

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA
E DOS MATERIAIS - PPGEMM

"SISTEMA ELETRO-ELETRÔNICO PARA MEDIÇÃO DIRETA
DE TORQUE EM DISPOSITIVOS GIRANTES UTILIZANDO
EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA"

por

RENATO MACHADO DE BRITO

Mestre em Ciências

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM.

Porto Alegre

1994

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

**"SISTEMA ELETRO-ELETRÔNICO PARA MEDIÇÃO DIRETA
DE TORQUE EM DISPOSITIVOS GIRANTES UTILIZANDO
EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA"**

T E S E

Apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de:

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Ciência dos Materiais

Por

Renato Machado de Brito, Mestre em Ciências

1 9 9 4

II

Esta TESE foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, Área de Concentração de Ciência dos Materiais e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Ildon Guilherme Borchardt
Doutor em Ciências, ITA
UFRGS/PPGEMM

Banca Examinadora:

- Dr. João Luiz Kovaleski - CEFET - PR.
- Dr. Volnei Andersson - FURG - RS
- Dr. Adriano Virgílio Damiani Bicca - DECIV - UFRGS
- Dr. Ildon Guilherme Borchardt - PPGEMM - UFRGS
- Dr. Altamiro Amadeu Suzim - DELET - UFRGS

Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio
Coordenador do PPGEMM

DEDICATÓRIA

Aos meus filhos Daniel e Renata, a minha esposa Maria Bernadete e em memória de meus pais, Aloísio e Nelly que sempre quiseram ter um filho Doutor.

AGRADECIMENTOS

Agradecer a todas as pessoas e instituições que contribuíram para este trabalho não é tarefa fácil. Por ter iniciado esta empreitada, um pouco fora de época, já meio adiantado na idade, creio que mereci mais atenção, respeito e carinho de todos os que me rodeiam aqui na Escola de Engenharia. Foram tantos os que me ajudaram, acolheram, incentivaram e ampararam que corro o risco de esquecer alguém. Mas, por dever de ofício, por tradição e por expesso reconhecimento, atrevo-me a tentar:

- Professor Dr. Ildon Guilherme Borchardt, sem a sua orientação nada teria sido possível. Não esquecerei as muitas conversas que tivemos a cerca deste trabalho, sobre o ensino e a pesquisa, sobre a universidade e sobre nós mesmos. Muitíssimo obrigado.

- Professor Dr. Arno Müller, professor, pesquisador e dirigente, de entidades, de projetos e de pessoas, foi muito importante sentir-me amparado por sua experiência, tranquilidade e sabedoria. Saiba que sua contribuição foi decisiva para que eu pudesse enfrentar este desafio, obrigado.

- Professor Dr. Jarbas Milititsky, tutor nomeado pela direção da Escola de Engenharia para acompanhar minhas atividades como aluno de doutorado. Agradeço-lhe, primeiramente por aceitar a espinhosa missão que lhe foi outorgada, porém mais ainda pela confiança que sempre em mim depositou. Esta foi mais um fator que contribuiu para que eu pudesse chegar até aqui.

- Professor MSc. Eng^o. José Serafim Gomes Franco, grande líder da Escola de Engenharia que como companheiro e amigo sempre me incentivou a iniciar e concluir este trabalho, inestimável foi seu apoio, muito obrigado.

- MSc. Eng^o. José Rogério Araújo, companheiro de todas as horas que sempre procurou fazer tudo que estivesse ao seu alcance para que este trabalho se tornasse realidade. Deu-me inúmeras sugestões, emprestou-me sua experiência, dispensou-me sua atenção e, não satisfeito com isto, digitou e diagramou todas as páginas

deste trabalho, dando forma ao conteúdo que desenvolvi. Qualquer coisa que eu aqui escrever será sempre pouco para expressar o meu agradecimento.

- Dr.Eng^o. Carlos Roberto Cauduro, primeiro dos doutores na área de Instrumentação do PPGEMM, grande colega, profissional competente que muito contribuiu para que este trabalho se viabilizasse. Especialista em extensometria e transdutores extensométricos, foi meu conselheiro e consultor em diversas tarefas que tive de executar. Sem o teu auxílio Cauduro, teria sido impossível terminar este trabalho, muito obrigado.

- MSc.Eng^o. João Carlos Pinheiro Beck, meu colega no curso de doutorado, sempre pronto a colaborar comigo para o bom andamento deste trabalho. Deu grande contribuição em relação ao projeto mecânico da bancada de ensaios de torquímetros girantes. Acompanhou a execução e a montagem da mesma no Inmetal. E, entre suas múltiplas atividades, ainda conseguia tempo para dedicar aos meus problemas. Beck, do fundo do coração, agradeço toda a tua atenção e ajuda.

- MSc. Eng^o. Ricardo Lastra Olsen, bolsista RHAÉ do Inmetal, desenvolveu inúmeros programas de computador para operar no sistema de aquisição de dados da bancada de ensaios. Colaborou na análise de sinais que obtive nos ensaios da instrumentação, juntos fizemos tantas atividades que difícil seria enumerá-las. Ricardo, muito obrigado pela tua ajuda.

- Aos bolsistas de Iniciação científica do Inmetal que deram o máximo de sua dedicação, para o andamento de todos os trabalhos de apoio ao desenvolvimento desta tese. Em especial agradeço ao acadêmico Rodrigo Lacerda que dedicou boa parte de suas horas de estudo e lazer para montar e depurar diversos circuitos eletrônicos por mim projetados. Obrigado ainda é pouco Rodrigo, tua dedicação e competência foi uma perfeita amostra do que pode fazer um bolsista de Iniciação Científica.

- Aos funcionários da Escola de Engenharia, em especial ao pessoal da secretaria do DELET, Loracy, Miriam e estagiárias Helena, Neusa e Michele que não mediram esforços para me auxiliar a concluir este trabalho de tese. Sem a verdadeira proteção que me deram teria sido impossível chegar até aqui, principalmente

depois que fui eleito Chefe do Departamento. Muitíssimo obrigado por tudo, vocês são pessoas maravilhosas.

- A todos os meus colegas professores da Escola de Engenharia, da CPPD, alunos de mestrado, alunos de graduação, ex-alunos e ex-funcionários que acompanharam este meu esforço, agradeço pela solidariedade, apoio e incentivo, material e espiritual em todas as horas. Este trabalho pertence também a vocês, muito obrigado.

- Às instituições de fomento e apoio à pesquisa deste meu país: FINEP, CNPq, CAPES e FAPERGS que suportaram os encargos financeiros de todos os bolsistas que comigo colaboraram, além de custear despesas com equipamento e serviços necessários ao desenvolvimento deste trabalho de pesquisa que juntos conduzimos.

- À UFRGS que me permitiu, como aluno de graduação, professor, pesquisador e como aluno de pós-graduação realizar-me na carreira docente. Tudo o que tenho e sou devo a esta universidade, a ela também ofereço este trabalho de conclusão como preito de reconhecimento e gratidão.

- Ao PPGEMM que me aceitou como aluno de doutorado e que me permitiu aprofundar meus estudos, proporcionando sempre um ambiente adequado ao desenvolvimento de meu trabalho, agradeço profundamente. Espero, como professor da Escola de Engenharia, ainda poder retribuir um pouco do que me foi dado durante estes quase cinco anos de convivência. Ao corpo de professores e aos dedicados funcionários, os meus sinceros agradecimentos.

S U M Á R I O

LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XVII
RESUMO	XIX
ABSTRACT	XX
1- CAPÍTULO 1: MEDIÇÃO DIRETA DE TORQUE	1
1.1- INTRODUÇÃO	1
1.2- MEDIÇÃO DIRETA DE TORQUE	2
1.3 - OBJETIVOS PROPOSTOS	3
1.4- JUSTIFICATIVAS DA PROPOSTA	6
2- CAPÍTULO 2: SISTEMAS EXISTENTES PARA MEDIÇÃO DE TORQUE EM DISPOSITIVOS GIRANTES	13
2.1- HISTÓRICO	13
2.2- CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE TORQUE EM DISPOSITIVOS GIRANTES	15
2.2.1- Sistemas de Absorção	15
2.2.2- Sistemas de Reação	15
2.2.3- Sistemas de Transmissão	17
2.3- TORQUÍMETROS ROTATIVOS QUE UTILIZAM EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA	18
2.3.1- Transdutor de torque, sua Função de Transferência e Sensibilidade	21
2.3.2- Condicionadores de sinais para torquímetros rotativos com extensômetros de resistência elétrica	30
2.4- SISTEMA BLM DA HBM	33
2.4.1- Módulos constituintes	33
2.4.2- Utilização e calibração	37
2.5- ENSAIOS REALIZADOS COM O SISTEMA BLM PARA MEDIDA DIRETA DE TORQUE	40

2.5.1-	Bancada Computadorizada Para Ensaio De Torquímetros Girantes	41
2.5.2-	Calibração estática	45
2.5.3-	Ensaio dinâmico	46
2.6-	LIMITAÇÕES ENCONTRADAS	47
3-	CAPÍTULO 3: O SISTEMA ELETRO-ELETRÔNICO PROPOSTO PARA MEDIÇÃO DIRETA DE TORQUE	52
3.1-	CARACTERÍSTICAS DE PROJETO	52
3.2-	DESCRIÇÃO DOS CIRCUITOS ELETRÔNICOS DESENVOLVIDOS	58
3.2.1-	Oscilador e Amplificador de Potência	58
3.2.2-	Amplificador de Desbalanço	62
3.2.3-	Demodulador Síncrono	64
3.2.4-	Conversor e Transmissor de Sinal	66
3.2.5-	Fonte de Alimentação	66
3.2.6-	Transformador Rotativo Para Transferência de Energia	68
4-	CAPÍTULO 4: UTILIZAÇÃO DO SISTEMA NA MEDIDA DIRETA DE TORQUE NO EIXO DE UM MOTOR ELÉTRICO	72
4.1-	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	72
4.2-	COLAGEM DOS EXTENSÔMETROS	73
4.3-	INSTALAÇÃO DOS CIRCUITOS ELETRO-ELETRÔNICOS	74
4.4-	CALIBRAÇÃO ESTÁTICA	75
4.5-	ENSAIO DINÂMICO	76
4.6-	COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS DE ENSAIOS REALIZADOS COM O SISTEMA BLM	79
5-	CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	83
5.1-	CONSIDERAÇÕES SOBRE O DESEMPENHO DO SISTEMA PROPOSTO	83
5.2-	APLICABILIDADE EM TESTES DE CAMPO	84
5.3-	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO	85
5.4-	CONCLUSÕES, SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES	86
	APÊNDICE A- INSTRUMENTAÇÃO	88

A.1-	INTRODUÇÃO	88
A.2-	CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS INSTRUMENTADOS	89
A.2.1-	Monitoração de processos	90
A.2.2-	Controle de Processos	90
A.2.3-	Análise Experimental	91
A.3-	GENERALIDADES SOBRE TRANSDUTOR, CONDICIONADOR, REGISTRADOR, FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA, SENSIBILIDADE E RESOLUÇÃO	93
A.4-	MÉTODOS PARA MELHORAR O DESEMPENHO DE UM CANAL DE MEDIÇÃO	99
A.4.1-	Método da insensibilidade inerente	100
A.4.2-	Método da realimentação negativa	100
A.4.3-	Método da correção do valor medido	101
A.4.4.-	Método da filtragem do sinal medido	101
A.4.5-	Método da codificação do sinal medido	102
A.4.6-	Método diferencial	103
APÊNDICE B: ACOPLAMENTOS PARA TRANSFERÊNCIA DE		
	ENERGIA E SINAL	104
B.1-	INTRODUÇÃO	104
B.2-	ACOPLAMENTO COM ANÉIS E ESCOVAS	105
B.2.1-	Características, ligação e modelo para análise	105
B.2.2-	Condicionadores de sinais para uso em acoplamento do tipo anel-escova	107
B.2.3-	Limitações do uso do acoplamento por anéis e escovas para medida direta de torque em sistemas girantes	115
B.3-	ACOPLAMENTO COM TRANSFORMADORES ROTATIVOS	116
APÊNDICE C: MODELAMENTO E PROJETO DE		
	TRANSFORMADORES ROTATIVOS	120
C.1-	MODELAMENTO DOS TRANSFORMADORES ROTATIVOS	120
C.1.1-	Transformadores sem núcleo magnético	120
C.1.2-	Transformadores com núcleo magnético	123
C.2-	CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO DE TRANSFORMADORES ROTATIVOS	129

C.2.1- Exemplo de um projeto de transformador rotativo sem núcleo magnético	131
C.2.2- Resultados experimentais	138
C.3- CONCLUSÕES	138
BIBLIOGRAFIA	140

L I S T A D E F I G U R A S

Figura 1.1-	Diagrama em blocos de sistema para medição direta de torque.	4
Figura 2.1-	Freio de Prony.	13
Figura 2.2-	Representação esquemática do freio a água. . .	14
Figura 2.3-	Arranjo mecânico esquemático para medida de torque com torquímetros girantes. (a)- Sistema original. (b)- Sistema com o torquímetro instalado.	16
Figura 2.4-	Esquema típico de um freio de fricção utilizado para medição de torque	16
Figura 2.5-	Esboço de uma mesa de torque ("torque table")	17
Figura 2.6-	Medição de torque por reação da carcaça. . . .	18
Figura 2.7-	Esboço de um torquímetro girante com extensômetros de resistência elétrica. . . .	19
Figura 2.8-	Diagrama em blocos de um torquímetro girante com extensômetros de resistência elétrica. . .	20
Figura 2.9-	Transdutor composto: A- converte torque em deform. B- Converte deform. em variação de resist. elétr. C- Converte variação de resist. elétr. em variação de tensão.	21
Figura 2.10-	Torquímetro de anéis e escovas- A,B- sinal de excitação(I); C,D- sinal de desbalanço da ponte (Δe_0); E- extensômetros; F- anéis e G- escovas.	31
Figura 2.11-	Torquímetro com acoplamento magnético e capacitivo.	32
Figura 2.12-	Esquema de ligação dos módulos do sistema BLM com baterias e acoplamento capacitivo para transmissão do sinal de desbalanço modulado em frequência.	34
Figura 2.13-	Ligação dos módulos BLM com transformador rotativo para transferência de energia e acoplamento capacitivo para transmissão do sinal de desbalanço modulado em frequência.	35

Figura 2.14-	Montagem do sistema BLM acoplado a um eixo rotativo com o receptor estacionário.	36
Figura 2.15-	Transferência de energia para alimentar os circuitos instalados nas partes girantes através do transmissor rotativo DU 2802.	37
Figura 2.16-	Transferência de sinal com acoplamento magnético via transformador rotativo	38
Fotografia nº 1-	Arranjo para aplicação estática de torque em eixos.	40
Figura 2.17-	Diagrama em blocos da bancada computadorizada para ensaio de torquímetros girantes.	42
Figura 2.18-	Vista superior da bancada para ensaio de torquímetros.	43
Figura 2.19-	Calibração estática da bancada através do T30FN/HBM. Analiticamente: τ (Nm) \approx 10 V_0 (Volts)	44
Figura 2.20-	Ensaio dinâmico do T30FN no eixo da bancada de ensaios.	45
Fotografia nº 2-	Vista da instrumentação BLM/HBM montada num eixo de 30mm na bancada.	46
Figura 2.21-	Ensaio estático do sistema BLM na medida direta de torque num eixo de 30 mm na bancada de ensaios.	47
Figura 2.22-	Ensaio dinâmico do sistema BLM/HBM no eixo de 30 mm da bancada de ensaios.	48
Figura 3.1-	Diagrama em Blocos do sistema de medição proposto	53
Figura 3.2 -	Diagrama em Blocos do Pré-Condicionador	59
Fotografia nº 3-	Pré-condicionador instalado em placa de "teflon" acoplado a polia junto ao eixo de um motor.	60
Figura 3.3-	Circuito do oscilador e do amplificador de potência.	61
Figura 3.4-	Circuito do amplificador de desbalanço.	63
Figura 3.5-	Circuito do demodulador síncrono.	65
Figura 3.6-	Circuito do conversor tensão-freqüência e transmissor de sinal.	67
Figura 3.7-	Circuito da fonte de alimentação.	70

Fotografia nº 4- Transformador rotativo com forma bipartida e cabos planos.	71
Fotografia nº 5- Transformador rotativo completo.	71
Figura 4.1- Família de curvas $\epsilon = f(\tau, D)$ para eixos de aço ($E = 21.000 \text{ kgf/mm}^2$) com seção circular de diâmetro D . $\Delta\epsilon =$ faixa de utilização do sistema proposto.	73
Fotografia nº 6- Vista do eixo do motor com os extensômetros colados.	74
Fotografia nº 7- Instrumentação proposta instalada no eixo do motor.	76
Figura 4.2- Calibração estática no eixo do motor com a instrumentação proposta nesta tese.	77
Fotografia nº 8- Vista do procedimento de calibração do eixo do motor.	78
Figura 4.3- Sinal elétrico proporcional a variação de torque no eixo com o motor girando a uma velocidade de 1200 rpm.	78
Figura 4.4- Sinal elétrico proporcional a variação de torque no eixo do motor e o sinal elétrico proporcional a variação de torque medido pelo T30FN no eixo da bancada.	79
Figura 4.5- Comparação entre o sinal do T30FN com o sinal de torque no eixo do motor integrado (filtro passa-baixas).	80
Figura 4.6- Calibração estática do eixo do motor com o sistema BLM/HBM.	80
Figura 4.7- Ensaio do sistema BLM/HBM com o motor girando a 1.200 rpm.	81
Fotografia nº 9- Sistema BLM/HBM instalado no eixo do motor que aciona a bancada.	81
Figura A.1- Sistema de aquisição de dados	90
Figura A.2- Sistema instrumentado para controle de processo	91
figura A.3- Sistema para análise experimental	92
figura A.4- Instrumentação, sistema completo	94
Figura A.5- Diagrama em blocos de um canal de medição	96

Figura B.1-	Conjunto de anéis e escovas comercializados pela HBM. A- produzido em dimensões diversas. B- Para utilização em pontas de eixos com 6 ou 12 anéis/escovas.	106
Figura B.2-	Esquema elétrico do circuito de acoplamento de uma ponte de extensômetros girantes através de um conjunto de anéis e escovas.	106
Figura B.3-	$R1 = R2 = R3 = R4 = R$; AI = amplificador de instrumentação; V_t = tensões térmicas no par anel-escova; Ad = ganho diferencial do AI; Acm = ganho de modo comum do AI.	107
Figura B.4-	Circuito equivalente de uma ponte de extensômetros ligada a um condicionador que utiliza excitação com fonte de corrente (I).	110
Figura B.5-	Circuito tipo fonte de corrente para excitar ponte de extensômetros com acoplamento através de anéis e escovas. $R1 = R2 = R3 = R4 = R$	112
Figura B.6-	Utilização de um sistema de anéis e escovas aplicado a medida de torque em um dispositivo girante com polias ou engrenagens instaladas em pontas de eixo.	116
Figura B.7-	Desenho de um transformador rotativo montado em um eixo. Vista em corte.	117
Figura B.8-	Diagrama de ligação dos transformadores rotativos para uso com ponte de extensômetros em torquímetros girantes.	118
Figura B.9-	Transformador rotativo para transmissão de sinais elétricos entre partes girantes e estacionárias.	119
Figura C.1-	Circuito equivalente para análise dos transformadores rotativos sem material magnético no núcleo.	120
Figura C.2-	Circ. equiv. do transf. rot. no domínio freq. $\omega = 2\pi f$ onde f é a frequência utilizada. V_1, I_1, V_2 e I_2 são fasores tensão e corrente respect.	121
Figura C.3-	Circuito para ensaio do transformador rotativo a circuito aberto.	122

Figura C.4-	Circuito para ensaio com carga.	123
Figura C.5-	Circ. equiv. para transf. rotativos com núcleo magnético com excitação e carga. A representação vale para excitações senoidais segundo o método fasorial.	124
Figura C.6-	Diagrama fasorial das tensões do modelo de transformador rotativo com núcleo magnético. .	125
Figura C.7-	Diagrama fasorial das tensões no secundário do transformador num ensaio com a carga RL. . . .	128
Figura C.8-	Geometria do transformador rotativo a ser projetado. Dimensões em milímetros.	132
Figura C.9-	Diagramas fasoriais das tensões do primário e secundário do transformador considerando-se $R_1 = 0$ e $R_2 = 0$ no modelo da figura C.2.	133

L I S T A D E S Í M B O L O S

F-	Força
m-	Massa
a-	Aceleração
τ -	Torque
M_i -	Momento de inércia
a_α -	Aceleração angular
P-	Potência
W-	Velocidade angular
k-	Sensibilidade dos extensômetros
k_j -	Sensibilidade do extensômetro j
k'_j -	Coefficiente de acoplamento da cola utilizada no extensômetro j
B_n -	Fator de ponte (n = 1, 2)
S_0 -	Sensibilidade inicial
δ -	Coefficiente de alinearidade elétrica
R-	Resistência elétrica
R_x -	Resistência elétrica do elemento x
R_m -	Perdas no material magnético
R_L -	Resistência de carga
R_{xy} -	Resistência elétrica entre os pontos x e y
Δ -	Variação de uma grandeza genérica
V-	Tensão elétrica
V_{xy} -	Tensão elétrica entre os pontos x e y
V_{Rxy} -	Tensão elétrica sobre o resistor xy
e_0 -	Sinal elétrico de tensão
I-	Corrente elétrica
I_x -	Corrente elétrica no ramo x
G-	Grandeza física qualquer
G_N -	Valor nominal da grandeza física
G_e -	Grandeza medida, estímulo de entrada
$G_{e_{m\acute{a}x}}$ -	Estímulo máximo
$G_{e_{m\acute{i}n}}$ -	Estímulo mínimo
δG_e -	Variação do estímulo, variação do sinal de entrada
ϵ_j -	Deformação relativa no ponto j

ϵ_0 -	Sensibilidade intrínseca
σ_e -	Tensão limite de escoamento
E-	Módulo de Young
ν -	Coefficiente de Poisson
S_g -	Coefficiente de segurança
S_x -	Função de transferência do bloco X (A, B, C)
S_T -	Sensibilidade de um canal de medição
n_j -	Coefficiente geométrico posicional
D-	Diâmetro do eixo
θ -	Ângulo de alinhamento
A_p -	Ganho de tensão do pré-condicionador
f_0 -	Freqüência central do conversor tensão/freqüência
KM-	Fator de conversão tensão/freqüência
KM'-	Fator de conversão freqüência/tensão
FM-	Sinal elétrico modulado em freqüência
A_D -	Ganho diferencial
A_{cm} -	Ganho diferencial do modo comum
AI-	Amplificador de Instrumentação
M-	Indutância mútua
L-	Indutância
L_x -	Indutância do elemento x
ω -	Freqüência em rad/s
X-	Reatância
X_S -	Sinal de saída
δX_S -	Variação do sinal de saída
X_{Lm} -	Reatância de magnetização
X_{LDx} -	Reatância do enrolamento x
μ_0 -	Permeabilidade magnética do ar
N-	Número de espiras
N_x -	Número de espiras do enrolamento x
l-	Comprimento da bobina
r-	Raio da bobina
A-	Área da secção
ln-	Logaritmo neperiano
C_x -	Comprimento do fio utilizado no enrolamento x
ρ_x -	Resistividade por metro do condutor
$F_{x,xy}$ -	Função matemática

R E S U M O

Neste trabalho propõe-se um sistema para medição de torque em dispositivos girantes, que utiliza extensômetros de resistência elétrica colados nos próprios elementos constituintes do arranjo mecânico sob análise. Um conjunto de circuitos eletrônicos foi especialmente desenvolvido para o sensoreamento das pequenas deformações que ocorrem nos dispositivos girantes. O sistema opera sem contato eletro-mecânico entre a parte estacionária e a parte girante. Para tanto desenvolveu-se também uma metodologia de projeto e construção de transformadores rotativos que são utilizados para transferência da energia que alimenta os circuitos eletrônicos solidários ao elemento mecânico instrumentado. Também foi necessário utilizar um transmissor em frequência modulada do sinal elétrico proporcional ao torque medido. Uma análise comparativa, dos resultados obtidos entre os sistemas existentes e aqueles alcançados com a técnica proposta neste trabalho, demonstra sua aplicabilidade em diversas situações práticas.

A B S T R A C T

A torque measurement system for rotating devices is proposed in this work through the use of bonded strain gages directly applied on the mechanical elements which belong to the device under analysis. Electronic circuits, specially developed to detect low strain signals on the rotating elements, are presented. Eletro-mechanical contact between rotating and stationary parts is not necessary. To do this a methodology to design and build rotating transformers, used for energy transfer to feed the electronic circuits attached to the rotating parts, is developed as well as a frequency modulated system to transmit the electrical signal which is proporcional to measured torque. A comparative analysis between existing systems and the proposed technique presented in this work demonstrates its applicability to several practical cases.

1- CAPÍTULO 1: MEDIÇÃO DIRETA DE TORQUE

1.1- INTRODUÇÃO

A grande maioria das grandezas físicas que refletem o comportamento de qualquer sistema termodinâmico (Processo Industrial, Experimento Científico, etc...) são passíveis de uma conversão para uma variável elétrica (tensão ou corrente), através de dispositivos transdutores específicos^[13,14,23]. A facilidade de tratamento matemático dos sinais elétricos, o seu registro gráfico, a sua indicação visual sob forma analógica ou digital, a sua transmissão à distância, ou ainda a sua aquisição por um sistema computadorizado, tem permitido que se desenvolvam sistemas de medição, cada vez mais sofisticados e precisos.

Não há exagero em afirmar-se que a eficiência de um processo industrial e a qualidade do produto dele obtido, dependem fundamentalmente de quão acuradas são as medidas que se podem efetuar e, quão freqüentemente são as mesmas realizadas. A utilização de adequada instrumentação para cada sistema de medição, além da eficiência e qualidade, garante também, na maioria das vezes, a segurança de todo o equipamento e do próprio pessoal envolvido no processo^[45].

Hoje, em função de toda uma gama de procedimentos e técnicas, instrumentação, medição e controle estão envolvidos em uma ciência integrada e multidisciplinar. Entretanto, apesar desta integração, as técnicas de medição e controle continuam a crescer em variedade e multiplicidade. Isto mostra que engenheiros e técnicos precisam adquirir habilidade para selecionar criteriosamente, de um largo contingente de equipamentos e técnicas, aquilo que é mais apropriado para resolver um problema específico. Esta especialização continuará agora com a inclusão de sistemas computadorizados que permitem automação, controle de processos e um sofisticado tratamento dos dados coletados.

O rápido crescimento do campo da instrumentação nas últimas décadas tem poucos paralelos na história. Os sofisticados

sistemas eletrônicos hoje em uso no mundo todo começaram a proliferar em meados dos anos 50, sendo, naquela época, considerados ainda de credibilidade marginal^[40].

A Instrumentação, tal como hoje é entendida, está a merecer uma organização didática que permita uma visão sistêmica. Para tal propõe-se como contribuição, no Apêndice A desta tese, uma revisão de conceitos inerentes a sistemas instrumentados, organizados de uma forma que parece mais coerente e útil a todos os que se interessam pelo tema.

1.2- MEDIÇÃO DIRETA DE TORQUE COM CIRCUITO ELETRO-ELETRÔNICO EMBARCADO

Sem sombra de dúvida, na área das grandezas mecânicas (força, pressão, torque, massa), a utilização dos extensômetros de resistência elétrica ("strain gages")^[6,44] vem propiciando um avanço considerável na medição destas variáveis, em diversas situações, tanto na indústria como em laboratórios de pesquisa.^[4, 24, 25 e 33]

O desenvolvimento de instrumentos dedicados, construídos a partir de dispositivos eletrônicos integrados (amplificadores, conversores tensão/frequência, moduladores e demoduladores), cada vez mais poderosos e miniaturizados, tem contribuído em muito para o aprimoramento dos circuitos de tratamento dos sinais elétricos, tornando a medição cada vez mais eficiente, mais imune a ruídos e com uma resolução nunca imaginada^[48].

Baseados nesta realidade é que se está apresentando uma forma de medição direta do torque em sistemas girantes, procurando estender ao limite o uso dos extensômetros de resistência elétrica nesta aplicação.

Por medição direta de torque, com extensômetros de resistência elétrica, entende-se aquela que se utiliza da deformação que surge nos elementos girantes constituintes dos sistemas mecânicos (eixos, polias, etc...), quando os mesmos forem submetidos a um esforço de torque. Assim sendo, é

necessário colar extensômetros diretamente nos elementos girantes já pertencentes ao sistema mecânico existente e, através de uma instrumentação eletro-eletrônica adequada, medir um sinal proporcional ao torque aplicado.

Este tipo de medição tem possibilidade de utilização nos mais diversos tipos de sistemas mecânicos, sem a necessidade de modificação ou inserção de um torquímetro. Aplica-se pois à medida de torque em dispositivos mecânicos que possuam eixos, polias, ou quaisquer outros elementos girantes que sofram alguma deformação elástica, quando por eles for transmitido um esforço de torque.

Como se verá a seguir, o desempenho deste sistema depende das características básicas da instrumentação eletro-eletrônica utilizada. Dentre estas destacam-se: resolução, imunidade ao ruído elétrico e praticidade de uso.

1.3 - OBJETIVOS PROPOSTOS

Nesta tese os objetivos propostos são:

a- Descrever e analisar os sistemas para medição de torque em dispositivos girantes que se utilizam de extensômetros de resistência elétrica, a instrumentação eletro-eletrônica utilizada para tal fim e a apreciação de sua aplicabilidade em um ambiente industrial.

b- Projetar e desenvolver uma sistema eletro-eletrônico (pré-condicionador girante) dedicado ao uso de extensômetros de resistência elétrica ligados em um circuito tipo ponte de Wheatstone, aplicados diretamente aos elementos girantes de dispositivos mecânicos industriais que permita a medição de sinais elétricos de desbalanço desde 0,05 mV/V, elevada imunidade ao ruído elétrico e praticidade de uso.

Para um melhor entendimento destes objetivos, apresenta-se na figura 1.1 um diagrama em blocos do sistema proposto para medição direta de torque, em dispositivos girantes, quando se utilizam extensômetros de resistência elétrica.

Os extensômetros de resistência elétrica são colados em um dispositivo mecânico girante (eixo, polia, engrenagem, etc...) que passa a ser o "elemento de mola". Este converte torque em deformação mecânica. Tal dispositivo girante é um elemento já integrante do sistema mecânico onde se deseja efetuar a medição de torque.

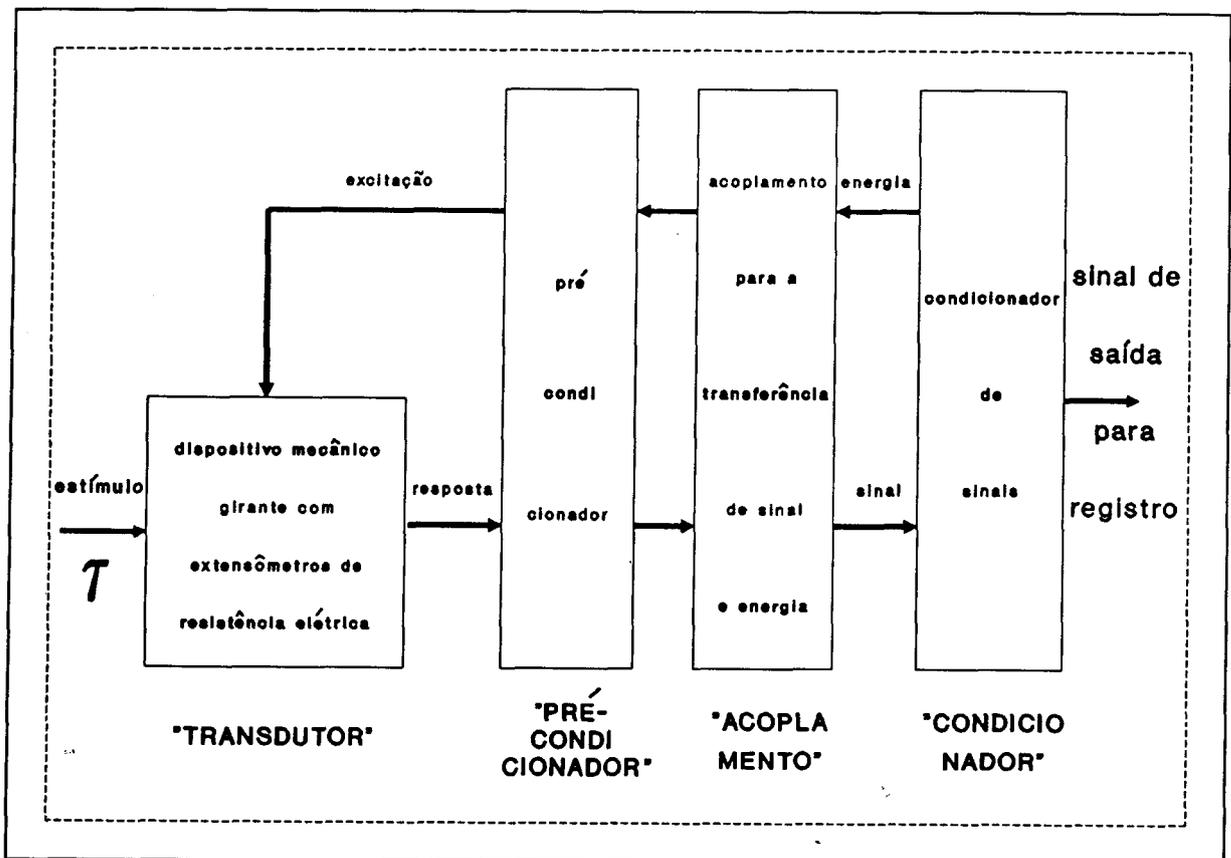


Figura 1.1- Diagrama em blocos de sistema para medição direta de torque.

Normalmente os extensômetros são arranjos num circuito tipo ponte de Wheatstone que, excitado por uma tensão ou corrente elétrica, produz como resposta um sinal elétrico, quantificado em mV/V, proporcional ao torque aplicado. Este conjunto, incluindo o dispositivo mecânico instrumentado, forma o bloco "transdutor" (com sensibilidade em mV/V/Nm).

O bloco denominado "Condicionador de Sinais" é o responsável pela geração da energia de excitação da ponte de extensômetros (Tensão ou Corrente, alternada ou contínua) e pela recepção do sinal elétrico emitido como resposta pelo

"transdutor".

Para transferir a energia de excitação ao transdutor e o sinal elétrico produzido como resposta ao condicionador, é necessário um sistema de "Acoplamento" elétrico ou magnético, devido à característica girante do dispositivo mecânico que suporta os extensômetros.

Num sistema convencional só existem estes três blocos (Transdutor, Acoplamento e Condicionador). No entanto, para que a medida direta de torque seja possível, é necessário que se instale no eixo girante um circuito eletrônico, aqui denominado de Pré-Condicionador. Este é o responsável pela estabilidade da excitação da ponte de extensômetros, bem como pela amplificação dos pequenos sinais de desbalanço disponíveis, em função das reduzidas deformações que ocorrem na peça mecânica girante.

Como se poderá verificar, o desempenho do sistema de medição de torque depende de cada um dos blocos apresentados na figura 1.1. A resolução, a imunidade ao ruído e a praticidade do sistema para aplicação em ambientes industriais, dependem de como cada um dos blocos for implementado.

No capítulo 2 faz-se uma análise dos sistemas atualmente em uso, descrevendo-se suas vantagens e desvantagens para uso em ambiente industrial.

No capítulo 3 descrevem-se o projeto e a implementação de um circuito pré-condicionador que procura empregar os recursos hoje disponíveis da instrumentação eletro-eletrônica, para maximizar o potencial de utilização dos extensômetros de resistência elétrica na medida direta de torque em dispositivos girantes.

No capítulo 4 descreve-se a utilização do sistema desenvolvido na medida direta de torque no eixo de um motor elétrico.

No apêndice B faz-se uma análise dos sistemas de acoplamento para transferência de sinal e energia em sistemas instrumentados girantes.

No apêndice C apresenta-se o modelamento e projeto de transformadores rotativos para uso em sistemas instrumentados girantes.

1.4- JUSTIFICATIVAS DA PROPOSTA

O torque é um importante parâmetro para avaliar um processo, não apenas em engenharia mecânica, mas em qualquer sistema onde haja conversão ou transferência de energia através de dispositivos mecânicos. Especialmente em sistemas girantes, há grande interesse em uma medida precisa do torque já que, praticamente todos os processos de conversão ou transferência de energia, utilizam dispositivos mecânicos rotativos. Este interesse está refletido na incessante busca de processos e sistemas de medição ao longo dos tempos (vide capítulo 2 - Sistemas Existentes Para Medição De Torque Em Dispositivos Girantes - Histórico). No entanto, ainda hoje, a maioria das medições de torque, exceção feita ao emprego de torquímetros girantes, são efetuadas com uma incerteza muito grande, uma vez que são no geral, resultados obtidos por métodos indiretos, onde necessariamente muitas aproximações são efetuadas.

Considerando-se os processos de produção utilizados no parque industrial do mundo de hoje, verifica-se que há uma constante preocupação em aumentar a eficiência, pois esta determina a sobrevivência de qualquer empreendimento numa economia de mercado. Particularmente, busca-se a redução do consumo de energia naqueles sistemas onde ela intervém significativamente como insumo. Este é o caso de qualquer processo em que se utilizam dispositivos mecânicos de conversão ou transferência de energia. Aí incluem-se fortemente os sistemas mecânicos com partes girantes.

Como o torque, em qualquer ponto de um sistema girante, relaciona-se com a potência mecânica disponível neste mesmo ponto, medi-lo em cada ponto, significa seguir os caminhos do "fluxo de energia", determinando-se assim onde ela está sendo realmente consumida. Com a medição precisa do torque em diversos pontos de um sistema, pode-se então determinar perdas mecânicas em dispositivos bastante complexos, como por exemplo num laminador ou numa caixa de câmbio^[50], ou em dispositivos tão simples como num mancal de sustentação de um eixo girante.

Um outro aspecto interessante a examinar é o significado físico da medida de torque no conjunto de outras grandezas da área da mecânica.

Considerando-se que a relação:

$$\vec{F} = m \vec{a} \quad (1.1)$$

que sintetiza a lei de Newton (onde "F" é a força, "m" é a massa e "a" a aceleração), está em sistemas girantes representada por:

$$\vec{\tau} = M_i \vec{a}_\alpha \quad (1.2)$$

onde " τ " é o torque, " M_i " o momento de inércia e " a_α " a aceleração angular, verifica-se a importância da medida de torque para o perfeito dimensionamento de qualquer sistema mecânico.

Na maioria dos sistemas girantes é importante também conhecer a potência instantânea. Esta pode ser calculada por:

$$P = \tau W \quad (1.3)$$

onde "P" é a potência, " τ " o torque e "W" a velocidade angular. A velocidade angular é hoje um parâmetro facilmente medido uma vez que se dispõe de diversos transdutores específicos com grande precisão (dispositivos ópticos ou magnéticos)^[17, 37, 40]. A dificuldade continua sendo a medida precisa do torque aplicado ao eixo girante.

Pelas publicações atuais constata-se que a medida precisa do torque em dispositivos girantes continua sendo investigada com razoável intensidade [15, 36, 49, 50, 52, 53].

Por todas as razões aqui expostas é que o autor se propôs a desenvolver um trabalho de pesquisa na medida direta do

torque em sistemas girantes, procurando trazer uma contribuição relevante ao tema. A complexidade de um sistema eficiente e prático é realmente um desafio que poucos enfrentaram.

No Brasil inexitem fabricantes de sistemas de medição de torque com estas características. Também a nível mundial são pouquíssimos os fabricantes de dispositivos para medida de torque aplicado a sistemas girantes. Que se tenha conhecimento, existem alguns fabricantes mundiais de torquímetros girantes (HBM, KIOWA e MTS) [28, 34, 35] e apenas um que produz um sistema que pode ser utilizado para medição direta de torque em dispositivos girantes (sistema BLM da HBM) [30]. Obviamente todos estes fabricantes têm seus produtos patenteados e sua montagem final é cuidadosamente lacrada para impedir uma análise técnica de seus elementos constituintes. Tal procedimento é comum no âmbito tecnológico em função do que se convencionou chamar "segredo industrial".

Tal atitude reflete-se na ausência de publicações técnicas a respeito da construção destes dispositivos. Com este trabalho de tese demonstra-se como se pode implementar, sem segredos, um sistema completo utilizando componentes eletrônicos disponíveis no mercado. Abre-se pois, a nível científico, este "pacote tecnológico" dando-se publicidade à todos os aspectos de projeto e implementação do sistema de medição proposto.

É importante referir a oportunidade deste tema de investigação, tendo-se em conta que o trabalho de pesquisa foi realizado no Laboratório de Instrumentação (INMETAL) do PPGEMM. No INMETAL já são construídos há alguns anos (desde 1985) torquímetros girantes que utilizam extensômetros de resistência elétrica. Três teses de mestrado [2, 3, 21] já foram produzidas pelo Grupo abordando projeto, construção e testes de torquímetros girantes. Em outubro de 1989, iniciou-se a montagem de uma "Bancada Computadorizada Para Ensaio de Torquímetros Girantes" [31], projeto PADCT. No capítulo 3 há uma descrição detalhada de como esta Bancada e toda instrumentação disponível foram utilizadas para auxiliar no desenvolvimento deste trabalho.

O principal campo de aplicação dos torquímetros girantes é aquele existente em laboratórios de pesquisa, onde se realizam ensaios com o objetivo de calibração ou levantamento de

parâmetros, que servirão para homologação de produtos ou então como dados para realimentação de projetos mecânicos. Encontram-se, no entanto, muitas limitações na utilização destes dispositivos em trabalhos de campo, onde dificilmente se poderão reproduzir as condições específicas de operação em bancadas existentes em laboratórios de ensaios mecânicos. Isto porque a medida de torque em um sistema mecânico girante com esta técnica, implica na instalação de um torquímetro em série com o eixo que transfere o torque a ser medido. Esta inserção é feita mediante um acoplamento com flanges adequados aos torquímetros utilizados. Em princípio parece bastante simples, porém é preciso analisar diversos aspectos que por vezes tornam impeditiva uma medida de torque com este procedimento, principalmente quando consideram-se sistemas mecânicos industriais. Abaixo descrevem-se as principais limitações:

- A inserção do torquímetro em um sistema mecânico já existente, pode acarretar a necessidade do deslocamento físico longitudinal, entre a máquina que fornece o torque e a carga (vide figura 2.3). Nem sempre isto é possível.

- Um sistema girante sempre estará sujeito à transitórios de partida, ou de parada, que provocam o aparecimento de torques altíssimos, quando comparados ao seu valor de regime. Estes transitórios podem danificar permanentemente o elemento de mola do torquímetro inserido no sistema, caso o mesmo não seja superdimensionado. De outra parte, se o elemento de mola do torquímetro for superdimensionado, perde-se em resolução do torque medido quando o sistema estiver em torno dos valores de regime.

- A inserção do torquímetro precisa ser efetuada com extremo cuidado no que tange ao alinhamento. Os torquímetros rotativos quando submetidos a desalinhamentos sofrem esforços de flexão que podem provocar dano permanente aos mesmos por fadiga. Cada tipo de transdutor tem, definido pelo fabricante, limites de tolerância ao desalinhamento que são extremamente rigorosos, tornando a instalação um processo moroso e caro.

- Por se tratar de um sistema girante, qualquer desbalanceamento mecânico provocará o aparecimento de vibrações

que irão refletir-se no sinal de torque como oscilações. Além da perturbação elétrica no sinal medido, haverá também a modificação da resposta dinâmica do sistema mecânico original. Estas vibrações podem também provocar fadiga.

- Muitas vezes será necessário a instalação de mancais de apoio em ambos os lados do torquímetro (ou um berço para assentá-lo), já que o mesmo tem peso próprio considerável. Haverá pois uma perda ocasionada pela inserção do torquímetro. Em medições de baixos valores de torque o uso de torquímetros girantes poderá ser problemático, pois os mesmos também possuem rolamentos com atrito que precisará ser vencido pelo sistema de acionamento. Alguns torquímetros (caso do T30FN da HBM) possuem rolamentos apenas no lado do acionamento garantindo-se que os extensômetros sofrem ação apenas do torque aplicado à carga. Esta providência no entanto provoca uma limitação maior ainda no desalinhamento admissível pois o transdutor fica sujeito a um esforço de flexão ainda maior, caso o desalinhamento realmente ocorra.

- Em sistemas mecânicos de grande porte (motores, geradores, laminadores, etc,...) é praticamente impossível a inserção de um torquímetro girante pelas inúmeras complicações que isso iria provocar. Torna-se ainda mais evidente este fato, quando se verifica que o projeto mecânico de uma instalação destas, nem sequer levou em consideração esta possibilidade.

A importância do tema para a área metalúrgica é também bastante grande, uma vez que nesta os dispositivos mecânicos de grande porte são na sua maioria rotativos e de alto consumo de energia elétrica. A otimização dos dispositivos mecânicos ou mesmo a determinação do seu rendimento é de alto interesse técnico e econômico.

Assim, este trabalho apresenta uma nova forma de medição do torque que procura superar todas estas limitações mencionadas. Medindo-se diretamente o torque, através da medida da deformação que ocorre nos próprios elementos constituintes do sistema girante, viabiliza-se uma medição até então impossível por outras técnicas, com a vantagem de provocar-se uma perturbação mínima no comportamento real de todo o conjunto

mecânico sob teste.

Tal procedimento de medida é possível porque todas as partes, de qualquer sistema mecânico submetido a um carregamento, sofrem deformações mecânicas elásticas, ou seja comportam-se como "molas". Da mesma forma, torques aplicados em sistemas girantes provocarão deformações mecânicas elásticas em partes como eixos, polias ou engrenagens. Estas deformações medidas na superfície das partes constituintes destes sistemas, permitem que se utilizem estes elementos como transdutores.

As deformações que ocorrem podem apresentar valores diferentes para diferentes posições e orientações, conforme a geometria do "elemento de mola" considerado. No entanto, estas deformações nunca serão superiores a um valor ϵ_0 , denominado Sensibilidade Intrínseca^[12] deste elemento. Esta Sensibilidade Intrínseca (que é uma deformação relativa) chega a atingir valores de 0,1% (igual a 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$) em transdutores comerciais. Obviamente tais níveis de deformação dificilmente ocorrem em sistemas mecânicos girantes, projetados para operar com elevados coeficientes de segurança.

Nesta tese desenvolveu-se uma instrumentação capaz de medir deformações elásticas de até 10 $\mu\text{m}/\text{m}$ (em fundo de escala) que podem ocorrer em elementos estruturais elásticos e girantes. Assim, qualquer parte de uma estrutura mecânica em rotação que apresente deformações elásticas de até 10 $\mu\text{m}/\text{m}$, ou mais pode, através desta instrumentação, ser usada como transdutor das grandezas físicas causadoras destas deformações.

A instrumentação foi desenvolvida e testada em extensômetros de resistência elétrica colados em eixos girantes que têm sua deformação superficial proporcional ao torque aplicado.

Considerando-se que os extensômetros utilizados apresentam uma variação relativa da resistência elétrica ($\Delta R/R$ em Ω/Ω), duas vezes maior ($k = 2$) do que a deformação mecânica relativa (m/m) que sofrem, a instrumentação pode ser utilizada em circuitos tipo ponte de elementos que produzam variações de 20 $\mu\Omega/\Omega$ (ou mais) em suas impedâncias, quaisquer que sejam as grandezas físicas que as provoquem.

Como consequência deste trabalho pode-se apontar a consolidação de uma das linhas de pesquisa que vem sendo desenvolvida no PPGEMM através do INMETAL e de outros Laboratórios a ele vinculados, qual seja a de Teste e Medição de Grandezas Mecânicas. Esta instrumentação eletro-eletrônica desenvolvida, para operar em sistemas girantes, ampliará em muito o âmbito dos ensaios já realizados nesta linha. Poderá também a mesma ser utilizada para medir outras grandezas mecânicas, não restringindo-se apenas ao torque.

