

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RENAN LANDAU PAIVA DE MEDEIROS

ESTRATÉGIA DE IDENTIFICAÇÃO PARAMÉTRICA APLICADA À
MODELAGEM FENOMENOLÓGICA DE UM SISTEMA DO TIPO CORREIA
TRANSPORTADORA INDUSTRIAL PARA FINS DE DETECÇÃO DE FALTAS

DM 16/2014

UFPA/ ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RENAN LANDAU PAIVA DE MEDEIROS

ESTRATÉGIA DE IDENTIFICAÇÃO PARAMÉTRICA APLICADA À
MODELAGEM FENOMENOLÓGICA DE UM SISTEMA DO TIPO CORREIA
TRANSPORTADORA INDUSTRIAL PARA FINS DE DETECÇÃO DE FALTAS

Dissertação submetida à Banca
Examinadora do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da UFPA para a obtenção
do Grau de Mestre em Engenharia
Elétrica na área de Sistemas de
Energia

UFPA/ ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá

Belém-Pará-Brasil

2014

**ESTRATÉGIA DE IDENTIFICAÇÃO PARAMÉTRICA APLICADA À
MODELAGEM FENOMENOLÓGICA DE UM SISTEMA DO TIPO CORREIA
TRANSPORTADORA INDUSTRIAL PARA FINS DE DETECÇÃO DE FALTAS**

Este trabalho foi julgado em ___/___/___ adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, e aprovado na sua forma final pela banca examinadora que atribuiu o conceito _____.

Prof. Dr. Walter Barra Júnior
Orientador
PPGEE-UFPA

Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Júnior
PPGEE- UFPA

Prof. Dr. José Augusto Lima Barreiros
PPGEE- UFPA

Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga
PPGEM – UFPA
Examinador Externo

JULHO/2014

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus,
por ter me dado forças a continuar em minha jornada,
dedico a minha mãe Maria de Lourdes e aos meus familiares
e em especial a minha linda namorada Mônica Ewans,
por ser sempre uma incessante fonte de luz em minha vida,
e por sempre me apoiar e estar comigo em todos os momentos,
e por fim dedico este trabalho ao personagem principal “o leitor”,
que esta leitura possa ser aproveitada e utilizada a fim de
edificar o bem.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente este trabalho a Deus, que me deu saúde e forças em minha jornada e estava sempre comigo, nos momentos tristes e alegres.

Agradeço a minha mãe Maria, por se mostrar sempre uma guerreira, e me auxiliar em todos os momentos que precisei, e a meus familiares por fazerem parte de minha história e pelos valores morais adquiridos.

Agradeço em especial a minha linda namorada Mônica Ewans, por se tornar minha fonte de força e inspiração, sempre me amparando e colocando bálsamo sobre minhas feridas e por todos os momentos compartilhados, agradeço por você existir em minha vida.

Agradeço aos meus amigos Cleyson, Cleonor, Ruben Sicchar, Anderson, Fernando, Marcus Ciro, Erick, Wenilton, André Vinicius e Nick por todos os cafés e momentos de descontração.

Agradeço em especial aos amigos Rafael Nogueira e Eder Mendes por todo o esforço e empenho em me auxiliar na confecção desta obra.

Agradeço aos meus amigos Florindo, Frederico, Fernando por sempre me auxiliarem tecnicamente em momentos de dúvidas, sou grato por todas as contribuições prestadas.

Agradeço em especial ao meu orientador Prof. Walter Barra Júnior, pelos ensinamentos e orientações que recebi desde meu ingresso no grupo de controle. E agradeço pela oportunidade de tornar este trabalho possível.

Agradeço ao projeto Pred-Falt Vale pela oportunidade, e aos professores Tavares e Barreiros por me auxiliarem com o conhecimento que dispunham.

EPÍGRAFE

**“Eu sou enquanto lutar,
E luto enquanto for.”
(Dom Quixote de la Mancha)**

SUMÁRIO

Dedicatória	v
Agradecimentos	vi
Epígrafe	vii
Lista de figuras	xii
Lista de tabelas	xv
Lista de símbolos	xvi
Resumo	xviii
Abstract	xix
Capítulo I – Introdução	01
1.1- Considerações iniciais	01
1.2- Motivação e justificativa do trabalho	01
1.3- Organização	02
Capítulo II – Modelagem fenomenológica de um sistema do tipo correia transportadora	04
2.1- Introdução	04
2.2- Componentes das forças de oposição ao movimento da correia transportadora	04
2.2.1 - Escorregamento e resistência devido a gravidade	04
2.2.2 - Ponto de carga e resistência de aceleração de material	05
2.2.3 - Resistência de fricção	05
2.3- O coeficiente de atrito artificial (f)	05
2.4- Modelagem fenomenológica de uma correia transportadora	06
2.5- Conclusão	11
Capítulo III– Estimacão paramétrica	12
3.1- Introdução	12
3.2- Estimador dos mínimos quadrados não-recursivos (MQNR)	12
3.2.1- Formulação matemática	13
3.2.2- Propriedades do estimador de mínimos quadrados	16
3.3- Estimacão e calibracão dos parâmetros da correia transportadora utilizando o método de MQNR	17
3.4- Conclusão	19
Capítulo IV- Análise intervalar	20

4.1-	Introdução	20
4.2-	Análise intervalar clássica	20
4.2.1-	Definição	20
4.2.2-	Aritmética intervalar clássica	21
4.2.3-	Extensões intervalares clássica	22
4.3-	Análise intervalar modal	23
4.3.1-	Definição	23
4.3.2-	Aritmética intervalar modal	25
4.4-	Conclusão	27
	Capitulo V- Conceitos básicos sobre supervisão e detecção de faltas	28
5.1-	Introdução	28
5.2-	Breve contextualização histórica	28
5.3-	Fundamentos a respeito de supervisão e detecção de faltas em sistemas	29
5.3.1 -	Tarefas do processo de supervisão	29
5.3.2 -	Definição de faltas	30
5.3.3 -	Definição de falhas	30
5.3.4 -	Definição de mal funcionamento	30
5.4-	Classificação dos tipos de faltas	30
5.5-	Detecção de faltas com verificação de limites	31
5.5.1 -	Verificação de limites de valores absolutos	31
5.5.2 -	Verificação de tendências	32
5.6-	Detecção de Faltas	32
5.7-	Redundância física: A abordagem tradicional para a detecção de faltas	33
5.8-	Redundância analítica: A abordagem moderna para a detecção de faltas	35
6.2.1 -	Geração passiva de resíduos	36
6.2.2 -	Envoltórias	37
6.2.3 -	Propriedade das envoltórias	38
5.9-	Detecção de faltas utilizando zonas de erro em envoltórias	39
5.10-	Conclusão	41
	Capitulo VI- Desenvolvimento e construção de um protótipo para testes em escala de laboratório	42
6.1-	Introdução	42
6.2-	Estrutura física do protótipo de uma correia transportadora	42

6.2.1 -	Sistemas de acionamento do protótipo	43
6.2.2 -	Sistema de frenagem do protótipo	44
6.3-	Constituição das partes que compõe o protótipo da correia transportadora	46
6.4-	Componentes utilizados no desenvolvimento do protótipo	47
6.4.1 -	O dsPIC 30F3014 e seus periféricos	47
7.4.1.1 -	Módulo UART	48
7.4.1.2 -	Timer	49
6.4.2 -	Circuito integrado TL084	50
6.5-	Projeto e implementação dos circuitos de condicionamento e filtragem	50
6.5.1 -	Buffer ou seguidor de tensão	50
6.5.2 -	Divisor de tensão	51
6.5.3 -	Circuito somador	51
6.5.4 -	Circuito de filtragem	52
6.6-	Placas de sensoriamento	56
6.6.1 -	Unidade de aquisição de tensão	57
6.6.2 -	Unidade de aquisição de corrente	58
6.7-	Sistema de frenagem	59
6.7.1 -	Circuito retificador	59
6.7.2 -	Circuito retificador	60
6.7.3 -	Circuito de pré-carga	60
6.7.4 -	Circuito de controle de carga aplicada	61
6.8-	Placa de relés	62
6.9-	Conclusão	63
	Capítulo VII- Resultados de estimação paramétrica e detecção de falta no sistema de correia transportadora	65
7.1-	Introdução	65
7.2-	Construção do simulador utilizado	65
7.2.1 -	Resultados de testes do simulador em ambiente simulink	67
7.2.2 -	Resultados de testes do simulador em linha de código	70
7.3-	Resultados da estimação paramétrica da correia transportadora	72
7.3.1 -	Resultados do simulador	73
7.3.2 -	Resultados obtidos com a utilização de dados reais coletados em campo	78

7.4-	Resultados do algoritmo de detecção de faltas na correia transportadora	81
7.4.1 -	Resultados do algoritmo de detecção de faltas utilizando o simulador	82
7.4.1.1 -	Algoritmo de detecção de falta utilizando o envelope exato	83
7.4.1.2 -	Algoritmo de detecção de falta utilizando a envoltória <i>overbounded</i> e <i>underbounded</i>	84
7.4.2 -	Resultados do algoritmo de detecção de faltas da correia transportadora real	86
7.4.2.1 -	Detecção de falta utilizando a envoltória exata	86
7.4.2.2 -	Detecção de falta utilizando a envoltória <i>overbounded</i> e <i>underbounded</i>	87
7.5-	Conclusão	88
	Capítulo VIII- Resultados do protótipo	89
8.1-	Introdução	89
8.2-	Sistema de supervisão (IHM)	89
8.2.1 -	Operação da IHM	90
8.3-	Testes práticos	91
8.3.1 -	Testes com o motor a vazio	91
8.3.2 -	Teste no protótipo com variação abrupta de 50% de carga	95
8.3.3 -	Teste no protótipo com entrada gradativa de carga	98
8.4-	Conclusão	101
	Capítulo IX- Conclusão	102
9.1-	Considerações finais	102
9.2-	Proposta de trabalhos futuros	102
	Referências Bibliográficas	103
	Apêndice – A	107
	Apêndice – B	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Perfil típico de uma correia transportadora de minério	06
Figura 5.1: Modelo de redundância física	35
Figura 5.2: Modelo de redundância analítica	36
Figura 5.3: Modelo de redundância analítica usando limiar fixo	36
Figura 5.4: Modelo de redundância analítica usando limiar adaptativo	37
Figura 5.5: Propriedade dos envelopes	39
Figura 5.6: Apresentação das 3 zonas definidas pelos envelopes	40
Figura 6.1: Motor assíncrono trifásico utilizado no protótipo	43
Figura 6.2: Inversor de frequência utilizado no protótipo	44
Figura 6.3: Freio de Foucault utilizado no protótipo	45
Figura 6.4: Esquemático simplificado do funcionamento do protótipo	46
Figura 6.5: Protótipo montado	46
Figura 6.6: Diagrama esquemático e funcional da arquitetura geral do protótipo	47
Figura 6.7: Pinagem do microcontrolador dsPIC 30F3014	48
Figura 6.8: Ilustração de uma transmissão serial de dados	49
Figura 6.9: Interface de comunicação serial PC/dsPIC	49
Figura 6.10: Circuito integrado com amplificadores operacionais	50
Figura 6.11: Circuito seguidor de tensão ou buffer	51
Figura 6.12: Circuito divisor de tensão	51
Figura 6.13: Circuito somador de n entradas	52
Figura 6.14: Filtro passa-baixa de 2º ordem de Sallen & Key	52
Figura 6.15: Forma transposta de filtros digital	56
Figura 6.16: Diagrama do circuito de condicionamento e filtragem	56
Figura 6.17: Forma de ligação do transdutor de potencial LEM LV-25p	57
Figura 6.18: <i>Layout</i> da placa da unidade de aquisição de tensão	58
Figura 6.19: LEM LTS-25-NP transdutor de corrente	58
Figura 6.20: <i>Layout</i> da placa da unidade de aquisição de corrente	59
Figura 6.21: <i>Layout</i> da placa do circuito de <i>link</i> DC e pré-carga	61
Figura 6.22: Circuito utilizado para a realização do controle de carga do sistema	62
Figura 6.23: Circuito clássico para o acionamento de dispositivos	62

Figura 6.24: <i>Layout</i> da placa de relés constituída para o protótipo	63
Figura 7.1: Diagrama de blocos do simulador no Simulink	66
Figura 7.2: Curvas de potência com a variação do comprimento de uma correia transportadora pequena com $V = 3.15$ m/s e $T = 2000$ T/h	68
Figura 7.3: Curvas de potência com a variação do comprimento de uma correia transportadora de tamanho médio a longo com $V = 3.15$ m/s e $T = 2000$ T/h	68
Figura 7.4: Curvas de potência com a variação da velocidade de uma correia transportadora com $L = 1000$ m e $T = 1200$ T/h	69
Figura 7.5: Curvas de potência com a variação da taxa de alimentação de uma correia transportadora com $V = 3.15$ m/s e $L = 1000$ m	69
Figura 7.6: Curvas de potência com a variação do comprimento de uma correia transportadora pequena com $V = 3.15$ m/s e $T = 2000$ T/h	70
Figura 7.7: Curvas de potência com a variação do comprimento de uma correia transportadora de tamanho médio a longo com $V = 3.15$ m/s e $T = 2000$ T/h	70
Figura 7.8: Curvas de potência com a variação da velocidade de uma correia transportadora com $L = 1000$ m e $T = 1200$ T/h	71
Figura 7.9: Curvas de potência com a variação da taxa de alimentação de uma correia transportadora com $L = 1000$ m e $T = 1200$ T/h	72
Figura 7.10: Estimação dos parâmetros da correia transportadora do simulador	73
Figura 7.11: Erro percentual de estimação dos parâmetros do simulador da correia transportadora	74
Figura 7.12: Potência ativa com a taxa de alimentação variável 1000 – 2000 T/h	75
Figura 7.13: Erro percentual da estimação da potência ativa quando a taxa de alimentação é variável entre 1000 – 2000 T/h	76
Figura 7.14: Potência ativa com a taxa de alimentação variável 2000 – 3000 T/h	77
Figura 7.15: Erro percentual da estimação da potência ativa quando a taxa de alimentação é variável entre 2000 – 3000 T/h	77
Figura 7.16: Correia transportadora de minério de uma mina de cobre no estado do Pará	78
Figura 7.17: Sistema de acionamento da correia transportadora de cobre no estado do Pará	79
Figura 7.18: Medida da potência ativa consumida pela correia transportadora	80
Figura 7.19: Medida da potência ativa consumida pela correia transportadora e valor estimado pelo algoritmo de estimação MQNR	80

Figura 7.20: Erro percentual da estimação da potência ativa medida da correia transportadora	81
Figura 7.21: Algoritmo de detecção de falta usando o envelope exato no simulador	83
Figura 7.22: Algoritmo de detecção de falta usando o envelope exato com taxa randômica	84
Figura 7.23: Algoritmo de detecção de falta usando o envelope externo	85
Figura 7.24: Algoritmo de detecção de falta usando o envelope externo com taxa de alimentação randômica	86
Figura 7.25: Algoritmo de detecção de falta usando o envelope fixo em uma correia transportadora real	87
Figura 7.26: Algoritmo de detecção de falta usando a zona de tolerância em uma correia transportadora real	88
Figura 8.1: Interface homem-máquina utilizada na constituição do protótipo da correia transportadora	89
Figura 8.2: Medida de tensão de fase AB do motor a vazio	91
Figura 8.3: Medida de tensão de fase BC do motor a vazio	92
Figura 8.4: Medida de tensão de fase AC do motor a vazio	92
Figura 8.5: Tensão medida nas três fases do motor	93
Figura 8.6: Medida de corrente na fase A do motor	93
Figura 8.7: Medida de corrente na fase B do motor	94
Figura 8.8: Medida de corrente na fase C do motor	94
Figura 8.9: Corrente medida nas três fases do motor	95
Figura 8.10: Medida de tensão RMS do motor quando submetido a uma variação de carga.	96
Figura 8.11: Medida de corrente RMS do motor quando submetido a uma variação de carga	96
Figura 8.12: Potência ativa medida no motor quando submetido a variação de carga	97
Figura 8.13: Medida de tensão do link DC.	97
Figura 8.14: Medida de potência ativa e do algoritmo de detecção de faltas.	98
Figura 8.15: Medida de tensão do link DC com entrada de carga.	99
Figura 8.16: Medida de tensão RMS do motor submetido a carga	99
Figura 8.17: Medida de corrente RMS do motor submetido a carga.	100
Figura 8.18: Medida de potência ativa e do algoritmo de detecção de falta.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Visão geral da variedade dos tipos de faltas e suas dependências com os componentes do sistema	31
Tabela 5.2: Condições de falta do sistema definidas para cada zona	41
Tabela 6.1: Dados de placa do motor assíncrono trifásico utilizado no protótipo	43
Tabela 6.2: Dados de placa do freio de Focault utilizado no protótipo	46
Tabela 7.1: Valores dos parâmetros de uma correia transportadora de carvão	73
Tabela 7.2: Valor real e valores estimados dos parâmetros θ da correia transportadora de carvão	74

LISTA DE SIMBOLOS

- F_H – Força de resistência primária
 F_N – Força de resistência secundária
 F_S – Força de resistência especial
 F_{st} – Força de resistência de *slop*
 F_U – Força de resistência total ao movimento da correia transportadora
 Q_G – Massa por unidade de comprimento da carga devido ao material sendo transportado
 Q_B – Massa por unidade de comprimento da correia transportadora vazia
 Q_{ro} – Massa por unidade de comprimento das partes rotativas do percurso de ida
 Q_{ru} – Massa por unidade de comprimento das partes rotativas do percurso de retorno
 δ – Ângulo de inclinação da correia transportadora
 T – Taxa de alimentação da correia transportadora
 V – Velocidade tangencial da correia transportadora
 L – Comprimento da correia transportadora
 g – Aceleração gravitacional
 H – Altura da elevação da correia transportadora
 k_1, k_2, k_3 – Parâmetros que dependem da estrutura e geometria da correia transportadora
 P_M – Potência mecânica devido a resistência ao movimento da correia transportadora
 P_T – Potência elétrica consumida pelo sistema de acionamento da correia transportadora
 η – Eficiência dos equipamentos elétricos
 b_1 – Distância de intervalo entre as *skit boards* da correia transportadora
 ρ – Densidade do material sendo transportado
 C_{ft} – Parâmetro relacionado a resistência ao movimento entre a polia e a correia
 \Re – Conjunto dos números reais
 f – Fator de fricção artificial
 P_{acs} – Potência consumida pelos *drivers* acessórios
 Y_N – Conjunto permitido dos valores de y
 \hat{y} – Valor estimado de y
 Δy – Limiar de y
 $\underline{P_T}$ – Limite inferior de potência do modelo intervalar proposto da correia transportadora

\overline{P}_T – Limite superior de potência do modelo intervalar proposto da correia transportadora
 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ – Parâmetros físicos e mecânicos da correia transportadora

RESUMO

Os sistemas do tipo correia transportadora, são sistemas essenciais para grandes empresas, embora este equipamento apresente um elevado grau de criticidade, de modo que uma parada não planejada do mesmo, pode gerar perdas imensas ou até mesmo a parada de todo o processo produtivo. Tendo em vista a criticidade do equipamento, torna-se necessário realizar a monitoração adequada do mesmo e detectar com maior antecedência possível a ocorrência de alguma falta ocorrida no sistema. Objetivando reduzir as paradas não planejadas, investiga-se nesta dissertação a modelagem de um sistema do tipo correia transportadora com a finalidade de uso no monitoramento e diagnóstico de faltas neste tipo de sistema. Primeiramente é discutido um modelo fenomenológico do processo, o qual é baseado na aplicação das leis da mecânica e considerando-se os diversos tipos de força de oposição ao movimento de uma correia transportadora. Os principais parâmetros do transportador foram estimados utilizando-se técnicas de identificação baseadas em Mínimos Quadrados Não Recursivos. Em seguida, foi desenvolvido e implementado um algoritmo de detecção de faltas utilizando a teoria de análise intervalar, de modo que possibilite detectar condições inadequadas de funcionamento. Com o intuito de avaliar o desempenho do algoritmo proposto foi projetado e construído um protótipo que emula as condições operacionais típicas de um sistema real do tipo correia transportadora. Os resultados obtidos experimentalmente, confirmam o bom desempenho da metodologia proposta.

Palavra-Chave: Correia Transportadora, Modelagem Fenomenológico, Identificação Paramétrica, Análise Intervalar.

ABSTRACT

Belt conveyor systems are essential for large companies, even though this equipment has a great deal of importance that makes its non-planned stop can generate huge amounts of losses or even the stall of the whole production process. Having this importance in mind it becomes necessary to realize the adequate monitoring of the system and detect with a larger prior notice the occurrence of some fault in the system. In an effort to reduce the unforeseen stop, this dissertation investigates a modeling of a belt conveyor system. At first a phenomenological model of the process is discussed based on the mechanical laws and considering the diverse types of movement opposition force throughout the belt conveyor. The main parameters of a belt conveyor belt were estimated through the non-recursive mean square. In sequence a fault detection algorithm was elaborated using the interval analysis theory, in a way that its possible to detect inadequate operation conditions. With the intent to evaluate the performance of the proposed algorithm a prototype that emulates the typical operation of a conveyor belt was designed. The results were obtained experimentally, that confirms the great performance of the proposed methodology.

Key-words: Belt conveyor, phenomenological model parametric identification, Analysis Interval.

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

1.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde o início da segunda metade do século XVII os sistemas do tipo correia transportadora, têm sido uma parte fundamental dos sistemas industriais. Durante a década de 1920, os sistemas do tipo correia transportadora eram comum na indústria. Desde aquela época correias transportadoras eram utilizadas em minas de carvão para distâncias superiores a 8 km. Estas correias eram confeccionadas utilizando-se camadas de algodão e coberturas de borracha. Em 1908, Hymle Goddard, da empresa Logan, foi o primeiro a receber a patente para este tipo de sistema. Alguns anos mais tarde, em 1919, alimentadores e transportadores livres foram usados na produção de automóveis (Bormax, 2000). Dessa forma, os sistemas de correias transportadoras tornaram-se sistemas de transporte indispensáveis em uma ampla gama de aplicações, desde o transporte de minérios até o transporte de mercadorias pesadas.

Estes sistemas possuem uma grande importância dentro da indústria, devido a isso é de vital importância investigar modelos matemáticos que representem o sistema em questão, objetivando propor metodologias para melhor supervisionar e investigar diversos problemas relacionados ao sistema.

1.2- MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Os sistemas do tipo correia transportadora, são sistemas de grande importância no âmbito de grandes corporações, visto que estes sistemas, são utilizados geralmente para a realização de abastecimento de matéria prima para o processo produtivo. Desta forma, este equipamento apresenta um elevado grau de criticidade, de modo que uma parada não planejada do mesmo pode gerar perdas imensas ou, até mesmo, a parada total de todo o processo produtivo. Tendo em vista a criticidade do equipamento, torna-se necessário realizar a monitoração adequada do mesmo e detectar, com maior antecedência possível a ocorrência de alguma falta no sistema. Objetivando contribuir para reduzir paradas não programadas, esta dissertação tem como objetivo principal, realizar a modelagem fenomenológica e investigar metodologias de detecção de faltas

em sistemas industriais do tipo correia transportadora. O estudo será efetuado tanto via estudos computacionais, quanto através de teste experimentais em laboratório. Como objetivos específicos, esta contribuição propõe desenvolver um protótipo para os ensaios laboratoriais, o qual consiste de um sistema de acionamento de motor de indução via inversor e a implementação do modelo fenomenológico da correia através de um modelo simulado em microcontrolador.

1.3- ORGANIZAÇÃO

O capítulo 2 desta dissertação, aborda a teoria a respeito de um sistema do tipo correia transportadora, levando em consideração aspectos técnicos e teóricos do sistema. Neste capítulo é apresentada uma estratégia de modelagem fenomenológica da correia transportadora.

O capítulo 3, apresenta os conceitos a cerca de estimação paramétrica, apresentando como principal técnica utilizada para a realização da estimação, a técnica de mínimos quadrados não recursiva, após apresentar os conceitos da técnica, foi reescrita a equação obtida na modelagem fenomenológica do sistema, de modo que possibilitasse a estimação dos parâmetros mecânicos da correia, devido a estes serem de difícil determinação.

O capítulo 4, apresenta os conceitos a respeito da análise intervalar, inicialmente é apresentado os conceitos idealizados para a constituição da análise intervalar clássica e a aritmética que a compõe, em seguida é exposto a definição e a aritmética relacionada a análise intervalar modal.

O capítulo 5, apresenta conceitos básicos a respeito de supervisão e detecção de faltas em sistemas, em seguida são apresentadas algumas técnicas para a realização da supervisão de sistemas e detecção de faltas no mesmo, dentre todas as técnicas apresentadas destaca-se a técnica das envoltórias, apresentando as suas propriedades e aplicação na problemática da detecção de faltas.

O capítulo 6, apresenta os passos para o desenvolvimento e construção de um protótipo em escala laboratorial, que emule o sistema em estudo, em seguida é descrito minuciosamente todos os passos para o projeto do mesmo.

O capítulo 7, apresenta os resultados obtidos da estimação paramétrica de uma correia transportadora real e da construção de um simulador do sistema do tipo correia

transportadora, no ambiente de simulação computacional Matlab, utilizando o simulador e a série de dados obtidas é aplicado o algoritmo de detecção de faltas abordado no capítulo 5, em seguida é apresentando os resultados obtidos para diversas condições de operação do sistema.

O capítulo 8, apresenta os resultados obtidos do protótipo construído, apresentando a aplicação do algoritmo de detecção de falta e a emulação do modelo de uma correia transportadora de minério.

O capítulo 9, apresenta as conclusões a cerca do trabalho e propostas de trabalhos futuros.

CAPITULO II

MODELAGEM FENOMENOLÓGICA DE UM SISTEMA DO TIPO CORREIA TRANSPORTADORA

2.1- INTRODUÇÃO

Os sistemas do tipo correia transportadora são tidos como os mais eficazes dentre todos os meios de transporte de minério em curtas ou médias distâncias (Zhang, 2009). O custo da energia elétrica constitui uma grande parte do custo operacional desse tipo de sistema, sendo estimado em torno de 40% de custo operacional (Zhang, 2011). Dessa forma, trabalhos visando a melhoria da eficiência energética de equipamentos de acionamentos são de extrema importância para a operação econômica e segura de correias transportadoras de minério, visando reduzir custos e preservar a vida útil dos equipamentos.

2.2- COMPONENTES DAS FORÇAS DE OPOSIÇÃO AO MOVIMENTO DA CORREIA TRANSPORTADORA

O consumo energético dos sistemas de correias transportadoras, são determinados através da análise dos componentes de resistência de movimento ao longo de todo o percurso da esteira. A resistência total é determinada através da soma algébrica de todas as resistências existentes, as forças de resistência podem ser classificadas dentro de três categorias, descritas a seguir (Wiid, 2009).

2.2.1- ESCORREGAMENTO E RESISTÊNCIA DEVIDO À GRAVIDADE

Esta componente está diretamente associada com, a altura relativa do ponto de alimentação ao ponto de descarga da correia transportadora, devido a esta inclinação é exercida uma componente horizontal da força gravitacional sobre o material transportado, promovendo desta forma uma resistência ao transporte deste (Nuttal, 2007).

2.2.2- PONTO DE CARGA E RESISTÊNCIA DE ACELERAÇÃO DE MATERIAL

Esta componente está associada a velocidade com a qual o material é colocado sobre a correia transportadora, no momento da recepção deste material, geralmente a velocidade e direção do mesmo são diferentes da velocidade e direção da correia transportadora, resultando desta forma em uma resistência de inércia no ponto de carregamento da mesma.

2.2.3- RESISTÊNCIA DE FRICÇÃO

A resistência de fricção está diretamente associada aos muitos componentes mecânicos que produzem atrito ao movimentar a correia transportadora, desta forma inclui-se o atrito devido a rotação, deslizamentos e resistências internas como resultado da interação correia/roletes.

A resistência de atrito rotacional ocorre devido a presença de componentes que rotacionam ao longo de toda a esteira como os roletes, tambores e polias.

A resistência de atrito por deslizamento ocorre como resultado da inclinação e da aderência da interface correia/material.

As resistências de atrito internas ocorrem principalmente na interface correia/roletes, esta resistência também é conhecida como resistência à flexão. A resistência à flexão ocorre devido a uma deformação da zona de contato da correia com os roletes tensores, resultando em um recuo da cinta e promovendo assim uma resistência ao movimento.

2.3- O COEFICIENTE DE ATRITO ARTIFICIAL (f)

Segundo a norma ISO 5048, o coeficiente de atrito artificial é obtido através da relação entre as três resistências de atrito anteriormente citadas. Estas resistências estão diretamente relacionadas com as seguintes massas de movimento, estas por sua vez são expressas por metro de comprimento do transportador:

- Massa dos roletes.
- Massa da cinta da correia transportadora.
- Massa do material transportado.

As massas em movimento tem uma relação cumulativa para as resistências de atrito. Desta forma os roletes suportam as massas das partes rotativas, a massa da cinta da correia transportadora e a massa do material que esta sobre a esteira, logo as massas sobre os roletes é dado pela soma algébrica total das massas mencionadas anteriormente (ISO 5048, 1989).

2.4- MODELAGEM FENOMENOLÓGICA DE UMA CORREIA TRANSPORTADORA

A modelagem fenomenológica da correia transportadora, e de cunho fundamental para a obtenção do ponto ótimo de operação, de modo ao sistema atuar adequadamente e com maior eficiência. Na literatura são difundidos dois métodos distintos para a obtenção do modelo matemático, o primeiro método baseia-se no cálculo das forças de resistência que atuam no sistema, o outro baseia-se na conversão de energia através de um comprimento de compensação. Este trabalho, foi elaborado utilizando o modelo proposto por (Zhang, 2009), onde este propõe uma interligação entre as duas abordagens apresentadas anteriormente. A figura 2.1 apresenta o esquema de uma correia transportadora de minérios típica, utilizada em (Zhang,2009).

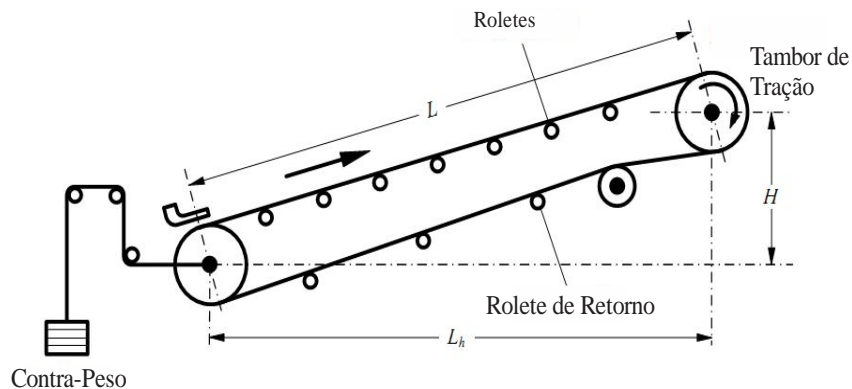


Figura 2.1- Perfil típico de uma correia transportadora de minério (ZHANG, 2009).

Na Figura 2.1 é apresentado o esquema de uma correia transportadora de minérios, onde, L (m) é comprimento de transporte da correia, medido em relação ao centro das polias de acionamento nos pontos extremos da esteira, L_h (m) é a correspondente distância horizontal, e H (m) é a correspondente altura de elevação.

De acordo com (Zhang, 2009), sob condições de regime permanente, o consumo de potencia elétrica ativa é predominante devido às diversas forças de resistência ao movimento da secção carregada e também da secção de retorno da correia transportadora. Os acessórios tais como os *belt cleaners* (para retirada de material colados à correia) e os *skirt boards* (para minimizar derramamento de material pelas laterais da esteira) também contribuem para o consumo total de energia. As normas ISO 5048 e DIN22101 classificam as forças de resistência ao movimento nos seguintes grupos:

- F_H - Força de Resistência Primária, é composta pelas forças de resistência devido a fricção, ao longo de todo o percurso da correia, pode ser expressada conforme a equação 2.1.

$$F_H = fgL[(Q_G + 2Q_B)\cos(\delta) + Q_{RO} + Q_{RU}] \quad (2.1)$$

Onde:

Q_G - Massa por unidade de comprimento (em kg/m) da carga devido ao material sendo transportado na correia.

$2Q_B$ - Massa por unidade de comprimento da correia vazia (em kg/m).

δ - É o ângulo de inclinação da correia.

Q_{RO} - Massas por unidade de comprimento das partes rotativas dos *idlers* (roletes) do percurso de ida, dados em (kg/m).

Q_{RU} - Massas por unidade de comprimento das partes rotativas dos *idlers* (roletes) do percurso de retorno da correia.

Na equação 2.1, o valor da carga Q_G pode ser expresso em função da taxa de transferência de material na correia, T (T/h), e da velocidade da esteira, V (m/s), conforme mostra a relação 2.2.

$$Q_G = \frac{T}{3.6V} \quad (2.2)$$

- F_N - Força de Resistência Secundária: É composta por forças de resistência ao movimento de natureza inercial e também de fricção. São forças de fricção do material com a correia, na estação de alimentação, bem como forças de resistência a movimento devido a fricção do material nas *skirt boards*. A norma ISO 5048 relaciona a força de resistência secundária, F_N , à força de resistência principal, F_H , pode ser expressada através da equação 2.3.

$$F_N = (C(L) - 1)F_H \quad (2.3)$$

Onde, o parâmetro $C(L)$ pode ser expresso através da relação (4).

$$C(L) = \begin{cases} 0.85 + 13.31L^{-0.576} & , \text{ para } (10 \leq L < 1840) \\ 1.025 & , \text{ para } (L \geq 1840) \end{cases} \quad (2.4)$$

- F_{st} - Força de Resistência de *Slop*: Esta força de resistência é devida à elevação, H (m), e pode ser expressa conforme a equação 2.5.

$$F_{st} = Q_G g H \quad (2.5)$$

- F_s - Força de Resistência Especial: É a composição das demais forças de resistência ao movimento, pode ser expressa conforme a equação 2.6.

$$F_s = k_1 \frac{T^2}{V} + k_2 \frac{T}{V} + k_3 \quad (2.6)$$

Onde:

k_1 , k_2 e k_3 - Parâmetros que dependem da estrutura da correia.

