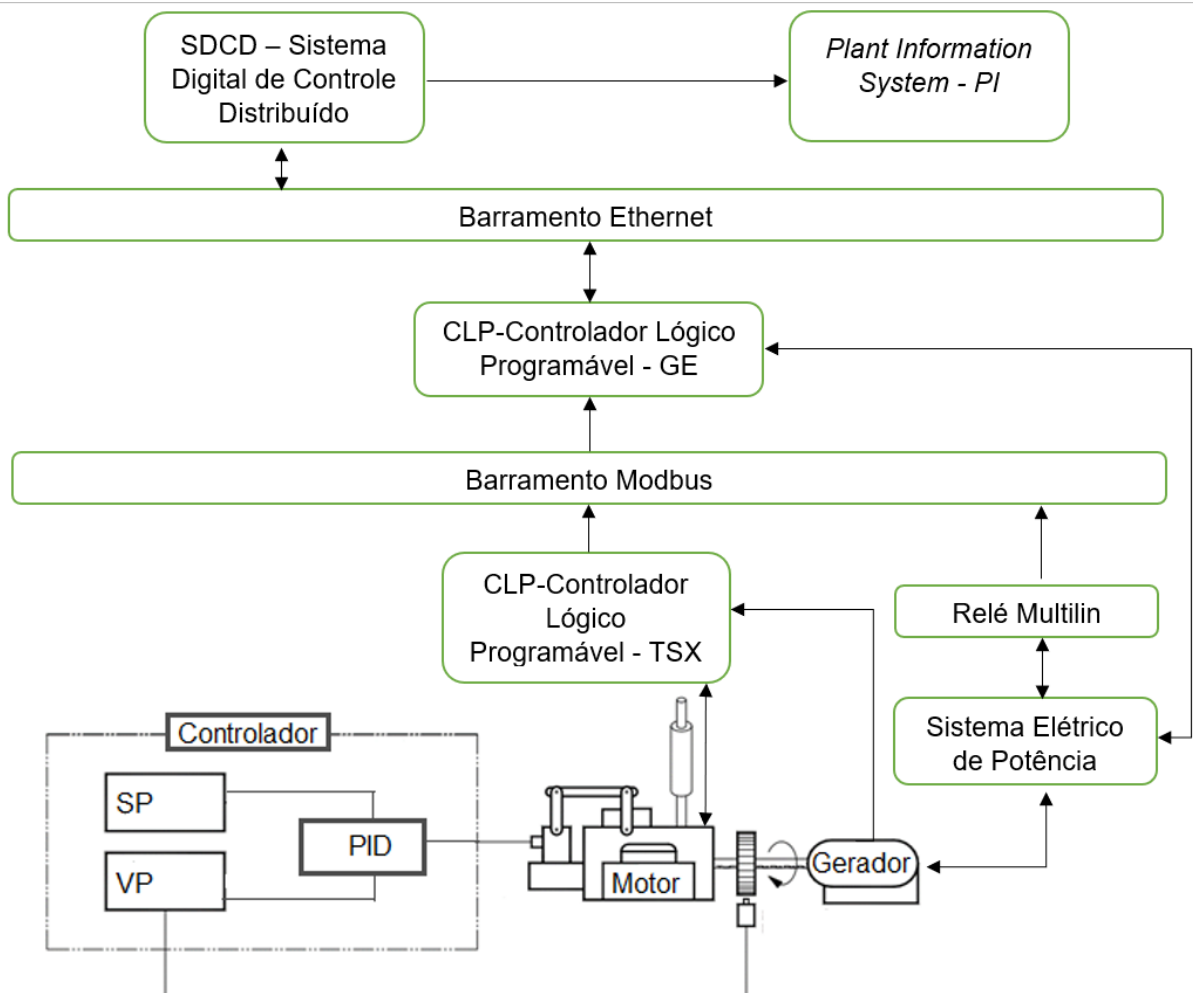


Figura 17: Visão geral do grupo motor gerador.

3.2 Motor de Combustão Interna – MCI

Os motores de combustão interna são amplamente utilizados no transporte e na indústria, representando grande parte do consumo energético das nações e contribuindo de forma significativa para a contaminação atmosférica dos centros urbanos. Os esforços da comunidade científica nacional e internacional, que atualmente realiza atividades de pesquisa e desenvolvimento relacionadas a estas máquinas térmicas, estão sendo direcionados para melhorar cada vez mais sua

eficiência térmica e reduzir suas emissões de poluentes e estudar os efeitos do uso de combustível (Adaptado de WHEALS et al., 1999).

Os motores de combustão interna são classificados em relação ao ciclo de funcionamento em dois tipos: ciclo Otto e ciclo Diesel. O ciclo de funcionamento é o conjunto de transformações na massa gasosa que ocorre no interior dos cilindros, desde sua admissão, até a eliminação para o meio ambiente. O ciclo Otto foi descrito por Nikolaus A. Otto (1876) e o ciclo Diesel por Rudolf Diesel (1893).

Ambos os ciclos podem ser completados em dois ou quatro cursos do pistão, quando o motor completa o ciclo em dois cursos do pistão é chamado de motor de dois tempos e quando completa o ciclo em quatro cursos é chamado motor de quatro tempos.

Destaca-se ainda que os MCI são conhecidos de forma genérica de motores de explosão (ciclo Otto) ou combustão (ciclo Diesel). Tendo essa qualificação, apesar de frequente, não é tecnicamente correta. O que acontece no interior das câmaras de combustão não é uma explosão de gases, logo, o aumento da pressão interna da câmara, decorrente da combustão (queima controlada com frente de chama).

O que se pode chamar de explosão (queima descontrolada sem frente de chama definida) é uma detonação dos gases, que deve ser evitada ou controlada nos motores de combustão interna, a fim de adaptar maior durabilidade dos mesmos e menores taxas de emissões de poluentes atmosféricos provenientes da dissociação de gás nitrogênio (KOLTON, 2004).

A energia comprimida no combustível é decomposta em energia mecânica por meio de uma reação química provocada pelas partes móveis do motor utilizando ou não centelha para ignição da mistura ar-combustível. A fundamental diferença entre os motores de ciclo Diesel e ciclo Otto é o fato de que no ciclo Diesel, como o próprio nome diz, emprega como combustível o óleo diesel, e a ignição da combustão (reação química) ocorre devido à grande temperatura do ar na câmara criada na compressão do ar. Por outro lado, no ciclo Otto, que além de ser

necessário uma compressão (menor se comparada ao ciclo Diesel), se faz imprescindível a aplicação de uma centelha de energia elétrica externa para que aconteça a ignição para se dar início à combustão.

3.2.1 Motor de Combustão Interna - Wartsila

O motor de combustão interna a diesel é de quatro tempos, com injeção direta no pistão, turboalimentado e com arrefecimento intermediário (água), com as seguintes características principais: Configuração em V, 12 cilindros, diâmetro interno dos cilindros 460 mm, velocidade 1200 rpm, velocidade média do pistão 9,9 m/s, 167 kW de potência por cilindro a 1200 rpm, 02 válvulas de entrada, 02 válvulas de saída, sentido de rotação virado para o volante (para a direita) e fabricante Wartsila. As figuras 18 e 19 apresentam uma visão geral do MCI Wartsila e a seguir se destacam as suas principais características.

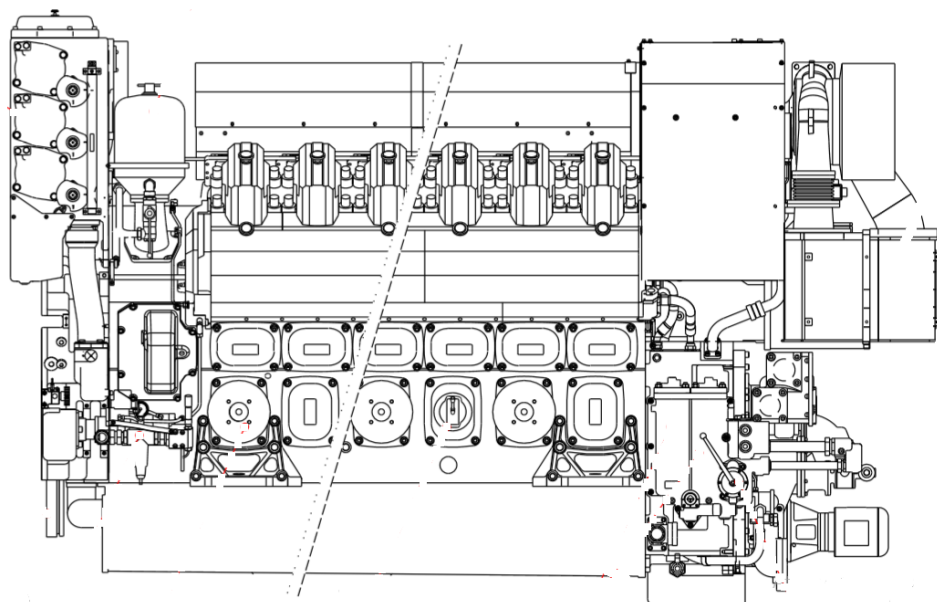


Figura 18: Visão geral do motor W200 Wartsila. Fonte: (MANUAL WARTSILA, 2019).



Figura 19: Motor de Combustão Interna Wartsila 12V-W200.

- Bloco do motor - é feito de ferro fundido modular e em uma única peça. O eixo virabrequim fica na parte baixa do bloco e assentado pelas tampas dos mancais principais. A admissão de ar é integrada ao bloco. As tomadas de água de refrigeração estão integradas no bloco do motor com canais diversos para resfriamento do conjunto. O óleo lubrificante é fornecido aos mancais e aos pistões para resfriamento através de um canal perfurado no meio do bloco do motor e o direcionamento é feito através de jatos de óleo direcionados. O acionamento do eixo de cames nas duas bancadas de cilindros está integrado ao bloco do motor. Há portas de inspeção para o eixo virabrequim e do eixo de cames nos dois lados do bloco do motor para facilitar a manutenção e limpeza do cárter.

A cabeça de cilindro apresenta duas válvulas de admissão e duas de escape por cilindro. A sede da válvula de exaustão é resfriada a água.

Há, como padrão, a bomba de água de resfriamento dupla e a unidade de bomba de óleo lubrificante, incluindo a bomba de óleo principal de combustão, a bomba elétrica de pré-combustão e a bomba de alimentação de combustível;

- Injeção de combustível - o sistema é baseado em bombas injetoras individualizadas por cilindros, bomba principal integrada ao bloco do motor e filtros primários e secundários;
- Lubrificação - o sistema de óleo lubrificante inclui o cárter, a bomba de óleo integrada ao bloco do motor, resfriador de óleo lubrificante (troca com água), filtros centrífugos e tipo cartucho e uma bomba elétrica para pré-lubrificação como requisito para partida;
- Refrigeração - consiste em dois circuitos: temperatura baixa (LT) e de temperatura alta (HT). A água de alta temperatura (HT) resfria uma parte do ar de carga, os cilindros, as cabeças dos cilindros e a parte não isolada do sistema de exaustão. A água de baixa temperatura (LT) resfria a extremidade do volante e o radiador de óleo.

Os dois circuitos de água de arrefecimento são circulados pela bomba centrífuga integrada ao bloco do motor. As temperaturas da água de resfriamento são controladas por válvulas termostáticas que estão instaladas na unidade de controle CW (*Cooling Water*), instalada na parte traseira do bloco do motor. Há um sistema de pré-aquecimento do motor, composto por bomba elétrica e conjunto de resistências, que mantém o conjunto aquecido para partidas imediatas entre 45°C e 54 °C.

Na unidade de controle CW, se a temperatura estiver "fria", a água será desviada para a bomba de água LT e, se a temperatura estiver "quente", a água será transferida para o resfriador central, a água resfriada volta para a bomba de água LT através da unidade de controle de água de refrigeração;

- Exaustão de gases e turboalimentação de ar - O ar de alimentação dos cilindros são conduzidos por turbinas e os gases de exaustão são conduzidos a partir da cabeça dos cilindros através de dutos e resfriados;
- Partida - é baseado em um motor de partida movido a ar comprimido e processo de injeção em rampa de combustível controlado a partir da identificação de 200 rpm; e
- Dispositivos de desligamento de emergência - é eletropneumático. O motor está equipado com um vaso de ar, em caso de emergência (sobrevelocidade, baixas pressões, temperaturas elevadas, detecção de partícula metálica no óleo e intertravamentos externos), uma válvula solenóide é energizada e o ar comprimido desse recipiente é despressurizado fazendo com que os avanços de injeção de combustível sejam ajustados no mínimo (Adaptado do MANUAL WARTSILA 12V-W200 Capítulo 01, 2019).

3.2.2 Protocolo de Testes - Wartsila 12 V 200 – W200

A legislação e as empresas cada vez mais se movimentam em busca da melhoria contínua da eficiência energética dos motores diesel que equipam veículos pesados e para o caso desta pesquisa sistemas de geração de energia elétrica em ambientes *offshore*, essa busca passa pela pesquisa e a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias, protocolos de ensaio e avaliação de desempenho. A medição de consumo de combustível com alta acuracidade em banco de provas de motores à combustão interna é complexa, devido a grande quantidade de condições de contorno as quais influenciam os resultados. Com base neste desafio as empresas desenvolvem protocolos de teste para determinar o consumo de combustível de motores diesel com alta precisão, em condições estacionárias e dinâmicas, reproduzindo ciclos representativos para aplicação em campo, suportando o desenvolvimento de novas tecnologias (Adaptado de EVERTON et al, 2017).

Os protocolos específicos para determinação de desempenho mecânico e de consumo específico, no qual os principais parâmetros de influência na variação

dos resultados são identificados e controlados, são amplamente utilizados na indústria. O fabricante Wartsila fornece protocolos de testes dos motores de combustão interna aos seus clientes. Sendo assim, o protocolo se apresenta como uma ferramenta importante para avaliação de desempenho, aumento da eficiência energética e identificação de falhas através de parâmetros pré-definidos de alarmes. A tabela 2, apresenta o protocolo de teste do motor de combustão interna e os valores de cada parâmetro encontrado nos ensaios de fábrica.

Tabela 2: Protocolo de teste - Wartsila 12V200 – W200 – MCI.
Fonte: (Adaptado do ANEXO A, 2019)

Protocolo de Teste do Fabricante do MCI - Wartsila			
Descrição	Unidade	Valor do Parâmetro	
Velocidade do conjunto MCI - Dinamômetro	rpm	1200	1200
Ponto de teste	%	25	50
Potência	kW	483	1005
Pressão de combustível após a bomba	bar	6,2	6,1
Pressão de ar de admissão	bar	0,4	1,1
Pressão de óleo lubrificante após o filtro	bar	4,7	4,6
Pressão de água de refrigeração saída	bar	0,65	0,65
Pressão de água de refrigeração entrada	bar	1,2	1,2
Temperatura de óleo lubrificante	°C	65	65
Temperatura de entrada de combustível	°C	49	50
Temperatura de ar de admissão	°C	59	61
Temperatura de água de resfriamento - saída	°C	72	81
Temperatura de água de resfriamento - entrada	°C	47	48
Temperatura de exaustão cilindro A1	°C	344	376
Temperatura de exaustão cilindro A2	°C	353	392
Temperatura de exaustão cilindro A3	°C	327	368
Temperatura de exaustão cilindro A4	°C	316	358
Temperatura de exaustão cilindro A5	°C	339	388
Temperatura de exaustão cilindro A6	°C	360	401
Temperatura de exaustão cilindro B1	°C	362	405
Temperatura de exaustão cilindro B2	°C	343	381
Temperatura de exaustão cilindro B3	°C	342	384
Temperatura de exaustão cilindro B4	°C	339	373
Temperatura de exaustão cilindro B5	°C	347	388
Temperatura de exaustão cilindro B6	°C	356	402
Temperatura de exaustão média	°C	344	384,6

3.3 Gerador

O gerador elementar foi inventado na Inglaterra em 1831 por MICHAEL FARADAY, e nos Estados Unidos, mais ou menos na mesma época, por JOSEPH

HENRY. Este gerador consistia basicamente de um ímã que se movimentava dentro de uma espira, ou vice versa, provocando o aparecimento de uma f.e.m. registrado num galvanômetro (WEG, 2019).

3.3.1 Gerador Elétrico

O gerador elétrico trifásico utilizado nesta pesquisa apresenta as seguintes características principais: potência aparente 2.500 KVA, potência ativa 2000 kW, tensão 4.160 VAC, frequência 60Hz, corrente elétrica 347 A, rotação até 1800 rpm e fabricante Leroy Somer. A figura 20, apresenta a visão geral do gerador acoplado ao motor.

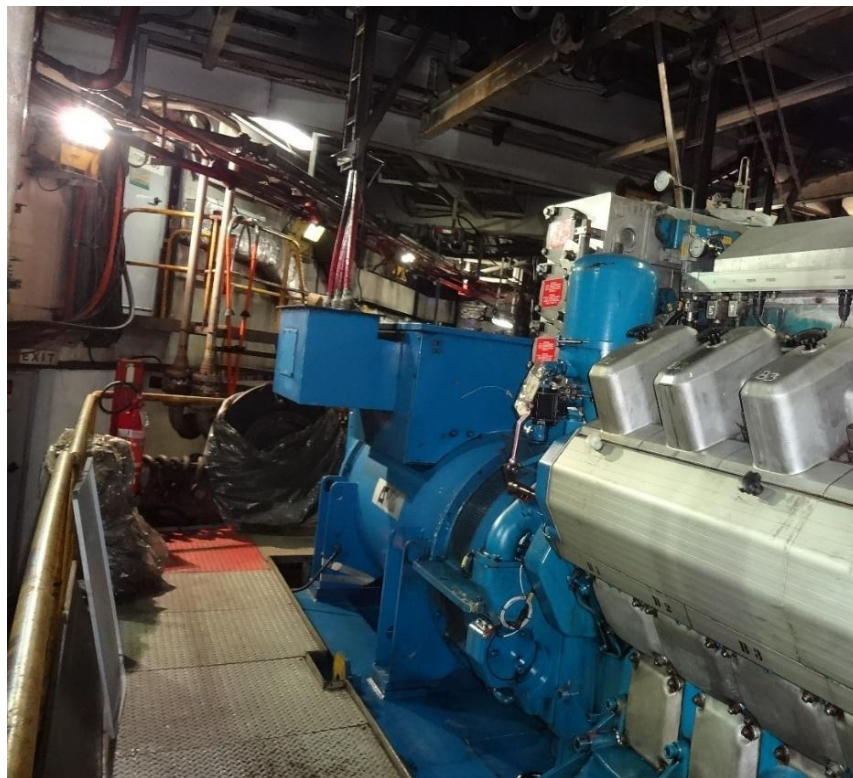


Figura 20: Visão geral de um gerador Leroy Somer.

O gerador elétrico é utilizado para submeter carga no motor testado. O gerador é interligado a um sistema de potência, e, ocorrendo perturbações de potência (acréscimo ou decréscimo), haverá variações de corrente elétrica e variações de injeção de combustível na unidade primária (motor de combustão interna).