Como se procurará mostrar no capítulo 5, a instrumentação eletro-eletrônica desenvolvida pode ser aplicada a qualquer arranjo de elementos sensores que permita uma ligação tipo ponte, com um sinal de desbalanço mínimo na faixa de 0,05 mV/V, que admita excitação por um sinal senoidal de amplitude igual a 5V e frequência de 5 kHz. Pela sua grande imunidade a ruído, elevado ganho e praticidade de uso em sistemas girantes, encontrará certamente um grande número de aplicações em análise experimental ou em sistemas de monitoração e controle de processos industriais.

2- CAPÍTULO 2: SISTEMAS EXISTENTES PARA MEDIÇÃO DE TORQUE EM DISPOSITIVOS GIRANTES

2.1- HISTÓRICO

Comparativamente com os métodos de medição de força, muitos já conhecidos há algumas centenas de anos, pode-se dizer que os métodos de medição de torque em eixos girantes são bastante recentes [22]. Somente nos anos 1700, com o advento da máquina a vapor, o primeiro sistema de medida de torque foi proposto e executado pelo físico francês Gaspar de Prony (1755-1839). Este sistema ficou conhecido como "Freio de Prony". Consiste de um sistema de frenagem que age sobre uma polia acoplada ao eixo (figura 2.1).

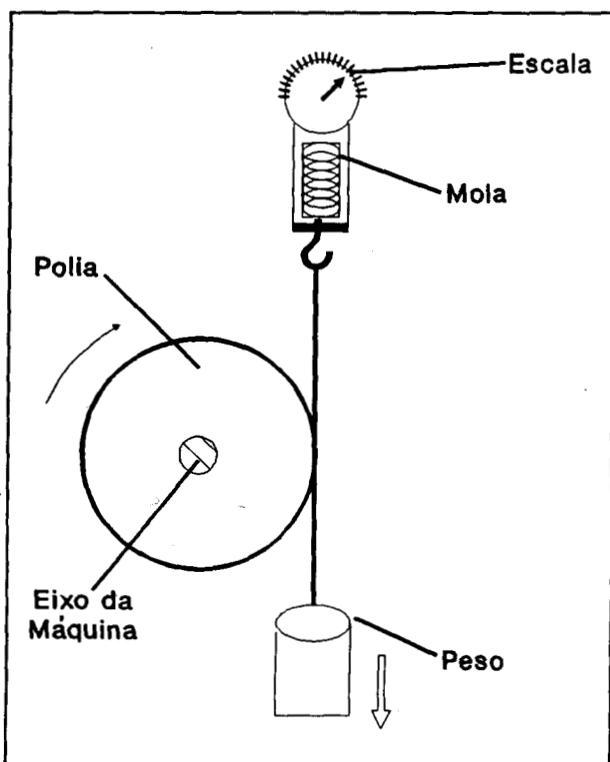


Figura 2.1- Freio de Prony.

Por muitas dezenas de anos o Freio de Prony era o único método conhecido de medição de torque em sistemas girantes.

Somente em 1877 Sir William Froude, um Engenheiro Naval inglês, utilizou um sistema diferente chamado "Freio a água" (figura 2.2.). O rotor do freio é impulsionado pelo sistema mecânico girante. Faz-se circular água no circuito hidráulico do estator, de tal forma que se promova a frenagem do rotor[22]. Ainda hoje os dois sistemas são empregados para medição de

torque. Pouco depois, no ano de 1833, introduziu-se a utilização de um sistema chamado "Dinamômetro Eletromagnético". Este emprega um gerador de corrente contínua aplicado como carga ao eixo

motor, fazendo-se uma medida indireta de torque através de grandezas elétricas (tensão e corrente) disponíveis na saída do gerador. Entre os anos de 1819 e 1868, o Físico Francês J.B. Foucault sugeriu a confecção de um freio que funcionasse por correntes parasitas. Protótipos deste só foram montados e testados no ano de 1928. Em qualquer um destes sistemas, a indicação de torque é feita através da leitura em uma escala previamente calibrada, ou por monitoração da tensão e corrente necessárias para a frenagem do eixo girante.

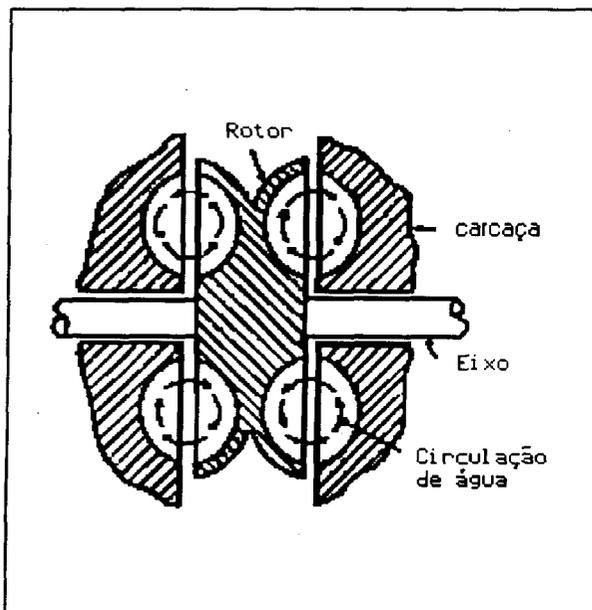


Figura 2.2- Representação esquemática do freio a água.

A partir de 1930 introduziu-se um novo método de medição baseado em células de carga construídas com extensômetros de resistência elétrica. Este método utiliza o efeito de reação da carcassa de uma máquina rotativa, quando um torque é aplicado ao seu eixo (figura 2.6).

Atualmente utilizam-se transdutores específicos para medida de torque que são denominados Torquímetros Girantes ou Rotativos. Para

medir o torque em um determinado ponto de um sistema girante, é necessário acoplar mecanicamente o torquímetro (através de flanges, chavetas, etc,...) em série com o eixo, engrenagem ou polia conforme sugere a figura 2.3.

Os torquímetros girantes têm como princípio de funcionamento a deformação angular do eixo (ou de um sistema mecânico) que transfere o esforço de torque da máquina para a carga. Este eixo é denominado de "elemento de mola" e sua deformação pode ser detectada de diversas formas (extensômetros de resistência elétrica, dispositivos ópticos, magnéticos, capacitivos, etc...).

Pela importância que tem para este trabalho, os

torquímetros girantes com extensômetros de resistência elétrica merecem uma abordagem mais detalhada em tópico subsequente (item 2.3).

2.2- CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE TORQUE EM DISPOSITIVOS GIRANTES

Todos os sistemas utilizados para medir torque em dispositivos girantes podem ser classificados em três tipos básicos: absorção, reação e transmissão.

2.2.1- Sistemas de Absorção

Os sistemas do tipo absorção são aqueles em que a carga aplicada ao eixo é substituída por um dispositivo de medida que é usualmente conhecido como dinamômetro. Neste tipo de arranjo a energia mecânica disponível no eixo é totalmente absorvida pelo dinamômetro e convertida em calor, por atrito (caso dos freios) ou em energia elétrica dissipada em cargas resistivas (caso dos eletrodinamômetros). Um exemplo típico está mostrado na figura 2.4. Enquadram-se também nesta categoria o Freio de Prony e o Freio Hidráulico de Froude.

2.2.2- Sistemas de Reação

Os sistemas de medição de torque por reação utilizam o princípio de que qualquer máquina geradora de energia mecânica (motor elétrico, motor a explosão, etc, ...) produz um esforço de reação transferido à carcaça, ou a base mecânica que os sustentam, que é proporcional ao torque disponível no eixo. Nestes sistemas de medição é necessário que o motor tenha a sua carcaça móvel (livre para girar), ou seja montado em mesas instrumentadas denominadas "torque tables" (figura 2.5) para medir o esforço de reação. Quando a carcaça está livre para

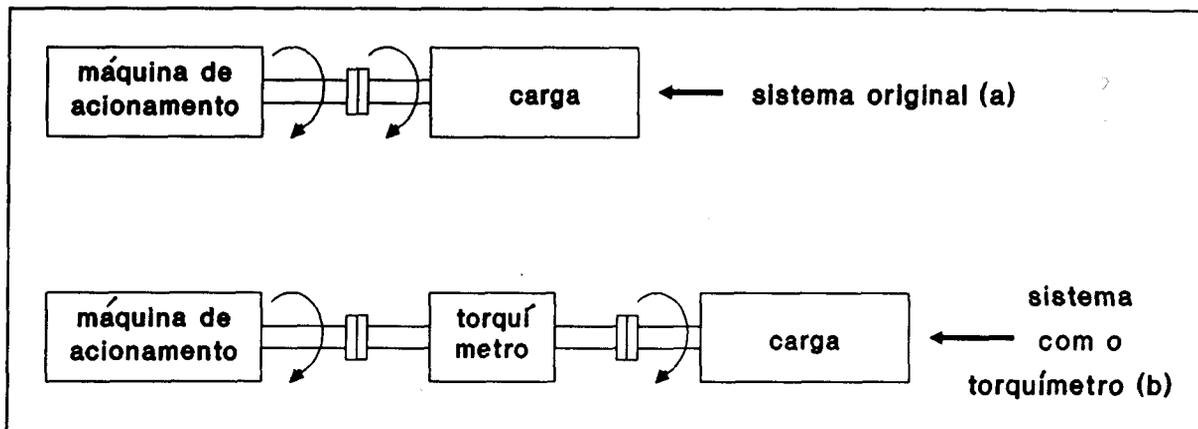


Figura 2.3- Arranjo mecânico esquemático para medição de torque com torquímetros girantes. (a)- Sistema original. (b)- Sistema com o torquímetro instalado.

girar, é possível a instalação de um braço de alavanca na mesma, onde se colocam pesos para equilibrar o torque que tenderia fazê-la girar. Em alguns sistemas deste tipo instalam-se células de carga que podem medir a força em um determinado ponto de um braço de alavanca quando a carcaça tenta girar (figura 2.6).

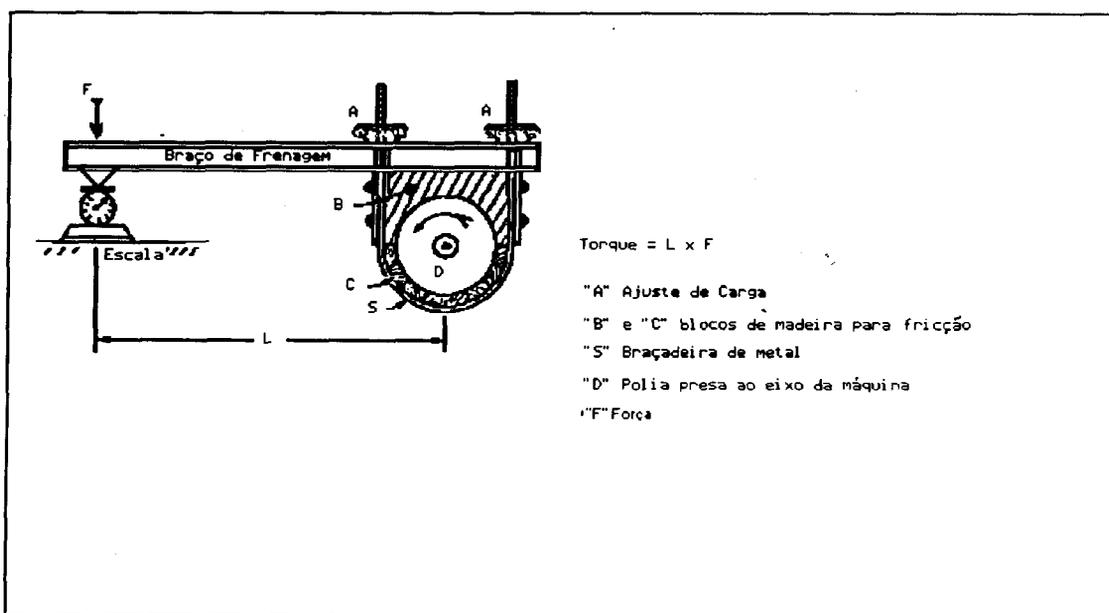


Figura 2.4- Esquema típico de um freio de fricção utilizado para medição de torque

Em algumas referências bibliográficas este sistema de reação é também classificado como de absorção. No entanto difere bastante do sistema clássico de absorção que realmente absorve todo o

torque disponível no eixo e não apenas responde proporcionalmente a ele.

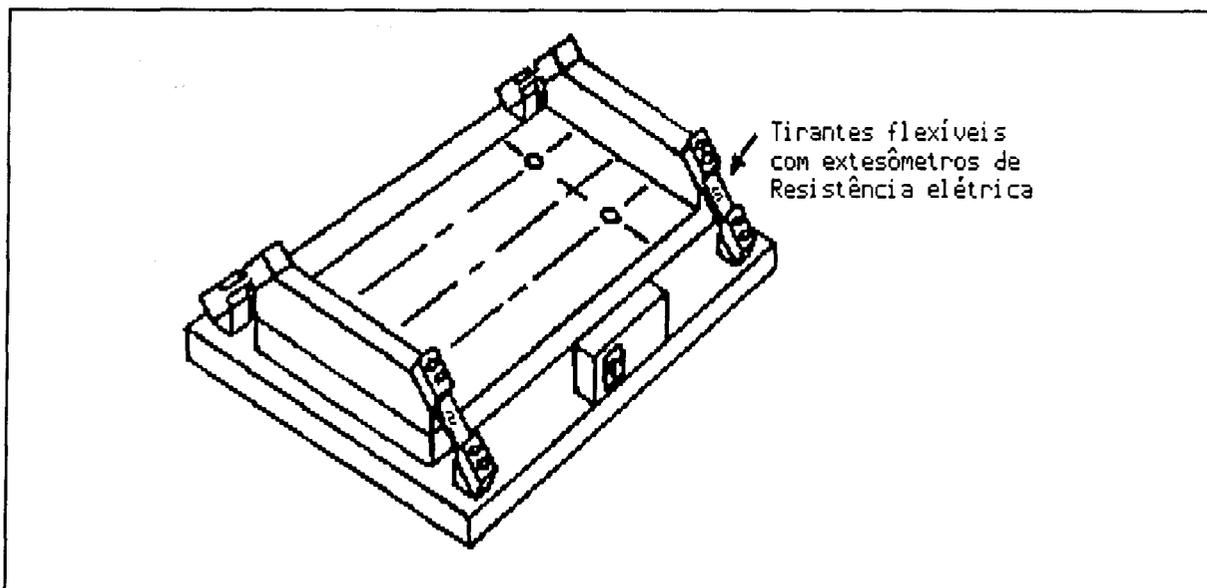


Figura 2.5- Esboço de uma mesa de torque ("torque table")

2.2.3- Sistemas de Transmissão

Este sistema de medição não necessita absorver energia do eixo girante, simplesmente precisa sentir o esforço de torque nele aplicado. Os transdutores que operam desta forma são colocados em série com o eixo que transmite o esforço do motor à carga. O exemplo típico é o torquímetro com extensômetros de resistência elétrica, largamente empregado nos dias de hoje. Incluem-se também nesta classificação todos os transdutores cujo princípio é a deformação angular do eixo que transfere um esforço de torque. Estes transdutores têm a possibilidade de operar continuamente em sistemas girantes podendo responder de forma dinâmica a esforços de torque variáveis em condições reais de operação.

Cabe ainda ressaltar a variedade da instrumentação eletro-eletrônica empregada com transdutores que medem o torque por transmissão. Como este aspecto é de particular interesse

neste trabalho, há um enfoque mais aprofundado em tópico subsequente.

2.3- TORQUÍMETROS ROTATIVOS QUE UTILIZAM EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

O perfeito domínio da tecnologia de produção e colagem de extensômetros de resistência elétrica protagonizou o aparecimento de uma nova geração de transdutores de torque.

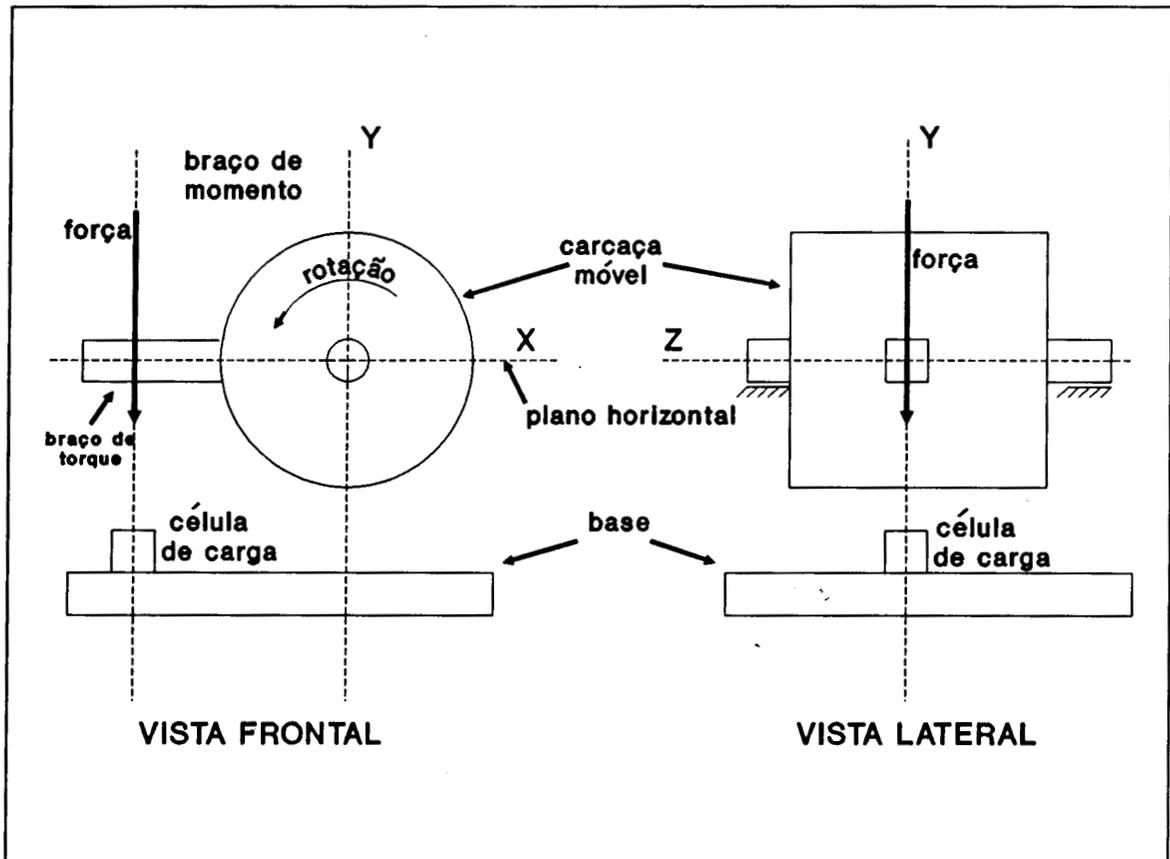


Figura 2.6- Medição de torque por reação da carcaça.

Nestes a medição de torque pode ser efetuada diretamente em função da deformação de um "elemento de mola" que transmite o esforço mecânico a ele aplicado (figura 2.7). Uma das grandes vantagens do uso de torquímetros com extensômetros de resistência elétrica é a sua precisão. A incerteza envolvida na determinação de torque, através de cálculos indiretos, pode

chegar a ser três vezes maior do que a medida feita com torquímetros que utilizam extensômetros^[26]. Devido a esta sua grande precisão, os transdutores que utilizam extensômetros de resistência elétrica são freqüentemente utilizados como padrão de referência [8].

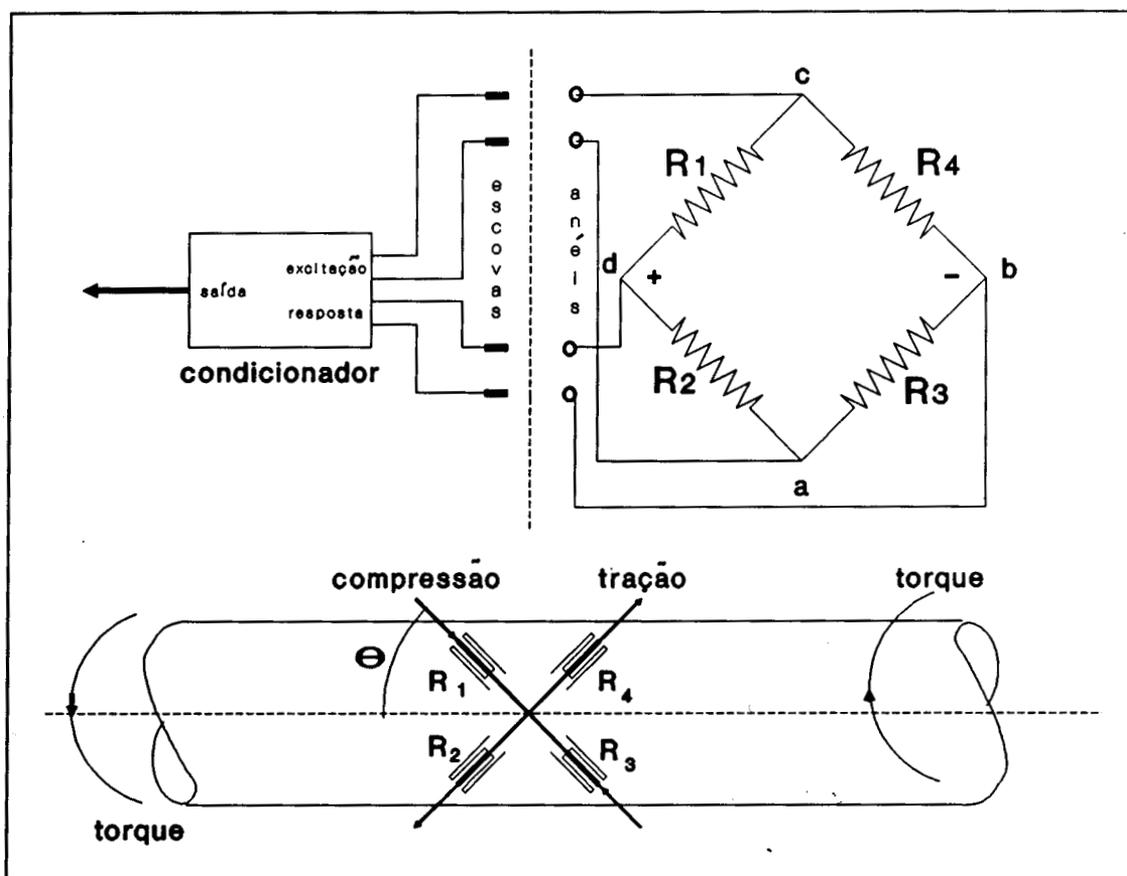


Figura 2.7- Esboço de um torquímetro girante com extensômetros de resistência elétrica.

Neste tipo de torquímetro os extensômetros de resistência elétrica são colados no "elemento de mola" que se deforma quando submetido a um esforço de torque. Existem diversas geometrias para os elementos de mola (cilíndrica, cruciforme, cruciforme vazada, etc...) [2, 3]. Esquemáticamente, na figura 2.7, representa-se um torquímetro em que o elemento de mola é cilíndrico. Neste os extensômetros (R_1, R_2, R_3, R_4) são colados a 45 graus (direção em que ocorre a máxima deformação nesta geometria) e ligados em ponte de Wheatstone. Para alimentar a

ponte de extensômetros e coletar o sinal de desbalanço da mesma, a figura 2.7 mostra um sistema de acoplamento com anéis e escovas.

O condicionador de sinais é quem fornece a excitação e recebe o sinal correspondente à resposta, tratando-o convenientemente para que na saída se disponha de um sinal elétrico apropriado à indicação ou registro da grandeza medida (± 10 Volts, 4 a 20 mA, etc,...). A resposta do transdutor é normalmente um sinal bastante pequeno (da ordem de 10^{-3} Volts), para o valor correspondente ao fundo de escala (valor nominal do transdutor).

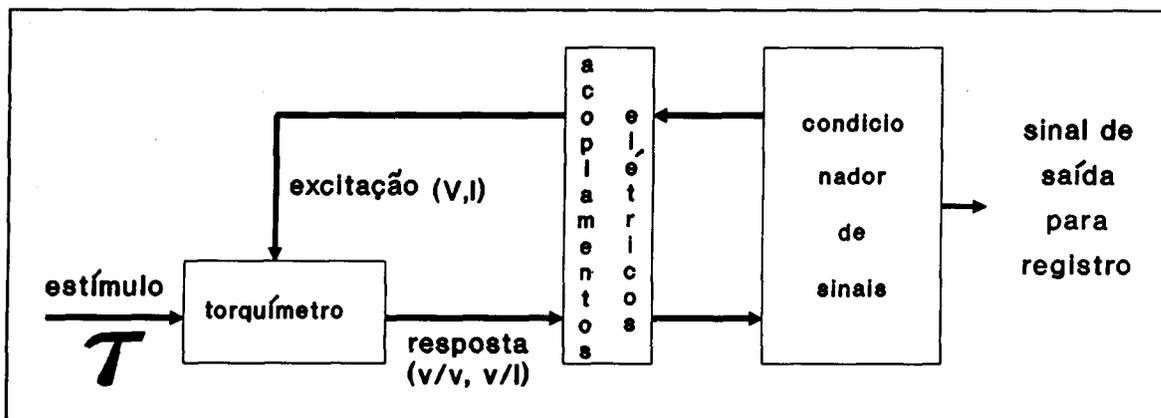


Figura 2.8- Diagrama em blocos de um torquímetro girante com extensômetros de resistência elétrica.

A figura 2.8 mostra em blocos funcionais o torquímetro da figura 2.7.

Como este transdutor utiliza extensômetros de resistência elétrica, o acoplamento elétrico entre a parte girante e a parte estacionária é um problema adicional. Através deste (via anéis e escovas, transformadores rotativos, etc,...) o condicionador de sinais fornece ao transdutor a energia (excitação) necessária a sua operação, bem como coleta o sinal elétrico fornecido como resposta pelo mesmo.

2.3.1- Transdutor de torque, sua Função de Transferência e Sensibilidade

Um transdutor de torque, bem como qualquer outro transdutor de grandezas mecânicas, que utilize extensômetros de resistência elétrica, é um transdutor composto que pode ser desmembrado em três diferentes estágios de transdução, tal como sugere a figura 2.9.

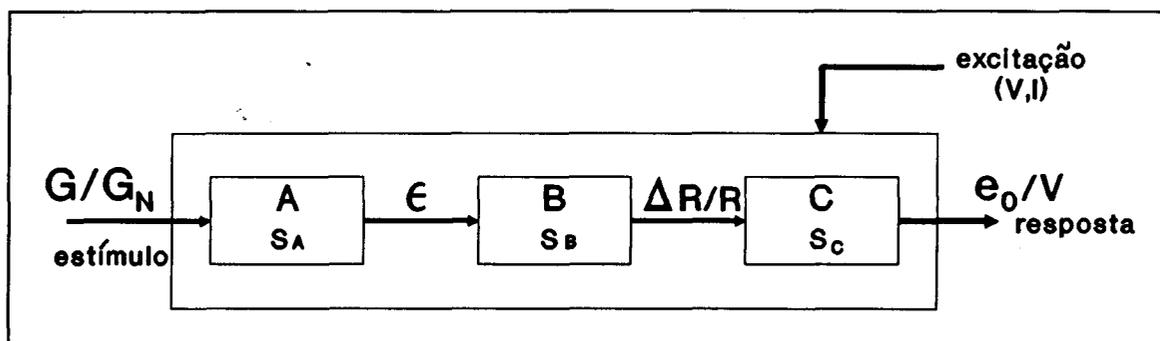


Figura 2.9- Transdutor composto: A- converte torque em deform. B- Converte deform. em variação de resist. elétr. C- Converte variação de resist. elétr. em variação de tensão.

Todos estes transdutores possuem a mesma função de transferência, desde que os parâmetros de entrada e saída de cada estágio sejam postos sob forma adimensional.

O primeiro estágio (A), ou elemento de mola de um transdutor, é uma estrutura metálica que se deforma elasticamente sob a ação do carregamento das grandezas mecânicas a que está submetida. Escolhem-se então os pontos de maior deformação elástica desta estrutura, para neles colar os extensômetros. Assim, qualquer grandeza mecânica G , que provoque deformações elásticas, pode ser medida. Isto vale para torque, força, pressão, temperatura, etc... O tipo de estrutura mais adequada, seu dimensionamento e o cálculo das deformações de suas partes, é uma tarefa bastante complexa e demanda conhecimentos de resistência dos materiais. Não é simples encontrar uma função de transferência mecânica que relacione facilmente o estímulo (carregamento) com a saída (deformações) deste transdutor.

Cauduro^[12], em sua tese de doutorado, mostrou que as

deformações mecânicas relativas ϵ_j que ocorrem em qualquer estrutura metálica, nunca ultrapassam um valor ϵ_0 , que denominou de Sensibilidade Intrínseca. Esta é entendida como o valor máximo possível que a deformação relativa pode alcançar, em determinados pontos e orientações, quando a estrutura estiver submetida a carregamentos nominais.

Na definição da Sensibilidade Intrínseca necessitam-se de conceitos como: coeficiente de segurança S_g e o valor nominal de carregamento G_N de uma estrutura submetida a um carregamento G . O coeficiente de segurança é a razão entre o valor do carregamento que leva a estrutura ao escoamento plástico (ou ao seu limite elástico), dividido pelo seu valor nominal. O valor nominal G_N é escolhido como o valor máximo do carregamento aplicado a estrutura em regime normal de trabalho. Assim, valor nominal e coeficiente de segurança são grandezas diretamente relacionadas no sentido da preservação da integridade do elemento de mola utilizado. Quanto maior o coeficiente de segurança adotado, menor será o valor nominal que a grandeza que produz o carregamento poderá atingir em relação ao seu valor máximo que levaria ao colapso o elemento de mola. O coeficiente de segurança é um dado de projeto, escolhido normalmente em função da tensão limite de escoamento σ_e do material utilizado e do regime de trabalho a que o mesmo estará submetido.

A Sensibilidade Intrínseca ϵ_0 será o máximo valor possível que a deformação pode atingir (em determinados pontos e em determinadas direções) em uma estrutura submetida ao carregamento nominal. Se E e ν são as constantes elásticas longitudinal (módulo de Young) e transversal (coeficiente de Poisson) mostra-se que:

$$\epsilon_0 = \frac{\sigma_e}{E S_g} \quad (\text{para carregamentos não cisalhantes}) \quad (2.1)$$

onde σ_e é o valor da tensão limite de escoamento do material

obtido em ensaio uniaxial de tração.

$$\epsilon_0 = \frac{1 + \nu}{2} \frac{\sigma_e}{E S_g} \quad (\text{para carregamentos cisalhantes}) \quad (2.2)$$

Observe-se que ϵ_0 depende do material, através da tensão de escoamento e das constantes elásticas e também do coeficiente de segurança adotado. A Sensibilidade Intrínseca ϵ_0 independe da geometria da estrutura utilizada. Este resultado permite que rapidamente se tenha o valor máximo possível para a sensibilidade de um determinado transdutor, bastando que se conheça apenas o material com que foi fabricado.

Para um aço com $\sigma_e = 60 \text{ kgf/mm}^2$ (600 M Pa, se $g = 10 \text{ m/s}^2$) comumente usado em transdutores e supondo $S_g = 3$, tem-se:

$$\epsilon_0 = 0,1\% = 1000 \text{ } \mu\text{m/m} \quad (\text{não cizalhante})$$

$$\epsilon_0 = 0,065\% = 665 \text{ } \mu\text{m/m} \quad (\text{cizalhante})$$

As deformações ϵ_j localizadas sobre a superfície do elemento elástico variam de posição para posição e dependem da direção considerada, respondendo ao estímulo aplicado (carregamento G).

Para $G = G_N$ as deformações podem ser calculadas por:

$$\epsilon_j (G=G_N) = n_j \epsilon_0 \quad (2.3)$$

onde n_j são coeficientes geométricos, isto é, funções da geometria. Variam com a localização do ponto e a direção em que se calcula a deformação. Sendo ϵ_0 intrinsecamente positivo, verifica-se que n_j podem assumir qualquer valor no intervalo:

$$-1 \leq n_j \leq +1 \quad (2.4)$$

No caso de torquímetros que utilizam como elemento de mola um eixo em torção de diâmetro "D" conforme mostra a figura 2.7, pode-se, pela resistência dos materiais, provar que as deformações mecânicas relativas na superfície dependem da direção θ considerada e do torque τ aplicado, segundo a expressão [12]:

$$\epsilon_j(\tau, \theta) = n_j(\theta) \frac{16(1 + \nu)}{\pi E D^3} \tau \quad (2.5)$$

em que θ corresponde ao ângulo formado entre o eixo longitudinal e a direção considerada para cálculo da deformação. Considerando-se apenas as tensões cisalhantes:

$$n_j(\theta) = \text{sen}(2\theta) \quad (2.6)$$

O máximo valor de ϵ_j ocorre para $\tau = \tau_N$ em pontos tais que $|n_j(\theta)| = 1$ ($p/\theta = \pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4$ e $7\pi/4$). O valor máximo de ϵ_j é denominado Sensibilidade Intrínseca ϵ_0 deste elemento de mola. Nesta situação pode ser calculado tomando-se $n_j(\theta) = 1$ ($p/\theta = \pi/4$). Assim sendo, a equação (2.5) fica:

$$\epsilon_0 = \epsilon_j(\tau_N, \frac{\pi}{4}) = \frac{16(1 + \nu)}{\pi E D^3} \tau_N \quad (2.7)$$

Assim conclui-se que:

$$\epsilon_j\left(\frac{\tau}{\tau_N}, \theta\right) = n_j(\theta) \epsilon_0\left(\frac{\tau}{\tau_N}\right) \quad (2.8)$$

que é a função de transferência adimensional para este elemento

elástico do tipo cilíndrico. Observe-se a simplicidade desta equação. No caso de calcular-se ϵ_0 pela expressão (2.8), não seria necessário conhecer o diâmetro do elemento de mola para determinar ϵ_j . Seria necessário apenas conhecer sua geometria para avaliar o parâmetro n_j . Para cada geometria tem-se diferentes n_j . No caso do projeto de elementos de mola com seção circular, o diâmetro seria calculado a partir do torque nominal a ser aplicado no eixo, através da equação 2.7.

O segundo estágio (B) é formado pelos extensômetros de resistência elétrica, resistores sensores da deformação mecânica relativa sofrida por sua grade metálica sensora, quando o mesmo é colado sobre a peça que se deforma, sob um dado carregamento. Se R_j é a resistência elétrica da grade metálica do sensor j e sendo ΔR_j a variação, em valor absoluto, desta resistência, quando a grade é submetida a uma deformação mecânica relativa média ϵ_j , aceita-se para função de transferência uma expressão do tipo:

$$\frac{\Delta R_j}{R_j} = k_j \epsilon_j \quad (2.9)$$

em que k_j é conhecido como "Sensibilidade" do extensômetro. O extensômetro, visto desta forma, é um sensor de deformação mecânica que recebe um estímulo ϵ_j na sua entrada e o converte em variação de resistência elétrica $\Delta R_j/R_j$. k_j é o fator de conversão das deformações em variações de resistência do extensômetro, sendo também o responsável pelas incertezas agregadas a esta transformação.

Existem comercialmente dois tipos de extensômetros: os metálicos e os semicondutores. Podem ser encontrados extensômetros semicondutores com sensibilidade $k_j > 100 \Omega/\Omega/m/m$ em contraste com k_j aproximadamente $2\Omega/\Omega/m/m$ para os tipos metálicos. Este fato recomenda, sempre que possível, o uso dos tipos semicondutores, uma vez que este elevado "ganho" reduz o

custo da instrumentação utilizada. Contudo, existem sérias restrições ao seu uso, principalmente quanto à forte dependência que os mesmos apresentam com a temperatura. Deve-se considerar também o seu elevado custo comparado com os extensômetros metálicos (20 vezes mais caro). Tais fatores têm inibido seu uso em instalações permanentes bem como em transdutores onde a estabilidade ou constância de k_j é requisito essencial. Os extensômetros metálicos hoje produzidos são compensados em temperatura para alguns metais mais utilizados nos elementos de mola (aço, alumínio, titânio, etc...). Com isto as deformações que sofrem, por efeito da variação dimensional do elemento de mola, em função da temperatura, são compensadas pela variação da resistência nominal do extensômetro que possui um coeficiente térmico ajustado para efetuar esta compensação. Esta não é efetiva para qualquer faixa de temperatura porém é plenamente satisfatória para uso em ambiente industrial (20°C a 110°C). Desta forma os extensômetros com grade metálica são os mais utilizados.

Como os extensômetros são colados na estrutura onde se deseja medir a deformação, é preciso que a cola utilizada transmita à grade esta deformação. Sabe-se que a cola sofre influência da temperatura, creep, etc... Assim, a rigor, convém colocar um coeficiente adicional na expressão que traduz a deformação dos extensômetros em variação de resistência, de forma a contemplar este efeito. Este coeficiente seria denominado k'_j ou seja:

$$\frac{\Delta R_j}{R_j} = k'_j k_j \epsilon_j \quad (2.10)$$

em que $k'_j \leq 1$. Numa cola ideal $k'_j = 1$. Às vezes, convém olhar equação nesta forma, pois assim consegue-se visualizar como as perturbações afetam separadamente a incerteza do resultado final. No caso em tela considerar-se-á sempre $k'_j = 1$ e $k_j = 2$ onde j

= 1, 2, 3 e 4.

O terceiro estágio (C) é denominado de "Ponte de Wheatstone". Neste os resistores sensores (extensômetros) são ligados entre si conforme ilustra a figura 2.7. Basicamente este circuito é formado por dois braços que são derivações série de resistores: $R_1 + R_2$ e $R_4 + R_3$ que formam dois divisores de tensão ($R_1 : R_2$ e $R_4 : R_3$), excitados entre "a" e "c" por uma tensão comum V. Estes divisores de tensão são independentes entre si, se a saída (pontos "b" e "d") está aberta ou está ligada a uma impedância muito grande frente a impedância equivalente da ponte. Assim, a tensão na saída por unidade de excitação (e_0/V) será a diferença de tensão entre os divisores, ou seja, somente função da relação entre os resistores.

$$\frac{e_0}{V} = f\left(\frac{R_1}{R_2}, \frac{R_3}{R_4}\right) = f(B_1, B_2) \quad (2.11)$$

onde $B_1 = R_1/R_2$ e $B_2 = R_3/R_4$.

Uma ponte se diz no balanço quando a saída é zero. Esta condição é alcançada quando $B_1 = B_2 = B$.

Nestas condições, podem-se comparar impedâncias^[5]. A maior utilização da ponte é no entanto quando a mesma está em desbalanço, isto é, quando se deseja medir a variação da tensão na saída (Δe_0), proveniente de alterações nas impedâncias dos elementos de seus braços. No caso dos transdutores extensométricos, esta variação de tensão na saída é proporcional ao carregamento mecânico aplicado ao elemento de mola que provoca variação na resistência dos extensômetros. Se as variações se dão a partir do balanço ($e_0 = 0$) e se $(\Delta R_j/R_j)$ são as variações relativas dos resistores R_j equivalentes de cada um dos quatro braços ($j = 1, 2, 3$ e 4)^[12], mostra-se que:

$$\frac{\Delta e_0}{V} = S_0(1-\delta) \sum_{j=1}^4 \frac{\Delta R_j}{R_j} (-1)^{j+1} \quad (2.12)$$

onde S_0 é chamada de Sensibilidade Inicial e vale:

$$S_0 = \frac{B}{(1+B)^2} \quad (2.13)$$

sendo portanto só função das condições de balanço inicial da ponte. δ é denominado de Coeficiente de alinearidade elétrica. Para transdutores extensométricos, $B = 1$. Nestas condições tem-se:

$$S_0 = \frac{1}{4} \frac{V/V}{\Omega/\Omega} \quad (2.14)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^4 \frac{\Delta R_j}{R_j} \quad (2.15)$$

Observe-se, pela expressão 2.12, que a ponte tem um função "integradora", no sentido de apresentar como saída um sinal de desbalanço proporcional à soma algébrica das variações relativas dos resistores de cada braço.

A função de transferência global de um transdutor extensométrico é dada então por:

$$\frac{\Delta e_0}{V} = S_0 (1-\delta) \epsilon_0 k \frac{\tau}{\tau_{n_{j=1}}} \sum_{j=1}^4 (n_j) (-1)^{(j+1)} \quad (2.16)$$

Esta expressão é geral, válida para qualquer elemento elástico onde os termos principais são ϵ_0 e n_j . O primeiro

depende somente do material que constitui o elemento elástico e do coeficiente de segurança adotado. O segundo depende da geometria do elemento elástico e dos pontos superficiais considerados. Quaisquer pontos da estrutura que apresentem deformações mensuráveis podem ser aproveitados.

Para um elemento elástico cilíndrico de secção circular submetido a um torque τ/τ_N e com extensômetros colocados na posição indicada na figura 2.7, em que $n_1 = n_3 = -1$ e $n_2 = n_4 = 1$, supondo os quatro extensômetros iguais ($k_j = k$), $S_0 = 1/4$ e $\delta = 0$, vem:

$$\frac{\Delta e_0}{V} = k \epsilon_0 \frac{\tau}{\tau_n} \quad (2.17)$$

que é a função de transferência para este caso particular. Sendo $k = 2$ e a sensibilidade intrínseca calculada pela expressão (2.2) que considera deformações cisalhantes, tem-se:

$$\frac{\Delta e_0}{V} = 2 \left(\frac{1+\nu}{2} \right) \frac{\sigma_e}{E S_g} \frac{\tau}{\tau_N} \quad (2.18)$$

Supondo-se um transdutor construído com aço 4340, com $\sigma_e = 60 \text{ kgf/mm}^2$ (600 M Pa) e $E = 20.000 \text{ kgf/mm}^2$ (200 G Pa) obtém-se:

$$\epsilon_0 = 665 \text{ } \mu\text{m/m} \text{ (se } S_g = 3)$$

$$\epsilon_0 = 75 \text{ } \mu\text{m/m} \text{ (se } S_g = 60)$$

o que corresponde respectivamente a:

$$\Delta e_0/V (\tau = \tau_N) = 3 \text{ mV/V}$$

$$\Delta e_0/V (\tau = \tau_N) = 0,15 \text{ mV/V.}$$

Estes resultados demonstram que a deformação obtida em elementos de mola de transdutores é consideravelmente maior que aquela que se pode obter em dispositivos mecânicos projetados com coeficiente de segurança bastante elevado, o que é comum em se

tratando de elementos como polias, eixos, etc...

Desejando-se calcular o sinal elétrico de saída da ponte de extensômetros de um torquímetro com elemento de mola cilíndrico, em função de seu diâmetro e do torque aplicado, pode-se utilizar diretamente a expressão:

$$\frac{\Delta e_0}{V} = k(1 + \nu) \frac{16\tau}{E \pi D^3} \quad (2.19)$$

2.3.2- Condicionadores de sinais para torquímetros rotativos com extensômetros de resistência elétrica

Num sistema de medição, o bloco denominado Condicionador de Sinais recebe na sua entrada um sinal elétrico proveniente do transdutor e o amplifica, elimina ruído, realiza operações matemáticas (soma, subtração, integração, diferenciação, etc,...) apresentando na saída um sinal adequado à indicação, registro ou transmissão da grandeza medida. Quando o condicionador estiver ligado à um transdutor passivo, deve ainda gerar o sinal de excitação do mesmo (tensão e/ou corrente alternada e/ou contínua)^[7, 11].

No caso dos condicionadores para torquímetros rotativos que utilizam extensômetros de resistência elétrica, as características dos mesmos serão determinadas pelo tipo de acoplamento elétrico utilizado entre a parte girante e a parte estacionária do transdutor^[1]. Os condicionadores mais simples são aqueles que operam com torquímetros rotativos que utilizam como acoplamento um sistema de anéis e escovas. Na figura 2.10 observa-se que um par de anéis e escovas transfere o sinal de excitação (usualmente uma corrente contínua) e outro par de anéis e escovas coleta o sinal de desbalanço da ponte de extensômetros colados ao eixo girante.

Basicamente o condicionador de sinais^[7, 41] tem uma fonte de corrente (I), para excitar o torquímetro, e um amplificador de corrente contínua de alta impedância de entrada,

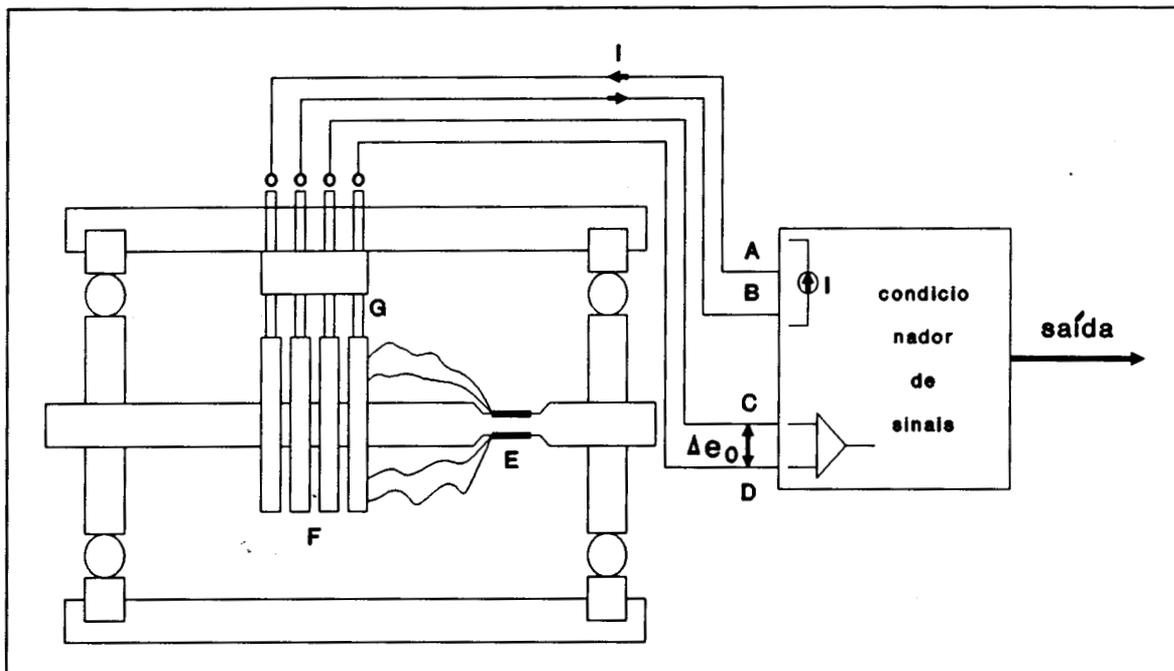


Figura 2.10- Torquímetro de anéis e escovas- A,B- sinal de excitação(I); C,D- sinal de desbalanço da ponte (Δe_0); E- extensômetros; F- anéis e G- escovas.

para receber o sinal de desbalanço proporcional ao torque.

Quando o torquímetro não utiliza escovas ("Brush Less Torquemeters"), o acoplamento é magnético ou capacitivo^[42]. Neste caso, o usual é que a transferência da energia para excitação do transdutor seja feita magneticamente (transformador rotativo) e o sinal de desbalanço coletado por acoplamento capacitivo. Na figura 2.11 apresenta-se um esquema deste tipo de torquímetro e seu condicionador de sinais. O condicionador de sinais, para este tipo de torquímetro, gera como excitação uma tensão alternada (usualmente 50 a 60 Volts) com uma frequência adequada ao acoplamento magnético obtido com o transformador rotativo. O sinal de saída do transdutor é normalmente um sinal de tensão modulado em frequência (10 kHz \pm 5 kHz no caso dos torquímetros da HBM) que deve ser demodulado pelo condicionador^[27].