➤ F_U - Força de resistência total ao movimento da correia: Esta força pode ser calculada como a soma das forças de resistência primária - F_H , força de resistência secundária - F_N , força de resistência de *slop* - F_{st} e força de resistência especial - F_S , como mostra a equação 2.7.

$$F_U = F_H + F_N + F_{st} + F_S \quad (2.7)$$

Conforme o conceito da física mecânica a potência mecânica total necessária para equilibrar as forças de resistência ao movimento, pode ser expressa como mostra a equação 2.8.

$$P_M = F_U V \quad (2.8)$$

A potência elétrica ativa total, P_T , que os motores elétricos e seus respectivos *drivers* de acionamento necessitam consumir da rede elétrica, para suprir a potência mecânica total da correia, P_M , pode ser calculada como mostra a equação 2.9.

$$P_T = \frac{1}{\eta} P_M \quad (2.9)$$

Onde:

η - Rendimento total dos motores elétricos e *drivers* de acionamento da correia transportadora.

Substituindo as equações 2.1, 2.3, 2.5 e 2.6 na equação 2.7 e a equação 2.8 na equação 2.9 e de acordo com (Zhang, 2009), a potência elétrica consumida pelo sistema correia transportadora e carga, P_T , pode ser expressa conforme a equação 2.10.

$$P_{ec} = \frac{1}{\eta} \left[fg(L \cos \delta) + L_{01} \right] QV + fg(L \cos \delta) + L_{02} \left) \frac{T}{3.6} + gH \frac{T}{3.6} + P_{acs} \right] \quad (2.10)$$

Onde:

L_{01} (m) e L_{02} (m) - Parâmetros de compensação.

Q (kg/m) - Massa por unidade de comprimento dos componentes móveis da correia

P_{acs} - Potência consumida pelos equipamentos acessórios.

Os valores de Q , L_{01} e L_{02} podem ser calculador utilizando as relações de 2.11 a 2.13, respectivamente.

$$Q = 2Q_B + Q_{RO} + Q_{RU} \quad (2.11)$$

$$L_{01} = L(1 - \cos(\delta)) \left(1 - \frac{2Q_B}{Q} \right) \quad (2.12)$$

$$L_{02} = \frac{V}{gf} \left(V + \frac{T}{1.8b_1^2 \rho} + \frac{3.6C_{ft}}{T} \right) \quad (2.13)$$

Onde:

b_1 (m)- Distância de intervalo entre as *skirt boards* da correia.

ρ (kg/m³)- Densidade do material sendo transportado pela correia.

C_{ft} - Parâmetro relacionado com a resistência ao movimento entre a polia e a correia, normalmente este parâmetro é pequeno e constante.

2.5-CONCLUSÃO

Neste capítulo, foram apresentados os aspectos técnicos e teóricos, de maior relevância, a respeito da modelagem fenomenológica do sistema de correia transportadora. Foi utilizado como premissa a modelagem do sistema, o princípio da conservação de energia, obtendo desta forma um modelo estático do sistema. O próximo capítulo, apresentará os conceitos básicos sobre estimação paramétrica, dando ênfase no método de mínimos quadrados não recursivos (MQNR).

CAPITULO III

ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA

3.1- INTRODUÇÃO

A identificação de sistemas é tratada, muitas vezes como um problema de otimização que envolve algumas medidas para a adequação de modelos candidatos a representar um processo real. A seleção de modelos matemáticos e o ajuste dos parâmetros são influenciados por diversos fatores, dentre eles pode-se destacar: Conhecimento *a priori* do sistema, propriedades do modelo a ser identificado, seleção da medida do erro a ser minimizado e a presença de ruídos. O objetivo do algoritmo de otimização é a minimização de um critério de desempenho. Se todas as restrições forem satisfeitas, o modelo encontrado pode ser tido como satisfatório, caso contrário, se uma das condições impostas é violada, todos os procedimentos de identificação, estimação de parâmetros e diagnóstico do modelo devem ser reavaliados até que um modelo apropriado seja encontrado (Ljung, 1996; Coelho, 2004).

Este capítulo tem por finalidade apresentar um método de estimação *off-line*, para a realização deste teste armazenou-se as medidas de entrada e saída de uma correia transportadora, de modo a aplicação *a posteriori* de algoritmos de estimação não-recursivos.

3.2- ESTIMADOR DOS MÍNIMOS QUADRADOS NÃO-RECURSIVO (MQNR)

Karl Friedrich Gauss formulou o princípio dos mínimos quadrados ao final do século 18, este possuía a intenção de aplicar tal técnica para prever a trajetória de planetas e cometas, a partir das observações realizadas. K. F. Gauss estabeleceu que os parâmetros desconhecidos de um modelo matemático deveriam ser selecionados de modo que:

“O valor mais provável das grandezas desconhecidas é o que minimiza a soma dos quadrados da diferença entre os valores atualmente observados e os valores calculados multiplicados por números que medem o grau de precisão, onde quanto mais precisa a medida, maior a sua ponderação” (Ljung e Söderström, 1983).

3.2.1- FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Considere um processo físico caracterizado por uma entrada $u(t)$, uma saída $y(t)$ e uma perturbação $e(t)$, possuindo a função de transferência discreta como mostra a Equação 3.1.

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d} B(z^{-1})u(t) + e(t) \quad (3.1)$$

Onde os polinômios A e B podem ser escritos conforme as Equações 3.2 e 3.3.

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{na} z^{-na} \quad (3.2)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{nb} z^{-nb} \quad (3.3)$$

Substituindo as Equações 3.2 e 3.3 na Equação 3.1 e reescrevendo a equação no domínio do tempo através de equações de recorrência, pode-se escrever a Equação 3.4.

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - a_2 y(t-2) - \dots - a_{na} y(t-na) + b_0 u(t-d) + b_1 u(t-d-1) + \dots + b_{nb} u(t-d-nb) \quad (3.4)$$

Definido o vetor de medidas $\Phi(t)$ e o vetor de parâmetros $\theta(t)$, de dimensão $(na+nb+1) \times 1$ e $(na+nb+1) \times 1$, como mostra a Equação 3.5 e 3.6 respectivamente.

$$\phi(t) = [-y(t-1) \quad \dots \quad -y(t-na) \quad u(t-d) \quad \dots \quad u(t-d-nb)] \quad (3.5)$$

$$\theta^T = [a_1 \quad \dots \quad a_{na} \quad b_0 \quad \dots \quad b_{nb}] \quad (3.6)$$

Desta forma pode-se reescrever a Equação 3.4 como mostra a Equação 3.7, este por sua vez é denominado modelo de regressão linear (Ljung e Söderström, 1983).

$$y(t) = \phi^T(t)\theta + e(t) \quad (3.7)$$

Admitindo que são realizadas N medidas, suficientes para determinar os parâmetros a_i e b_j , então tem-se a Equação 3.8 e 3.9, como a representação matricial da Equação 3.7.

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi^T(0) \\ \phi^T(1) \\ \vdots \\ \phi^T(N-1) \end{bmatrix} \cdot \theta + \begin{bmatrix} e(0) \\ e(1) \\ \vdots \\ e(N-1) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$Y = \varphi \cdot \theta + E \quad (3.9)$$

A matriz de observação φ pode ser formulada conforme a Equação 3.10.

$$\varphi = \begin{bmatrix} -y(-1) & -y(-2) & \cdots & -y(-na) & u(-d) & \cdots & u(-d-nb) \\ -y(0) & -y(-1) & \cdots & -y(1-na) & u(-d) & \cdots & u(1-d-nb) \\ -y(1) & -y(0) & \cdots & -y(2-na) & u(1-d) & \cdots & u(2-d-nb) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -y(N-2) & -y(N-3) & \cdots & -y(N-na-1) & u(N-d-2) & \cdots & u(N-d-nb) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Sendo desta forma o vetor de saída Y , dado pela relação 3.11.

$$Y^T = [y(0) \quad y(1) \quad y(2) \quad \cdots \quad y(N-1)] \quad (3.11)$$

A estimativa do vetor de parâmetros, $\hat{\theta}$, pode ser obtida através do procedimento de mínimos quadrados. Utilizando a estimativa $\hat{\theta}$, a melhor previsão da saída do sistema \hat{y} , é calculada através da Equação 3.12.

$$Y^T = \phi \cdot \hat{\theta} \quad (3.12)$$

E o erro de previsão pode ser determinado através da relação 3.13.

$$\varepsilon = Y - \hat{Y} = Y - \phi \cdot \hat{\theta} \quad (3.13)$$

O estimador de mínimos quadrados ponderado, também pode ser denominado de estimador de Markov, este por sua vez obedece ao critério mostrado nas Equações 3.14 e 3.15.

$$J = \min_{\hat{\theta}} \|Y - \phi \cdot \hat{\theta}\|_w^2 \quad (3.14)$$

$$J = [Y - \phi \cdot \hat{\theta}]^T \cdot W \cdot [Y - \phi \cdot \hat{\theta}] \quad (3.15)$$

Desta forma a matriz W pode ser escrita através da Equação 3.16.

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}} = -2 \cdot [Y^T \cdot W \cdot \hat{\theta}]^T + 2 \cdot \phi^T \cdot W \cdot \phi \cdot \hat{\theta} = 0 \quad (3.17)$$

Desta forma, o estimador dos mínimos quadrados ponderado é calculado através da relação 3.18.

$$\hat{\theta} = [\phi^T \cdot W \cdot \phi \cdot \phi]^T^{-1} \phi^T \cdot W \cdot Y \quad (3.18)$$

A equação 3.18 é estimada de forma adequada, e conduz ao mínimo valor, se satisfizer a condição mostrada na Equação 3.19.

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}} = 2 \cdot \phi^T \cdot W \cdot \phi \cdot \hat{\theta} > 0 \quad (3.19)$$

O estimador dos mínimos quadrados não recursivos é obtido admitindo que a relação 3.20 seja verdadeira.

$$W = \sigma^2 \cdot I_{N \times N} \quad (3.20)$$

Esta consideração, significa dizer que a mesma ponderação deve ser aplicada a todos os erros de medida, logo pode-se modificar a Equação 3.18 para a Equação 3.21 e 3.22.

$$\hat{\theta} = \left[\frac{1}{\sigma} \right] \left[\phi^T \cdot \phi \cdot \right]^{-1} \phi^T \cdot [\sigma^2] \cdot Y \quad (3.21)$$

$$\hat{\theta} = \left[\phi^T \cdot \phi \cdot \right]^{-1} \phi^T \cdot Y \quad (3.22)$$

O estimador dos mínimos quadrados, obtido na Equação 3.22 é considerado uma transformação linear sobre a função linear das medidas Y , denominado de estimador linear. Algumas observações podem ser feitas para este tipo de estimador:

- A matriz $[\Phi^T \Phi]$ é inversível e simétrica, esta pode ser denominada de “condição de excitação”, a dimensão da matriz depende do número de parâmetros e não do número de amostras coletadas do sistema.
- O critério dos mínimos quadrados pondera todos os erros igualmente, desta forma implica-se dizer que todas as medidas possuem a mesma precisão.
- Na aplicação do estimador dos mínimos quadrados não recursivos, todas as medidas devem estar disponíveis *a priori* para análise, e não existe limitação no tempo de processamento do algoritmo.
- A precisão das estimativas está associada com o tamanho dos elementos da matriz de covariância, que por definição é calculado $P(t) = [\Phi(t)^T \Phi(t)]^{-1}$

3.2.2- PROPRIEDADES DO ESTIMADOR DOS MÍNIMOS QUADRADOS

O estimador dos mínimos quadrados, $\hat{\theta}$, é uma aleatória, onde as propriedades podem ser analisadas utilizando-se a equação de diferenças do processo, como mostrado na Equação 3.7 (Coelho, 2004).

- O estimador é não-polarizado, ou seja, os parâmetros estimados convergem para os parâmetros verdadeiros quando o número de iterações aumenta, se a perturbação é um ruído branco e os sinais de entrada e saída são estatisticamente independentes.

- O valor da covariância pode ser calculada, através da relação 3.23. Esta por sua vez fornece a medida direta da variabilidade e covariabilidade dos parâmetros estimados, desta forma conclui-se que a precisão das estimativas é estabelecida pelo tamanho dos elementos da matriz covariância.

$$\text{cov}\{\hat{\theta}\} = \sigma^2 [\phi^T \cdot \phi]^{-1} \quad (3.23)$$

3.3- ESTIMAÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CORREIA TRANSPORTADORA UTILIZANDO O MÉTODO DE MQNR

O modelo matemático baseado no cálculo energético da correia transportadora, é formulado a partir da integração de três equações analíticas, como observado no capítulo 2.

Atualmente, os pontos de operação das correias transportadoras não são ajustados de modo que esta opere em seu ponto ótimo, este fato se deve principalmente a complexidade do modelo matemático adequado e a parametrização e calibração deste, visto que diversos parâmetros mecânicos deste modelo são de difícil obtenção. Desta forma Zhang, propõe um modelo de cálculo energético modificado, no qual permite a calibração e parametrização do modelo energético modificado de modo experimental, utilizando como artifício matemático a técnica MQNR (Zhang, 2009).

De acordo com a ISO 5048, a força de resistência especial F_S que existe na correia transportadora, onde inclui-se as forças F_{fr} , F_{sb} , F_c e F_p , pode ser obtida através da relação entre a taxa de alimentação da esteira (T) e a velocidade da esteira (V), como mostrado na relação 2.6, para descrever a força F_S , desta forma pode-se isolar os coeficientes dos parâmetros a serem estimados, rescrevendo a relação da potência total consumida como mostra a Equação 3.24.

$$P_T = \frac{V^2 T}{3.6} + T^2 V \theta_1 + V \theta_2 + \frac{T^2}{V} \theta_3 + T \theta_4 \quad (3.24)$$

As relações 3.25 a 3.28 mostram como os parâmetros $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ relacionam-se com as características da correia transportadora.

$$\theta_1 = \frac{1}{6.48b_1\rho} \quad (3.25)$$

$$\theta_2 = gf(L_h + L_{01})Q + k_3 + c_{ft} \quad (3.26)$$

$$\theta_3 = k_1 \quad (3.27)$$

$$\theta_4 = \frac{gH + gfL_h}{3.6} + k_2 \quad (3.28)$$

Objetivando realizar a aplicação da técnica de estimação MQNR, reescreve-se a Equação 3.24 como mostra as Equações 3.29 a 3.34.

$$\frac{P_T}{M} - \frac{VT^2}{3.6M} = \left(\frac{m_1}{M}\theta_1\right)\frac{T^2V}{m_1} + \left(\frac{m_2}{M}\theta_2\right)\frac{V}{m_2} + \left(\frac{m_3}{M}\theta_3\right)\frac{T^2}{m_3V} + \left(\frac{m_4}{M}\theta_4\right)\frac{T}{m_4} \quad (3.29)$$

Onde:

$$m_1 = \text{máx}(T^2V) \quad (3.30)$$

$$m_2 = \text{máx}(V) \quad (3.31)$$

$$m_3 = \text{máx}\left(\frac{T^2}{V}\right) \quad (3.32)$$

$$m_4 = \text{máx}(T) \quad (3.33)$$

$$M = \text{máx}\left(P_T - \frac{V^2T}{3.6}\right) \quad (3.34)$$

Escrevendo a Equação 3.29 no formato matricial, obtém-se as relações 3.35 a 3.38.

$$P_{TN} = \phi' \theta \quad (3.35)$$

Onde:

$$P_{TN} = \frac{P_T}{M} - \frac{VT^2}{3.6M} \quad (3.36)$$

$$\phi^T = \left[\frac{T^2V}{m_1} \quad \frac{V}{m_2} \quad \frac{T^2}{m_3V} \quad \frac{T}{m_4} \right]^T \quad (3.37)$$

$$\theta = \left[\frac{m_1}{M}\theta_1 \quad \frac{m_2}{M}\theta_2 \quad \frac{m_3}{M}\theta_3 \quad \frac{m_4}{M}\theta_4 \right] \quad (3.38)$$

3.4- CONCLUSÃO

Neste capítulo, foram apresentadas as técnicas de estimação paramétrica mais difundidas na área, dando maior ênfase na técnica de mínimos quadrados não recursivos (MQNR), de modo que esta técnica, seja aplicada ao modelo de estimação da correia transportadora, viabilizando assim a estimação dos parâmetros de um sistema real. No próximo capítulo, serão abordados os principais conceitos e teoremas de análise intervalar.

CAPITULO IV

ANÁLISE INTERVALAR

4.1- INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão abordados os principais conceitos a respeito de análise intervalar, assim como a aritmética intervalar e seus principais teoremas constituintes, de modo que possibilite a elaboração de um equacionamento intervalar para a construção do modelo intervalar da correia transportadora.

4.2- ANÁLISE INTERVALAR CLÁSSICA

Em determinadas situações para realizar a identificação de um determinado sistema, inicialmente é necessário uma descrição matemática adequada do problema proposto, entretanto nem sempre esta representação é de fácil compreensão e representa fidedignamente o sistema, para estes casos recorre-se a métodos para a obtenção experimental de um modelo que represente o sistema, sendo desta forma apenas uma estimativa de parâmetros para realizar a representação do sistema, ou seja, o mesmo geralmente contém incertezas em sua descrição. Desta forma, é interessante utilizar não apenas valor estimado para os parâmetros do modelo, mas parametrizar também incertezas, levando em conta possíveis erros de medidas nos valores dos parâmetros. Os valores do sistema, ao invés de valores fixos, passam a ser representados por intervalos reais, nos quais, garantidamente, estariam contidos os parâmetros “desconhecidos” da planta.

4.2.1- DEFINIÇÃO

Define-se intervalo clássico como sendo um par ordenado de números reais $[a] = [\underline{a}, \bar{a}]$, onde $\underline{a} \leq \bar{a}$. Os números reais \underline{a} e \bar{a} são os pontos extremos do intervalo $[a]$. Pode-se classificar os intervalos degenerados da forma $[a]$, onde $\underline{a} = \bar{a}$, são equivalentes a números reais (Moore,1966).

O conjunto dos números intervalares é denotado por $I(\mathbb{R})$.

A largura, o centro, o raio e a magnitude de $[a]'$, podem ser definidos como apresentam as Equações 4.1 a 4.4, respectivamente.

$$a_w = \bar{a} - \underline{a} \quad (4.1)$$

$$a_c = \frac{1}{2}(\bar{a} + \underline{a}) \quad (4.2)$$

$$\delta = \frac{1}{2}(\bar{a} - \underline{a}) \quad (4.3)$$

$$|[a]'| = \max(|\underline{a}|, |\bar{a}|) \quad (4.4)$$

4.2.2- ARITMÉTICA INTERVALAR CLÁSSICA

A aritmética intervalar é uma extensão da aritmética real. Segundo Alefeld e Mayer as operações aritméticas intervalares, podem ser explicitadas conforme apresenta as Equações 4.5 a 4.8 (Alefeld e Mayer, 2000).

$$[a]' + [b]' = [\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}] \quad (4.5)$$

$$[a]' - [b]' = [\underline{a} - \bar{b}, \bar{a} - \underline{b}] \quad (4.6)$$

$$[a]' \cdot [b]' = [\min(\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b}), \max(\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b})] \quad (4.7)$$

$$[a]' / [b]' = [\underline{a}, \bar{a}] \frac{1}{[\underline{b}, \bar{b}]} \quad (4.8)$$

Diz-se ainda que $[a]' < [b]'$ se e somente se $\bar{a} < \underline{b}$, assume-se ainda que, $[a]' = [b]'$ se e somente se $\underline{a} = \underline{b}$ e $\bar{a} = \bar{b}$.

Algumas propriedades podem ser descritas conforme as Equações 4.9 a 4.12, onde demonstram que a adição e multiplicação intervalares são ambas associativas e comutativas. Os números reais 0 e 1 são identidades para adição e multiplicação intervalar, respectivamente. Para maiores informações, consultar (Prado, 2006).

$$[a]' + ([b]' + [c]') = ([a]' + [b]') + [c]' \quad (4.9)$$

$$[a]' \cdot ([b]' \cdot [c]') = ([a]' \cdot [b]') \cdot [c]' \quad (4.10)$$

$$[a]' + [b]' = [b]' + [a]' \quad (4.11)$$

$$[a]' \cdot [b]' = [b]' \cdot [a]' \quad (4.12)$$

A Equação 4.13 apresenta a propriedade da subdistributividade.

$$[a]' \cdot ([b]' + [c]') \subseteq [a]' \cdot [b]' + [a]' \cdot [c]' \quad (4.13)$$

4.2.3- EXTENSÕES INTERVALARES CLÁSSICA

Extensões intervalares padrão $\varphi \in E = \{\sin, \cos, \tan, \arctan, \exp, \ln, \text{mod}, \sqrt{x}\}$, são definidas como funções definidas via suas imagens, ou seja, pode ser expressa conforme a Equação 4.14.

$$\varphi([x]') = \{\varphi(x) \mid x \in [x]'\} \quad (4.14)$$

Estas funções são extensões correspondentes funções reais, e são inclusões monotônicas, satisfazendo a Equação 4.15 (Prado, 2006).

$$[x]' \subseteq [y]' \Rightarrow \varphi([x]') \subseteq \varphi([y]') \quad (4.15)$$

Segundo (Prado, 2006), a aritmética intervalar clássica, quando utilizada para obter a extensão natural de funções que tenham elementos multiincidentes em sua descrição, pode tornar o resultado final um intervalo bastante sobreestimado. Além disso, os resultados intervalares não possuem um significado suficientemente claro. De modo a contornar tal problemática, utiliza-se a análise intervalar modal.

4.3- ANÁLISE INTERVALAR MODAL

A matemática intervalar é definida através de intervalos clássicos, são intervalos definidos através de conjuntos, desta forma tornam-se o contexto consistente para a computação numérica. Entretanto, o contexto de análise intervalar clássica apresenta uma estrutura básica e rigidez semântica devido a fundamentar-se em conjuntos. Objetivando sanar tal fragilidade, na análise intervalar modal definem-se intervalos a partir da identificação dos números reais com os conjuntos de predicados que os intervalos aceitam ou rejeitam.

Um intervalo modal é definido como um par formado por um intervalo clássico e um quantificador, possibilitando comparar de forma análoga a reta real em que números reais são associados em pares, tendo o mesmo valor absoluto, mas sinais opostos. Duas diferentes extensões para funções contínuas (chamadas extensões semânticas, tendo em vista que ambas terão um significado devido a importantes teoremas semânticos) estas são definidas e suas propriedades são estabelecidas. A definição de extensão intervalar racional, e suas relações com as extensões intervalares semânticas, torna possível calcular as extensões intervalares semânticas e dar um significado lógico aos resultados intervalares dos cálculos racionais (Prado, 2006).

As extensões semânticas para algumas funções são iguais, por exemplo, para operadores aritméticos que podem ser obtidos através de cálculos com os limites intervalares, obtendo as definições da aritmética intervalar completa de Kaucher (Kaucher, 1980).

4.3.1- DEFINIÇÃO

Um intervalo modal é definido como um par formado por um intervalo clássico $[x]'$ e um quantificador $Q[x]$, como apresenta a Equação 4.16.

$$[x] := ([x]', Q[x]) \quad (4.16)$$

Os quantificadores são operadores que indicam a modalidade de um intervalo. A modalidade de um intervalo pode ser classificada como: Existencial ou Universal. O quantificador existencial $Q[x]=E$, define que existe um valor de x que pertence ao intervalo $x \in [x']$. O quantificador universal $Q[x]=U$, define que para todo e qualquer valor de x pertence ao intervalo $x \in [x']$.

As coordenadas canônicas dos intervalos modais são definidas conforme apresenta as Equações 4.17 e 4.18.

$$\inf([a]) = \begin{cases} \min([a'])..se..Q([a']) = E \\ \max([a'])..se..Q([a']) = U \end{cases} \quad (4.17)$$

$$\sup([a]) = \begin{cases} \max([a'])..se..Q([a']) = E \\ \min([a'])..se..Q([a']) = U \end{cases} \quad (4.18)$$

Desta forma pode-se definir intervalos modais, como apresenta a Equação 4.19.

$$[a] = \begin{cases} \left(\left[\underline{a}, \bar{a} \right], E \right) ..se.. \underline{a} \leq \bar{a} \\ \left(\left[\bar{a}, \underline{a} \right], U \right) ..se.. \underline{a} \geq \bar{a} \end{cases} \quad (4.19)$$

Os conjuntos “naturais” dos intervalos modais podem ser definidos em 3 conjuntos: Intervalos próprio, intervalos impróprio e intervalo pontual. Estes conjuntos podem ser definidos conforme apresentado nas Equações 4.20 a 4.22, respectivamente.

$$I_e(\mathfrak{R}) = \{ [a] \in I^*(\mathfrak{R}) \mid \underline{a} \leq \bar{a} \} \quad (4.20)$$

$$I_u(\mathfrak{R}) = \{ [a] \in I^*(\mathfrak{R}) \mid \underline{a} \geq \bar{a} \} \quad (4.21)$$

$$I_p(\mathfrak{R}) = \{ [a] \in I^*(\mathfrak{R}) \mid \underline{a} = \bar{a} \} \quad (4.22)$$

Os predicados são condições que podem ser relacionadas a um intervalo, com o intuito de relacionar os quantificadores aos predicados, utiliza-se as notações como apresentado nas Equações 4.23 e 4.24.

$$E(x, [a'])P(x) \quad (4.23)$$

$$U(x, [a'])P(x) \quad (4.24)$$

A Equação 4.23, tem por significado que existe um valor de x que pertence ao intervalo $[a']$ de modo que o predicado $P(x)$ seja satisfeito. A Equação 4.24, tem por significado que para todo valor de x que pertence ao intervalo $[a']$ o predicado $P(x)$ seja satisfeito.

4.3.2- ARITMÉTICA INTERVALAR MODAL

Segundo (Prado, 2006), seja uma operação aritmética em \mathfrak{R} , onde, $[a], [b] \in I^*(\mathfrak{R}), \underline{a}, \bar{a}, \underline{b}, \bar{b}, r \in \mathfrak{R}$. A extensão de $*$ em $I^*(\mathfrak{R})$ se define como uma extensão intervalar da função real contínua sobre os intervalos.

Desta forma as operações assumem as seguintes formas, como apresenta as Equações 4.25 a 4.29.

$$[a] + [b] = [\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}] \quad (4.25)$$

$$[a] - [b] = [\underline{a} - \bar{b}, \bar{a} - \underline{b}] \quad (4.26)$$

$$[a] \bullet [b] = \left\{ \begin{array}{l} [\underline{ab}, \overline{ab}] \dots se.. \underline{a} \geq 0, \overline{a} \geq 0, \underline{b} \geq 0, \overline{b} \geq 0 \\ [\underline{ab}, \overline{ab}] \dots se.. \underline{a} \geq 0, \overline{a} \geq 0, \underline{b} \geq 0, \overline{b} < 0 \\ [\underline{ab}, \overline{ab}] \dots se.. \underline{a} \geq 0, \overline{a} \geq 0, \underline{b} < 0, \overline{b} \geq 0 \\ [\underline{ab}, \overline{ab}] \dots se.. \underline{a} \geq 0, \overline{a} \geq 0, \underline{b} < 0, \overline{b} < 0 \\ [\underline{ab}, \overline{ab}] \dots se.. \underline{a} \geq 0, \overline{a} < 0, \underline{b} \geq 0, \overline{b} \geq 0 \\ [\max(\underline{ab}, \overline{ab}), \min(\overline{ab}, \underline{ab})] \dots se.. \underline{a} \geq 0, \overline{a} < 0, \underline{b} \geq 0, \overline{b} \geq 0 \\ [0, 0] \dots se.. \underline{a} \geq 0, \overline{a} < 0, \underline{b} < 0, \overline{b} \geq 0 \\ [\underline{ab}, \overline{ab}] \dots se.. \underline{a} \geq 0, \overline{a} < 0, \underline{b} < 0, \overline{b} < 0 \\ [\underline{ab}, \overline{ab}] \dots se.. \underline{a} < 0, \overline{a} \geq 0, \underline{b} \geq 0, \overline{b} \geq 0 \\ [0, 0] \dots se.. \underline{a} < 0, \overline{a} \geq 0, \underline{b} \geq 0, \overline{b} < 0 \\ [\min(\underline{ab}, \overline{ab}), \max(\overline{ab}, \underline{ab})] \dots se.. \underline{a} < 0, \overline{a} \geq 0, \underline{b} \leq 0, \overline{b} \geq 0 \\ [\underline{ab}, \overline{ab}] \dots se.. \underline{a} < 0, \overline{a} \geq 0, \underline{b} < 0, \overline{b} < 0 \\ [\underline{ab}, \overline{ab}] \dots se.. \underline{a} < 0, \overline{a} < 0, \underline{b} \geq 0, \overline{b} \geq 0 \\ [\underline{ab}, \overline{ab}] \dots se.. \underline{a} < 0, \overline{a} < 0, \underline{b} \geq 0, \overline{b} < 0 \\ [\underline{ab}, \overline{ab}] \dots se.. \underline{a} < 0, \overline{a} < 0, \underline{b} < 0, \overline{b} \geq 0 \\ [\underline{ab}, \overline{ab}] \dots se.. \underline{a} < 0, \overline{a} < 0, \underline{b} < 0, \overline{b} < 0 \end{array} \right. \quad (4.27)$$

$$r[a] = \left\{ \begin{array}{l} [\underline{ra}, \overline{ra}] \dots se.. r \geq 0 \\ [\underline{ra}, \overline{ra}] \dots se.. r < 0 \end{array} \right. \quad (4.28)$$

$$[a]/[b] = \left\{ \begin{array}{l} [\underline{a/\underline{b}}, \overline{a/\underline{b}}] \dots se.. \underline{a} \geq 0, \overline{a} \geq 0, \underline{b} \geq 0, \overline{b} \geq 0 \\ [\underline{a/\underline{b}}, \overline{a/\underline{b}}] \dots se.. \underline{a} \geq 0, \overline{a} \geq 0, \underline{b} < 0, \overline{b} < 0 \\ [\underline{a/\underline{b}}, \overline{a/\underline{b}}] \dots se.. \underline{a} \geq 0, \overline{a} < 0, \underline{b} \geq 0, \overline{b} \geq 0 \\ [\underline{a/\underline{b}}, \overline{a/\underline{b}}] \dots se.. \underline{a} \geq 0, \overline{a} < 0, \underline{b} < 0, \overline{b} < 0 \\ [\underline{a/\underline{b}}, \overline{a/\underline{b}}] \dots se.. \underline{a} < 0, \overline{a} \geq 0, \underline{b} \geq 0, \overline{b} \geq 0 \\ [\underline{a/\underline{b}}, \overline{a/\underline{b}}] \dots se.. \underline{a} < 0, \overline{a} \geq 0, \underline{b} < 0, \overline{b} < 0 \\ [\underline{a/\underline{b}}, \overline{a/\underline{b}}] \dots se.. \underline{a} < 0, \overline{a} < 0, \underline{b} \geq 0, \overline{b} \geq 0 \\ [\underline{a/\underline{b}}, \overline{a/\underline{b}}] \dots se.. \underline{a} < 0, \overline{a} < 0, \underline{b} < 0, \overline{b} < 0 \end{array} \right. \quad (4.29)$$

Para intervalos modais pode-se definir também o conceito de dualidade, onde a Equação 4.30 apresenta tal conceito.

$$dual([\underline{a}, \overline{a}]) = [\overline{a}, \underline{a}] \quad (4.30)$$

As propriedades da soma, diferença, produto por um escalar, produto e quociente da aritmética intervalar modal podem ser demonstrados e melhor explicitados em (Prado, 2006; Trepát, 1982).

4.4- CONCLUSÃO

Neste capítulo, foram apresentados os fundamentos a cerca de análise intervalar, estes conceitos básicos e teoremas apresentados, serão utilizados para a aplicação no modelo de uma correia transportadora real, de modo que possibilite a delimitação do intervalo gerado pela função da correia, a partir do teorema de extensão funcional. No próximo capítulo, serão abordados os principais conceitos a respeito de detecção de faltas.

CAPITULO V

CONCEITOS BÁSICOS SOBRE SUPERVISÃO E DETECÇÃO DE FALTAS

5.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por finalidade, apresentar os principais aspectos a respeito do tema de supervisão e detecção de faltas. Por conseguinte, definir um algoritmo de detecção de faltas, que viabilize a aplicação do mesmo, em um sistema de correia transportadora real e que possa ser aplicado com base no modelo construído por esta obra.

5.2 – BREVE CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

O desenvolvimento histórico de diversos sistemas de supervisão, detecção de falta e sistemas de diagnóstico de faltas, é difícil descrever devido ao grande número de contribuições originais publicadas na literatura técnica. No século XIX, para a supervisão de sistemas, foi utilizado gravadores com impressão a tinta, este foi o equipamento padrão para a supervisão de sistemas em meados de 1935. Depois, por volta de 1960, foram utilizados controladores analógicos, baseados em amplificadores transistorizados e controladores sequenciais com dispositivos com fio, tornaram-se disponível e em seguida usou-se a técnica de verificação de limite, para realizar a supervisão de sistemas (Isermann, 2006).

Em meados de 1960, iniciou-se a implementação verificação *on-line* da operação de um determinado sistema, melhorando assim os métodos utilizados para a supervisão. Em 1968 foi introduzido o primeiro, controlador lógico programável PLC, substituindo assim os relés eletromecânicos, desta forma tornava-se mais fácil e eficiente elaborar um sistema de proteção. Com o advento do microcomputador, em 1971, aumentou a descentralização dos processos do sistema de automação, em 1975 foi o início do uso computacional, para construir programas e algoritmos para a supervisão e detecção de faltas em sistemas. As primeiras publicações nesta área foram a respeito de sistemas aeroespaciais, seguido de processos em plantas químicas.

5.3 – FUNDAMENTOS A RESPEITO DE SUPERVISÃO E DETECÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS

O processo de supervisão é uma técnica que objetiva apresentar o presente estado do sistema, indicando assim as condições apresentadas que são indesejáveis ao bom funcionamento do processo, podendo intervir no processo, a fim de tomar ações apropriadas, de modo a evitar a ocorrência de danos e/ou acidentes. O desvio do comportamento normal do sistema deve-se as faltas e erros, que podem ser atribuídas a diversas causas. Estas faltas podem se apresentar em pequenos ou longos períodos de tempo, podem apresentar-se inicialmente como um mal funcionamento do sistema, e evoluir para uma falha caso não seja neutralizada a tempo. Ratificando assim, a necessidade da supervisão, que tem por objetivo detectar e apresentar o mal funcionamento e as falhas do sistema.