3.3.2 Sistema de Potência Unifilar - Aplicação AC

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é constituído de 4 conjuntos Motor Gerador 12V200 da Wartsila ciclo diesel de média rotação (1200 rpm). Potência nominal de cada unidade 2 MW, potência instalada – 8 MW no total, tensão de saída – 4,16 kV, CA com frequência de 60 Hz. Subestação abaixadora 4,16 kV/480V é constituída de 2 transformadores de 1500 kVA. As cargas são predominantemente indutivas, as maiores cargas do sistema são 06 bombas de transferência de óleo cru saindo da plataforma via dutos submarinos até o terminal de Cabiúnas em Macaé-RJ. Cada bomba de transferência apresenta potência nominal de 1000 HP, conforme figura 21.

O SEP utilizado dispõe de dispositivos de desligamento de emergência que monitoram os parâmetros de tensão, potência e corrente e cujos limites são estabelecidos no relé inteligente Multilin, instalado na entrada do barramento de cada gerador. Na partida e em regime permanente do conjunto motor gerador impede o funcionamento em caso de alarme acima dos parâmetros seguros para operação .

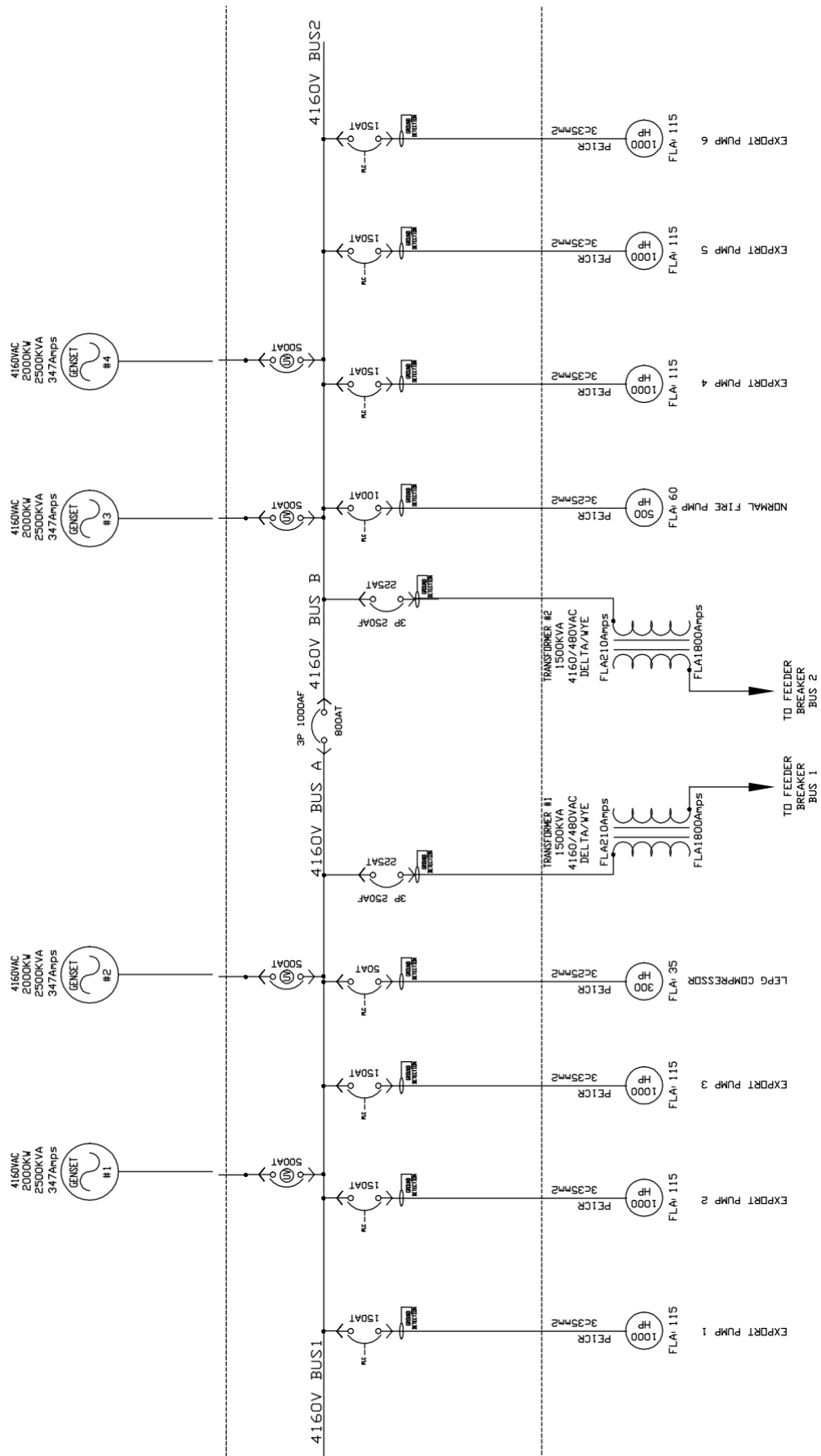


Figura 21: Diagrama unifilar do sistema elétrico de potência. Fonte:(Manual Unifilar, 2019)

3.4 Controlador

O Controlador de Velocidade 2301A, fabricado pela Woodward, controla a velocidade e a carga do motor a diesel no modo isócrono. O sistema de controle é definido pelos seguintes componentes, conforme figuras 22 e 23:

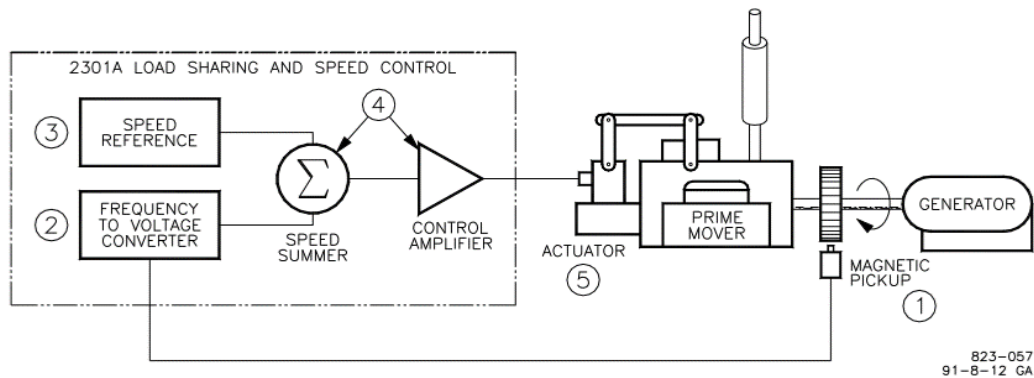


Figura 22: Representação do sistema de controle do conjunto motor gerador.
Fonte: (MANUAL DO CONTROLADOR, 2019).

1. Sensor magnético para detectar a velocidade do motor principal, gera um sinal CA com uma frequência proporcional à velocidade do motor primário;
2. Conversor de frequência para tensão para converter a frequência de sensor magnético em uma tensão para uso nos circuitos internos do módulo 2301A. O conversor de frequência para tensão recebe o sinal de frequência do sensor magnético e altera-o para uma tensão DC proporcional. O circuito de referência de velocidade gera uma tensão de referência CC a qual a tensão do sinal de velocidade é comparada;
3. Referência de velocidade do motor principal (1200 rpm). Uma referência de velocidade na qual a velocidade do motor principal é comparada. As referências de marcha lenta e nominal são fornecidas pelo Controle de Velocidade 2301A. A referência de velocidade usada é selecionada pelo operador com um interruptor externo;

4. Amplificador de velocidade com saída proporcional à quantidade de combustível necessário para manter a velocidade de referência e a carga do sistema de potência demandada. A tensão do sinal de velocidade é comparada com a tensão de referência no ponto de soma. Se a tensão do sinal de velocidade for menor ou maior que a tensão de referência, um sinal é enviado pelo amplificador de controle, solicitando um aumento ou diminuição da velocidade; e

5. Atuador para posicionar o mecanismo de combustível (cremalheira do injetor) do motor primário, permitindo manter a velocidade de referência e a carga do sistema de potência demandada. A saída de corrente para o atuador das bancadas de injeção de combustível inicia a abertura com 20 mA e alcança uma abertura total com 160 mA.

No modo isócrono os controladores de velocidade são utilizados nos sistemas de potência para regular a velocidade do motor e, portanto, a frequência da tensão do gerador síncrono, no qual ocorreu alguma perturbação. Essa perturbação ocorre constantemente, pois a demanda de potência é variável. É um modo no qual é possível realizar o controle da potência e frequência de um sistema e para que a velocidade seja mantida no valor desejável é necessário que a potência gerada seja igual à potência da carga.

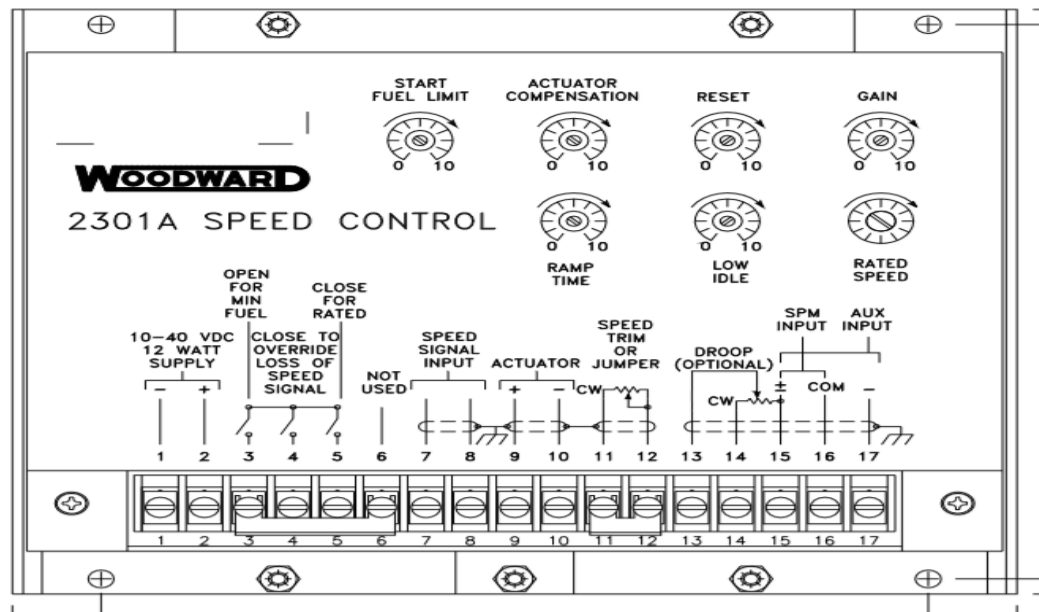


Figura 23: Controlador de carga e velocidade. Fonte: (MANUAL WOODWARD, 2019).

O Controlador de Velocidade 2301A fabricado pela Woodward controla a velocidade ou a carga de motores a diesel ou a gás e turbinas a vapor ou a gás. O controle é alojado em um chassi de chapa metálica e consiste em uma única placa de circuito impresso. Todos os potenciômetros são acessíveis pela frente do chassi, e os ajustes PID para respostas do atuador são: *Gain* – Proporcional, *Reset* – Integral e *Rated Speed* - Derivativo.

O Controlador de Velocidade 2301A fornece controle no modo isócrona com *droop* disponível através de um potenciômetro externo (opcional). Como mencionado, o modo isócrona é usado para manter a velocidade constante do motor controlado, desde que ele seja capaz de fornecer a carga e também é usado quando se compartilha a carga com um sensor de carga Woodward. Por outro lado, o *droop* externo é usado para controle de velocidade como uma função de carga quando um motor primário está operando em um barramento infinito ou quando dois ou mais motores principais estão em operação paralela (opcional).

Dispositivos de desligamento de emergência são estabelecidos de acordo com as referências de velocidade de partida. Nesta pesquisa foram usadas as seguintes referências: em 200 rpm o atuador posiciona o mecanismo de injeção de combustível na posição mínima, em 600 rpm posiciona até atingir 1200 rpm e

mantém controle nesta referência. Em regime permanente ou na partida ao atingir 1300 rpm despressuriza o sistema de controle provocando o desligamento do motor, em caso de falha e a rotação continuar subindo até 1350 rpm será acionado o fechamento dos dampers do motor impedindo a admissão de ar e conseqüente forçando o desligamento do motor.

A figura 24 apresenta os gráficos de resposta característicos para o controle de velocidade e potência, e seus ajustes recomendados a serem configurados no módulo de controle de velocidade 2301.

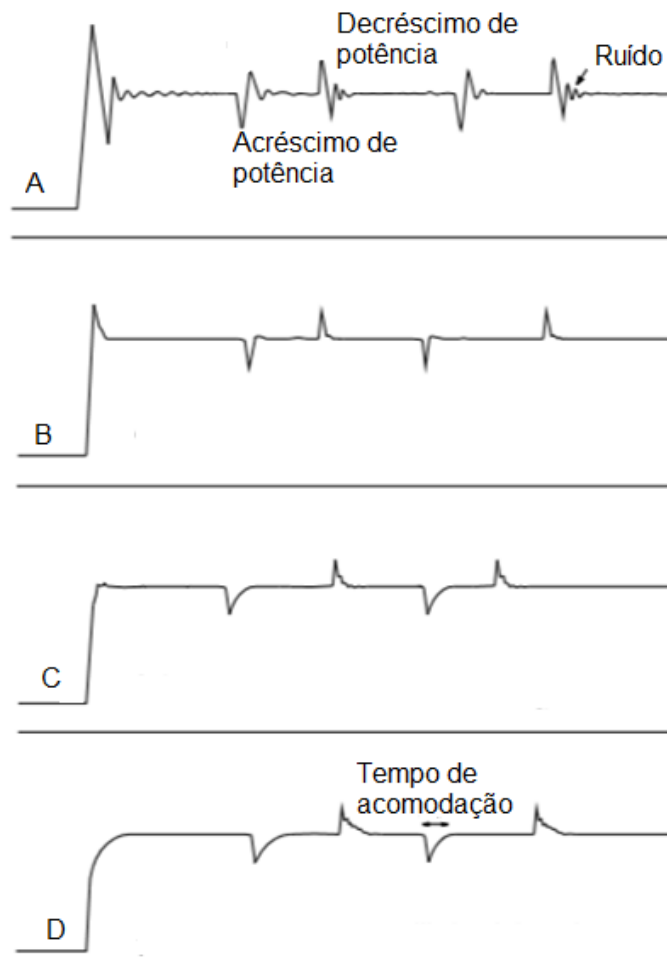


Figura 24 – Curvas de desempenho do motor diesel com controlador de velocidade e potência 2301.

Fonte: (Adaptado de MANUAL WOODWARD, 2019)

- A figura 24A apresenta Gain muito alto e reset muito baixo, conseqüentemente grande sobrepasso na partida e nas oscilações de potência – Amortecimento baixo;
- A figura 24B apresenta ótimo desempenho nas oscilações de potência com leve sobrepasso na partida – Amortecimento ideal;
- A figura 24C apresenta ótimo desempenho na partida com leve extensão de tempo nas oscilações de potência – Amortecimento ideal; e
- A figura 24D apresenta *reset* muito alto, conseqüentemente longo tempo para se ajustar à velocidade nominal – Amortecimento elevado.

3.5 Sistema de Supervisão

A partir das entradas dos elementos primários o programador lógico controlável processa de acordo com o programa implementado e determina saídas de controle e monitoramento, por sua vez os dados que trafegam através dos barramentos de comunicação fornecem aos sistemas supervisórios as informações de supervisão em telas gráficas. O sistema *plant information* captura os dados do sistema de supervisão e os dados são tratados e monitorados.

3.5.1 Supervisório PI – Plant Information

O PI - *Plant Information* é uma ferramenta de aquisição de dados desenvolvida pela empresa OSI, destinada à construção de sistemas de controle e automação. O objetivo do software PI é capturar, processar, analisar e armazenar qualquer tipo de dados para as devidas análises através de informações disponibilizadas por meio de telas gráficas com dados coletados a partir do sistema SDCD (OSISOFT, 2019). As telas de aquisição de dados (figuras 25, 26 e Anexo C) e foram construídas durante a elaboração desta pesquisa e forneceram os dados utilizados nos ensaios descritos no capítulo 5.

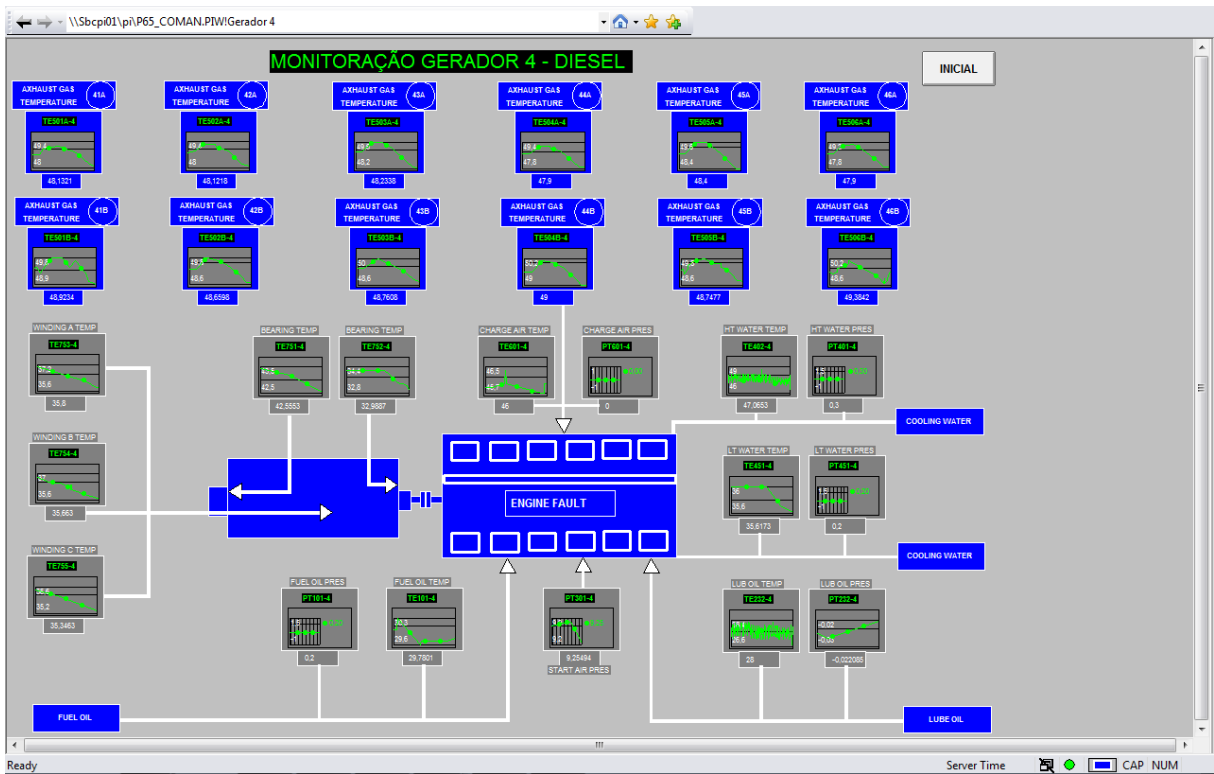


Figura 25: Tela de aquisição de dados do MCI.