Conforme mostra a figura 2.11 (A,B- excitação em tensão alternada; C,D- sinal de desbalanço da ponte; E- extensômetros; F- circuito para estabilização do estímulo; G- circuito para conversão do sinal de desbalanço em um sinal modulado em frequência; H- transformador rotativo; I- acoplamento

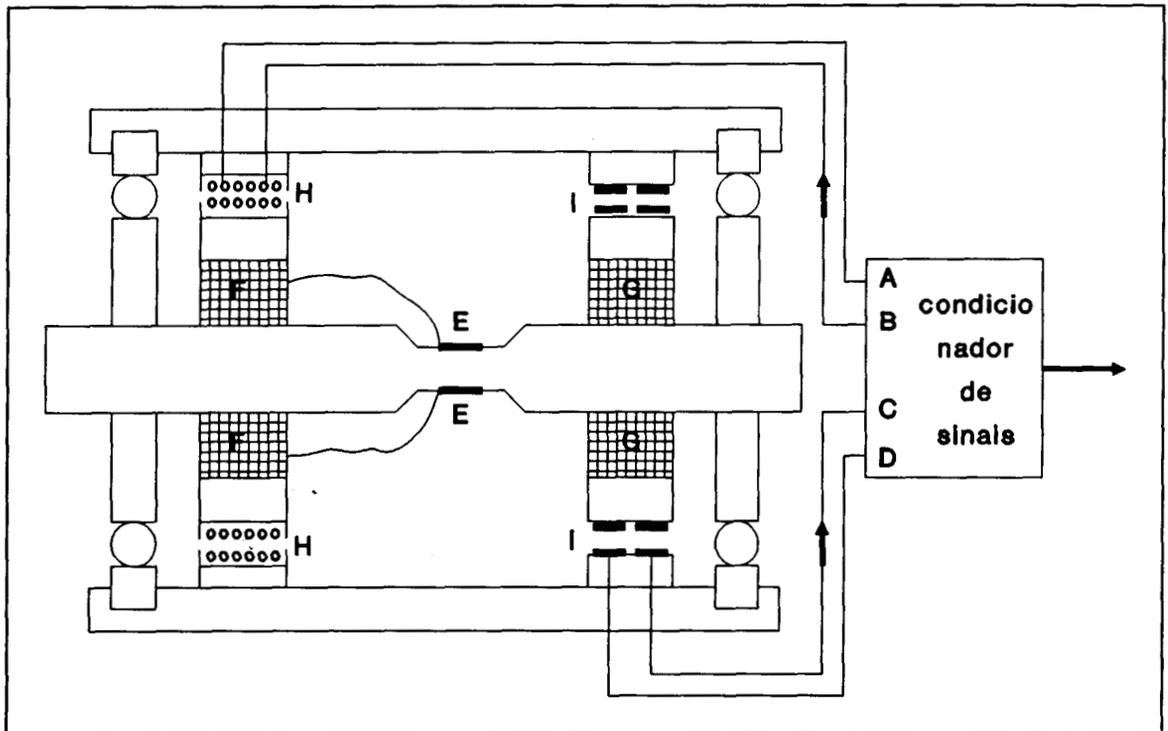


Figura 2.11- Torquímetro com acoplamento magnético e capacitivo.

capacitivo), há neste tipo de torquímetro uma "eletrônica embarcada" que gira juntamente com o eixo, adaptando o sinal de excitação recebido do condicionador, via transformador rotativo, para depois transferi-lo à ponte de extensômetros. Também o sinal de desbalanço passa por um circuito conversor de tensão em frequência (modulador), adaptando-o para que possa ser transmitido para fora, com o acoplamento capacitivo disponível^[42].

Existem ainda outros tipos de torquímetros que utilizam transformadores rotativos, tanto para o sinal de excitação, como para a transferência da resposta do transdutor. Logicamente o condicionador de sinais deverá ser compatível com o método de transferência utilizado.

O condicionador de sinais é uma parte fundamental do sistema de medição de torque. Nele é que se ajustam o zero, o ganho e conseqüentemente a calibração do sinal de saída em função do torque aplicado.

No apêndice B apresenta-se uma contribuição para o modelamento, análise e projeto de sistemas de acoplamento para

transferência de energia e sinal em torquímetros girantes.

2.4- SISTEMA BLM DA HBM

O sistema BLM ("Brush Less Measurement Modular System") é fabricado pela HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik), uma empresa alemã dedicada à produção de instrumentação eletro-eletrônica para medição de grandezas mecânicas. É constituído de diversos módulos que permitem a conexão de uma ponte de extensômetros de resistência elétrica, instalada em elementos de dispositivos mecânicos móveis. O conjunto dos módulos permite a alimentação da ponte de "strain gages", a detecção do sinal de desbalanço da mesma e a transmissão deste sem a necessidade de contato elétrico (utiliza modulação em frequência).

Segundo o fabricante, a grande vantagem do sistema é a sua versatilidade na análise experimental. Com a utilização de extensômetros é possível medir deformações em qualquer componente móvel, esteja ele com movimento de rotação, como em eixos, flanges ou engrenagens, ou em movimento de translação, como é o caso de máquinas ferramentas. Com algumas limitações, a seguir relatadas, este sistema presta-se também para a medição de torque em dispositivos girantes.

2.4.1- Módulos constituintes

O sistema BLM compreende seis módulos distintos que devem ser selecionados conforme a aplicação. São eles:

- a- MT2555 A - Measured-value transmitter (condicionador de sinais para a ponte de extensômetros e transmissor do sinal medido por modulação em frequência).
- b- BK2801 A - Battery box (Caixa de baterias).
- c- EV2510 A - Receiver pre-amplifier (pré-amplificador receptor).
- d- DU2802 - Rotary transmitter (Transmissor rotativo).
- e- MD3555 - Converter Unit - Torque (Unidade conversora de

frequência em tensão com saída proporcional ao torque).
 f- MD18N - Torque-speed amplifier (Amplificador que perfaz o produto torque-velocidade).

Todos estes módulos são de fabricação da HBM e necessitam estar interligados conforme diagrama esquemático mostrado nas figuras 2.12 e 2.13. Os módulos "e" e "f" são alternativos em qualquer conjunto.

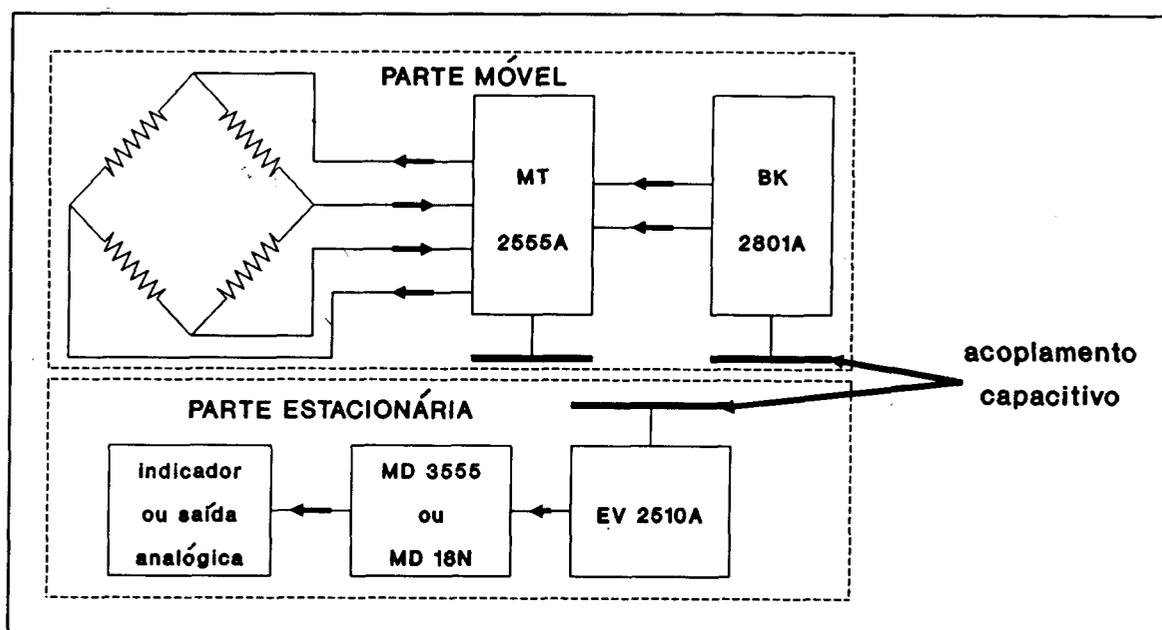


Figura 2.12- Esquema de ligação dos módulos do sistema BLM com baterias e acoplamento capacitivo para transmissão do sinal de desbalanço modulado em frequência.

Conforme se verifica nas figuras 2.12 e 2.13, existem dois procedimentos básicos para energizar a parte girante: um com baterias instaladas na parte móvel e outro com transferência de energia por acoplamento magnético. Como o sinal de desbalanço da ponte de extensômetros é modulado em frequência pelo MT2555 A, o mesmo pode ser transmitido à parte estacionária por acoplamento capacitivo (fig. 2.12) ou indutivo (fig. 2.13).

Quando se utilizam baterias, o sistema pode operar por 14 horas ininterruptamente (se a ponte utilizar extensômetros de 350Ω). São recomendadas baterias de 9 Volts de níquel-cádmio em dispositivos com movimento de translação e de mercúrio para dispositivos girantes, devido a força centrífuga que adultera o

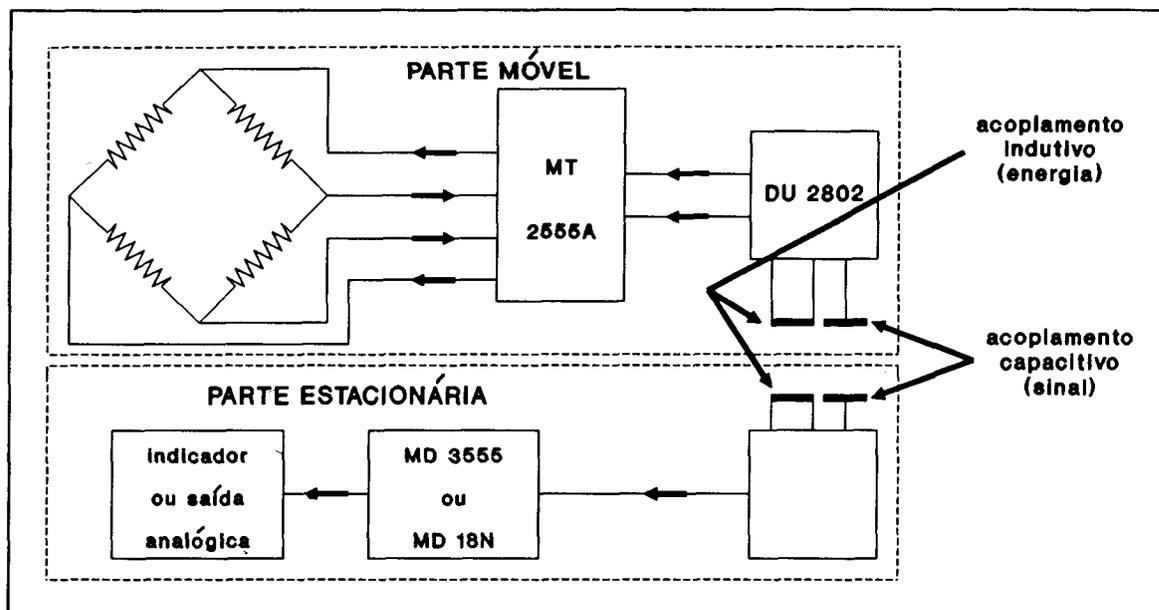


Figura 2.13- Ligação dos módulos BLM com transformador rotativo para transferência de energia e acoplamento capacitivo para transmissão do sinal de desbalanço modulado em frequência.

funcionamento das primeiras.

Os módulos MT2555 A e BK2801 A ou DU2802 devem ser acomodados mecanicamente nas partes móveis conforme sugere a figura 2.14.

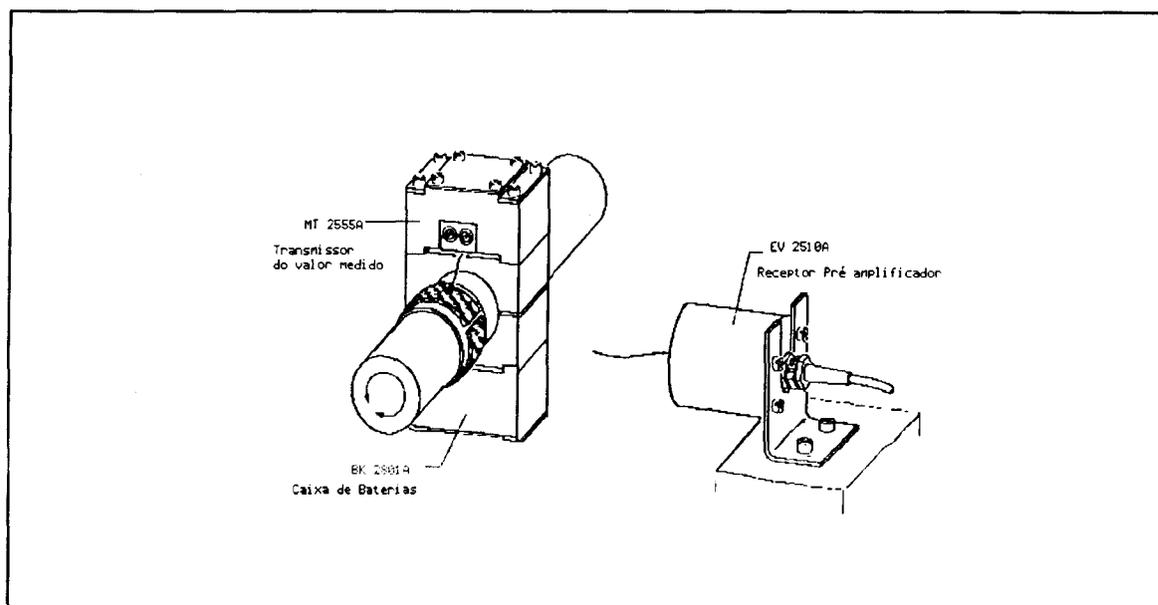


Figura 2.14- Montagem do sistema BLM acoplado a um eixo rotativo com o receptor estacionário.

Neste arranjo as placas metálicas existentes nos

módulos presos ao eixo girante podem ser usadas como antena de transmissão do sinal de desbalanço modulado em frequência. Em caso de necessidade pode-se ampliar a área de transmissão utilizando-se chapa condutora isolada montada sobre o eixo girante. O amplificador receptor (EV2510 A), montado estacionariamente nas proximidades do eixo girante, recebe e amplifica o sinal transmitido por acoplamento capacitivo pelo MT2555 A e o repassa ao módulo MD 3555 ou MD 18 N através de um cabo de conexão de até 70 metros de comprimento. Qualquer um destes dois últimos é capaz de excitar o pré-amplificador receptor e converter o sinal modulado em frequência em um sinal de tensão proporcional, para ser apresentado em um indicador, ou ser lido por um sistema de aquisição de dados.

Quando uma aplicação envolve uma medição permanente, ou mesmo de longa duração, utiliza-se acoplamento magnético para transferir energia ao MT2555 A. Este arranjo está mostrado esquematicamente na figura 2.13 utilizando o DU2802. Um circuito retificador converte em uma tensão contínua o sinal alternado (54 Volts-15 kHz) gerado pelo MD 3555 A ou MD 18N, transmitido magneticamente à parte girante por transformador rotativo. Este transformador é constituído de dois enrolamentos acoplados magneticamente que podem ser montados em trechos livres de eixos girantes ou em extensões nas extremidades destes.

Também o sinal de desbalanço modulado pelo MT 2555 A pode ser transferido para a parte estacionária utilizando-se transformador rotativo. Para este tipo de transferência não é necessário um acoplamento magnético muito forte, já que se pretende apenas detectar o sinal transmitido ao EV2510. Nas figuras 2.15 e 2.16 mostram-se sugestões de montagem de transformadores rotativos para o sistema BLM.

2.4.2- Utilização e calibração

Após a instalação da ponte de extensômetros, apropriada a medida de torque no elemento girante escolhido, faz-se

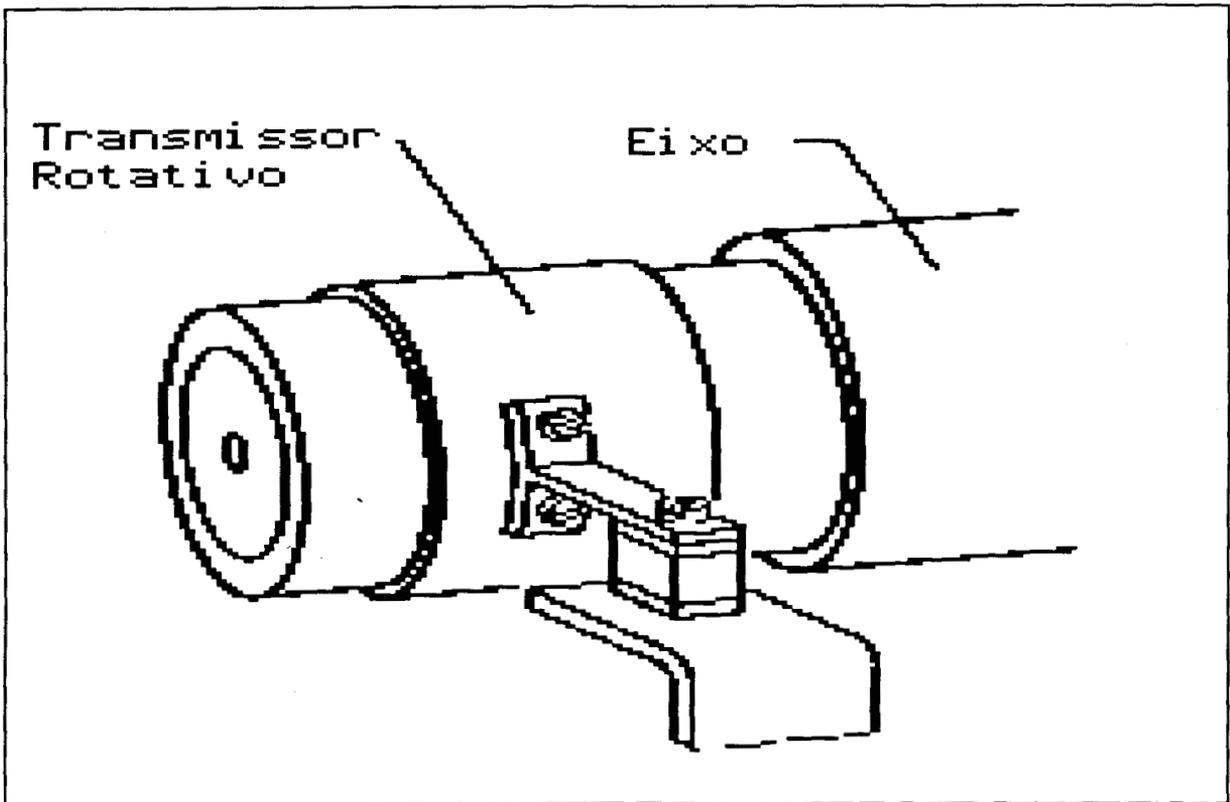


Figura 2.15- Transferência de energia para alimentar os circuitos instalados nas partes girantes através do transmissor rotativo DU 2802.

necessário agregar os módulos girantes do sistema BLM conforme as figuras 2.14, 2.15 e 2.16.

Para colocar o sistema em operação, primeiramente faz-se o ajuste da sensibilidade do receptor (EV2510) para que, com o sinal de desbalanço da ponte igual a zero (curto circuito na entrada de sinal no MT2555), tenha-se uma indicação mais próxima possível de zero na saída do MD3555 A.

Outro ajuste importante a ser verificado é o relativo ao fator de conversão do sinal de desbalanço da ponte em variação de frequência que ocorre no MT2555 (que é um circuito de conversão tensão-frequência). Este vem ajustado de fábrica para atuar com pontes de 350Ω . O fator de conversão é de 2 mV/V de desbalanço para 5 kHz de variação da frequência transmitida ao EV2510. Em resumo, abaixo apresenta-se uma tabela de conversão tensão-frequência para pontes com extensômetros de 350Ω . Caso se utilizem pontes com extensômetros de resistência diferentes de 350Ω , devem ser substituídos três resistores existentes no

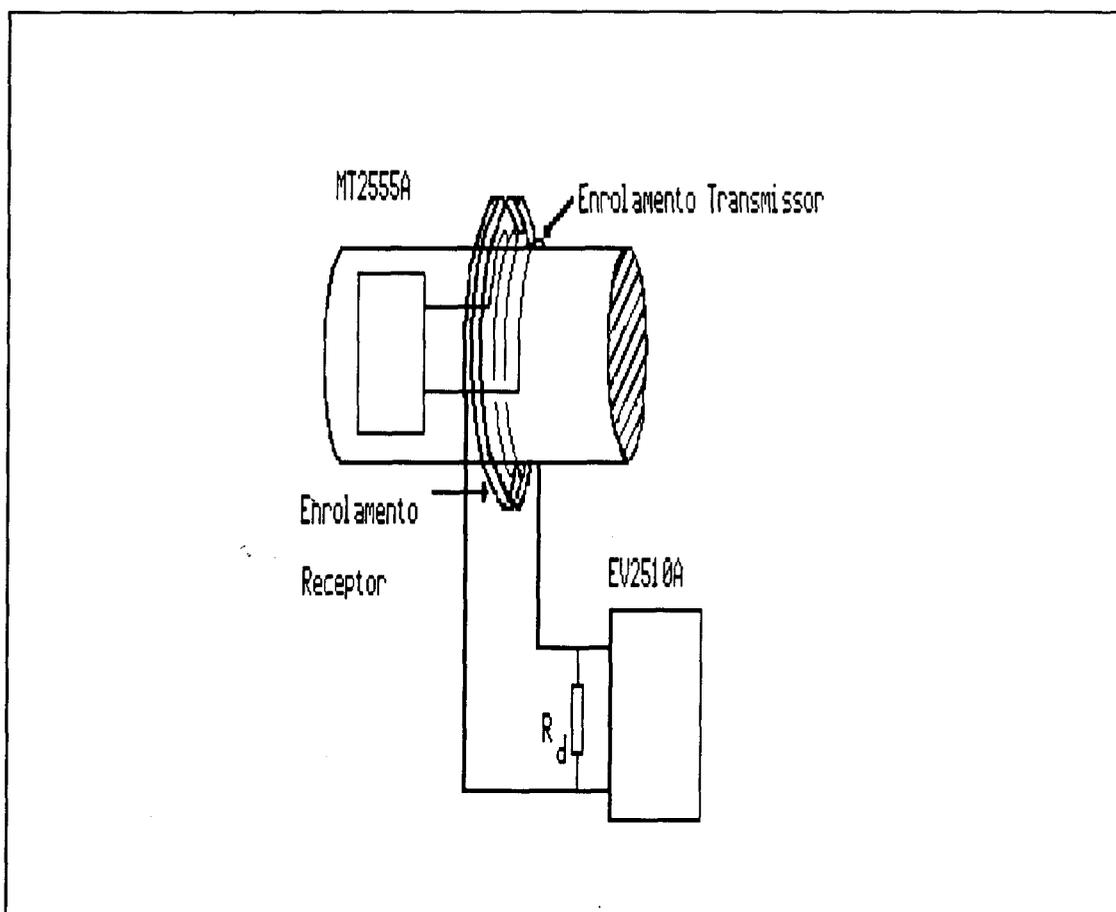


Figura 2.16- Transferência de sinal com acoplamento magnético via transformador rotativo

MT2555, conforme instruções do manual do fabricante.

O fator de amplificação do sistema é determinado por um ajuste de escala efetuado no MD3555 [29] e por um ajuste fino de ganho no MT 2555. O MD3555 perfaz a reconversão do sinal modulado em frequência, recebido do EV2510, em uma tensão contínua de ± 10 Volts, apresentada como saída analógica a qualquer instrumento indicador ou de aquisição de dados que efetue o registro de torque medido. O MD3555 prevê um ajuste de escala com fatores de multiplicação para sinais de saída da ponte iguais a 100%, 50%, 20% e 10% dos valores previstos na tabela 2.1.

Quando a ponte de extensômetros for ligada ao MT2555, certamente haverá um desbalanço inicial, mesmo sem carga aplicada, resultante das diferenças dos extensômetros e das deformações residuais introduzidas pela colagem dos mesmos ao elemento girante onde o torque será medido. O zeramento da ponte

deve ser efetuado pela adição de resistores diretamente sobre a ponte e num ajuste de zero no próprio MT2555 com um alcance $\pm 5\%$ da escala (potenciômetro denominado "null punkt").

A calibração do sistema de medida é efetuada aplicando-se uma carga mecânica estática no eixo que for instrumentado com os extensômetros. Normalmente utiliza-se um braço de comprimento conhecido e um peso também conhecido.

Sinal de saída da ponte em mV/V	Frequência do sinal transmitido em Hz
-2	5.000
0	10.000
+2	15.000

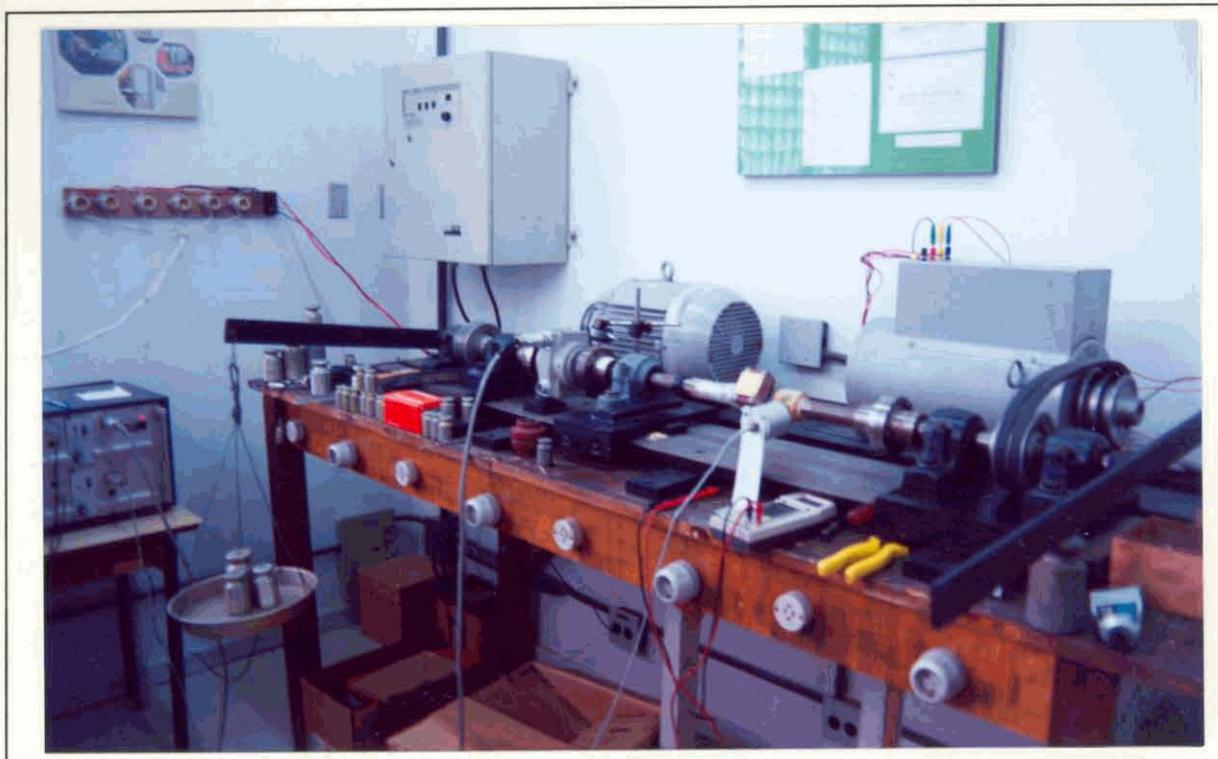
Tabela 2.1- Tabela de conversão tensão-frequência do MT2555 do sistema BLM em função do sinal de desbalanço da ponte de extensômetros instalada no elemento girante.

Na fotografia nº 1 mostra-se um arranjo para aplicação de um torque a um eixo.

Obviamente há necessidade de frear o eixo de modo que os extensômetros estejam colocados entre os pontos de frenagem e de aplicação do esforço de torque produzido pelo conjunto alavanca x peso.

A seguir seleciona-se a faixa de operação mais adequada do MD3555. Um ajuste fino do ganho pode ainda ser efetuado no MT2555 (potenciômetro denominado "sensitivity") de modo que se obtenha, no indicador ligado na saída analógica do MD3555, um valor numérico adequado ao torque realmente aplicado ao eixo.

Com um conjunto de pesos pode-se verificar a linearidade do sistema para valores de torque dentro da faixa de operação desejada. Normalmente no final desta operação um reajuste de zero no MT2555 será necessário.



Fotografia nº 1- Arranjo para aplicação estática de torque em eixos.

2.5- ENSAIOS REALIZADOS COM O SISTEMA BLM PARA MEDIDA DIRETA DE TORQUE

Toda a instrumentação existente foi montada na Bancada Computadorizada que se dispõe no INMETAL. Nos próximos tópicos descrevem-se a Bancada propriamente dita e os ensaios estáticos e dinâmicos realizados. Tais ensaios permitem a verificação do desempenho do sistema BLM em comparação com o torquímetro T30FN da HBM disponível no laboratório.

2.5.1- Bancada Computadorizada Para Ensaio De Torquímetros Girantes

Em outubro de 1989, iniciou-se no INMETAL um projeto FINEP/PADCT para construção de uma Bancada Computadorizada para ensaio de torquímetros girantes. Este projeto encontra-se agora concluído, estando já a bancada em condições de uso para testes

de torquímetros. Nela desenvolveram-se a maioria dos ensaios da instrumentação descrita neste trabalho de tese. Através de programas executados no microcomputador que controla a Bancada, é possível escolher a velocidade de giro de um eixo na faixa de 0 a 2000 rpm e o torque a ele aplicado na faixa de 5 a 70 Nm.

Na figura 2.17 apresenta-se um diagrama em blocos da Bancada e de seu controle computadorizado. Na figura 2.18 mostra-se uma vista superior da Bancada para ensaio de torquímetros onde são visíveis os aspectos mecânicos da mesma.

A bancada propriamente dita é constituída de uma base retificada, semelhante a um barramento de um torno mecânico (vide foto nº 1). Sobre esta base estão montadas plataformas corrediças que sustentam os mancais com eixos, polias de tração e flanges de acoplamento.

Lateralmente, conforme a figura 2.18, está disposto o motor de tração (10 cv) e também o alternador (7,5 kW) que atuará como carga do sistema, provocando a existência de torque no eixo.

A instrumentação eletro-eletrônica do sistema pode controlar, de forma programável, tanto a velocidade do motor, através do conversor de frequência, como o torque aplicado ao eixo, através das cargas elétricas resistivas ligadas ao alternador.

O torquímetro padrão é o modelo T30FN da HBM^[28] que possui condicionador de sinais específico (MT3555), fornecendo como saída, sinal analógico de torque e sinal digital de velocidade.

Os interfaces (AD, DA e ON/OFF) fazem a conexão da instrumentação de medição e controle com o microcomputador que gerencia o sistema.

Através de programas específicos, residentes no microcomputador, efetua-se a programação da velocidade e torque desejados para o ensaio do torquímetro sob teste.

Conforme pode-se observar, a Bancada, pela sua concepção mecânica, permite a instalação de qualquer dispositivo girante, tal como um eixo, um flange ou mesmo um sistema de engrenagens. Assim, foi possível instalar um eixo de diâmetro adequado, colar nele extensômetros de resistência elétrica e

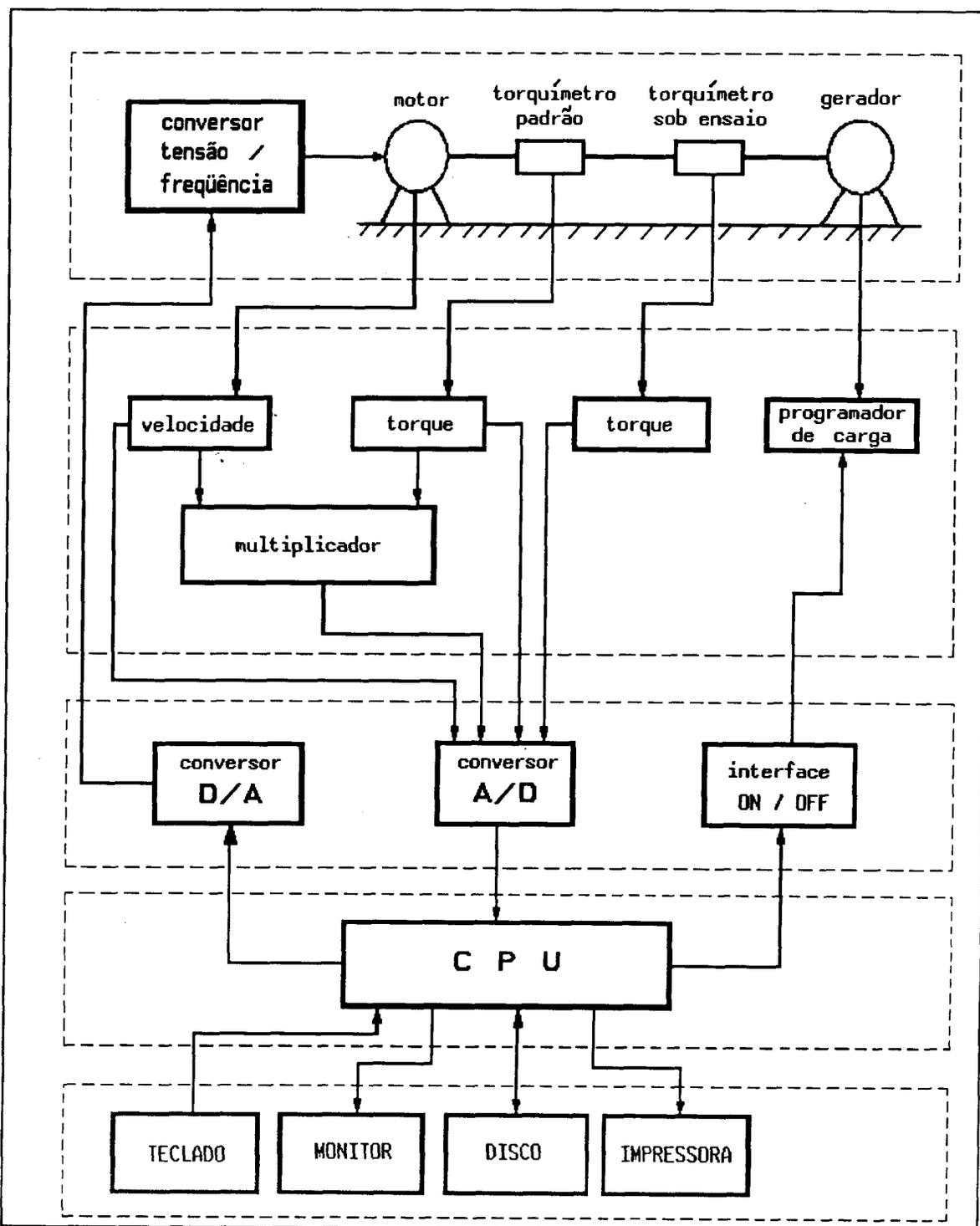


Figura 2.17- Diagrama em blocos da bancada computadorizada para ensaio de torquímetros girantes.

verificar a desempenho da instrumentação disponível para medição direta de torque. Neste dispositivo, há até mesmo a possibilidade de aferição estática ou em movimento por comparação com o torquímetro padrão já existente.

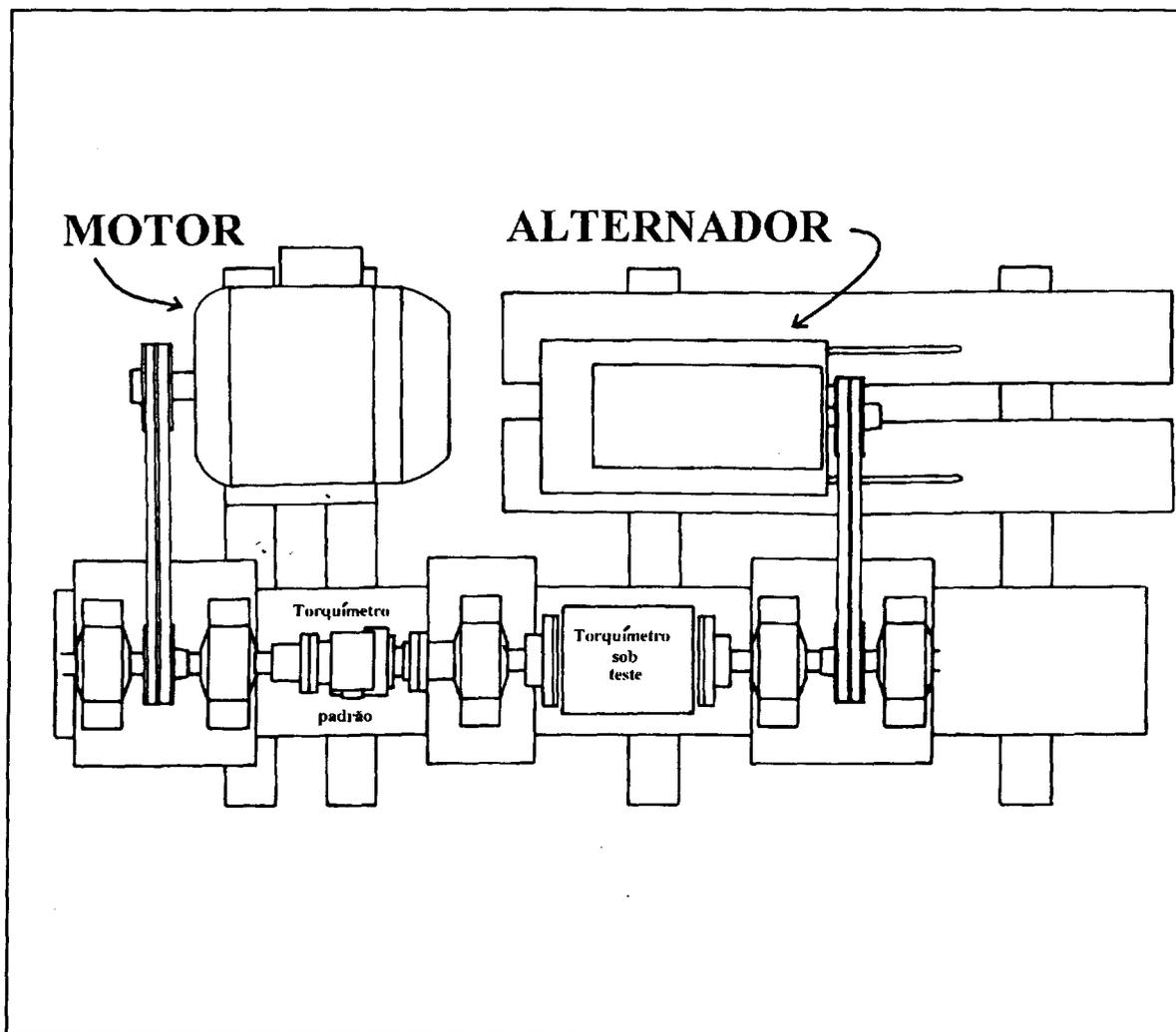


Figura 2.18- Vista superior da bancada, para ensaio de torquímetros.

Na figura 2.19 mostra-se a curva de calibração estática da bancada utilizando o torquímetro padrão (T30FN/HBM). Nesta figura representa-se o sinal obtido na saída do condicionador (MD3555) em função do torque aplicado. Observa-se que o canal de medição tem uma função de transferência linear com uma sensibilidade de 100 mV/Nm. Conclui-se que, para 100 Nm, o sinal elétrico na saída, será igual a 10 Volts, valor que corresponde ao fundo de escala. Como a sensibilidade adimensional do T30FN é de 2 mV/V (especificada pelo fabricante) e, supondo que a tensão de excitação da ponte de extensômetros (contida no T30FN) seja de 5 Volts, pode-se calcular que, para o fundo de escala, o sinal de desbalanço corresponderia a 10 mV. Isto exigiria do canal de medição um ganho de 1000 vezes.

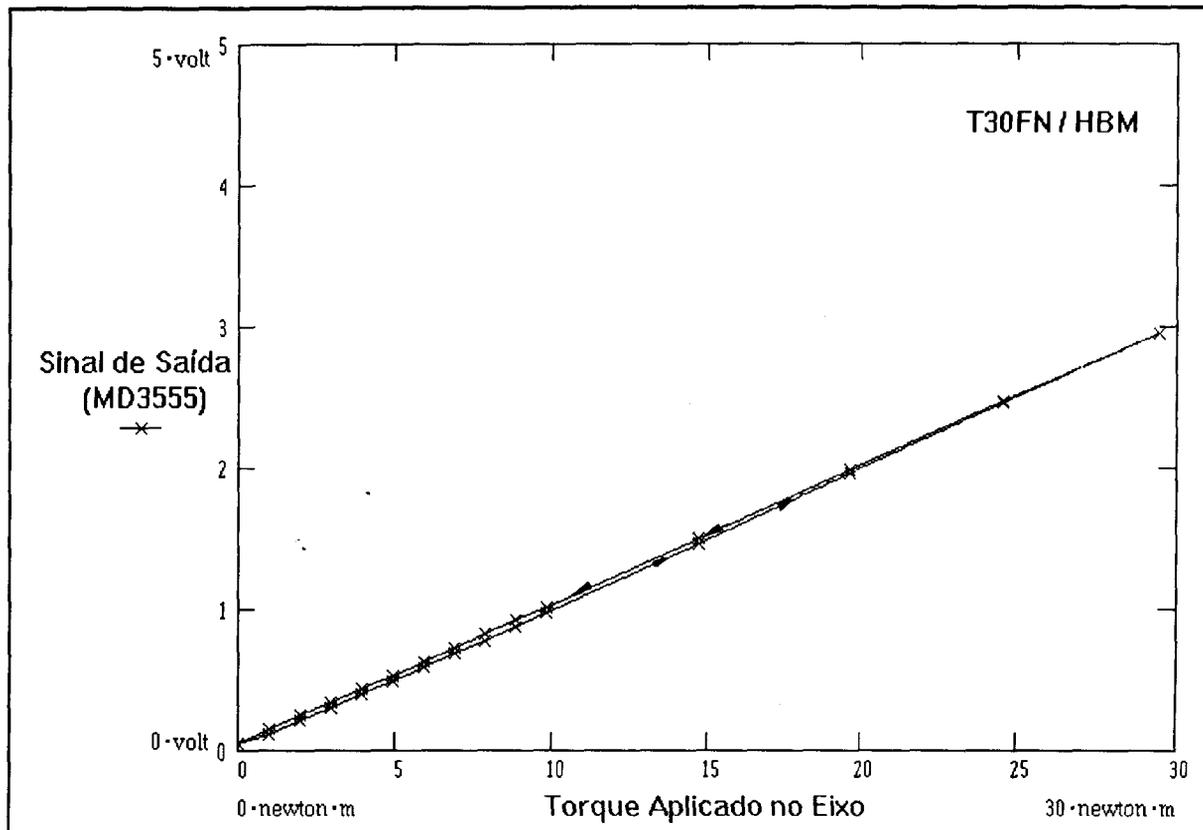


Figura 2.19- Calibração estática da bancada através do T30FN/HBM. Analiticamente: $\tau \text{ (Nm)} \approx 10 V_0 \text{ (Volts)}$

Na figura 2.20 mostra-se o sinal de saída obtido com o T30FN quando o eixo da bancada é posto a girar em uma velocidade de 1.200 rpm. Devido a carga exercida pelo alternador que alimenta um conjunto de lâmpadas, aparece no eixo um torque correspondente. O torque aplicado ao eixo é nitidamente pulsante, em função de que o motor é acionado por um inversor de frequência ajustável e de eventuais desalinhamentos e desbalanços das massas girantes que funcionam como carga no eixo. Este comportamento mecânico pode ser avaliado na figura 2.20. Tendo-se em conta a calibração estática efetuada anteriormente, pode-se afirmar que o torque, quando o eixo da Bancada gira a uma velocidade de 1200 rpm, é pulsante e tem uma amplitude de oscilação de aproximadamente 9 Nm. Neste ensaio dinâmico o zero foi propositadamente deslocado para que se pudesse observar plenamente a amplitude da oscilação.

Para teste do sistema BLM, instalou-se na Bancada de Ensaio de torquímetros, um eixo de 30 mm de diâmetro e

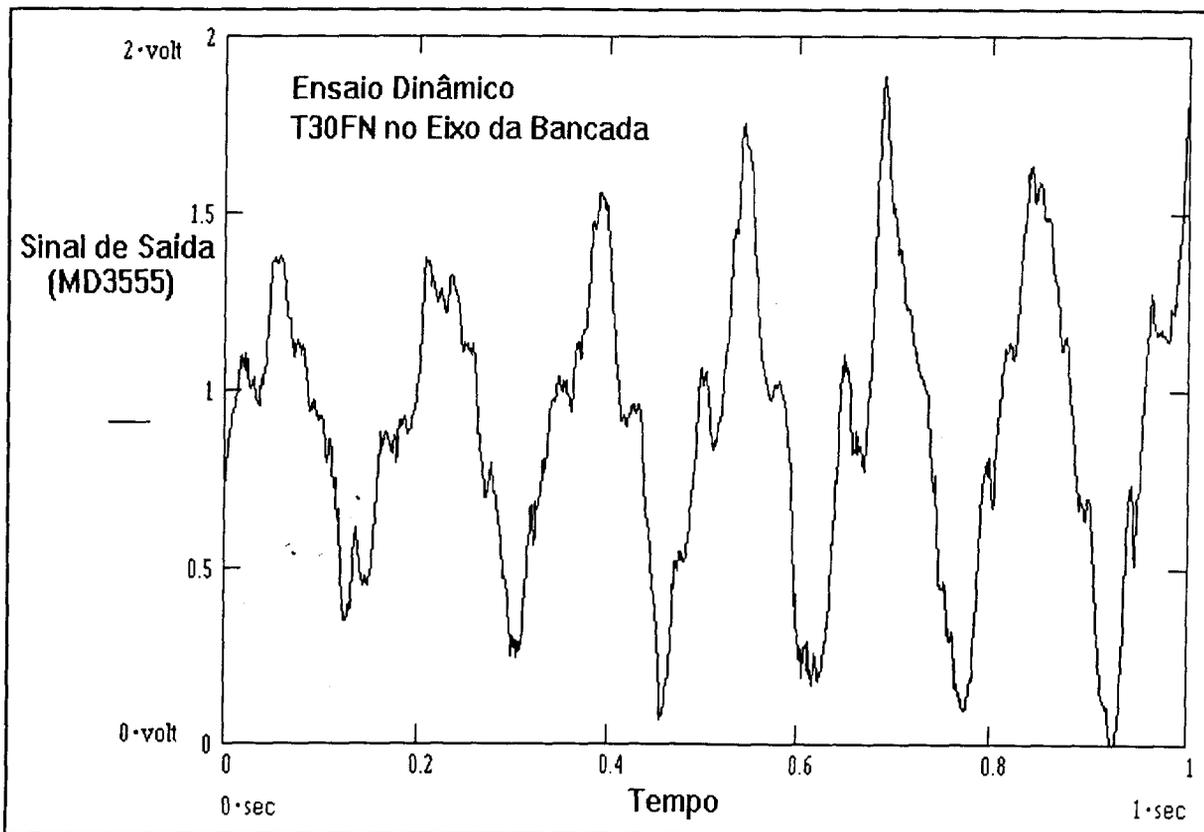


Figura 2.20- Ensaio dinâmico do T30FN no eixo da bancada de ensaios.