5.3.1 – TAREFAS DO PROCESSO DE SUPERVISÃO

As técnicas de supervisão de processos e/ou controle de qualidade dos produtos manufaturados, são geralmente realizadas através da verificação dos limites operacionais do sistema, com verificação direta das variáveis de saída do sistema e de algumas variáveis, como: pressão, força, torque, nível, fluxo, temperatura, velocidade entre outras. Para verificar os limites é utilizado uma zona de tolerância fixa, um alarme indica uma condição de falta, quando a medida ultrapassa a zona de tolerância previamente estipulada. Pode-se destacar e sumarizar algumas tarefas principais do sistema de supervisão:

- **Monitoração:** Verificar as medidas das variáveis, no que se refere a tolerâncias, e emitir um alerta quando desrespeitadas as condições estipuladas.
- **Supervisão com detecção de faltas:** Implementação de técnicas computacionais de modo que possibilite verificar condições de mal funcionamento do sistema, algumas das técnicas mais eficazes, constituem modelos para a detecção de faltas no sistema.

- Proteção automática: No caso de um processo entrar em uma condição de perigo, o sistema neutralizará automaticamente tais faltas, visto que o processo de monitoração captará tais mudanças na condição de operação.

Para maiores informações a respeito de sistemas de supervisão, consultar (Isermann, 2006).

5.3.2 – DEFINIÇÃO DE FALTAS

Segundo (R. Isermann, 2006), a falta é definida como, um desvio irregular do comportamento normal e operacional do sistema, mantendo o sistema em condições prejudiciais.

5.3.3 – DEFINIÇÃO DE FALHAS

Segundo (R. Isermann, 2006), a falha é definida como, a interrupção permanente da capacidade do desempenho do sistema em realizar determinadas funções em condições específicas de operação.

5.3.4 – DEFINIÇÃO DE MAL FUNCIONAMENTO

Segundo (R. Isermann, 2006), o mal funcionamento é definido como, a irregularidade intermitente na execução da função requerida pelo sistema.

5.4 – CLASSIFICAÇÕES DOS TIPOS DE FALTAS

As faltas, geralmente apresentam um comportamento característico em vários componentes. Isso pode ser distinguido pela forma, comportamento no tempo, extensão. A forma pode ser subdivida entre sistemática ou randômica, o comportamento no tempo pode ser descrito por permanente, transiente, intermitente ou ruído, a extensão da falta pode ser classificada em local ou global. A Tabela 5.1 dá uma visão geral da variedade dos tipos de faltas e as dependências com os componentes do sistema.

Tabela 5.1- Visão geral da variedade dos tipos de faltas e suas dependências com os componentes do sistema
(R. Isermann, 2006).

Tipos de Faltas		Componentes do Sistema			
		Componentes Mecânicos	Componentes Elétricos	Hardware Eletrônico	Software
Forma	Sistemática	X		X	X
	Randômica		X	X	
Comportamento no Tempo	Permanente			X	X
	Transiente	X	X	X	
	Intermitente		X	X	X
	Ruído		X	X	
Extensão	Local	X	X	X	X
	Global			X	X

5.5 – DETECÇÃO DE FALTAS COM VERIFICAÇÃO DE LIMITES

O mais simples e o mais frequente método utilizado para a detecção de faltas é a verificação de limites, diretamente das variáveis medidas, com isto as medidas das variáveis do processo são monitoradas e verificadas, se o seu valor absoluto, ou se a tendência excede um determinado limiar previamente estabelecido.

5.5.1 – VERIFICAÇÃO DE LIMITE DE VALORES ABSOLUTOS

Geralmente, para constituir o modelo de detecção de faltas utilizando a técnica de verificação de limites de valores absolutos. O estado normal de operação do sistema, ocorre quando a Equação 5.1 é obedecida.

$$Y_{\min} < Y < Y_{\max} \quad (5.1)$$

Se a variável monitorada, estiver dentro da faixa delimitada pelos valores máximos e mínimos, denominada de faixa de tolerância, pode-se afirmar que o sistema encontra-se na situação normal de operação. Quando a variável monitorada excede a zona de tolerância, é indicado que o sistema está em falta. Portanto o grande problema para o uso desta técnica, está na escolha adequada dos limites mínimos e máximos das variáveis monitoradas, esta problemática é bem discutida, pois em sistemas reais é comum ocorrer pequenas flutuações das variáveis, mesmo em condições normais de operação, e isto poderia ocasionar uma grande quantidade de alarmes falsos, que é um fator de ineficiência para sistemas de detecção de falta.

5.5.2 – VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIAS

Outra possibilidade de detecção de faltas, utilizando a verificação de limites, é utilizar a primeira derivada do sistema, e verificar se a tendência obedece a Equação 5.2.

$$\dot{Y}_{\min} < \dot{Y} < \dot{Y}_{\max} \quad (5.2)$$

Caso uma zona de tolerância pequena, seja estabelecida, a utilização da técnica de verificação de tendência pode ser utilizada, para obter de forma mais rápida, do que a técnica de valor absoluto.

5.6 – DETECÇÃO DE FALTAS

Atualmente no mundo não é suficiente produzir os produtos que o mercado demanda, precisam produzir a um custo operacional baixo, possibilitando propor baixos preços ao produto. Esta redução dos custos operacionais é de maior interesse das indústrias. Uma forma de reduzir os custos de produção é reduzir drasticamente as perdas de produção, devido a paradas não planejadas do processo produtivo. Em uma situação ideal, a manutenção preventiva dos equipamentos em uma empresa, reduz drasticamente o número de intervenções não planejadas, conhecidas como manutenção corretiva, que atua de modo a sanar um problema no processo produtivo, para alguns

métodos avaliativos de plano de manutenção estes servem como indicadores fundamentais, de modo a ratificar a eficiência de uma manutenção bem planejada.

Outra maneira de se lidar com o problema da manutenção é observar o processo e detectar mudanças em suas condições de operação. Estas mudanças no ponto de operação podem ocasionar diversos problemas ao sistema, podendo promover uma perda no desempenho ocasionando uma degradação na qualidade do produto ofertado, ou até mesmo inviabilizando a comercialização do mesmo, assim como pode ocasionar danos ao equipamento e/ou promover condições de risco aos operadores. Neste sentido é de fundamental importância a detecção destas condições inadequadas de operação, caracterizadas como condições de falta do sistema. Objetivando projetar um sistema tolerante a faltas, ou para manter um elevado nível de desempenho, é de fundamental importância que estas alterações sejam detectadas imediatamente e diagnosticadas, de modo que possibilite a tomada de ações corretoras para reconfigurar o sistema e acomodar estas oscilações (J. Armengol, 1999).

É de fundamental importância distinguir entre falta e falha de um sistema. A falta denota um mal funcionamento do sistema e pode denotar algo tolerável em seu estágio inicial, enquanto que a falha sugere um colapso completo, uma catástrofe. Os sistemas de falta são especialmente difíceis de detectar e controlar.

Segundo (R. Isermann, 1997), algumas tarefas relacionadas ao campo de detecção de faltas, pode ser apresentada da seguinte forma:

- Detecção de faltas: É a indicação de que alguma coisa está errada com o sistema.
- Diagnóstico de faltas:
 - Isolação da falta: É a determinação do tipo e a exata localização da falta.
 - Identificação da falta: É a determinação do tamanho, tipo, magnitude, natureza e causa da falta.
- Acomodação da falta: É a reconfiguração do sistema utilizando componentes em operação normal.

Este trabalho, está focado na problemática de detecção de faltas. O desempenho de um sistema de detecção de faltas, pode ser mensurado através da análise e minimização de 3 tipos de indicadores distintos:

- Taxa de alarmes perdidos: Este indicador está relacionado aos alarmes que são perdidos quando existe uma falta no sistema, ou seja, o sistema de detecção de faltas não detectou tal ação.
- Taxa de alarmes falsos: Este indicador está relacionado a quantidade de alarmes que o sistema de detecção de faltas acusa, mesmo sem a configuração de uma falta.
- Tempo de atraso: Este indicador está relacionado ao tempo que o sistema demora para detectar uma falta ocorrida.

5.7 – REDUNDÂNCIA FÍSICA: A ABORDAGEM TRADICIONAL PARA DETECÇÃO DE FALTAS

Antigamente, o problema de detecção de faltas foi abordado utilizando diversas técnicas, como: Análise do espectro de frequência, limites, *fault dictionary approach*, verificação de tendência entre outros. Uma das técnicas mais difundidas foi a redundância física. Pode-se destacar como algumas exemplificações deste método:

- A instalação de múltiplos sensores. Diferentes sensores são utilizados para medir a mesma variável. Caso ocorra uma discrepância muito grande entre as medidas de um dos sensores, isso claramente caracteriza que este sensor está em falta.
- A instalação de múltiplos *hardwares* ou *softwares*. Para operações críticas, com o intuito de aumentar a segurança alguns componentes são duplicados ou triplicados.

Em todos os casos é através da comparação do comportamento medido por todos os dispositivos, que define o comportamento normal do sistema, caso não possua o mesmo comportamento este encontra-se em falta. Em outras palavras, o comportamento do sistema deverá ser previamente conhecido, de modo a comparar com o comportamento de outro sistema utilizado apenas para essa finalidade. Desta forma constitui-se uma maneira para gerar uma referência de comportamento de um sistema de forma mais simples e eficiente, trabalhando com a cópia exata do sistema real e nas mesmas condições de operação, provendo o comportamento real do sistema, como base de

referência. Entretanto, por razões econômicas e outros tipos este tipo de aplicação não é usual. Uma alternativa válida para este tipo de problema, gerar uma referência de comportamento do sistema, como apresenta a Figura 5.1.

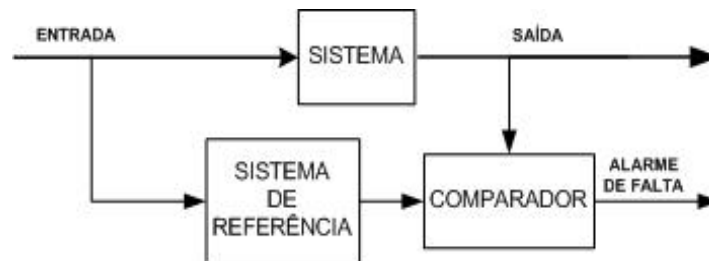


Figura 5.1- Modelo de redundância física

5.8 – REDUNDÂNCIA ANALÍTICA: A ABORDAGEM MODERNA PARA A DETECÇÃO DE FALTAS

Alguns tipos de modelos matemáticos podem ser utilizados para gerar referências de comparação, e verificar se o sistema em questão está em falta ou não. A vantagem deste tipo de técnica, é que além de não promover gastos desnecessários com a replicação de equipamentos, os modelos constituídos utilizando sistemas especialistas baseados no conhecimento humano do sistema durante as condições normais e de falta. Para maiores informações a respeito do assunto consulte (Keller, 1999; Quevedo, 1994; Travé-Massuyes, 1995).

Na literatura, quando a abordagem do método utilizado para constituir o modelo, é baseada no conhecimento humano prévio do funcionamento do sistema é denominada de *knowledge-based approaches*, entretanto quando a abordagem é baseada no modelo matemático do sistema denomina-se *model-based approaches*. Estas abordagens podem ser utilizadas para constituir o algoritmo de detecção de faltas (J. Armengol, 1999; J. Armengol and Sainz, 1999).

Este trabalho é baseado utilizando a abordagem *model-based approaches*. A figura 5.2 apresenta um esquemático da redundância analítica.

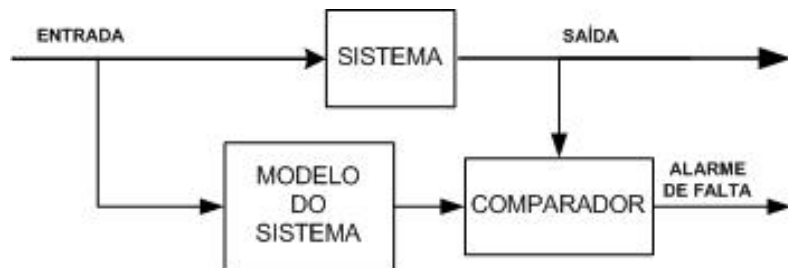


Figura 5.2- Modelo de redundância analítica

O modelo quantitativo é utilizado usualmente para simuladores, sendo que para alguns tipos de modelos, este simulador pode ser utilizado para realizar a previsão de valores das variáveis do sistema. No caso ideal, as medidas estimadas pelo simulador reproduzem exatamente o comportamento do sistema para diferentes situações, incluindo a condição de operação normal e a condição de falta do sistema em questão.

5.8.1 – GERAÇÃO PASSIVA DE RESÍDUOS

A indicação de faltas ocorre, quando os resíduos gerados pela comparação das medidas do sistema com o modelo obtido, for maior que um limiar. Desta forma, o problema agora está na escolha adequada deste limiar, pois caso este limiar seja muito pequeno, uma grande quantidade de alarmes falsos ocorrerá, caso este limiar seja muito grande, uma grande quantidade de alarmes será perdido. A figura 5.3 apresenta um esquemático da redundância analítica usando um limiar fixo.

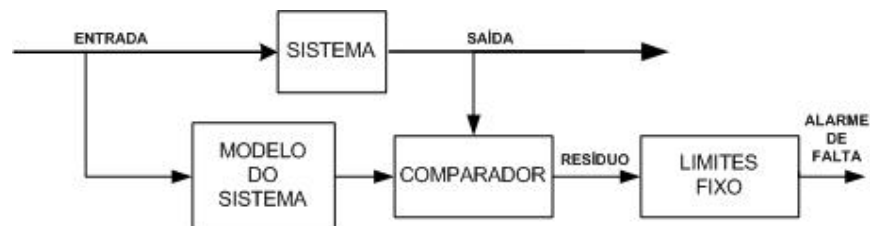


Figura 5.3- Modelo de redundância analítica usando limiar fixo

O limite fixo tem como vantagem levar em consideração, algumas incertezas e imprecisões existentes na modelagem do processo, ruídos providos pelos sensores entre outras coisas. Usualmente o limite fixo, não leva em consideração a dinâmica do

sistema, depende exclusivamente de seu modelo de aproximação que selecionará as melhores condições para o seu sistema, dependendo do seu ponto de operação. Por esta razão, sistemas não-lineares e/ou linearizados em torno de um ponto de operação, possuem uma boa aproximação apenas em pontos de operação nominal do sistema. Para estes casos adota-se uma estratégia diferenciada, onde é gerado um novo limite a cada passo de tempo, variando com as condições do sistema ou processo, denominando-se esta estratégia de limiar adaptativo. A Figura 5.4 apresenta um esquemático de redundância analítica utilizando limiar adaptativo.

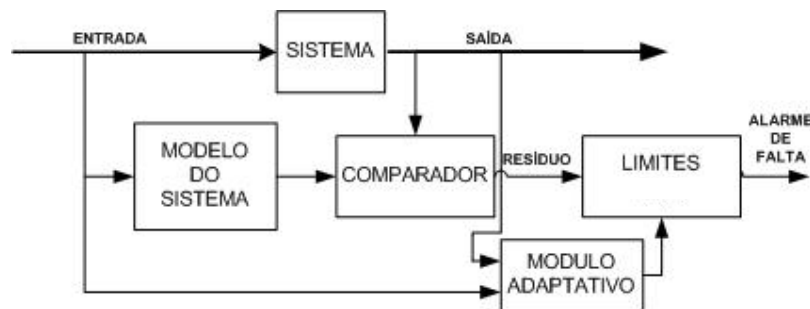


Figura 5.4- Modelo de redundância analítica usando limiar adaptativo

Pode-se escrever a relação dos resíduos do limiar adaptativo, conforme a Equação 5.1. Em geral, para sistemas dinâmicos, o desempenho do limiar adaptativo é melhor do que o limiar fixo (J. Armengol, 1999).

$$Y_N = \{y \mid |y - \hat{y}| \leq \Delta y\} \quad (5.3)$$

Onde:

Y_N é o conjunto permitido que compõe os valores de y .

\hat{y} é o valor estimado de y .

Δy é o limiar de \hat{y} .

5.8.2 – ENVOLTÓRIAS

A referência de comportamento de um sistema utilizando redundância analítica, pode ser obtida através de simulações de modelos. No caso de utilizar valores reais aplicados ao modelo, o resultado obtido será as trajetórias das variáveis do sistema no

tempo. No caso de intervalos modais, o conjunto de modelos, gerará um conjunto de curvas denominadas de envoltórias. O envelope completo é o conjunto de todos os possíveis comportamentos do modelo do sistema (J. Armengol, 1998; J. Armengol, 2001).

Os envelopes possuem a difícil tarefa, especialmente em sistemas considerados invariantes no tempo, de determinar os valores dos parâmetros que são constantes, embora haja incertezas e imprecisões. Em cada passo de tempo, a simulação determina os valores de máximo e mínimo possível para as variáveis do sistema, desta forma o *range* do sistema passa a ser um problema computacional de otimização, podendo ser solucionados através de algoritmos de otimização global. As propriedades e aplicabilidades de algoritmos, para a solução deste tipo de problema pode ser consultada em (Hansen, 1992).

Os envelopes exatos são uma representação dos limiares. Estes são obtidos, especificamente utilizando o modelo de limiar adaptativo, como apresentado no subitem anterior, contudo é adicionado uma faixa de tolerância, como apresenta a Equação 5.2 (J. Armengol, 1999). Para maiores informações a respeito das propriedades dos envelopes e alguns simuladores, pode ser consultado (J. Armengol, 1999).

$$Y_N = \{y \mid \hat{y} - \Delta y \leq y \leq \hat{y} + \Delta y\} \quad (5.2)$$

Em casos reais de detecção de faltas, o uso dos envelopes não são exatos, por isso adere-se a uma estratégia de delimitação de erros aceitáveis nos envelopes, conhecida como *over-bounded envelope*, desta forma delimita-se uma faixa de tolerância adicional ao entorno do mesmo.

5.8.3 – PROPRIEDADES DAS ENVOLTÓRIAS

A geração de um envelope não é uma tarefa simples, e muitas vezes, não é possível obter uma boa precisão em relação ao *range* que descreve o envelope, para isso em muitos casos são utilizados aproximações. Pode-se sumarizar em duas definições as propriedades dos envelopes.

Definição 1: O envelope *overbounded* é mais amplo que o envelope exato: Todas as possíveis saídas dos modelos que pertencem ao espaço dos modelos aceitáveis, estão dentro do envelope, mas existem pontos no interior que não pertencem a nenhuma dessas saídas e, por conseguinte, inclui-se zonas que não podem ser alcançadas por qualquer um dos modelos pertencentes ao conjunto dos modelos aceitáveis.

Definição 2: O envelope *underbounded* é mais restrito que o envelope exato: Todos os pontos dentro do envelope pertencem a, pelo menos uma das saídas do modelo que pertencem ao espaço dos modelos aceitáveis, entretanto existem pontos destas saídas fora do envelope. Portanto, existem modelos pertencentes ao conjunto, cujo as saídas se encontram-se fora do envelope, por conseguinte, o envelope não representa o seu comportamento.

As propriedades aqui apresentadas, podem ser verificadas na Figura 5.5.

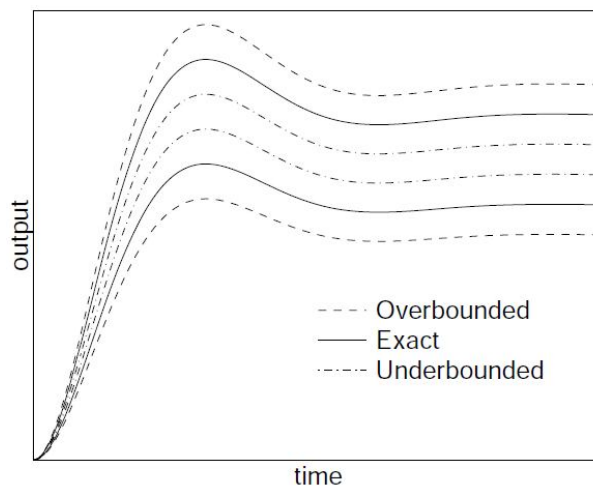


Figura 5.5- Propriedade dos envelopes (J. Armengol, 1999).

5.9 – DETECÇÃO DE FALTAS UTILIZANDO ZONAS DE ERRO EM ENVOLTÓRIAS

A utilização dos envelopes *overbounded* e *underbounded*, simultaneamente caracteriza uma estratégia de detecção de faltas. Estes dois envelopes definem 3 zonas, como mostra a Figura 5.6. Com a utilização destas 3 zonas, garante-se que ocorrerá uma

falha quando a medida do sistema, estiver fora das zonas delimitadas, entretanto existe a possibilidade de que mesmo quando o sistema estiver em falta, a medida esteja dentro de uma das zonas da envoltória.

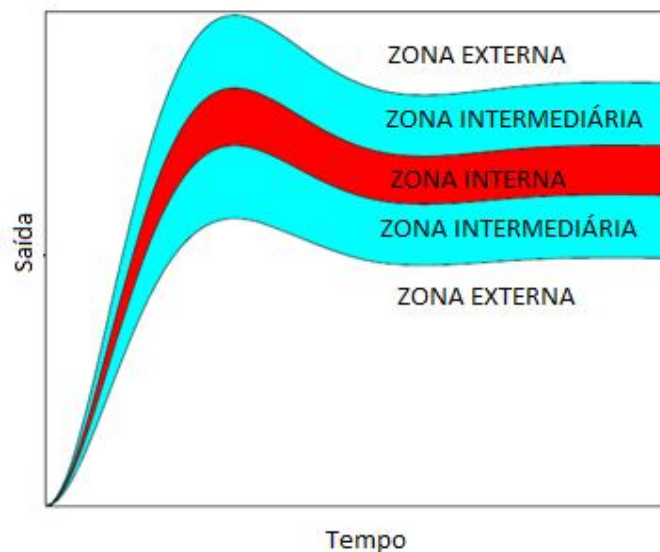


Figura 5.6- Apresentação das 3 zonas definidas pelos envelopes Adaptado de: (J. Armengol, 1999).

Os envelopes admitem que alguns pontos que não são representados por nenhum modelo do espaço de modelos aceitáveis, estejam dentro de uma das zonas permitidas, isso deve-se ao fato de que estes pontos não são possíveis de se alcançar com a representação do modelo intervalar.

Portanto, a saída do sistema poderá alcançar a uma das três zonas definidas, a Tabela 5.2 apresenta as condições de falta do sistema para cada zona definida.

Tabela 5.2- Condições de falta do sistema definidas para cada zona.

		CONDIÇÃO DO SISTEMA	
		Sem Falta	Em Falta
ZONAS	Interna	Permitido	Permitido
	Intermediaria	Permitido	Permitido
	Externa	Proibido	Permitido

Se as medidas da saída do sistema, estiverem dentro da zona externa um alarme de faltas pode ser acionado, independente do erro entre os envelopes. Se a medida estiver dentro da zona interna, nada poderá ser dito a respeito do comportamento do sistema, não podendo definir se é falta ou não. Por conseguinte, se a medida estiver dentro da zona intermediária, possivelmente a falta foi detectada se esta medida estiver as proximidades da zona externa.

Para a realização do algoritmo de detecção de faltas, utilizando as zonas definidas, foi constituído 3 indicadores, para realizar a detecção da falta.

- *Falta = 1* A medida está na zona externa. A falta foi detectada.
- *Falta = 0.5* A medida está na zona intermediária. Não foi detectado falta.
- *Falta = 0* A medida está na zona interna. Não foi detectado falta.

5.9 – CONCLUSÃO

Neste capítulo, foram apresentados os principais conceitos a respeito do tema de detecção de faltas, apresentando algumas técnicas mais usuais no ramo, este tem por objetivo a construção de um algoritmo de detecção de faltas que possibilite a averiguação destas, em uma correia transportadora, para isso utilizou-se o modelo desenvolvido no capítulo 2, desta obra. No próximo capítulo, são apresentados o desenvolvimento e construção dos circuitos que compõe o protótipo de uma correia transportadora.

CAPITULO VI

DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO PARA TESTES EM ESCALA DE LABORATÓRIO

6.1- INTRODUÇÃO

Devido a dificuldade de realizar testes práticos na correia transportadora real, devido a restrições econômicas e operacionais, foi necessário desenvolver um protótipo para a simulação física do sistema.

A estrutura física do protótipo da correia transportadora é constituída, por um motor de indução trifásico, circuitos eletrônicos para a realização de acionamento, condicionamento, medição e controle, também é utilizado inversor trifásico e um conjunto de bobinas, utilizadas como freio magnético. Este protótipo tem por finalidade, emular o comportamento permanente da correia transportadora real em questão, aplicando os algoritmos de detecção de faltas.

6.2- ESTRUTURA FÍSICA DO PROTÓTIPO DE UMA CORREIA TRANSPORTADORA

Com base na modelagem fenomenológica da correia transportadora, abordada no capítulo 2, infere-se que as principais variáveis de entrada utilizadas pelo modelo são: Velocidade da correia (V) e Taxa de alimentação (T). Todavia o modelo oferece apenas uma saída do sistema, a potência consumida pelos drivers de acionamento da correia, visto que a abordagem utilizada para realizar o levantamento do modelo, possui como base, a conservação de energia.

Com o intuito de constituir um sistema, no qual emule de forma satisfatória o modelo apresentado de uma correia transportadora, foi utilizado um sistema motor assíncrono com um acionamento utilizando um inversor de frequência, este conjunto tem por finalidade emular o sistema de acionamento da correia, de modo a simular a entrada e saída de carga do sistema da correia transportadora, é utilizado um sistema de frenagem acoplado magneticamente ao eixo do rotor, para isso utiliza-se um freio de Foucault.

6.2.1- SISTEMA DE ACIONAMENTO DO PROTÓTIPO

O motor elétrico é a máquina mais utilizada na indústria, no meio rural, no comércio, nos serviços e nas residências. Suas características operacionais atendem a quaisquer tipos de cargas, aliadas a um alto rendimento na transformação de energia. Sob o ponto de vista econômico, são imbatíveis frente a quaisquer outros tipos de motores (Filho, 2000).

Tendo em mente as grandes vantagens no uso de um motor elétrico, optou-se no uso deste para a construção do protótipo para a emulação do sistema de acionamento da correia transportadora, desta forma utilizou-se um conjunto com motor e inversor. A Figura 6.1 apresenta o motor utilizado, este por sua vez é um motor de fabricação WEG assíncrono trifásico, do tipo gaiola de esquilo e possui uma placa metálica acoplada ao eixo do rotor.



Figura 6.1. Motor assíncrono trifásico utilizado no protótipo

A Tabela 6.1 apresenta os dados de placa do motor apresentado na Figura 6.1.

Tabela 6.1. Dados de placa do motor assíncrono trifásico utilizado no protótipo

Características	Unidades	Valor
Tensão	V	220
Potência	KW	1,1
Rotação	r.p.m	1700
Fator de Potência	-	0,82
Rendimento	%	81,6

O sistema de acionamento também é composto por um inversor de frequência, este por sua vez tem a finalidade de realizar o controle da malha de velocidade do motor, fornecendo ao protótipo dados reais da velocidade do motor, este controle é realizado através de uma realimentação da velocidade do motor e controlado pelo inversor de frequência utilizando um controlador PI digital. A Figura 6.2 apresenta o inversor utilizado, este por sua vez é um inversor trifásico de fabricação WEG, modelo CFW09, para maiores informações vide (WEG-CFW09 - A user guide's, 2011).



Figura 6.2. Inversor de frequência utilizado no protótipo

6.2.1- SISTEMA DE FRENAGEM DO PROTÓTIPO

Sabendo que cargas elétricas em movimento, dentro de um campo magnético, ficam sujeitas à força magnética. Essa força coloca as cargas elétricas em movimento perpendicular ao campo magnético que atravessam, gerando desta forma uma corrente induzida, com sentido tal que os pólos magnéticos destas corrente induzidas se oponham à variação do fluxo magnético que as originou.

As correntes de Foucault são correntes elétricas induzidas que surgem no interior de uma massa metálica, quando a mesma atravessa um campo magnético. Pela lei de Lenz, a oposição à variação do fluxo magnético que origina as correntes funciona, portanto, como freio magnético ou amortecedor, possuindo com consequente liberação de calor por efeito Joule (Feynman, 1979).

A Figura 6.3 apresenta o conjunto de freios magnéticos utilizados no protótipo, estes tem por finalidade emular a entrada de carga no sistema, de modo a possibilitar que o protótipo trabalhe em diferentes pontos de operação.



Figura 6.3. Freio de Focault utilizado no protótipo

A Tabela 6.2 apresenta os dados de placa do freio de Focault apresentado na Figura 6.3.

Tabela 6.2. Dados de placa do freio de Focault utilizado no protótipo

Características	Unidades	Valor
Tensão Contínua	V	190
Corrente Máxima	A	2,7
Nº de voltas	-	10
Bitola do Cabo	mm ²	2,5
Diâmetro interno s/ núcleo	mm	30

A Figura 6.4 apresenta um esquemático simplificado do funcionamento do protótipo construído.

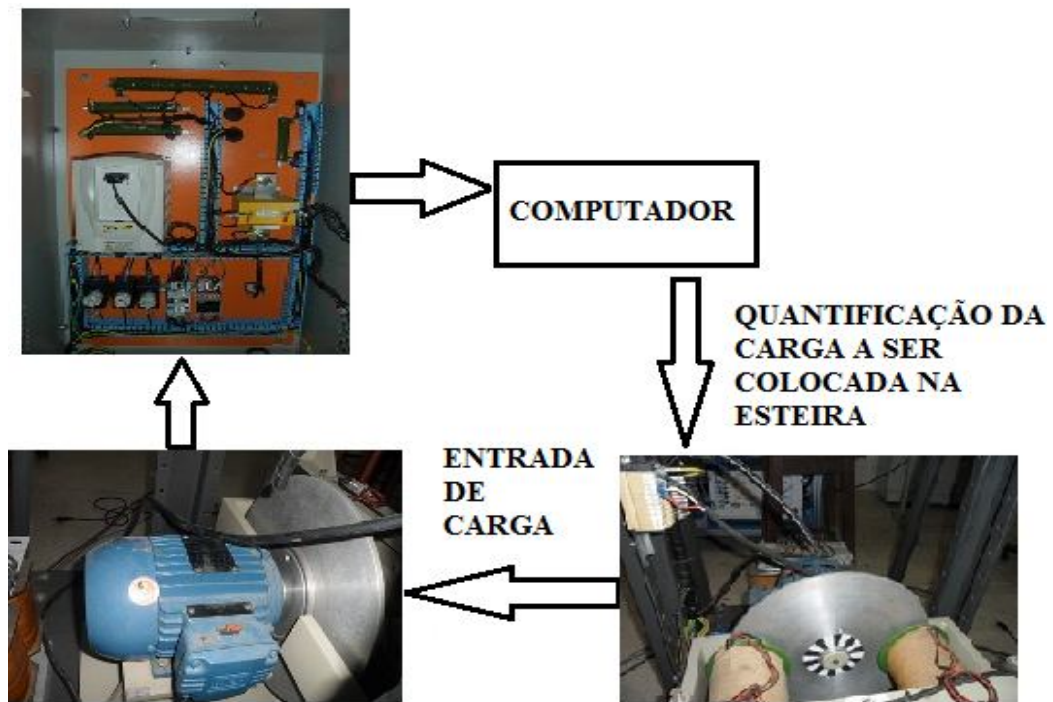


Figura 6.4. Esquemático simplificado do funcionamento do protótipo

A figura 6.5 apresenta o protótipo montado.

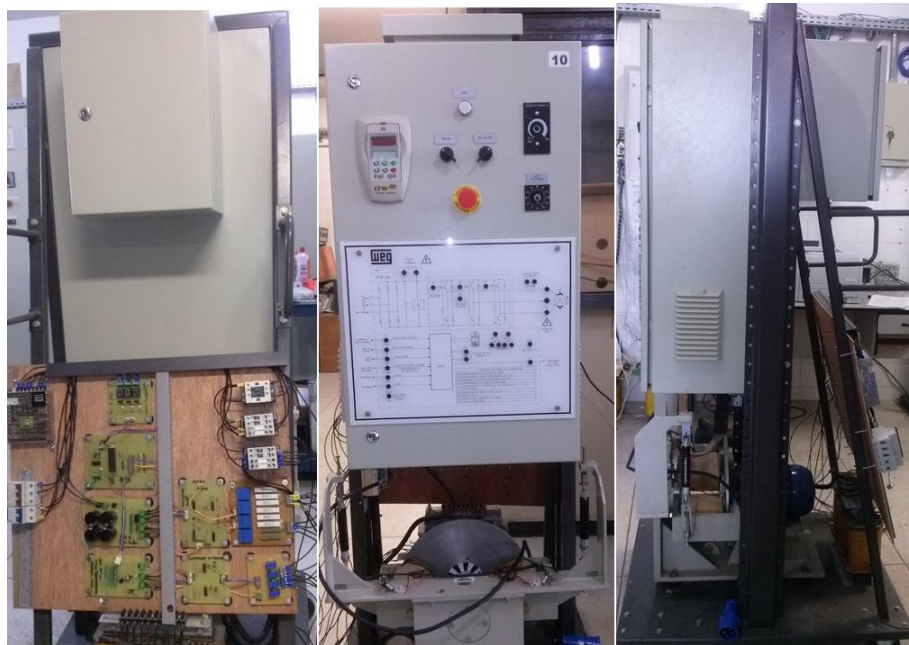


Figura 6.5. Protótipo montado

6.3- CONSTITUIÇÃO DAS PARTES QUE COMPÕE O PROTÓTIPO DA CORREIA TRANSPORTADORA

Na Figura 6.5, apresenta-se as partes que compõe todo o protótipo da correia transportadora, apresentando o diagrama esquemático e funcional da arquitetura geral do protótipo constituído, abordando tanto os aspectos mecânicos das partes quanto os aspectos eletrônicos e computacionais.