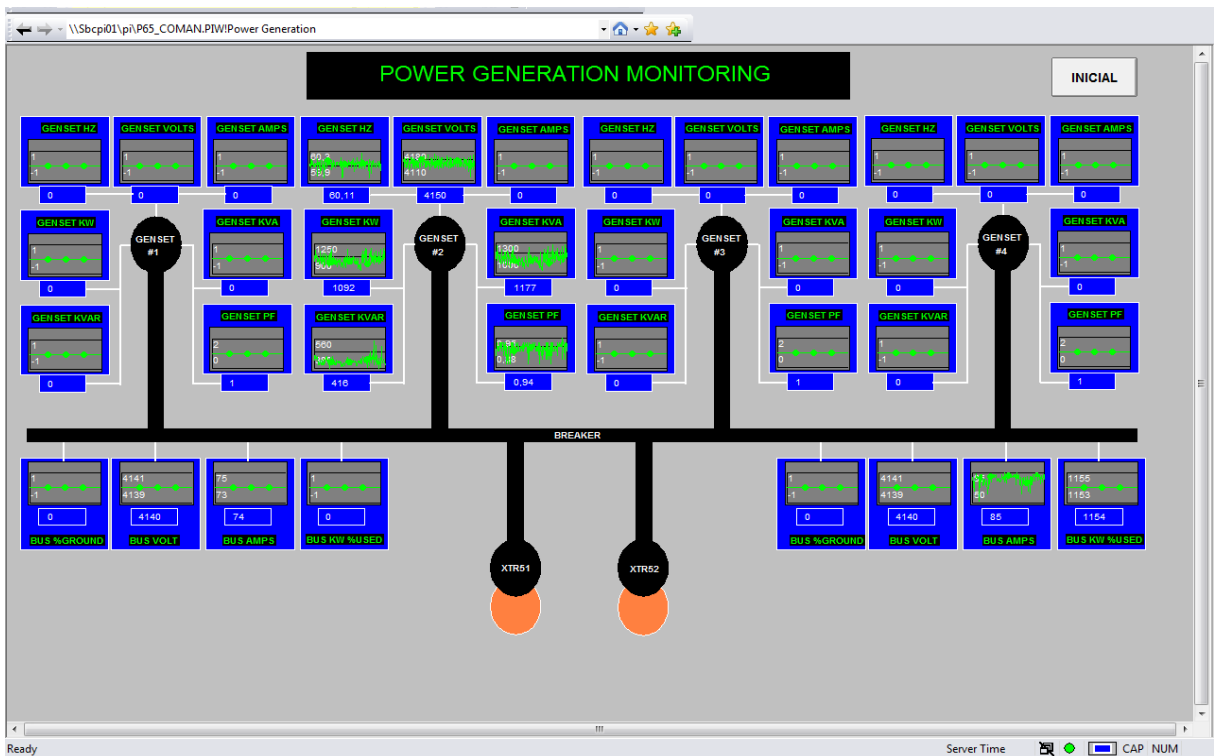


Figura 26: Tela de aquisição de dados do gerador.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados conceitos e caracterização geral do grupo motor gerador elétrico, dados fundamentais para realização dos ensaios de respostas às perturbações do sistema de potência utilizando as sintonias propostas neste trabalho. Os dispositivos de desligamento de emergência e o conhecimento dos valores dos parâmetros de fábrica para velocidade, pressão, temperatura, tensão, corrente e potência elétrica são fundamentais para que os ensaios sejam realizados de forma segura para as pessoas e para a instalação industrial. Adicionalmente, as curvas de desempenho do controlador, quando comparadas com as curvas e parâmetros das variáveis monitoradas pelo sistema de supervisão, apresentaram dados para uma possível validação da sintonia.

Neste trabalho será realizada uma sintonia de um controlador PID de um grupo motor gerador elétrico através de algoritmos de otimização por enxame de partículas e de evolução diferencial. O seguinte capítulo apresenta os conceitos do controlador PID, a formulação do problema de otimização matemática e a descrição dos algoritmos de otimização.

4 CONTROLADOR PID e ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos de controladores PID, os algoritmos PSO (*Particle Swarm Optimization*) e DE (Evolução Diferencial) e suas respectivas variações usando a técnica de aprendizagem por oposição. É apresentada a função custo que representa uma resposta esperada da planta do grupo motor gerador elétrico e uma discussão sobre o resultado do processo de otimização é realizada com base na comparação estatística do desempenho dos algoritmos.

4.1 Formulação do Problema de Otimização

A definição de otimização matemática é a capacidade de obter o melhor resultado possível dentro de um conjunto de soluções em um espaço finito ou infinito, visando minimizar os esforços ou maximizar os lucros. Para verificar se uma solução é ótima, é necessário obter uma representação matemática, chamada de “função objetivo” ou “função custo”, que permite avaliar cada solução. Esta representação é formada por uma ou várias variáveis de decisão e um conjunto de restrições que afetam o problema de otimização. Desta forma, o objetivo da otimização é encontrar o melhor valor ou valor aceitável da função custo (o maior valor numérico possível implica em maximização e o menor valor numérico possível implica em minimização) (SERAPIÃO, 2009).

Problemas que envolvem otimização global sobre espaços contínuos são onipresentes em toda a comunidade científica. Em geral, a tarefa é otimizar certas propriedades de um sistema escolhendo pertinentemente os parâmetros do sistema. Por conveniência, os parâmetros de um sistema geralmente são representados como um vetor. O padrão de abordagem para um problema de otimização começa por projetar uma função custo que pode modelar os objetivos do problema enquanto incorpora restrições (STORN e PRICE, 1995).

As funções custo usadas na sintonização de controladores em aplicações práticas geralmente são multimodais, o que dificulta a otimização pelo excesso de mínimos locais, tornando-as eficientes para avaliar o desempenho dos algoritmos de

otimização nas mais diversas situações. A seguir são apresentadas as principais funções teste utilizadas para a sintonização de controladores PID junto de suas principais características. Tais funções custo podem ser formuladas a partir das variáveis da resposta ao degrau unitário de uma planta a ser controlada, conforme figura 27, e a avaliação de desempenho pode ser medida em termos de:

- Sobrepasso (“A/B”) – Menor valor possível;
- Tempo de acomodação ou razão de declínio (“C/A”) – Igual a certo valor;
- Tempo de subida (T_s) – Menor possível; e
- Erro de estado estacionário – Igual a certo valor.

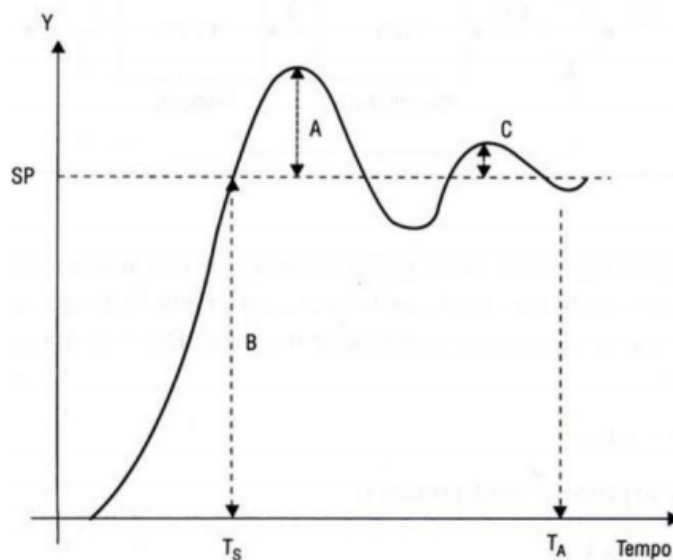


Figura 27: Resposta de um sistema PID em malha fechada. Fonte: (DE CAMPOS, 2006).

Dessa forma, a eq. (30) será utilizada como modelo do grupo motor gerador, a função custo é representada pela equação 37 e utilizada nos códigos aplicados nas simulações computacionais pelos algoritmos PSO, DE e suas variações.

$$F = e2 \times B + overshoot \times a \quad (37)$$

onde $e2$ é a integral do erro no tempo; B , $overshoot$ e a são definidos conforme o Anexo D.

4.2 Controle PID

O controle PID - proporcional, integral e derivativo - é uma das técnicas mais empregadas quando se deseja realizar o controle de variáveis contínuas. Consiste em um algoritmo matemático, que tem por função o controle preciso de uma variável em um sistema, permitindo ao sistema operar de forma estável no ponto de ajuste desejado, mesmo que ocorram variações ou distúrbios que afetam sua estabilidade (Munõz, 2017). A figura 28 representa o controlador PID inserido em um diagrama de blocos implementado nas simulações computacionais pelos algoritmos PSO, DE e suas variações.

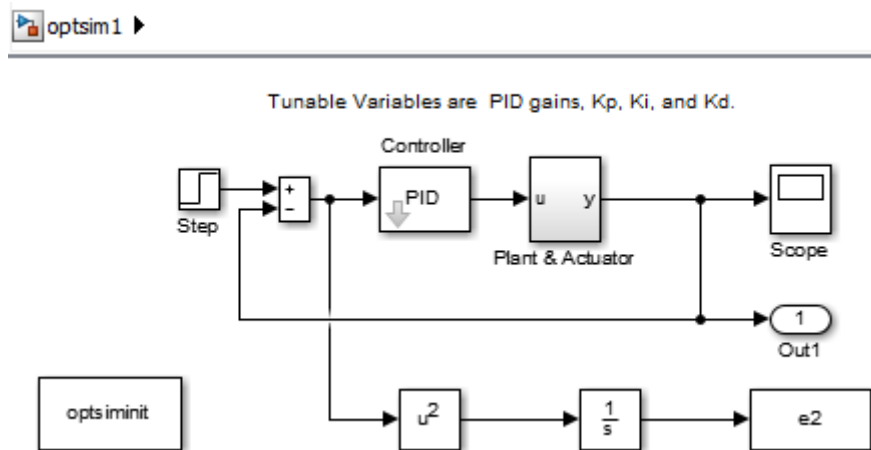


Figura 28: Diagrama de blocos controlador PID

Aplicação dos controladores PID podem ser encontradas em qualquer área que necessite de controle de variáveis contínuas como: velocidade, nível, pressão, vazão, temperatura, posicionamento, controle de tensão em fontes chaveadas, etc. O controle PID pode ser descrito pela equação 38:

$$MV = (Kp E) + Ki \int_0^t E dt + Kp Kd \frac{dE}{dt} S_0, \quad (38)$$

onde MV é a variável manipulada, Kp é o ganho proporcional, Ki é o ganho integral, Kd é o ganho derivativo, E representa o erro ou desvio, e S_0 é a saída inicial do controlador. O erro é a diferença entre o valor desejado (*setpoint*) e o valor real da variável, aplicado a uma planta, conforme figura 29.

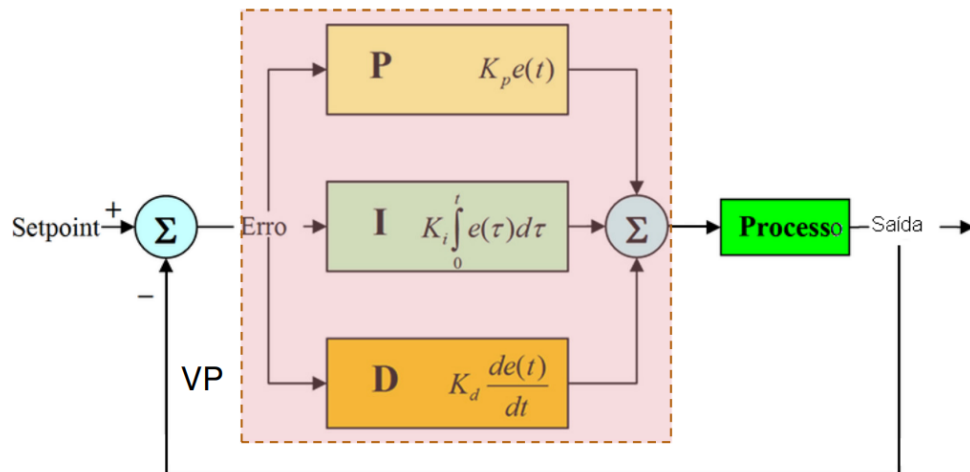


Figura 29: Diagrama de blocos de um controlador PID.

Fonte: (<https://embarcados.com.br/controle-pid-em-sistemas-embarcados/>, 2023).

A ação proporcional elimina as oscilações da variável, aproximando a saída do sistema do valor de referência (*setpoint*), porém não garante que a mesma alcance o valor desejado (*setpoint*). Esse desvio é denominado *off-set* e atua corrigindo o erro do sistema, multiplicando o ganho proporcional pelo erro, o qual pode ser positivo ou negativo, dessa forma agindo com uma maior amplitude de correção, conforme equação 39.

$$MV = K_p E \quad (39)$$

A ação integral atua integrando pequenos desvios ao longo do tempo, para os quais a ação de controle é pequena o suficiente para a planta não reagir. Dessa forma, quanto maior for o tempo de permanência do erro no sistema, maior será a amplitude da ação integral, conforme a equação 40.

$$MV = K_i \int_0^t E dt \quad (40)$$

A ação derivativa fornece ao sistema uma ação antecipativa, permitindo aumentar a velocidade de resposta quando o sistema é lento, conforme equação 41. Para sistemas de dinâmica rápida a ação derivativa costuma ser desativada.

$$MV = K_d \frac{dE}{dt} S_0 \quad (41)$$

4.3 Sintonia PID do Grupo Motor Gerador com PIDTUNE

Algoritmo de ajuste PID para o modelo linear da planta $C = \text{pidtune}(\text{sys}, \text{type})$ projeta um controlador PID do tipo type para o sistema da planta. O controlador é projetado para uma realimentação de ganho unitário, conforme figura 30.

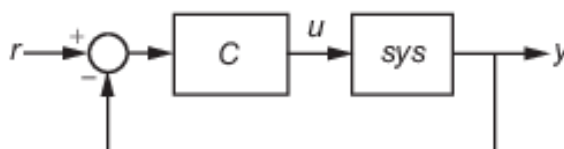


Figura 30: Diagrama do ciclo de feedback PID TUNE. Fonte: ÅSTRÖM AND HÄGGLUND, 2006

O PIDTUNE ajusta os parâmetros do controlador PID C para o equilibrar desempenho (tempo de resposta) e a robustez (margens de estabilidade). sys representa o modelo dinâmico do sistema e type o tipo de controlador projetado PIDF que contém os termos proporcionais, integradores e derivativos com filtro. C tem o mesmo domínio de tempo que sys . Os objetivos típicos de ajuste do PID incluem:

- Estabilidade em malha fechada: A saída do sistema de loop fechado permanece limitada para entrada limitada;
- Desempenho - O sistema de loop fechado rastreia as alterações de referência e suprime os distúrbios o mais rápido possível. Quanto maior a largura de banda do *loop*, mais rápido o controlador responde a alterações na referência ou distúrbios no *loop*; e
- Robustez - O projeto do *loop* tem margem de ganho suficiente e margem de fase para permitir erros de modelagem ou variações na dinâmica do sistema.

O algoritmo desenvolvido pela empresa *MathWorks* para sintonizar os controladores PID atende a esses objetivos, otimizando os ganhos do PID para alcançar um bom equilíbrio entre desempenho e robustez. Por padrão, o algoritmo escolhe uma frequência de *crossover* (largura de banda de loop) com base na

dinâmica da planta e projeta uma margem de fase alvo de 60° . Quando são alterados de forma interativa o tempo de resposta, largura de banda, resposta transitória ou margem de fase usando a interface PID Tune, o algoritmo calcula novos ganhos de PID. Em todos os casos, o ajuste fino do desempenho do sistema depende fortemente das propriedades da planta (ÅSTRÖM and HÄGGLUND, 2006).

A função de transferência, assumida como modelo para planta motor gerador representada pela eq. (30), foi aplicada em código de programa no Matlab e função PIDF e como resposta da sintonia apresentou os seguintes parâmetros: $P=40.1$, $I=3.94$ e $D=33.4$.

A figura 31 apresenta o gráfico de resposta do controlador PID a função degrau e aos parâmetros de P, I e D, sintonizado pelo PIDTUNE.

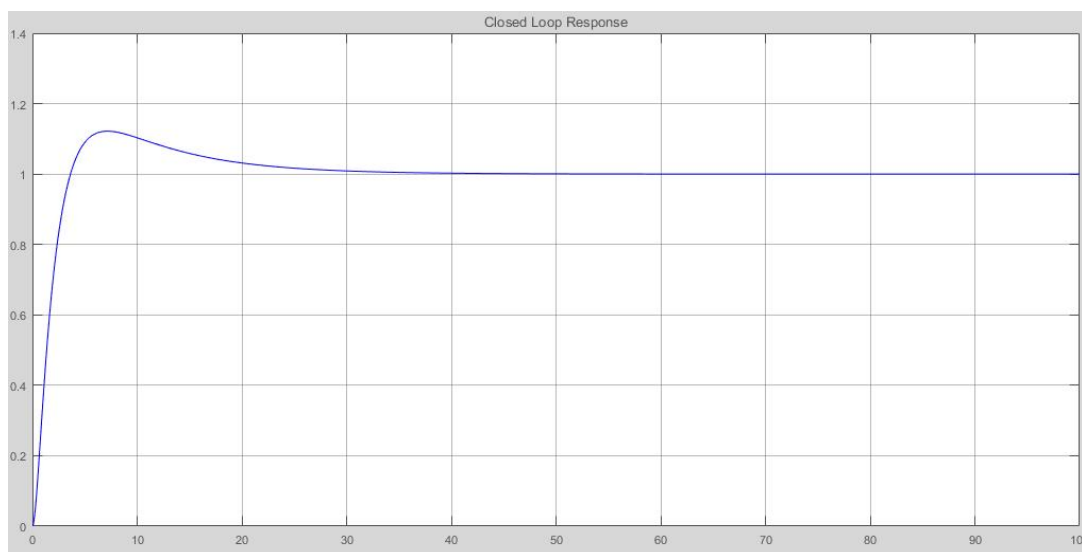


Figura 31: Resposta do controlador sintonizado com PIDTUNE.

Com base no gráfico da figura 31, é possível afirmar que o Algoritmo PIDTUNE apresenta soluções satisfatórias para a sintonia do controlador. Os tempos de subida e de estabilização ficam próximos de $3t$ e $25t$, respectivamente, e o erro de estado estacionário se mantém estável próximo ao *setpoint* de valor 1.

4.4 Sintonia PID do Grupo Motor Gerador com Algoritmos PSO e DE

Algoritmos bioinspirados são técnicas de otimização muito usadas nos últimos anos para resolver problemas complexos com múltiplas variáveis nos quais soluções robustas são difíceis ou impossíveis de encontrar usando métodos clássicos (baseados no cálculo do gradiente). Esse tipo de algoritmo imita o comportamento social de algumas espécies da natureza, mais precisamente de espécies que possuem inteligência coletiva. A característica principal destes algoritmos é o processo de interação entre os indivíduos do exame os quais estão baseados em regras simples, porém, usam suas capacidades de inteligência coletiva para realizar tarefas complexas (DIAGO, 2015).