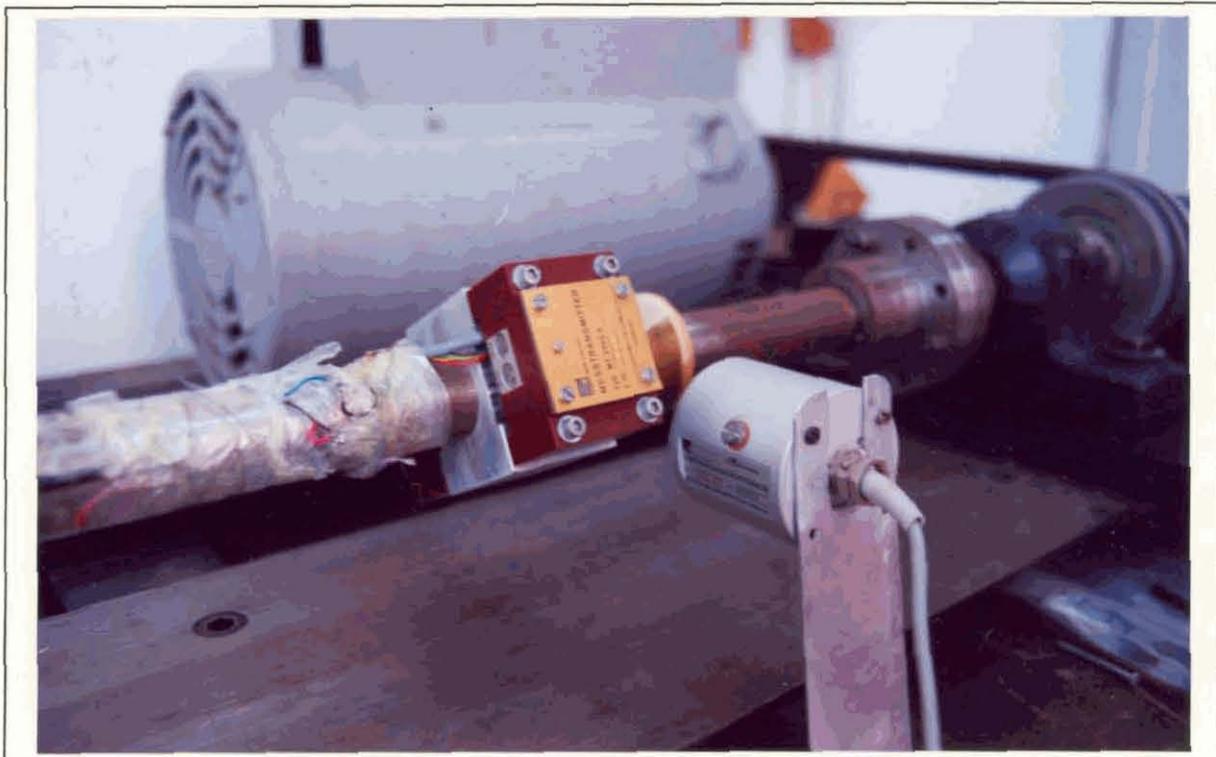
comprimento de 60 cm. Este eixo foi instrumentado com 2 extensômetros, tipo "espinha de peixe", de 120Ω e $k \approx 2$.

Ligando-se os extensômetros em um circuito tipo ponte, o mesmo foi conectado no MTM 2555A da HBM (vide foto nº 2).

Realizaram-se então ensaios estáticos e dinâmicos para verificar o desempenho do sistema BLM na medida direta de torque.

2.5.2- Calibração estática

Na figura 2.21 mostra-se o sinal elétrico obtido em função do torque aplicado ao eixo da bancada com a instrumentação BLM/HBM montada no mesmo eixo. A aplicação de torque estático ao eixo foi realizada da mesma forma que para o ensaio do T30FN. Também como anteriormente na figura 2.21, optou-se por apresentar o sinal elétrico de saída em função do torque aplicado ao eixo ensaiado. Nestas condições a taxa de variação do sinal de saída



Fotografia nº 2- Vista da instrumentação BLM/HBM montada num eixo de 30mm na bancada.

obtido foi de 40 mV/Nm.

2.5.3- Ensaio dinâmico

Na figura 2.22 mostra-se o sinal elétrico obtido com o sistema BLM/HBM e com a bancada sob carga dinâmica (motor da bancada girando a 1.200 rpm). Também aqui as condições foram as mesmas que se aplicaram ao ensaio dinâmico do T30FN.

Considerando-se os resultados dos dois ensaios dinâmicos, observa-se que o sinal elétrico gerado pelo sistema BLM está bastante contaminado com ruído. Como se poderá verificar também em outra aplicação descrita posteriormente, a imunidade ao ruído do MT2555A deixa a muito a desejar.

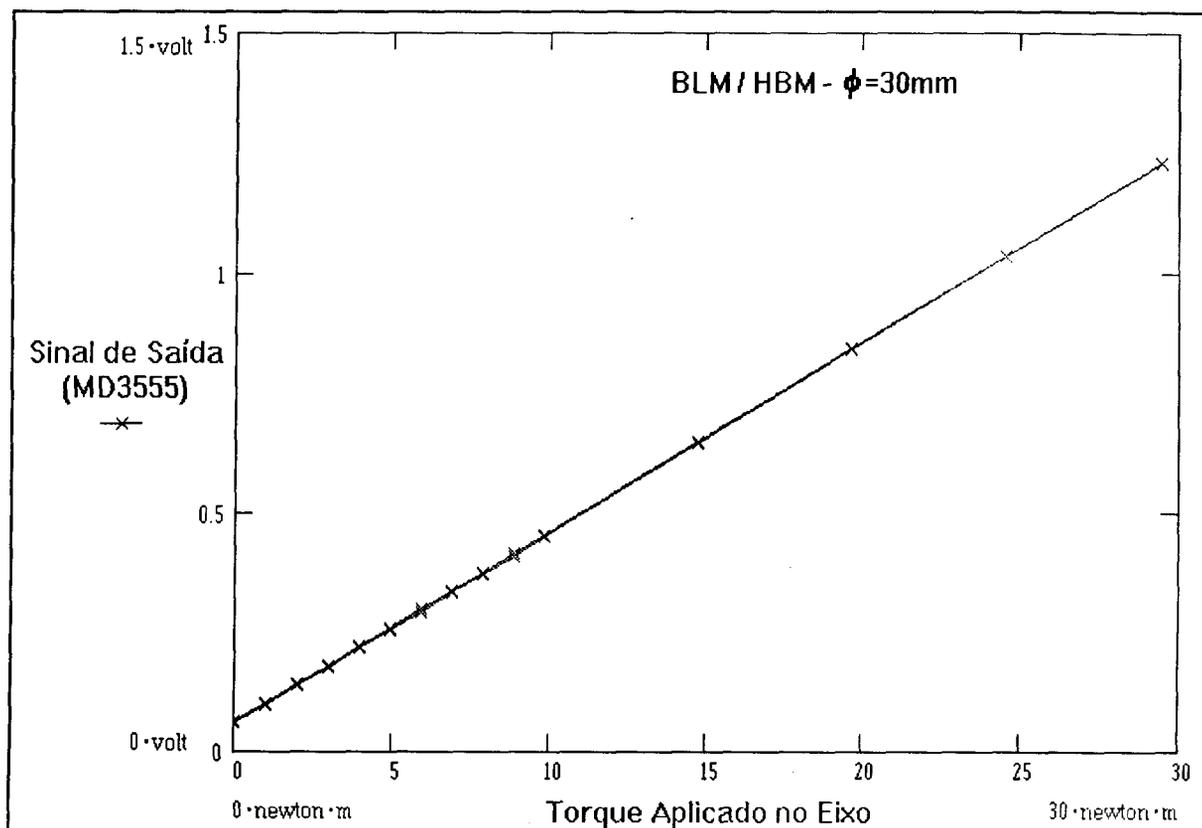


Figura 2.21- Ensaio estático do sistema BLM na medida direta de torque num eixo de 30 mm na bancada de ensaios.

2.6- LIMITAÇÕES ENCONTRADAS

Considerando os dados técnicos do sistema BLM (manual do fabricante) verifica-se que, na melhor das hipóteses o mesmo pode tratar sinais de desbalanço desde 0,5 mV/V que correspondem ao valor de fundo de escala da grandeza medida. Para transmissão do sinal de desbalanço, o mesmo é convertido em uma variação de frequência de 5 kHz, centrada em 10 KHz, com uma incerteza de ± 25 Hz. Exemplificando:

1- A um desbalanço de $\pm 0,5$ mV/V corresponderá um sinal de 10 kHz \pm (5 kHz \pm 25 Hz).

2- A incerteza do sistema de medição estará limitada a ± 25 Hz, ou 0,5%, que corresponderá a $\pm 0,0025$ mV/V.

3- Considerando ainda que um desbalanço de 0,5 mV/V, numa ponte completa, de extensômetros com $K = 2$, corresponde a uma

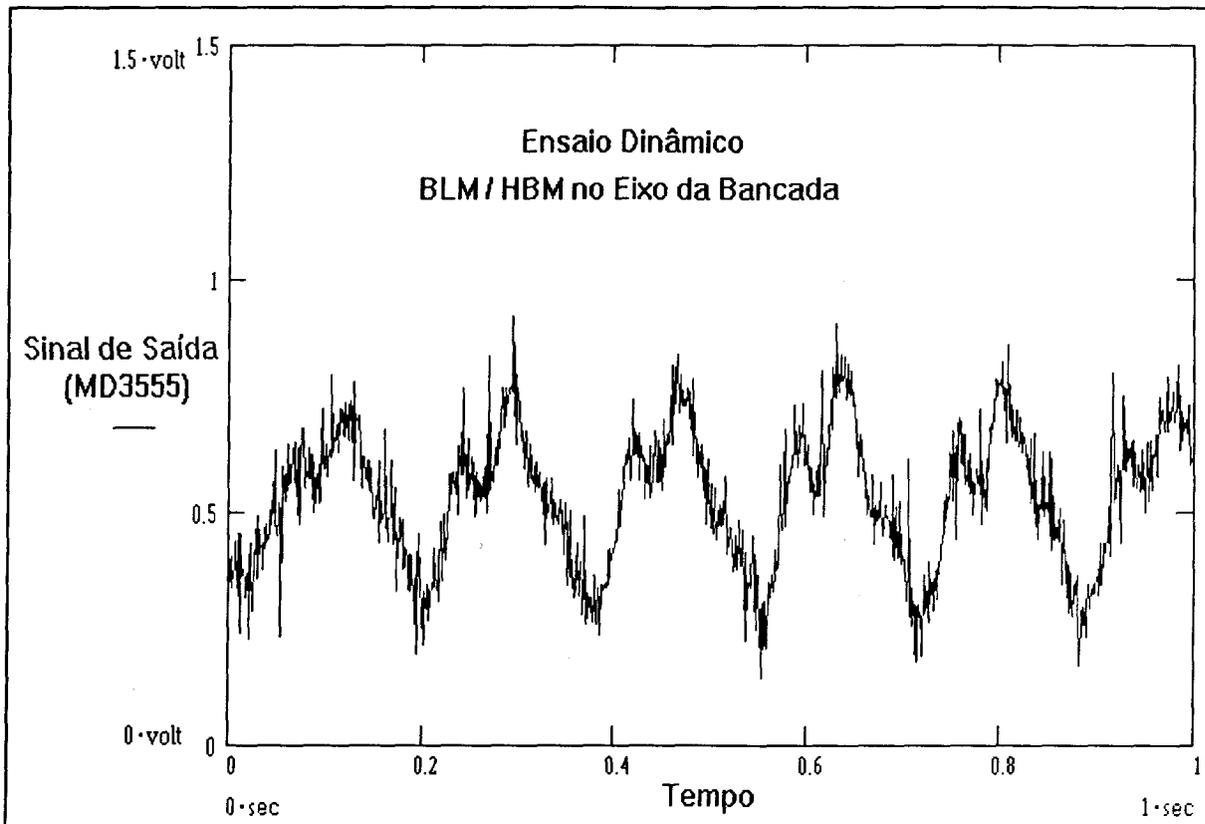


Figura 2.22- Ensaio dinâmico do sistema BLM/HBM no eixo de 30 mm da bancada de ensaios.

deformação de $250 \mu\text{m/m}$, pode-se concluir que a incerteza de $\pm 0,0025 \text{ mV/V}$ corresponderá a $\pm 1,25 \mu\text{m/m}$.

Em princípio este sistema parece razoável.

Considerando-se a incerteza calculada e a resolução obtida na calibração estática (figura 2.21), o sistema BLM até poderia ser utilizado em substituição a um torquímetro. Ocorre no entanto que em elementos girantes de sistemas mecânicos industriais, dificilmente ter-se-á oportunidade de obter uma deformação da ordem de $250 \mu\text{m/m}$ (previstos como fundo de escala para o sistema BLM). Para verificar esta afirmativa, basta lembrar os elevados coeficientes de segurança utilizados nos projetos destes elementos, uma vez que devem ser considerados todos os aspectos do regime de trabalho de cada um deles (temperatura, vibrações, transitórios, fadiga, etc,...) [32].

Quanto à utilização específica do sistema BLM para medição de torque, pode-se realizar um cálculo demonstrativo básico utilizando a expressão (2.7) que traduz a deformação

relativa " ϵ " na superfície de um eixo circular de diâmetro "D", quando nele se aplica um torque " τ "^[2].

Aplicando-se esta expressão a um eixo de aço ($E = 21.000 \text{ kgf/mm}^2$, $\nu = 0,3$) de 30 mm de diâmetro, tal como o montado na bancada, verifica-se que, para um torque de 0 a 50 Nm, ter-se-á uma deformação que varia entre 0 e $233,4 \text{ } \mu\text{m/m}$, no caso de uma ponte completa. Tal resultado indicaria uma deformação de $4,68 \text{ } \mu\text{m/m}$ (deformação relativa) por Nm (torque) aplicado no eixo. Esta deformação corresponde a um sinal elétrico de desbalanço de apenas $9,33 \text{ } \mu\text{V/V}$ por Nm (veja expressão 2.19).

Os resultados práticos das medidas demonstram claramente a falta de resolução do sistema BLM para aplicações em eixos de diâmetros mais elevados com torques mais baixos do que os considerados neste exemplo. Comparem-se os níveis dos sinais de saída obtidos com o T30FN e com o BLM (figuras 2.19 e 2.21). O sistema BLM é 2,4 vezes pior que o T30FN.

Considerando-se o interesse em medir o torque diretamente no eixo de um motor trifásico de 10 cv, de quatro polos que possui 38 mm de diâmetro, pode-se aplicar a expressão 2.7 para calcular a deformação relativa. Ao girar na sua velocidade nominal (1800 rpm), o torque desenvolvido no eixo é de aproximadamente 40 Nm. Supondo que o eixo é de aço com $E = 21000 \text{ kgf/mm}^2$ e $\nu = 0,3$ ter-se-á pela equação (2.7) $\epsilon = 19,65 \text{ } \mu\text{m/m}$. Utilizando-se uma ponte de extensômetros poder-se-ia atingir uma deformação de até $78,6 \text{ } \mu\text{m/m}$ que corresponderia a um sinal de desbalanço de até $0,157 \text{ mV/V}$, valor 3,7 vezes menor que os $0,5 \text{ mV/V}$ previsto pelo sistema BLM como fundo de escala. Esta deformação corresponde a um sinal de desbalanço de $3,92 \text{ } \mu\text{V/V}$ por Nm.

A solução seria tentar aumentar a deformação do eixo através da usinagem do mesmo com o objetivo de reduzir seu diâmetro. Criar-se-ia assim uma zona de concentração das deformações onde deveriam ser colados os extensômetros. Tal solução é a que se emprega na confecção dos elementos de mola dos torquímetros rotativos. Isto porém reduz drasticamente o coeficiente de segurança do sistema mecânico como um todo (nos torquímetros rotativos o coeficiente adotado é aproximadamente 3

enquanto que em projetos mecânicos de motores elétricos, em que as condições de serviço são bastante severas, este coeficiente chega a 60 ou mais).

Um outro aspecto a considerar é que a tensão utilizada, para excitar a ponte de extensômetros, será no máximo igual a 10 Volts, em função da sobrecarga de corrente e mesmo da dissipação térmica dos extensômetros. Deste modo, o sinal elétrico de desbalanço correspondente a 1Nm seria de $22,5 \mu\text{V/V}$, enquanto que a incerteza (Vide ítem 3 das considerações iniciais anteriores), leva a uma tensão de $\pm 0,025 \text{ mV}$ ou seja $25 \mu\text{V}$. É ainda preciso considerar que, num ambiente industrial, o sinal elétrico correspondente ao ruído talvez seja, no mínimo, dez vezes maior do que isto, ou seja $250 \mu\text{V}$. Tal nível de ruído inviabilizará qualquer medida caso não haja um condicionador de sinais, ou mesmo um pré-amplificador com um sistema síncrono de recuperação de sinal da ponte de extensômetros.

No ensaio dinâmico do sistema BLM verifica-se o aparecimento de um ruído já bastante apreciável, da ordem de 0,25 Volts superposto ao sinal de saída (vide figura 2.22).

Segundo dados do fabricante, o MT2555 A é um circuito amplificador e conversor tensão-freqüência que é controlado pela tensão de desbalanço da ponte. Supõe-se que a excitação da ponte de extensômetros seja feita em fonte de corrente. Assim, mesmo que haja uma variação da carga da bateria utilizada para alimentá-lo, não haveria variação na tensão de desbalanço da ponte, nem na freqüência correspondente à esta. Sendo porém uma fonte de corrente um dispositivo de alta impedância, será certamente suscetível a ruído elétrico induzido sob forma de tensão. Este irá também modular o sinal de desbalanço da ponte, superpondo-se ao sinal de interesse. Ocorre ainda que, havendo variação da fonte de energia que alimenta o MT2555 A, haverá também variação na amplitude do sinal transmitido ao Amplificador Receptor (EV2510 A), já que o próprio MT2555 A possui um transmissor de sinais. Logicamente isto acarretará uma diminuição da potência do sinal transmitido e, por conseqüência, uma menor imunidade ao ruído do sistema como um todo.

Como se verificará no capítulo 4 (ítem 4.6), a

utilização sistema BLM, medindo torque no eixo de um motor, é algo inviável em função do ruído eletromagnético existente. Este se superpõe ao sinal elétrico de desbalanço da ponte de extensômetros, ocasionando uma perturbação que impede qualquer medida dinâmica com o sistema BLM.

3- CAPÍTULO 3: O SISTEMA ELETRO-ELETRÔNICO PROPOSTO PARA MEDIÇÃO DIRETA DE TORQUE

3.1- CARACTERÍSTICAS DE PROJETO

A instrumentação que aqui se apresenta foi projetada para a medição direta do torque em qualquer sistema girante (eixos, engrenagens, polias, etc,...), através da instalação de extensômetros de resistência elétrica em pontos adequados das peças girantes, onde ocorram deformações elásticas de no mínimo $10 \mu\text{m/m}$, quando o carregamento é máximo. Desta forma as próprias partes constituintes do sistema girante funcionam como "elemento de mola" do transdutor de torque, dispensando-se a instalação de torquímetros. Obviamente, além dos extensômetros, é necessária também a instalação de uma "eletrônica embarcada" na mesma peça girante, provendo-se a sua alimentação com a energia necessária e a retirada do sinal elétrico, proporcional ao torque, através de acoplamento apropriado.

Para atender aos requisitos da medição direta de torque em dispositivos girantes, foi necessário desenvolver uma instrumentação específica que superasse as limitações já descritas dos sistemas existentes^[47].

Na figura 3.1 apresenta-se um diagrama em blocos detalhado do sistema de medição proposto. Em princípio foi desenvolvido um Pré-condicionador que é um amplificador síncrono. Este deve ser instalado no eixo girante, tão próximo quanto possível da ponte de "strain gages". Assim é possível recuperar o pequeno sinal elétrico de desbalanço disponível, devido à pequena deformação dos elementos girantes constituintes dos sistemas mecânicos, onde se deseja medir o torque aplicado, com grande imunidade ao ruído elétrico.

A técnica empregada é conhecida como "lock-in" na bibliografia especializada^[39]. Esta é a técnica recomendada quando se deseja amplificar pequenos sinais elétricos imersos em um ambiente ruidoso. Quando se utilizam amplificadores de corrente contínua para pequenos sinais, há, além do ruído, um

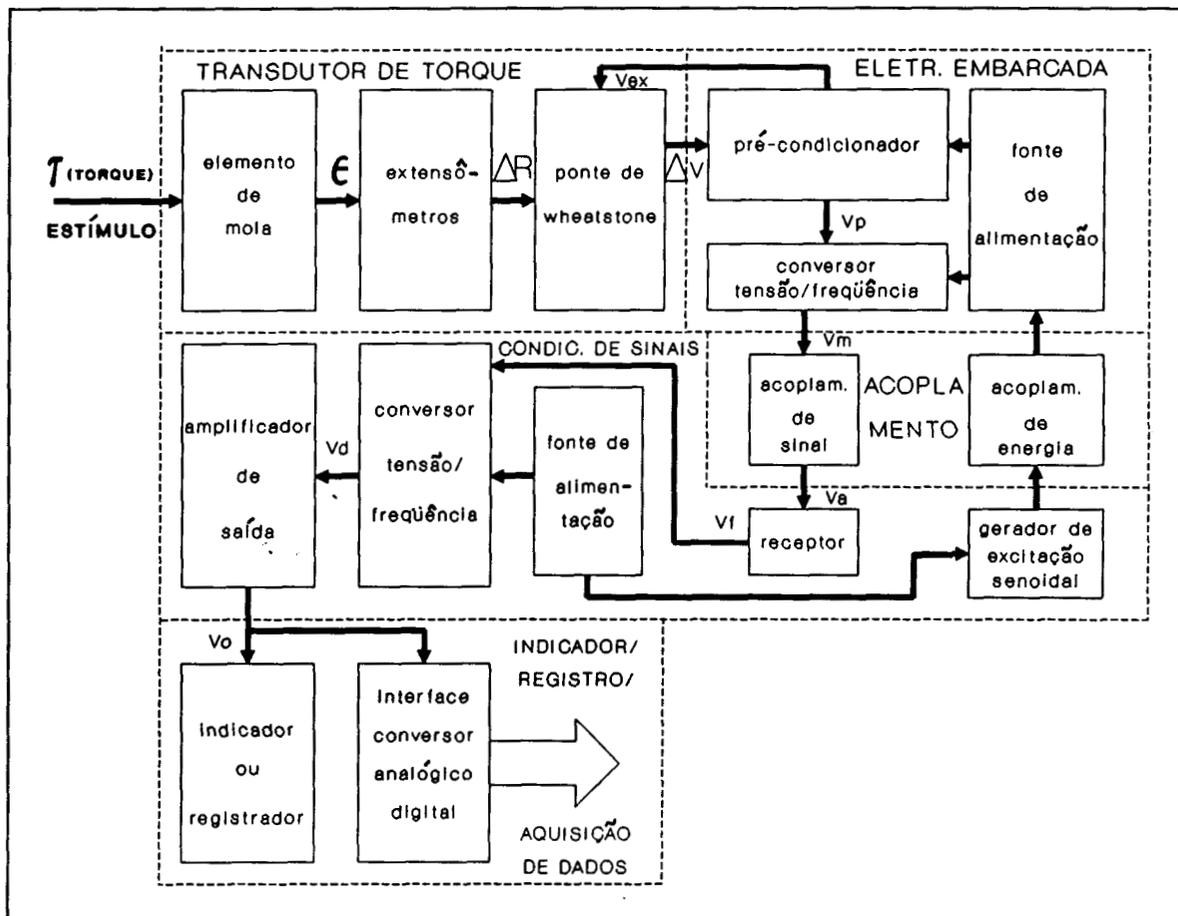


Figura 3.1- Diagrama em Blocos do sistema de medição proposto

problema sério com os "offsets" e "drifts" da eletrônica empregada. Estes variam grandemente com a temperatura e fazem surgir, no sinal elétrico que está sendo medido, flutuações de baixa frequência que determinam perda da estabilidade.

De um modo geral os amplificadores síncronos permitem que se amplifiquem sinais extremamente débeis em comparação com o ruído elétrico inerente a ambientes industriais, ou mesmo em laboratórios de pesquisa. No entanto esta capacidade não pode ser superestimada, já que, em algumas situações, o nível de ruído, correspondente ao ruído térmico, pode atingir um valor bem maior do que o sinal de interesse. Também não se pode subestimar o ruído que penetra pelo próprio transdutor, ou então sinais de interferência, que não podem ser eliminados. Estes casos ainda aguardam solução, nem mesmo a amplificação e detecção com sistemas síncronos garantiriam isenção, ou mesmo atenuação, da

influência de ruído.

No caso de pontes de extensômetros, montados sobre eixos metálicos condutores, é possível o uso de excitação síncrona, com um sinal senoidal de frequência definida. Isto imprime no sinal de desbalanço a mesma forma de onda modulada em amplitude. Com um amplificador sintonizado e um detector síncrono, recuperam-se as variações de amplitude que correspondem ao sinal de interesse, diminuindo-se grandemente a interferência de sinais espúrios. Também a blindagem dos extensômetros é possível de ser efetuada, bem como a aproximação do condicionador à ponte.

Além do amplificador síncrono, houve necessidade de desenvolver-se também um meio de transferir energia para a "eletrônica embarcada", o que pode ser efetuado com transformador rotativo, por acoplamento com anéis e escovas, ou ainda com a utilização de duas baterias de 9 Volts, quando isto for possível.

Também foi construído um modulador em frequência (Conversor Tensão-Frequência) do sinal de saída do amplificador síncrono, para que o mesmo pudesse ser transferido sem contato elétrico, empregando-se acoplamento com antena para transmissão da frequência modulada.

O restante da instrumentação utilizada (Receptor e Conversor frequência-tensão) é da HBM (EV2510 e MD3555). Isto permite que se faça uma comparação do desempenho da instrumentação projetada e construída com aquela anteriormente disponível no mercado.

O projeto, o modelamento e o ensaio do transformador rotativo empregado no sistema de medição também foi objeto de estudo desta tese. No Apêndice C estão apresentados alguns modelos para os transformadores rotativos, bem como alguns resultados experimentais de projetos já executados.

O sinal analógico obtido na saída do MD3555 é aplicado a um interface conversor Analógico/Digital de 12 bits conectado ao microcomputador PC que controla a Bancada de Torque. Através do programa "DIGSCOPE" [42], os sinais elétricos proporcionais ao torque podem ser visualizados na tela e armazenados em disco para posterior tratamento matemático. Todos os sinais adquiridos foram

tratados através do aplicativo "MATHCAD".

A Função de Transferência global do Canal de Medição pode ser obtida através das funções de cada bloco funcional da instrumentação que se construiu.

Na saída do Transdutor de Torque, conforme já se descreveu em 2.3.1 (expressão 2.16 particularizada para elemento elástico cilíndrico):

$$\frac{\Delta e_0}{V} = k \epsilon_0 \frac{\tau}{\tau_n} \quad (3.1)$$

onde "V" é a tensão de excitação da ponte, "k" é a sensibilidade do extensômetro, " ϵ_0 " a Sensibilidade Intrínseca do material, " τ " o torque aplicado e " τ_n " o torque nominal. Introduzindo nesta expressão os parâmetros geométricos do elemento de mola cilíndrico, a mesma transforma-se em:

$$\frac{\Delta e_0}{V} = k \frac{16\tau(1+\nu)}{E\pi D^3} \quad (3.2)$$

O Pré-Condicionador multiplica as variações de tensão disponíveis na saída do transdutor de modo que:

$$V_p = A_p \Delta e_0 \quad (3.3)$$

onde " A_p " é o ganho do Pré-Condicionador.

O Conversor Tensão-Freqüência apresenta na saída um sinal de tensão cuja forma de onda é retangular com freqüência dada por:

$$FM = f_0 + \frac{A_p \Delta e_0}{KM} \quad (3.4)$$

onde f_0 é a frequência central e "KM" é o fator de conversão (Volts/Hertz).

O sinal de saída do conversor tensão/frequência é transmitido ao receptor. Este perfaz a conversão inversa (frequência/tensão) fornecendo uma saída dada por:

$$V_d = KM' (f_0 + V_p/KM) - V_z \quad (3.5)$$

onde KM' é o fator de conversão frequência tensão e V_z é o ajuste de zero. Procura-se obter:

$$KM' f_0 = V_z \quad (3.6)$$

de tal forma que:

$$V_d = \frac{KM}{KM'} V_p \quad (3.7)$$

Por último, o amplificador de saída amplifica o sinal dando:

$$V_0(t) = A_a V_d(t) \quad (3.8)$$

A Função de transferência completa, particularizada para geometria cilíndrica do elemento de mola, será então:

$$V_0(t) = A_a A_p \frac{KM}{KM'} V k \epsilon_0 \frac{\tau}{\tau_n} \quad (3.9)$$

A função de transferência completa sem particularizar a geometria do elemento de mola seria obtida pela substituição da equação (2.16) na (3.9):

$$V_0(t) = A_a A_p \frac{KM}{KM'} V S_0 (1-\delta) \epsilon_0 k \frac{\tau}{\tau_n} \sum_{j=1}^4 (n_j) (-1)^{(j+1)} \quad (3.10)$$

Verifica-se pois que deve-se buscar maximizar " ϵ_0 " (o que é obtido pela escolha adequada do material da peça girante) e os n_j (pela escolha do local onde os extensômetros serão colados).

Os ganhos do Amplificador de Saída (A_a), do Pré-Condicionador (A_p) e os fatores de conversão frequência tensão KM e KM' devem ser estáveis mesmo que ocorram variações de temperatura. O ganho A_p deve ser ajustado para um valor adequado ao sinal elétrico obtido em função das deformações do elemento elástico (no projeto da instrumentação construída previu-se ajuste até 20.000 vezes).

Também a tensão de alimentação da ponte de extensômetros (V) deve ser estável e de amplitude adequada para não sobrecarregar os mesmos (na instrumentação construída previu-se 5 Volts).

O valor de " k " na expressão (3.1) é definido pelo tipo de extensômetro utilizado. No caso dos "strain gages" convencionais (filme metálico) $k \approx 2$.

Com a "Bancada Computadorizada Para Ensaio De Torquímetros Girantes"^[31] existente no INMETAL, teve-se a possibilidade de ensaiar toda a instrumentação aqui proposta. Para tal finalidade uma série de procedimentos de ensaio foram desenvolvidos e implementados em "software" e "hardware".

Finalmente ainda buscou-se que toda a "eletrônica

embarcada" pudesse ser instalada facilmente em eixos girantes, sem ocupar muito espaço e sem provocar perturbação significativa nos dispositivos mecânicos a serem ensaiados.

3.2- DESCRIÇÃO DOS CIRCUITOS ELETRÔNICOS DESENVOLVIDOS

O diagrama em blocos do pré-condicionador está mostrado na figura 3.2. A seguir passa-se a descrição de cada um dos blocos constituintes do pré-condicionador, desenvolvido para operar fisicamente instalado na parte girante do sistema mecânico ensaiado. Estes circuitos são referidos no texto, de uma forma genérica como "Eletrônica Embarcada".

Todos os circuitos estão montados em três placas de circuito impresso com formato retangular de dimensões iguais a: comprimento: 15 cm; largura: 3 cm. Tais dimensões e formato permitiriam a instalação das mesmas num eixo girante ou numa placa girante junto a uma polia fixada no eixo de um motor elétrico (foto nº 3). Não houve preocupação em otimizar o "lay-out" dos circuitos já que tratava-se de um protótipo. Acredita-se que uma vez validada esta tese, possa haver um trabalho de engenharia de produto que leve a um conjunto bem mais compacto (vide capítulo 5).

3.2.1- Oscilador e Amplificador de Potência

Estes circuitos estão mostrados na figura 3.3. O oscilador construído baseia-se num circuito tipo ponte de Wien sintonizado para oscilar numa frequência de 5 kHz. A escolha desta frequência foi determinada por duas razões básicas:

-Primeira: é a frequência mais utilizada por todos os condicionadores A.C. na área de extensometria (HBM, KIOWA, etc...). Justifica-se esta escolha pelos fabricantes em função de que esta frequência cai numa faixa de relativo "silêncio" em termos do espectro do ruído presente no ambiente industrial. Também pode-se demonstrar que os efeitos capacitivos, sempre

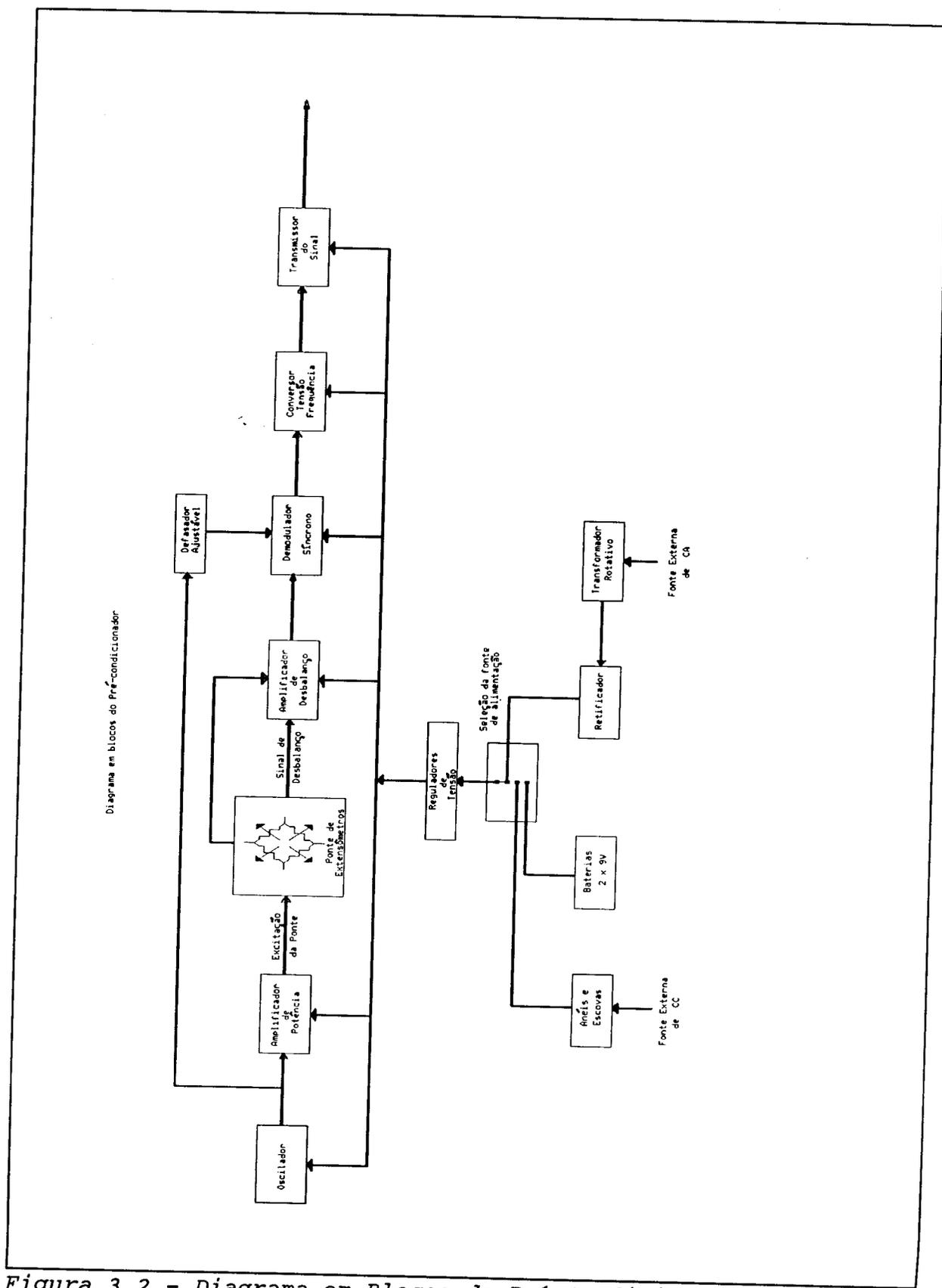
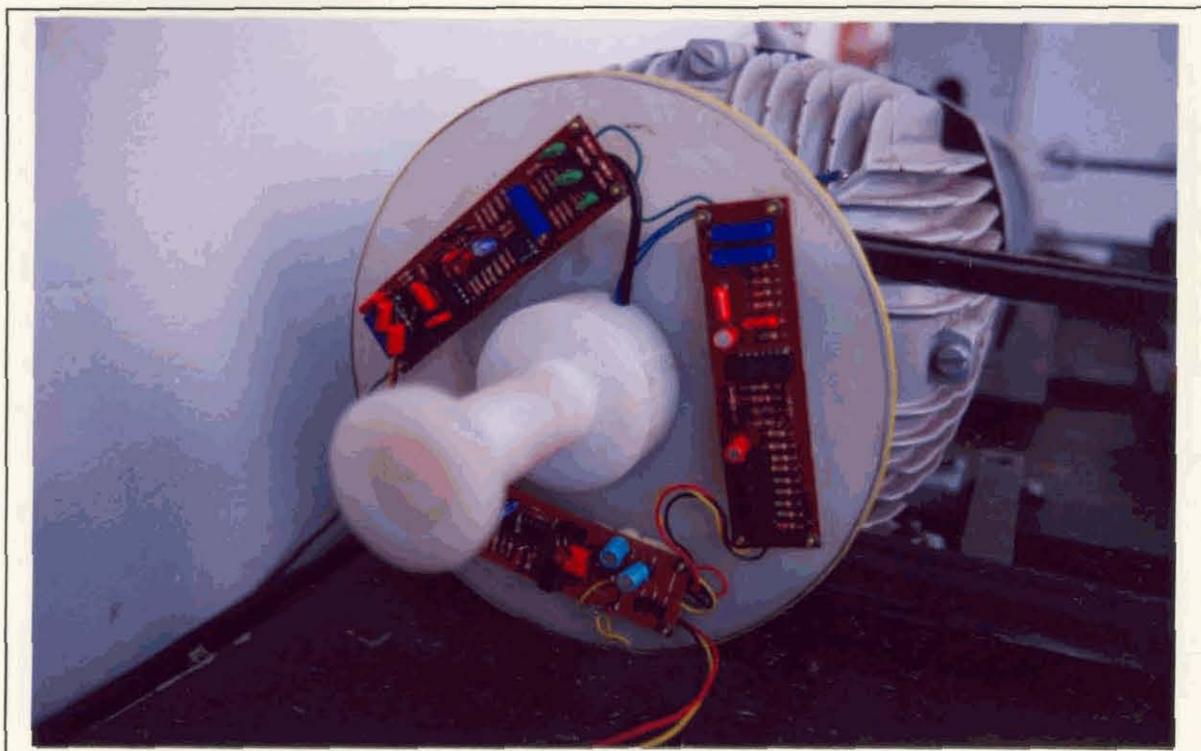


Figura 3.2 - Diagrama em Blocos do Pré-Condicionador



Fotografia nº 3- Pré-condicionador instalado em placa de "teflon" acoplado a polia junto ao eixo de um motor.

presentes em transdutores extensométricos, não serão tão acentuados por uma freqüência desta ordem de grandeza.

-Segunda: como na instrumentação construída, o conversor tensão-freqüência utilizado para transmitir o sinal de saída do pré-condicionador para o receptor, utiliza como freqüência central 10 kHz, modulado entre 6 e 16 kHz, esta freqüência (de 5 kHz) estaria fora do espectro utilizado na transmissão, não perturbando assim a recepção do sinal no EV2510 [30].

O amplificador de potência utiliza dois amplificadores operacionais, um inversor e outro não inversor, que excitam cada um, um par de transistores montados numa configuração complementar. Estes transistores incluídos no laço de realimentação "bufferizam" a excitação para a ponte de extensômetros admitindo "strain gages" de 120 Ω ou 350 Ω sem necessidade de qualquer modificação. Uma amostra do sinal do oscilador é retirada para o circuito do demodulador síncrono.

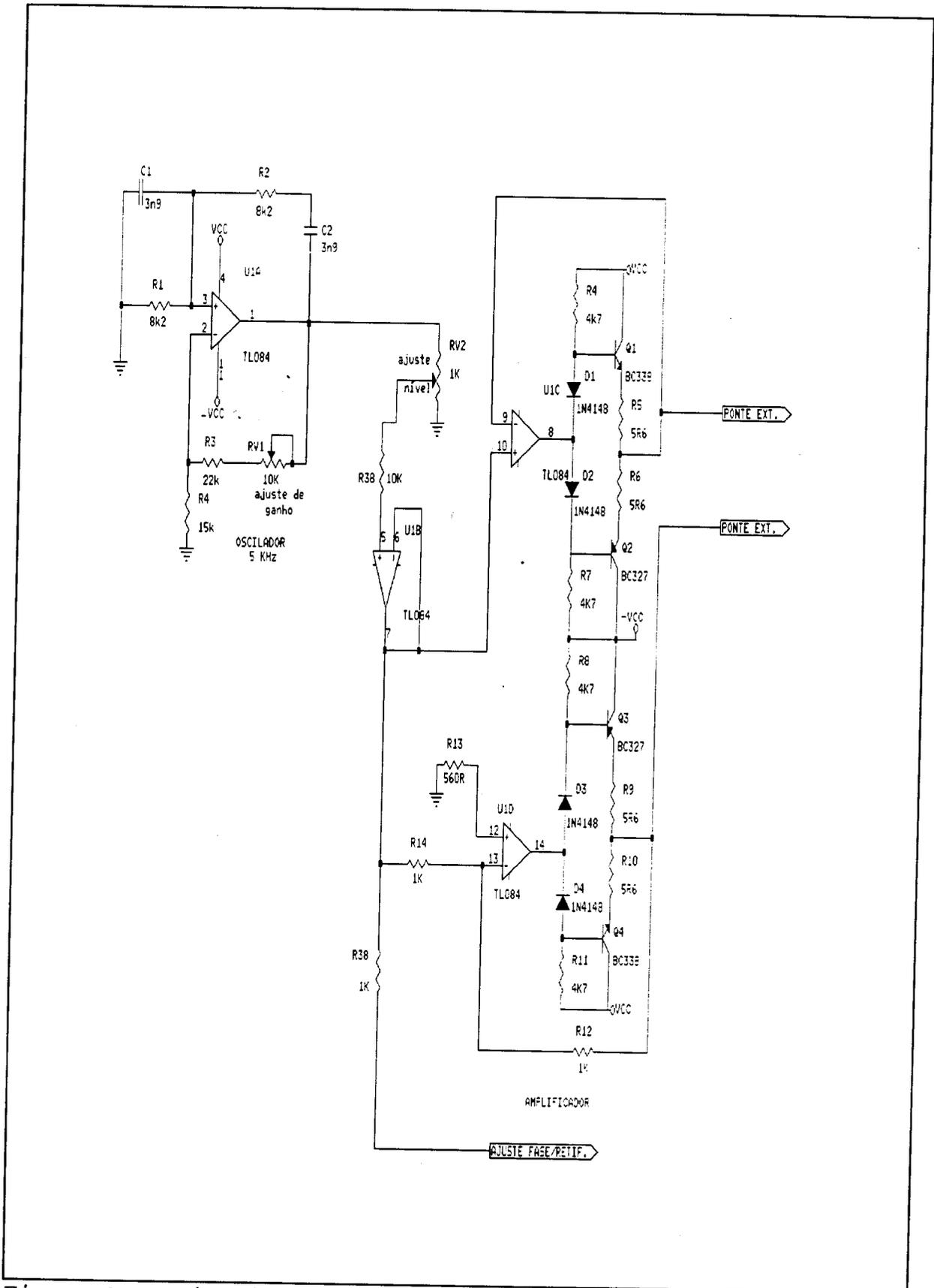


Figura 3.3- Circuito do oscilador e do amplificador de potência.

3.2.2- Amplificador de Desbalanço

O circuito do amplificador de desbalanço está mostrado na figura 3.4. É constituído basicamente de um amplificador de transcondutância CA3080. A entrada do circuito (pinos 2 e 3) pode ser ligada aos pontos de saída da ponte de extensômetros, ou a uma amostra do sinal de excitação (no caso de se desejar efetuar uma calibração ou um ajuste do circuito defasador) através dos "jumpers" JP1 e JP3.

O ganho do amplificador CA3080 é controlado pela corrente que entra no pino 5. Esta corrente é calculada por:

$$I = \frac{V_C - (V_{BE} - V_{CC}^-)}{47 k\Omega} \quad (3.10)$$

onde V_C é a tensão resultante da soma algébrica de uma tensão de referência ($V_{DZ1} = 5,1$ Volts) e do negativo de outra tensão (pino 8 do U3C), proporcional à amplitude da excitação da ponte de Extensômetros. Através desta corrente promove-se uma compensação do ganho diferencial que garante estabilidade do sinal de saída, mesmo que haja variação na tensão de excitação da ponte.

A expressão da tensão obtida sobre o resistor R24 da figura 3.4 é, segundo a ICAN-6668-RCA:

$$V_{R_{24}} = 27 \times 19,2 \times I \times \Delta V_i \quad (3.11)$$

Assim o ganho diferencial (A_D) que se obtém neste primeiro estágio é dado por:

$$A_D = \frac{V_{R_{24}}}{\Delta V_i} = 56 \quad (3.12)$$

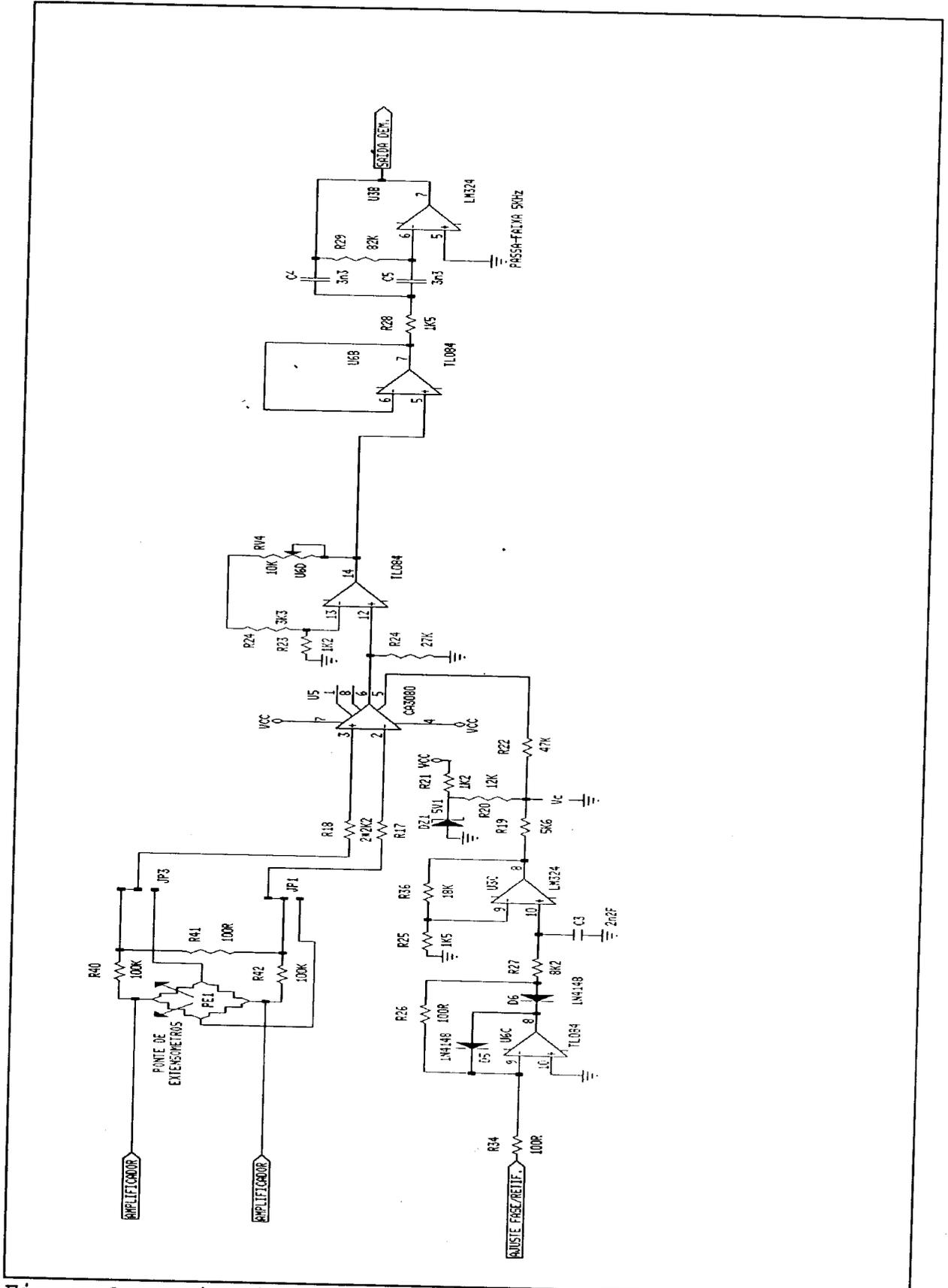


Figura 3.4- Circuito do amplificador de desbalanço.

O estágio seguinte é um amplificador não inversor com ganho ajustável de 4 a 10 vezes. Com o amplificador operacional U6B pode-se ainda, se for o caso, obter mais ganho. No circuito que está montado, ele serve apenas como "buffer" para o filtro passa-faixa constituído por U3B. O filtro tem a configuração do tipo "Ganho Infinito Realimentações Múltiplas (GIRM) centrado em 5 kHz com $Q=7,4$. Elimina-se assim toda e qualquer componente DC do sinal de interesse, não havendo qualquer influência de "drifts" e "off-sets" dos circuitos que antecedem ao filtro. Do mesmo modo, sinais espúreos de frequências diferentes da faixa de 5 kHz serão bastante atenuados em função da seletividade do filtro. O ganho total obtido no circuito até a saída deste filtro é de 4.800.