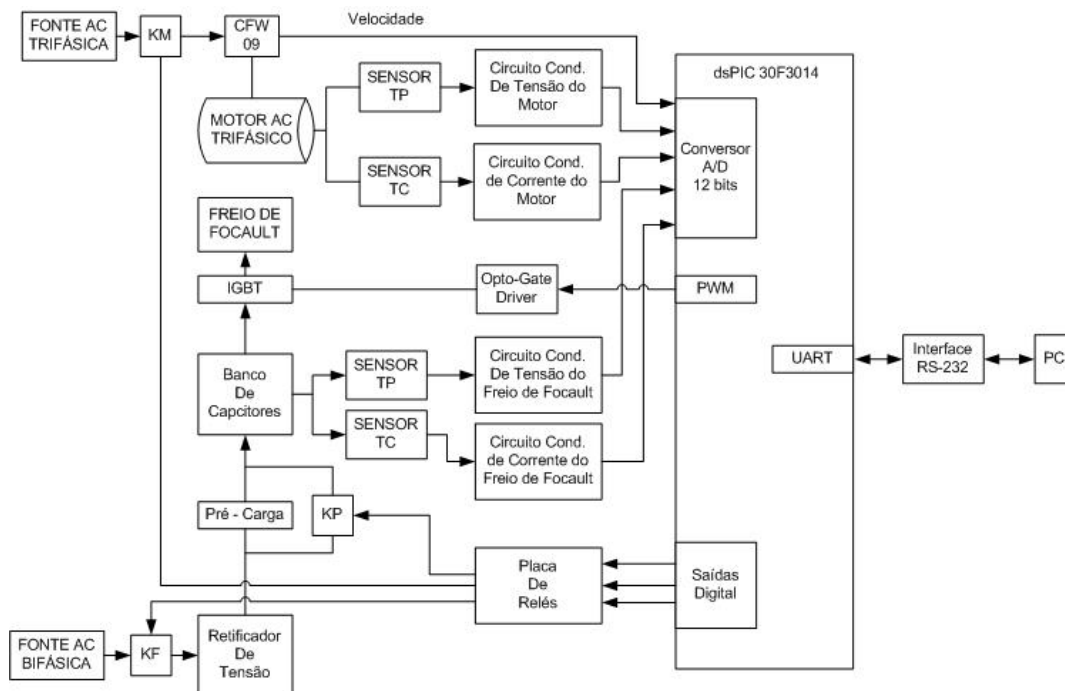


Figura 6.6. Diagrama esquemático e funcional da arquitetura geral do protótipo

6.4- COMPONENTES UTILIZADOS NO DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Esta seção tem por finalidade apresentar e descrever os componentes que serão utilizados na construção do protótipo.

6.4.1- O dsPIC 30F3014 E SEUS PERIFÉRICOS

Os controladores de sinais digitais dsPIC, da Microchip, são dispositivos que integram as principais características do mundo dos micro controladores (baixo custo e

variedade de periféricos internos), com a arquitetura voltada para o processamento em tempo real dos Processadores digitais de sinais, assim, criando uma linha de dispositivos intermediários. São dispositivos de alto desempenho, chegando a operar a 120 MHz. Neste projeto, foi escolhido o DSPIC30F3014, ilustrado na Figura 5.6 por disponibilizar as ferramentas essenciais para as aplicações requeridas, ou seja: Conversores A/D, “Timers”, canal de comunicação serial assíncrona.

Principais características:

- Arquitetura Harvard modificada de alto desempenho.
- 33 fontes de interrupção.
- Instruções e registradores próprios para DSP.
- Pinos de I/O com alta corrente de dreno e fonte: 25mA.
- Conversor analógico-digital de 12 bits.
- Módulo I2C.
- Dois módulos UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter).
- Módulo de comunicação CAN 2.0.
- Memória de programa flash de 48 Kbytes, 2048 bytes de SRAM e 1024 bytes de EEPROM.
- Programação serial In-circuit (ICSP™).
- Fabricado com tecnologia CMOS admitindo faixas de temperatura industriais.
- Cinco timers/contadores de 16 bits, podendo agrupar um par para gerar um módulo de timer de 32 bits.

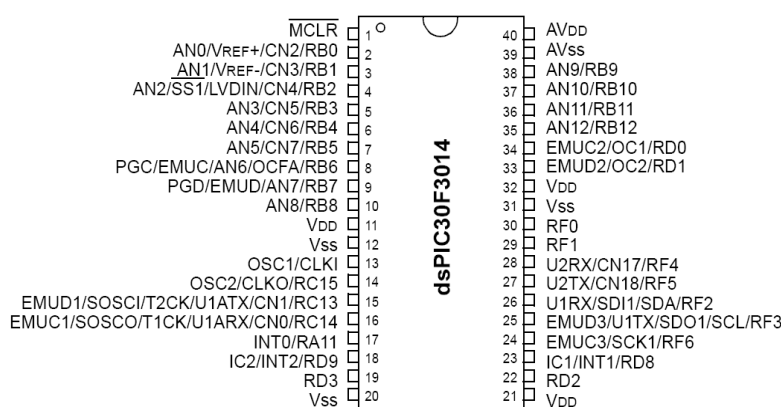


Figura 6.7: Pinagem do micro-controlador dsPIC 30F3014.

6.4.1.1 – MÓDULO UART

O módulo UART é um periférico que realiza a comunicação serial assíncrona nos controladores de sinais digitais dsPIC's. É um método de comunicação *full-duplex*, ou seja, com dois canais de comunicação independentes que podem operar ao mesmo tempo, mas com a mesma taxa de transferência e tamanho de dados. O modo de comunicação é assíncrona, ou seja, não existe a necessidade de sincronização entre os dispositivos, uma vez que os caracteres são transmitidos individualmente e não em blocos como na comunicação síncrona. A transmissão de cada caractere é precedida de um bit de *start* e terminada por 1 ou 2 bits de *stop*, como é ilustrado na Figura 6.7.

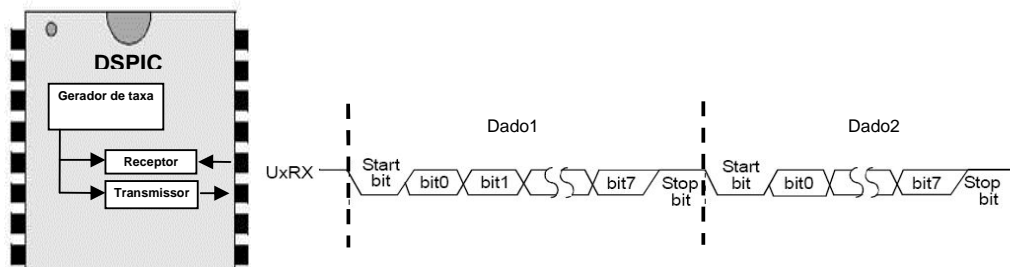


Figura 6.8 – Ilustração de uma transmissão serial de dados.

A implementação desta via de comunicação é feita com uso de um circuito integrado (MAX232) que, com auxílio de capacitores, ajusta os níveis de tensão entre o micro-controlador e a porta serial de um PC. Na Figura 6.8 é ilustrada essa interface de comunicação.

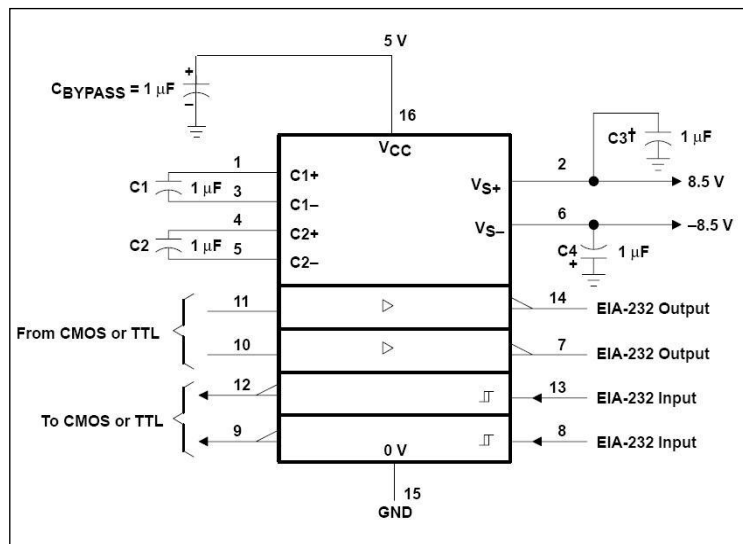


Figura 6.9 – Interface de comunicação serial PC/dsPIC.

6.4.1.2 – TIMER

O temporizador Timer3 é um contador de 16 bits. Ele é o periférico que fornece a noção de tempo para o conversor A/D do dsPIC, pois a cada estouro de contagem deste timer uma conversão A/D é iniciada.

6.4.2 – CIRCUITO INTEGRADO TL084

O componente TL084, Figura 6.9, é um circuito integrado com 4 amplificadores operacionais (AOP). Eles são utilizados no desenvolvimento dos circuitos condicionadores dos sinais dos sensores e do sinal de controle.

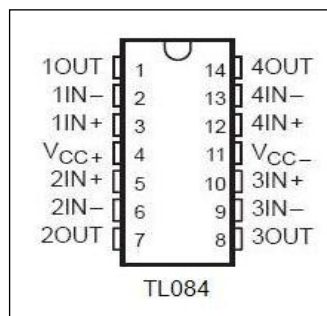


Figura 6.10. Circuito Integrado com amplificadores operacionais.

6.5 – PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DOS CIRCUITOS DE CONDICIONAMENTO E FILTRAGEM

Os circuitos, que serão abordados nesta secção, são os estágios que compõem os circuitos de condicionamento dos sensores e filtragem dos sinais. O tratamento das variáveis é realizado em 4 etapas. Primeiramente tem-se o estágio seguidor de tensão, em seguida a etapa de divisão, logo após um circuito somador por fim a etapa de filtragem.

6.5.1 – BUFFER OU SEGUIDOR DE TENSÃO

O seguidor de tensão, apresentado na Figura 6.10, é um circuito com alta impedância de entrada, na ordem de Mega Ohms, e baixa impedância de saída, tendendo a zero, (Sedra e Smith, 2000). Ele é um amplificador de ganho unitário utilizado para isolar estágios de um circuito ou casar impedâncias (Pertence, 2003).

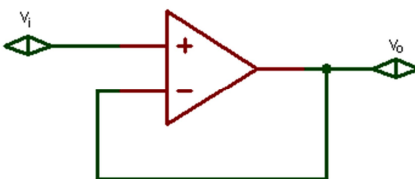


Figura 6.11. Circuito seguidor de tensão ou buffer.

6.5.2 – DIVISOR DE TENSÃO

A etapa de divisão, tem por finalidade a realização da adequação do nível de tensão de saída dos transdutores ($\pm 15V$) para uma tensão de ($\pm 1,5V$). Para isso utiliza-se o circuito ilustrado na Figura 6.11. A Equação 6.1, apresenta a tensão de saída do circuito em relação à tensão de entrada.

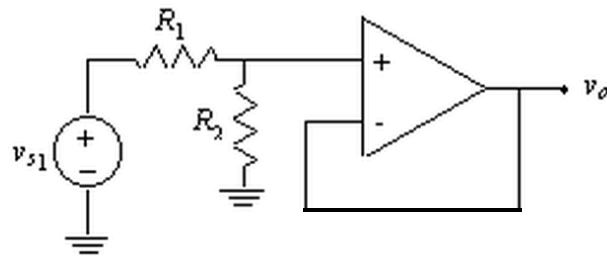


Figura 6.12. Circuito divisor de tensão.

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{s1} \quad (6.1)$$

6.5.3 – CIRCUITO SOMADOR

O circuito somador, apresentado na Figura 6.13, apresenta um amplificador somador de n entradas, desta forma fornece um meio de somar algebricamente n tensões, cada um multiplicado por um fator de ganho constante, ou seja, cada entrada adiciona uma tensão à saída, multiplicada pelo seu correspondente fator de ganho. A equação 5.2 apresenta a tensão V_o em relação as entradas de tensão V_n .

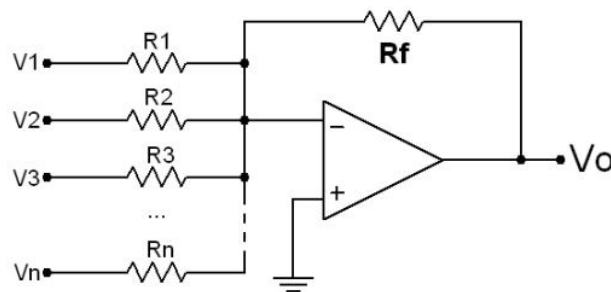


Figura 6.13. Circuito somador de n entradas.

$$V_o = -\sum_{i=1}^n \left(\frac{R_f}{R_i} V_i \right) = -\left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \dots + \frac{R_f}{R_n} V_n \right) \quad (6.2)$$

O circuito somador no protótipo constituído, é responsável por adicionar uma tensão de *off-set* de +2,5V, que desloca a senóide de forma a torna-la totalmente positiva, logo o sinal de saída apresentado está na faixa de 0 a +4V.

6.5.4 – CIRCUITO DE FILTRAGEM

Em geral, os amplificadores operacionais em conjunto com resistências e capacitores, permitem implementar funções de transferência que na prática constituem filtros. Esta alternativa de construção de filtros é conhecida por técnica RC- Ativa. A Figura 6.13 apresenta um filtro passa-baixa RC- Ativo.

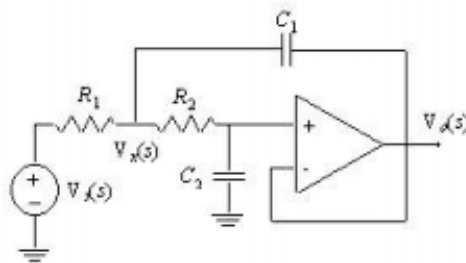


Figura 6.14. Filtro passa-baixa de 2º ordem de Sallen & Key.

A Figura 6.13 apresenta o filtro passa-baixa de 2º ordem de Sallen & Key, pode-se obter a função de transferência do filtro utilizando a lei de Kirchhoff das correntes como mostra a Equação 6.3 e do divisor de impedâncias e do seguidor de tensão implementados pela resistência R_2 , e pelo capacitor C_2 , como apresenta a Equação 6.4.

$$\left(\frac{V_s - V_x}{R_1} \right) + \left(\frac{V^+ - V_x}{R_2} \right) + sC_1(V_o - V_x) = 0 \quad (6.3)$$

$$V^+ = \frac{V_x}{1 + sC_2R_2} = V_o \quad (6.4)$$

O cociente entre as tensões na saída do amplificador operacional e da fonte de sinal, pode-se obter a equação 6.5.

$$H(s) = \frac{\left(\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2} \right)}{s^2 + \frac{R_1 + R_2}{C_1 R_1 R_2} + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} = \frac{\omega_o^2}{s^2 + \frac{\omega_o}{Q} s + \omega_o^2} \quad (6.5)$$

Desta forma, temos as Equações 6.6 e 6.7.

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (6.6)$$

$$Q = \frac{1}{R_1 + R_2} \sqrt{\frac{R_1 R_2 C_1}{C_2}} \quad (6.7)$$

Após a constituição do circuito somador, é constituído um circuito de filtragem, este tem por finalidade a eliminação de ruídos de alta frequência e limitar a largura de banda do sinal lido, evitando desta forma evitando o efeito *aliasing*.

No filtro apresentado foi utilizado a estrutura de filtro *butterworth* (Pertence, 2012). Aplicando a técnica de mudança de escala de frequência, apresentada em (Dorf, 2008), cujo a frequência de corte passa a ser 300 Hz, obtêm-se a função de transferência do filtro utilizado, como mostra a Equação 6.8.

$$H(s) = \frac{(2\pi 300)^2}{s^2 + 2\sqrt{2}\pi \cdot 300 \cdot s + (2\pi 300)^2} \quad (6.8)$$

Para a implementação física deste filtro, algumas considerações devem ser realizadas:

- I. Todos os resistores apresentam o mesmo valor de resistência.
- II. O capacitor da malha de realimentação é o dobro do valor da capacitância do capacitor na entrada do amplificador.

Maiores detalhes podem ser apresentados em (Júnior, 2013; Moraes, 2011). Desta forma, pode-se calcular os valores dos resistores e capacitores, utilizando a Equação 5.9.

$$\omega_c = \frac{1}{RC\sqrt{2}} \quad (6.9)$$

Segundo (Júnior, 2013), este mesmo filtro é implementado digitalmente, objetivando eliminar ruídos oriundos do processo de conversão analógico-digital. Inicialmente é necessário realizar o processo de discretização para embarcar o filtro no algoritmo do dsPIC.

Para a realização da discretização do sistema apresentado, é necessário conhecer a largura de banda do sistema, podendo ser calculado como mostra a Equação 6.10 (Ogata, 1987).

$$\omega_{BW}^{CL} = \omega_n \sqrt{(1 - 2\xi^2) + \sqrt{4\xi^4 - 4\xi^2 + 2}} \quad (6.10)$$

Conhecida a largura de banda do sistema, determina-se a frequência na qual o sinal de tensão será amostrado através do conversor Analógico-Digital, de acordo com a Equação 6.11 (Landau, 2011).

$$6\omega_{BW}^{CL} \leq \omega_s \leq 25\omega_{BW}^{CL} \quad (6.11)$$

Segundo (Fadali, 2009), para fins práticos quanto maior a frequência de amostragem melhor, podendo chegar a 100 vezes a largura de banda do sistema.

Para a discretização do sistema contínuo é utilizado o método de *Tustin*, para isso utiliza-se a Equação 6.12.

$$s = \frac{2}{T} \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right) \quad (6.12)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega_s} \quad (6.13)$$

Substituindo a Equação 6.12 na Equação 6.8, obtém-se a função de transferência do filtro digital, apresentado na Equação 6.14.

$$H(z^{-1}) = \frac{U(z^{-1})}{E(z^{-1})} = \frac{0,00045 + 0,00089z^{-1} + 0,00045z^{-2}}{1 - 1,935z^{-1} + 0,9355z^{-2}} \quad (6.14)$$

De acordo com (Nascimento, 2011), o filtro digital pode ser implementado em sua estrutura transposta, como apresenta a Figura 6.14.

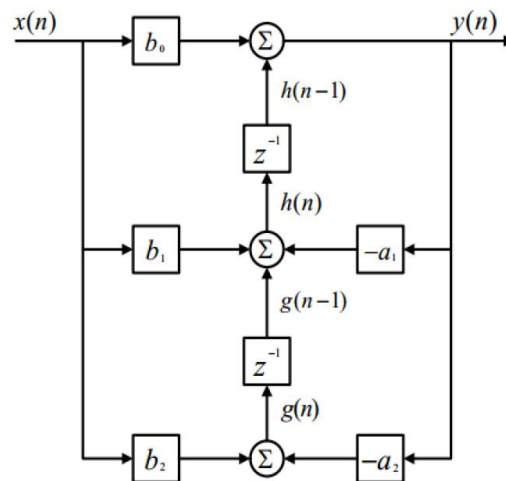


Figura 6.15. Forma transposta de Filtros digital (JUNIOR, 2013).

A Figura 6.15 mostra todos os circuitos anteriormente descritos interligados.

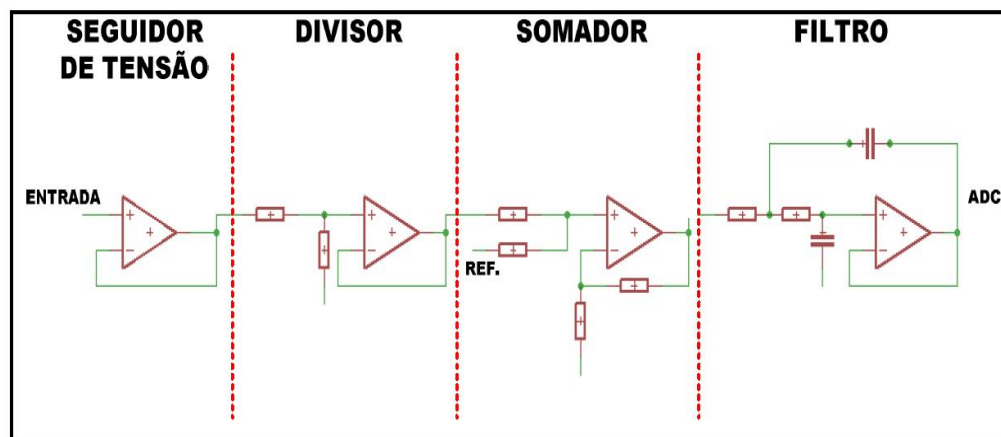


Figura 6.16. Diagrama do circuito de condicionamento e filtragem (JUNIOR, 2013).

6.6 – PLACAS DE SENSORIAMENTO

Nesta seção, são apresentadas as placas de sensores, que foram elaboradas com o intuito de realizar a medição das principais variáveis elétricas dos sistemas de acionamento e frenagem do protótipo.

6.6.1 – UNIDADE DE AQUISIÇÃO DE TENSÃO

A unidade de aquisição de tensão é composta basicamente por quatro transdutores de potencial (TP) de modelo LEM LV-25p. Estes 4 TP's, tem como função medir as tensões de linha do motor que compõe o acionamento da correia transportadora, e o *link* DC para o acionamento do freio de Focault que funcionará como carga da correia.

O TP utilizado é baseado em efeito hall, desta forma é necessário uma corrente sensibilizá-lo, sendo assim, é inserido um resistor R_1 entre o TP e a rede, de modo a proporcionar uma corrente que será lida. Um segundo resistor R_2 é introduzido no secundário do TP, de modo a permitir a leitura da tensão pelos circuitos eletrônicos (Júnior, 2013).

A Figura 6.16 apresenta a ligação do transdutor de potencial LEM LV- 25p.

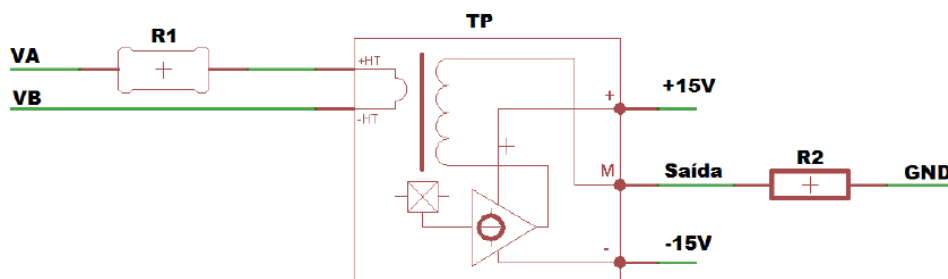


Figura 6.17. Forma de ligação do transdutor de potencial LEM LV-25p.

No circuito apresentado na Figura 6.16, o valor da tensão de saída, em relação a entrada, pode ser calculado utilizando a Equação 6.15.

$$V_{s\grave{a}ida} = 2,5.V_{AB} \frac{R_2}{R_1} \quad (6.15)$$

A Figura 6.17 apresenta o *layout* da placa da unidade de aquisição de tensão, assim como apresenta a placa construída.

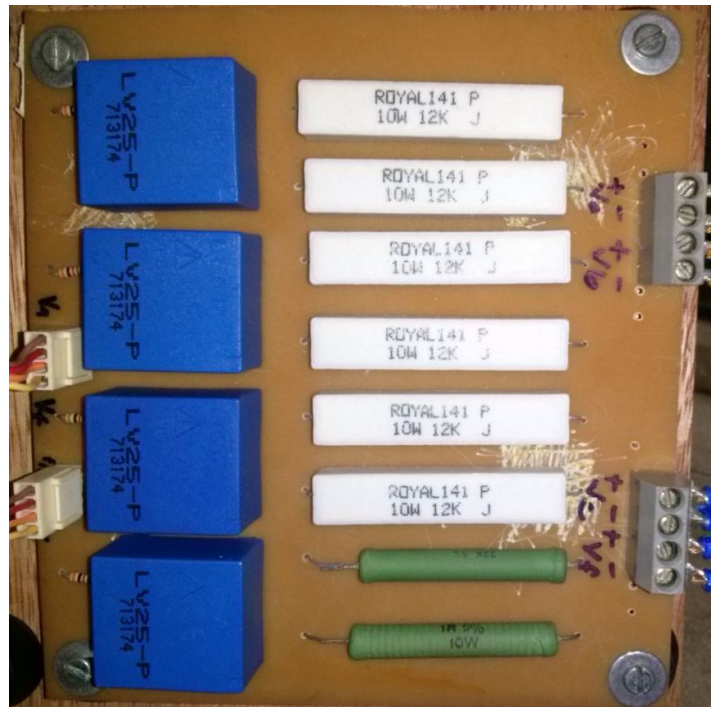


Figura 6.18. *Layout* da placa da Unidade de Aquisição de Tensão

6.6.2 – UNIDADE DE AQUISIÇÃO DE CORRENTE

A unidade de aquisição de corrente é composta basicamente por quatro transdutores de corrente (TC) de modelo LEM LTS-25-NP, como apresenta a Figura 6.18. Estes 4 TC's tem como função medir as correntes de linha do motor que compõe o acionamento da correia transportadora e a corrente do *link* DC para o acionamento do freio de Foucault que funcionará como carga da correia.

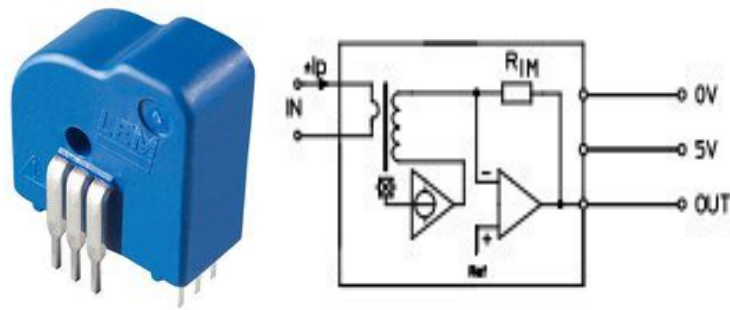


Figura 6.19. LEM LTS-25-NP transdutor de corrente

E Figura 6.19 apresenta o *layout* da placa da Unidade de Aquisição de Corrente.

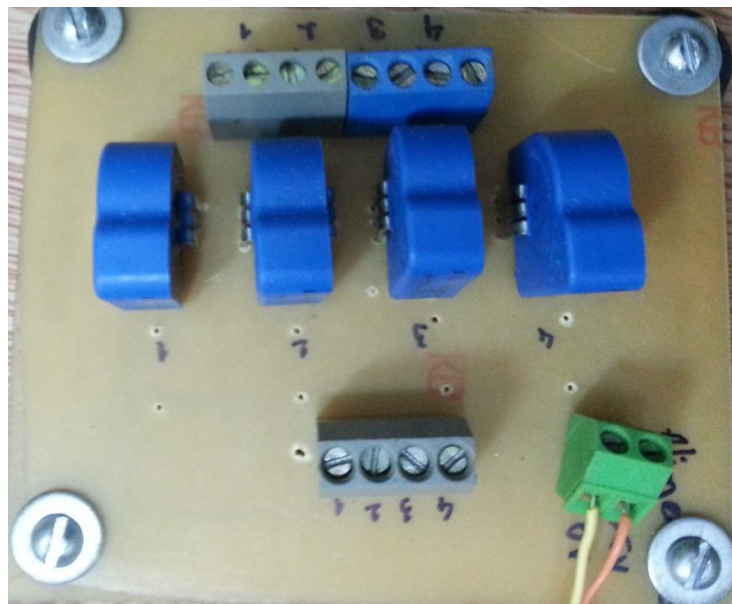


Figura 6.20. *Layout* da placa da Unidade de Aquisição de Corrente

6.7 – SISTEMA DE FRENAGEM

O sistema de frenagem do protótipo, como anteriormente descrito, é composto por dois freios eletromagnético de modo a emular a carga a qual a correia transportadora está submetida, vide Figura 6.3, entretanto, alguns subsistemas devem ser constituídos para o bom funcionamento do sistema de frenagem. Nesta seção serão descritos tais subsistemas.

6.7.1 – CIRCUITO RETIFICADOR

Para a utilização do freio de Foucault anteriormente descrito, é necessário um ramo DC do circuito. Tendo em mente esta necessidade, constituiu-se uma etapa de retificação que tem por finalidade realizar a transformação da forma de onda de tensão alternada em uma tensão contínua, que será utilizada para alimentar as bobinas DC do freio eletromagnético.

6.7.2 – FILTRO CAPACITIVO

Com o intuito de realizar um alisamento da forma de onda retificada, pelo retificador de onda completa, é colocado um filtro capacitivo de modo a diminuir a tensão de *ripple* do sistema de acionamento do sistema de frenagem, e desta forma tornar a forma de onda sobre as bobinas a mais próxima de um valor constante. Para isto utilizou-se uma regra prática, para cada 1 Ampere de corrente do freio é acrescentado 1000 μF no banco de capacitores. Sabendo que o freio possui uma corrente máxima de 2,7 Ampere, então constituiu-se um banco de capacitores de 3000 μF .

6.7.3 – CIRCUITO DE PRÉ-CARGA

O circuito de pré-carga é considerado uma parte fundamental do sistema de frenagem, no que tange a proteção de determinados componentes. Este circuito é importante principalmente na inicialização do sistema, no momento em que é acionado o sistema de frenagem.

Este circuito é formado por um conjunto de resistores ligados em série com a bobina do freio de Foucault, este sistema tem por finalidade de reduzir as correntes elevadas que ocorrem no momento em que é energizado a bobina do freio de Foucault, em seguida ocorre um carregamento suave do banco de capacitores. Para a determinação dos resistores utiliza-se a Equação 6.16, onde V_{AB} é a tensão de linha da rede local e I_n corresponde a máxima corrente de trabalho suportada pelo freio.

$$R = \frac{V_{AB}}{I_n} = \frac{190}{2,7} = 70,37\Omega \quad (6.16)$$

Como o valor de $70,37\Omega$ não é um valor comercial, utilizou-se a combinação de resistores em série. A Figura 6.20 mostra o *layout* da placa do circuito de pré- carga.



Figura 6.21. *Layout* da placa do circuito de link DC e pré-carga

6.7.4 – CIRCUITO DE CONTROLE DE CARGA APLICADA

Objetivando realizar o controle da quantidade de carga inserida ou retirada no protótipo, foi utilizado o controle da corrente aplicada ao freio eletromagnético, através de um circuito de chaveamento baseado em IGBT, apresentado na Figura 6.21. Este circuito tem por finalidade realizar o acionamento que é comandado via microcontrolador, através da estratégia de modulação de largura de pulso PWM. O microcontrolador comunica-se diretamente com a interface homem-máquina (IHM), localizada no computador, que disponibiliza um comando de aumento e/ou diminuição da carga no sistema, o passo de deslocamento da carga é de 10% do seu valor nominal, ou seja, a cada aumento de carga é inserido 10% de carga no sistema para sua emulação, o mesmo ocorre para a retirada.



Figura 6.22. Circuito utilizado para a realização do controle de carga do sistema

6.8 – PLACA DE RELÉS

Os relés são dispositivos eletromecânicos que realizam a comutação de contatos, a partir da aplicação de alguma tensão sobre a bobina de excitação do circuito magnético.

Grande quantidade dos relés são associados a dispositivos eletrônicos que determinam a sua comutação. A Figura 6.22 apresenta uma configuração clássica usualmente utilizada para acionamento a partir de dispositivos eletrônicos.

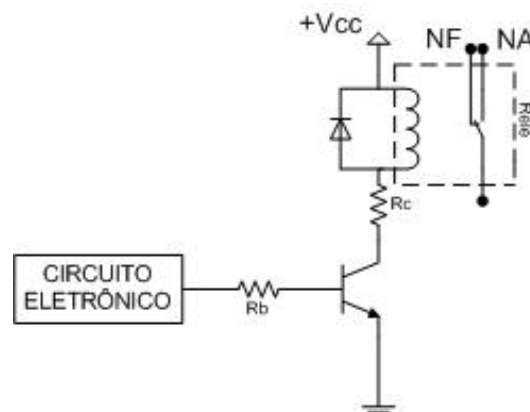


Figura 6.23. Circuito clássico para o acionamento de dispositivos

Quando o transistor for saturado por V_{BE} , passa corrente pela bobina do relé, promovendo a comutação dos contatos (Pertence, 2012).

Para a determinação das resistências de base e coletor do circuito, utilizam-se as Equações 6.17 e 6.18, respectivamente.

$$R_C = \frac{V_C - V_{CE}^{sat}}{I_C} \quad (6.17)$$

$$R_B = \frac{5 - V_{BE}}{I_C [\alpha_{sat} - 1]} \quad (6.18)$$

Onde:

V_{CE}^{sat} é a tensão entre coletor e emissor na saturação, onde considera-se 2,5 V.

O valor de β_{sat} para a realização do cálculo é 10 vezes menor que o do transistor, desta forma utilizou-se o valor de 30.

A Figura 6.23 apresenta a placa de relés constituída para o protótipo, utilizando a mesma configuração de circuito apresentada na Figura 6.22.



Figura 6.24. Layout da placa de relés constituída para o protótipo

6.9- CONCLUSÃO

Neste capítulo, são apresentados os principais componentes e circuitos utilizados para a constituição de um protótipo de uma correia transportadora. No próximo capítulo,

abordará os principais resultados obtidos do modelo da correia transportadora e dos algoritmos de detecção de faltas.

CAPITULO VII

RESULTADOS DE ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA E DETECÇÃO DE FALTA NO SISTEMA DE CORREIA TRANSPORTADORA

7.1- INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será apresentado os resultados obtidos a respeito dos algoritmos de estimação e de detecção de faltas, para a utilização destes códigos serão utilizados dois sistemas, o primeiro sistema utilizado, será o apresentado por (Zhang, 2009) o outro sistema, será um sistema real de uma correia transportadora.

7.2- CONSTRUÇÃO DO SIMULADOR UTILIZADO

Objetivando realizar a simulação do modelo matemático estático obtido, foi utilizado o ambiente de simulação computacional MATLAB, para realizar a simulação deste modelo. Foi utilizado duas ferramentas para a constituição deste modelo, a ferramenta SIMULINK e linhas de código. A figura 7.1 apresenta o diagrama de blocos do simulador no ambiente de simulação computacional SIMULINK.

Os respectivos testes são aplicados a ambos simuladores:

1. Teste com comprimento da correia transportadora variável: Neste teste é fixada uma taxa de alimentação da esteira e da velocidade da esteira, e varia-se o comprimento da esteira, de modo que mostre a variação da potência elétrica consumida, conforme a dimensão da esteira. Este teste é realizado em duas etapas, na etapa 1 é aplicado para transportadores de correia de pequeno porte ($L= 10-200$ m) com taxas de alimentação $T= 2000$ t/h e velocidade de $V=3.15$ m/s. A segunda etapa é aplicado o mesmo teste para transportadores de média a longa distância ($L= 200- 4000$ m).
2. Teste com velocidade da correia transportadora variável: Neste teste é fixada uma taxa de alimentação da esteira ($T= 1200$ t/h) e um determinado comprimento ($L= 1000$ m), de modo que o único parâmetro que varie durante o teste seja a velocidade da cinta da correia, esta por sua vez varia entre os seguintes valores ($V= 1.5- 6$ m/s). Os resultados mostram o comportamento da potência elétrica consumida de uma determinada correia transportadora, quando submetida a uma variação de velocidade.
3. Teste com taxa de alimentação variável: Neste teste é fixada uma determinada velocidade ($V= 3.15$ m/s) e um determinado comprimento para a correia transportadora ($L=1000$ m), de modo que o único parâmetro que varie durante o teste seja a taxa de alimentação da esteira ($T= 1000- 2000$ t/h). Os resultados mostram a influência que a variação da taxa de alimentação da esteira, impacta sobre a energia demanda pela mesma.