4.4.1 Otimização por Enxame de Partículas - PSO

A técnica PSO (*Particle Swarm Optimization*) é um algoritmo de otimização inspirada no comportamento social do voo dos bandos de pássaros e também no movimento dos cardumes de peixes durante a busca por alimento. O algoritmo foi desenvolvido em 1995 por dois pesquisadores de duas áreas diferentes, o psicólogo social James Kennedy e o engenheiro Russell Eberhart (EBERHART & KENNEDY, 1995).

A inspiração natural deste algoritmo pode ser explicada da seguinte forma, seja um bando de pássaros que procura uma fonte de alimento em uma área delimitada, no início, os pássaros do bando voam aleatoriamente na área de busca e comunicam-se entre eles quando encontram uma nova fonte de alimento, ao interagir entre si, o enxame segue o pássaro que estiver mais perto da melhor fonte de alimento. O algoritmo PSO emula este comportamento para resolver problemas de otimização, de forma que as características fundamentais para seu funcionamento são o conhecimento individual, representado pelo histórico de cada partícula, e o conhecimento social, representado pelo histórico das partículas vizinhas (EBERHART & KENNEDY, 1995).

O algoritmo PSO básico pode ser descrito, de forma geral, como um conjunto de vetores que contém dados ligados à posição das partículas, as quais se movimentam em uma região ou área definida, vide figura 32. A nova posição de uma

partícula é definida por sua experiência particular, conhecida como memória individual, isto é, a partícula lembra-se da melhor posição determinada pela avaliação da função custo. Da mesma forma, a partícula é influenciada pela experiência global do enxame, conhecida como memória coletiva, ou seja, a partícula lembra a melhor posição do enxame determinada pela melhor aptidão ao ser avaliada na função custo (EBERHART e KENNEDY, 1995).

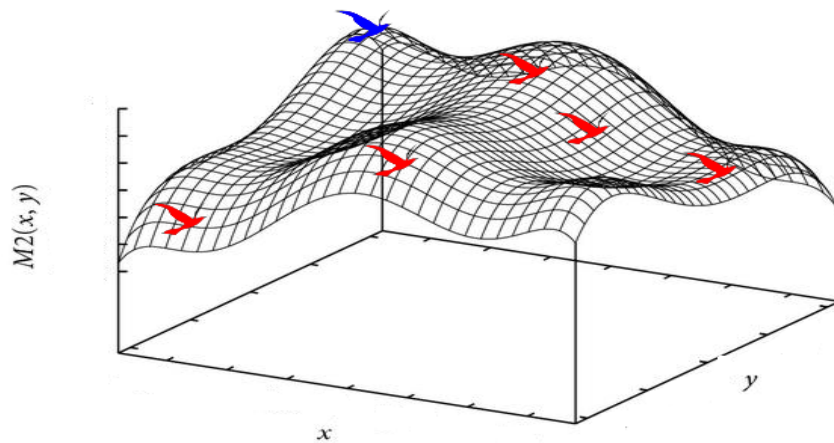


Figura 32: Conjunto de vetores em movimento. Fonte: Adaptado de <http://computacaointeligente.com.br/algoritmos/otimizacao-por-enxame-de-particulas> (2019)

Os parâmetros do algoritmo PSO são descritos, como:

- Partícula - indivíduos do enxame;
- Enxame - conjunto de partículas;
- Posição (x) - coordenadas de uma partícula no espaço N-dimensional (possível solução de um problema);
- Aptidão - valor que representa quão boa é uma solução. Resultado da avaliação de uma posição por meio de uma função custo;
- Pbest (y_i) - memória individual da partícula determinada pela posição do melhor valor de aptidão encontrado pela partícula;

- Gbest (y_s) - memória coletiva do enxame determinada pela posição do melhor valor de aptidão encontrado entre todas as partículas; e
- Vmax - velocidade máxima possível para uma partícula.

As equações 42 e 43 representam a atualização da posição da i -ésima (ith) partícula na j -ésima (jth) dimensão, quando o enxame se movimenta procurando a melhor solução em um espaço de N dimensões.

$$v_{ij}^{(t+1)} = wv_{ij}^{(t)} + c_1U_{1j}(y_{ij}^{(t)} - x_{ij}^{(t)}) + c_2U_{2j}(y_{sj}^{(t)} - x_{ij}^{(t)}) \quad (42)$$

$$x_{ij}^{(t+1)} = x_{ij}^{(t)} + v_{ij}^{(t+1)} \quad (43)$$

- U_{1j} e U_{2j} são números aleatórios uniformemente distribuídos entre 0 e 1;
- c_1 e c_2 são os coeficientes cognitivo individual e social, respectivamente. Um valor grande de c_1 indica partículas com alta confiança na sua experiência, enquanto um valor grande de c_2 proporciona maior confiança das partículas na experiência do enxame;
- w é denominado o fator de inércia. Este parâmetro é aplicado durante o cálculo da velocidade, sendo utilizado como um fator de escala para a velocidade atual de cada partícula. Desta forma define a influência da velocidade na medida em que o algoritmo vai sendo executado;
- y_{ij} é a melhor posição individual da ith partícula na jth dimensão;
- y_{sj} é a melhor posição global entre todas as partículas na jth dimensão; e
- v_{ij} estão limitadas na faixa $[-Vmax, Vmax]$ evitando assim que as partículas abandonem o espaço de busca. Nesta equação, pode-se observar que a posição para o próximo instante de tempo, depende da posição atual e do cálculo da velocidade. Entretanto, a velocidade para o próximo instante de

tempo da partícula depende diretamente da velocidade atual, da melhor posição encontrada pela partícula (y_i) e da melhor posição encontrada pelo enxame (y_s).

A nova posição de uma partícula pode ser observada como uma soma vetorial dos parâmetros ys_j e yij , vide figura 33.

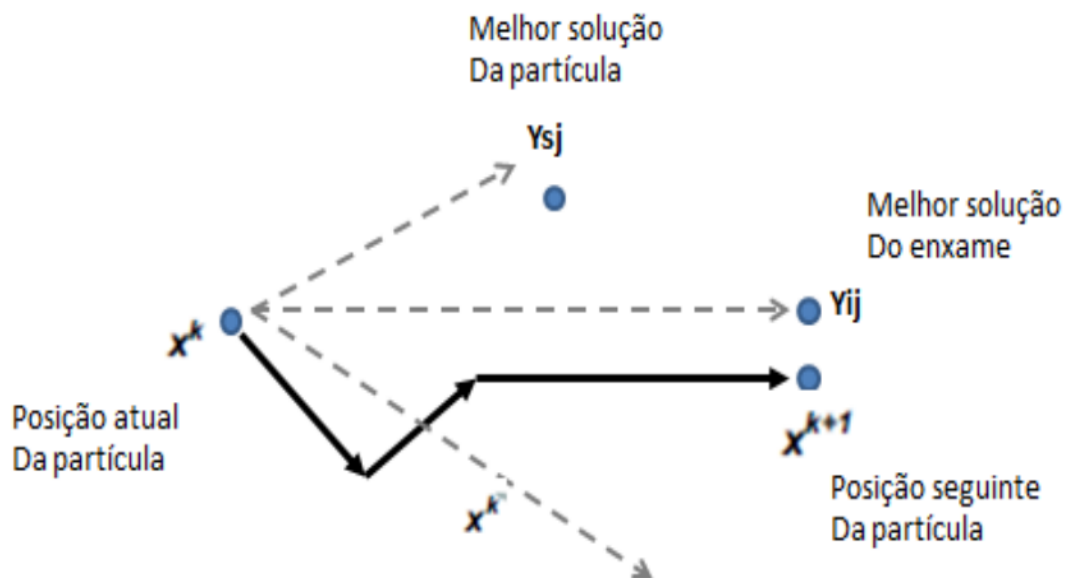


Figura 33: Otimização da posição da partícula. Fonte: (DIAGO, 2015).

A seguir apresenta-se o pseudocódigo do algoritmo PSO.

Entrada: $S, N, f, c_1, c_2, x_{\max}, v_{\max}, \text{Max}_{\text{iter}}$

Saída: pos. da partícula: x e seu melhor valor de aptidão: $f(x)$

Início

//Inicializa o enxame

Para $k=1$: S faça

Para $j=1$: N faça

$V_{ij} = -V_{\max} + 2U[0,1] v_{\max}$

$X_{ij} = -X_{\max} + 2U[0,1] x_{\max}$

Fim para

Fim para

Repita


```

//Avaliação e detecção
Para k=1: S faça
    Se  $f(x_k) = f_{\min k}$  então
         $y_k = x_k$ 
         $f_{\min k} = -f(x_k)$ 
    Fim se
Fim para
//Calcule y, usando os S valores de aptidão  $f(y_{ik})$ 
//Atualização usando equações
Para k=1: S faça
    Para j=1: N faça
 $v_{ij}^{(t+1)} = wv_{ij}^{(t)} + c_1U_{1j}(y_{ij}^{(t)} - x_{ij}^{(t)}) + c_2U_{2j}(y_{sj}^{(t)} - x_{ij}^{(t)})$ 
 $x_{ij}^{(t+1)} = x_{ij}^{(t)} + v_{ij}^{(t+1)}$ 
    Fim para
Fim para
Até iterações =  $\text{Max}_{\text{iter}}$ 

```

A técnica PSO é muito usada em diferentes áreas para resolver problemas de otimização ou como complemento para outras técnicas de controle (ROSA et. al., 2013; LIU et. al., 2011).

4.4.2 Otimização por Evolução Diferencial – DE

Este algoritmo utiliza NP vetores de parâmetros D -dimensionais x_i, G , onde $i = 1, \dots, NP$, como população em cada geração G . O conjunto inicial de vetores é gerado aleatoriamente e deve cobrir todo o espaço de busca. Na ausência de qualquer conhecimento acerca do espaço de busca (regiões promissoras ou mesmo soluções parciais), utiliza-se uma distribuição uniforme para a população inicial (RAHNAMAYAN et. al., 2006).

O algoritmo DE gera novos vetores de parâmetros através da adição da diferença ponderada entre dois vetores de parâmetros a um terceiro indivíduo,

operação conhecida como mutação. Os vetores de parâmetros mutados são então combinados com outros vetores pré-determinados, denominados *target vectors*, a fim de gerar os *trial vectors*. Esta combinação de parâmetros é referida como *crossover* ou recombinação no DE. É importante ressaltar que cada vetor presente na atual população deve ser usado uma vez como *trial vector*.

Caso o *trial vector* forneça um valor de *fitness* maior (maximização) que aquele associado ao respectivo *target vector*, este último dará lugar ao primeiro na próxima geração. Esta operação é conhecida como seleção binária.

Mutação - Para cada target vector $x_{i,G}$, $i = 1, \dots, NP$, um novo vetor é gerado por meio da equação 44.

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{r3,G} - x_{r2,G}) \quad (44)$$

onde $r1, r2, r3 \in 1, 2, \dots, NP$ são índices mutuamente distintos e também diferentes do índice i . F é uma constante real $\in [0, 2]$ que determina o tamanho do passo a ser dado na direção definida pelo vetor diferença $x_{r3,G} - x_{r2,G}$, vide figura 34.

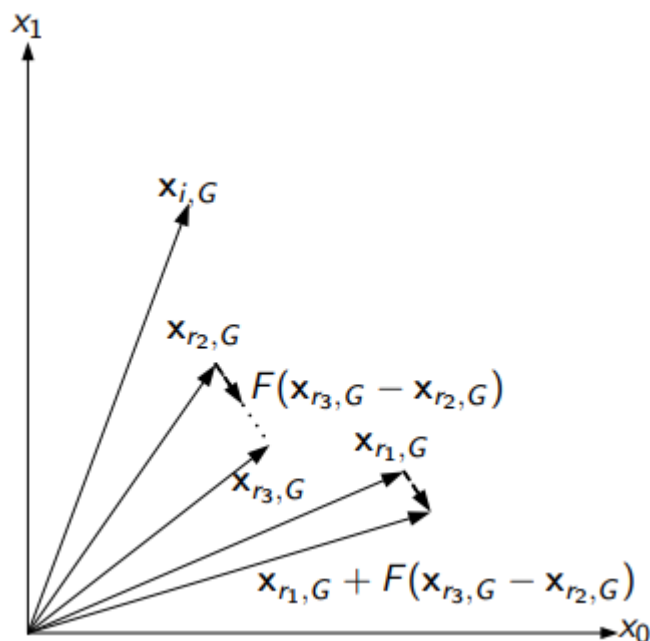


Figura 34: Exemplo bidimensional do processo de mutação. Fonte: (STORN e PRICE, 1995).

Crossover - Com a finalidade de aumentar a diversidade dos vetores de parâmetros mutados, um procedimento similar ao *crossover* é utilizado. Seja $x_{i,G}$ o *target vector* sob análise e $v_{i,G+1}$ o respectivo vetor modificado obtido por meio da equação 44.

O vetor $u_{i,G+1} = (u_{1i,G+1} \ u_{2i,G+1} \ \dots \ u_{Di,G+1})$, denominado *trial vector*, é obtido conforme a equação 45,

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1}, & \text{se } r_j \leq CR \text{ ou } j = l_i, \\ x_{ji,G}, & \text{se } r_j > CR \text{ e } j \neq l_i \end{cases} \quad (45)$$

Onde $j = 1, \dots, D$, $r_j \sim U(0,1)$, $CR \in [0, 1]$ é a taxa de recombinação definida pelo usuário, e l_i é um índice aleatoriamente escolhido $\in 1, \dots, D$, o que garante que $u_{i,G+1}$ recebe pelo menos uma componente de $v_{i,G+1}$. Seja $x_{i,G}$ o *target vector* sob análise e $v_{i,G+1}$ o respectivo vetor mutado obtido por meio da equação 44, a figura 35 detalha o processo de geração do *trial vector* $u_{i,G+1}$.

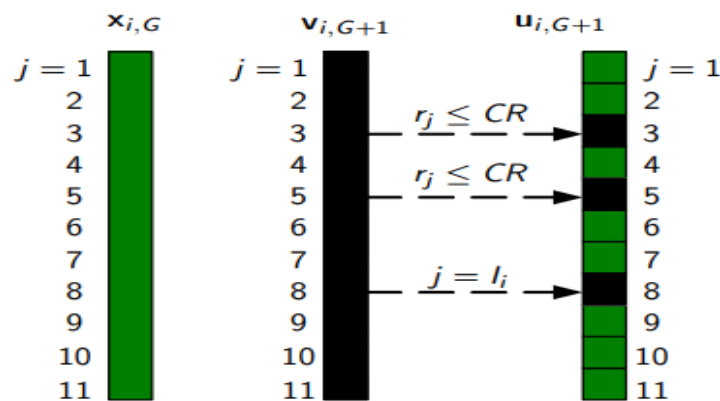


Figura 35: Processo de *crossover*. Fonte: (RAHNAMAYAN et. al. 2006).

Seleção - Após as etapas de mutação e *crossover*, nas quais todos os NP vetores serviram como *target vector*, a seleção dos vetores que serão preservados para a próxima geração é feita usando um critério elitista. Seja $x_{i,G}$ o *target vector* sob análise e $u_{i,G+1}$ seu respectivo *trial vector*.

Se $f(u_{i,G+1}) > f(x_{i,G})$, então $x_{i,G+1} = u_{i,G+1}$. (Max.)

Caso contrário, $x_{i,G+1} = x_{i,G}$.

A seguir apresenta-se o pseudocódigo do algoritmo DE.

Requisitos: D - dimensão do problema (opcional)
 NP, F, Cr - parâmetros de controle
 GEN - condição de parada
 L, H - restrições de fronteira

Inicializa população $Pop_{ij} \leftarrow rand_{ij} [L, H]$ e avaliar $Fit_j \leftarrow f (Pop_j)$

for $g = 1$ to GEN **do**

for $j = 1$ to NP **do**

 Escolha aleatória $r_{1,2,3} \in [1, \dots, NP], r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq j$

 Cria teste individual $X \leftarrow S (r, F, Cr, Pop)$

 Verifica as condições de limite **if** $(x_i \notin [L, H])$ $x_i \leftarrow rand_i [L, H]$

 Seleciona a melhor solução $(X \text{ or } Pop_j)$, atualiza $iBest$ se necessário

end for

end for

4.4.3 Técnicas de Melhoria de Desempenho dos Algoritmos PSO e DE

Estes métodos são modificações realizadas por pesquisadores na busca do aumento do desempenho dos algoritmos bioinspirados ou evolucionários. Métodos denominados na literatura como o de adição de diversidade artificial, tentam evitar o problema de convergência prematura, especialmente quando se faz uso de topologias em que os agentes do enxame seguem exclusivamente o indivíduo com melhor desempenho. Para esses casos existe uma forte tendência a encontrar soluções subótimas como consequência do melhor indivíduo encontrar-se preso em um mínimo local (KARABOGA e BASTURK, 2007).

É importante saber que, com estas modificações pode-se obter a melhoria no desempenho dos algoritmos, porém, incrementa-se também a complexidade computacional do algoritmo. Os métodos que são apresentados neste trabalho, dos muitos que podem ser encontrados na literatura são:

Fator de inércia: é aplicado durante o cálculo da velocidade das partículas no algoritmo PSO, sendo utilizado como um fator de escala para a velocidade atual de cada partícula, vide equações 46 e 47 (SHI e EBERHART, 1999).

$$v_{ij}^{(t+1)} = wv_{ij}^{(t)} + c_1U_{1j}[0,1](y_{ij}^{(t)} - x_{ij}^{(t)}) + c_2U_{2j}[0,1](y_{sj}^{(t)} - x_{ij}^{(t)}) \quad (46)$$

onde $wv_{ij}^{(t)}$ representa a inércia, $c_1U_{1j}[0,1](y_{ij}^{(t)} - x_{ij}^{(t)})$ o componente cognitivo e $c_2U_{2j}[0,1](y_{sj}^{(t)} - x_{ij}^{(t)})$ o componente social.

$$x_{ij}^{(t+1)} = x_{ij}^{(t)} + v_{ij}^{(t+1)} \quad (47)$$

Esta técnica é amplamente utilizada, configurando o fator de inércia w para decrescer linearmente, desde valores grandes até valores pequenos durante a execução do algoritmo. Valores típicos: $w=[0.9 \text{ a } 0.1]$. Dessa forma, o fator de inércia controla a capacidade de exploração das partículas. Observe-se que valores grandes de w resultam em uma busca global, enquanto valores pequenos de w permitem às partículas explorarem localmente na vizinhança de uma possível solução.