3.2.3- Demodulador Síncrono

Os circuitos da figura 3.5 mostram o demodulador síncrono e seu respectivo chaveamento com os comparadores (LM311), além do filtro passa-baixo na saída com uma frequência de corte de 1,5 kHz.

O circuito demodulador emprega um amplificador operacional (U6A) que tem sua operação controlada pelo arranjo de diodos (4 x 1N4148) chaveados pelos comparadores. Pode-se verificar que, se os diodos estiverem conduzindo, a entrada não inversora do operacional estará ligada à massa. Nestas condições o amplificador é um circuito inversor com ganho unitário. Quando os diodos estiverem cortados, o sinal de entrada ficará aplicado às duas entradas simultaneamente. Aplicando-se o princípio da superposição, vê-se que o ganho não inversor é 2 e o ganho inversor é 1. Logo o resultado final é um ganho não inversor unitário.

Sendo o chaveamento dos diodos realizado de forma sincronizada com o sinal de excitação da ponte de extensômetros, e procedendo-se um adequado ajuste de fase (RV5), o demodulador opera como um retificador de onda completa.

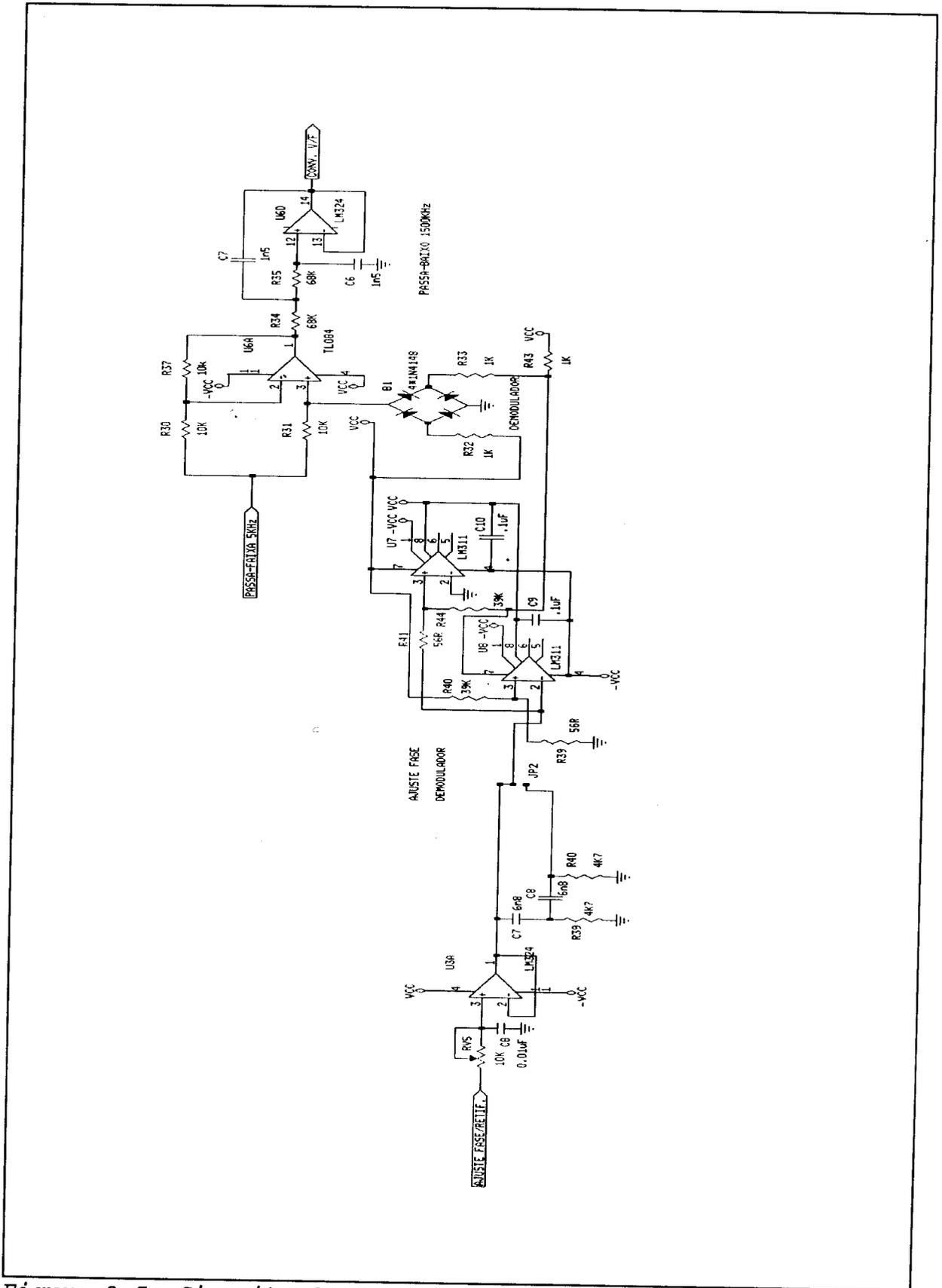


Figura 3.5- Circuito do demodulador síncrono.

O filtro passa-baixo utiliza a configuração "Salen-Key" realizando a integração do sinal de interesse.

Para uma deformação de $\pm 48 \mu\text{m/m}$, com a excitação de um sinal senoidal de 2,5 Volts de amplitude aplicado na ponte de extensômetros, obtém-se na saída deste filtro um sinal D.C. de $\pm 2,16$ Volts. Tal desempenho corresponde a um ganho total de 1800.

3.2.4- Conversor e Transmissor de Sinal

Para transferir o sinal de interesse da parte girante para o receptor EV2510 utiliza-se um conversor tensão/frequência constituído do circuito integrado LM566 (vide figura 3.6.) A frequência central de transmissão é de 10 kHz que corresponderia a um sinal de torque nulo. Tal comportamento é garantido pelo circuito somador U1D e pela referência de tensão constituída pelo U1A.

O sinal modulado em frequência é aplicado à entrada de um amplificador de potência, semelhante ao já utilizado no circuito de excitação da ponte de extensômetros. Na saída deste, utiliza-se uma espira como antena transmissora cuja potência de transmissão é determinada pela corrente circulante em função do resistor R_{24} (120 Ω).

3.2.5- Fonte de Alimentação

A fonte de alimentação está mostrada na figura 3.7. Pode obter energia na entrada a partir de um conjunto de duas baterias de 9 Volts, ou através de um sistema de anéis e escovas, ou ainda com o auxílio de um transformador rotativo. Uma destas três opções pode ser escolhida de acordo com a aplicação desejada.

Para utilizações temporárias, em sistemas girantes de baixa velocidade (até 1000 rpm), recomenda-se o uso das baterias.

No caso de aplicações permanentes, ou em sistemas girantes com alta velocidade deve-se optar por anéis e escovas ou

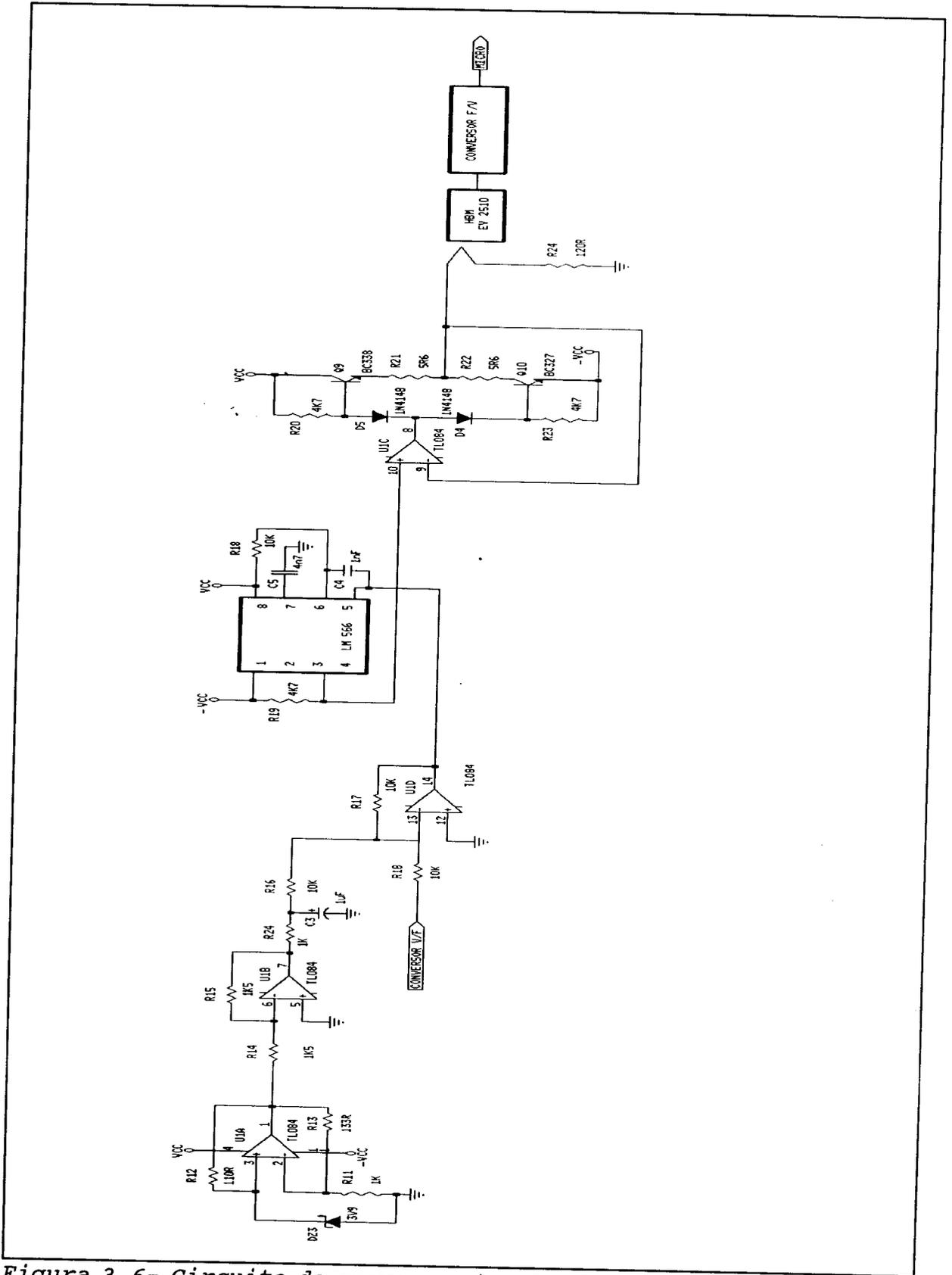


Figura 3.6- Circuito do conversor tensão-freqüência e transmissor de sinal.

transformador rotativo.

O circuito da fonte dispõe de uma seção retificadora que pode ser incluída ou não no circuito. Obviamente só será utilizada quando a energização for realizada com transformador rotativo.

Os reguladores utilizam uma configuração transistorizada, com saída em coletor, que permite alta eficiência exigindo pequena diferença de tensão entre a entrada e a saída, sem perda da regulação.

Tal circuito permite que se opere com baterias, admitindo-se uma faixa bastante razoável para variação da tensão em função da descarga da mesma (de 9 Volts até 7,8 Volts).

Os reguladores determinam tensões de ± 7.5 Volts na saída, com capacidade de corrente de até 300 mA.

Com todos os circuitos ligados, o consumo total, incluindo uma ponte de extensômetros de 120Ω , não passa de 140 mA. Os maiores consumidores são a ponte de extensômetros e o circuito de transmissão do sinal modulado em frequência.

3.2.6- Transformador Rotativo Para Transferência de Energia

Um estudo dos transformadores rotativos está apresentado no Apêndice C. A utilização do mesmo como solução alternativa na energização do pré-condicionador é bastante interessante, uma vez que desenvolveu-se um método construtivo, razoavelmente simples, que demonstrou ser de excelente aplicabilidade em sistemas girantes.

A idéia principal é a de que se possa instalar o enrolamento girante (no caso o secundário do transformador) sem remover qualquer peça do complexo mecânico onde se deseja utilizá-lo. Necessita-se pois "construir" o enrolamento girante diretamente sobre um eixo.

A praticidade de uso fez-se realidade quando se decidiu utilizar cabos planos multiveias ("flat cables") para construir os enrolamentos.

Na foto nº 4 apresenta-se um transformador cujo

secundário foi enrolado sobre uma forma de "tecnil" bipartida, que pode ser aplicada à um eixo de diâmetro qualquer, de acordo com o local onde se deseja instalá-lo. No caso presente, o eixo utilizado tem um diâmetro de 30 mm. Sobre a forma colocaram-se seis camadas de um cabo multiveias com 31 condutores. Efetuando-se a interligação alternada entre as terminações dos condutores obteve-se uma bobina com 186 espiras.

O enrolamento primário pode ser executado da mesma forma que a descrita para o secundário. Sua fixação deve ser efetuada de forma a permitir giro livre do secundário e um bom acoplamento magnético alcançado pela máxima proximidade que for permitida entre os dois enrolamentos. No enrolamento primário construído, utilizou-se cabo plano de 40 condutores, em 7 camadas, obtendo-se assim uma bobina de 280 espiras (ver foto nº 5).

Em função de que os terminais da cada espira estão disponíveis em cada enrolamento, é possível realizar a escolha de pontos de conexão ("taps"), que garantam a obtenção do nível de tensão desejado. No transformador construído, o enrolamento secundário foi ligado de forma a alimentar a ponte de diodos numa configuração com tomada central (ver figura 3.7). O enrolamento primário foi dividido em dois conjuntos de 120 espiras ligadas em paralelo para aumentar o fluxo magnético gerado.

O enrolamento primário é energizado a partir do gerador senoidal da General Radio (modelo 1308A) com frequência ajustada para 3 kHz e 30 Volts (rms). Nestas condições, obteve-se no circuito secundário uma tensão, já retificada de 9 Volts, aplicada então à entrada do circuito regulador de $\pm 7,5$ Volts.

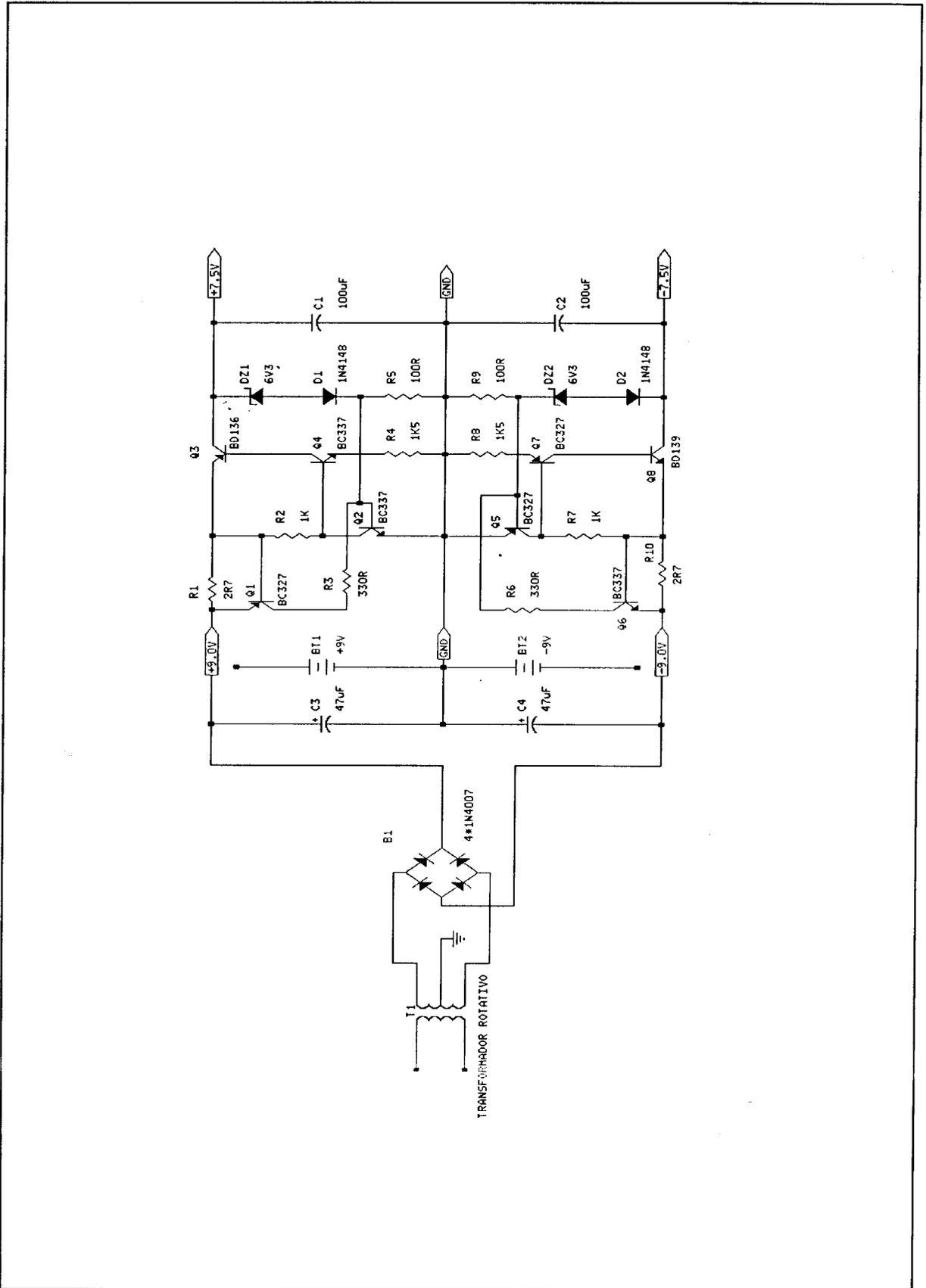
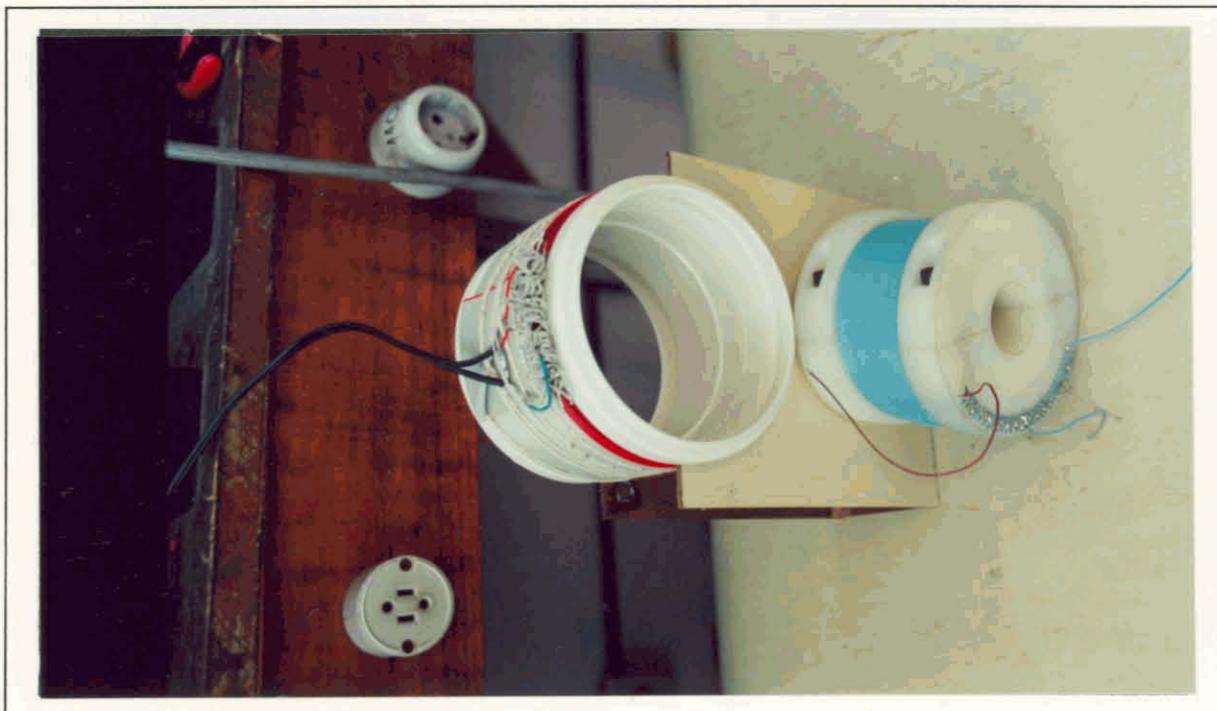
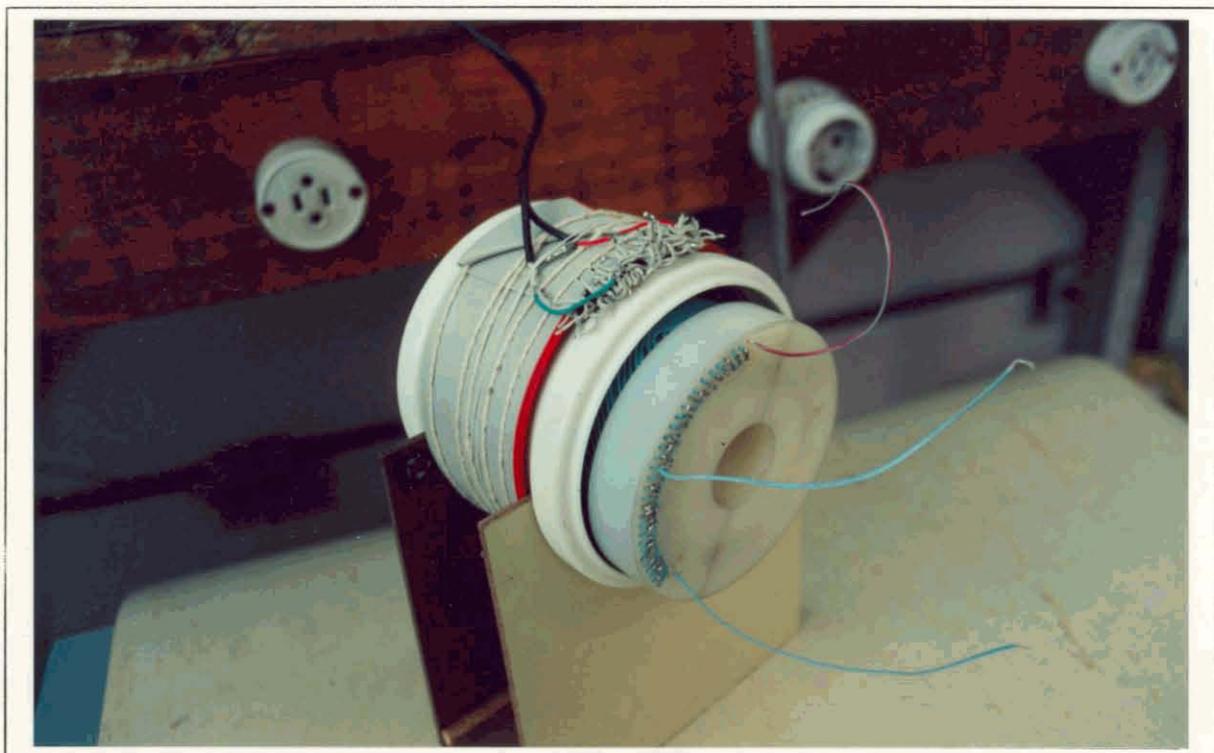


Figura 3.7- Circuito da fonte de alimentação.



Fotografia nº 4- Transformador rotativo com forma bipartida e cabos planos.



Fotografia nº 5- Transformador rotativo completo.

4- CAPÍTULO 4: UTILIZAÇÃO DO SISTEMA NA MEDIDA DIRETA DE TORQUE NO EIXO DE UM MOTOR ELÉTRICO

4.1- DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A medição do torque aplicado ao eixo de um motor elétrico é um problema até hoje enfrentado indiretamente. Mede-se a reação da carcaça ou a corrente elétrica aplicada ao enrolamento do estator. Descontadas as "perdas", com um ensaio a vazio e, considerando-se um rendimento aproximado de 90 a 95 %, supõe-se que toda a força mecânica de reação, ou a energia elétrica adicional fornecida ao motor, seja equivalente ao torque disponível no eixo.

Este procedimento de medição pode ser abandonado, medindo-se o torque diretamente pela deformação elástica do eixo, quando o motor fornecer energia aos dispositivos mecânicos por ele acionados.

Considerando a expressão (2.7) que relaciona a deformação relativa a 45 graus (ϵ), com o torque (τ) em função do diâmetro (D) de eixos construídos em aço, pode-se traçar uma família de curvas apresentadas na figura 4.1 com o torque em escala logarítmica.

Consultando catálogo de fabricantes de motores elétricos^[51], verifica-se que, segundo a norma, os diâmetros dos eixos variam de 25 mm a 80 mm, para potências de 1 cv a 250 cv. As curvas apresentadas na figura 4.1 abrangem eixos de 25 a 150 mm com torques desde 1 Nm até 5000 Nm que correspondem à variação de 2 a 40 $\mu\text{m/m}$.

A instrumentação utilizada para medir torque deveria ser capaz de recuperar sinais de deformação de cada extensômetro na faixa de 1 a 10 $\mu\text{m/m}$, o que corresponderia a um sinal total de 4 a 40 $\mu\text{m/m}$. Um desbalanço desta ordem corresponderá a um sinal elétrico de 8 a 80 $\mu\text{V/V}$. Supondo que os extensômetros sejam de 350 Ω e a excitação da ponte de 10 Volts, a tensão de desbalanço será de 80 a 800 μV . A recuperação de sinais elétricos nesta faixa só é realizável com confiabilidade, se forem utilizados

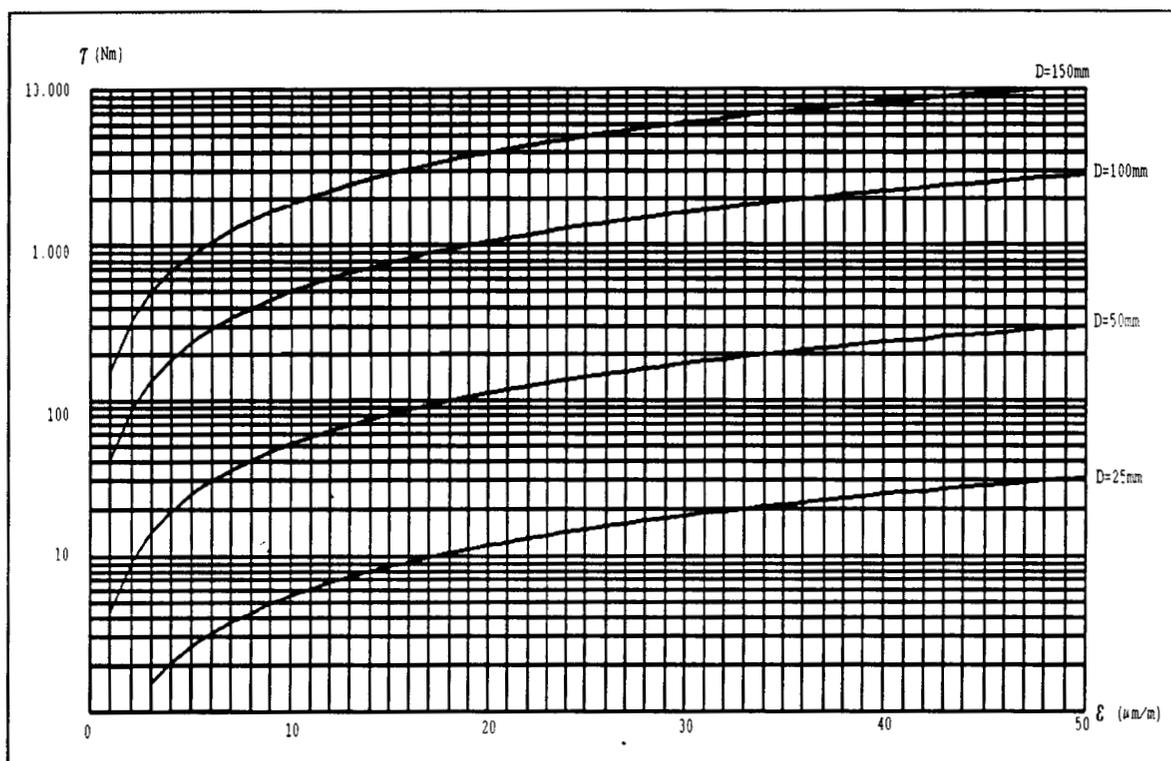


Figura 4.1- Família de curvas $\epsilon = f(\tau, D)$ para eixos de aço ($E = 21.000 \text{ kgf/mm}^2$) com seção circular de diâmetro D . $\Delta\epsilon$ = faixa de utilização do sistema proposto.

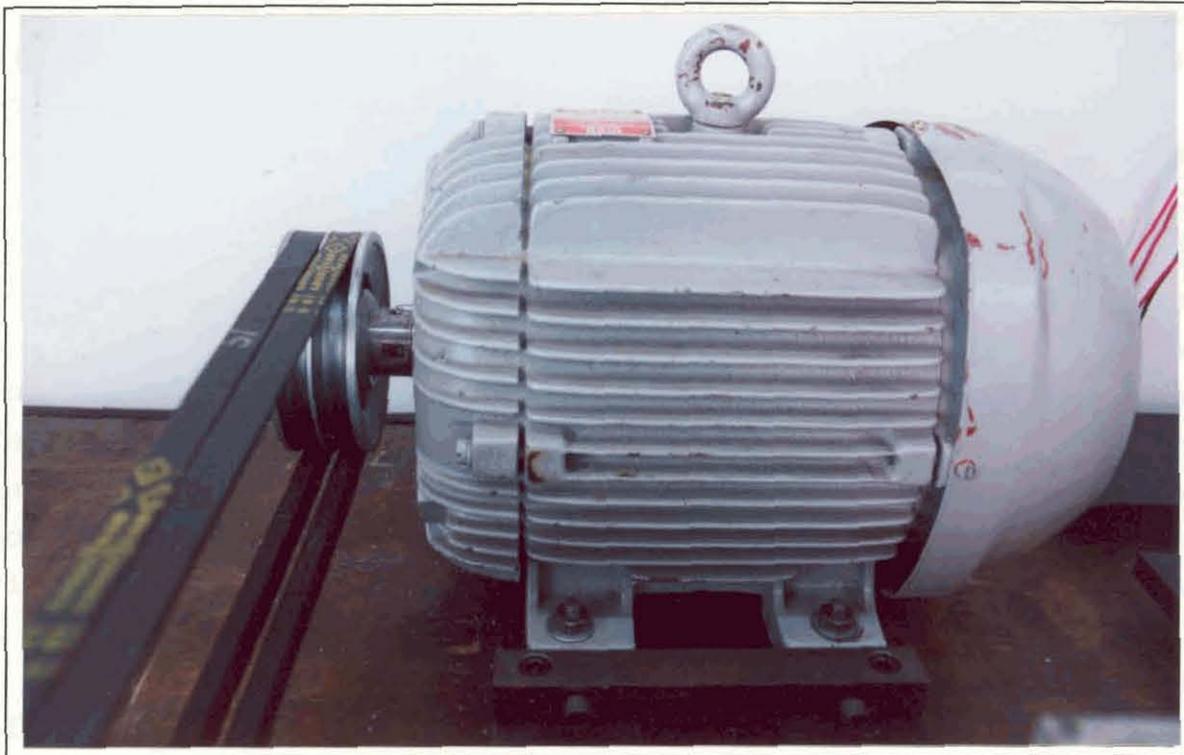
amplificadores síncronos, ainda mais que a grande maioria das aplicações será em ambiente industrial com elevado ruído elétrico.

Para testar a instrumentação proposta, escolheu-se o eixo do motor que aciona a própria bancada de ensaios. O motor, com 10 HP de potência, tem um eixo de 38 mm de diâmetro, desenvolvendo um torque máximo de 40 Nm quando girar sob carga máxima a uma velocidade de 1800 rpm.

Pelos cálculos já efetuados no item 2.6, verifica-se que, na potência máxima, a deformação do eixo do motor chegaria a $78 \mu\text{m/m}$ ($19,65 \mu\text{m/m}$ para cada extensômetro).

4.2- COLAGEM DOS EXTENSÔMETROS

Para utilizar a instrumentação construída neste trabalho de tese, aplicada a uma medida direta do torque, colaram-se extensômetros tipo "espinha de peixe" no eixo do motor



Fotografia nº 6- Vista do eixo do motor com os extensômetros colados.

(vide foto nº 6). No caso em foco utilizou-se o espaço disponível entre a carcaça e a polia que transfere o torque a todo o sistema mecânico.

Os extensômetros utilizados foram do tipo KFC 2 D2 11 da KIOWA, com resistência de 120Ω , grade de 2 mm e $k \approx 2$. Foram colados com cola do tipo acrílico modelo X60 da HBM, na superfície do eixo e orientados a 45° em relação a direção longitudinal (ver figura 2.7), de modo a sentir a deformação máxima que ocorre nesta direção, conforme mostra a figura 2.7.

4.3- INSTALAÇÃO DOS CIRCUITOS ELETRO-ELETRÔNICOS

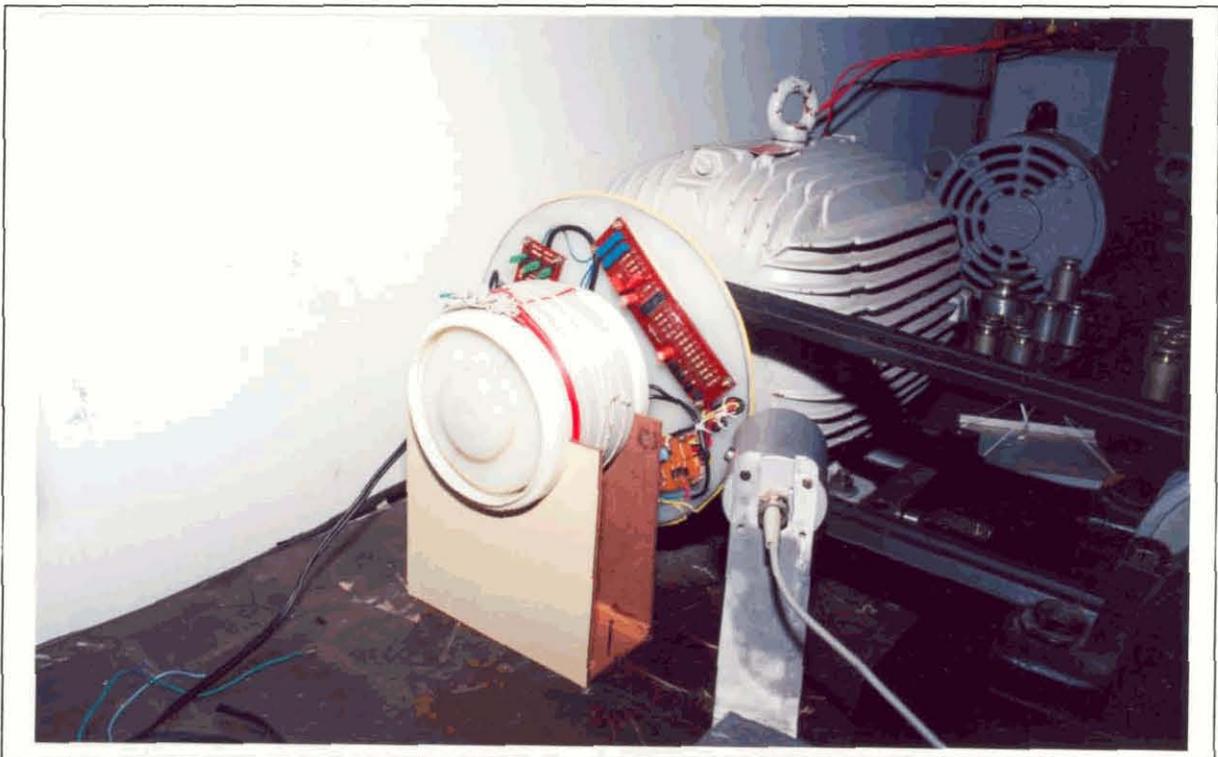
A instrumentação eletrônica constituída das três placas de circuito impresso (já descritas em 3.2) foi afixada em um disco de "nylon", justaposto à polia que acopla o motor à bancada através de duas correias tipo "V" (ver foto nº 3).

Os extensômetros colados no eixo foram ligados em um circuito tipo ponte completa. A excitação da ponte, bem como a

coleta do sinal de desbalanço é efetuada através de um cabo blindado ligado ao pré-condicionador. O cabo atravessa a polia metálica através de um furo próximo ao eixo.

No mesmo sistema de fixação do disco que suporta os circuitos eletrônicos, instalou-se um prolongamento do eixo do motor, onde fixou-se o enrolamento secundário do transformador rotativo que alimenta a eletrônica embarcada. O enrolamento primário é sustentado através de um suporte de madeira fixado a mesa que sustenta a bancada. A alimentação do transformador é efetuada pelo gerador General Radio 1308-A ajustado para fornecer uma tensão de 30 Volts e frequência de 3 kHz. Interliga-se o secundário do transformador rotativo à ponte retificadora existente na fonte de alimentação do pré-condicionador conforme já se descreveu em 3.2.5.

A antena transmissora do sinal modulado em frequência foi fixada na borda do disco que sustenta toda a "eletrônica embarcada" (fio amarelo na borda do disco, visível na foto nº 7).



Fotografia nº 7- Instrumentação proposta instalada no eixo do motor.

O EV2510 da HBM, parafusado à mesa, recebe o sinal

transmitido enviando-o ao conversor frequência-tensão existente no bastidor que contem toda a instrumentação da HBM.

Toda a instalação pode ser visualizada na Foto nº7.

4.4- CALIBRAÇÃO ESTÁTICA

Bloqueando-se o eixo do motor na extremidade da polia, aplica-se torque utilizando-se uma haste de comprimento igual a 0,178 m fixada à extremidade oposta e massas de 1 a 10 kg. Obtém-se assim um torque (em Nm) de 1,75 x a massa aplicada (em kg), considerando-se a aceleração gravitacional igual a 9,82 (em m/s^2) (vide foto nº 8). Obteve-se então uma curva de calibração conforme o gráfico mostrado na figura 4.2.

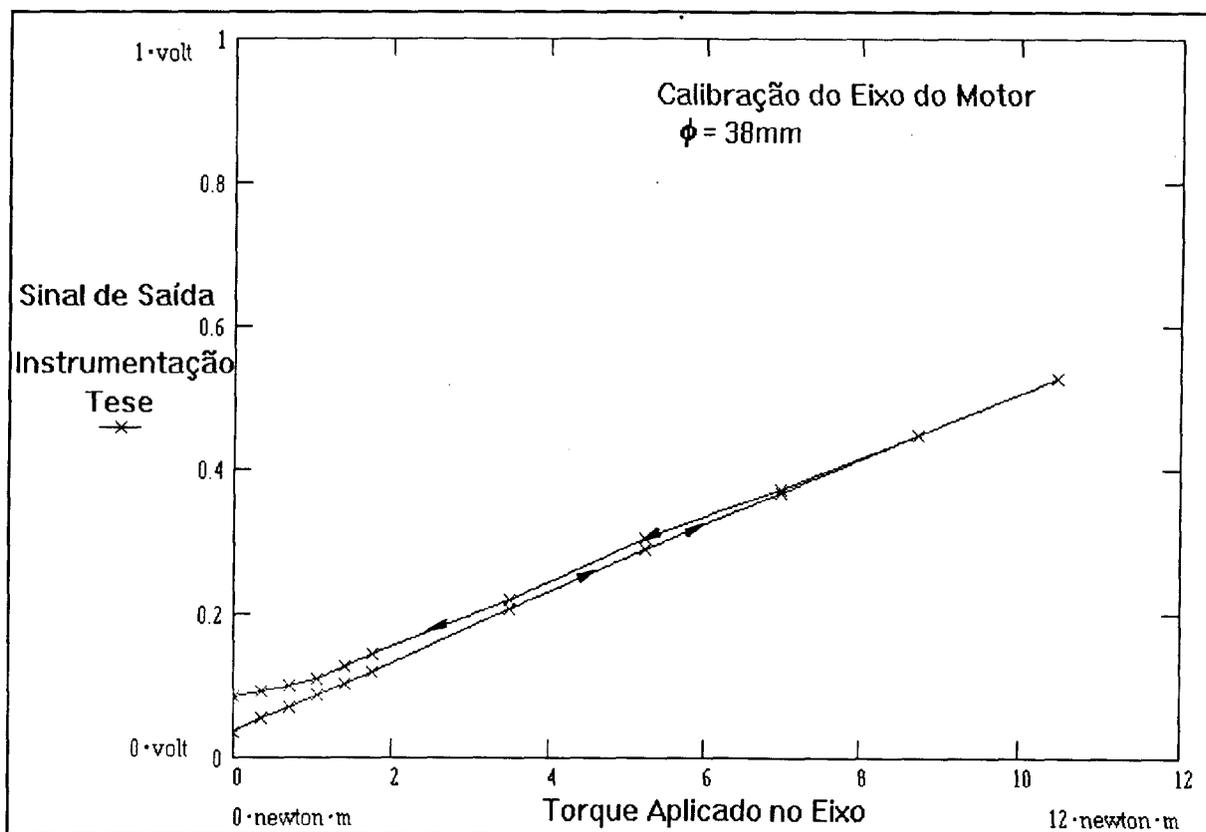
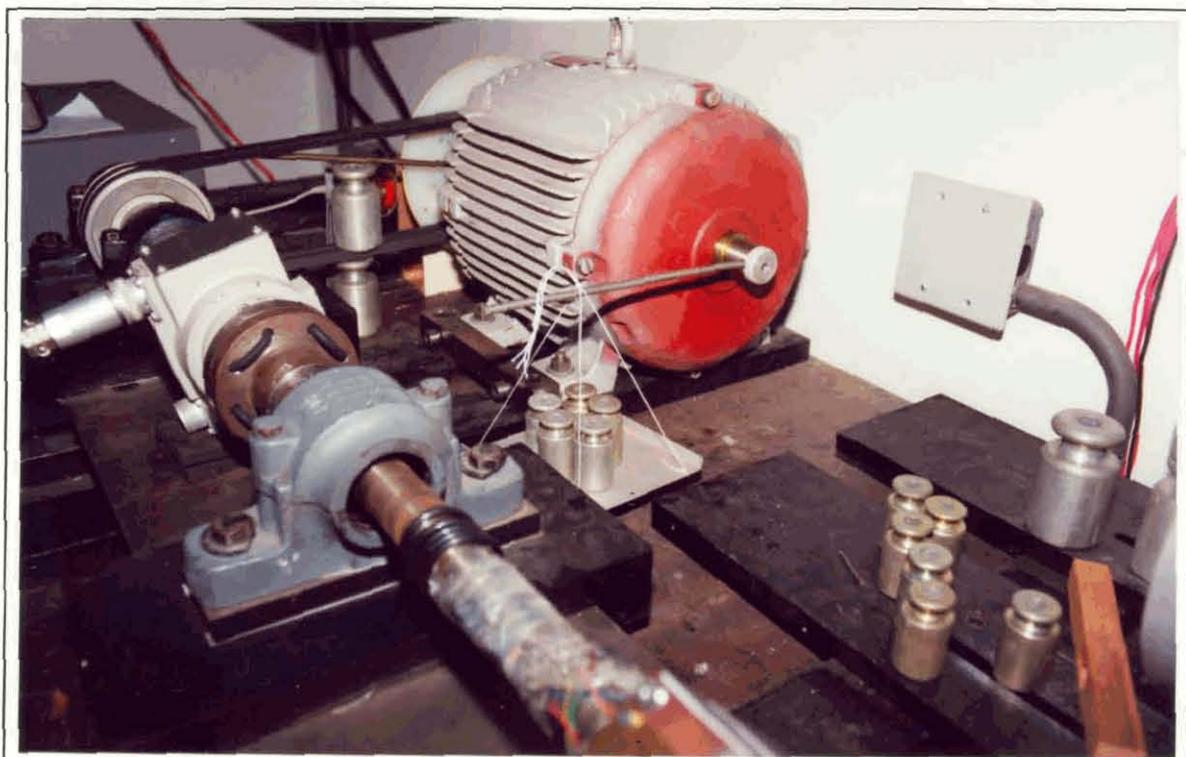


Figura 4.2- Calibração estática no eixo do motor com a instrumentação proposta nesta tese.

O exame desta curva de calibração revela que existe uma histerese. Quando se retorna ao ponto de partida, aliviando o



Fotografia nº 8- Vista do procedimento de calibração do eixo do motor.

torque aplicado ao eixo, não mais se obtém o mesmo valor de tensão na saída para valores baixos de torque. Isto pode ser justificado pelo atrito dos rolamentos no eixo do motor. Também observa-se que o sinal elétrico de saída varia bastante linearmente com o torque aplicado ao eixo, obtendo-se uma sensibilidade de aproximadamente 50 mV/Nm no canal de medição. O zero elétrico do sinal de saída foi propositadamente deslocado para permitir a leitura na placa de aquisição conectada ao microcomputador. Esta admite apenas sinais unipolares de 0 a 5 Volts. Supondo que se partisse do zero, um torque de 40 Nm aplicado ao eixo geraria um sinal elétrico de 2 Volts na saída. Isto determinou que se limitasse o ganho do pré-condicionador conforme se descreve em 3.2.2.

4.5- ENSAIO DINÂMICO

Colocando-se o motor em operação pode-se obter um sinal proporcional ao torque em qualquer regime de funcionamento.

A seguir apresenta-se o resultado obtido com a bancada de ensaios de torquímetros operando sob carga onde aparece o sinal de torque medido diretamente no eixo do motor (Figura 4.3).

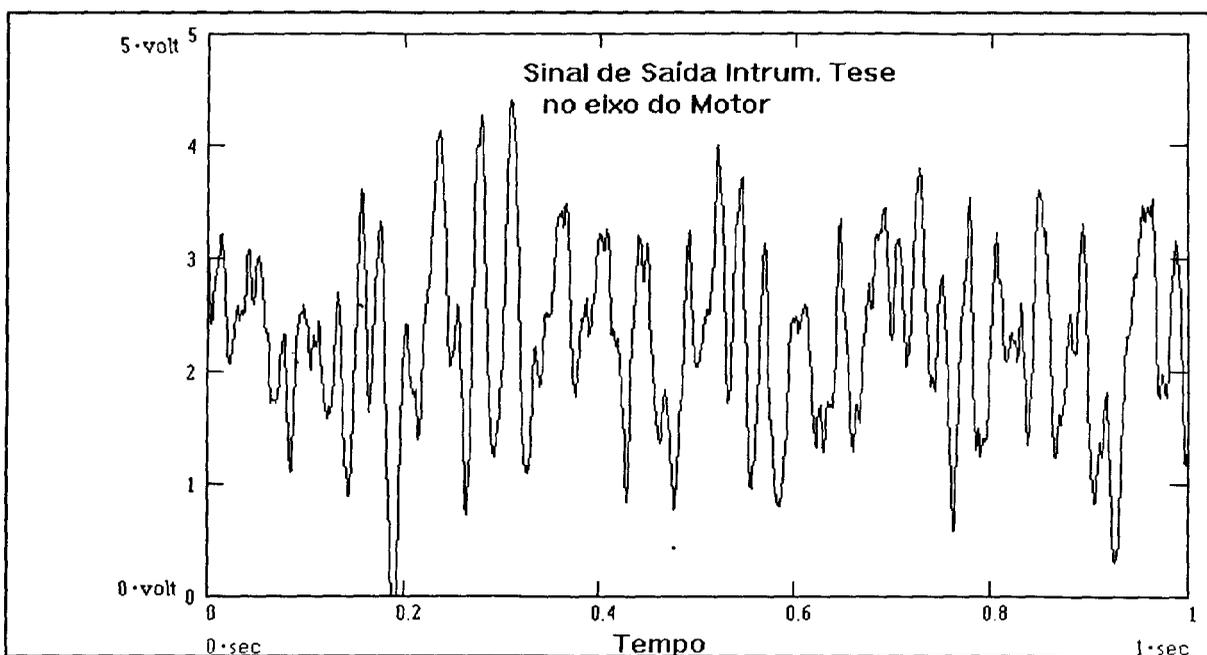


Figura 4.3- Sinal elétrico proporcional à variação de torque no eixo com o motor girando a uma velocidade de 1200 rpm.