7.2.1- RESULTADOS DE TESTES DO SIMULADOR EM AMBIENTE SIMULINK

A Figura 7.2 e 7.3 mostram os testes quando mantem-se fixos a velocidade e a taxa de alimentação da correia transportadora e o comprimento variável. As Figuras 7.2 e 7.3 apresentam uma variação da potência ativa consumida, denotando que o comprimento da correia é uma das variáveis deste tipo de sistema.

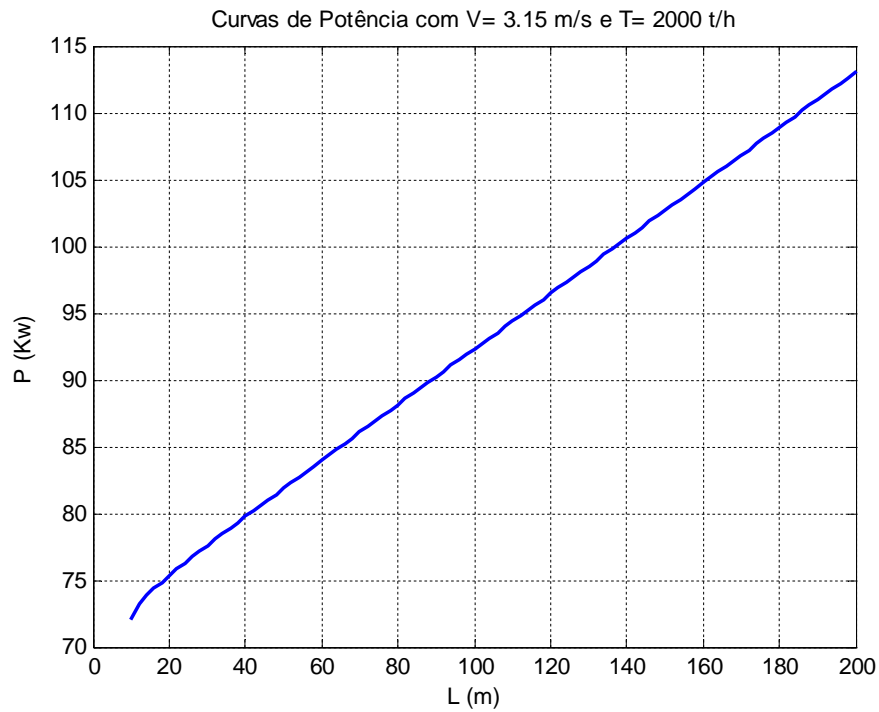


Figura 7.2- Curvas de potência com a variação do comprimento de uma correia transportadora pequena com $V= 3.15 \text{ m/s}$ e $T= 2000 \text{ t/h}$.

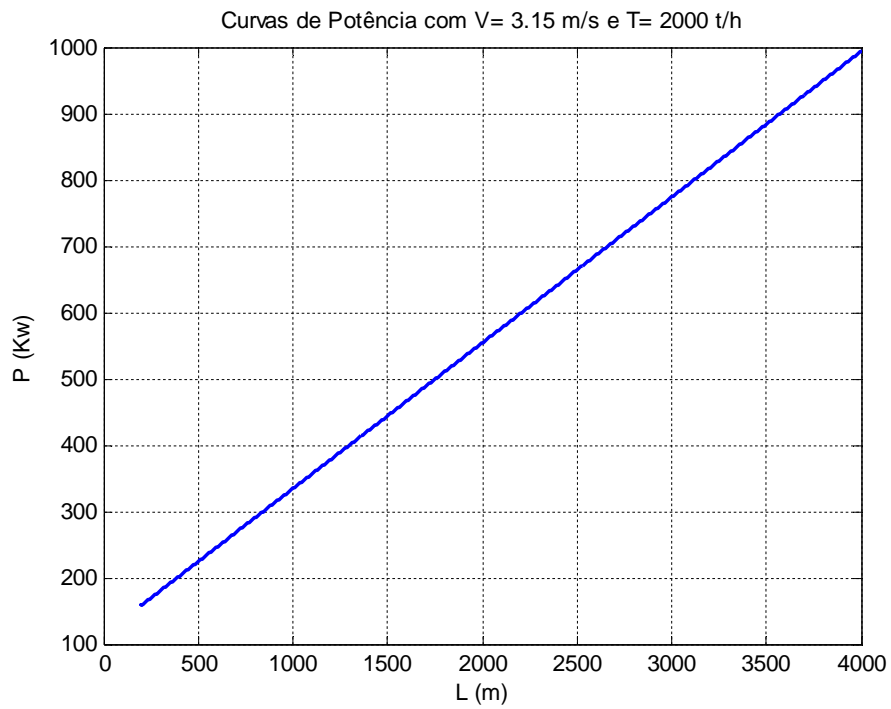


Figura 7.3- Curvas de potência com a variação do comprimento de uma correia transportadora de tamanho médio a longo com $V= 3.15 \text{ m/s}$ e $T= 2000 \text{ t/h}$.

A figura 7.4 mostra o teste quando mantem-se fixo o comprimento e a taxa de alimentação da correia transportadora e a velocidade é variável.

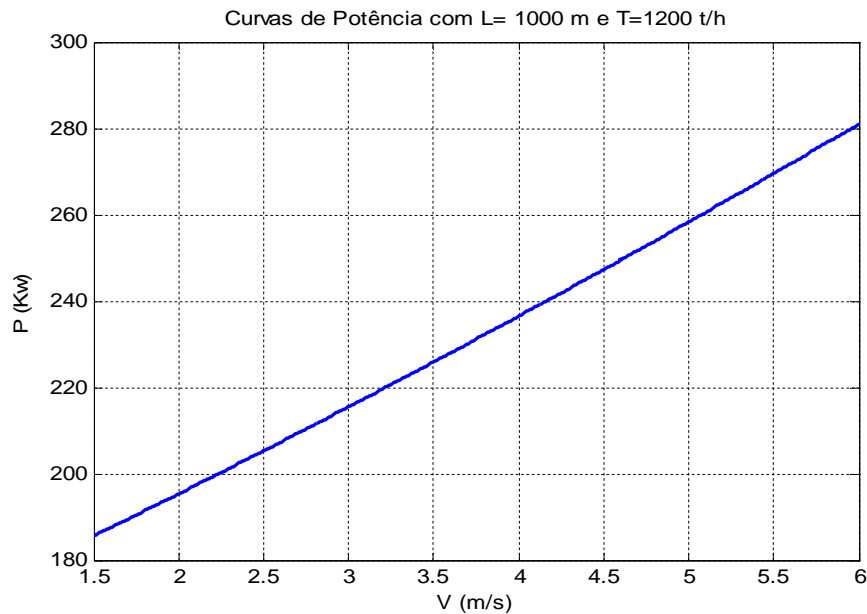


Figura 7.4- Curvas de potência com a variação da velocidade de uma correia transportadora com $L=1000$ m e $T= 1200$ t/h.

A Figura 7.4 apresenta a velocidade como uma das principais variáveis para este sistema, visto que existe uma variação elevada da potência consumida, quando submetese o sistema a variação de velocidade. A Figura 7.5 mostra o teste quando mantem-se fixo a velocidade e o comprimento da correia transportadora e a taxa de alimentação é variável.

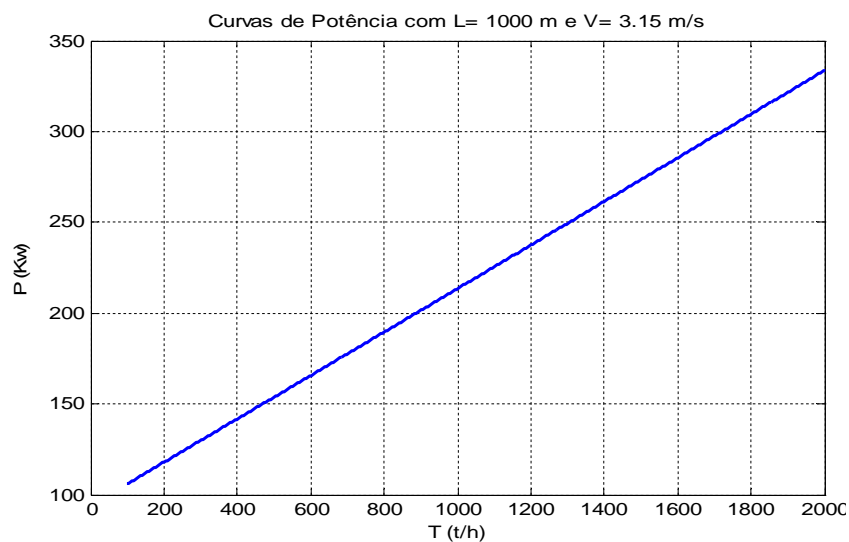


Figura 7.5- Curvas de potência com a variação da Taxa de alimentação de uma correia transportadora com $L=1000$ m e $V= 3.15$ m/s.

A Figura 7.5 apresenta a variação da potência ativa quando submete-se o sistema a uma variação da taxa de alimentação, verifica-se que o sistema apresenta elevada variação de sua potência, devido a isto, a taxa de alimentação é o principal objeto de estudo deste trabalho.

7.2.2- RESULTADOS DE TESTES DO SIMULADOR EM LINHA DE CÓDIGO

As Figuras 7.6 e 7.7 mostram os testes quando mantem-se fixos a velocidade e a taxa de alimentação da correia transportadora e o comprimento variável.

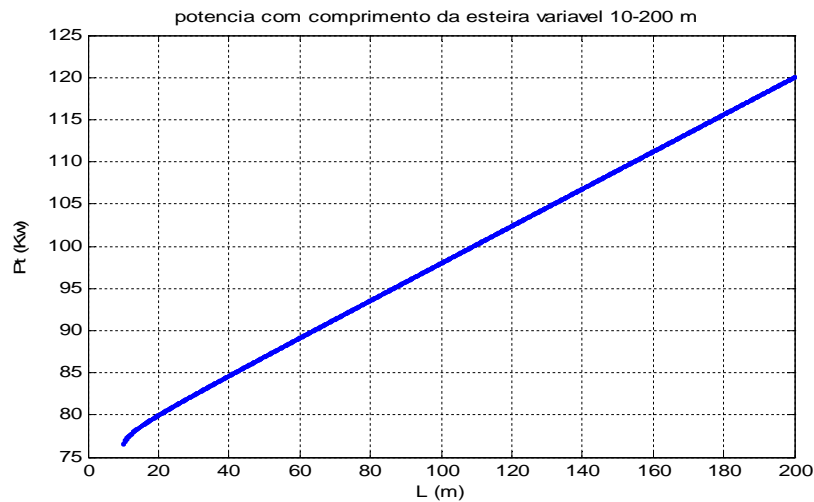


Figura 7.6- Curvas de potência com a variação do comprimento de uma correia transportadora pequena com $V= 3.15$ m/s e $T= 2000$ t/h.

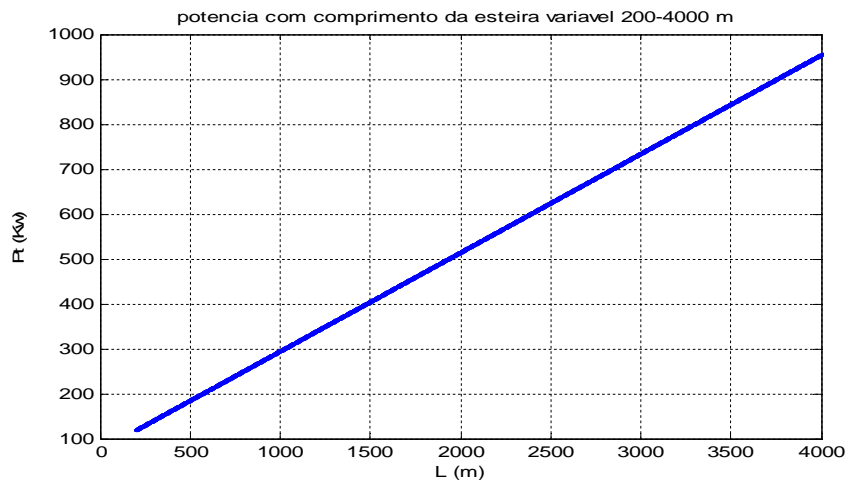


Figura 7.7- Curvas de potência com a variação do comprimento de uma correia transportadora de tamanho médio a longo com $V= 3.15$ m/s e $T= 2000$ t/h.

As Figuras 7.6 e 7.7 apresentam uma variação da potência ativa consumida, denotando que o comprimento da correia é uma das variáveis deste tipo de sistema, verifica-se que estas Figuras assemelham-se as Figuras 7.2 e 7.3.

A Figura 7.8 mostra o teste quando mantem-se fixo o comprimento e a taxa de alimentação da correia transportadora e a velocidade é variável.

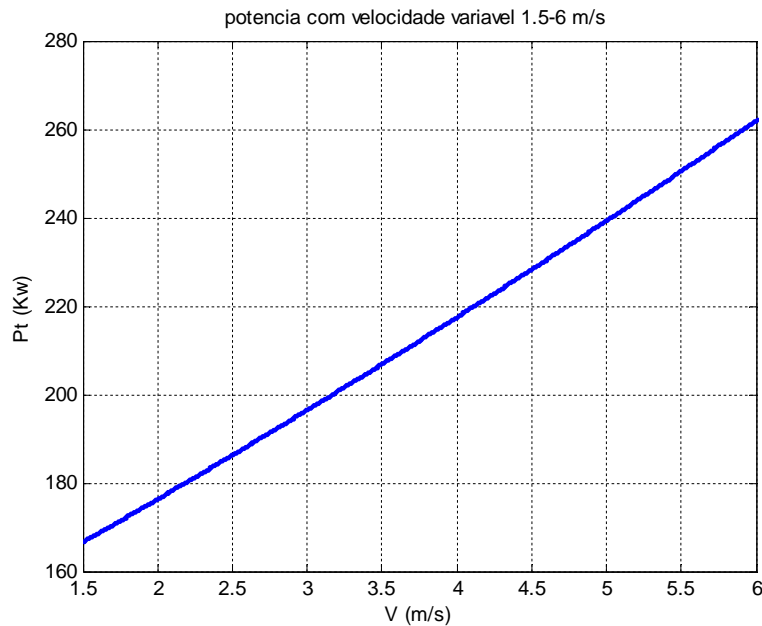


Figura 7.8- Curvas de potência com a variação da velocidade de uma correia transportadora com L=1000 m e T= 1200 t/h.

A Figura 7.8 assemelha-se a Figura 7.4, onde a velocidade é variada e nota-se uma grande variação da potência consumida.

A Figura 7.9 mostra o teste quando mantem-se fixo a velocidade e o comprimento da correia transportadora e a taxa de alimentação é variável.

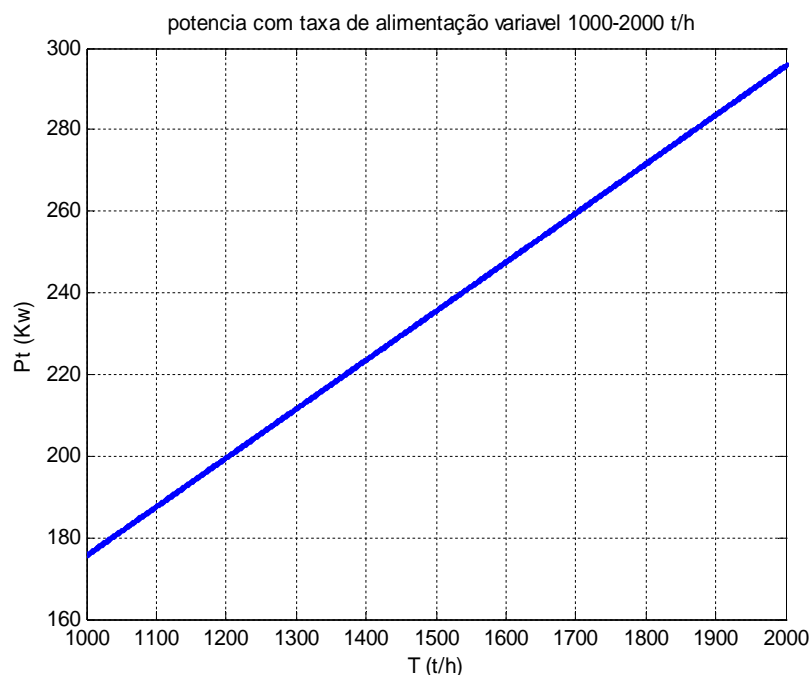


Figura 7.9- Curvas de potência com a variação da Taxa de alimentação de uma correia transportadora com $L=1000$ m e $V= 3.15$ m/s.

A Figura 7.9 apresenta a variação da potência consumida através da variação da taxa de alimentação da correia, verifica-se que esta variável possui uma maior influência na variação da potência consumida, quando comparada as demais, devido a isto este trabalho visou realizar o estudo sobre a variação da taxa de alimentação.

7.3- RESULTADOS DA ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA DA CORREIA TRANSPORTADORA

Com o intuito de realizar a parametrização e estimação do modelo de uma correia transportadora real, foi constituído um código de estimação de parâmetros, utilizando a técnica MQNR no ambiente de simulação computacional MATLAB. Para alimentar o algoritmo de estimação *off line*, foi constituído um banco de dados com as principais variáveis elétricas, como: a potência ativa utilizada para promover a movimentação da correia, também é capturada a taxa de velocidade nominal na qual a esteira está funcionando, e a taxa de alimentação do transportador, este por sua vez possui um limite máximo e um mínimo em sua operação.

7.3.1- RESULTADOS DO SIMULADOR

Com o intuito de validar o simulador, constituído no ambiente de simulação MATLAB, foi utilizado o conjunto de dados obtido em (Zhang, 2009), onde este mostra os dados coletados em uma correia transportadora de carvão, tais dados podem ser visualizados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1- Valores dos parâmetros de uma correia transportadora de carvão.

Param.	Valor	Param.	Valor	Param.	Valor
L (m)	1000	H (m)	9,98	δ (graus)	1,825
ρ (kg/m ³)	900,0	b ₁ (m)	1,4	f	0,024
G (m/s ²)	9,8	Q _B (kg/m)	18,73	Q _{RO} (kg/m)	15,75
Q _{RU} (kg/m)	7,76	Q _G (kg/m)	176,3	T (ton/h)	2000
V (m/s)	3,15	P _{acs} (W)	0,0	C _{Pt}	0,0

Obteve-se a Figura 7.10 como resultado, obtido do simulador.

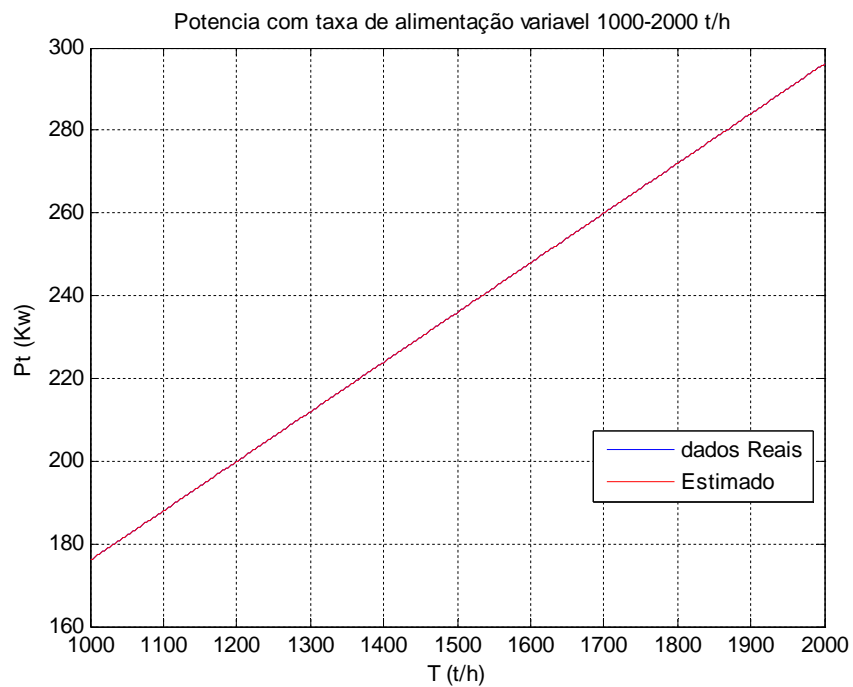


Figura 7.10- Estimação dos parâmetros da correia transportadora do simulador

A Figura 7.11 mostra o gráfico do erro em percentual.

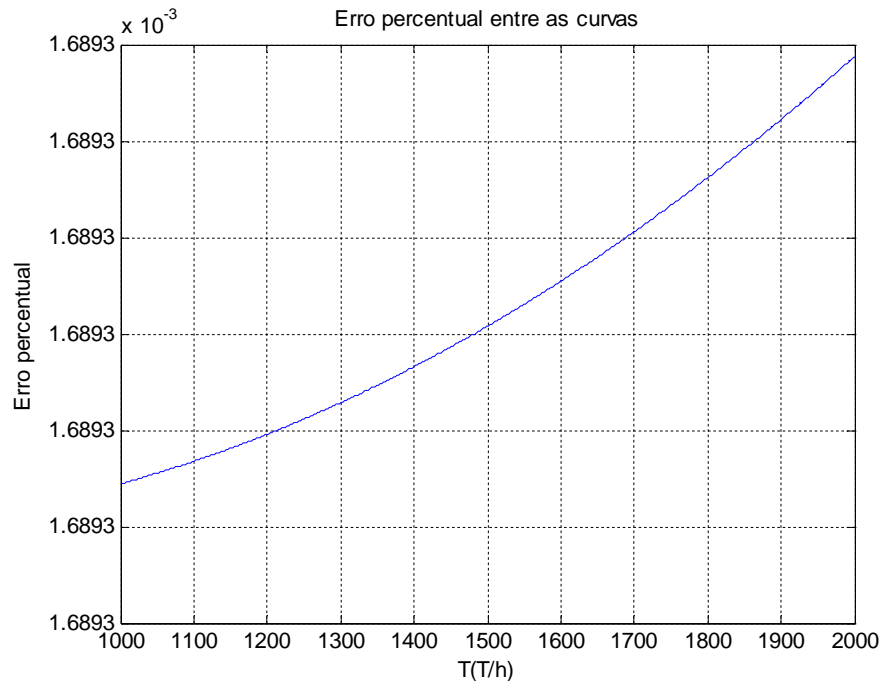


Figura 7.11- Erro percentual de estimação dos parâmetros do simulador da correia transportadora

A Figura 7.10 apresenta os valores de potência gerados pelo estimador em azul e em vermelho sobrepostos a curva em azul apresenta a potência gerada pela estimação dos parâmetros, verifica-se na Figura 7.11 o erro em percentual relacionado as duas curvas em questão, verificando erros muito baixos e aceitáveis para a aplicação de calibração do simulador e/ou identificação de sistemas reais. A Tabela 7.2 apresenta os valores reais calculados e os valores estimados das variáveis θ .

Tabela 7.2- Valor real e valores estimados dos parâmetros θ da correia transportadora de carvão.

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
Real	0,0000874	14343	1	92,497
Estimado	0,000085	14333	1	95,59
Erro (%)	2,746	0,0697	0	3,2348

Para a realização do teste computacional com a taxa de alimentação variável, é fixada uma determinada velocidade e um determinado comprimento para a correia transportadora, como apresentado na Tabela 7.1, de modo que o único parâmetro que

varie durante o teste, seja a taxa de alimentação da esteira, esta por sua vez irá variar de 1000 a 2000 T/h. Os resultados mostram a influência que a variação da taxa de alimentação da esteira, impacta sobre a energia demanda pela mesma.

A Figura 7.12 mostra o gráfico da variação de potência ativa consumida nos drivers de acionamento da correia transportadora, devido a uma taxa de alimentação variando de 1000 a 2000 T/h e a estimativa obtida pelo algoritmo de estimação MQNR.

A Figura 7.13 apresenta o erro em percentual dos valores reais obtidos pelo simulador e dos valores estimados da potência ativa, quando a correia é submetida a uma taxa de alimentação variável de 1000 a 2000 T/h.

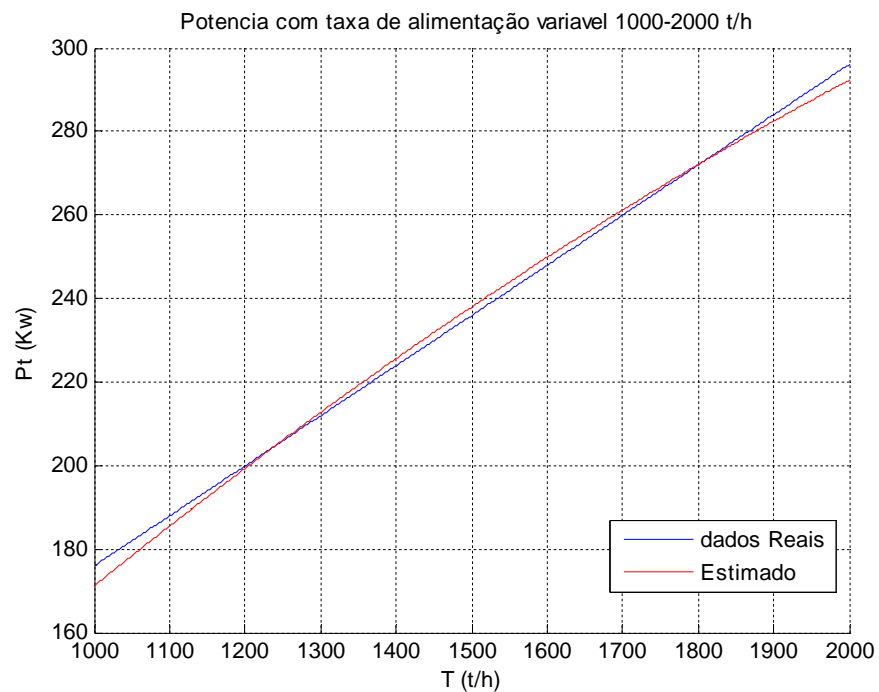


Figura 7.12- Potência ativa com a taxa de alimentação variável 1000 – 2000 T/h

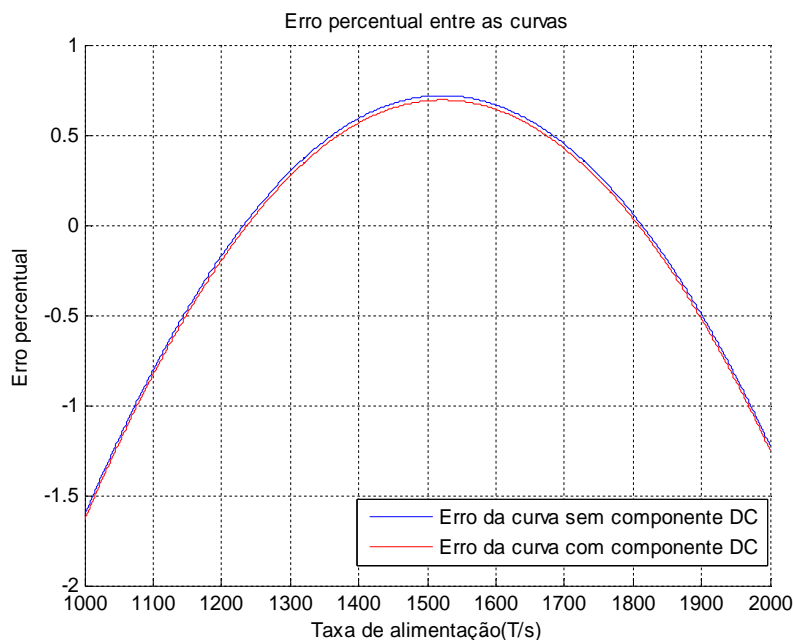


Figura 7.13- Erro percentual da estimação da potência ativa quando a taxa de alimentação é variável entre 1000 – 2000 T/h.

A Figura 7.13 apresenta que o máximo erro percentual de estimação é inferior a 1,6 %, para valores de potência ativa com taxa de alimentação variando de 1000 a 2000 T/h.

A Figura 7.14 mostra o gráfico da variação de potência ativa consumida nos drivers de acionamento da correia transportadora, devido a uma taxa de alimentação variando de 2000 a 3000 T/h, mantendo-se constante os valores de velocidade e comprimento da correia transportadora e a estimativa obtida pelo algoritmo de estimação MQNR.

A Figura 7.15 apresenta o erro em percentual dos valores reais obtidos pelo simulador e dos valores estimados da potência ativa, quando a correia é submetida a uma taxa de alimentação variável de 2000 a 3000 T/h.

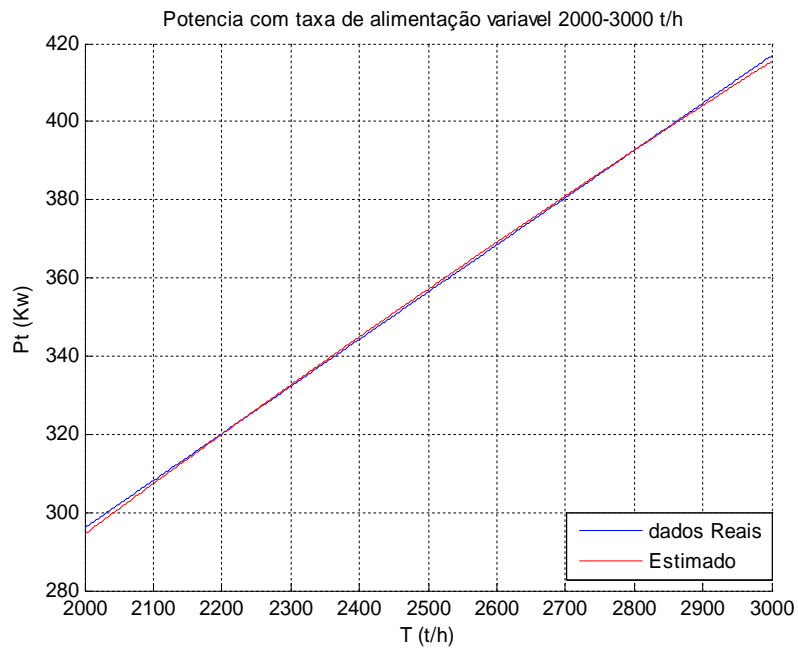


Figura 7.14- Potência ativa com a taxa de alimentação variável 2000 – 3000 T/h

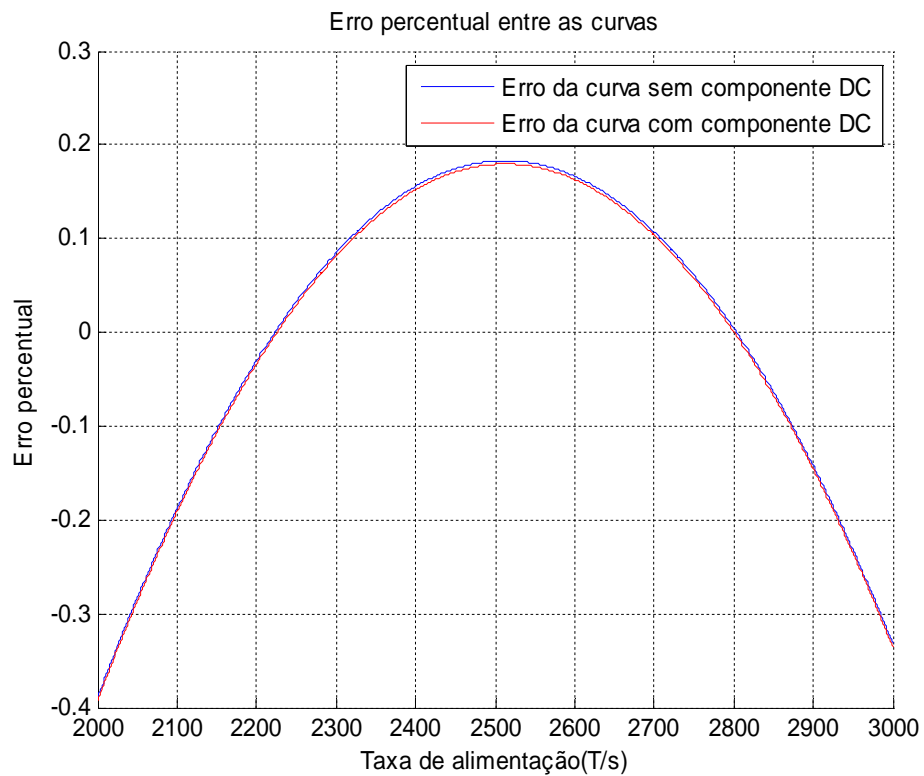


Figura 7.15- Erro percentual da estimação da potência ativa quando a taxa de alimentação é variável entre 2000 – 3000 T/h

A Figura 7.15 apresenta que o máximo erro percentual de estimação é inferior a 0,4 %, para valores de potência ativa com taxa de alimentação variando de 2000 a 3000 T/h.

7.3.2- RESULTADOS OBTIDOS COM A UTILIZAÇÃO DE DADOS REAIS COLETADOS EM CAMPO

A Figura 7.16 apresenta a correia transportadora de minério modelada neste trabalho. A correia possui um comprimento fixo de 4,1 Km, velocidade nominal de 4,17 m/s e potência nominal ativa para o acionamento da correia de 800 KW, a Figura 7.17 mostra o sistema de acionamento da correia.



Figura 7.16- Correia transportadora de minério de uma mina de cobre no estado do Pará.



Figura 7.17- Sistema de acionamento da correia transportadora de cobre no estado do Pará.

Com o algoritmo de estimação dos parâmetros da correia transportadora, devidamente validados, constituiu-se um banco de dados para armazenar as variáveis elétricas principais da correia transportadora de minério, apresentada nas Figuras 7.16 e 7.17, com os dados obtidos foi construído um gráfico, onde este apresenta a potência ativa consumida pelos drivers de acionamento da correia, quando opera em sua condição nominal de trabalho e possuindo uma taxa de alimentação de aproximadamente 2540 T/h e a velocidade nominal de 4.17 m/s. A Figura 7.18 apresenta a potência a ativa nominal consumida pela correia transportadora.