Fatores de restrição: Úteis para assegurar a convergência no algoritmo. O fator de restrição facilita a escolha dos parâmetros w , c_1 e c_2 mediante as seguintes relações, vide equações 48 e 49.

$$v_{ij}^{(t+1)} = x(v_{ij}^{(t)} + c_1U_{1j}(y_{ij}^{(t)} - x_{ij}^{(t)}) + c_2U_{2j}(y_{sj}^{(t)} - x_{ij}^{(t)})) \quad (48)$$

$$x = 2 / |2 - \phi - \sqrt{\phi^2 - 4\phi}| \quad (49)$$

sendo, $\phi = c_1 + c_2$, $\phi > 4$

Desta forma é possível aplicar o PSO sem impor restrições na trajetória das partículas, especificamente no valor de v_{max} . O método de restrição mais encontrado na literatura é utilizar $f = 4.1$ com constantes $c_1 = c_2 = 2.05$ ($c = 0.729$) (Diago, 2015).

Aprendizagem por Oposição – OBL: O método de aprendizado em oposição direciona a busca da melhor solução pelos algoritmos bioinspirados na direção oposta da busca atual. O processo consiste em que em um determinado momento os agentes encontram-se juntos ao redor da melhor posição encontrada, com um decremento da diversidade. Nesse caso, esta técnica permite trocar as posições de alguns dos seus agentes às coordenadas opostas, explorando novas possibilidades no espaço de busca (RAHNAMAYAN et. al., 2008).

A abordagem OBL está baseada no conceito do número oposto, definido pela equação 50.

$$\dot{x} = a + b - x, \quad (50)$$

sendo x um número real definido na faixa $[a,b]$ e \dot{x} o número oposto de x . Esta definição também é válida para pontos N -dimensionais x_i definidos na faixa $[a_i,b_i]$, $i = 1,2,\dots,N$ (MUNÓZ., 2017).

4.4.4 Método de Avaliação de Desempenho dos Algoritmos PSO e DE

Testes não paramétricos e análise de significância estatística comparam a efetividade dos resultados atingidos com o intuito de validar ou descartar os resultados. A metodologia usada neste trabalho está baseada na aplicação dos testes de Kolmogorov-Smirnov, Kruskal-Wallis e Wilcoxon, apresentados a seguir.

Teste de Kolmogorov-Smirnov - verifica se os conjuntos de dados são normalmente distribuídos. A hipótese nula (H_0) implica que os dados são, de fato, provenientes de distribuições normais, enquanto que, a hipótese alternativa indica que os dados não procedem de uma distribuição normal. Os possíveis resultados são $h = 1$ (que rejeita H_0 com um nível de significância de $\alpha = 0.05$) e $h = 0$ (que valida H_0 com um nível de significância de $\alpha = 0.05$). (R. WILCOX, 1998)

Teste de Kruskal-Wallis - é aplicado em todos os conjuntos (todos os algoritmos), com o objetivo de determinar se há diferenças estatisticamente

significativas entre dois ou mais conjuntos. Neste caso, a hipótese nula H_0 considera todos os conjuntos provenientes de distribuições com de dados que advêm da mesma distribuição de probabilidade, ou seja, que todos os algoritmos se comportam da mesma maneira, e a hipótese alternativa H_0 indica que pelo menos um conjunto tem uma distribuição de probabilidade diferente dos outras. Se p – valor ≈ 0 ou $h = 1$, então H_0 é rejeitada com um nível de significância de $\alpha = 0.05$. (KRUSKAL AND WALLIS, 1952)

Teste de Wilcoxon - é utilizado para verificar que dois conjuntos (ou dois algoritmos) provém de distribuições de probabilidade diferentes. No teste, a hipótese nula H_0 indica que os dois conjuntos de dados decorrem de distribuições diferentes, enquanto que, a hipótese alternativa H_1 aponta que ambos conjuntos têm a mesma distribuição de probabilidade. Se p – valor ≈ 0 ou $h = 1$, então H_0 é rejeitada com um nível de significância de $\alpha = 0.05$. (WILCOXON, Frank (1945).

4.4.5 Resultados e Discussões Preliminares da Simulação com PSO e DE

Após simulações em ambiente computacional Matlab e Simulink, os resultados dos testes dos algoritmos de otimização são apresentados de forma estatística em tabelas que contêm média, mediana, desvio padrão, valor mínimo e número de acertos. Para cada algoritmo PSO e DE e variações OBL, os valores dos parâmetros de configuração são apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de configuração dos algoritmos DE, PSO, O-PSO e O-DE

DE		PSO		O-PSO		O-DE	
PARÂMETROS	VALOR	PARÂMETROS	VALOR	PARÂMETROS	VALOR	PARÂMETROS	VALOR
Tamanho do Enxame	[20]	Tamanho do Enxame	[20]	Tamanho do Enxame	[20]	Tamanho do Enxame	[20]
Dimensões	3	Dimensões	3	Dimensões	3	Dimensões	3
Interações	100	Interações	100	Interações	100	Interações	100
Fator de Mutação	1,2	Peso Inércia	0,9 a 0,1	Peso Inércia	0,9 a 0,1	Fator de Mutação	1,2
Crossover rate	1	Coefficiente Cognitivo e Social	C1=C2= 2,05	Coefficiente Cognitivo e Social	C1=C2= 2,05	Taxa de Crossover	1
		Velocidade Máxima	3,3	Velocidade Máxima	3,3		
				Limite	40	Limite	40

Os algoritmos foram executados 32 vezes para cada conjunto de parâmetros. Para as 32 execuções, as posições iniciais dos agentes foram geradas aleatoriamente. Dos resultados obtidos em cada teste foi escolhida a melhor posição encontrada pelas partículas e o respectivo valor de aptidão (valor mínimo encontrado). Com os resultados dos 32 experimentos foram calculados o valor da média, mediana, valor mínimo, desvio padrão e foram aplicados os testes não paramétricos para comparação de resultados obtidos pelos algoritmos, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados estatísticos dos algoritmos

ALGORITMO		MÉDIA	MEDIANA	MÍNIMO	DESVIO PADRÃO	GOALS / 32	P	I	D
S=20	PSO	-1,00E+38	-1,00E+38	1,00E+25	-1,00E+38	99,5	100	-70,9	100
N=3	O-PSO	72,449	72,4493	72,424	0,03606	0	50,71	-0,03	39,74
	DE	-8,524	12,054	-17,05	0,03125	59,596	65,44	59,87	0
	O-DE	72,453	72,453	72,452	0,0015	0	86,34	0	100

Os testes não-paramétricos dos algoritmos PSO, O-PSO, DE e O-DE, conforme o protocolo seguido, mostraram os seguintes resultados.

Tabela 5. Teste Kolmogorov-Smirnov

Função	PSO	O-PSO	DE	O-DE
PID	1	1	1	1

Tabela 6. Teste de Kruskal-Wallis

Função	PSO	O-PSO	DE	O-DE	p
PID	125,0672	66,0359	-86,0706	-28,87	3,12E-23

Tabela 7. Teste de Wilcoxon

PID	O-DE -> PSO	O-DE -> PSO	O-DE -> DE
	6,51E-12	6,51E-12	6,51E-12

- Teste de Kolmogorov-Smirnov: Todos os algoritmos obtiveram como resultado $h = 1$, conforme tabela 5, negando a hipótese nula H_0 com um nível de significância de $\alpha = 0.05$, portanto, o conjunto de dados não obedece a uma distribuição normal e podem-se aplicar os testes não-paramétricos.
- Teste de Kruskal-Wallis: O resultado deste teste para todos os algoritmos foi $p - \text{valor} = 3,12E-23$, conforme tabela 6, então H_0 é rejeitada com um nível de significância de $\alpha = 0.05$, indicando assim que pelo menos um dos algoritmos é estatisticamente diferente dos outros.
- Teste de Wilcoxon: Os resultados dos testes realizados, comparando o algoritmo O-DE com o PSO, com o O-PSO, e DE usando os valores mínimos da função custo estão listados na tabela 7 e 4, demonstrando que H_0 é rejeitada com um nível de significância de $\alpha = 0.05$.

As figuras de 36 a 39 apresentam os gráficos de resposta do controlador PID a função degrau e aos parâmetros de P, I e D, sintonizados pelos algoritmos.

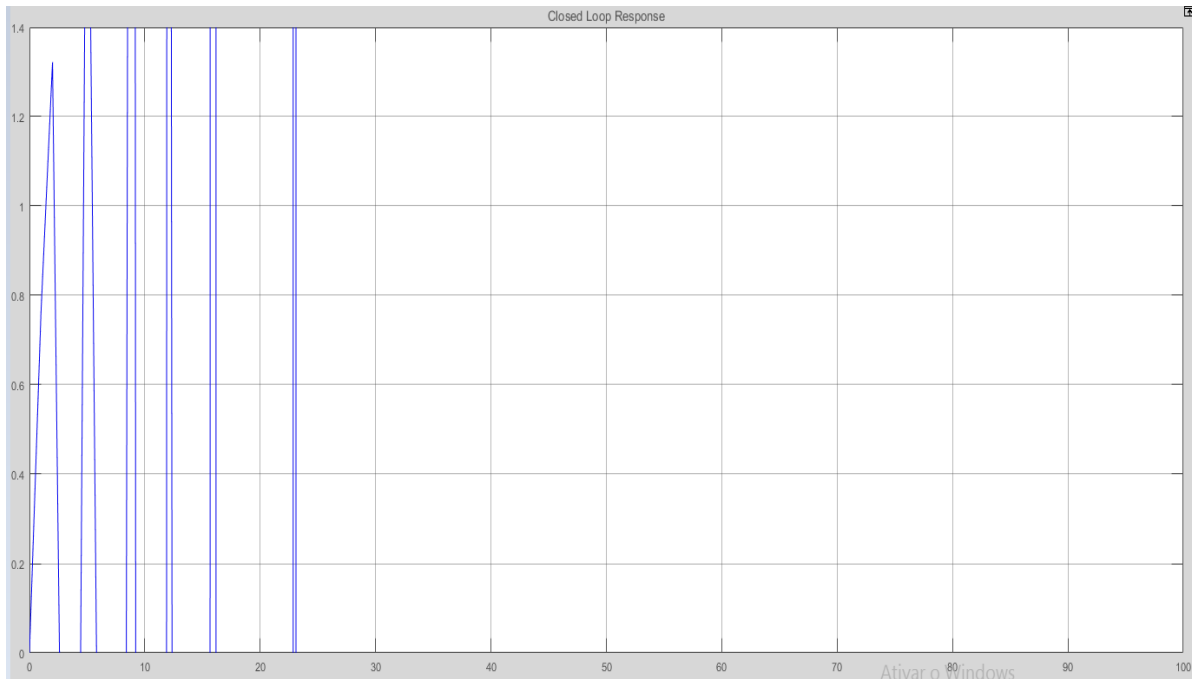


Figura 36: Resposta do controlador sintonizado com PSO

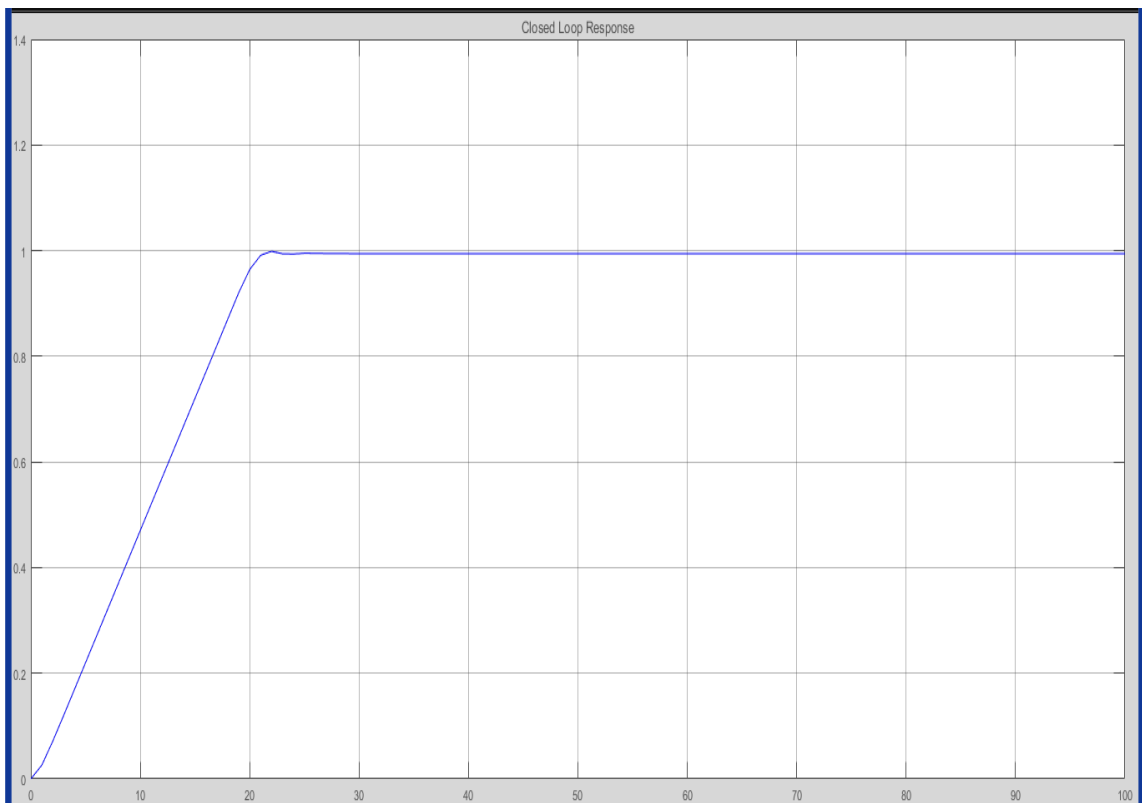


Figura 37: Resposta do controlador sintonizado com O-PSO

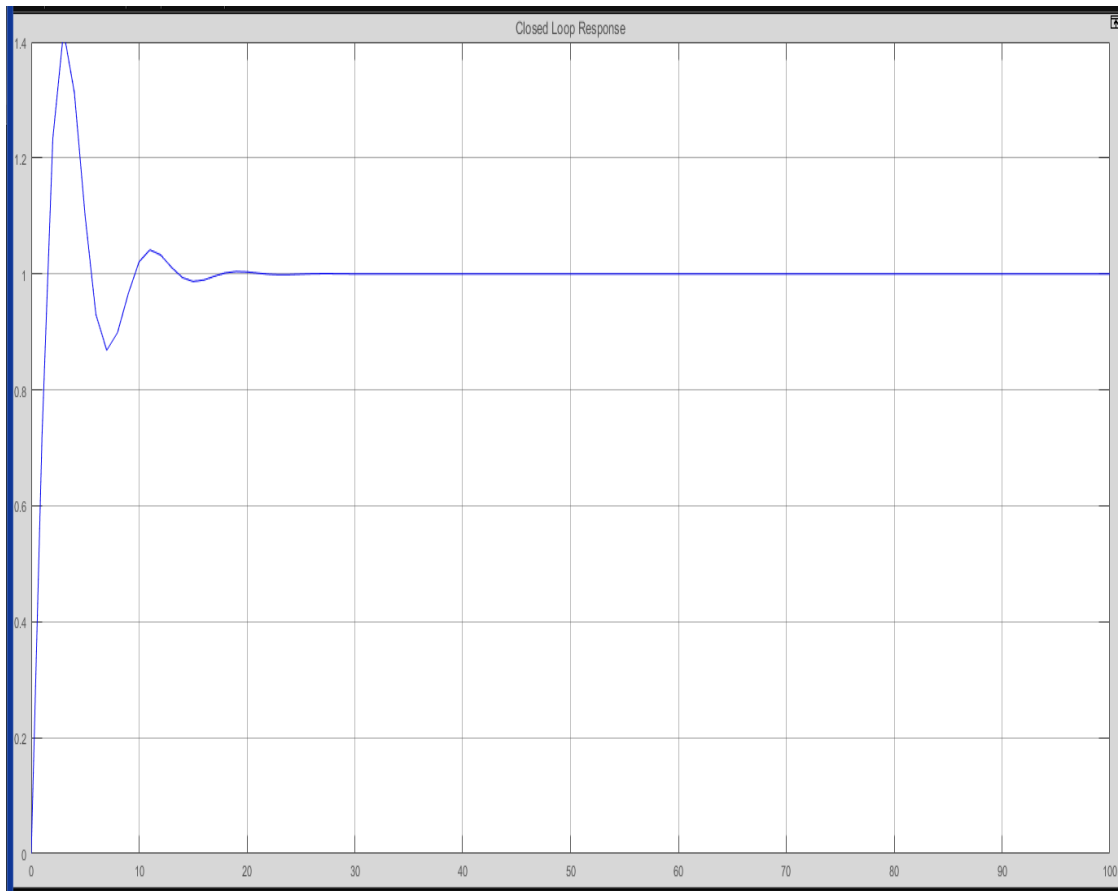


Figura 38: Resposta do controlador sintonizado com DE

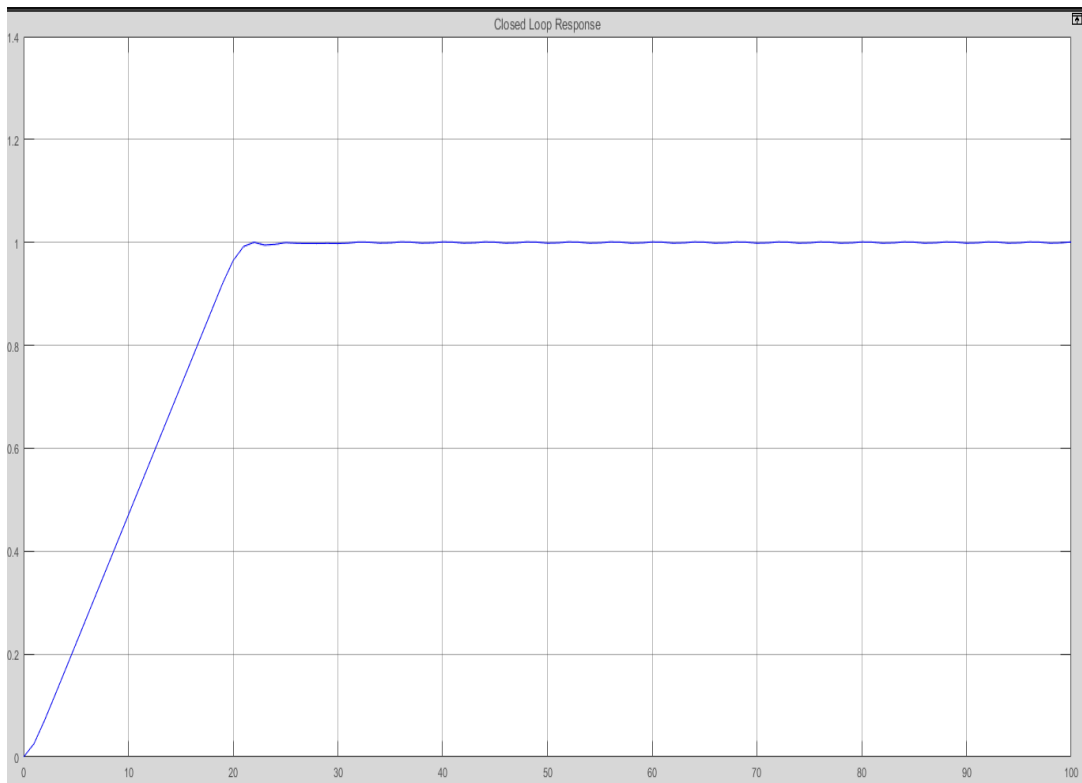


Figura 39: Resposta do controlador sintonizado com O-DE

4.4.6 Resultados de Convergência das Simulações com PSO e DE

As condições experimentais para cada algoritmo estão descritas na Tabela 3. O valor de aptidão máximo admissível (*threshold*) foi configurado em 0.01 para a função multimodal. Conforme resultados descritos na tabela 4; melhor posição global e da melhor aptidão obtida para cada experimento, foi calculado o valor médio, mediana, desvio padrão e o valor de aptidão mínimo entre todos os experimento, se apresenta as seguintes considerações para os experimentos:

- Com base nos valores médios da tabela 4 e o gráfico da figura 36, é possível afirmar que o algoritmo PSO não apresenta soluções satisfatórias para a sintonia do controlador;
- Com base nos valores médios da tabela 4, desvio padrão e os gráficos das figuras 37 e 39, é possível afirmar que os algoritmos O-PSO e O-DE apresentam soluções satisfatórias para a sintonia do controlador. Os tempos de subida e de estabilização ficam próximos de $20t$ e o erro de estado estacionário se mantém estável próximo ao *setpoint* de valor 1;
- Com base na tabela 4; mediana, desvio padrão e o gráfico da figura 38, é possível afirmar que o algoritmo DE apresenta solução satisfatória para a sintonia do controlador. Os tempos de subida próximo a $2t$ e de estabilização menor que $20t$ e o erro de estado estacionário se mantém estável próximo ao *setpoint* de valor 1. Como a componente integral é apresentada com valores relativamente altos, ocorre um baixo tempo de subida e consequente sobrepasso, o que para sistemas que requerem um baixo tempo de resposta é satisfatório, desde que o sobrepasso esteja dentro de parâmetros aceitáveis;
- O desempenho dos algoritmos aumenta conforme o incremento do número de iterações, apresentando valores das componentes P, I e D mais ajustado e consequente melhor resposta ao degrau; e
- A variação de aprendizagem OBL favoreceu a solução dos algoritmos.