Esta figura mostra a variação de torque que ocorre no eixo quando em operação dinâmica.

Na figura 4.4 apresenta-se o sinal elétrico proporcional à variação de torque no eixo do motor e o sinal elétrico proporcional à variação de torque medido pelo T30FN no eixo da bancada.

Nestas figuras observa-se novamente a natureza pulsante do sinal de torque no eixo do motor em função do acionamento elétrico promovido pelo conversor de frequência ajustável.

Na figura 4.5 realizou-se a integração do sinal elétrico proporcional à variação de torque no eixo do motor, podendo-se compará-lo com o sinal do T30FN montado na bancada. Percebe-se então que as correias de acoplamento, entre o motor e o eixo da bancada, têm uma função integradora, absorvendo as vibrações de mais alta frequência. Também pode-se observar o atraso temporal entre o sinal de torque fornecido pelo motor e

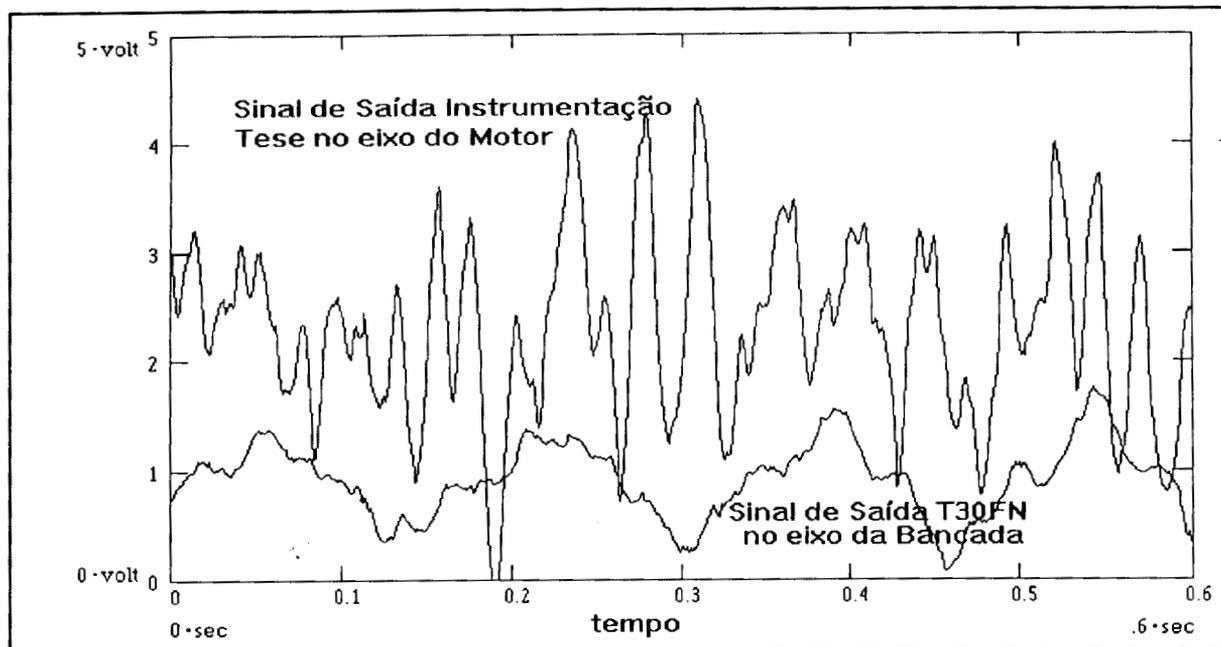


Figura 4.4- Sinal elétrico proporcional à variação de torque no eixo do motor e o sinal elétrico proporcional à variação de torque medido pelo T30FN no eixo da bancada.

aquele exigido pela bancada em função da carga aplicada ao eixo.

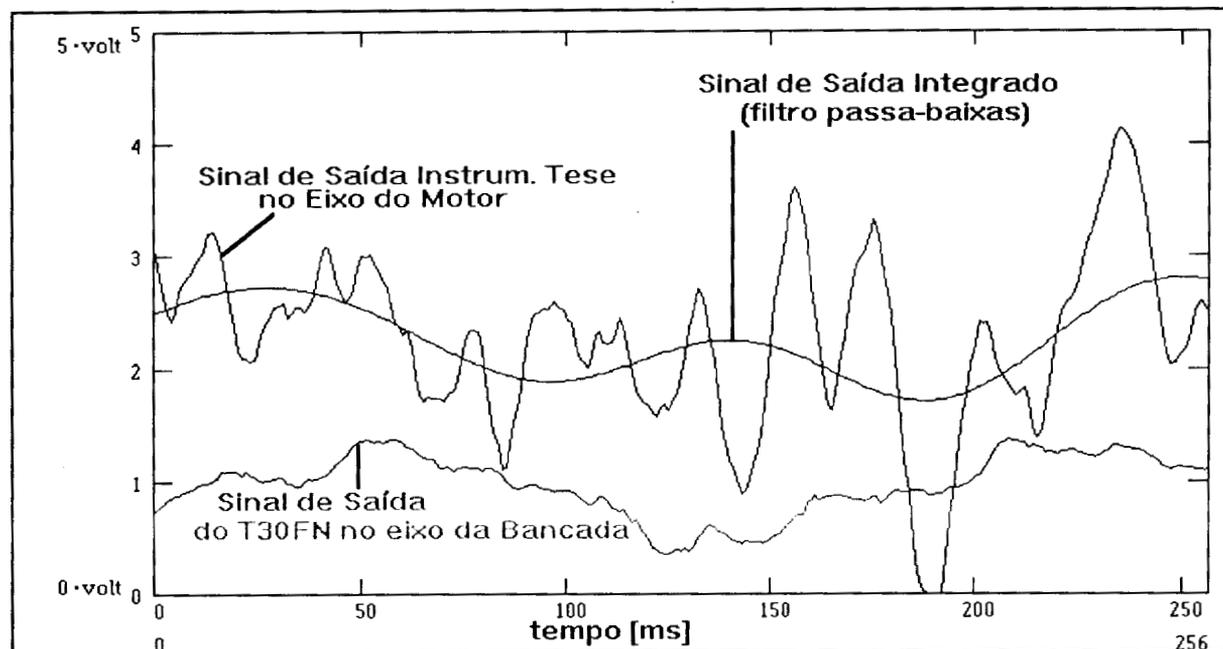


Figura 4.5- Comparação entre o sinal do T30FN com o sinal de torque no eixo do motor integrado (filtro passa-baixas).

Como a resposta em frequência da instrumentação

proposta está limitada em 1,5 KHz, todas as vibrações mecânicas abaixo desta frequência são detectadas.

4.6- COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS DE ENSAIOS REALIZADOS COM O SISTEMA BLM

Retirando-se o transformador rotativo fixado ao prolongamento do eixo do motor, pode-se instalar o MT2555 A da HBM e ligar a ponte de extensômetros, colados ao eixo do motor, neste dispositivo (vide foto nº 9). Realizaram-se então os mesmos ensaios (estático e dinâmico) já efetuados com a instrumentação proposta nesta tese.

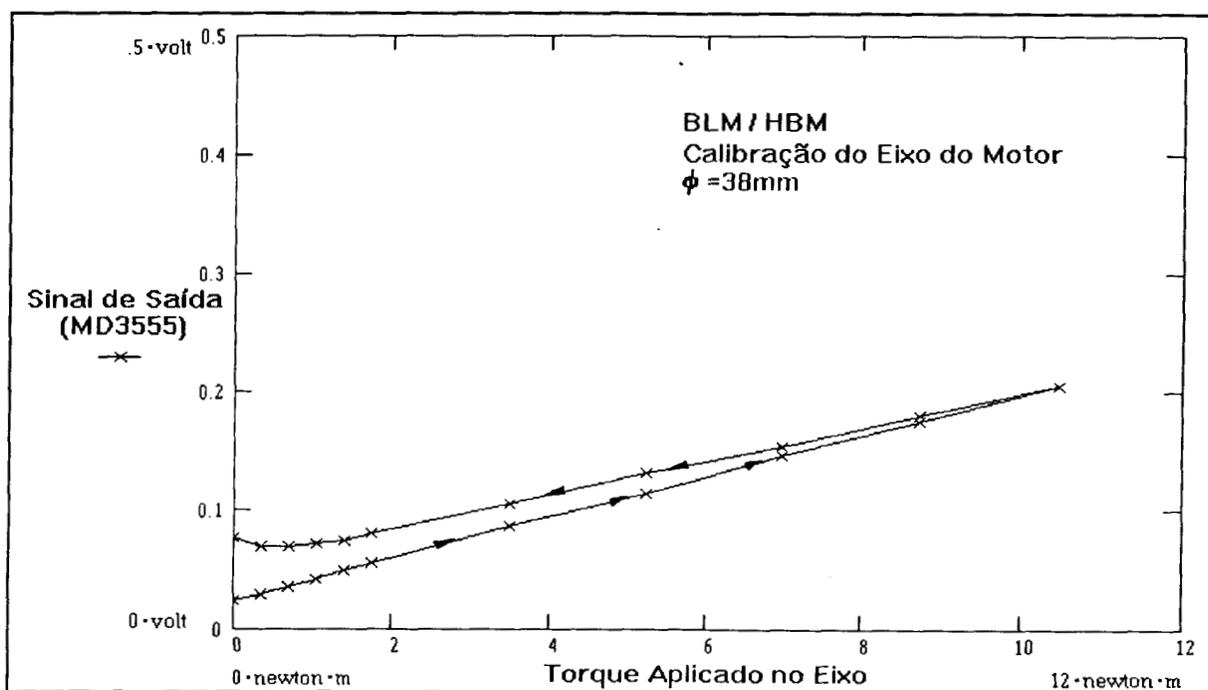


Figura 4.6- Calibração estática do eixo do motor com o sistema BLM/HBM.

Na figura 4.6 registra-se o sinal elétrico proporcional ao torque, no eixo do motor, obtido com o sistema BLM/HBM num ensaio estático. Da mesma forma que no ensaio anterior, com a instrumentação proposta nesta tese, observa-se a histerese mecânica no eixo do motor (efeito dos rolamentos). Como

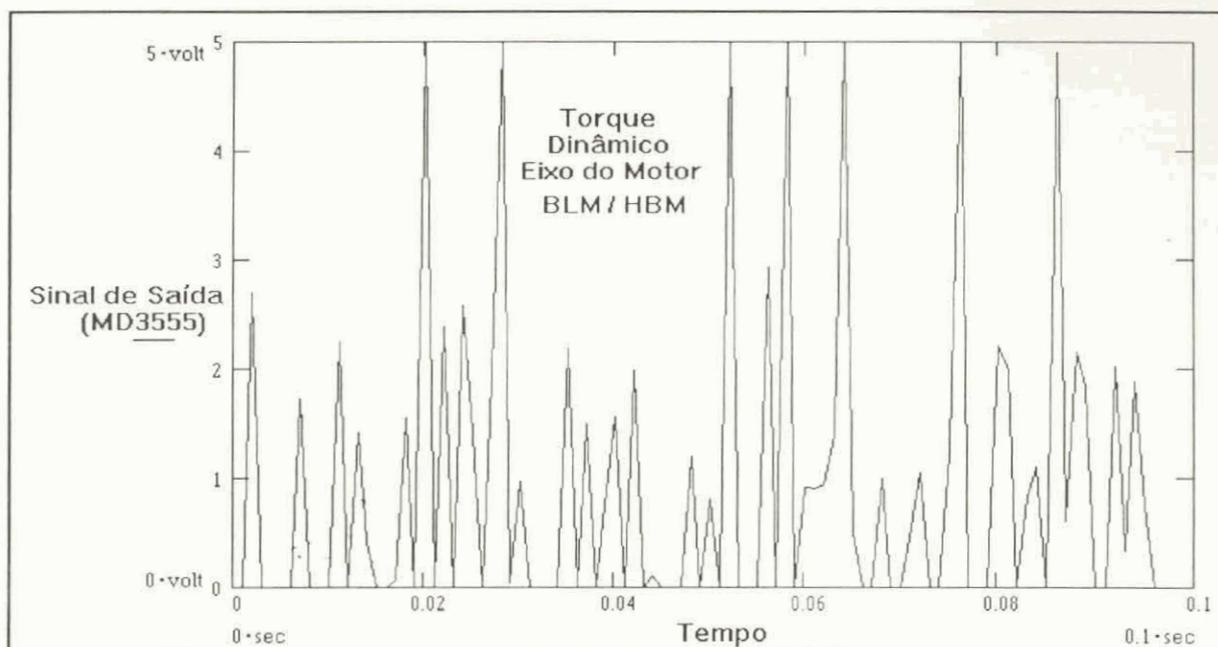
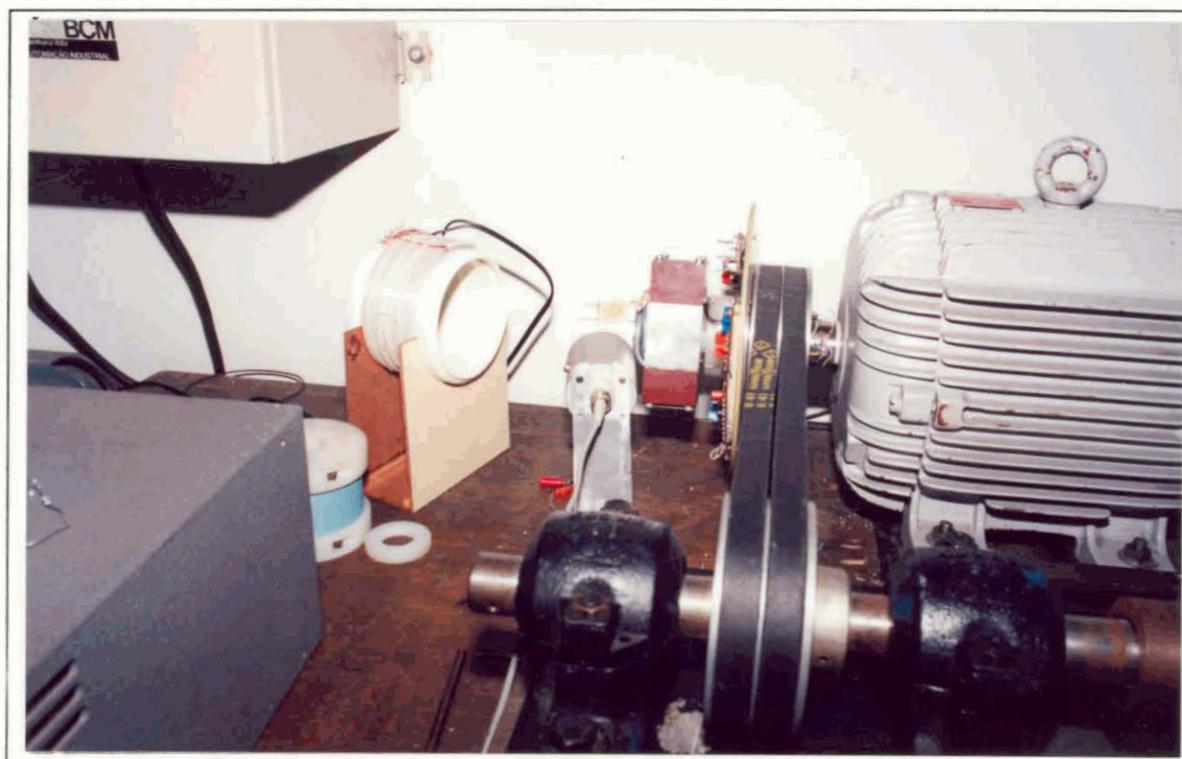


Figura 4.7- Ensaio do sistema BLM/HBM com o motor girando a 1.200 rpm.



Fotografia nº 9- Sistema BLM/HBM instalado no eixo do motor que aciona a bancada.

o sistema BLM foi, nesta aplicação, alimentado por uma bateria, ocorreu também um pequeno "drift" que se soma à histerese.

Considerando-se o sinal elétrico razoavelmente linear,

pode-se calcular uma sensibilidade de aproximadamente 15 mv/Nm. Em função do menor ganho do sistema BLM, quando comparado com a instrumentação proposta nesta tese, a resolução também resulta menor.

Na figura 4.7 observa-se o sinal elétrico obtido quando o motor é posto a girar. Devido ao ruído eletromagnético existente nas cercanias do eixo do motor, a utilização do sistema BLM, nesta situação é praticamente impossível.

5- CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1- CONSIDERAÇÕES SOBRE O DESEMPENHO DO SISTEMA PROPOSTO

De acordo com o que se pode observar, os ensaios realizados demonstram a capacidade do sistema para medir torque estático e dinâmico em dispositivos girantes.

Como o pré-condicionador pode ser adaptado a diversas situações no que tange à sua fixação às partes girantes, pode-se concluir que esta "eletrônica embarcada" é versátil e viabiliza um grande número de aplicações para medida de torque.

Dado ao elevado ganho (ajustável até 20.000) e à sua imunidade ao ruído, o pré-condicionador permite a medida de sinais elétricos da ordem de μV , que são produzidos por pontes de extensômetros em dispositivos que se deformam, quando um torque é aplicado. Estas características permitem que se obtenham sinais elétricos confiáveis até mesmo em eixos mecanicamente superdimensionados. Assim sendo, pode o sistema monitorar a ocorrência de defeitos mecânicos intermitentes, como é o caso de rolamentos em vias de quebra ou comportamento anômalo.

A grande vantagem do sistema proposto é, sem dúvida, a possibilidade real de medida do torque em diversos pontos de um complexo mecânico girante, sem a necessidade de introduzir-se um torquímetro ou da utilização de métodos indiretos de medida. É um método de medição que não implica em alterações mecânicas no sistema a ser avaliado. Não há necessidade de modificar o acoplamento entre o sistema motor e a carga.

Aplica-se também a qualquer dispositivo mecânico girante, seja este acionado por motor elétrico, motor a explosão ou até por turbinas hidráulicas ou eólicas.

Pode-se utilizar este método em bancos de provas de motores, sem a necessidade de complicadas estruturas mecânicas para aplicação de carga à um eixo. Poder-se-iam utilizar apenas conjuntos de frenagem para aplicação de carga à um motor o que baratearia em muito os bancos de prova.

Obviamente é necessário realizar uma calibração

estática do sistema, depois que o mesmo for instalado, para que seja possível a medição do torque, quando se desejar avaliar o comportamento dinâmico dos dispositivos mecânicos instrumentados.

O sistema proposto também permite a determinação da frequência natural dos dispositivos ensaiados, caso esta esteja abaixo de 1500 Hz (faixa de operação dos circuitos eletrônicos utilizados). Esta frequência pode ser medida aplicando-se uma torque repentino (ocasionado por um pulso de força) no dispositivo mecânico ensaiado, registrando-se o sinal elétrico resultante na saída, durante um intervalo de tempo adequado (por exemplo um segundo).

5.2- APLICABILIDADE EM TESTES DE CAMPO

Pode-se imaginar um grande número de aplicações deste sistema de medição de torque em máquinas que operam em condições reais de trabalho. O exemplo típico seria a medição de torque no eixo de um veículo de carga ou passeio, tratores, colheitadeiras ou quem sabe até um veículo de competição (carros de corrida, kart, motos, etc...).

Para tais aplicações, seria necessário apenas modificar o transmissor do sinal de torque convertido em frequência, para que se lograsse um maior alcance, permitindo-se assim uma medida a distância.

Também seria conveniente desenvolver um conjunto de dispositivos tais como:

- pré-condicionador montado em placas circulares, ou tipo meia lua para adaptação direta em polias existentes.

- transformadores rotativos adaptáveis a eixos ou polias para transferência de energia aos circuitos eletrônicos (seria muito prático no caso de veículos automotores).

- Projeto de um único "chip" dedicado que contivesse todos os amplificadores operacionais, comparadores, resistores e diodos, restando apenas como componentes discretos os capacitores e transistores de maior potência. Isto levaria a uma grande miniaturização da "eletrônica embarcada" que poderia viabilizar

novas aplicações.

5.3- CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO

A instrumentação eletro-eletrônica construída, para atender aos requisitos propostos neste trabalho de tese, pode ser utilizada também em sistemas de teste e medição de outras grandezas físicas.

Aplica-se a qualquer tipo de transdutor sensor, cujo princípio de operação seja a variação de um parâmetro elétrico (resistência, indutância ou capacitância), que possa ser montado em um circuito tipo ponte e que admita uma excitação senoidal de 5 V de amplitude e frequência de 5 kHz.

Pela imunidade a ruído inerente aos sistemas do tipo "lock-in" e pelo elevado ganho que se pode obter entre o sinal elétrico de desbalanço da ponte e aquele disponível na saída, esta instrumentação pode ser utilizada com vantagem em situações que envolvem a coleta de pequenos sinais (da ordem de μV) em ambiente ruidoso.

Como o ganho de tensão pode chegar a 20.000, pode-se utilizar esta sistema com circuitos em ponte de Wheatstone, cuja sinal de desbalanço, em fundo de escala, seja da ordem de 0,05 mV/V.

Caso a impedância de saída do transdutor utilizado seja maior do que 1 k Ω , o amplificador de desbalanço construído com o CA3080 deve ser reprojetoado. Esta baixa impedância de entrada, propositadamente escolhida, é também responsável pela imunidade ao ruído do sistema de medição.

A resposta em frequência do amplificador está limitada em 1,5 kHz, em função da largura de banda dos filtros passa-faixa e passa-baixo existentes no circuito construído.

Quanto à histerese observada no sinal de saída, dependerá do dispositivo mecânico ensaiado. No caso apresentado nesta tese, o eixo do motor instrumentado está apoiado em dois rolamentos (um em cada extremidade da carcaça do motor). Esta característica construtiva determina o aparecimento da histerese

observada nas figuras (4.2) e (4.6).

A resolução do sistema como um todo está limitada pelo conversor Analógico/Digital utilizado que é de 12 Bits e pela faixa de excursão do sinal elétrico de saída. Supondo um sinal de saída entre 0 e 5 Volts ter-se-ia uma resolução de $5V/(2^{12}-1)$, o que equivale à 1,22 mVolts. Tomando a sensibilidade encontrada no ensaio estático do sistema proposto (50 mV/Nm), pode-se afirmar que a resolução alcançada foi de 0,024 Nm.

5.4- CONCLUSÕES, SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho constitui-se no coroamento de uma linha de pesquisa que vem sendo trabalhada a mais de cinco anos no INMETAL. Verifica-se claramente que esta foi apenas mais uma etapa vencida: o desafio de levar o uso dos extensômetros para medir pequeníssimas deformações ($10 \mu\text{m}/\text{m}$ em fundo de escala), em elementos girantes. Tais requisitos só eram alcançados por instrumentação específica para uso estático (KWS 3073 da HBM).

Como todo o sistema de medição proposto foi comparado com as medidas de torque obtidas com o torquímetro T30FN da HBM, usado como padrão, mostrando-se plenamente satisfatório, não houve a preocupação de avaliar a classe de precisão que se alcançou com a instrumentação desenvolvida. Certamente a medida sofre influência de diversos fatores associados a cada um dos elementos utilizados na cadeia de medição. Sugere-se como uma possível linha de investigação futura a quantificação das incertezas no sinal elétrico de saída da ponte, em função da variação de temperatura, das características da cola e do ruído eletromagnético sempre presente em ambientes industriais, tendo em vista que toda a medição está baseada nas pequenas deformações que ocorrem nos elementos elásticos utilizados, propositadamente superdimensionados.

Sugere-se também que sejam propostos, um ou mais projetos de pesquisa, associados a laboratórios da própria Escola de Engenharia, ou quem sabe associados a indústrias que tenham interesse nas aplicações deste método e na "eletrônica embarcada"

desenvolvida, para que se obtenha um, ou vários conjuntos de medição de torque para uso em campo (aplicado ao ensaio de máquinas automotrizes tais como automóveis, motos, tratores, caminhões, etc.).

É interessante que se continue desenvolvendo o estudo de materiais, para construção de conjuntos de anéis e escovas, com desempenho adequado à transferência de energia e sinal aplicados à dispositivos girantes, pois isto significaria uma grande simplicidade para aplicações do sistema de medição aqui proposto. Devem ser conjuntos de anéis e escovas facilmente adaptáveis a eixos e polias com baixo desgaste e baixa resistência de contato.

Com o conhecimento que se desenvolveu a cerca dos transformadores rotativos, valeria a pena retomar o projeto de torquímetros girantes que empregam apenas dois transformadores e a ponte de extensômetros. Também o uso dos mesmos transformadores em outros transdutores girantes, casos dos sincros, poderia ser desenvolvido.

Concluindo, pode-se dizer que este trabalho levará certamente a novas aplicações e possibilidades de medição com extensômetros, ou ainda com outros transdutores solidários a dispositivos móveis (girantes ou não) uma vez que se abordaram aqui muitos aspectos relativos a problemas desta natureza, quais sejam: a amplificação de pequenos sinais e a transferência de sinal e de energia sem contato elétrico.

APÊNDICE A- INSTRUMENTAÇÃO

A.1- INTRODUÇÃO

A instrumentação, pelo seu caráter multidisciplinar e pelo seu uso intensivo nas mais diversas áreas de conhecimento, está a merecer um tratamento diferenciado na organização de seu conteúdo, de forma que se possa utilizar a mesma linguagem e os mesmos conceitos em qualquer ramo da ciência.

Entende-se que este procedimento é necessário, principalmente a nível didático, pois o que hoje se observa é uma verticalização do desenvolvimento em instrumentação, aplicada a cada área de conhecimento, numa pulverização de esforços que não mais se justifica.

Instrumentação é matéria de conhecimento básico que deveria ser ministrada em qualquer curso universitário, de engenharia ou de outras áreas que necessariamente dela se utilizam, bastando para tanto que se definam os conceitos fundamentais, aplicáveis a qualquer área de conhecimento, e os parâmetros que norteiam o planejamento, a implementação e a avaliação da performance de um sistema instrumentado.

A organização da área de instrumentação em um curso a nível de mestrado na Escola de Engenharia da UFRGS já é uma realidade, não restando mais dúvidas de que o domínio deste ramo do conhecimento deve naturalmente existir no âmbito da engenharia.

As particularidades da instrumentação em cada área de aplicação decorrem de necessidades específicas que poderão ser definidas quando se procura responder à pergunta:

- Instrumentação para que?

No âmbito da engenharia, a instrumentação é utilizada para medir, registrar e controlar o comportamento de grandezas físicas (Temperatura, Força, Deslocamento, Torque, Tempo, Velocidade, Aceleração, Pressão, etc...) que intervêm em um

determinado processo. Portanto, pode-se definir instrumentação como:

- "o conjunto de dispositivos e técnicas utilizadas para aquisição, processamento, indicação, registro e controle de variáveis que definem o comportamento de um sistema termodinâmico".

Ao construir novas máquinas ou sistemas instrumentados para utilização em qualquer área, é muito comum a inclusão de dispositivos dedicados, como computadores de vários portes ou mesmo de microcontroladores integrados. De baixo custo, compactos e poderosos, tanto em "hardware" como em "software", os computadores tornaram possível significativos avanços em produtividade, qualidade, eficiência, flexibilidade e segurança. No entanto este fato trouxe ao público não técnico, a errônea visão de que todo o sistema é um computador. É importante que não se reforce esta idéia. Os computadores são importantes, mas não são os componentes mais críticos de um sistema que envolva instrumentação. Todo o cuidado deve ser dedicado aos elementos externos ao computador, aos atuadores que respondem aos comandos oriundos do computador, bem como aos sensores que suprem o computador com informações vitais ao processo^[17].

A.2- CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS INSTRUMENTADOS

Em geral a instrumentação no âmbito da engenharia pode ser classificada em três diferentes segmentos:

- Monitoração de processos,
- Controle de processos,
- Análise experimental.

Esta classificação é uma tentativa de alguns autores^[17], visando um melhor entendimento de características e técnicas recomendadas em cada caso. A seguir procura-se descrever cada um destes diferentes segmentos.

A.2.1- Monitoração de processos

Monitorar significa sensorear, avaliar e registrar, sob forma gráfica ou visual, uma ou mais variáveis que têm algum significado para um observador^[8]. Exemplos típicos de instrumentos utilizados em monitoração são os termômetros, anemômetros e barômetros empregados para registrar as condições climáticas. Do mesmo modo, medidores de gás, água e energia elétrica são instrumentos que registram o consumo destes insumos em uma residência ou instalação industrial. Na figura A.1 está esboçado um diagrama em blocos de um sistema de aquisição de dados.

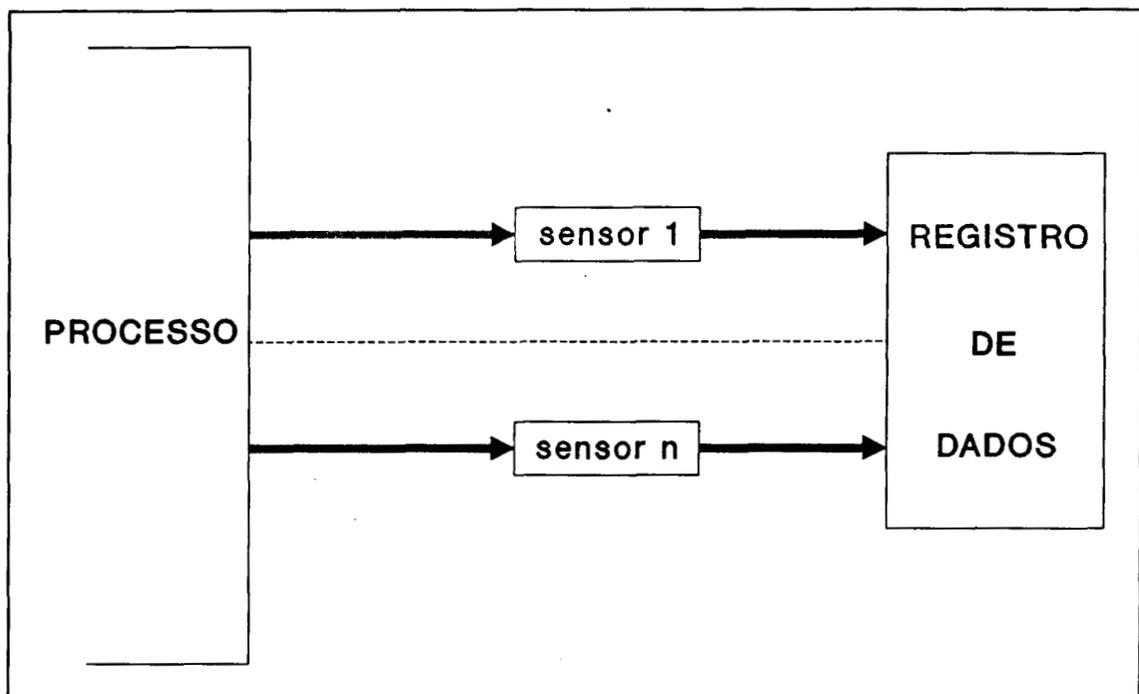


Figura A.1- Sistema de aquisição de dados

A.2.2- Controle de Processos

Controlar significa sensorear, avaliar e modificar ou manter, uma ou mais variáveis dentro de limites pré determinados. A instrumentação aqui utilizada, faz parte de um sistema que inclui o controle. Utilizam-se Transdutores sensores que permitem

medir e registrar variáveis de interesse e transdutores atuadores para interagir com o processo. O diagrama em blocos da figura A.2 representa um sistema instrumentado para controle de processos.

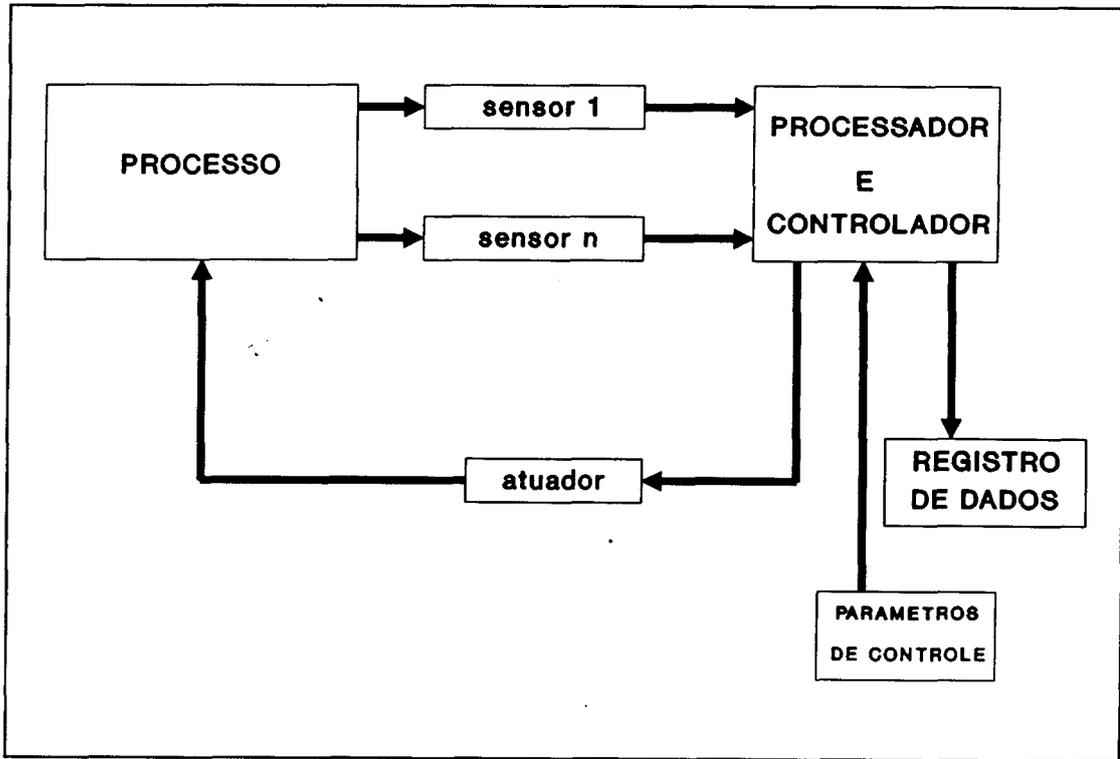


Figura A.2- Sistema instrumentado para controle de processo

O registro de grande volume de informações, o tratamento estatístico de dados bem como a capacidade de processamento lógico matemático dos computadores, permite que se faça a monitoração e o controle de complexas plantas industriais, nas mais diferentes áreas (petroquímica, siderúrgica, metal mecânica, elétrica, etc...).

O uso de sistemas de controle distribuídos (SDCDs) tem sido intensificado nos últimos anos, sendo pedra de toque da modernização do parque industrial em todo mundo.

A.2.3- Análise Experimental

Em muitas áreas de pesquisa, a solução de problemas

pode ser alcançada tanto pela via Experimental como pela via Teórica. Alguns problemas requerem aplicação de ambos os métodos, principalmente aqueles que estão relacionados com a fronteira do conhecimento atual, onde ainda não há teorias ou modelos completamente desenvolvidos. Nestes casos, teoria e prática andam juntas e é necessário que os experimentos sejam realizados cuidadosamente, com toda a instrumentação necessária muito bem ajustada para prevenir erros de avaliação. Estas atividades, desenvolvidas principalmente em centros de pesquisa, em universidades ou em algumas indústrias, são genericamente denominados como Análise Experimental^[17]. Na figura A.3 representa-se um sistema típico.

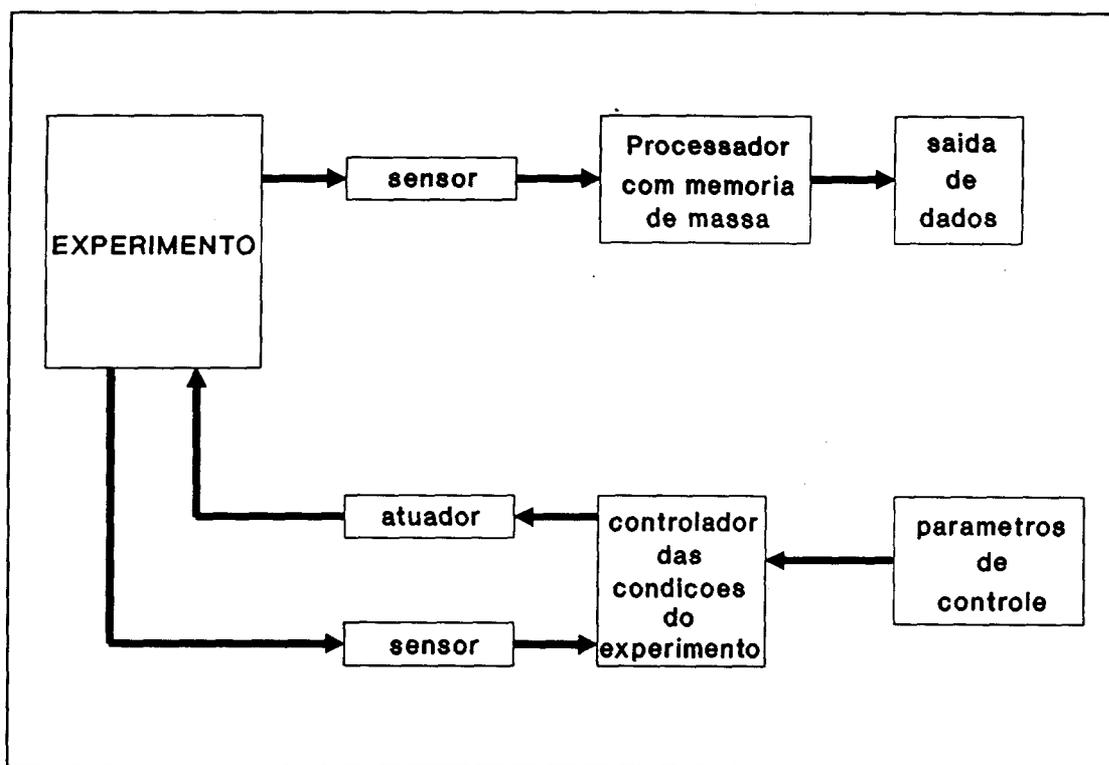


figura A.3- Sistema para análise experimental

Os experimentos são conduzidos de forma que se possam estudar separadamente os efeitos de diversas variáveis. Para tanto incorporam-se dispositivos de controle que procuram manter estáveis, ou variando de forma controlada, as variáveis que se pressupõe independentes.

Em muitos laboratórios realizam-se ensaios estáticos e

dinâmicos de peças, máquinas ou corpos de prova, com coleta de dados a serem utilizados em cálculos subseqüentes. Estes dados são muitas vezes processados em computadores com grande capacidade de memória, realizando-se então simulações e testes de modelos matemáticos que possam explicar os resultados obtidos experimentalmente.

Ainda que se pudesse enquadrar a Análise Experimental em uma das classificações anteriores (Monitoração ou Controle de Processos), é preferível tratá-la separadamente pela especificidade dos sistemas e exigências de desempenho da instrumentação envolvida.

A.3- GENERALIDADES SOBRE TRANSDUTOR, CONDICIONADOR, REGISTRADOR, FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA, SENSIBILIDADE E RESOLUÇÃO

As definições de transdutor encontradas na literatura são muito diversificadas. Algumas são muito restritivas, outras muito abrangentes. Adota-se aqui a definição constante do caderno técnico^[8] que se utiliza nas disciplinas de Instrumentação dos departamentos de Metalurgia e Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da UFRGS:

- "Transdutor é um dispositivo que converte um estímulo (sinal de entrada) em uma resposta (sinal de saída) proporcional, adequada à transferência de energia, medição ou processamento da informação. Em geral o sinal de saída é uma grandeza física de natureza diferente do sinal de entrada".

Desta forma, qualquer dispositivo que se enquadre nesta definição pode ser visto como um transdutor. Pode-se pois subdividi-los em:

- Transdutores Conversores,
- Transdutores para Instrumentação (sensores e atuadores).

Os primeiros têm como parâmetro fundamental a eficiência ou rendimento no processo de conversão de energia. Já os transdutores sensores, que servem para monitorar ou medir grandezas físicas, devem interferir minimamente no ambiente onde estão inseridos. Devem também apresentar uma saída que guarde relação direta e monotônica com a grandeza medida. Os transdutores atuadores, a exemplo dos sensores, devem responder fielmente aos sinais de controle, de modo que possam atuar prontamente sobre o processo ou experimento que está sendo controlado.

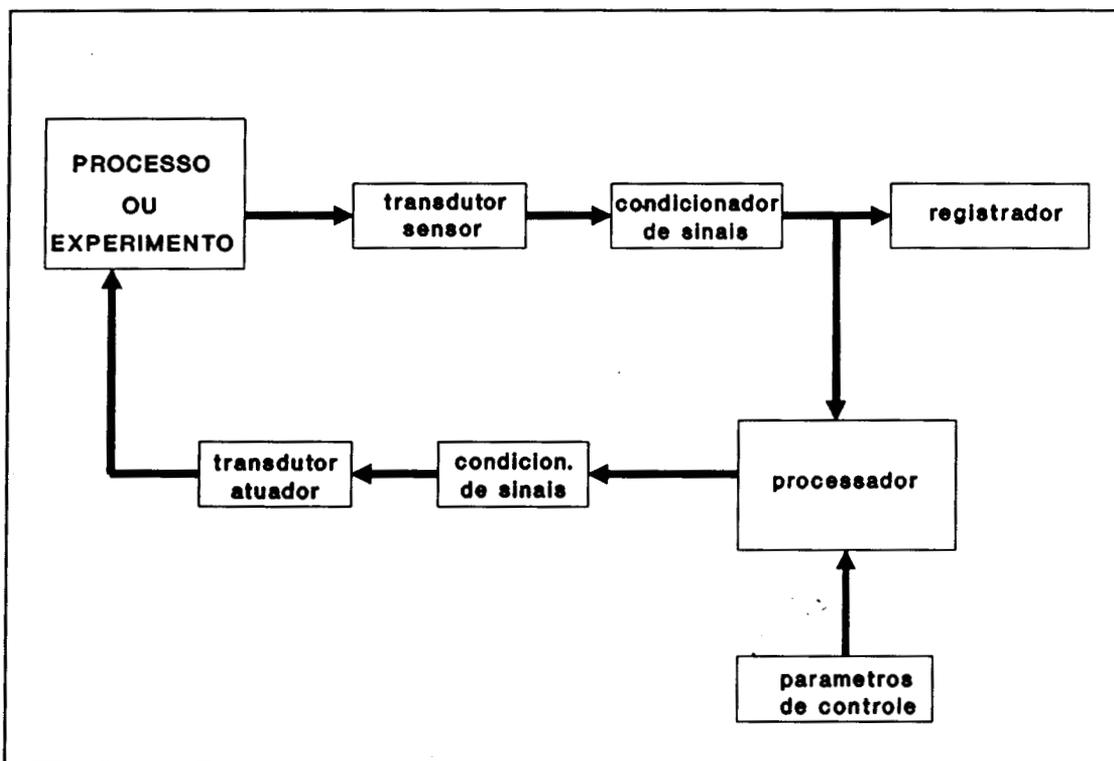


figura A.4- Instrumentação, sistema completo

Os transdutores sensores, com saída elétrica, são quase sempre ligados a dispositivos denominados Condicionadores de Sinais. Estes recebem na entrada um sinal elétrico proveniente do transdutor e o amplificam, eliminam ruído, realizam operações matemáticas (integração, diferenciação, logaritmação, adição, subtração, divisão, etc...) apresentando na saída um sinal adequado ao Registrador ou ao Processador.

Os Registradores e Indicadores utilizados em sistemas instrumentados são os mais variados possíveis. Vão desde instrumentos analógicos (Voltmetros, ampermetros, etc...), registradores gráficos, indicadores digitais até impressoras. Com a introdução de sistemas computadorizados e a implantação de sistemas controlados costuma-se ainda caracterizar separadamente um bloco funcional denominado Processador. Na figura A.4 apresenta-se um sistema completo onde aparecem todos os blocos até aqui definidos.

Idealmente um transdutor, um instrumento, ou mesmo um sistema de medição, tem o seu comportamento analisado em função da relação entre os sinais de entrada (estímulo) e de saída (resposta), na sua faixa de operação. Esta relação é referida genericamente pela literatura como Função de Transferência. É representada teoricamente por uma função matemática.

Na realidade a resposta será também influenciada por estímulos indesejáveis tais como variações térmicas, vibrações, ruído elétrico, etc... Em 1955, Drapper, Mc Kay e Lees ^[18] em sua obra "Instrument Engineering", sugerem uma configuração generalizada para análise da relação entre os sinais de entrada e saída de um instrumento de medição que leva em consideração também os estímulos indesejáveis. Mais recentemente, em 1990, Doebelin ^[17] propõe uma análise baseada no mesmo esquema ligeiramente modificado. Esta parece bastante interessante e pode ser estendida para que se compreendam as limitações de um Canal de Medição e os métodos de correção que se podem empregar para melhorar seu desempenho.

Quando se deseja construir um sistema de medição, com transdutores, condicionadores de sinais registradores ou indicadores e processadores das informações coletadas, configura-se o que se denomina um Canal de Medição.

Na figura A.5 apresenta-se um diagrama em blocos que pode representar o comportamento de um canal de medição. Nele considera-se a existência de três sinais de entrada (i_D , i_M , i_I) e uma única saída (O).

O sinal de entrada identificado por " i_D " representa o estímulo que se deseja medir ou detectar. O sinal " i_I " é

denominado de interferência e representa estímulos indesejáveis aos quais o canal de medição é sensível. O sinal " i_M " representa as modificações que podem ocorrer na performance dos dispositivos que compõe o canal de medição, tanto na sua capacidade de sensoriar o estímulo desejado, como também em relação ao efeito que o sinal interferente causa na saída.

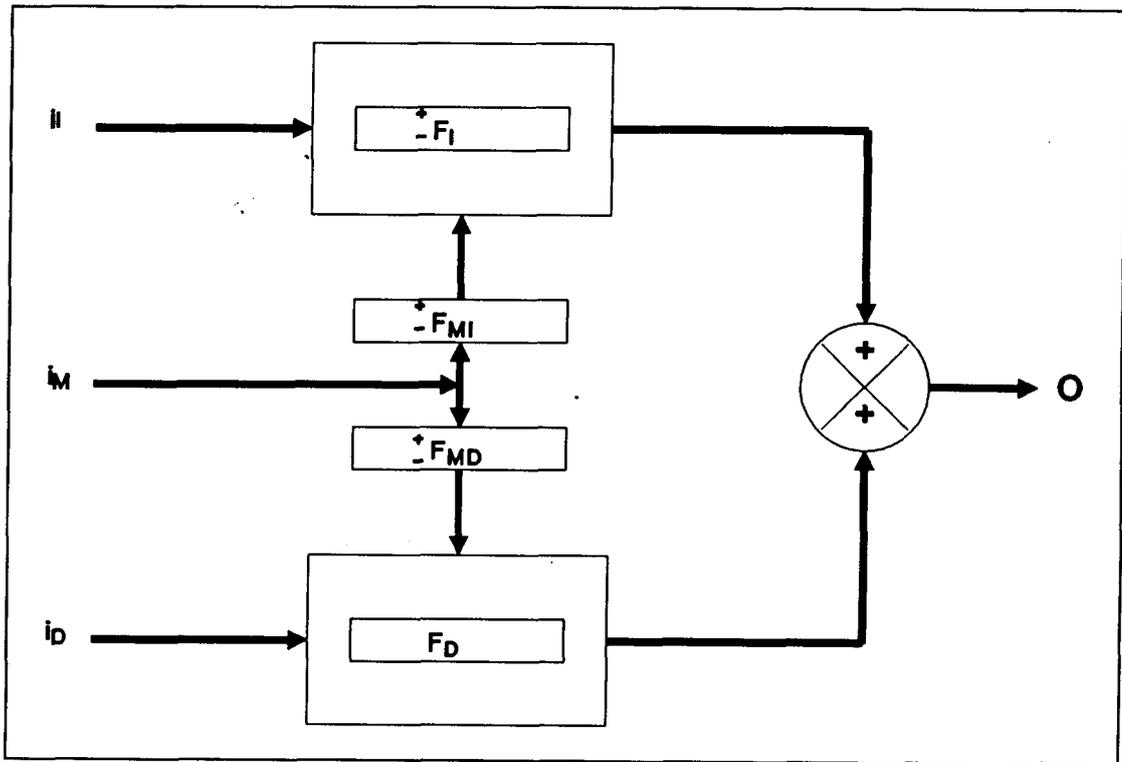


Figura A.5- Diagrama em blocos de um canal de medição

A relação entre a entrada e a saída de cada bloco está representada por uma função matemática " F_x " ou " F_{xy} " (com um ou dois índices conforme o caso). Assim " i_D " produzirá na saída uma parcela do sinal que será representada pelo produto " $i_D \cdot F_D$ ". Genericamente pode-se então escrever:

$$O = i_D \cdot F_D \pm i_M \cdot F_{MD} \pm i_I \cdot F_I \pm i_M \cdot F_{MI} \tag{A.1}$$

$$O = i_D \cdot F_D \pm i_I \cdot F_I \pm i_M \cdot (F_{MI} + F_{MD}) \quad (\text{A.2})$$

É desejável que a primeira parcela seja preponderante em qualquer medição. As parcelas subseqüentes são indesejáveis. Devem portanto ser minimizadas ao máximo.