A Figura 7.18 e 7.19 apresentam a potência ativa medida e a potência ativa estimada utilizando o algoritmo de estimação de parâmetros MQNR.

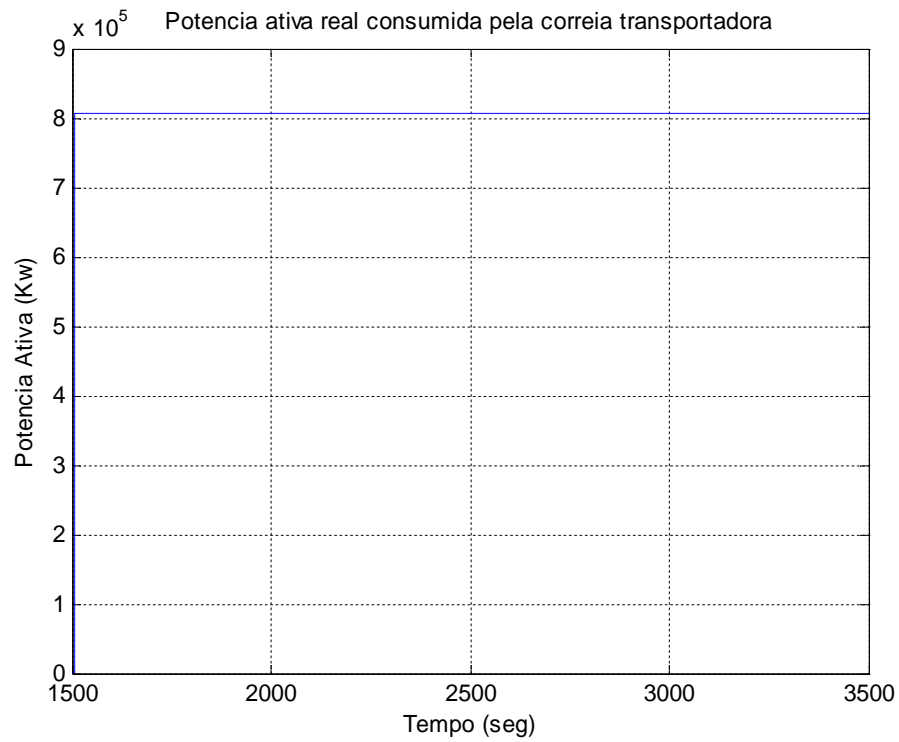


Figura 7.18- Medida da potência ativa consumida pela correia transportadora.

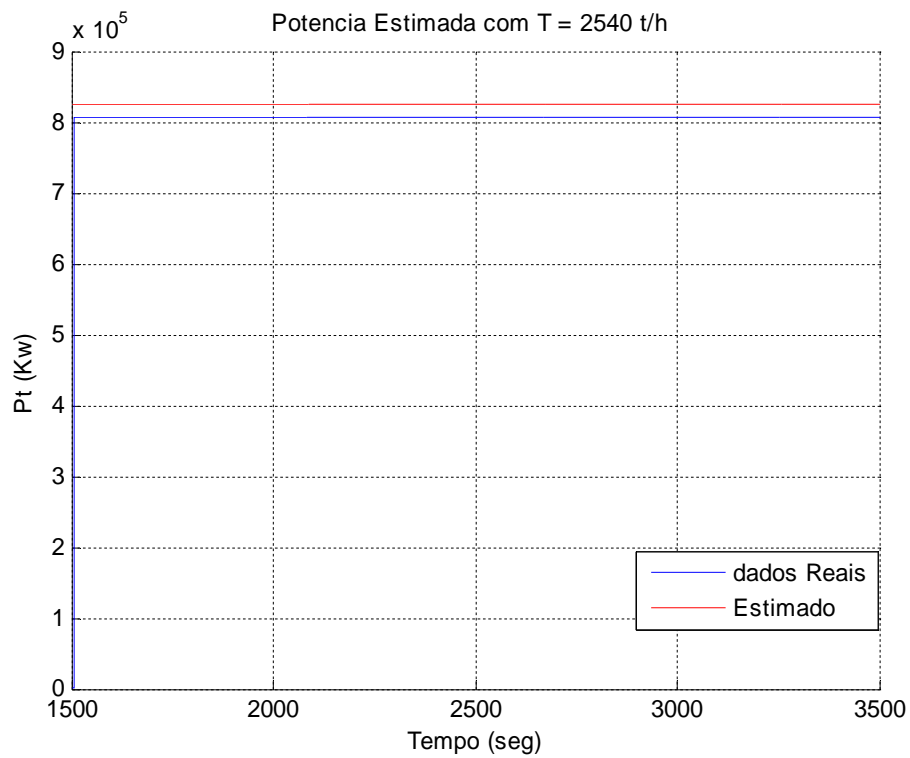


Figura 7.19- Medida da potência ativa consumida pela correia transportadora e valor estimado pelo algoritmo de estimação MQNR.

A Figura 7.20 apresenta o erro em percentual relacionada a estimativa de potência ativa medida da correia transportadora.

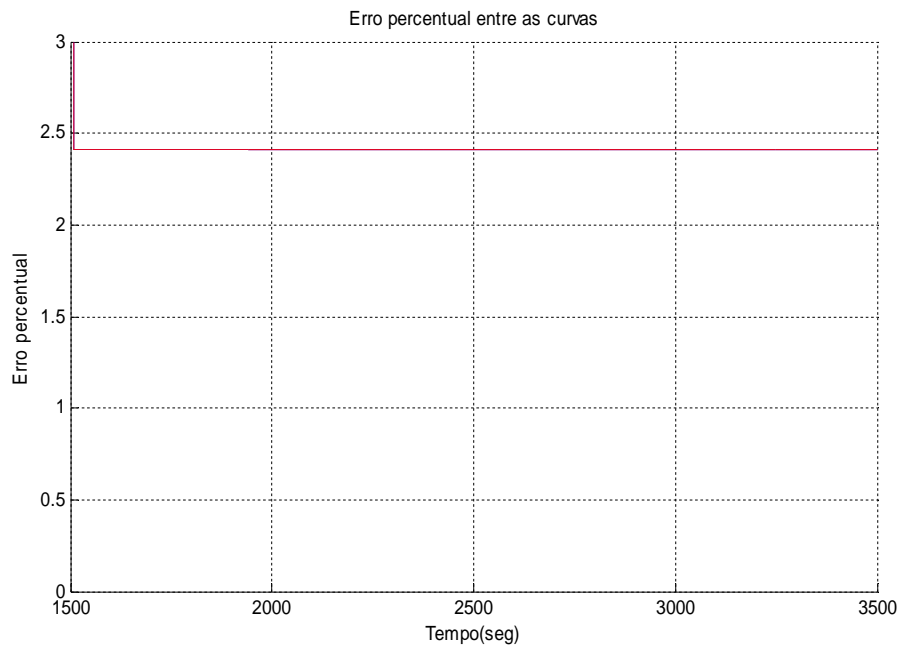


Figura 7.20- Erro percentual da estimacão da potência ativa medida da correia transportadora

Verifica-se na Figura 7.19 que os valores estimados pelo algoritmo aproxima-se dos valores reais coletados em campo, entretanto existe um erro entre as medidas. A Figura 7.20 apresentou a estimativa do erro em percentual, pode-se perceber através do gráfico que o erro esteve dentro de uma faixa de percentual inferior a 2.5%, este erro está relacionado a calibrao do termo de potência dos equipamentos acessório (P_{acs}) como apresentado na equao 2.10. Estes resultados Demonstram um desempenho satisfatório do algoritmo MQNR quanto a estimativa de parâmetros do sistema investigado.

7.4- RESULTADOS DO ALGORITMO DE DETECO DE FALTAS NA CORREIA TRANSPORTADORA

Objetivando construir um sistema de deteco de faltas, foi utilizado os conceitos teóricos abordados no capítulo 5, e utilizou-se a técnica de verificao de limites, sendo que estes limites serão definidos utilizando a análise intervalar, logo serão elaboradas zonas de tolerância. Para a delimitao destas zonas, utilizou-se o

modelo da correia, apresentada na Equação 2.10, e definiu-se como variáveis intervalares a velocidade da correia (V) e a taxa de alimentação da correia transportadora (T). Os intervalos definidos para estas duas variáveis são, $V = [\underline{V}_{\min}, \overline{V}_{\max}]$ e $T = [\underline{T}_{\min}, \overline{T}_{\max}]$. Aplicando tais intervalos na Equação 2.10, obtêm-se as Equações 7.1 e 7.2, que definem os limites inferior e superior da potência consumida pelos *drivers* de acionamento do sistema, $P_t = [\underline{P}_t, \overline{P}_t]$, respectivamente.

$$\underline{P}_t = \underline{T}_{\min}^2 \left(\theta_1 \cdot \underline{V}_{\min} + \frac{\theta_3}{\underline{V}_{\max}} \right) + \underline{T}_{\min} \left(\frac{\underline{V}_{\min}^2}{3.6} + \theta_4 \right) + \underline{V}_{\min} \cdot \theta_2 \quad (7.1)$$

$$\overline{P}_t = \overline{T}_{\max}^2 \left(\theta_1 \cdot \overline{V}_{\max} + \frac{\theta_3}{\overline{V}_{\min}} \right) + \overline{T}_{\max} \left(\frac{\overline{V}_{\max}^2}{3.6} + \theta_4 \right) + \overline{V}_{\max} \cdot \theta_2 \quad (7.2)$$

Sendo os valores de θ calculados a partir das Equações 7.3 a 7.6.

$$\theta_1 = \frac{1}{6.48 \cdot \rho \cdot b_1^2} \quad (7.3)$$

$$\theta_2 = f \cdot g \cdot Q \left[L \cdot \cos(\delta) + L \cdot (1 - \cos(\delta)) \cdot \left(1 - \frac{2Q_b}{Q} \right) + c_{ft} + k_3 \right] \quad (7.4)$$

$$\theta_3 = k_1 \quad (7.5)$$

$$\theta_4 = \left[\frac{g \cdot L \cdot \sin(\delta) + g \cdot f \cdot L \cdot \cos(\delta)}{3.6} \right] + k_2 \quad (7.6)$$

7.4.1- RESULTADOS DO ALGORITMO DE DETECÇÃO DE FALTAS UTILIZANDO O SIMULADOR

Com o intuito de validar o algoritmo de detecção de faltas, utilizou-se o simulador para alterar os pontos de operação do sistema e desta forma ocasionar faltas, objetivado testar o algoritmo utilizado. Testou-se inicialmente o algoritmo para construir o envelope exato, em seguida testou-se o envelope *overbounded* e *underbounded*. Utilizando os mesmos parâmetros da Tabela 7.1. Para definir os valores

do envelope exato, utilizou-se as Equações 7.1 e 7.2 para definir os limites de tolerância para o sistema, para realizar tal definição, utilizou-se o seguinte intervalo das variáveis, para a operação normal do sistema: $V = [3.15 \quad 3.15]$ e $T = [1000 \quad 2000]$.

7.4.1.1- ALGORITMO DE DETECÇÃO DE FALTA UTILIZANDO O ENVELOPE EXATO

Para a realização do teste do algoritmo de detecção de faltas, utilizou-se a variação da taxa de alimentação da correia, iniciando em $T = 2500 \text{ ton/h}$ e reduzindo deste valor 250 ton/h a cada 200 segundos, objetivando verificar se os limites de tolerância estão adequadamente dimensionados. A Figura 7.21 apresenta os resultados obtidos nesta situação.

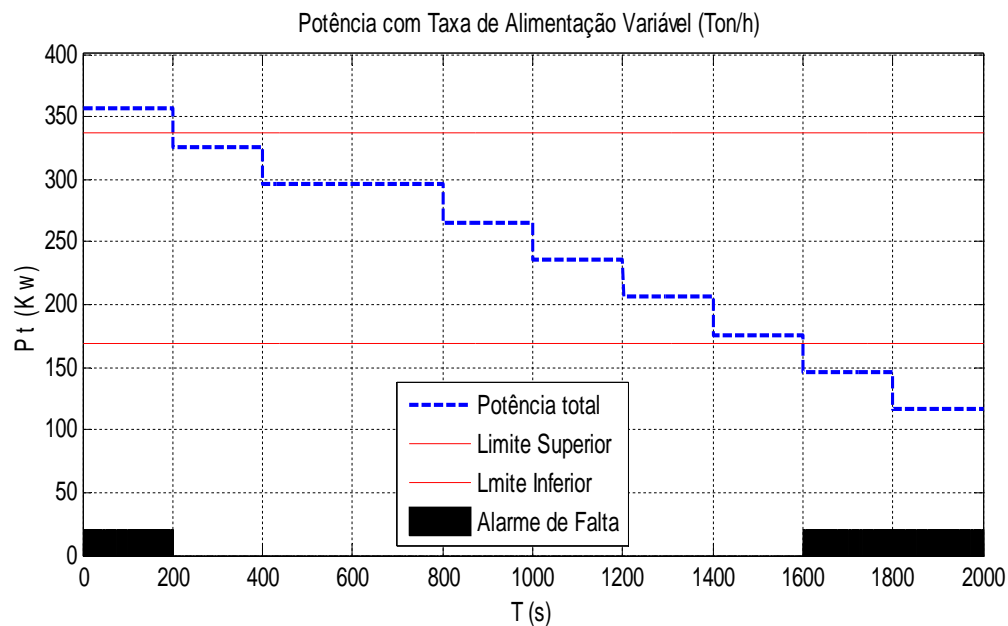


Figura 7.21- Algoritmo de detecção de falta usando o envelope exato no simulador.

Na Figura 7.21, verificamos que os alarmes de falta, estão adequados a todas as situações de falta, entretanto, no intervalo de 200 a 400 segundos o sistema apresentou uma taxa de alimentação de 2250 Ton/h, portanto esta taxa está acima do limite delimitado pelo simulador, contudo não há a indicação de falta pelo algoritmo, mostrando um alarme perdido pelo algoritmo.

Para realizar o segundo teste, foi utilizado um número randômico, que gerará uma taxa de alimentação variável entre 1 e 2100 Ton/h. Na Figura 7.22 apresenta-se o resultado do experimento.

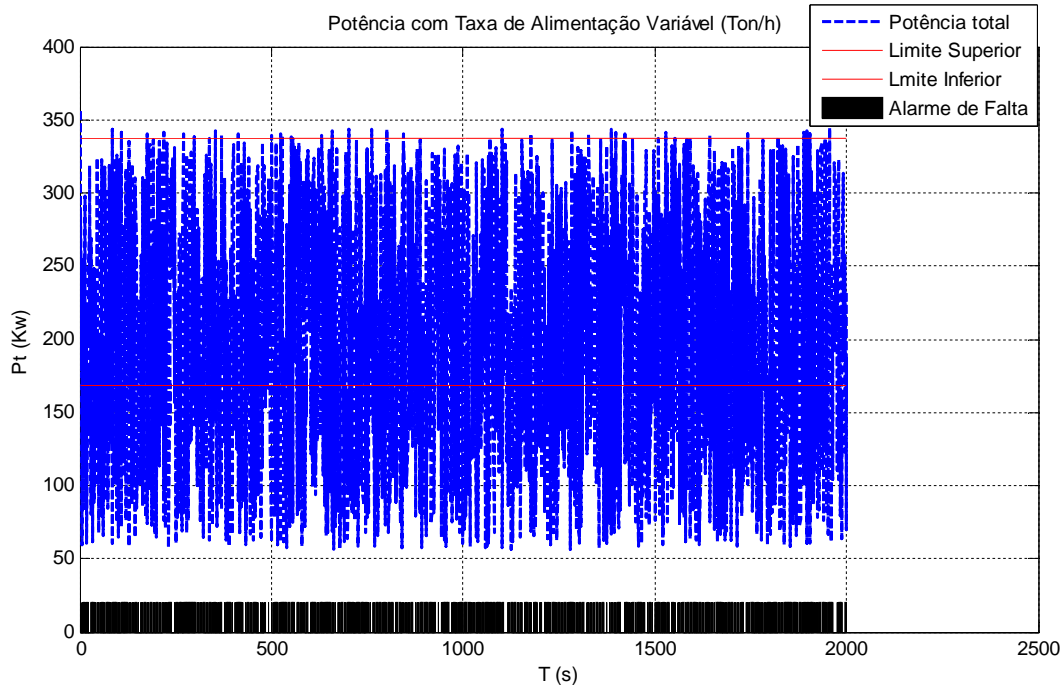


Figura 7.22- Algoritmo de detecção de falta usando o envelope exato com taxa randômica

7.4.1.2- ALGORITMO DE DETECÇÃO DE FALTA UTILIZANDO A ENVOLTÓRIA *OVERBOUNDED* E *UNDERBOUNDED*

Conforme apresentado no capítulo 5, foi delimitada 3 zonas de operação do sistema, a zona interna, zona intermediaria e a zona externa, quando a medida da variável em questão estiver dentro da zona interna, significa dizer que o sistema está operando normalmente, quando a medida da variável estiver dentro da zona externa o sistema está apresentando uma falta, se a medida do sistema estiver dentro da zona intermediaria nada poderá se afirmar sobre a condição do sistema, contudo existe a possibilidade do sistema está em falta.

Para a realização deste experimento utilizou-se as mesmas condições e valores das variáveis, utilizadas no subitem 7.4.1.1, desta obra. Entretanto foi incluída uma zona de tolerância externa para possibilitar filtrar algumas incertezas na detecção da falta do sistema. A Figura 7.23 apresenta os resultados do teste realizado.

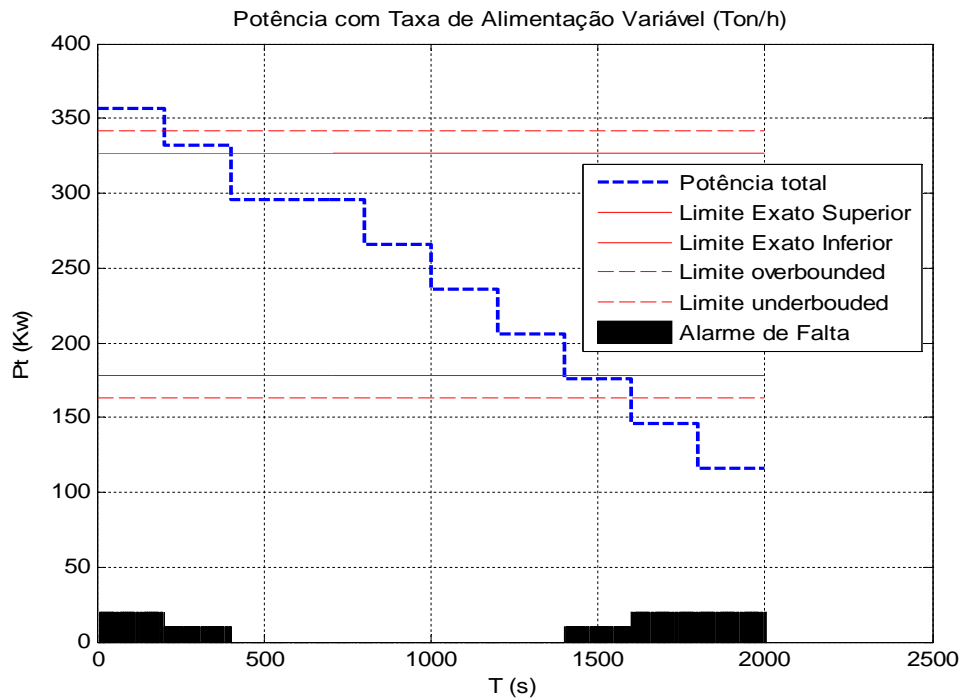


Figura 7.23- Algoritmo de detecção de falta usando o envelope externo

Para as mesmas condições utilizadas no teste anterior, o algoritmo de detecção de faltas utilizando uma zona de tolerância externa, conseguiu detectar a incerteza apresentada entre 200 e 400 segundos, demonstrando a robustez do algoritmo.

Para realizar este teste, foi utilizado um número randômico, que gerará uma taxa de alimentação variável entre 1 e 2100 Ton/h. Na Figura 7.24 apresenta-se o resultado do experimento.

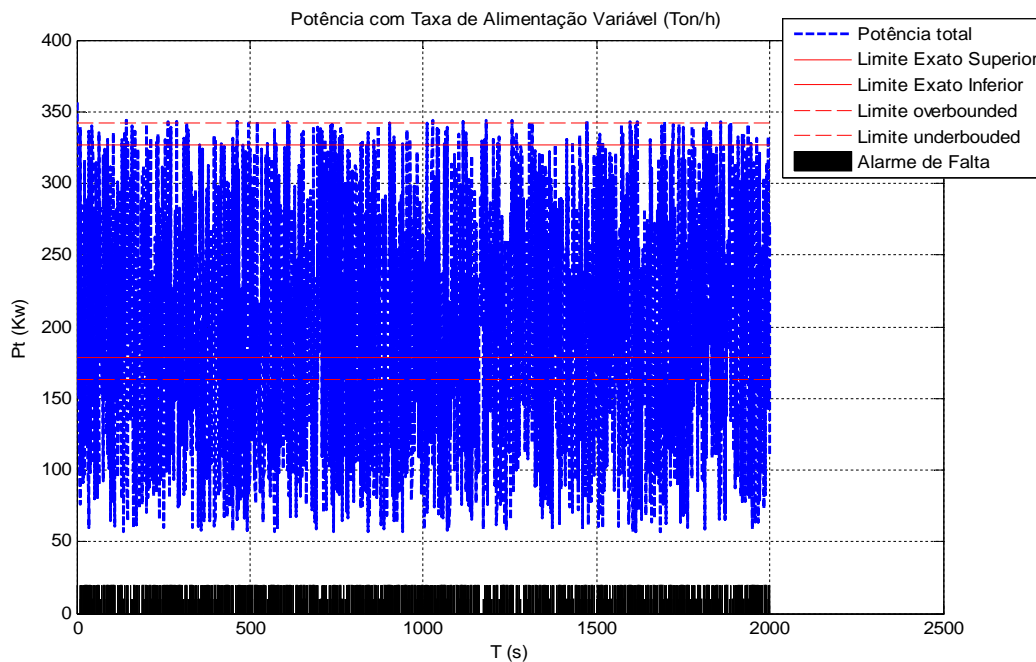


Figura 7.24- Algoritmo de detecção de falta usando o envelope externo com taxa de alimentação randômica.

7.4.2- RESULTADOS DO ALGORITMO DE DETECÇÃO DE FALTAS DA CORREIA TRANSPORTADORA REAL

A correia transportadora, apresentada na Figura 7.16 e 7.17 foi monitorada, durante um período normal de funcionamento, e no momento da monitoração foi constituído os limites mínimos e máximos das variáveis de operação e verificou-se que sua faixas de operação são respectivamente, $V = [4.17 \ 4.17]$ e $T = [2000 \ 2150]$. Após definir seus limites operacionais, foi constituído um banco de dados, de modo que este capturasse a potência consumida de todos os *drivers* de acionamento do sistema em questão. Os dados capturados, foram colocados nos algoritmos de detecção de faltas utilizando as técnicas de envelope exato e de envelopes *overbounded* e *underbounded*.

7.4.2.1- DETECÇÃO DE FALTA UTILIZANDO A ENVOLTÓRIA EXATA

Utilizando as técnicas intervalares apresentadas anteriormente, definiu-se os limites para a técnica do envelope exato, e utilizando os limites operacionais da correia transportadora. A Figura 7.25 apresenta os resultados desta análise, sendo considerado:

os valores reais da correia transportadora, os valores estimados dos dados da correia, e seus respectivos limites superior e inferior.

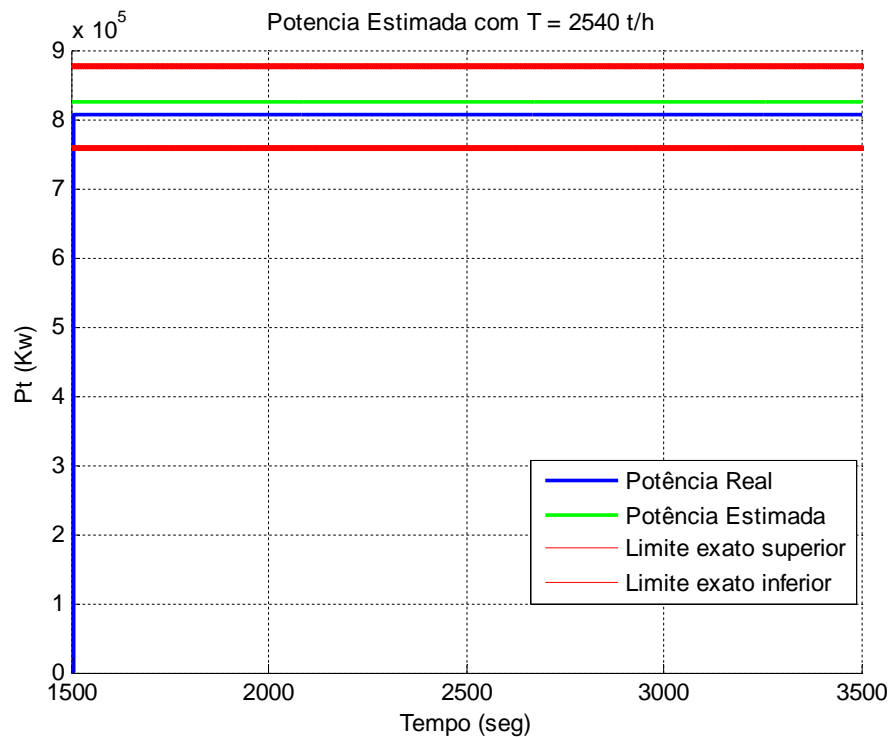


Figura 7.25- Algoritmo de detecção de falta usando o envelope fixo em uma correia transportadora real.

A Figura 7.25 apresenta o algoritmo de detecção de faltas, utilizando apenas a envoltória exata, verifica-se que todos os valores tanto da potência real medida no sistema da correia transportadora, quanto do valor estimado pelo algoritmo MQNR, estão contidos dentro da zona normal de operação, este fato ocorreu devido aos dados serem coletados enquanto que o sistema estava em seu funcionamento normal e devido a impossibilidade de colocar o sistema em um ponto de operação inadequado, apresentou-se como demonstração da técnica.

7.4.2.1- DETECÇÃO DE FALTA UTILIZANDO A ENVOLTÓRIA *OVERBOUNDED* E *UNDERBOUNDED*

Para os valores reais, foi constituído também os envelopes *overbounded* e *underbounded*. Com isso foi adicionada uma zona de tolerância, como pode-se verificar na Figura 7.26.

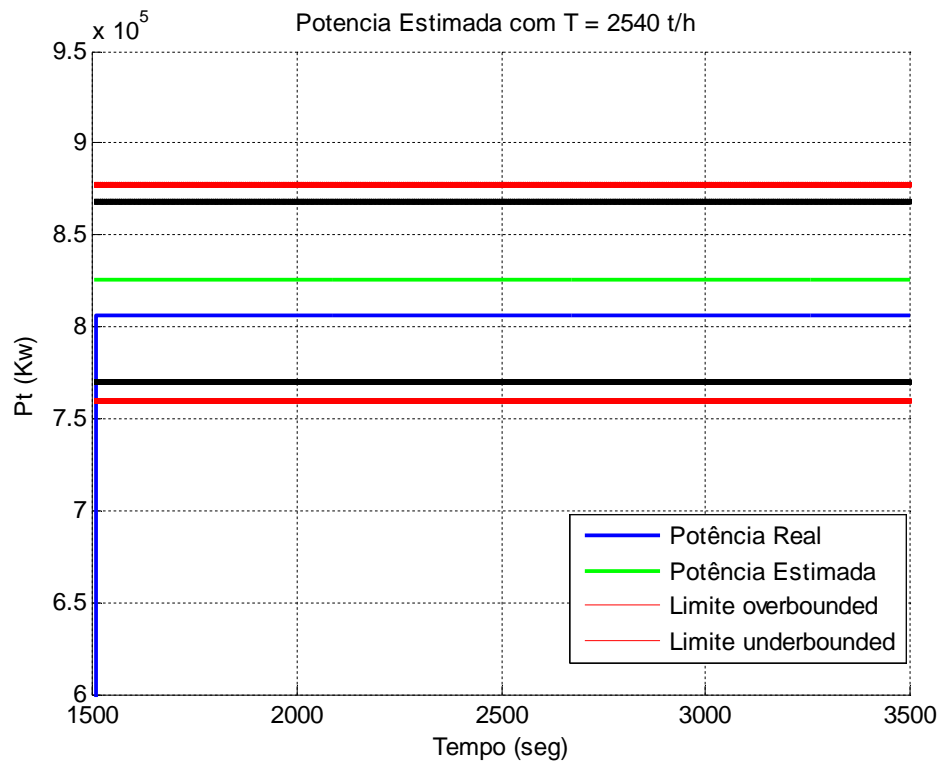


Figura 7.26- Algoritmo de detecção de falta usando a zona de tolerância em uma correia transportadora real.

A Figura 7.26 apresenta o algoritmo de detecção de faltas, utilizando a envoltória exata e *underbounded*, as mesmas condições apresentadas para a Figura 7.25 são reproduzidas para a Figura 7.26.

7.5 - CONCLUSÃO

Neste capítulo, são apresentados os principais resultados a respeito da estimação paramétrica e algoritmo de detecção de faltas no sistema, são utilizados como modelo de referência o sistema abordado por (Zhang, 2009) e em seguida é aplicada as técnicas discutidas nesta obra, em um sistema real. No próximo capítulo, são apresentados os principais resultados obtidos do protótipo construído.

CAPITULO VIII

RESULTADOS DO PROTÓTIPO

8.1- INTRODUÇÃO

Esta seção objetiva apresentar os resultados práticos dos testes realizados no protótipo desenvolvido da correia transportadora. O protótipo desenvolvido nesta obra reproduz de modo satisfatório, todos os pontos de operação de uma correia transportadora, possibilitando tanto a variação da velocidade da correia quanto à variação da taxa de alimentação, entretanto todos os pontos estudados nesta seção limitam-se a manter constante a velocidade do motor, atingindo a velocidade nominal de operação do mesmo e varia-se a taxa de alimentação, através da inserção e retirada de carga do sistema.

8.2 – SISTEMA DE SUPERVISÃO (IHM)

O sistema de supervisão, desenvolvido nesta obra baseia-se no software de instrumentação Labview. Este tem como principal objetivo, tornar a operação do sistema constituído o mais amigável possível, possibilitando ao operador comandar todo o sistema através dos botões de acesso, além de apresentar a possibilidade de visualização dos sinais adquiridos. A figura 8.1 apresenta a IHM da correia transportadora.

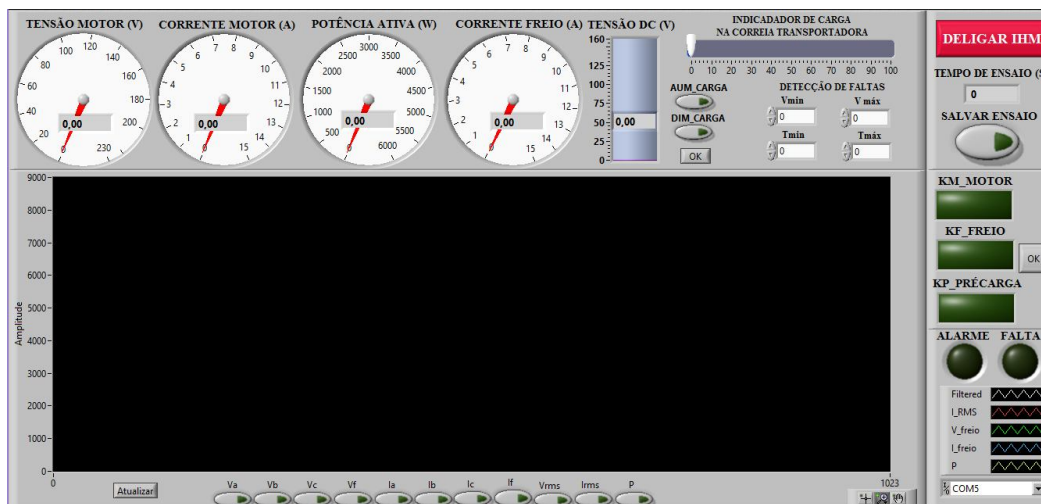


Figura 8.1- Interface homem-máquina utilizada na constituição do protótipo da correia transportadora.

A interface apresentada na figura 8.1, possui 5 medidores em sua parte superior, sendo que estes são grandezas relacionadas a tensão rms do motor, corrente rms do motor, potência ativa consumida pelo motor, corrente no *link DC* e tensão no *link DC* respectivamente. Ao lado apresenta-se os medidores de carga a ser emulada no sistema e os dados de operação para a realização dos cálculos do algoritmo de detecção de faltas. Ao lado estão os indicadores de tempo de ensaio e os botões de salvar dados e o de desliga a IHM. Abaixo estão localizados os botões relacionados à partida do motor (KM_MOTOR), a energizar o *link DC* (KF_FREIO) e a retirada da pré-carga do *link DC* (KP_PRÉCARGA). Abaixo encontram-se 2 led's onde indicam as condições de alarme ou falta do sistema respectivamente, dependendo diretamente do algoritmo de detecção de faltas.

8.2.1 – OPERAÇÃO DA IHM

Inicialmente deve-se selecionar a porta de comunicação utilizada pelo computador, esta localiza-se no quadrante inferior a direita. Para a realização da aplicação do algoritmo de detecção de faltas, deve-se selecionar os valores dos campos, velocidade mínima (V_{\min}), velocidade máxima (V_{\max}), taxa mínima de alimentação da correia transportadora (T_{\min}) e taxa máxima de alimentação da correia transportadora (T_{\max}). Após a calibração do algoritmo de detecção de faltas, pressiona-se o botão KM, e confirma apertado o botão OK ao lado. Após isso pressionasse o botão KF e confirma, em seguida aguarde 15 segundos, para a realização do carregamento dos capacitores do *link DC*, após este tempo pressionasse o botão KP e confirma. Após este procedimento o sistema está pronto para ser operado, com o intuito de visualizar as variáveis em questão, é disposto um grupo de botões abaixo do gráfico de modo a selecionar as variáveis a serem visualizadas através do gráfico. Para inserir carga no sistema, pressionasse o botão AUM_CARGA, em seguida pressione o botão OK, logo abaixo do botão para confirmar a ação, a cada confirmação é incrementado uma tensão no *link DC*. Para retirar carga do sistema, pressionasse o botão DIM_CARGA, em seguida pressione o botão OK, logo abaixo do botão para confirmar a ação, a cada confirmação é decrementado uma tensão no *link DC*. Para realizar o salvamento dos dados coletados, pressionasse o botão SALVAR ENSAIO e passando o tempo necessário desejado

pressionasse o botão DESLIGAR IHM, após isso selecione o diretório no qual se deseja salvar o arquivo, após selecionar o nome do arquivo escreva “.txt” de modo a obter os dados em um arquivo de extensão de texto.