4.5 Considerações Finais do Capítulo

A tabela 8 apresenta um resumo comparativo numérico das variáveis de resposta ao degrau unitário da planta a ser controlada.

Tabela 8. Variáveis da resposta ao degrau unitário da planta a ser controlada

VARIÁVEL	PID TUNE	DE	O-DE	PSO	O-PSO	OBSERVAÇÕES
Setpoint	1	1	1	1	1	Função Degrau
Sobrepasso (A) em Relação	0.12	0.4	~ 0	Instável	~ 0	
Sobrepasso (A/B)	0.03	0.02	~ 0	Instável	~ 0	
Tempo de acomodação	25t	20t	20t	Instável	20t	
Tempo de Subida (B)	3t	2t	20t	Instável	20t	
Erro de Estado Estacionário	0 em 40t	0 em 25t	0 em 24t	Instável	0 em 24t	
Estabilidade	30t	25t	24t	Instável	24t	
Resposta do Controlador - P	40.1	59.59	86.34	100	50.71	
Resposta do Controlador - I	3.94	59.87	0	-70,9	-0,03	
Resposta do Controlador - D	33.4	0	100	100	39.74	

Os resultados obtidos destacam uma visão das potencialidades dos algoritmos para resolver problemas de otimização multimodal aplicado à sintonia de controladores PID. Na perspectiva de otimizar o desempenho é possível realizar um processo de ajuste dos parâmetros de cada algoritmo, tais como valores de inércia, coeficiente cognitivo, tempo do ciclo de *feedback*, entre outras, permitindo explorar as capacidades de busca local e global.

Para os algoritmos PSO e DE, o incremento do número de iterações permite que as partículas tenham mais oportunidades de convergirem para uma solução. As soluções apresentadas para os parâmetros P, I e D, no processo de sintonia do controlador associada a sua função custo para a planta do grupo motor gerador, utilizando os algoritmos O-PSO, O-DE e DE são adequadas. Com base nos resultados experimentais obtidos e a significância estatística baseada nos testes de Kolmogorov Smirnov, Wilcoxon e Kruskal-Wallis, aplicada para um nível de confiança de 95%, foi possível afirmar que os dados seguem uma distribuição normal e que os algoritmo O-DE e O-PSO apresentaram os melhores resultados finais de aproximação à solução mais ótima no problema de otimização. Tais resultados foram superiores em termos de sobrepasso e tempo de assentamento se comparado com a sintonização realizada com a função PIDTUNE do Matlab (vide Figura 31).

Os sistemas motores geradores que compõem o parque de geração de energia elétrica da unidade de tratamento de petróleo em alto mar apresentam características que requerem baixo tempo de resposta e menor tempo de estabilização, desta forma os parâmetros encontrados na sintonia DE foram escolhidos para realizar os testes físicos no conjunto motor gerador. O sobrepasso encontrado na resposta da simulação sugere que o mesmo está dentro dos parâmetros aceitáveis e conforme descrito no capítulo 3 o grupo motor gerador possui um sistema robusto de proteção para as variáveis de controle e monitoramento.

5 IMPLEMENTAÇÃO FÍSICA NO GRUPO MOTOR GERADOR

Após conclusão do módulo de simulação, apresenta-se a implementação dos parâmetros P, I e D, no controlador de velocidade e carga do grupo motor gerador e análise dos resultados. Os resultados são descritos para o seguimento de trajetória, tempo de resposta e análise comportamental das variáveis de potência, tensão, frequência, corrente elétrica, temperatura e pressão, apresentados de forma gráfica.

5.1 Ensaios dos Parâmetros PID no Grupo Motor Gerador

Os testes realizados no grupo motor gerador são, primeiramente, uma sequência de valores desejados de potência elétrica. Estas sequências são alcançadas manipulando o acréscimo ou redução de cargas no sistema elétrico de potência, a figura 22, descreve o sistema do grupo motor gerador.

Os ajustes encontrados na Capítulo 4 em ambiente de simulação foram implementados em *Gain* = P, *Reset* = I, e *Rated Speed* = D, sendo P = 65,44, I = 59,87 e D=0 no controlador, destaca-se que o *setpoint* é fixo e definido em 1200 rpm no Motor e 60 Hz no Gerador.

Para as perturbações do sistema de potência o controlador irá responder no servossistema de injeção de combustível.

5.2 Resultados de Convergência – Variáveis do Gerador

Para melhor observar o desempenho dos resultados encontrados para os ensaios dos valores das variáveis P, I e D, as figuras 40, 41 e 42 apresentam de forma gráfica as respostas para o seguimento de trajetória e tempo de resposta no controle da frequência (Hz) e potência (kW). Os dados foram extraídos a partir da ferramenta de aquisição de dados *PI – Plant Information*; o software captura, processa, analisa e armazenar qualquer tipo de dados através de informações disponibilizadas por meio de telas gráficas com dados coletados a partir do Sistema Digital de Controle Distribuído SDCD. As legendas estão descritas conforme:

- 1 - P65-G4_30APP2 – Potência Aparente;
- 2 - P65-G4_30REACT2 – Potência Reativa;
- 3 - P65-G4_30REALPOWER2 – Potência Real/Ativa;
- 4 - P65-G4_AVLIVOLT – Tensão;
- 5 - P65-G4_AVPHCUR1 – Corrente Elétrica;
- 6 - P65-G4_FREQ – Frequência; e
- 7 - P65-G4_POWER – Fator de Potência.

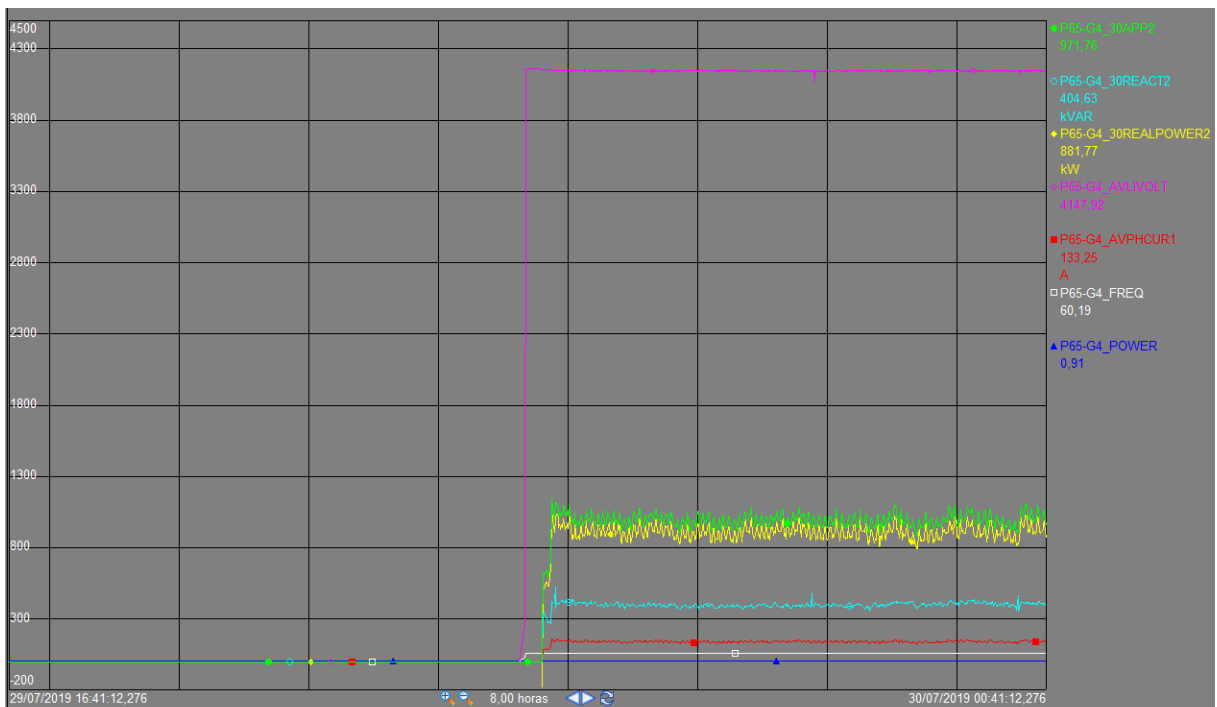


Figura 40: Resposta do controlador sincronizado com DE, base de tempo 8,00h.

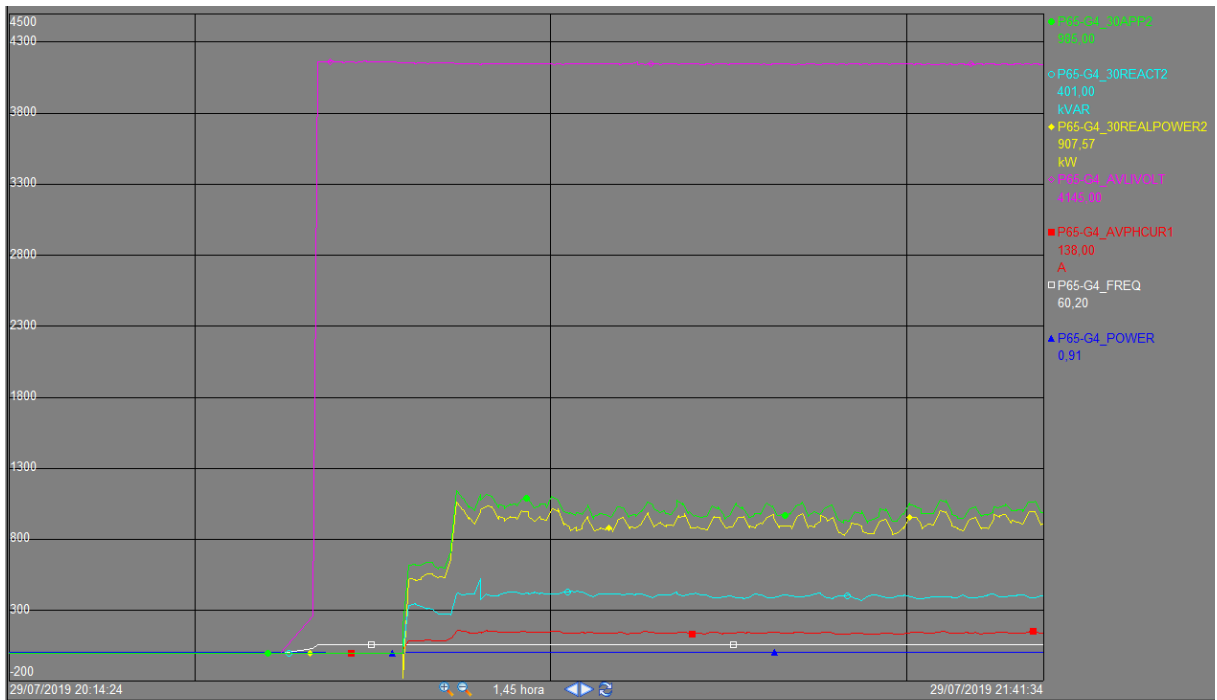


Figura 41: Resposta do controlador sintonizado com DE, base de tempo 1,45h.

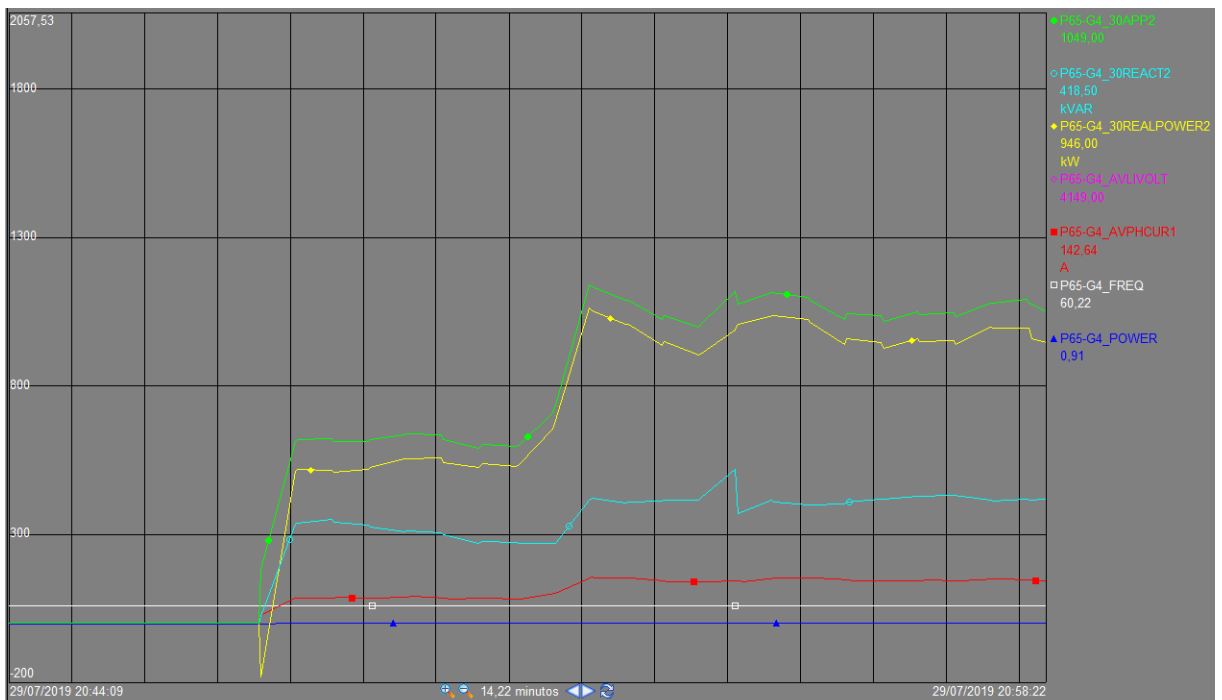


Figura 42: Resposta do controlador sintonizado com DE, base de tempo 14,22 minutos.

5.3 Considerações Finais - Variáveis Elétricas do Gerador

Para os ensaios, inicialmente foi aplicada uma função degrau, seguida de uma função rampa. A potência ativa ficou oscilando próximo a 946 kW e a frequência ~ 60 Hz, no intervalo de proteção do relé multifunção, conforme as figuras 40, 41 e 42. Os resultados apresentados se referem à melhor resposta dos ensaios. As componentes foram ajustadas para a sintonia Proporcional 65,44, Integral 59,87 e Derivativo 0, portanto uma sintonia PI obtida a partir de simulações experimentais.

Conforme resultados descritos nas figuras 40, 41 e 42; seguimento de trajetória para a função degrau, seguimento de trajetória para a função rampa e dos tempos de resposta, foi realizada análise comportamental da frequência (Hz), potência ativa (kW), potência aparente (kVA), potência reativa (kVAR), corrente elétrica (A), tensão (VAC) e fator de potência. Se apresenta as seguintes considerações para os ensaios:

- Com base nos valores médios dos gráfico das figuras 40, 41 e 42, é possível afirmar que a sintonia apresentada a partir das simulações com o algoritmo DE apresenta soluções satisfatórias para o controle do grupo motor gerador;
- Com base no seguimento de trajetória a uma função degrau de ~ 500 kW e os gráficos das figuras 40, 41 e 42, é possível afirmar que o controlador apresenta respostas satisfatórias para o sistema. O tempo de subida e de estabilização ficam próximos de 30s e o erro de estado estacionário se mantém estável próximo ao *setpoint* de valor 500 kW e não houve sobrepasso. Observa-se que o fator de potência se manteve estável em 0.91, o que indica um bom aproveitamento da potência. A frequência se manteve estável próximo de 60 Hz e no intervalo de proteção, indicando que as respostas ao sinal de avanço da injeção de combustível para manutenção da velocidade do grupo motor gerador está satisfatória;
- Com base no seguimento de trajetória a uma função rampa de ~ 500 kW, chegando a ~1000 kW e os gráficos das figuras 40, 41 e 42, é possível afirmar que o controlador apresenta respostas satisfatórias para o sistema.

Os tempos de subida próximo a 40s e de estabilização menor que 20s e o erro de estado estacionário se mantém estável próximo ao *set point* de valor 1000 kW. Como a componente integral é apresentada com valores relativamente altos, ocorre um baixo tempo de subida e consequente pequeno sobrepasso, o que para sistemas que requerem um baixo tempo de resposta é satisfatório, desde que o sobrepasso esteja dentro de parâmetros aceitáveis; e

- O desempenho do controlador se apresenta estável às oscilações crescentes e decrescentes do sistema de potência durante todo o ensaio, mantendo a velocidade do motor de combustão interna constante e a frequência estável em ~ 60 Hz e dentro da faixa de proteção do relé multifunção.

5.4 Resultados de Convergência – Variáveis do MCI

As figuras 43 e 44 apresentam de forma gráfica as respostas para o seguimento de trajetória de temperaturas e as figuras 45 e 46 para o seguimento de trajetória de pressões do grupo motor gerador em função do acréscimo e manutenção de potência, este sintonizado com os parâmetros PI encontrados em ambiente de simulação. Os dados foram extraídos a partir da ferramenta de aquisição de dados *PI – Plant Information*. A tabela 8 apresenta dados históricos para avaliar o desempenho do conjunto para as variáveis temperatura e pressão.