Numa representação genérica de qualquer medida pode-se utilizar a notação:

$$\text{Medida} = \text{Valor Nominal} \pm \text{Incerteza} \quad (\text{A.3})$$

Assim pode-se dizer que a parcela " $i_D \cdot F_D$ " é o valor nominal e as parcelas subseqüentes da expressão (A.2) a incerteza da medida.

O ideal seria que " F_D " fosse simplesmente uma constante que faria a correlação entre a entrada e a saída.

Tal comportamento seria a característica de um sistema linear. Entretanto nem sempre isto ocorre. Para sistemas não lineares uma constante não é suficiente para relacionar estímulo e resposta, usualmente uma função matemática pode satisfazer tal requisito.

Cabe ainda salientar que estímulo e resposta, até aqui considerados estáticos, podem vir a ser dinâmicos de modo que para relacionar entradas e saídas tenha que se utilizar equações diferenciais.

O bloco que representa o efeito do sinal de interferência tem uma função de transferência " F_I " que pelo menos genericamente pode ser da mesma natureza de " F_D ". O ideal é que " F_I " fosse nula ou pelo menos constante. O sinal de interferência pode ser ruído elétrico, vibração mecânica, etc... Este aparecerá no sinal de saída em função do bloco somador que na figura A.5 representa um efeito de superposição.

O sinal " I_M " provoca através de " F_{MD} " e " F_{MI} " modificações nas funções " F_D " e " F_I " originalmente existentes. Pode-se

justificar este efeito imaginando que " i_M " é por exemplo a temperatura ambiente que pode afetar todas as funções do canal de medição.

Finalmente cumpre chamar a atenção de todos os usuários em relação às definições de Sensibilidade e Resolução. Segundo a Norma ISO de Metrologia, Sensibilidade de um instrumento de medição é:

" a relação entre a variação da resposta (sinal de saída) e a correspondente variação do estímulo na entrada (sinal de entrada)."

A Resolução de um instrumento indicador é:

" a capacidade de um indicador distinguir inequivocamente entre dois valores adjacentes da quantidade indicada"

A aplicação desta terminologia aos sistemas instrumentados pode ser entendida supondo-se que, um instrumento, um transdutor ou um canal de medição, tenha como estímulo uma grandeza física genérica " G_e " e, como saída, um sinal (usualmente elétrico) " X_s ". Assim, sendo " F_T " a Função de Transferência do canal de medição considerado, pode-se escrever:

$$X_s = F_T(G_e) \quad (\text{A.4})$$

logo a Sensibilidade " S_T " é dada por:

$$S_T = \frac{dX_s}{dG_e} \quad (\text{A.5})$$

No caso de funções de transferências lineares tem-se:

$$S_T = \frac{\Delta X_s}{\Delta G_e} \quad (\text{A.6})$$

Sendo a resolução a variação da grandeza de medição " δG_e " que causa uma variação " δX_s " no sinal de saída pode-se escrever:

$$\delta G_e = \frac{\delta X_s}{S_T} \quad (\text{A.7})$$

ou em valor relativo:

$$\text{Resolução} = \frac{\delta X_s}{G_{e\text{máx.}} - G_{e\text{mín.}}} \times \frac{1}{S_T} \quad (\text{A.8})$$

Cabe ainda referir que, no caso de transdutores que necessitam de excitação externa e que são lineares, a Sensibilidade é usualmente especificada de forma adimensional, sempre referida ao valor nominal da grandeza de entrada (Valor de fundo de escala). Este é o caso das células de carga que têm a sua Sensibilidade especificada em mV/V.

A.4- MÉTODOS PARA MELHORAR O DESEMPENHO DE UM CANAL DE MEDIÇÃO

A desempenho de um canal de medição pode ser aferida pela sua confiabilidade, imunidade a estímulos espúrios, insensibilidade às condições ambientes, estabilidade no tempo para medidas estáticas, bem como pela sua resposta em frequência quando os sinais de interesse são dinâmicos.

Para prevenir grande parte dos efeitos indesejáveis, utilizam-se técnicas diversas. Seria praticamente impossível enumerá-las de forma completa, porem uma breve descrição de algumas delas serão a seguir apresentadas, pois justificam muitas das soluções adotadas na definição da instrumentação sugerida nesta proposta de tese.

A.4.1- Método da insensibilidade inerente

Este é o método mais natural de se buscar melhora do canal de medição. Cada componente do mesmo deve ser insensível a sinais espúrios. Em relação ao transdutor utilizado, pode-se dizer que a escolha deverá recair naquele que apresentar menor sensibilidade à estímulos indesejáveis presentes no ambiente em que se efetuará a sua instalação. Do mesmo modo os condicionadores de sinais e registradores devem ser imunes a ruídos, resistirem a vibrações ou acelerações, variações da temperatura ambiente, se estiverem em locais que estas perturbações se manifestem.

A simplicidade da idéia pode levar um usuário comum da instrumentação a imaginar que então está tudo resolvido. Obviamente é impossível atingir um grau infinito de imunidade às perturbações indesejáveis, sempre presentes em qualquer ambiente onde se instala um sistema de medição.

É importante salientar no entanto que a escolha dos transdutores é em princípio o passo mais importante. De nada adiantaria cuidar do restante do canal de medição se por exemplo um transdutor de força fosse altamente sensível à variações da temperatura ambiente. Exemplos e contra exemplos de situações como esta existem às centenas.

A.4.2- Método da realimentação negativa

Neste caso procura-se tirar partido do elevado ganho que se dispõe em determinadas situações onde se utilizam transdutores atuadores capazes de alterar a grandeza que está sendo medida. Isto ocorre freqüentemente em sistemas onde a variável que se deseja controlar, através de um transdutor atuador, é também medida por um transdutor sensor. O seu valor instantâneo é comparado permanentemente com o valor desejado de modo que qualquer diferença é imediatamente detectada. Esta diferença através de um laço de realimentação faz com que o dispositivo atuador seja acionado para corrigir a diferença.

Um exemplo típico destes sistemas é o dos servomecanismos que podem controlar deslocamentos lineares ou angulares a partir de motores de acionamento e sensores de posição.

Outro exemplo interessante é o de uma termobalança que utiliza um detector de zero (equilíbrio) bastante sensível e um dispositivo eletromagnético capaz de reestabelecer o equilíbrio pela aplicação de corrente elétrica. A intensidade de corrente é então utilizada como informação da variação de massa que ocorre em função do acréscimo da temperatura.

Resumindo pode-se dizer que esta técnica procura ampliar ao máximo a sensibilidade do canal de medição, operando sempre em torno de um ponto de equilíbrio (zero), de modo que se garanta a estabilidade da medida e a mesma acuidade em qualquer ponto da faixa de variação da grandeza medida.

A.4.3- Método da correção do valor medido

Quando se dispõe de informações sobre a sensibilidade de um canal de medição às variáveis indesejáveis, pode-se realizar uma correção da medida efetuada, avaliando-se a intensidade das próprias variáveis espúrias. Isto se torna cada dia mais viável em função da capacidade de processamento dos canais de medição que incorporam computadores ou mesmo microcontroladores integrados.

Um exemplo típico seria a correção da leitura de qualquer variável em função de variações da temperatura ambiente. Conhecido o comportamento do transdutor utilizado, ou de qualquer outro componente do canal de medição, em função da temperatura, pode-se estabelecer o cálculo da correção a ser efetuada em cada medida da grandeza de interesse.

A.4.4.- Método da filtragem do sinal medido

Ainda que este método possa ser imaginado como uma

técnica de eletrônica analógica, sua aplicação estende-se a um grande número de situações. Pode-se entender como filtragem todas as providências que se tomam para evitar que os sinais de interesse no canal de medição sejam contaminados por perturbações espúrias sistemáticas.

Os exemplos vão desde a instalação de dispositivos amortecedores de vibrações mecânicas (molas, espumas de plástico, suspensões rotativas, etc...) até blindagens e filtros eletrônicos para supressão de ruído elétrico de baixa ou alta frequência.

Também nesta técnica inclui-se o processamento digital de sinais, permitido pela presença de um processador inteligente no canal de medição. Nestes dispositivos pode-se efetuar desde medições que perfazem a média de várias medidas subseqüentes de uma mesma variável, até a implementação de filtros digitais que podem identificar e suprimir qualquer tipo de perturbação sistemática que acompanhe o sinal de interesse.

A.4.5- Método da codificação do sinal medido

Para poder separar o sinal de interesse de perturbações indesejáveis, é muitas vezes necessário imprimir uma codificação no mesmo já na sua origem. O sucesso desta técnica, principalmente em canais de medição que empregam transdutores que exigem excitação elétrica, tem permitido a realização de medidas até então impossíveis, ou extremamente difíceis, em função das perturbações inerentes à maioria dos ambientes onde as mesmas são efetuadas. O ruído elétrico aleatório e intenso inibe medidas de sinais muito tênues.

Em 1946, Dickie [16] mostrou como este tipo de medida poderia ser efetuada através de um condicionador de sinais com a técnica de sincronismo de fase (PLL- Phase Locked Loop). Nesta técnica um sinal com frequência bem conhecida é aplicado ao transdutor que apresenta como resposta um sinal elétrico de mesma frequência, modulado pelo efeito da variável de interesse. A detecção do sinal de saída, realizada em sincronismo com o sinal

de referência, permite que se possam medir sinais cujo nível está até mesmo abaixo do nível do ruído de fundo^[39].

É hoje comum a utilização desta técnica até mesmo em transdutores que operam com extensômetros de resistência elétrica ligados em ponte. A tensão de excitação da ponte é um sinal senoidal de frequência em torno de 5 KHz, gerada pelo condicionador de sinais que também incorpora um amplificador sintonizado e um detector síncrono^[7].

A.4.6- Método diferencial

Uma vez que é muito difícil eliminar os sinais indesejáveis em um canal de medição, principalmente quando os mesmos "penetram" superpostos ao sinal de interesse, uma das técnicas mais empregadas é a que subtrai os sinais espúreos já na entrada do sistema de medição.

A utilização deste método tem particular importância quando os transdutores utilizados possuem saída elétrica. Neste caso os próprios transdutores podem ter saída diferencial (caso de dispositivos montados em ponte de Wheatstone) ou com o emprego de amplificadores eletrônicos diferenciais ligados diretamente aos terminais do transdutor sensor.

Quando os transdutores são construídos num circuito tipo ponte de Wheatstone, pode-se eliminar facilmente efeitos térmicos ou interferências elétricas, sempre presentes em qualquer aplicação. Daí a importância de se desenvolver o uso de sensores que operem por variação resistiva, capacitiva ou indutiva, já que os mesmos sempre podem ser utilizados em circuitos tipo ponte de Wheatstone, portanto com saída diferencial.

APÊNDICE B: ACOPLAMENTOS PARA TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA E SINAL**B.1- INTRODUÇÃO**

A instrumentação eletro-eletrônica aplicada a sistemas girantes tem por finalidade o condicionamento de sinais elétricos disponíveis em transdutores do tipo sensores, ou atuadores, vinculados às partes rotativas de qualquer conjunto mecânico. O uso de extensômetros de resistência elétrica aplicados às partes girantes de um sistema mecânico se insere neste contexto, exigindo que se disponha de energia para excitá-los e de um modo de coleta de sinal de saída proporcional à grandeza que se estiver medindo. A este conjunto destinado a transferência de sinal e energia denomina-se, já no capítulo 1, como "Acoplamento".

Em alguns casos apenas a ponte de extensômetros está solidária às partes móveis. Em outras situações, além dela, existem também circuitos eletrônicos associados (amplificadores, moduladores, transmissores). Estes são chamados vulgarmente de "eletrônica embarcada" por serem solidários às partes em movimento.

Uma das soluções mais empregadas para suprir de energia o circuito de uma ponte de extensômetros, ou mesmo alguns componentes constituintes da "eletrônica embarcada", é a utilização de baterias (de níquel-cádmio ou mercúrio), também solidárias às partes móveis. Esta solução tem vários inconvenientes, quando aplicada a elementos girantes: mau funcionamento de alguns tipos de baterias, desbalanço dinâmico pela considerável massa das mesmas, dificuldade de acomodação pelo seu formato e volume. Obviamente, em qualquer aplicação que utilize baterias, ter-se-á também problemas de substituição periódica ou então de recarga das mesmas.

No caso da transferência do sinal de desbalanço da ponte, várias são as alternativas propostas. Estas vão, desde circuitos transmissores com modulação em FM, PWM ou mesmo AM, até sistemas ópticos [19, 20].

No entanto, as alternativas mais utilizadas são, sem dúvida alguma, os sistemas de acoplamento com anéis e escovas, os que empregam transformadores rotativos e os que utilizam acoplamento capacitivo para transferência de sinal. No desenvolvimento de torquímetros rotativos, estes têm sido os tipos de acoplamento mais utilizados por fabricantes mundiais e conseqüentemente, têm sido os mais estudados pelo Grupo de pesquisadores do INMETAL. A experiência acumulada permite que já se disponha de elementos para caracterizar, modelar e recomendar ou não cada um destes tipos de acoplamento. Nos últimos três anos publicaram-se sobre o tema seis trabalhos em congressos nacionais. Atualmente trabalha-se para fazer uma publicação de nível internacional sobre o modelamento e projeto de transformadores rotativos. Também uma outra tese de doutorado aprofunda o tema em acoplamentos tipo anéis e escovas.

Nos tópicos subseqüentes são enfocados mais profundamente estes dois tipos de acoplamento, avaliando-se no final sua aplicabilidade à proposta de medição direta de torque, objeto deste trabalho.

B.2- ACOPLAMENTO COM ANÉIS E ESCOVAS

B.2.1- Características, ligação e modelo para análise

Um sistema de acoplamento que utiliza anéis e escovas é em princípio bastante simples. Na figura B.1 mostra-se um conjunto comercializado pela HBM que é de uso geral.

As características fundamentais são o baixo desgaste em altas velocidades, baixa resistência de contato e introdução de tensões térmicas muito baixas. Quando se trabalha com os extensômetros em ponte completa recomenda-se o uso de cinco pares de anel-escova. Dois para alimentar a ponte, dois para a coleta do sinal e um para aterramento elétrico da peça girante. Na fig. B.2 apresenta-se um diagrama elétrico do circuito de acoplamento. O contato entre a escova e o anel pode ser modelado por uma

resistência equivalente de contato (R_c) e uma fonte de tensão equivalente a tensão termoelétrica da junção anel-escova (V_t).

Ainda que se utilizem materiais adequados para obtenção de uma baixa resistência de contato, é impossível impedir a variação que ocorre nas mesmas devido ao movimento rotativo. Tipicamente

os fabricantes internacionais conseguem $R_c \leq 40 \text{ m}\Omega$ e $\Delta R_c \leq \pm 2 \text{ m}\Omega$. Mesmo com estes baixos valores de variação em R_c , podem ainda ser

consideráveis as perturbações que ocorrem no sinal detectado como desbalanço da ponte. Tudo depende da natureza dos circuitos eletrônicos utilizados no condicionador de sinais.

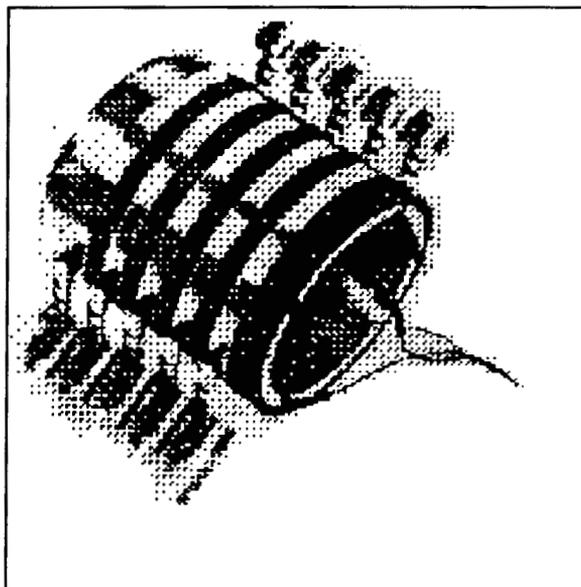


Figura B.1- Conjunto de anéis e escovas comercializados pela HBM. A- produzido em dimensões diversas. B- Para utilização em pontas de eixos com 6 ou 12 anéis/escovas.

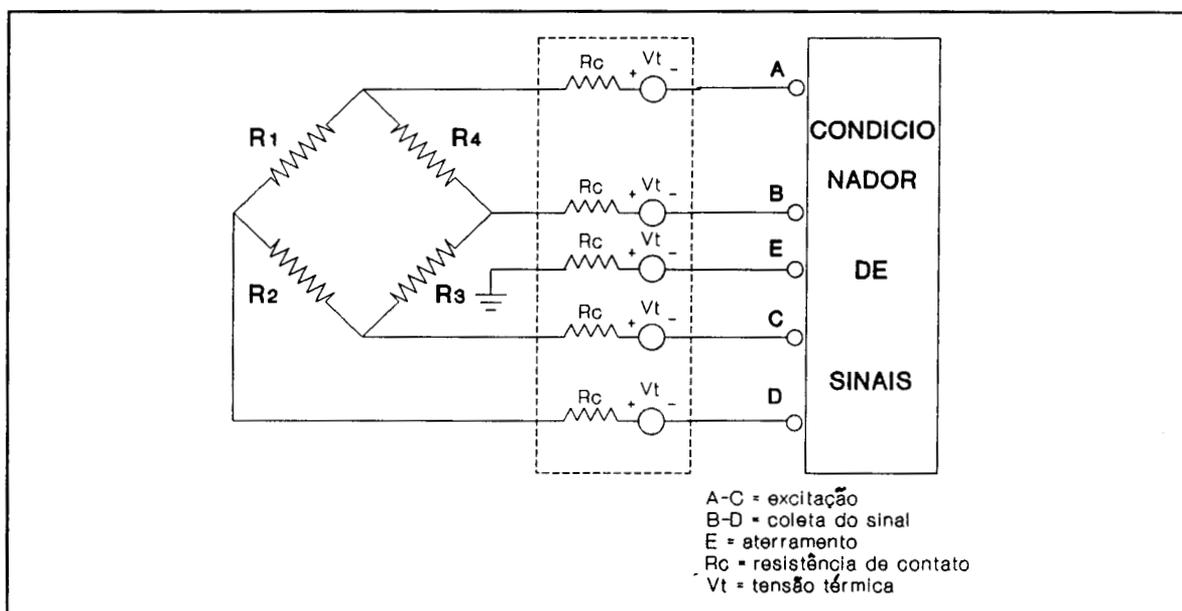


Figura B.2- Esquema elétrico do circuito de acoplamento de uma ponte de extensômetros girantes através de um conjunto de anéis e escovas.

B.2.2- Condicionadores de sinais para uso em acoplamento do tipo anel-escova

O uso de condicionadores de sinais com fonte de tensão constante, que são os instrumentos usuais para trabalho com transdutores à base de extensômetros de resistência elétrica, causa sérios problemas quando for ligado a uma ponte através de acoplamentos do tipo anel-escova. Na figura B.3 apresenta-se um circuito para análise, onde a excitação da ponte é realizada por um condicionador com fonte de tensão e o sinal de desbalanço coletado é aplicado à entrada de um amplificador diferencial de alta impedância.

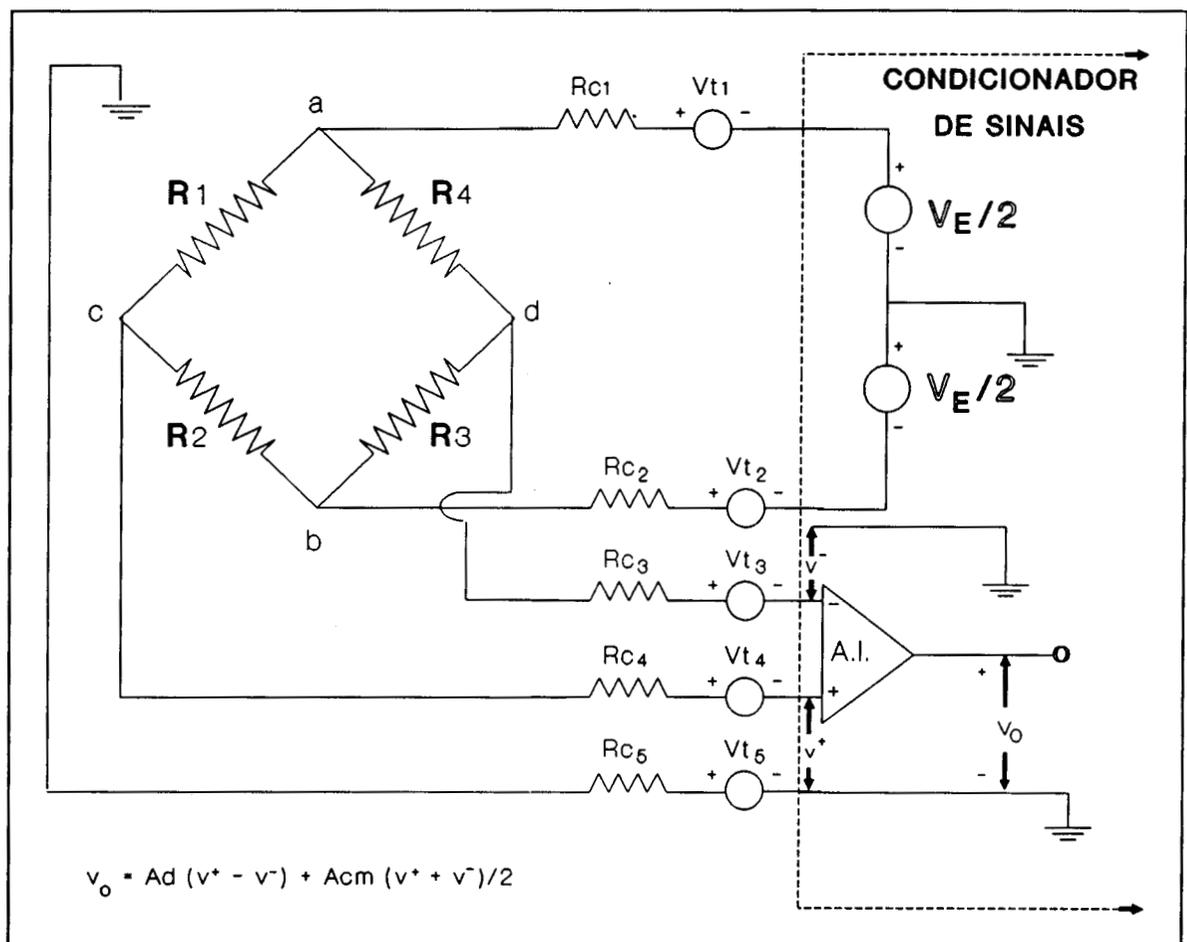


Figura B.3- $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$; AI = amplificador de instrumentação; V_t = tensões térmicas no par anel-escova; A_d = ganho diferencial do AI; A_{cm} = ganho de modo comum do AI.

Pela figura B-3 percebe-se que:

$$V_{ab} = \frac{V_E \pm Vt_1 \mp Vt_2}{R + RC_1 + RC_2} R \quad (\text{B.1})$$

é a tensão aplicada sobre a ponte de extensômetros. Assim verifica-se que uma variação em Rc_1 , Rc_2 , Vt_1 ou Vt_2 provoca uma variação em V_{ab} . Vt_1 e Vt_2 dependem da temperatura e dos materiais constituintes da escova e do anel. Usualmente são tensões da ordem dos microvolts (10^{-6} Volts). Se os pares anel-escova forem semelhantes poder-se-ia desprezar Vt no cálculo de V_{ab} . Assim simplificadamente, tem-se:

$$V_{ab} \approx \frac{V_E R}{R + (RC_1 + RC_2)} = \frac{V_E}{1 + [(RC_1 + RC_2) / R]} \quad (\text{B.2})$$

Isto significa que a V_{ab} será sempre menor do que E e varia de acordo com as variações em Rc_1 e Rc_2 . Como V_{cd} é o sinal de desbalanço da ponte, e é proporcional a V_{ab} . Este será então menor do que poderia ser, caso o acoplamento fosse direto, e ainda apresentará uma variação inerente às variações de Rc .

Para uma ponte completa, em que os extensômetros têm variações resistivas (ΔR) simétricas e idênticas com aplicação do estímulo, pode-se dizer, que em torno do equilíbrio:

$$V_{cd} = V_{ab} \frac{\Delta R}{R} \quad (\text{B.3})$$

onde R é a resistência de cada extensômetro e ΔR é a variação que os mesmos sofrem com a deformação.

Então substituindo tem-se:

$$V_{cd} = \frac{V_E \Delta R/R}{1 + [(RC_1 + RC_2)/R]} \quad (\text{B.4})$$

Esta expressão demonstra que podem haver variações em V_{cd} para uma mesma deformação dos extensômetros, caso haja variações em RC_1 e RC_2 . A variação em V_{cd} será no entanto tanto menor quanto maior for R .

As resistências de contato, em série com o amplificador diferencial que detecta o sinal de desbalanço da ponte, não têm grande influência se a impedância de entrada do mesmo for elevada. Usualmente isto é verdadeiro pois o estágio de entrada do condicionador é um amplificador de instrumentação. Sob este ângulo de análise os problemas que poderão surgir são eventuais diferenças entre V_{t_3} e V_{t_4} e variações na tensão de modo comum $(v^+ + v^-)/2$ em virtude de diferentes variações em RC_1 e RC_2 . Note-se na figura B.3 que a fonte de tensão E foi bipartida em $E/2$ com o centro aterrado. Isto é realizado para que v^+ e v^- sejam aproximadamente zero quando a ponte estiver em repouso.

É importante ainda considerar que o circuito de aterramento da parte móvel do sistema mecânico é fundamental, para que não haja uma tensão de modo comum entre a referência (massa) do amplificador de instrumentação e as entradas do mesmo, em virtude de interferências elétricas e magnéticas.

Para evitar que as variações das resistências de contato introduzam alterações na resposta da ponte, é preferível que a mesma seja excitada por uma fonte de corrente constante. Na figura B.4 mostra-se este circuito. Verifica-se agora que é possível manter V_{ab} constante mesmo que R_c varie.

No circuito da figura B.4. tem-se:

$$V_{ab} = R I \quad (\text{B.5})$$

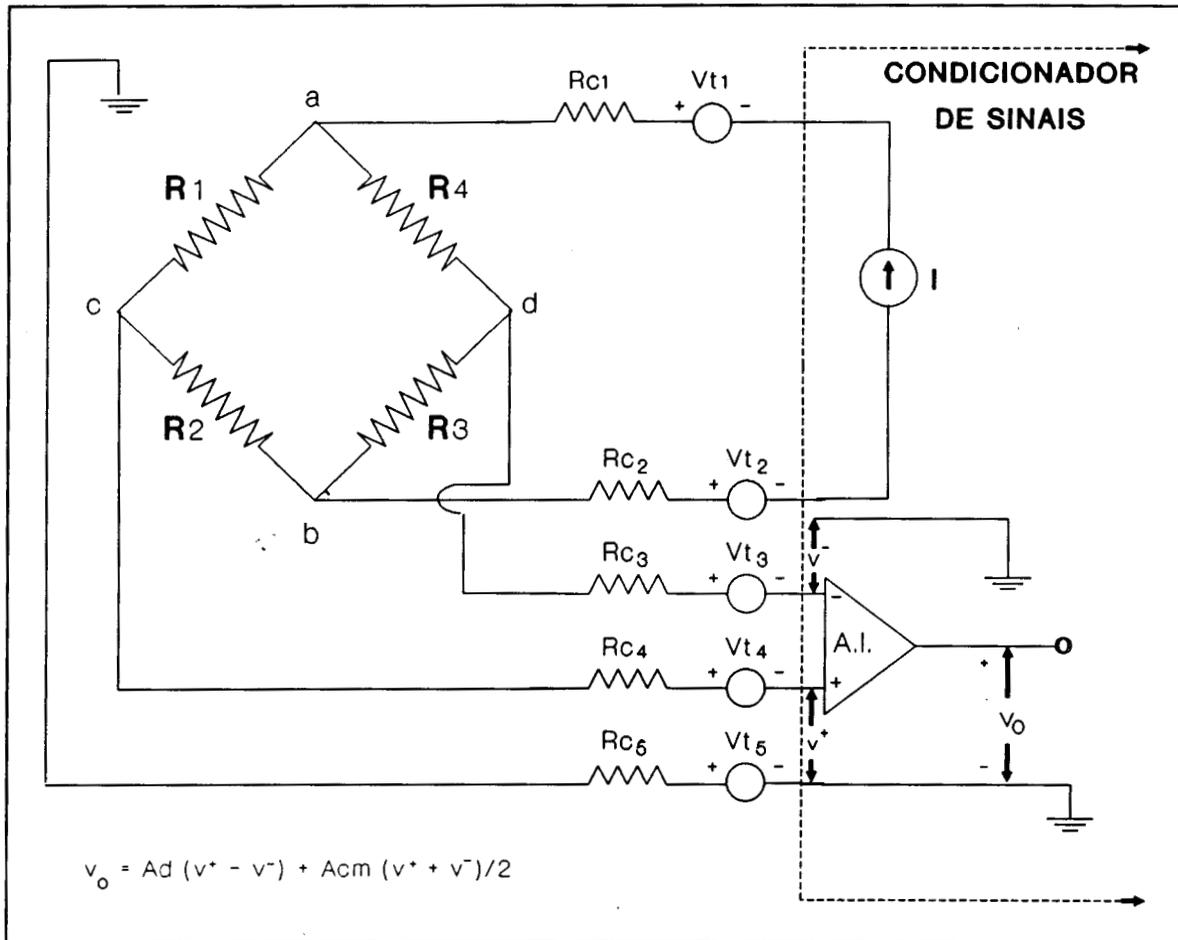


Figura B.4- Circuito equivalente de uma ponte de extensômetros ligada a um condicionador que utiliza excitação com fonte de corrente (I).

Logo, para pequenas deformações em torno do equilíbrio:

$$V_{cd} = R I \frac{\Delta R}{R} = I \Delta R \quad (\text{B.6})$$

Se I for constante, V_{cd} é proporcional apenas às variações dos extensômetros.

A dificuldade agora reside em manter a tensão de modo comum próxima de zero. Com o uso da fonte de corrente perde-se o ponto de aterramento que se tem no caso de excitação com fonte de tensão bipartida. Na figura B.5 apresenta-se o circuito de uma fonte de corrente para excitar uma ponte de extensômetros com acoplamento através de anéis e escovas. A corrente que se deseja

utilizar para alimentar a ponte de extensômetros é dada por:

$$I = V^*/R^* \quad (\text{B.7})$$

onde V^* é ajustada com um potenciômetro multivoltas. Um dos critérios utilizados para que a tensão de modo comum seja a menor possível é ajustar v^* para que:

$$I(R^*+R/2) = V \quad (\text{B.8})$$

onde R é a resistência dos extensômetros, R^* é um resistor de amostragem da corrente I e V a tensão simétrica disponível no circuito.

Analisando o circuito da figura B.5 vê-se que, em equilíbrio:

$$V^+ = V^- = (R/2)I + Rc_2I + R^* - V \quad (\text{B.9})$$

Se $Rc_2 I \ll V$ ter-se-á, com o ajuste previsto em (B.8),

$$V^+ = V^- \approx 0 \quad (\text{B.10})$$

Assim, a tensão de modo comum ficaria reduzida a zero. No entanto, como Rc varia, e nem sempre é um valor muito baixo, pode ocorrer que a tensão de modo comum seja diferente de zero. Ou seja:

$$V^+ = V^- = (Rc \pm \Delta Rc) I \quad (\text{B.11})$$

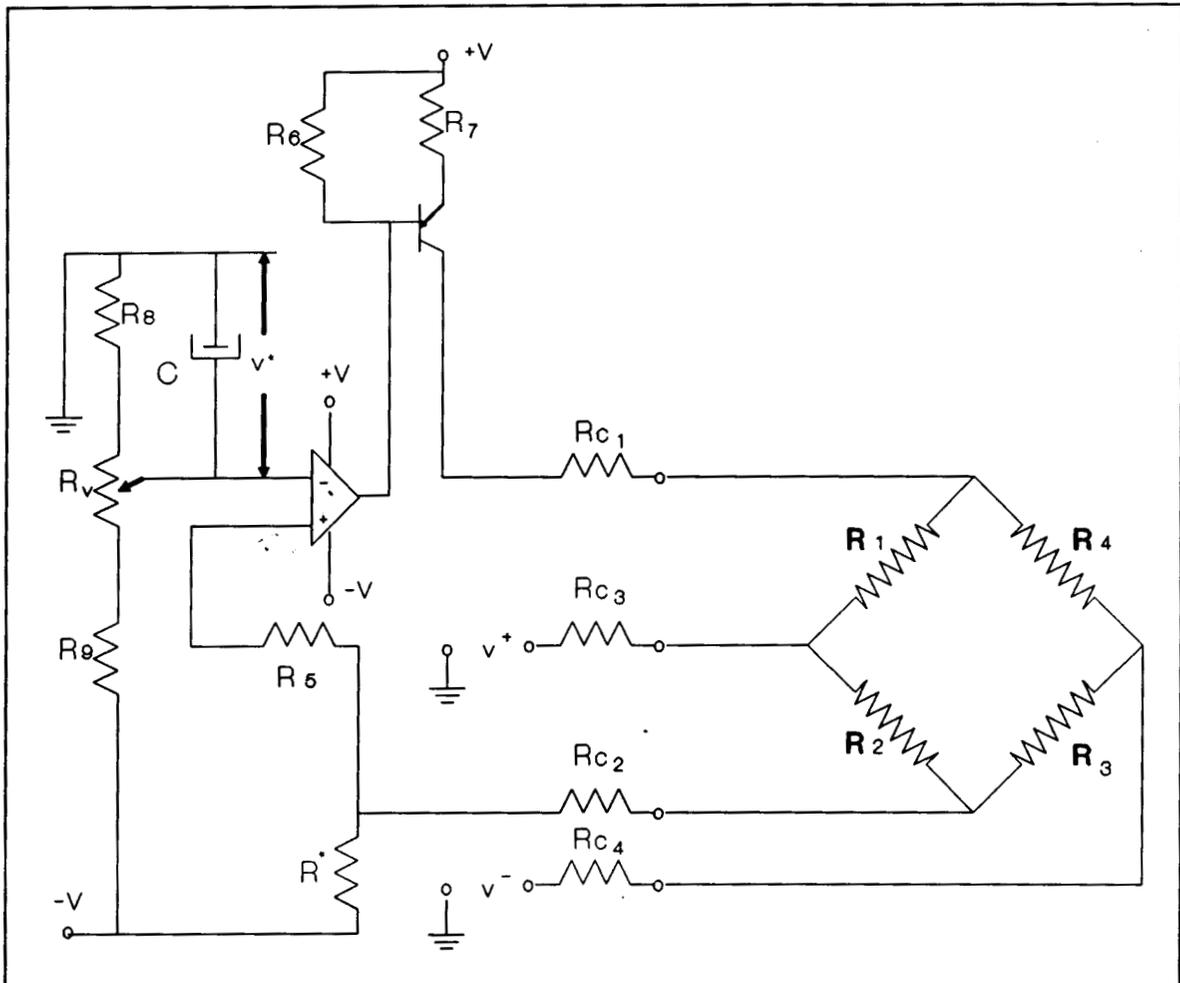


Figura B.5- Circuito tipo fonte de corrente para excitar ponte de extensômetros com acoplamento através de anéis e escovas. $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$.

Onde ΔR_c é a variação da resistência de contato. Há uma solução de compromisso para redução da tensão de modo comum que implica num aumento de R^* para que a corrente I seja minimizada e assim a influência de R_{c2} seja também menor. Ocorre que quanto menor I menor será a resposta da ponte (veja expressão B.6).

Supondo uma ponte com extensômetros de 120Ω e desejando manter $V_{ab} = 5$ Volts calcula-se:

$$I = \frac{5 \text{ V}}{120 \Omega} = 41,67 \text{ mA} \quad (\text{B.12})$$

Caso a ponte utilize extensômetros de 350Ω com V_{ab}

= 10 Volts ter-se-á:

$$I = \frac{10 \text{ V}}{350 \text{ } \Omega} = 28,57 \text{ mA} \quad (\text{B.13})$$

Em qualquer caso, a escolha de V_{ab} está vinculada à potência máxima que se pode dissipar nos extensômetros (depende do valor ôhmico dos mesmos e do seu tamanho físico). As tensões de 5 e 10 Volts são usuais para transdutores que utilizam extensômetros de 120 Ω e 350 Ω respectivamente.

Para analisar o efeito da tensão de modo comum no sinal do condicionador, pode-se admitir que, em um transdutor de 2 mV/V dispõe-se de um sinal de 20 mV para fundo de escala, se o mesmo for excitado com 10 Volts. Como o sinal analógico na saída do condicionador é da ordem de ± 5 Volts para o fundo de escala calcula-se o ganho diferencial necessário ao condicionador:

$$A_d = \frac{5 \text{ V}}{20 \text{ mV}} = 400 \quad (\text{B.14})$$

Supondo que o índice de rejeição ao modo comum do amplificador seja de 100 dB, calcula-se:

$$20 \log (A_d/A_{cm}) = 100 \text{ dB} \quad (\text{B.15})$$

Com $A_d = 400$ tem-se:

$$A_{cm} = 4 \times 10^{-3} \quad (\text{B.16})$$

O sinal de saída do condicionador de sinais será então

calculado através de:

$$V_o = A_d(V^+ - V^-) + A_{cm}[(V^+ + V^-)/2] \quad (\text{B.17})$$

Em repouso, para extensômetros de 350Ω com $I = 28,57$ mA, ter-se-á:

$$V_o = 4 \times 10^{-3} (R_c + \Delta R_c) 28,57 \times 10^{-3} \text{ Volts} \quad (\text{B.18})$$

$$V_o = 1,1428 \times 10^{-4} (R_c + \Delta R_c) \quad (\text{B.19})$$

Observa-se então que, se R_c for bastante pequeno bem como ΔR_c , a tensão devida ao modo comum seria desprezível. No entanto, a nível dos protótipos desenvolvidos no INMETAL nunca se obtiveram valores de R_c tão baixos como os anunciados pelos fabricantes internacionais. Isto se deve ao fato de que não se dispõe de escovas e anéis especiais (anéis de prata e escovas de prata-grafite). Utilizam-se anéis de cobre com escovas grafitadas (as mesmas usadas em alternadores de automóveis) por seu baixo custo e disponibilidade no mercado de autopeças. As resistências típicas obtidas para R_c são da ordem de $(10 \pm 6) \Omega$. Substituindo-se estes valores de R_c em (B.19) ter-se-á:

$$V_o = (1,1428 \pm 0,6856) \times 10^{-3} \text{ Volts} \quad (\text{B.20})$$

Considerando que a ponte de extensômetros, no fundo de escala, leia deformações na ordem de $\pm 2000 \mu\text{m/m}$, este sinal V_o , correspondente a tensão do modo comum calculado em (B.20), equivaleria a uma deformação de $(0,457 \pm 0,274) \mu\text{m/m}$, se $V_{0\text{máx}}$ correspondesse a ± 5 V. A incerteza seria então de 0,036%, valor perfeitamente aceitável para transdutores rotativos de torque.

B.2.3- Limitações do uso do acoplamento por anéis e escovas para medida direta de torque em sistemas girantes

O acoplamento por anéis e escovas pode ser utilizado em sistemas girantes quando houver possibilidade de adaptá-lo a pontas de eixos livres. No entanto na maioria dos casos haverá necessidade de perfurar os eixos para conduzir a fiação até o local onde se deseja instalar a ponte de extensômetros. Isto nem sempre é viável em instalações industriais onde tal perfuração não tenha sido prevista quando do projeto e construção dos elementos girantes.

A limitação principal no entanto reside exatamente no baixo sinal de deformação que se pode obter em eixos de sistemas girantes projetados com altíssimos coeficientes de segurança, em função do seu regime de trabalho. Desta forma a incerteza introduzida no sinal de saída do condicionador, em virtude do acoplamento, pode chegar facilmente a 10% ou 20 %, considerando apenas os problemas da tensão de modo comum.

Um outro aspecto a considerar no acoplamento com anéis e escovas é o ruído elétrico ambiente. Este pode ser introduzido no condicionador, que tem alta impedância de entrada e devido ao comprimentos dos cabos de conexão utilizados, em função da distância da ponte até a ponta de eixo onde estiver instalado o dispositivo de acoplamento.

A montagem de sistemas de acoplamento com anéis e escovas em qualquer ponto de um eixo girante não é nada prática. Haveria necessidade de desmontagem do eixo para inserção dos anéis, o que nem sempre é viável.

Assim, este tipo de acoplamento seria recomendável apenas para situações onde fosse possível conduzir a fiação até a ponte de extensômetros sem necessidade de desmontagem ou perfuração de eixos e com pequeno comprimento da mesma fiação. Adapta-se bem a sistemas girantes com polias ou engrenagens implantadas em ponta de eixo onde seria possível medir alguma deformação proporcional ao torque disponível. Na figura B.6 apresenta-se um esboço de uma aplicação viável. O conjunto de

anéis e escovas poderia ser o mesmo mostrado na figura B.1.

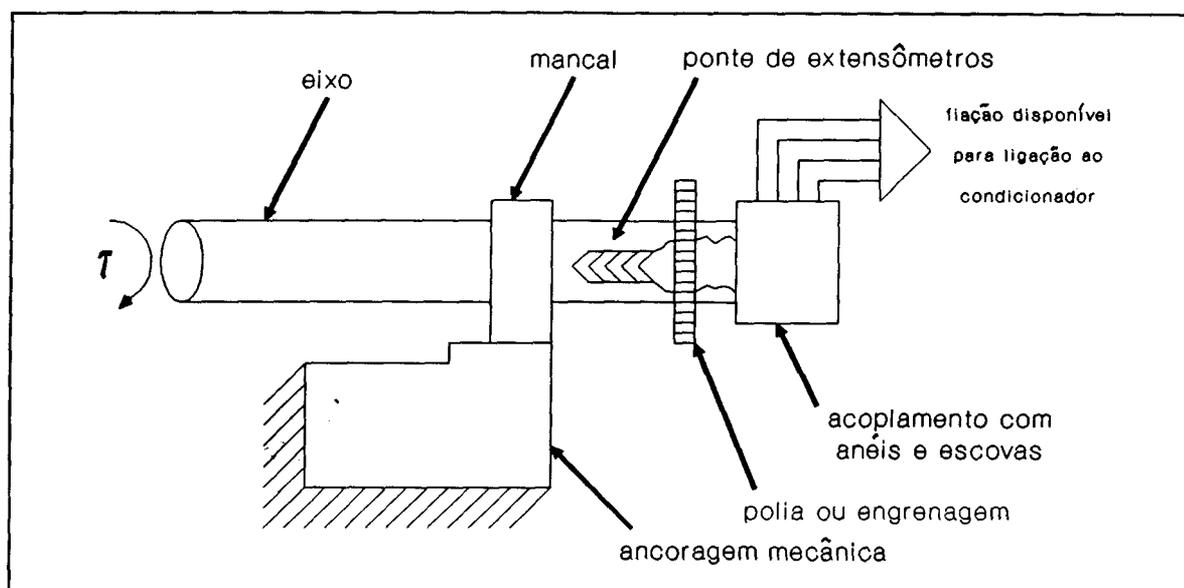


Figura B.6- Utilização de um sistema de anéis e escovas aplicado a medida de torque em um dispositivo girante com polias ou engrenagens instaladas em pontas de eixo.

Este sistema de acoplamento poderia ser utilizado em motores elétricos com saída em polias ou engrenagens. Também seria aplicável a rodas de automóveis ou de máquinas agrícolas. O ideal no entanto seria que se utilizasse alguma eletrônica embarcada, para amplificar previamente o sinal de desbalanço, ou até regular a tensão aplicada a ponte de extensômetros com um circuito instalado no dispositivo girante. Tal providência evitaria a interferência do ruído no acoplamento em função do pequeno sinal elétrico disponível na saída da ponte quando o mesmo não for previamente amplificado.

B.3- ACOPLAMENTO COM TRANSFORMADORES ROTATIVOS

Um transformador rotativo caracteriza-se por possuir dois enrolamentos mecanicamente independentes magneticamente acoplados. Na figura B.7 apresenta-se o desenho em corte de um transformador montado em um eixo. Eletricamente os mesmos são equivalentes a dois enrolamentos independentes. O acoplamento

magnético é bastante tênue quando não se utiliza material magnético para confinamento do fluxo. Os transformadores rotativos podem ser utilizados para transferência de energia a uma ponte de extensômetros ou para circuitos eletrônicos montados em eixos girantes. No caso de torquímetros rotativos são utilizados também para transferir o sinal de desbalanço da ponte^[43].

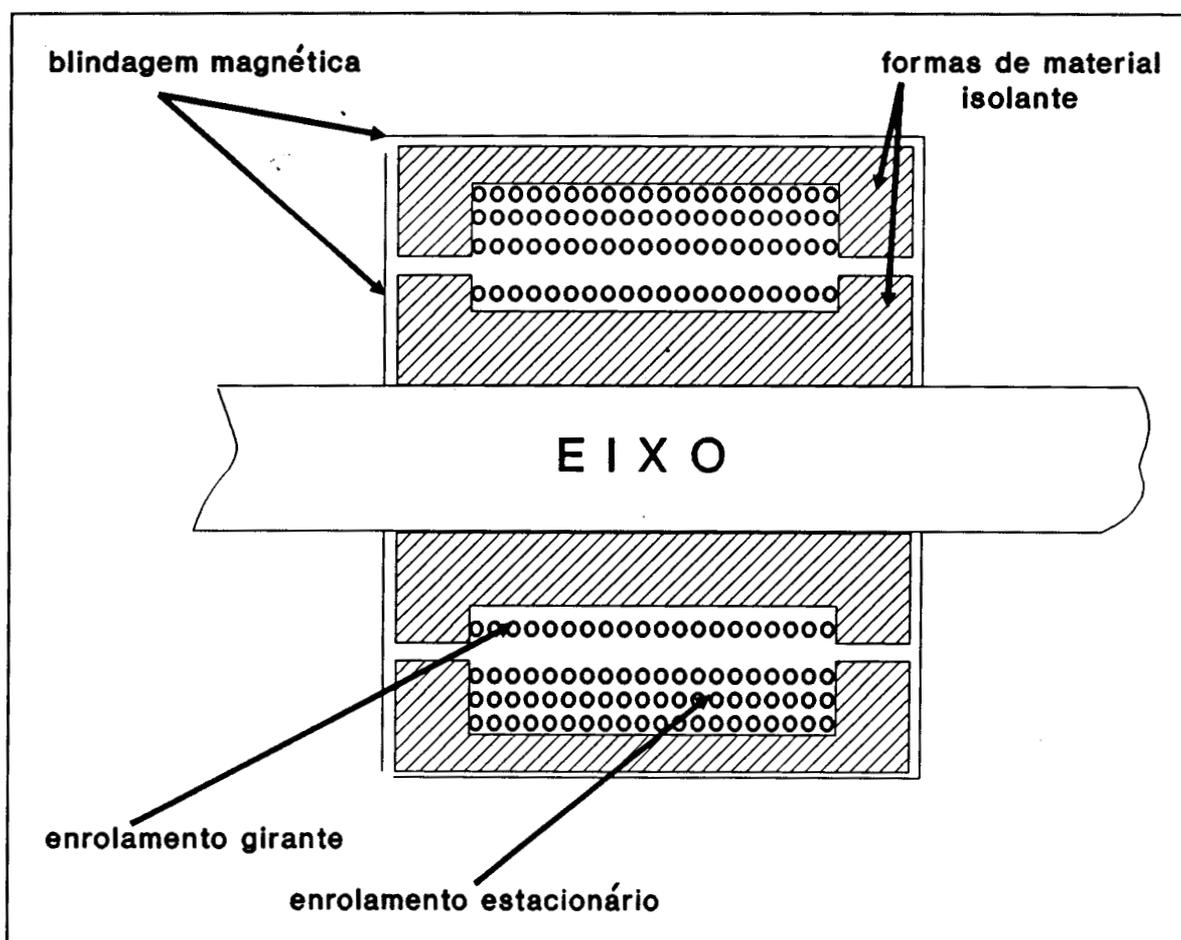


Figura B.7- Desenho de um transformador rotativo montado em um eixo. Vista em corte.