8.3 – TESTES PRÁTICOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos de testes experimentais, utilizando o protótipo criado.

8.3.1- TESTES COM MOTOR A VAZIO

Com o intuito de verificar as condições do sistema, é realizado um teste apenas com o motor funcionando, e são coletados as principais variáveis elétricas que caracterizam o sistema. As Figuras 8.1 a 8.3 são as medidas de tensão de fase, como o motor é trifásico e ligado em Δ , são coletadas as medidas de sequência positiva AB, BC e AC respectivamente.

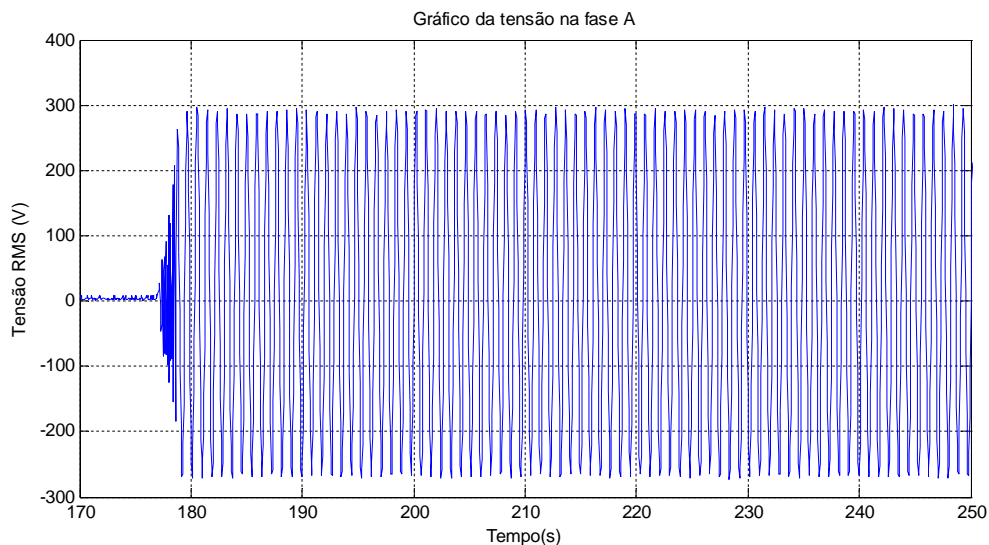


Figura 8.2- Medida de tensão de fase AB do motor a vazio.

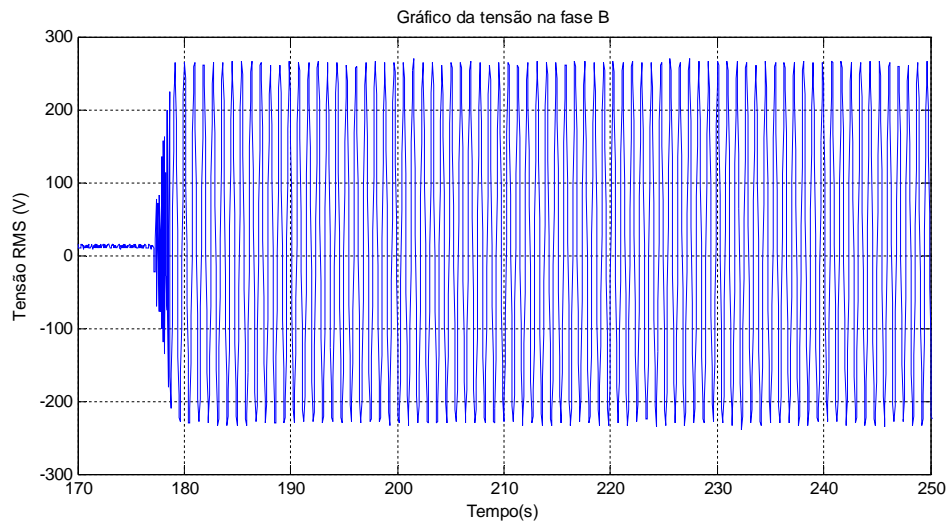


Figura 8.3- Medida de tensão de fase BC do motor a vazio.

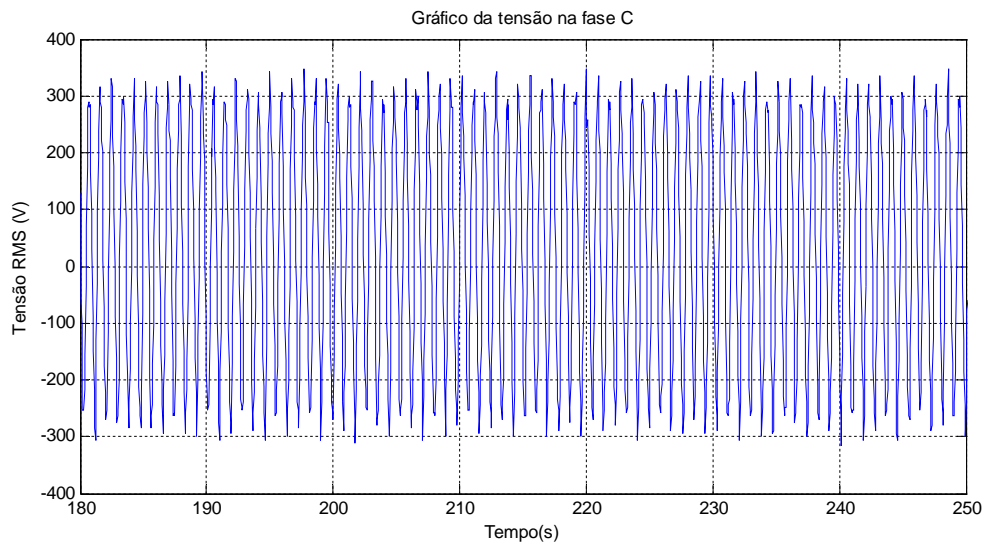


Figura 8.4- Medida de tensão de fase AC do motor a vazio.

A Figura 8.5 apresenta as 3 fases anteriormente apresentadas individualmente, de modo a perceber a defasagem entre elas, característica normal de um sistema trifásico balanceado.

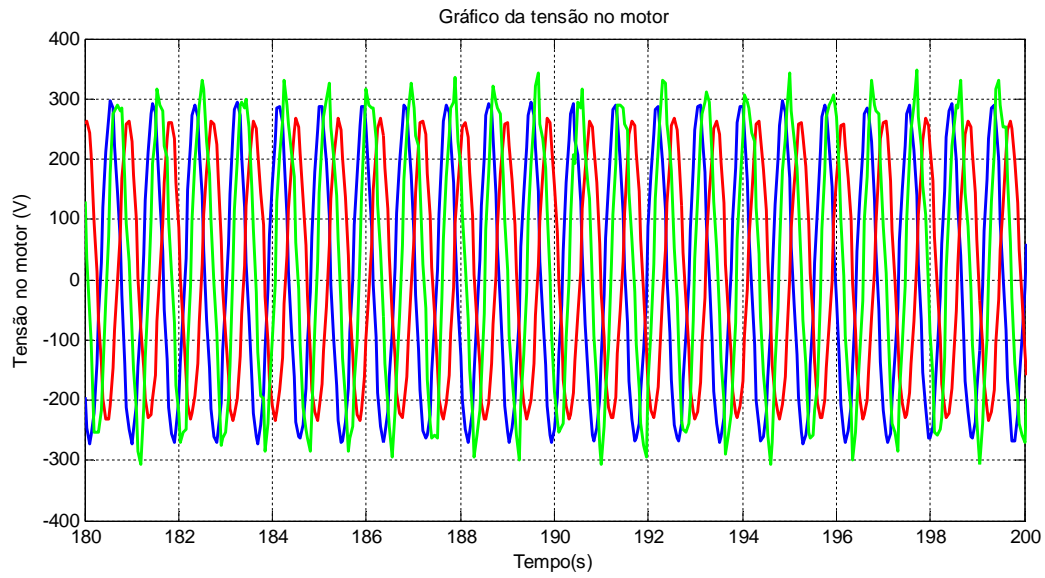


Figura 8.5- Tensão medida nas três fases do motor.

As Figuras 8.6 a 8.8 apresentam as medidas de corrente de linha A, B e C do motor respectivamente.

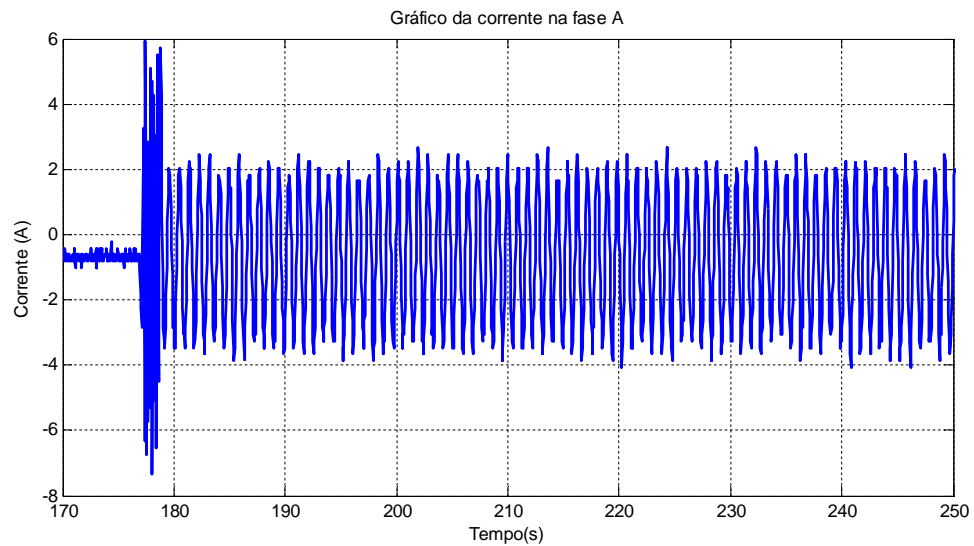


Figura 8.6- Medida de corrente na fase A do motor a vazio.

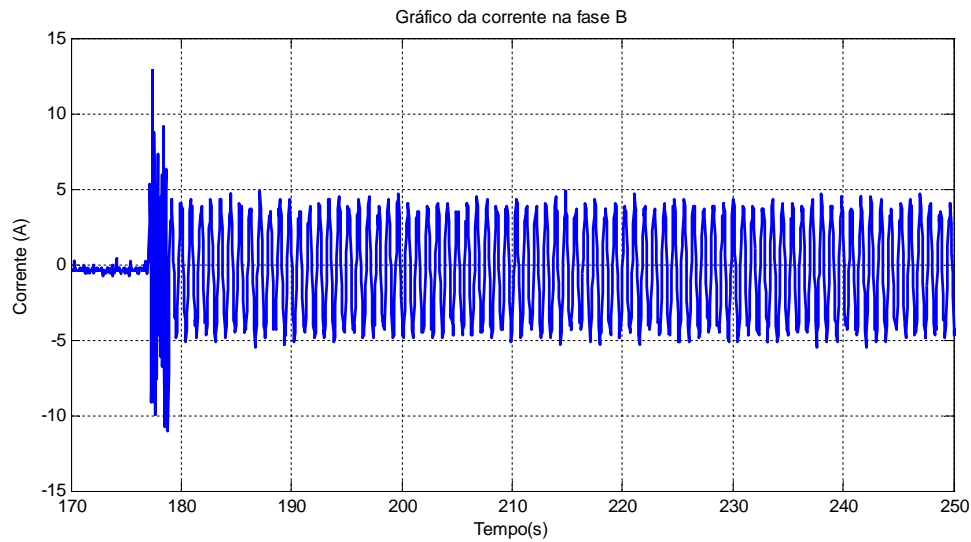


Figura 8.7- Medida de corrente na fase B do motor a vazio.

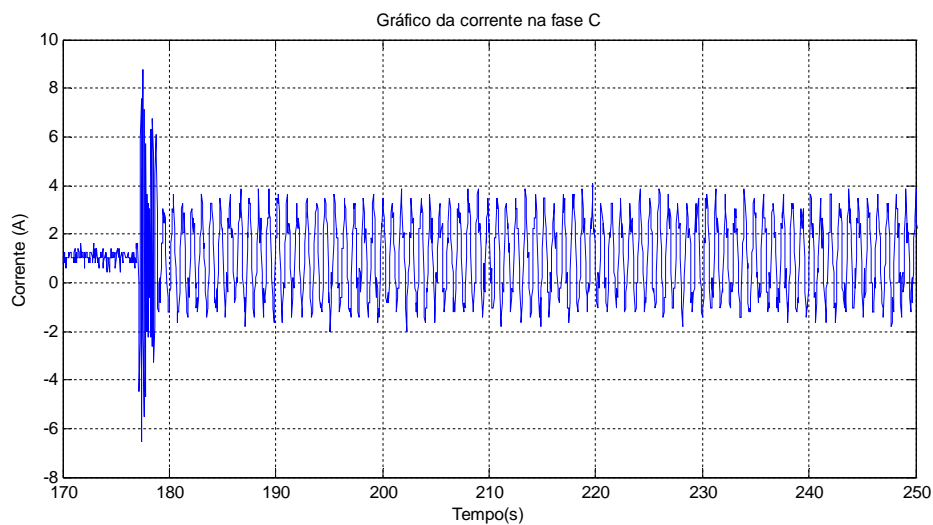


Figura 8.8- Medida da corrente na fase C do motor a vazio.

A Figura 8.9 apresenta as correntes coletadas nas três fases do motor, assim como as tensões as correntes apresentam as mesmas características de um sistema trifásico balanceado. Verifica-se que durante a partida do motor, que as correntes atingem valores elevados, isso é devido a potência necessária para fazer com que o motor consiga um conjugado superior a inércia.

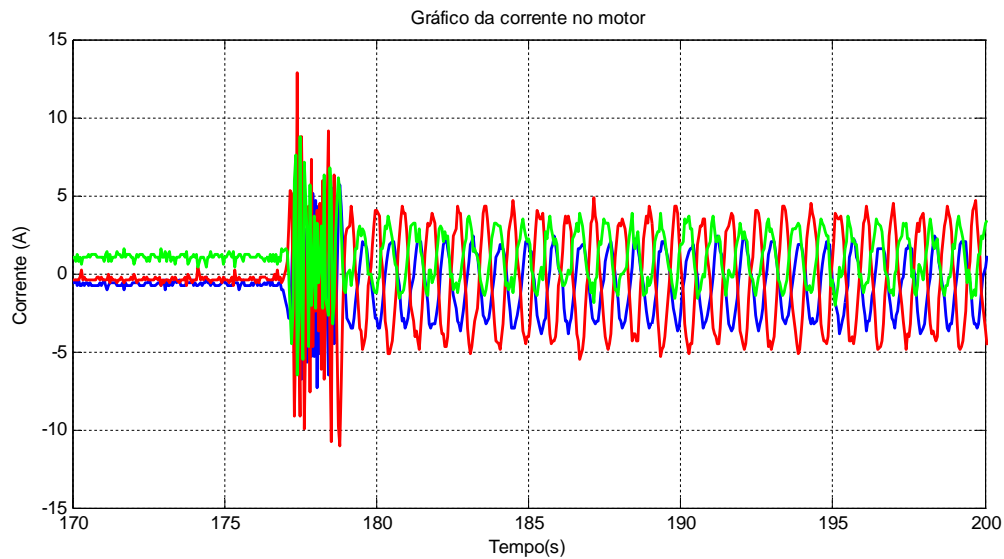


Figura 8.9- Corrente medida nas três fases do motor.

8.3.2 – TESTE NO PROTÓTIPO COM VARIAÇÃO ABRUPTA DE 50% DE CARGA

Objetivando verificar a variação de potência com a entrada de carga, foi realizado o seguinte procedimento: Calibrou-se o algoritmo de detecção de faltas de modo a obter uma velocidade mínima de 1 m/s e uma velocidade máxima de 4 m/s, para a taxa de alimentação da correia adotou-se os seguintes extremos, taxa mínima de 1000 T/h e taxa máxima de 2500 T/h. Inicia-se o procedimento normal de operação do protótipo, após a estabilização do protótipo é inserido instantaneamente, 50% da carga nominal de modo a verificar a atuação do algoritmo de supervisão e detecção de falta. A Figura 8.10 apresenta a tensão rms do motor.

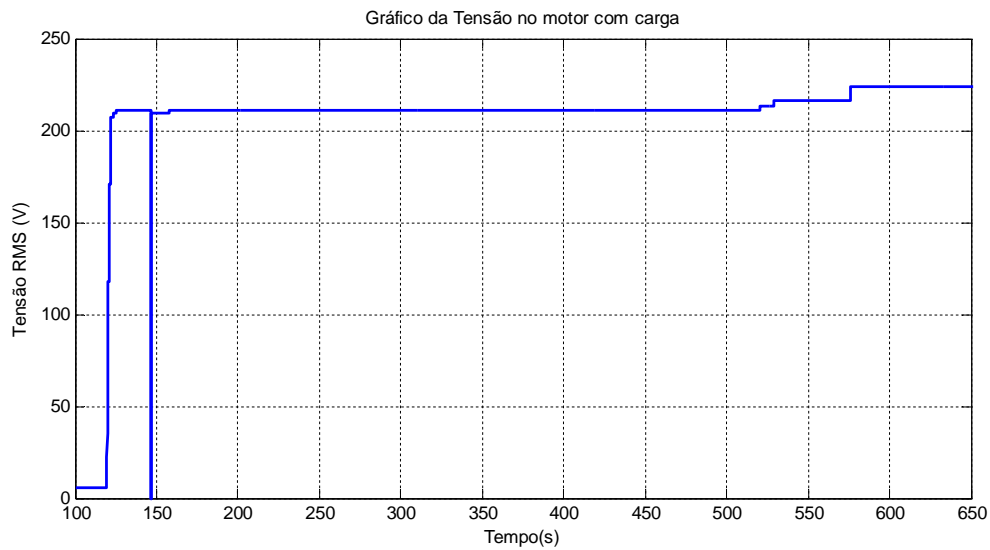


Figura 8.10 - Medida de tensão RMS do motor quando submetido a uma variação de carga.

Na Figura 8.10 pode-se verificar um ligeiro aumento da tensão do motor, isso é ocasionado devido ao controle de velocidade que o motor possui, este controle é devido a malha implementada via inversor (CFW09). A Figura 8.11 apresenta a corrente RMS medida no motor.

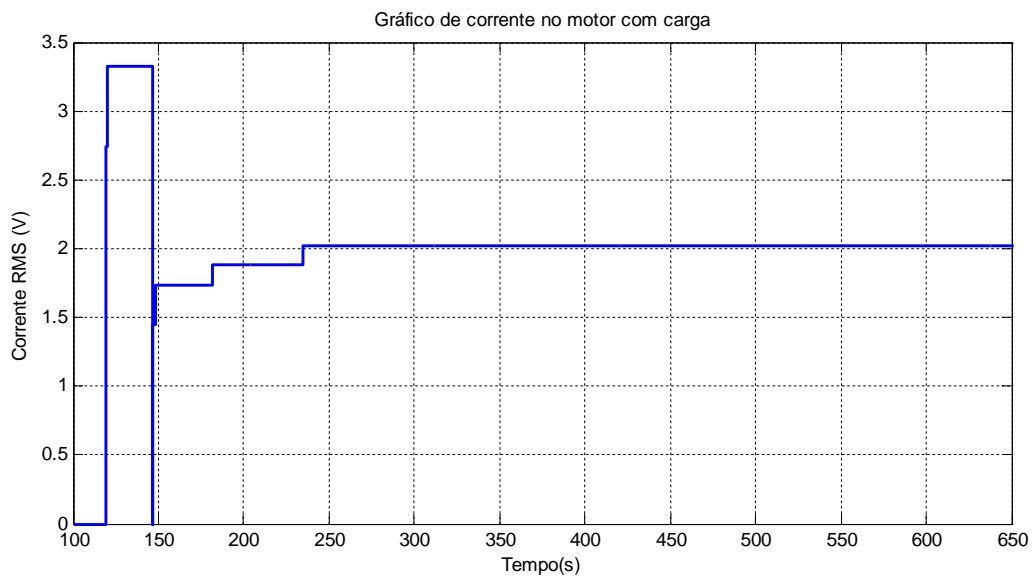


Figura 8.11 - Medida de corrente RMS do motor quando submetido a uma variação de carga.

Na Figura 8.11 inicialmente apresenta-se uma corrente elevada, isto ocorre devido ao pico de partida, após isso estabiliza-se em aproximadamente 2 A. A Figura 8.12 apresenta a potência ativa quando submetida a uma carga de 60%.

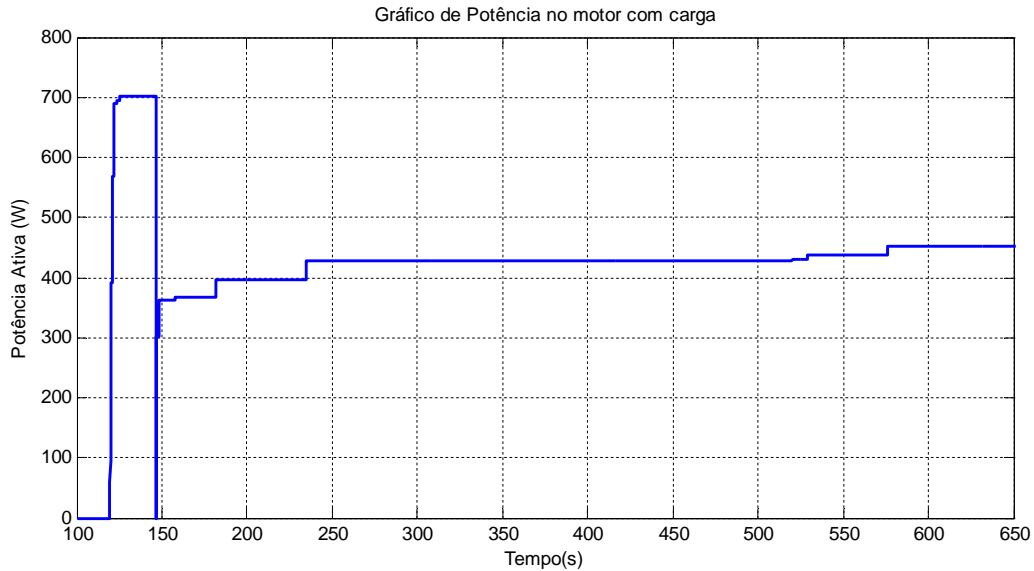


Figura 8.12- Potência ativa medida no motor quando submetido a variação de carga

Na Figura 8.12 verifica-se uma ligeira variação da potência ativa, quando é inserido 60% de carga no sistema.

A Figura 8.13 apresenta a tensão medida do *link DC*, quando este apresenta um aumento de carga gradativo de 60%.

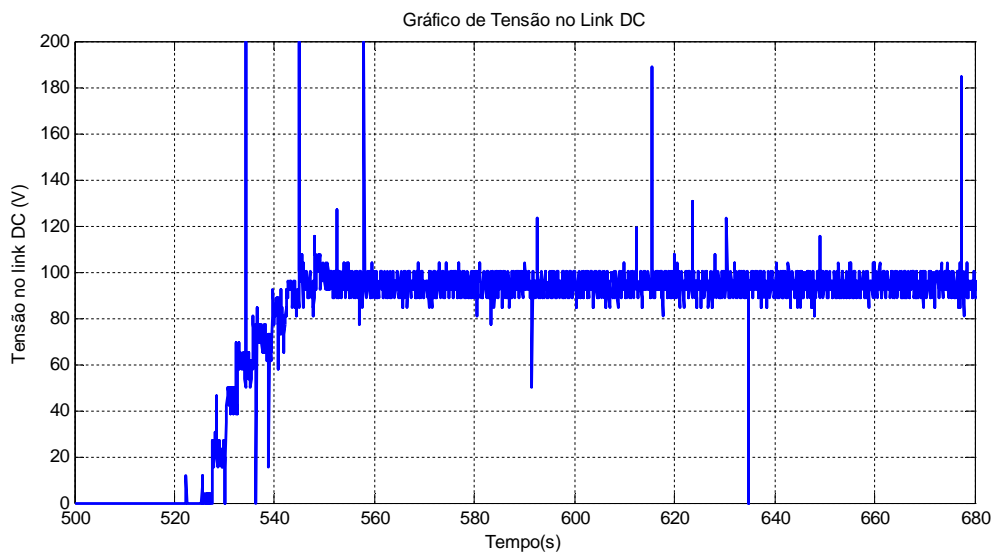


Figura 8.13- Medida de tensão do link DC.

A Figura 8.14 apresenta a variação de potência e o algoritmo de detecção de falta, em aproximadamente em 680 segundos é aplicado 50% de carga no sistema, esta variação de carga ocasionou um aumento na potência ativa, e com esta variação de potência o algoritmo detectou uma falta ocorrida no sistema, anteriormente a inserção da carga, o algoritmo de detecção identificou que o sistema operava em uma região próxima ao limite de modo que entrou na zona de alarme.

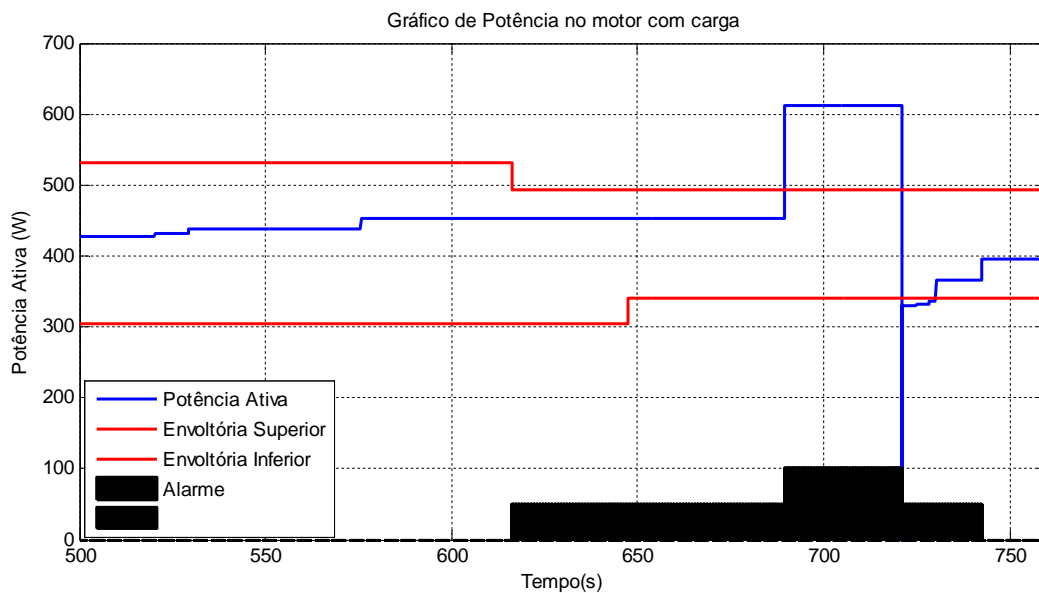


Figura 8.14- Medida de potência ativa e do algoritmo de detecção de faltas.

8.3.3 – TESTE NO PROTÓTIPO COM ENTRADA GRADATIVA DE CARGA

Para a realização do segundo teste, calibrou-se o algoritmo de detecção de falta, com as mesmas condições apresentadas anteriormente, foi também realizado todos os procedimentos de partida do sistema, como apresentado anteriormente, entretanto, para a realização deste teste, foi inserido carga no sistema de forma gradativa, de modo que o sistema pudesse estabilizar a cada inserção de 10% de carga até chegar ao seu limite. A Figura 8.15 apresenta a tensão no *link DC*.

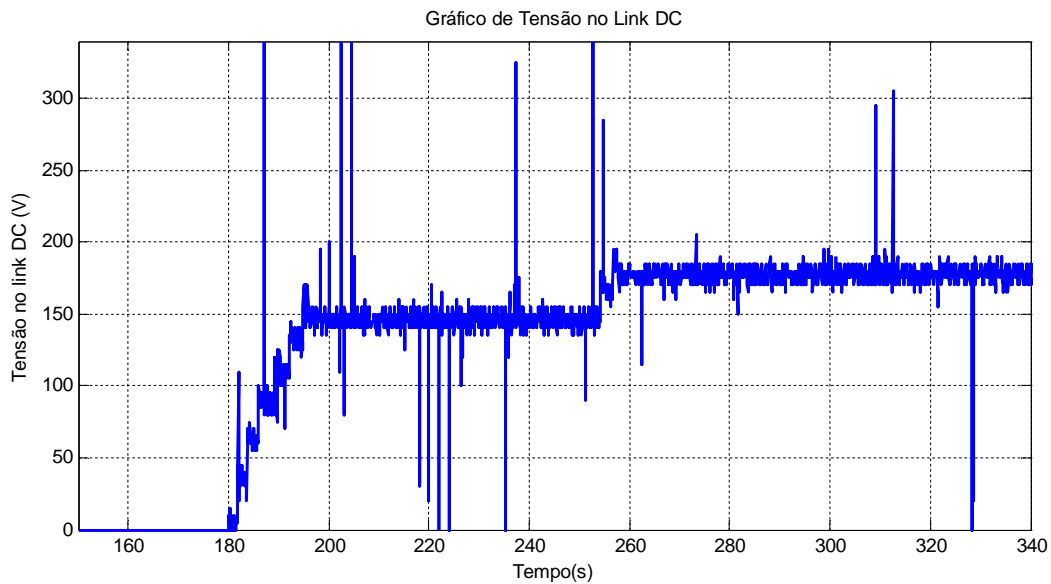


Figura 8.15 - Medida de tensão do link DC com entrada de carga.

Na Figura 8.15 verifica-se um aumento gradativo da tensão no *link DC*, que por sua vez alimenta a carga, chegando a um valor máximo de aproximadamente 170 V. A Figura 8.16 apresenta a forma de onda de tensão rms do motor, verifica-se nesta figura uma ligeira elevação da tensão rms.

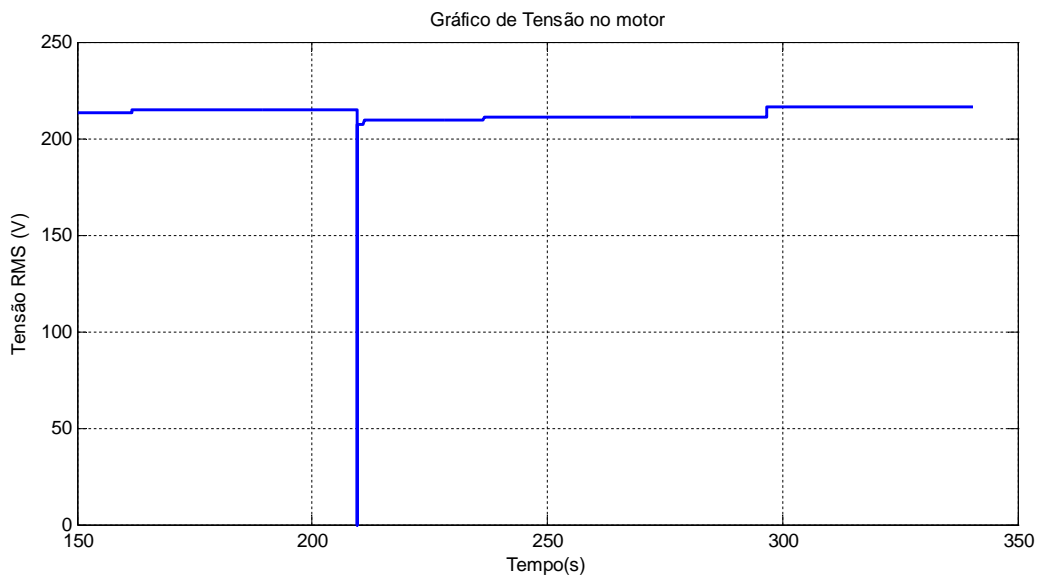


Figura 8.16 – Medida de tensão RMS do motor submetido a carga.

A Figura 8.17 apresenta a forma de onda de corrente rms medida no motor, verifica-se que quando ocorre a inserção de carga gradativa, a corrente tende a se elevar,

entretanto estabiliza em um valor inferior ao apresentado no teste de inserção de carga abrupta.

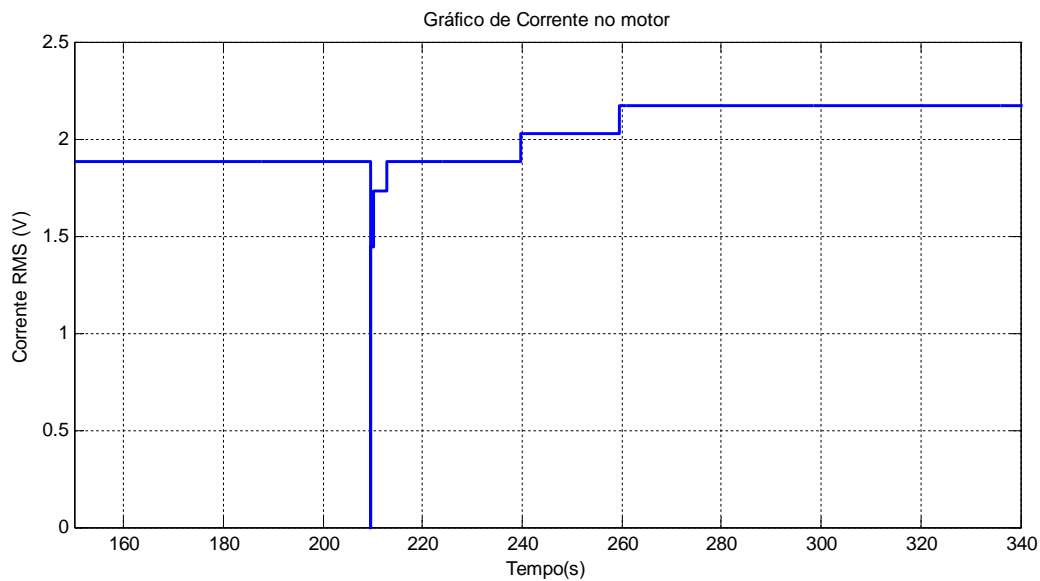


Figura 8.17 - Medida de corrente RMS do motor submetido a carga.