Para as figuras 43 e 44 a legenda dos sensores de temperatura se dá da seguinte forma, na sequência considerar de cima para baixo 22 sensores de temperatura:

- 1 – Temperatura do combustível - diesel;
- 2 – Temperatura do óleo lubrificante;
- 3 – Temperatura da água de resfriamento – saída;
- 4 – Temperatura da água de resfriamento – entrada;
- 5 – Temperaturas entre 400 e 440 °C, representam os gases de exaustão do MCI, 01 unidade por cilindro totalizando 12 sensores de temperatura;
- 6 – Temperatura do ar de admissão;
- 7 – Temperatura do rolamento do gerador, mancal lado não acoplado;

- 8 – Temperatura do rolamento do gerador, mancal lado acoplado; e
 9 – Temperaturas do enrolamento do gerador, 01 unidade por fase totalizando 3 sensores de temperatura, valores estão próximos a 78°C.

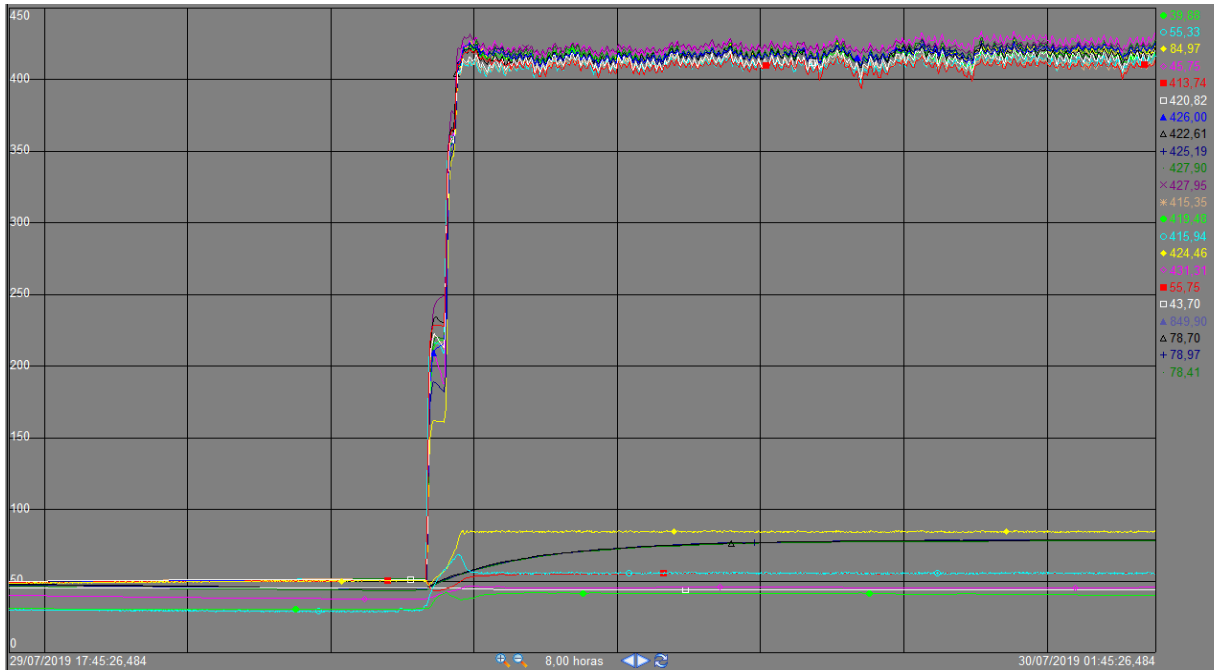


Figura 43: Gráfico de temperaturas do grupo motor gerador, base de tempo 8,00hs.

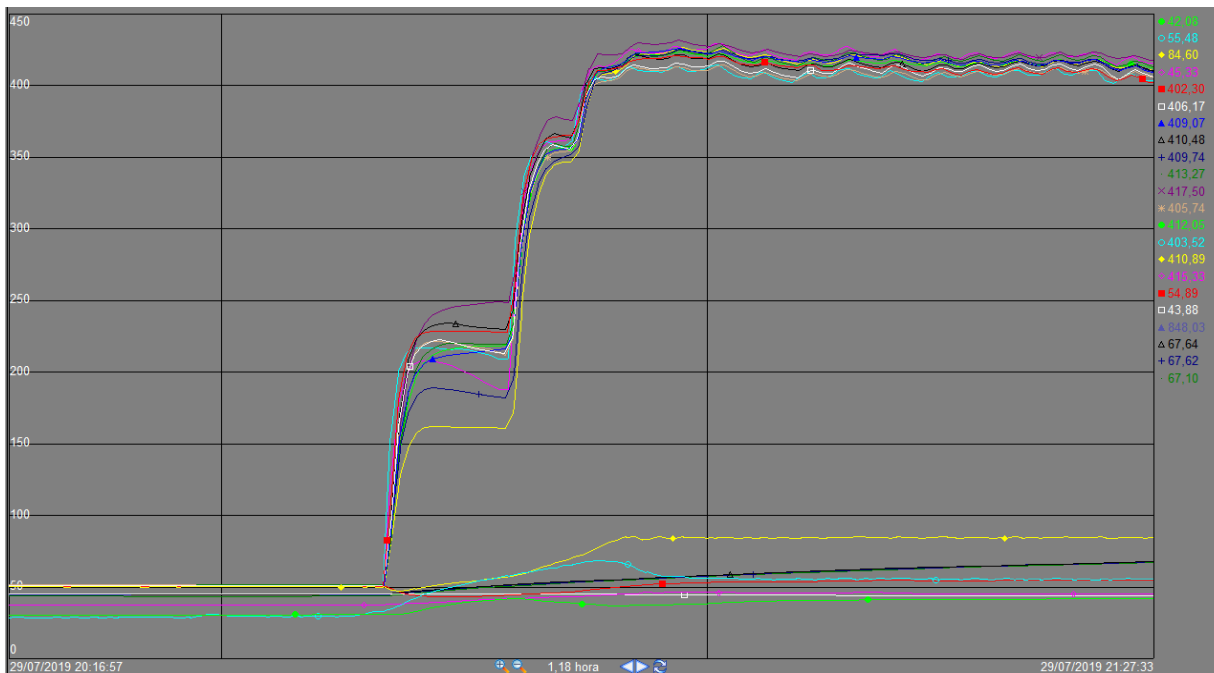


Figura 44: Gráfico de temperaturas do conjunto motor gerador, base de tempo 1,18hs.

As figuras 45 e 46, apresentam as variáveis de pressão do motor e a legenda é descrita a seguir:

- 1 - P65-PT101_4 – Pressão de óleo combustível.
- 2 - P65-PT232_4 – Pressão de óleo lubrificante;
- 3 - P65-PT301_4 – Pressão de ar de partida e ar de segurança;
- 4 - P65-PT401_4 – Pressão de água de refrigeração – Saída;
- 5 - P65-PT451_4 – Pressão de água de refrigeração – Entrada; e
- 6 - P65-PT601_4 – Pressão de ar de admissão.

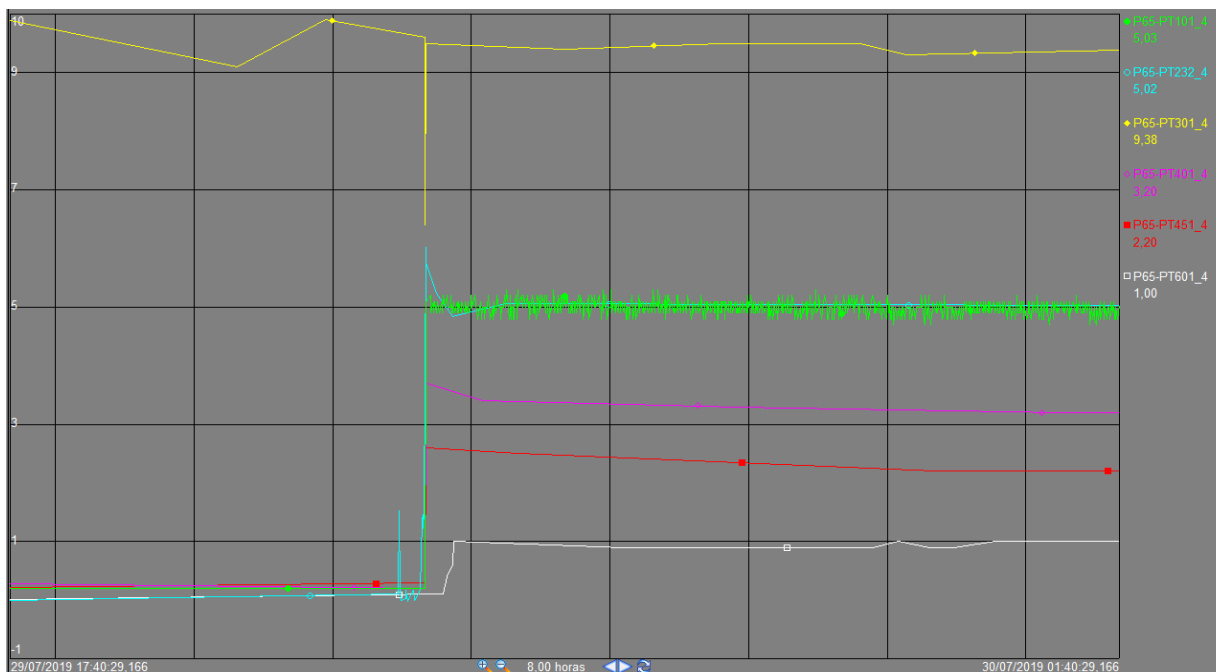


Figura 45: Gráfico de pressões do MCI, base de tempo 8,00 hs.

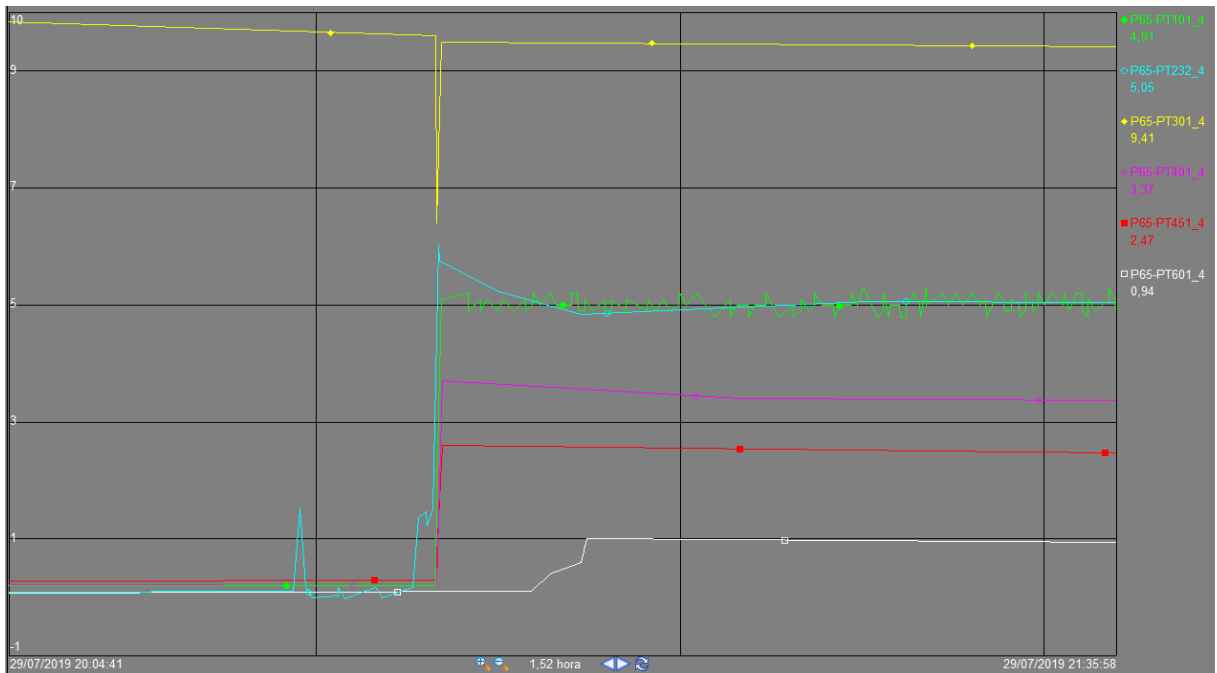


Figura 46: Gráfico de pressões do MCI, base de tempo 1,52hs.

A tabela 9 apresenta os dados dos protocolos de testes aplicados ao grupo motor de combustão interna – gerador elétrico pelo fabricante Wartsila (Anexo A) e os dados encontrados nos ensaios e coleta de dados desta pesquisa.

Tabela 9 : Protocolos de teste do fabricante Wartsila x Dados da Pesquisa

Protocolo de Teste do Fabricante do MCI - Wartsila			Protocolo de Ensaio		
Descrição	Unidade	Valor do Parâmetro		Valor do Parâmetro	
Velocidade do conjunto MCI - Dinamômetro	rpm	1200	1200	1200	1200
Ponto de teste	%	25	50	25	50
Potência	kW	483	1005	500	1000
Pressão de combustível após a bomba	bar	6,2	6,1	5,1	4,91
Pressão de ar de admissão	bar	0,4	1,1	0,5	0,94
Pressão de óleo lubrificante após o filtro	bar	4,7	4,6	5	5,05
Pressão de água de refrigeração saída	bar	0,65	0,65	2,6	2,47
Pressão de água de refrigeração entrada	bar	1,2	1,2	3,5	3,37
Temperatura de óleo lubrificante	°C	65	65	65	70
Temperatura de entrada de combustível	°C	49	50	40	40
Temperatura de ar de admissão	°C	59	61	52	55
Temperatura de água de resfriamento - saída	°C	72	81	75	84,6
Temperatura de água de resfriamento - entrada	°C	47	48	43	45,3
Temperatura de exaustão cilindro A1	°C	344	376	357,5	410
Temperatura de exaustão cilindro A2	°C	353	392	357,5	410
Temperatura de exaustão cilindro A3	°C	327	368	357,5	410
Temperatura de exaustão cilindro A4	°C	316	358	357,5	410
Temperatura de exaustão cilindro A5	°C	339	388	357,5	410
Temperatura de exaustão cilindro A6	°C	360	401	357,5	410
Temperatura de exaustão cilindro B1	°C	362	405	357,5	410
Temperatura de exaustão cilindro B2	°C	343	381	357,5	410
Temperatura de exaustão cilindro B3	°C	342	384	357,5	410
Temperatura de exaustão cilindro B4	°C	339	373	357,5	410
Temperatura de exaustão cilindro B5	°C	347	388	357,5	410
Temperatura de exaustão cilindro B6	°C	356	402	357,5	410
Temperatura de exaustão média	°C	344	384,6	357,5	410

5.5 Considerações Finais das Variáveis do MCI

Para os ensaios, inicialmente foi aplicada uma função degrau, seguida de uma função rampa. A potência ativa ficou oscilando próximo a 946 kW e a frequência em ~ 60 Hz no intervalo de proteção para altas e baixas frequências, conforme as figuras 40, 41 e 42. Os resultados apresentados se referem à melhor resposta dos ensaios. As componentes foram ajustadas para a sintonia Proporcional 65.44, Integral 59,87 e Derivativo 0, portanto uma sintonia PI obtida a partir de simulações experimentais.

Conforme resultados descritos nas figuras 40, 41 e 42; seguimento de trajetória para a função degrau, seguimento de trajetória para a função rampa e dos

tempos de resposta, foi realizada análise comportamental das temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) e pressões (bar). Se apresenta as seguintes considerações para os ensaios:

- Com base nos valores médios dos gráficos das figuras 43 a 46, é possível afirmar que a sintonia apresentada a partir das simulações com o algoritmo DE apresenta soluções satisfatórias para o controle do grupo motor gerador e as variáveis temperatura e pressão se mantiveram estáveis;
- Com base no seguimento de trajetória a uma função degrau de ~ 500 kW e os gráficos das figuras 43 e 44, é possível afirmar que o controlador apresenta respostas satisfatórias para o sistema. O tempo de subida da temperatura de exaustão dos gases apresenta-se em rampa e há estabilização entre 340°C e 375°C . Há elevação de temperatura da água de resfriamento e do óleo lubrificante. Observa-se que o motor inicialmente foi ligado sem carga e a temperatura de exaustão dos gases sobe em rampa se estabilizando entre 160°C e 250°C , procedimento este se deve ao fato de aquecimento prévio, antes de aplicar carga ao MCI;
- Com base no seguimento de trajetória a uma função rampa de ~ 500 kW, chegando a ~ 1000 kW e os gráficos das figuras 43 e 44, é possível afirmar que o controlador apresenta respostas satisfatórias para o sistema. O tempo de subida das temperaturas de exaustão dos gases apresenta-se em rampa e há estabilização entre 400°C e 420°C , e conforme recomendações do fabricante está dentro dos parâmetros aceitáveis considerando que não haja diferenças entre as temperaturas dos cilindros maior que 50°C (Anexo B). Há elevação de temperatura da água de resfriamento de saída e esta se estabiliza próximo a 84°C . Há elevação de temperatura do óleo lubrificante até próximo de 70°C e estabilizando em 55°C . A estabilização da temperatura da água de resfriamento e do óleo lubrificante se justifica com a abertura da válvula termostática em 70°C , assim permitindo que a água de resfriamento circule por todos os canais de refrigeração do bloco do motor. As demais temperaturas apresentam pequenas alterações não significativas;

- Com base no seguimento de trajetória a uma função degrau de ~ 500 kW e o gráfico da figura 46, é possível afirmar que o controlador apresenta respostas satisfatórias para o sistema. A pressão de ar de partida e de segurança apresentou queda abrupta de 9,5 bar para ~ 6,7 bar, normalizando rapidamente na sequência, justificando-se em função da necessidade de elevado volume de ar para partida do grupo motor gerador. A outra observação é que inicialmente, antes da partida do MCI, a bomba de pré-lubrificação foi ligada o que justifica a elevação em ~ 2 bar de óleo lubrificante, este procedimento é utilizado para garantia de perfeita lubrificação do conjunto MCI, esta etapa é um pré-requisito para liberação da partida;
- Com base no seguimento de trajetória a uma função rampa de ~ 500 kW, chegando a ~1000 kW e o gráfico da figura 45, é possível afirmar que o controlador apresenta respostas satisfatórias para o sistema. A pressão de admissão de ar elevou de 0,5 bar para 0,94 bar devido a necessidade de maior volume de ar para o processo de combustão nos cilindros. As demais pressões não tiveram alterações relevantes; e
- Conforme a tabela 9, os parâmetros de temperatura e pressão são compatíveis com o protocolo de teste realizado pelo fabricante Wartsila, e a partir destes dados conclui-se que as características das temperaturas e pressões conforme potências aplicadas estão satisfatórias.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos destacam uma visão das potencialidades dos algoritmos para resolver problemas de otimização multimodal aplicado à sintonia de controladores PID. Na perspectiva de otimizar o desempenho é possível realizar um processo de ajuste dos parâmetros de cada algoritmo. Adicionalmente, o incremento do número de iterações permite que as partículas tenham mais oportunidades de convergirem para uma solução. As soluções apresentadas para os parâmetros PID, no processo de sintonia do controlador associada à sua função custo motor gerador, utilizando os algoritmos PID TUNE, O-PSO, O-DE e DE, são adequadas.