A Figura 8.18 apresenta a potência ativa demandada pelo motor, quando este é submetido a uma variação de carga gradativa, inicialmente apresenta-se um pico elevado, isto é devido à partida do motor, como mencionado anteriormente, a curva em vermelho é o envelope exato, delimitando a zona de operação normal do sistema, verifica-se que no momento da partida, o algoritmo de detecção de falta, reconhece uma falta no sistema, quando o sistema estabiliza em aproximadamente 50 segundos, todos os valores de potência medidos, estão dentro da zona de operação normal do sistema, entretanto alguns destes valores se aproximam dos limiares de operação normal, apresentando desta forma uma condição de alarme, verifica-se esta condição em aproximadamente 270 segundos quando 50% da carga foi inserida no sistema, em 300 segundos toda a carga já está inserida no sistema, entretanto nenhuma condição de falta foi detectado pelo algoritmo.

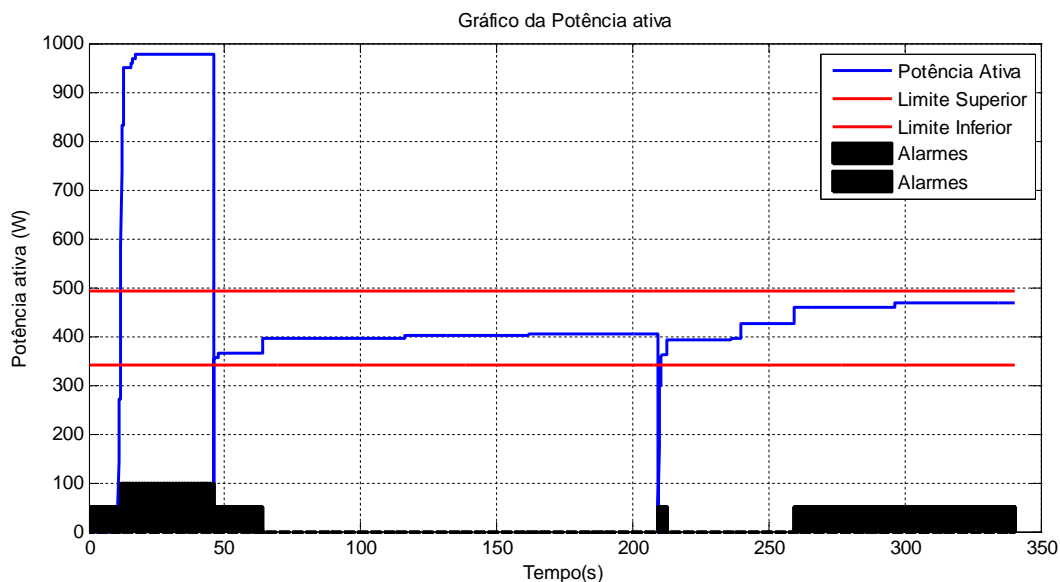


Figura 8.18- Medida de potência ativa e do algoritmo de detecção de falta.

8.4 – CONCLUSÃO

Neste capítulo verificou-se os dados coletados pelo protótipo, através deste pode-se verificar a influência da variação da taxa de alimentação na operação de uma correia transportadora, também verificou-se a eficácia do algoritmo de detecção de faltas aplicado ao protótipo, sendo este calibrado com as mesmas características da correia transportadora de minérios abordada no capítulo 7. O protótipo reproduz perfeitamente todos os pontos de operação alcançados por uma correia transportadora, levando em consideração, desde a relação de variação de velocidade quanto à variação da taxa de alimentação, entretanto todos os pontos de operação estudados neste capítulo mantem a velocidade como constante, sendo a velocidade nominal de operação do motor e variava-se a taxa de alimentação. No próximo capítulo serão apresentados as considerações finais relacionados a todo o estudo.

CAPITULO IX

CONCLUSÃO

9.1- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo apresentou-se como principais pontos de discussão e enfoque:

- Desenvolver uma proposta de modelagem fenomenológica de uma correia transportadora.
- Constituir um simulador que represente o modelo proposto de forma fidedigna.
- Propor uma metodologia de calibração para o modelo, utilizando como base a técnica de mínimos quadrados.
- Implementar com eficácia uma metodologia de identificação em um sistema real do tipo correia transportadora, baseando-se na técnica de mínimos quadrados.
- Constituir um algoritmo de detecção de faltas utilizando um enfoque em análise intervalar.
- Projetar, desenvolver e construir um protótipo que emule de forma satisfatória todas as condições de operação de um sistema do tipo correia transportadora, possibilitando investigar tanto a influência da variação da taxa de alimentação quanto a variação da velocidade.

O protótipo e sistema desenvolvido neste trabalho pode ser de grande utilidade no treinamento de engenheiros. Além disso, pode também ser utilizado para verificação de faltas associadas a correia transportadora, sem a necessidade de realizar ensaios no sistema de grande porte.

Desta forma destaca-se que todos os objetivos gerais e específicos propostos para a constituição desta dissertação foram atendidos de forma satisfatória.

9.2- PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

- Implementação de estratégias que tornem a operação do sistema correia transportadora mais eficiente e econômica.
- Implementar uma estratégia para a medição de velocidade do motor via microprocessador.

- Implementação de estratégias de controle para a velocidade do motor utilizado no protótipo.
- Construção de um algoritmo de estimação paramétrica *on-line* aplicado ao protótipo.
- Construção e implementação de um modelo dinâmico que represente o sistema do tipo correia transportadora.
- Construir um algoritmo de detecção de faltas utilizando o modelo dinâmico levantado.
- Aplicação de estratégias de controle Fuzzy RML e/ou RCL para a realização do controle de velocidade do motor utilizado no protótipo.
- Estudo e verificação da influência da variável velocidade do motor no modelo levantado e implementado nesta obra.
- Aprimorar o protótipo desenvolvido e incluir a humidade a qual o material é submetido como uma das variáveis a serem emuladas no processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alefeld, G. e Mayer, G. (2000). Interval Analysis: Theory and application. Journal of Computational and applied mathematics, 121 : 421 – 464.

Bormax – Correias e mangueiras industriais. Disponível em:

<<http://www.correiasindustriais.com.br>>

“Datasheet dsPIC30F3014” <http://www.microchip.com>.

“Datasheet Voltage Transducer LEM LTS-25-NP” <http://www.lem.com>.

“Datasheet Voltage Transducer LV-25p” <http://www.lem.com>.

Aguirre, L. A. Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não_Lineares Aplicadas a Sistemas Reais. Editora UFMG, Belo Horizonte – MG, 2007.

Coelho, A. A. R. and Coelho, L. S. Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares. Editora da UFSC, Florianópolis – SC, 2004.

Dorf, S. Introdução aos circuitos elétricos. 7 Ed. Editora Prentice Hall.

Fadalli, M. S., Visioli, A. Digital Control Engineering: Analysis and Design. Academic Press, 2009.

Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. The Feynman Lectures on Physics. v. II. 1979. cap. 16-3.

Filho, G. F. Motor de indução. Editora Érica, apoio cultural WEG. São Paulo – SP. 2000.

Hansen, E. 1992, Global optimization using interval analysis. Marcel Dekker.

J. Armengol, J. Vehí, L. Travé-Massuyès and Sainz, M. Á. 2001. Application of modal intervals to the generation of error-bounded envelopes. *Reliable Computing*, vol. 7, n° 2, pp. 171-185. Abril-2001.

J. Armengol, L. Travé-Massuyès, J. Vehí and L. de La Rosa. A survey on interval model simulators and their properties related to fault detection. *14th IFAC World Congress 1999*. Beijing, China, O:511-519, 1999.

J. Armengol, L. Travé-Massuyès, J. Vehí and Sainz, M. Á. 1999. Generation of error-bounded envelopes using modal interval analysis. *10th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX 1999)*. Loch Awe, Scotland, UK 20-26.

J. Chen and R. Patton. *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer, 1998.

J. Quevedo, J. Armengol and M. Vassilaki. Gas turbine fault detection based on model simulation of the process and its controllers. *Proceeding of the European Simulation Multiconference (ESM 94)*, Barcelona, Catalonia, Spain, pages 260-264, 1994.

Jaulin, L., Kieffer, M., Didrit, O., Walter, E. *Applied Interval Analysis: with examples in parameter and state estimation, robust control and robotics*. Springer, 2001.

Júnior, F. J. C. *Desenvolvimento do Controle de Tensão Para Um Conversor estático trifásico com aplicações em fontes de Alimentação Ininterrupta*. Faculdade de Engenharia Elétrica. Instituto de Tecnologia, UFPa- Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

Kaucher, E. (1980). Interval analysis in the extended interval space IR . *Comput suppl.* 2: 33 – 49.

L. Travé-Massuyès and R. Milner. Diagnosis of the dynamics system based on explicit and implicit behavioural models: na application to gas turbines in esprit project tiger.

Proceedings of Scandinavian Conference on Artificial Intelligence (SCAI 95), pages 169-183, 1995.

Landau, I. D., Zito, G. *Digital Control Systems: Design, Identification and Implementation*. Alemanha, Springer, 2006.

Ljung, L. *System Identification- Theory for the user*. Prentice-Hall, 2^o Edition, 1999.

Marques, A. E. B.; Cruz, E. C. A.; Júnior, S. C. *Dispositivos Semicondutores: Diodos e transistores*. Editora Érica, 10^a edição, São Paulo – SP. 2006.

Moore, R. E. *Method and Applications of Interval Analysis*, SIAM, Philadelphia, 1979.

Moraes, A. R. B. *Desenvolvimento e implementação de estratégias de controle digital para regulação de tensão e amortecimento de oscilações eletromecânicas em um gerador síncrono de 10 KVA*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica. Instituto de Tecnologia, UFPa- Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

Nascimento, P. S. F. *Investigação de estratégias de controle digital para regulação de velocidade e emulação da dinâmica de turbinas hidráulicas com a implementação e testes experimentais em uma micromáquina de 10 KVA*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica. Instituto de Tecnologia, UFPa- Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

Nuttal, A. J. G. and Lodewijks, G. (2007). *Dynamics of Multiple Drive Belt Conveyor System*. WILEY-VHC Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ppsc-journal, pp. 365 – 369. doi: 10.1002/ppsc.200601118.

Ogata, K. *Discrete- Time Control System*. Prentice Hall, 1987.

Pertence, A. J., *Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos: Teoria, projetos, aplicações e laboratório*. McGraw Hill, 2012.

Prado, M. L. M. Controle Robusto por Alocação de Pólos via Análise Intervalar Modal. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Instituto de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Belém, 2006.

Prado, M. L. M. e Ferreira, P. A. V. Realimentação de Estados Robusta para Sistemas com Incertezas Estruturadas via Análise Intervalar. Congresso Brasileiro de Automática (CBA), 2004.

R. Isermann and P. Ballé. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical process. *Control Engineering Practice*, 5:707-719, 1997.

R. Isermann. Fault-Diagnosis System: Na Introduction from Faul Detection to Fault Tolerance. Editora Springer. Alemanha. 2006.

Trepat, A. Completacion reticular del espacio de intervalos. Tesina de Licenciatura, Facultad de Matemáticas, Universidad de Barcelona, 1982.

U. Keller, T. Wyatt and R. R. Leitch. Frensi- a fuzzy qualitative simulation method. *Workshop on Applications of Interval Analysis to System and Control with special emphasis on recente advances in Modal Interval Analysis (MISC 99)*. Girona, Catalonia, Spain, pages 305-313, 1999.

WEG-CFW09 - A user guide's , 2011.

Wiid, A. P., Sithole, F., Bagus, M. e Khosa, T. H. Constant speed versus variable speed operation for belt conveyor system. IMHC. 2009.

Zhang, S. and Tang, Y. (2011). Optimal Control of Operation Efficiency of Belt Conveyor. IEEE Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific.

Zhang, S. and Xia, X. (2009). A New Energy Calculation Model of Belt Conveyor. IEEE AFRICON 2009, Nairobi-Kenya.

Zhang, S. and Xia, X. (2011), Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors. ELSEVIER Applied Energy, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.03.015.

APÊNDICE - A

```

# Código utilizado no dsPIC 30F3014

/*-----*/
/*-----BIBLIOTECAS-----*/
/*-----*/

#include <p30f3014.h>
#include <uart.h>
#include <string.h>
#include <stdio.h>
#include <Timer.h>
#include <adc12.h>
#include <incap.h>
#include <outcompare.h>

/*-----*/
/*-----FUSES-----*/
/*-----*/

_FOSC(FRC_PLL16&CSW_FSCM_OFF);
_FWDT(WDT_OFF)
_FGS(CODE_PROT_OFF);
_FBORPOR(MCLR_DIS & PBOR_OFF & PWRT_OFF);

/*-----*/
/*-----DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS GLOBAIS-----*/
/*-----*/

#define KM_RD9                // Contactor do motor
#define KF_RD3                // Contactor do freio
#define KP_RF0                // Contactor do by-pass da pré-carga
// #define PWM_ON_RD0         // Saída do PWM

static unsigned int Parte_Motor = 0, Liga_Carga = 0, Desliga_Precarga = 0,
                    Aumenta_Carga = 0, Diminui_Carga = 0;
float Va = 0.0, Vb = 0.0, Vc = 0.0, Vf = 0.0;
float Ia = 0.0, Ib = 0.0, Ic = 0.0, If = 0.0;
unsigned int atraso = 0; // Rotina de atraso
float Ts = 0.01;      // Definição do periodo de amostragem
float Tpw = 0.0;     // Definição do percentual de ciclo ativo do PWM

/*-----*/
/*-----TRATAMENTO DAS INTERRUPÇÕES-----*/
/*-----*/

//-----
//                Interrupção do Timer 1

```

```

//-----
void __attribute__((__interrupt__)) _T1Interrupt(void)
{
    WriteTimer1(0);
//-----TRATAMENTO DOS DADOS RECEBIDOS-----

    if(Parte_Motor == 1) {KM =1;}
    else {KM = 0;}

    if(Liga_Carga == 1) {KF =1;}
    else {KF = 0;}

    if(Desliga_Precarga == 1) {KP =1;}
    else {KP = 0;}

    if(Aumenta_Carga == 1)
    {
        if(Tpwm < 1.0) {Tpwm = Tpwm + 0.1; Aumenta_Carga = 0;ciclo_ativo(Tpwm);}
        if(Tpwm == 1.0) {Tpwm = 1.0; Aumenta_Carga = 0;ciclo_ativo(Tpwm);}
    }

    if(Diminui_Carga == 1)
    {
        if(Tpwm < 1.1) {Tpwm = Tpwm - 0.1; Diminui_Carga = 0;ciclo_ativo(Tpwm);}
        if(Tpwm == 0.0) {Tpwm = 0; Diminui_Carga = 0;ciclo_ativo(Tpwm);}
    }

//-----LEITURA E TRANSMISSÃO DOS DADOS-----

    Va = FiltroAtivo((4.0/(4095.0))*ReadADC12(0));
    Vb = FiltroAtivo ((4.0/(4095.0))*ReadADC12(1));
    Vc = FiltroAtivo ((4.0/(4095.0))*ReadADC12(2));
    Vf = FiltroAtivo ((4.0/(4095.0))*ReadADC12(3));
    Ia = FiltroAtivo ((4.0/(4095.0))*ReadADC12(4));
    Ib = FiltroAtivo ((4.0/(4095.0))*ReadADC12(5));
    Ic = FiltroAtivo ((4.0/(4095.0))*ReadADC12(6));
    If = FiltroAtivo ((4.0/(4095.0))*ReadADC12(7));

    Transmite_UART2(Va,Vb,Vc,Vf,Ia,Ib,Ic,If);
    _T1IF = 0;          // Liberação do flag da interrupção do Timer1
} // Fim da interrupção do Timer1
//-----
//
//                               Interrupção da recepção UART2
//-----

void __attribute__((interrupt,no_auto_psv)) _U2RXInterrupt(void)
{
    static unsigned int i = 0;
    unsigned char RecebeDados[9] = "0",x = "0";

```



```
while (DataRdyUART2())
{
x = ReadUART2();

if(U2STAbits.OERR)U2STAbits.OERR = 0;
    {

switch(x)
    {

case '1':
    Parte_Motor = 1;
    break;

case '2':
    Parte_Motor = 0;
    break;

case '3':
    Liga_Carga = 1;
    break;

case '4':
    Liga_Carga = 0;
    break;

case '5':
    Desliga_Precarga = 1;
    break;

case '6':
    Desliga_Precarga = 0;
    break;

case 'a':
    Aumenta_Carga = 1;
    break;

case 'd':
    Diminui_Carga = 1;
    break;

default:

break;

}

}
```

```

        _U2RXIF = 0;                // Limpa o flag da interrupção da UART2
    }
} // Fim interrupção da UART2

/*-----*/
/*-----SUB-ROTINAS CONSTRUIDAS-----*/
/*-----*/
//-----
//          Ciclo Ativo
//-----

void ciclo_ativo(float Tpwm)
{
    SetDCOC1PWM(Tpwm*0x1770);

} // Fim do ciclo_ativo

//-----
//          Transmite os dados via UART
//-----

void Transmite_UART2(double S1, double S2,double S3, double S4,double S5, double S6,double S7, double S8)
{
    unsigned char Dado1[60];

    sprintf(Dado1,"% .4f % .4f % .4f % .4f % .4f % .4f % .4f % .4f \n",S1,S2,S3,S4,S5,S6,S7,S8);
    putsUART2(((unsigned int*)Dado1));
    while(BusyUART2());

}

//-----
//          Filtro Ativo digital
//-----

float FiltroAtivo(float Ia)
{
    static float hc[2] = {0.0, 0.0}, gc[2] = {0.0, 0.0};
    float Xc = 0.0, Yc = 0.0;

    #define bc0 0.09021
    #define bc1 0.1804
    #define bc2 0.09021
    #define ac1 -0.9895
    #define ac2 0.3503

    Xc = Ia;
    Yc = bc0*Xc + hc[1];

```

```

    hc[0] = bc1*Xc - ac1*Yc + gc[1];
    gc[0] = bc2*Xc - ac2*Yc;

    hc[1] = hc[0];
    gc[1] = gc[0];

    return Yc;
} // Fim FiltroAtivo

/*-----*/
/*-----CONFIGURAÇÃO DOS PERIFÉRICOS-----*/
/*-----*/

//-----
//      Configurações do ADC12
//-----

void inicia_ADC12()
{
    unsigned int ConfigPort;
    unsigned int Scanselct;
    unsigned int Config1;
    unsigned int Config2;
    unsigned int Config3;

    CloseADC12(); // fecha o ADC12

    ConfigIntADC12(ADC_INT_DISABLE&
                  ADC_INT_PRI_6);

    SetChanADC12( ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN0&
                  ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN1&
                  ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN2&
                  ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN3&
                  ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN4&
                  ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN5&
                  ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN9&
                  ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN10&
                  ADC_CH0_NEG_SAMPLEA_NVREF);

    Config1 = ADC_MODULE_ON&
              ADC_IDLE_CONTINUE&
              ADC_FORMAT_INTG &
              ADC_CLK_AUTO&
              ADC_AUTO_SAMPLING_ON&
              ADC_SAMP_ON;

    Config2 = ADC_VREF_AVDD_AVSS&

```

```

        ADC_SCAN_ON&
        ADC_ALT_BUF_OFF&
        ADC_ALT_INPUT_OFF&
        ADC_SAMPLES_PER_INT_8;

Config3 =      ADC_SAMPLE_TIME_30&//13&
               ADC_CONV_CLK_SYSTEM&
               ADC_CONV_CLK_20Tcy;//10Tcy;

ConfigPort =   ENABLE_AN0_ANA&
               ENABLE_AN1_ANA&
               ENABLE_AN2_ANA&
               ENABLE_AN3_ANA&
               ENABLE_AN4_ANA&
               ENABLE_AN5_ANA&
               ENABLE_AN9_ANA&
               ENABLE_AN10_ANA;

Scanselct     =      SCAN_NONE | ~SKIP_SCAN_AN0 | ~SKIP_SCAN_AN1|
                   ~SKIP_SCAN_AN2| ~SKIP_SCAN_AN3 | ~SKIP_SCAN_AN4|
                   ~SKIP_SCAN_AN5| ~SKIP_SCAN_AN9 | ~SKIP_SCAN_AN10;

OpenADC12(Config1, Config2,Config3,ConfigPort, Scanselct);           // Inicia ADC12

} // Fim do inicia_ADC12

//-----
//          Configurações da UART
//-----

void inicia_UART2()
{
    unsigned int ubrg;
    unsigned int config1;
    unsigned int config2;

    CloseUART2();           //Desabilita a UART 2

    ubrg = 195;             // Taxa de transmissão = 9600bps
                          // ubrg = ([4*7.5M]/[16*9600])-1 =~ 195

    ConfigIntUART2(UART_RX_INT_EN &           // Habilita a interrupção de recepção da UART.
                  UART_RX_INT_PRI &
                  UART_TX_INT_DIS &
                  UART_TX_INT_PRI4);

    config1 =      UART_EN &                 // Habilita a UART2.
                  UART_IDLE_CON &          // UART2 funciona no modo IDLE.

```

```

        UART_DIS_WAKE &           // Desabilita o modo de espera.
        UART_DIS_LOOPBACK & // Desabilita o modo loop back.
        UART_DIS_ABAUD &         // Desabilita o modo auto baud.
        UART_NO_PAR_8BIT &       // Define o dado com 8 bit e sem paridade.
        UART_1STOPBIT;           // Define o stop bit como 1.

    config2 =        UART_INT_TX_BUF_EMPTY & // Interrupção TX habilita quando o buffer tiver vazio.
                    UART_TX_PIN_NORMAL &    // Define o pino TX break como normal.
                    UART_TX_ENABLE &        // Habilita a transmissão da UART.
                    UART_INT_RX_CHAR &     // Define a interrupção RX quando o buffer tiver 1.
                    UART_ADR_DETECT_DIS &  // Desabilita o modo de adress detect.
                    UART_RX_OVERRUN_CLEAR;  // Limpa o flag de over run.

    OpenUART2(config1, config2, ubrg); // Configura UART2.
    while(BusyUART2());                // Aguarda até desocupar a UART.
}
//Fim do inicia_UART2

//-----
//                Configurações do Timer 1
//-----

void inicia_TIMER1(float T)
{
    unsigned int T1COM_Register, PR1_Register;

    CloseTimer1();           // Fecha o Timer1
    WriteTimer1(0);         // Zera a contagem do Timer1

    ConfigIntTimer1(T1_INT_PRIOR_5 &
                    T1_INT_ON);

    T1COM_Register = T1_ON & // Habilita o Timer1
                    T1_GATE_OFF & // Desabilita o gate pin para o Timer1
                    T1_IDLE_CON &
                    T1_PS_1_256 & // Define prescale 1:64
                    T1_SOURCE_INT & // Sinal de clock interno para o Tcy
                    T1_SYNC_EXT_OFF; // Desabilita a sincronização externa

    PR1_Register = (unsigned int) (T*30e6)/(256);
    OpenTimer1(T1COM_Register, PR1_Register);
} // Fim do inicia_TIMER1

//-----
//                Configurações do PWM
//-----

void inicia_PWM(float Tp)
{
    T2CON= 0b1000000000000000;
    TMR2 = 0;

```

```

PR2= 0x1770; // PR2 =(Fcy/4*Fpwm)-1; Fcy = 16*7.5 MHz | Fpwm = 5 KHz;
OC1CON = 0b0000000000000110;
OC1RS  = Tp*0x1770;//((4.0*7.5e3)/5)-1; //0x0010;

} // Fim do inicia_PWM

/*-----*/
/*-----ROTINA PRINCIPAL-----*/
/*-----*/

int main(void)
{
    ADPCFG = 0x0000;    // Todos os pinos da porta B são analógicos
    TRISB  = 0xFFFF;   // Todos os pinos da porta B são entradas
    TRISD  = 0x0000;   // Todos os pinos da porta D são saídas
    TRISF  = 0x0000;   // Todos os pinos da porta F são saídas
    inicia_TIMER1(Ts);
    inicia_PWM(0.0);    // Frequencia de chaveamento do PWM 5 KHz
    inicia_UART2();
    inicia_ADC12();

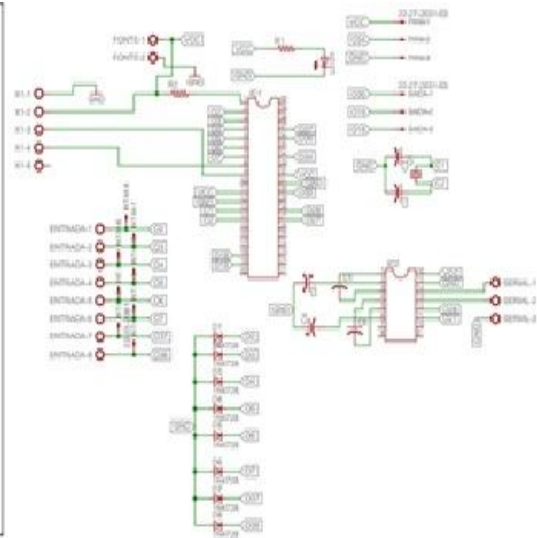
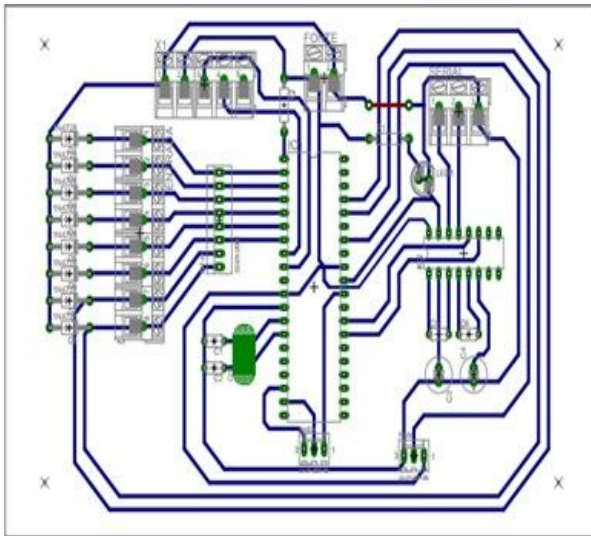
while(1);                // Loop infinito
}                          // Fecha Main

```

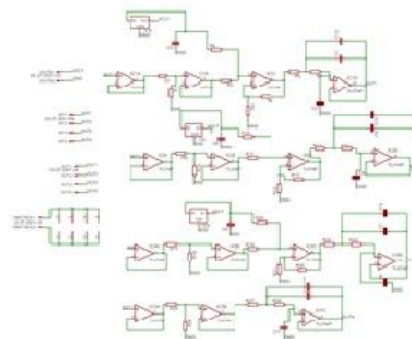
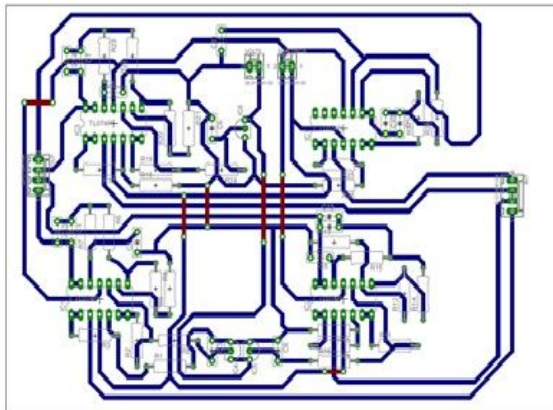
APÊNDICE - B

Placas Utilizadas para a constituição do protótipo

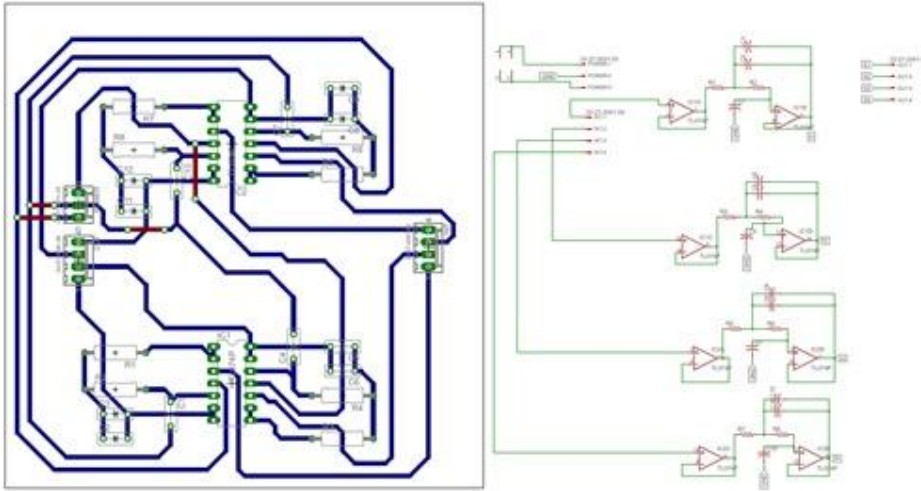
Placa do dsPIC



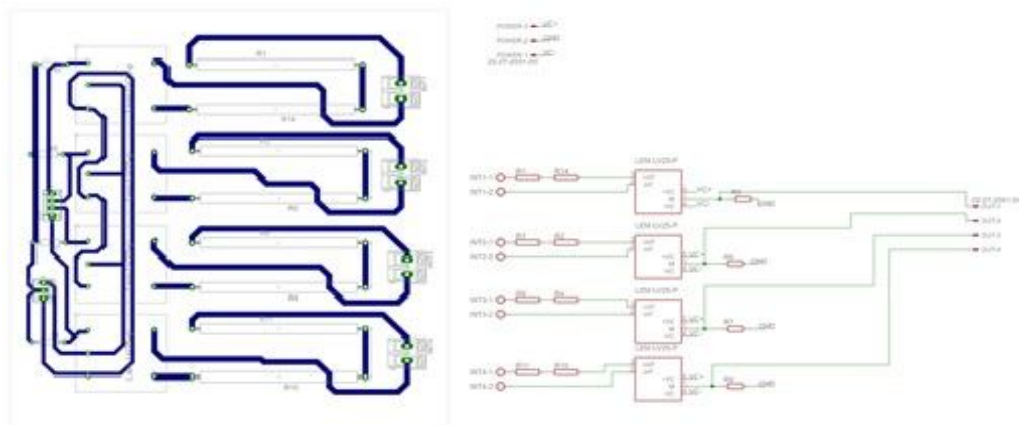
Placa de Condicionamento e filtro de tensão



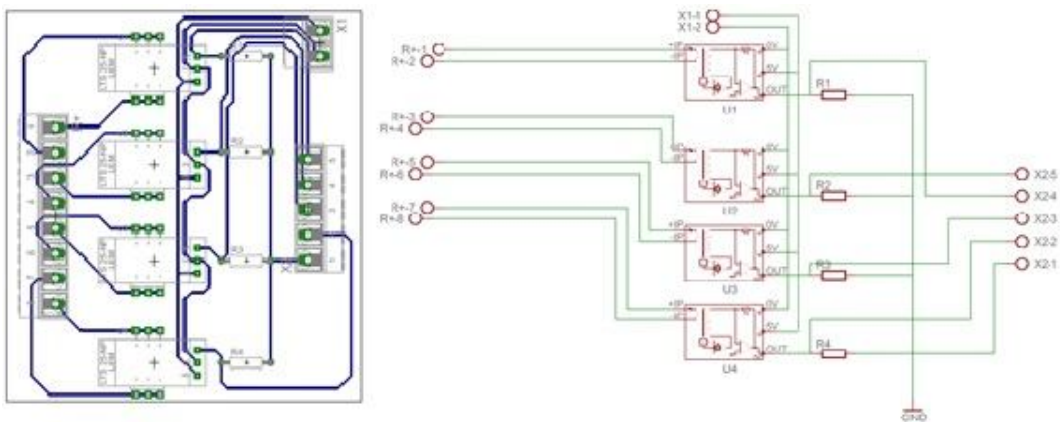
Placa de Condicionamento e filtro de Corrente



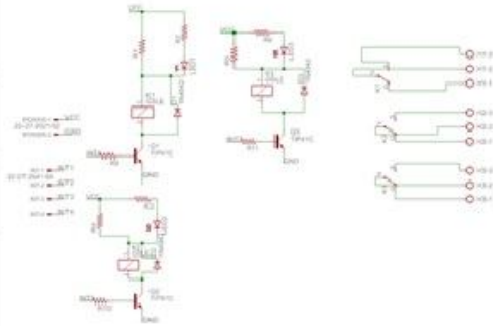
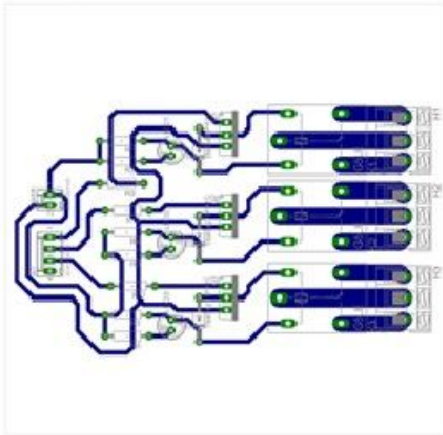
Placa de sensoriamento de Tensão



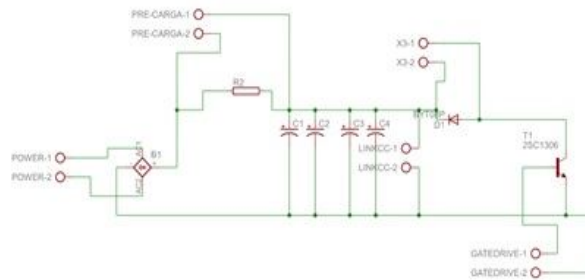
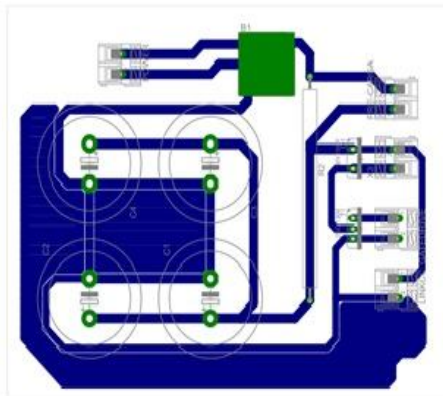
Placa de sensoriamento de Corrente



Placa de relés



Placa do link DC



Placa de Gate-Driver