Foi demonstrada que a sintonia DE dos parâmetros do controlador do sistema apresentou-se eficiente nos ensaios. Os parâmetros definidos para as componentes PID aplicados ao controlador do sistema motor de combustão interna (MCI) – gerador elétrico, para os ensaios realizados de seguimento de trajetória e tempos de respostas, são satisfatórios para o controle da frequência (Hz) que se manteve estável durante os ensaios e potência (kW). A utilização do supervisor com a coleta e registro de dados via aplicação PI – *Plant Information*, acrescenta capacidade de análise de desempenho dos grupos motores geradores quando comparado com as curvas, dados de fábrica e conhecimento empírico.

As variáveis de pressão e temperatura, quando comparadas com os valores do protocolo de teste inicial do fabricante do MCI Wartsila, sugere que o grupo está com suas características eletromecânicas de fábrica preservadas para as cargas de 25% e 50% da nominal

A metodologia utilizada, acrescenta alternativa para análises de desempenho e sintonias de controles de grupos motores geradores em ambiente *offshore* com vistas à redução de custos com; manutenção, combustível e aumento da disponibilidade e vida útil. A determinação das características fundamentais do sistema, a modelagem do sistema e a realização de simulações com algoritmos inteligentes, a aplicação dos resultados em ensaios e a coleta de dados apresentam resultados de desempenho com vistas a otimização dos grupos motogeradores.

6.1 Sugestões de trabalho futuro

Como trabalho futuro, há possibilidade de ampliar a pesquisa adicionando variáveis à modelagem matemática e relacionando as curvas de referência do sistema motor e gerador elétrico com os testes transientes padronizados por normas nacionais e internacionais para emissões atmosféricas. De forma adicional é possível modernizar o controlador para modelo digital e ampliar as possibilidades de sintonia PID remota com a inclusão de outras variáveis adaptativas para pontos específicos de operação e adicionando multiobjetivos.

6.2 Limitações da Pesquisa

O controlador PID do grupo motor gerador é analógico, o que pode acarretar erro na entrada dos parâmetros de ajuste (paralaxe).

Os ensaios foram limitados a ajustes próximos a 50% da carga total do grupo motor gerador, devido a condições de processo da plataforma.

6.3 Artigos Publicados

Como resultado dessa pesquisa, foi apresentado um artigo em congresso internacional de engenharia mecânica, conforme citado abaixo:

LIBANIO, L. B.; Rudi Henri van Els . *Bio-inspired and evolution algorithms - PID controller tuning, applied to a motor-electric dynamometer system. In: 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2019, Uberlândia - MG.*

7 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO - **Boletim da Produção de Petróleo e Gás - 2021-09**- boletim.pdf (www.gov.br)
- ALBUQUERQUE, Luiz E. N --- **Automatização de um dinamômetro hidráulico para ensaios de motores de combustão interna** --- MCI com Dinamômetro Hidráulico PID - Proporcional, Integral e Derivativo --- Ziegler – Nichols, UNB / 2015.
- ÁLVAREZ, N.G.; LABRIN, B.C., "**Optimización de funciones através de Optimización por Enjambre de Partículas y Algoritmos Genéticos,**" in Conferência Latinoamericana de Informática, Santiago, Chile, 2006.
- ALVES, Kariston Dias **Desenvolvimento de regulador de velocidade para Turbina Indalma com sintonia PID baseado em Otimização por Enxame de Partículas (PSO)**/ Kariston Dias Alves. – Brasília - DF, 2018
- ÅSTRÖM, K. J. and HÄGGLUND, T. **Advanced PID Control**, *Research Triangle Park, NC: Instrumentation, Systems, and Automation Society*, 2006.
- BELL, J. A., **Modern Diesel Technology: Electricity and Electronics**, 1st ed.: *Cengage Learning*, 2007.
- BLOEMEN, H.; BOOM, T. van de; VERBRUGGEN, H. **Model-based predictive control for hammerstein systems**. *Delft University of Technology*, 2001.
- BOLZANI, C. A. M. **Residências Inteligentes**. [S.l.]: Livraria da Física, 2004.
BOLZANI, C. A. M.
- BUNKER, B.J; FRANCKEK, M. A and THOMASON, B.E. "**Robust multivariable control of an engine-dynamometer system**" *IEEE - Transactions on Control Systems Technology*, 1997
- CEZAR, Gustavo Vianna; BRAGA, Sergio Leal; EGUSQUIZA, Julio Cesar Cuisano. **Desenvolvimento de uma Bancada de Testes para Motores a Combustão Interna**. Rio de Janeiro, 2012. 143p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- D. YANAKIEV, "**Adaptive control of diesel engine-dynamometer systems**" **Decision and Control**, 1998. *Proceedings of the 37th IEEE Conference on*.
- DE CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G.; **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. Editora Edgard Blucher, 1ª edição, 2006.
- DIAGO, J.P. "**Otimização de controle de tráfego em grupo de elevadores com algoritmos bioinspirados**". Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-088A/15, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015, 105p.

EBERHART, R.; KENNEDY, J. "**A new optimizer using particle swarm theory**". *International Symposium Micro Machine and Human Science*. Nagoya, Japan: IEEE, 1995.

EVERTON, Lopes Da Silva, Carlos Roberto de CAMARGO, Lucas Lázaro SQUAIELLA e Juliano Pallaoro de SOUZA - **Eficiência Energética para Motores Diesel - Metodologia de Testes em Bancos de Prova** - MAHLE Metal Leva S/A – Centro Tecnológico, 2017

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE; Ministério de Minas e Energia – MME. Disponível em: **MATRIZ ENERGÉTICA** (epe.gov.br)>. Acesso em 05 de outubro de 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, **Balço Energético Nacional - BEN**; Apresentação do PowerPoint (epe.gov.br) Acesso em 05 outubro de 2021.

ENGELBERT GRUENBACHER#, L. del Re+ "**Robust Inverse Control for Combustion Engine Test Benches**". **2008 American Control. Conference Westin Seattle Hotel**, Seattle, Washington, USA June 11-13, 2008.

ENGELBERT GRUENBACHER. **Robust Inverse Control of a Class of Nonlinear Systems**. Tese (Doutorado)—Johannes Kepler University Linz, Graz, 2005.

ENGELBERT GRUENBACHER. et al. **Adaptive inverse torque control of a diesel engine using adaptive mapping update**. *SAE 2003-01-0397*, 2003.

ENGELBERT GRUENBACHER. et al. **Trade-offs in highly dynamical transient simulation on engine test benches**. *SAE 2007-01-0325*, 2007.

FIGURA 29 - <https://embarcados.com.br/control-pid-em-sistemas-embarcados/>, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS – Observatório do Setor. Disponível em: **Número de plataformas no Brasil (Dez/2019) – Snapshots** – IBP Acesso em 05 novembro de 2021

KARABOGA D.; BASTURK, B. "**A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm**," *Journal of Global Optimization*, v. 39, 2007.

KOLTON, E. P., "**Motores de Combustão Interna**," FIB, Salvador, 2004.

KOUSTAS, J. and WATSON, N., "**A Transient Diesel Test Bed with Direct Digital Control**," *SAE Technical Paper 840347*, 1984.

LIU, J.; WU, C.; LIU, M. Gao, E.; FU, G. "**RBF Optimization control based on PSO for elevator group system**". *International Conference on Information Science*, 2011.

MANUAL WARTSILA 12V-W200 - Chapter 01 - **Main data, operating data and general design**, 2019.

MANUAL WARTSILA 12V-W200 - Chapter 23 - **Sensors**, 2019.

MARINHA DO BRASIL – **Relatório das Plataformas** PLATAFORMAS PETRÓLEO29ABR2019 (marinha.mil.br)

MARTIR, A.J.; PLINT, M. A. **Engine Testing**. Inglaterra: Butterworth-Heinemann, 2007.

MANUAL DO CONTROLADOR – 2301A – WOODWARD - **Installation and Operation Manual**, 2019

MUÑOZ, D. “**Notas de aula – Sistemas Bioinspirados para Engenharia**”. UNB, 2017.

MUÑOZ, D. “**Otimização por inteligência de enxames usando arquiteturas paralelas para aplicações embarcadas**”. UnB- Universidade de Brasília, 2012.

OGATA, Katsuhiko: **Engenharia de controle moderno**. Rio de Janeiro: Pearson Prentice Hall, 2010.

OLIVEIRA, M. F. **Metodologia para Aplicação de Fontes Renováveis de Energia Elétrica em Plataformas Marítimas de Produção de Petróleo e Gás Natural**. (Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

OSISOFT – PI SYSTEM - **Sistema de informações da planta**. <https://www.osisoft.com/>

PEREIRA ET AL - **Caracterização dos Sistemas de Geração Elétrica dos FPSO's em Operação no Brasil**– 2013

PUC-RJ / 2012 --- CEZAR, G. V **Desenvolver um sistema de controle para bancos de prova de MCI ---- MCI com Dinamômetro Elétrico – PID Ziegler – Nichols**.

QUEVEDO, C. “**Notas de aula – Sistemas de Controle**”. UTFPR, 2012

R. WILCOX, “**Kolmogorov-Smirnov Test**,” pp. 83–90, 1998.

RAHNAMAYAN, S.; TIZHOOSH, H.R.; SALAMA, M.M.A. “**Opposition versus randomness in soft computing techniques**”. *Elsevier J Appl Soft Comput*, v. 8, p. 906–918, 2008.

RAHNAMAYAN, S.; TIZHOOSH, H.R.; SALAMA, M.M.A. “**Opposition-based differential evolution for optimization of noisy problems**”. In: *Proceedings of IEEE congress on evolution computation*, p. 1865–1872, 2006.

SERAPIÃO, A.B. de Souza. **“Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral”**. Revista Controle & Automação, v. 20, 2009.

SHI, Y.; Eberhart, R. **“A modied particle swarm optimizer”**, *Proc. IEEE Congress on Computational Intelligence*, Anchorage, Alaska, USA, 1998. p. 69-73

STORN, R.; Price, K. (1995). **Differential evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces**, *Technical Report TR-95-012*, International Computer Science Institute, Berkeley.

TAVARES, C. A. A. **O Sistema Elétrico da Plataforma P-43 e sua Similaridade com o Sistema Elétrico de Potência**, 2010.

W. H. KRUSKAL AND W. A. Wallis, **“Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis,”** *Journal of the American Statistical Association*, vol. 47, no. 260, pp. 583–621, dec 1952.

WILCOXON, Frank (1945). **«Individual comparisons by ranking methods»** . *Biometrics Bulletin*. **1** (6): 80-83

WEEKS, R.W. and Moskwa, J.J. **“Automotive Engine Modeling for Real-Time Control Using MATLAB/SIMULINK”**, *SAE Technical Paper 950417*, 1995.

WEG – **Curso dt 5 Características e especificações de geradores** – Artigo Técnico, 2019.

WHEALS, A. E. Basso, L. C Alves, D. M. G Amorim, H. V. **Fuel ethanol after 25 years**. *Trends in Biotechnology* 12 (1): 482/487, 1999.

ANEXO A – Protocolo de Teste do MCI Wartsila

Relatório de performance do motor de combustão interna apresentado e aprovado pela certificadora ABS (*American Bureau of Shipping*), este documento integra o book de fabricação e foi entregue para a Petrobras.

ANEXO B – Parâmetros de Referência para o Protocolo de Testes – Wartsila

Este relatório apresenta os parâmetros de referência de operação e testes de acordo com a carga requerida pelo MCI para as variáveis temperatura e pressão. O documento integra o book de fabricação e foi entregue para a Petrobras.

03.6.10. W12V200 : Operation data record for running in

Customer :											
Engine type :						Serial N° :					
Engine using :				Max load :			Idle speed :			Rated speed :	
Sensors		Unit	Date								
Running hours		h									
Speed	SE167	rP m	Idle	Rated		Rated	Ra- ted	Ra- ted	Rated		
Power		kW	No load	No load		25 %	50 %	75 %	100 %		
Engine room temp.		°C									
Atmosphere press.		bar									
			Max	Max		Max	Max	Max	Max		Max
LT water bef eng.	TE451	°C	45	47		49	51	53	55		
Fuel before engine	TE101	°C	30	34		38	42	46	50		
Ch. air after cooler	TE601	°C	55	58		61	64	67	70		
Lube oil bef eng.	TE201	°C	68	70		72	74	76	78		
HT water after eng	TE402	°C	70	74		78	82	86	92		
CMR panel		°C									
Starting air	PT301	bar	7-11	7-11		7-11	7-11	7-11	7-11		
Fuel	PT101	bar	3,5-6	5-6		5-6	5-6	5-6	5-6		
HT water bef eng.	PT401	bar	>2,5	4-4,5		4-4,5	4-4,5	4-4,5	4-4,5		
LT water bef eng.	PT451	bar	>2,5	3-3,5		3-3,5	3-3,5	3-3,5	3-3,5		
Ch. air after cooler	PT601	bar	/	0,1		0,2-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2,5		
Lube oil bef eng.	PT201	bar	>2,5	4-2,5		4-2,5	4-2,5	4-2,5	4-2,5		
			Side A/B	Side Max		Side A/B	Side Max	Side A/B	Side Max		Side Max
Cyl. 1 - TE501 A/B		°C	300	350		380	420	500	550		
Cyl. 2 - TE502 A/B		°C	300	350		380	420	500	550		
Cyl. 3 - TE503 A/B		°C	300	350		380	420	500	550		
Cyl. 4 - TE504 A/B		°C	300	350		380	420	500	550		
Cyl. 5 - TE505 A/B		°C	300	350		380	420	500	550		
Cyl. 6 - TE506 A/B		°C	300	350		380	420	500	550		
Average		°C									(1)
Voltage											
Ampere											
Cos Phi											
Raw water T° bef cooler		°C									
Raw water T° after cooler		°C									
Eng water T° before cooler		°C									
Eng water T° after cooler		°C									
Raw water P° bef cooler		bar									
Raw water P° after cooler		bar									
Eng water P° before cooler		bar									
Eng water P° after cooler		bar									
P° before raw water pump		bar									

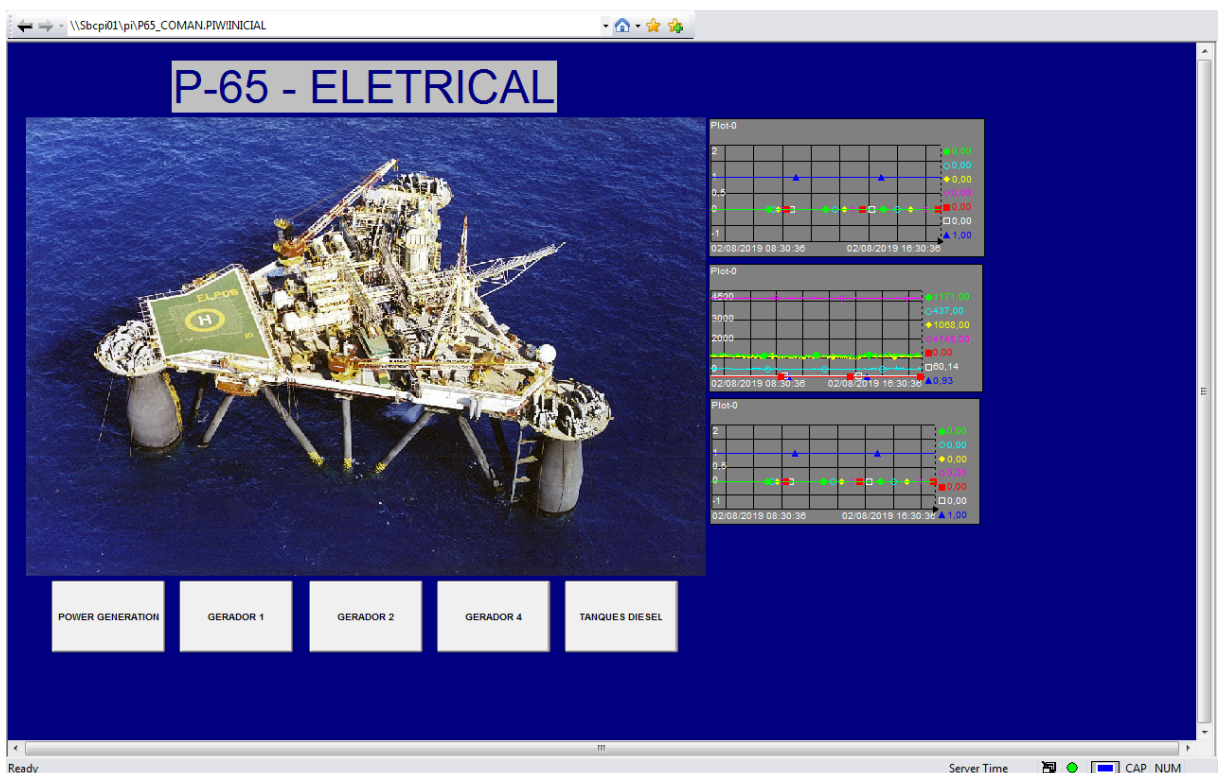
(1) See chap. 23

T = Temperature - P = Pressure - CHT = Cylinder Head Temperature
A = Alternator - S = System

ANEXO C – Supervisório de Aquisição de Dados da Plataforma 65

Tela principal configurada e desenhada para coletar e tratar os dados do grupo motor gerador, detalhada da seguinte forma:

- *Power Generator*: Apresenta as tendências do sistema elétrico de potência (SEP);
- Gerador 1, 2 e 4: Possibilita acompanhamento e registros das variáveis de pressão e temperatura para os conjuntos moto geradores. Para fins desta pesquisa foi utilizado o conjunto 4.
- Tanques de Diesel: Apresenta e registra os dados de consumo de combustível



ANEXO D – Função Custo

Função custo $F = \text{tracklsq}(\text{pid})$ utilizada nos códigos aplicados nas simulações computacionais pelos algoritmos PSO, DE e suas variações:

```
function F = tracklsq(pid)
    % Track the output of optsim to a signal of 1

    % Variables a1 and a2 are shared with RUNTRACKLSQ
    Kp = pid(1);
    Ki = pid(2);
    Kd = pid(3);

    sprintf('The value of interation Kp= %3.0f,Ki= %3.0f, Kd= %3.0f', pid(1),pid(2),pid(3));
    % Compute function value
    simopt = simset('solver','ode5','SrcWorkspace','Current','DstWorkspace','Current'); %
Initialize sim options
    [tout,xout,yout] = sim('optsim1',[0 100],simopt);
    e=1-yout ; % compute the error
    sys_overshoot=max(yout)-1; % compute the overshoot

    alpha=10;beta=10;
    F=e2*beta+sys_overshoot*alpha;
    bp=0;
end
```