O esquema básico de utilização dos transformadores rotativos como sistema de transferência de energia e sinal pode ser visualizado na figura B.8. Cada torquímetro utiliza dois transformadores independentes: um transformador de entrada e um transformador de saída. O transformador de entrada possui o enrolamento primário estacionário alimentado pelo oscilador do condicionador de sinais (V_{11}) e o enrolamento secundário girante

solidário ao eixo que contém a ponte de extensômetros. A partir da tensão induzida no enrolamento secundário obtém-se a excitação da ponte (V_{21}). Analogamente o transformador de saída tem o seu enrolamento primário girante e o secundário estacionário. O enrolamento primário do transformador de saída é excitado pela tensão de desbalanço (V_{12}) gerada pela ponte de extensômetros, em função do torque aplicado ao eixo. No enrolamento secundário coleta-se o sinal de desbalanço induzido (V_{22}) que será amplificado e detectado pelo condicionador de sinais.

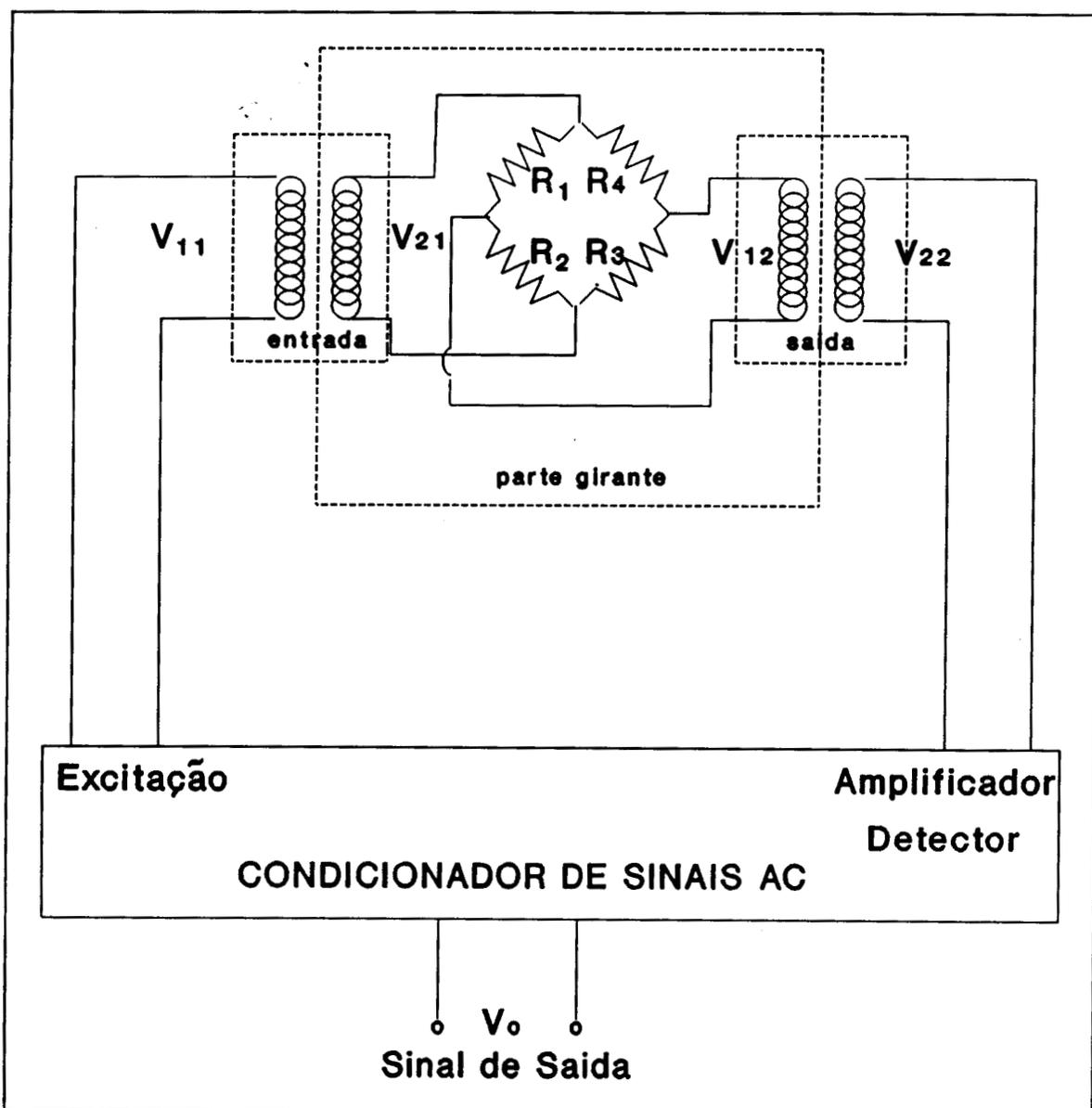


Figura B.8- Diagrama de ligação dos transformadores rotativos para uso com ponte de extensômetros em torquímetros girantes.

Apesar de esta ser uma aplicação específica, o sistema de acoplamento com transformador rotativo é de uso geral em sistemas instrumentados que operam em dispositivos girantes.

Existem até mesmo dispositivos completos produzidos pela Lebow^[35], conforme mostra a figura B.9, para serem adaptados em pontas de eixo (é semelhante ao sistema de anéis e escovas).

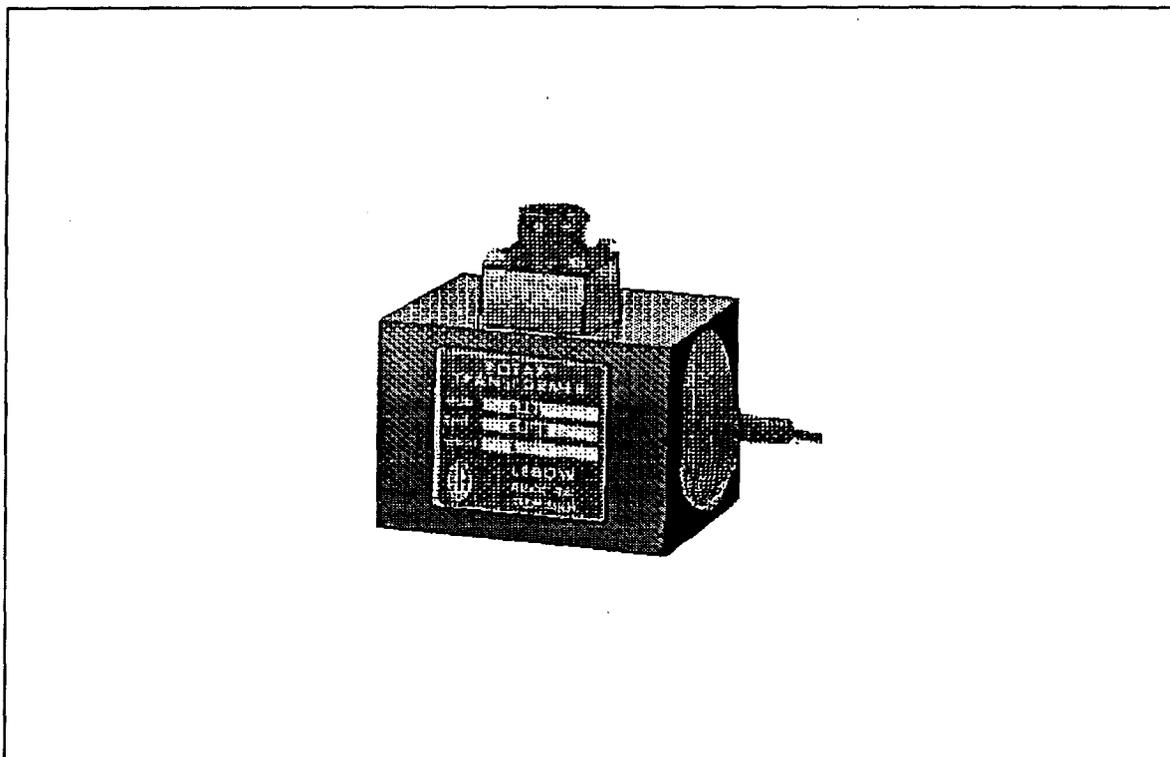


Figura B.9- Transformador rotativo para transmissão de sinais elétricos entre partes girantes e estacionárias.

Genericamente pode-se dizer que o transformador de entrada e o de saída deveriam ter relação 1:1. Isto significa que a tensão do primário é igual a do secundário. Desta forma o acoplamento seria "transparente" ao condicionador de sinais. Obviamente este tipo de acoplamento só pode ser utilizado com excitação alternada. É usual o emprego de sinais senoidais com frequência entre 2 e 10 kHz. Assim sendo o condicionador de sinais empregado deve ter um oscilador que aplicado ao transformador de entrada irá excitar a ponte de extensômetros. Por outro lado o amplificador do sinal de desbalanço deverá ser um amplificador síncrono sintonizado na mesma frequência.

APÊNDICE C: MODELAMENTO E PROJETO DE TRANSFORMADORES ROTATIVOS

C.1- MODELAMENTO DOS TRANSFORMADORES ROTATIVOS

C.1.1- Transformadores sem núcleo magnético

Quando os transformadores rotativos são montados sem nenhum núcleo de material magnético, o modelo elétrico utilizado para análise é o de indutâncias mútuas. Na figura C.1 apresenta-se o modelo elétrico empregado para análise.

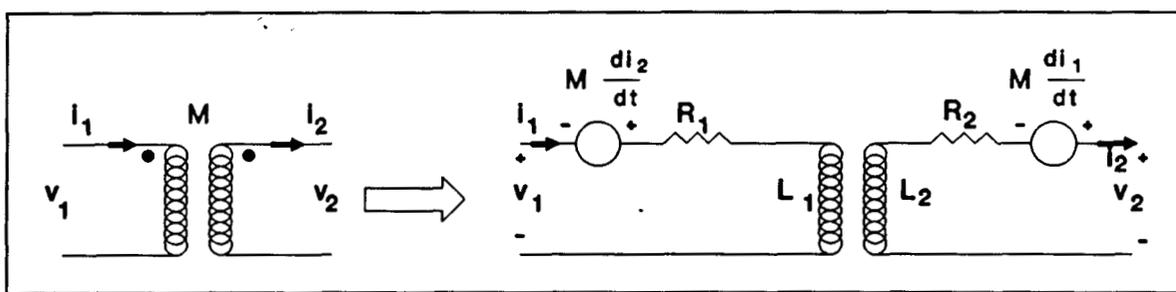


Figura C.1- Circuito equivalente para análise dos transformadores rotativos sem material magnético no núcleo.

As equações básicas retiradas do circuito equivalente são:

$$v_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \quad (\text{C.1})$$

$$v_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} - R_2 i_2 + M \frac{di_1}{dt} \quad (\text{C.2})$$

O parâmetro M é chamado de indutância mútua e define o grau de acoplamento magnético entre o primário e secundário. Quanto menor M mais tênue será o acoplamento magnético. Os parâmetros R_1 , R_2 , L_1 e L_2 são respectivamente as resistências e

indutâncias próprias dos enrolamentos primário e secundário do transformador rotativo.

A medida de R_1 e R_2 pode ser feita diretamente nos enrolamentos com um multímetro na escala ôhmica. A determinação de L_1 , L_2 e M é feita através de ensaios com excitação senoidal da mesma frequência utilizada pelo condicionador de sinais. Com excitação senoidal de frequência fixa o circuito equivalente da figura C.1 pode ser analisado fasorialmente, transformando-se no circuito da figura C.2.

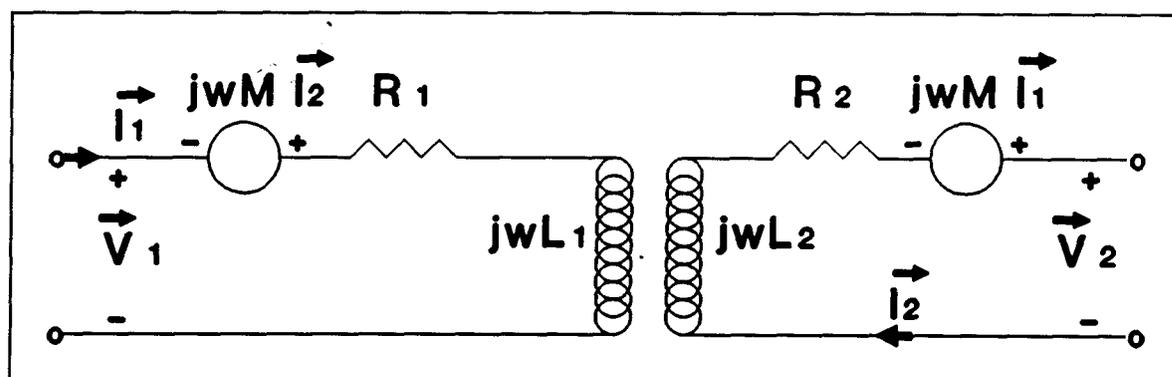


Figura C.2- Circ. equiv. do transf. rot. no domínio freq. $\omega = 2\pi f$ onde f é a frequência utilizada. V_1 , I_1 , V_2 e I_2 são fasores tensão e corrente respect.

A determinação de L_1 , L_2 e M pode ser realizada através de dois ensaios abaixo descritos:

a)- Ensaio a circuito aberto

Na figura C.3 mostra-se o ensaio para determinação de L_1 e M . Aplica-se no enrolamento primário um gerador senoidal (V_g) com uma resistência (R_s) conhecida em série. As equações para determinação dos parâmetros são:

$$\vec{v}_1 = -j\omega M \vec{I}_2 + R_2 \vec{I}_1 + j\omega L_1 \vec{I}_1 \quad (C.3)$$

$$\vec{v}_2 = +j\omega M \vec{I}_1 - R_2 \vec{I}_2 - j\omega L_2 \vec{I}_2 \quad (C.4)$$

$$\vec{I}_1 = \frac{\vec{V}_{RS}}{R_S} \quad (C.5)$$

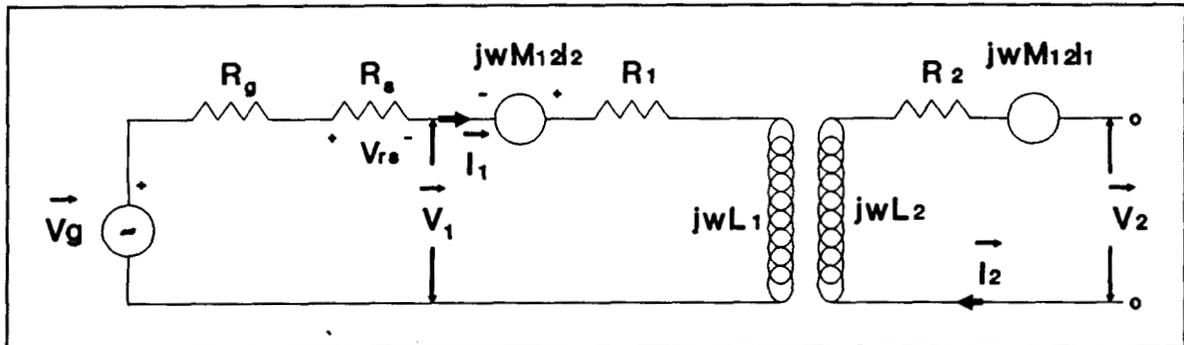


Figura C.3- Circuito para ensaio do transformador rotativo a circuito aberto.

Como o ensaio é a circuito aberto no secundário $I_2 = 0$. Assim as equações (C.3) e (C.4) reduzem-se a:

$$\vec{v}_1 = R_1 \vec{I}_1 + j\omega L_1 \vec{I}_1 \quad (C.6)$$

$$\vec{v}_2 = j\omega M \vec{I}_1 \quad (C.7)$$

Medindo-se \vec{v}_1 , \vec{v}_2 e \vec{V}_{RS} com auxílio de um osciloscópio, substituem-se seus valores em (C.5), (C.6) e (C.7) calculando-se M e L_1 .

b)- Ensaio com carga

Na figura C.4 está representado o circuito para ensaio com carga que servirá para determinação de L_2 . A carga (RL) consiste num resistor conhecido ligado ao secundário do transformador. Medindo-se \vec{v}_2 calcula-se:

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{V}_2}{R_L} \quad (C.8)$$

Analogamente ao primeiro ensaio mede-se \vec{v}_{RS} , \vec{v}_1 e \vec{v}_2 . Com os parâmetros já determinados no ensaio anterior e as novas medidas no segundo ensaio calcula-se L_2 através da equação (C.4).

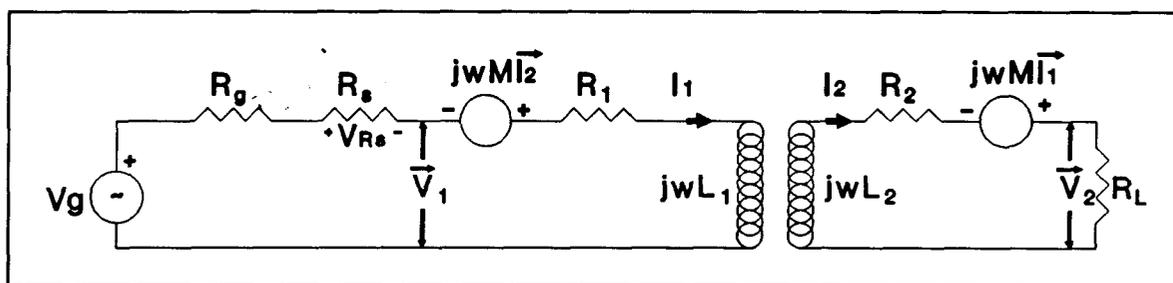


Figura C.4- Circuito para ensaio com carga.

C.1.2- Transformadores com núcleo magnético

Quando os transformadores rotativos são montados com núcleo magnético, o modelo elétrico utilizado para análise é semelhante ao dos transformadores convencionais. A diferença básica é que o acoplamento magnético tem um "entre-ferro" que faz aumentar as reatâncias de dispersão. Estas são normalmente desprezadas nos transformadores convencionais. Este modelo permite ainda verificar as perdas no material magnético, o que pode servir para orientar a escolha do material e da geometria mais adequada a uma maior eficiência [9, 10, 38].

O circuito equivalente utilizado para transformadores rotativos com núcleo magnético é mostrado na figura C.5. Os parâmetros R_1 e R_2 , X_{L1} e X_{L2} são respectivamente as resistências dos enrolamentos e as reatâncias de dispersão do primário e secundário; R_m representa as perdas no material magnético e X_{Lm} é a reatância de magnetização obtida com o mesmo material; "a" é a relação de espiras N_2/N_1 do transformador ideal

constituente do modelo. Basicamente X_{LD1} e R_m dependem da geometria do circuito magnético utilizado, enquanto que o valor de X_{Lm} é determinado pela característica $B \times H$ do material magnético do núcleo, pelo número de espiras e pelo "entre-ferro". As resistências R_1 e R_2 são definidas pela bitola dos fios e pelo número de espiras dos respectivos enrolamentos.

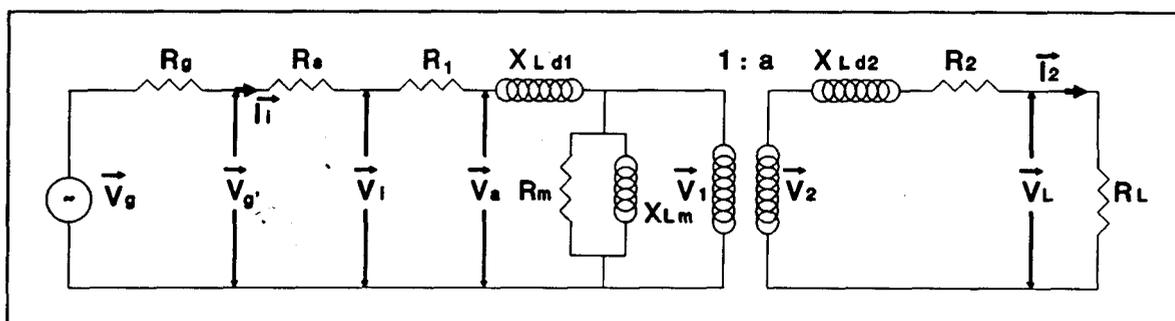


Figura C.5- Circ. equiv. para transf. rotativos com núcleo magnético com excitação e carga. A representação vale para excitações senoidais segundo o método fasorial.

Para determinação dos parâmetros constituintes do modelo não se pode utilizar os procedimentos convencionais para ensaio de transformadores de energia. Isto se deve ao fato de que X_{LD1} e X_{LD2} são elevados, o que em conjunto com os valores de R_1 e R_2 , não desprezíveis, determina um valor para a relação de espiras do transformador ideal, do modelo, diferente da relação de espiras do transformador real.

Para validade deste modelo considera-se que as resistências dos enrolamentos não variam com a tensão e frequência aplicada. Também considera-se que X_{LD1} , X_{LD2} e X_{Lm} não variam com a tensão aplicada no primário e com a carga ligada no secundário. Estas aproximações são coerentes com a geometria (existência do entre-ferro) e com a utilização do transformador rotativo em instrumentação (carga e frequência fixas).

Os ensaios realizados são semelhantes aos já descritos anteriormente para transformadores sem núcleo magnético, ou seja, um ensaio com $i_2 = 0$ (ensaio sem carga) e outro com R_L ligado ao secundário (ensaio com carga).

Na figura C.6 apresenta-se um diagrama fasorial das tensões envolvidas na análise do modelo.

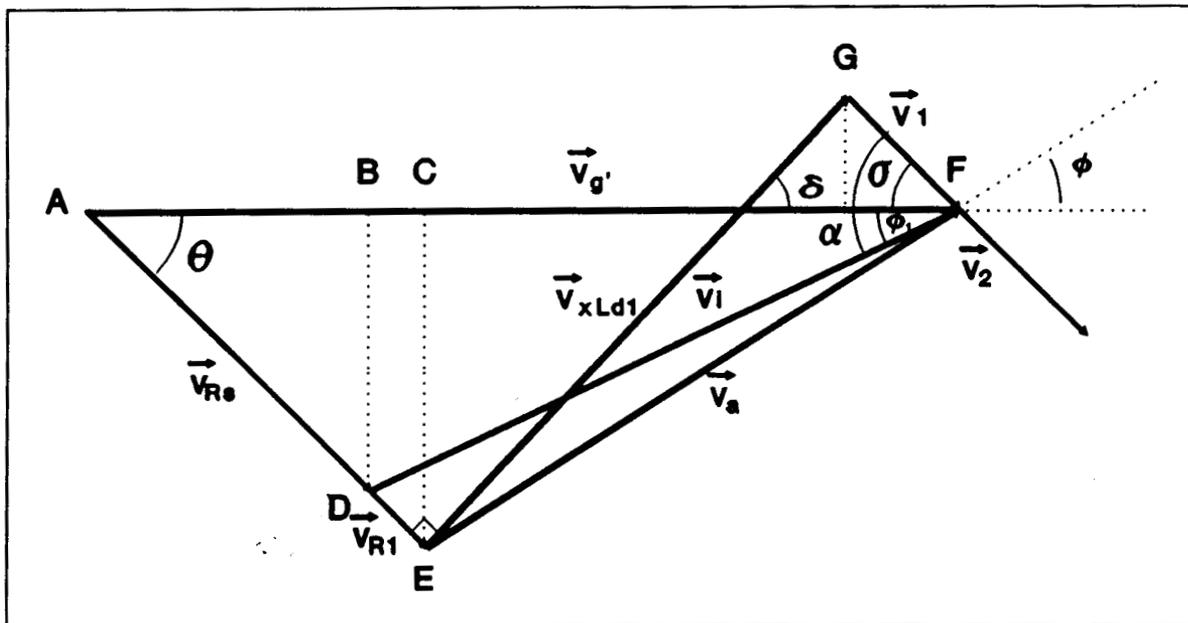


Figura C.6- Diagrama fasorial das tensões do modelo de transformador rotativo com núcleo magnético.

Ensaio sem carga

No ensaio sem carga mede-se $|\vec{v}_g'|$, $|\vec{v}_{Rs}|$, $|\vec{v}_i|$, $|\vec{v}_L|$ e o ângulo α entre as tensões \vec{v}_i e \vec{v}_L . Observe-se que neste ensaio $i_2 = 0$, logo $\vec{v}_L = \vec{v}_2$ e \vec{v}_2 e \vec{v}_1 têm a mesma fase já que no modelo representam as tensões de um transformador ideal.

Pelo circuito equivalente tem-se:

$$\vec{v}_a = \vec{v}_1 + \vec{v}_{XLD_1} \quad (\text{C.9})$$

Como \vec{v}_{XLD_1} é a tensão sobre uma reatância indutiva estará 90° adiantada em relação a corrente que por ele circula. Assim \vec{v}_{XLD_1} será perpendicular a \vec{v}_{R_1} definindo-se graficamente o ponto "G" do diagrama fasorial da figura C.6.

Analiticamente pode-se calcular o $|\vec{v}_1|$ e com isso determinar "a" do modelo. As equações que se seguem, obtidas do diagrama fasorial da figura C.6, têm este objetivo:

$$|\vec{v}_1| = \frac{|\vec{v}_g| - (|\vec{v}_{Rs}| + |\vec{v}_{Rl}|) \cos\theta - |\vec{v}_{XLD1}| \cos\delta}{\cos\sigma} \quad (\text{C.10})$$

$$\theta = \arccos \left[\frac{|\vec{v}_g| - |\vec{v}_i| \cos\phi_1}{|\vec{v}_{Rs}|} \right] \quad (\text{C.11})$$

$$\phi_1 = \arccos \left[\frac{|\vec{v}_g|^2 - |\vec{v}_{Rs}|^2 + |\vec{v}_i|^2}{2|\vec{v}_g||\vec{v}_i|} \right] \quad (\text{C.12})$$

$$\delta = 90^\circ - \theta \quad (\text{C.13})$$

$$\sigma = \alpha - \phi_1 \quad (\text{C.14})$$

$$a = \frac{|\vec{v}_2|}{|\vec{v}_1|} \quad (\text{C.15})$$

O cálculo de XLD1 pode ser efetuado por:

$$X_{LD1} = \frac{|\vec{v}_a| \cos\phi - |\vec{v}_1| \cos\sigma}{|\vec{I}_i| \cos\delta} \quad (\text{C.16})$$

$$|\vec{v}_a| = \sqrt{[(|\vec{v}_{Rs}| + |\vec{v}_{Rl}|) \text{sen}\theta]^2 + [|\vec{v}_g| - (|\vec{v}_{Rs}| + |\vec{v}_{Rl}|) \cos\theta]^2} \quad (\text{C.17})$$

$$\phi = \frac{|\vec{v}_{g'}| - (|\vec{v}_{RS}| + |\vec{v}_{RL}|) \cos \theta}{|\vec{v}_a|} \quad (\text{C.18})$$

$$|\vec{I}_i| = \frac{|\vec{v}_{RS}|}{R_s} \quad (\text{C.19})$$

também R_m e X_{Lm} podem ser determinados por:

$$R_m = \frac{A^2 + B^2}{A} \quad (\text{C.20})$$

$$X_{Lm} = R_m \sqrt{\frac{A}{R_m - A}} \quad (\text{C.21})$$

onde

$$A = \frac{|\vec{v}_a| \cos(\phi + \theta)}{I_i} \quad (\text{C.22})$$

$$B = \frac{|\vec{v}_a| \operatorname{sen}(\phi + \theta)}{I_i} \quad (\text{C.23})$$

Ensaio com carga:

No ensaio com carga medem-se novamente $|\vec{v}_{g'}|$, $|\vec{v}_{RS}|$, $|\vec{v}_i|$ e $|\vec{v}_L|$ calcula-se $|I_i|$ pela expressão (C.19). Calculando $|I_2|$ por:

$$|\vec{I}_2| = \frac{|\vec{v}_L|}{RL} \quad (\text{C.24})$$

e $|\vec{v}_{R2}|$ por:

$$|\vec{v}_{R2}| = |\vec{I}_2| R_2 \quad (\text{C.25})$$

pode-se construir um novo diagrama fasorial que envolve as tensões no secundário do transformador conforme sugere a figura C.7, tomando-se \vec{v}_2 como referência.

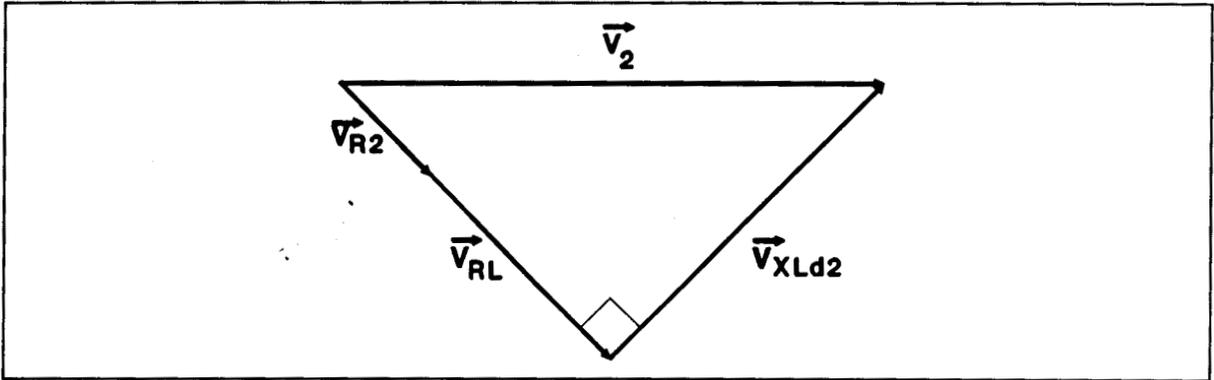


Figura C.7- Diagrama fasorial das tensões no secundário do transformador num ensaio com a carga RL.

A partir do diagrama da figura C.7 pode-se concluir que:

$$X_{LD2} = \frac{\sqrt{(|\vec{v}_2|)^2 - (|\vec{v}_{R2}| + |\vec{v}_{RL}|)^2}}{|\vec{I}_2|} \quad (\text{C.26})$$

Calculando-se $|\vec{v}_2|$ por:

$$|\vec{v}_2| = a |\vec{v}_1| \quad (\text{C.27})$$

sendo "a" já determinado no ensaio sem carga e $|\vec{v}_1|$ calculado em função dos parâmetros X_{LD1} , R_m e X_{Lm} já obtidos das expressões (C.16), (C.20) e (C.21) conforme o circuito equivalente adotado.

O diagrama fasorial da figura C.6 continua válido para as medidas do ensaio com carga, apenas que agora o ângulo α não pode ser medido como no ensaio a circuito aberto. Utilizando-se a equação (C.12) determina-se ϕ_1 e com a equação (C.11) calcula-se θ .

Com o valor de XLD_1 determina-se \vec{v}_{XLD_1} por:

$$|\vec{v}_{XLD_1}| = XLD_1 |\vec{I}_i| \quad (C.28)$$

e o ângulo δ pela expressão (C.13).

Para determinar a tensão \vec{v}_a utiliza-se a equação (C.17) e ϕ com a equação (C.18).

Pelo circuito equivalente da figura C.5 vê-se que:

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_a - \vec{v}_{XLD_1} \quad (C.29)$$

Assim determinar-se-ia $|\vec{v}_1|$ e σ não havendo nenhuma outra incógnita que impeça o cálculo de XLD_2 pela expressão (C.26).

C.2- CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO DE TRANSFORMADORES ROTATIVOS

Os dados disponíveis para projeto de um transformador rotativo são:

1- a tensão e a potência disponível na saída do condicionador de sinais.

2- A frequência de operação do condicionador de sinais.

3- A tensão necessária para excitar a ponte de extensômetros.

4- A resistência equivalente da ponte de extensômetros.

Com estes dados pode-se calcular o número de espiras e a bitola do fio dos enrolamentos desde que se eleja uma geometria para o transformador e se defina se o mesmo utilizará ou não núcleo magnético.

A geometria básica dos transformadores rotativos é a de duas bobinas concêntricas conforme a figura B.7 com ou sem núcleo

magnético. A diferença básica entre os dois tipos de transformadores é que sem núcleo o índice de acoplamento (M) é bastante menor do que aquele obtido com núcleo magnético (a). Se não houver necessidade de transferir grande quantidade de energia é preferível a montagem sem núcleo pela facilidade de construção. As formas que suportam os enrolamentos são construídas em "nylon" ou "tecnil" materiais de fácil usinagem e muito bons isolantes elétricos.

A potência necessária para excitar diretamente uma ponte de extensômetros é dada por:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (C.30)$$

onde V é a tensão de excitação e R a resistência equivalente da ponte. Na tabela C.1 mostra-se a potência (em mW) necessária para excitar pontes de extensômetros de 120, 350 e 1000 ohms e as tensões de 1, 2,5, 5 e 10 volts.

V / R	120 Ω	350 Ω	1.000 Ω
1 Volt	8	3	1
2,5 Volts	52	18	6
5 Volts	208	71	25
10 Volts	833	286	100

Tabela C.1- Potência, em mW, necessária para excitar uma ponte de extensômetro de resistência equivalente R, em ohms, com uma tensão V, em volts.

Na tabela verifica-se que a maior potência corresponderia a uma ponte de 120 Ω excitada com 10 V ou seja 833 mW. Esta combinação não é normalmente utilizada porque o

extensômetro deveria ter uma grade com área bastante grande para operar nesta tensão. Usualmente os extensômetros de 120Ω operam com tensões iguais ou menores do que 5 Volts. Feitas estas observações, poder-se-ia tomar a potência de 208 Watts como limite necessário às pontes de extensômetros colocadas em elementos girantes. Com este dado pode-se concluir que um transformador rotativo sem núcleo magnético pode ser utilizado como acoplamento para transferência de energia.

Cumpra ainda lembrar que no caso de se instalar uma "eletrônica embarcada" no elemento girante haverá mais uma parcela de energia a ser transferida além daquela necessária à excitação da ponte. No entanto, dado ao baixo consumo dos componentes eletrônicos hoje disponíveis, a perda adicional de energia é sensivelmente menor. A grosso modo pode-se avaliar a potência adicional em no máximo 150 miliwatts. Somando-se então as duas parcelas, ter-se-á necessidade de se dispor de uma potência aproximada de 350 mW para alimentar a parte girante. Ainda assim é possível que se utilizem transformadores rotativos sem núcleo magnético. Em experiências realizadas no INMETAL já se conseguiu atingir uma potência de até 3 Watts no secundário de transformadores rotativos sem núcleo magnético.

C.2.1- Exemplo de um projeto de transformador rotativo sem núcleo magnético

Para comprovar a possibilidade de se projetar um transformador rotativo sem núcleo magnético, a partir dos dados já anteriormente descritos, propõe-se o seguinte projeto:

- Calcular o número de espiras necessárias para os enrolamentos de um transformador rotativo, a fim de que se obtenha uma tensão de 5 Volts sobre uma ponte de 120Ω . O condicionador de sinais disponível opera numa frequência de 5 kHz com tensão de 5 Volts e corrente máxima de 200 mA. A geometria a ser utilizada para as formas que sustentarão os enrolamentos estão definidas na figura C.8.

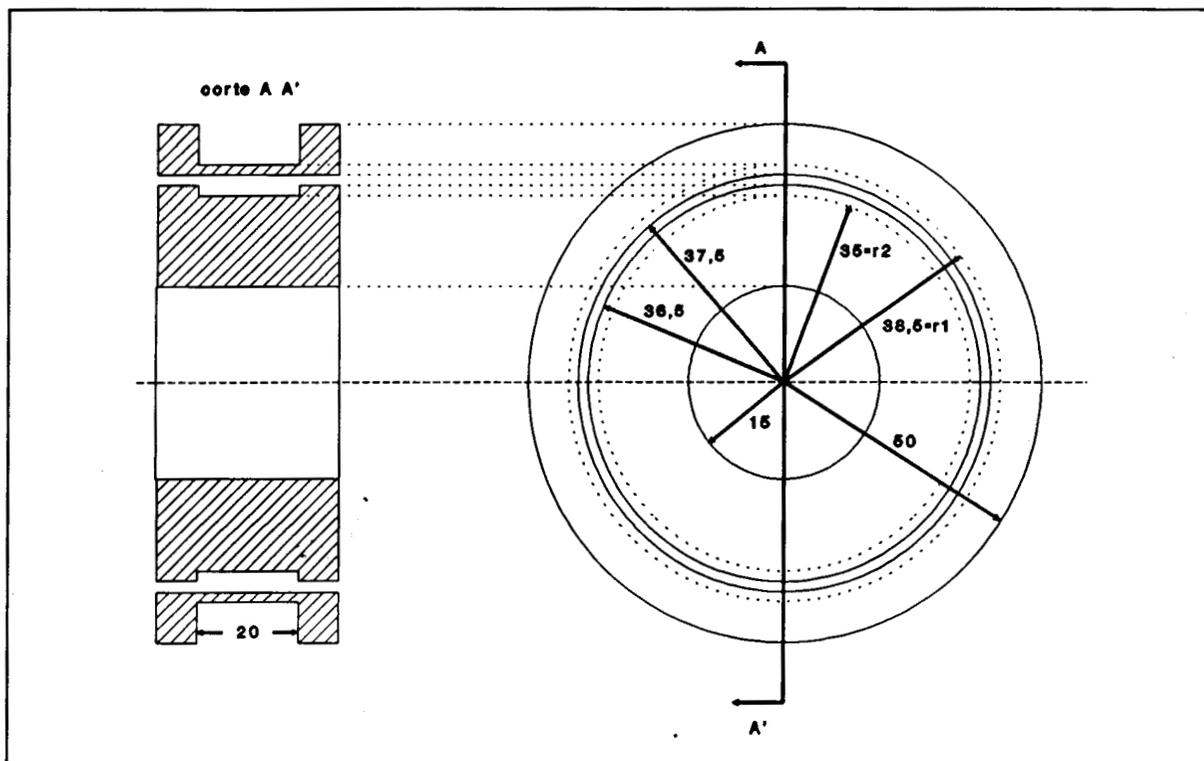


Figura C.8- Geometria do transformador rotativo a ser projetado. Dimensões em milímetros.

O modelo utilizado para projeto é o da figura C.2 de onde derivam as equações (C.3) e (C.4). A aproximação que se faz para iniciar o projeto é desconsiderar as quedas nas resistências dos enrolamentos primário e secundário. Assim as equações (C.3) e (C.4) transformam-se em:

$$\vec{v}_1 \approx -j\omega M \vec{I}_2 + j\omega L_1 \vec{I}_1 \quad (\text{C.31})$$

$$\vec{v}_2 \approx j\omega M \vec{I}_1 - j\omega L_2 \vec{I}_2 \quad (\text{C.32})$$

A partir delas traçam-se os diagramas fasoriais das tensões do primário e do secundário apresentadas na figura C.9. Por estes verifica-se que a tensão induzida no secundário ($\omega M I_1$) deve ser maior do que \vec{v}_2 para suprir a queda em L_2 . Por outro lado quanto maior I_1 maior será a tensão induzida.

No entanto, pela equação (C.31) verifica-se que I_1 depende da impedância de entrada vista a partir do primário do

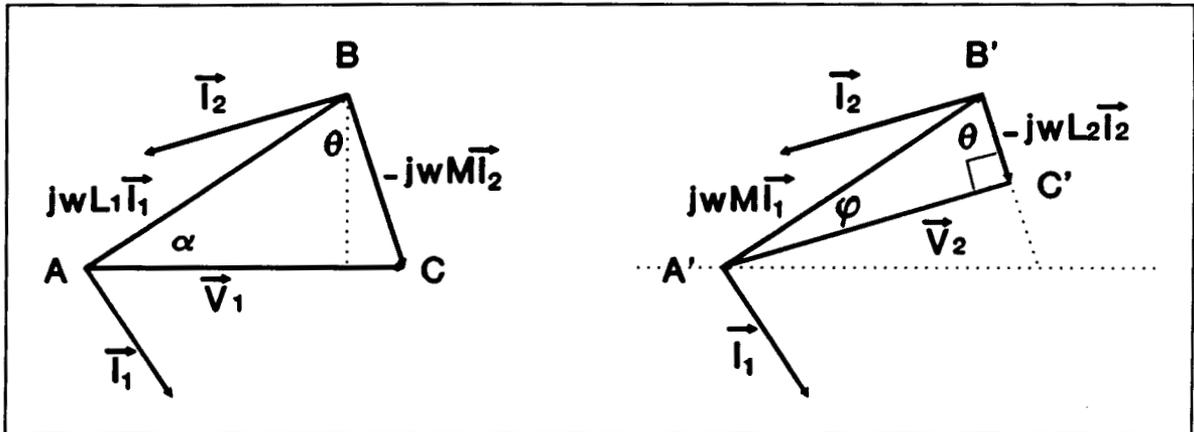


Figura C.9- Diagramas fasoriais das tensões do primário e secundário do transformador considerando-se $R_1 = 0$ e $R_2 = 0$ no modelo da figura C.2.

transformador (\vec{V}_1/I_1). Pode-se também afirmar que os lados dos triângulos ABC e A'B'C' são paralelos e proporcionais, uma vez que ω , L e M serão constantes. Considerando ainda que neste projeto:

$$V_1 = V_2 \quad (\text{C.33})$$

dever-se então ter que:

$$\alpha = \varphi \quad (\text{C.34})$$

Assim pode-se escrever que:

$$\frac{\omega L_1 \vec{I}_1}{\omega M \vec{I}_2} = \frac{\omega M \vec{I}_2}{\omega L_2 \vec{I}_1} = \frac{\vec{V}_1}{\vec{V}_2} = 1 \quad (\text{C.35})$$

Simplificando vem:

$$\frac{L_1}{M} = \frac{M}{L_2} = 1 \quad (\text{C.36})$$

logo:

$$L_1 = L_2 = M \quad (\text{C.37})$$

A indutância (L) equivalente de um enrolamento com "N" espiras numa forma de raio "r", de largura "l" e área "A" é dada pela expressão:

$$L = \mu_0 N^2 \frac{A}{l} \quad (\text{C.38})$$

onde $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ é a permeabilidade magnética do ar.

Na dedução desta expressão leva-se em conta que se $l > r$ não há fluxo externo à bobina, o que não é verdade no caso deste enrolamento. Alguns autores propõem fatores de correção determinados empiricamente para adaptar esta expressão ao uso em casos onde $l \approx r$. De acordo com experiência adquirida na determinação de parâmetros de transformadores já construídos no INMETAL, adota-se a expressão:

$$L = \mu_0 N^2 \frac{A}{l} (k_1 + k_2 \ln N) \quad (\text{C.39})$$

onde o fator de correção:

$$\text{fat. de corr.} = (k_1 + k_2 \ln N) \quad (\text{C.40})$$

deve ser determinado experimentalmente para cada forma construída. K1 e K2 podem ser facilmente determinados enrolando-se um número conhecido de espiras nas formas que se utilizar para a construção do transformador. Para as formas mostradas na figura C.9 obtiveram-se os seguintes resultados (adicionou-se o índice 1 para forma interna e 2 para a externa

nas constantes K1 e K2):

- forma interna (r= 35 mm) $K_{11} = 3,528$, $K_{21} = -0,596$
- forma externa (r= 40 mm) $K_{12} = 1,730$, $K_{22} = -0,291$.

Faltaria ainda conhecer o fator de acoplamento "M". Este depende da geometria e da relação de espiras entre primário e secundário. Em experimentos de laboratório com a geometria proposta, encontra-se $M = 1,42 \times 10^{-3}$ quando $N_1 = N_2$. Logicamente pode-se supor que:

$$M = 1,43 \times 10^{-3} \frac{N_2}{N_1} \quad (C.41)$$

se todas as espiras de N2 forem atravessadas pelo mesmo fluxo.

Como as dimensões do raio (r) e da área (A) são distintas para os dois enrolamentos e segundo (C.37) e (C.39) deve-se ter:

$$\frac{N_1^2 A_1}{l_1} (k_{11} + k_{21} \ln N_1) = \frac{N_2^2 A_2}{l_2} (k_{12} + k_{22} \ln N_2) \quad (C.42)$$

ou ainda:

$$\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 = \frac{l_2 A_1 (k_{11} + k_{21} \ln N_1)}{l_1 A_2 (k_{12} + k_{22} \ln N_2)} \quad (C.43)$$

Substituindo os valores de l, A, K1 e K2 na (C.43), vem:

$$\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 = \frac{4,322 - 0,730 \ln N_1}{2,768 - 0,465 \ln N_2} \quad (C.44)$$

Com a expressão (C.44) tem-se uma solução de compromisso entre N1 e N2.

Estimando-se que $R_2 < 0,1 RL$, adotando-se um fio de

bitola 28 AWG (que possui uma resistência por metro $\rho = 238$ ohms/km) [46] e conhecido o raio da forma ($r=35$ mm) onde o enrolamento será colocado, define-se um número máximo de espiras para N_2 :

$$C_2 = \frac{R_2}{\rho_2} = \frac{0,1 \times 120 \Omega}{238 \Omega/\text{km}} = 50,42 \text{ m} \quad (\text{C.45})$$

$$C_2 = \frac{R_2}{\rho_2} = \frac{0,1 \times 120 \Omega}{238 \Omega/\text{km}} = 50,42 \text{ m} \quad (\text{C.46})$$

$$N_2 = \frac{C_2}{2\pi r} = \frac{50,42}{2\pi \times 35 \times 10^{-3}} = 229,27 \text{ espiras} \quad (\text{C.47})$$

Como o espaço disponível na forma interna só permite colocar N_2 com no máximo 160 espiras adotou-se este valor. Substituindo-se então em (C.44) e resolvendo, encontra-se:

$$N_1 = \frac{49,162}{\sqrt{1 - 0,168 \ln N_2}} \quad (\text{C.48})$$

$$N_1 = 107,08 \text{ espiras} \quad (\text{C.49})$$

Utilizando-se fio de mesma bitola do enrolamento N_2 tem-se:

$$C_1 = 107 \times 2\pi \times 40 \times 10^{-3} = 26,89 \text{ m} \quad (\text{C.50})$$

$$R_1 = 26,89 \text{ m} \times 238 \text{ ohms/km} = 6,4 \text{ ohms} \quad (\text{C.51})$$

Calculando-se L_1 e L_2 pela expressão (C.39) tem-se:

$$L_1 = 1,401 \text{ mH} \quad (\text{C.52})$$

$$L_2 = 3,114 \text{ mH} \quad (\text{C.53})$$

Calculando-se "M" pela expressão (C.37) tem-se:

$$M = 2,13 \times 10^{-3} \quad (\text{C.54})$$

Retornando-se a equação (C.4) sem nenhuma aproximação tem-se:

$$RL \vec{I}_2 = j \omega M \vec{I}_1 - R_2 \vec{I}_2 - j \omega L_2 \vec{I}_2 \quad (\text{C.55})$$

ou seja:

$$j \omega M \vec{I}_1 = (RL + R_2) \vec{I}_2 + j \omega L_2 \vec{I}_2 \quad (\text{C.56})$$

Tendo-se em vista que as parcelas do segundo membro da equação (C.56) são ortogonais, pode-se calcular:

$$\omega M |\vec{I}_1| = \sqrt{[(RL + R_2) |\vec{I}_2|]^2 + (\omega L_2 |\vec{I}_2|)^2} \quad (\text{C.57})$$

como:

$$|\vec{I}_2| = \frac{|\vec{V}_2|}{RL} = \frac{5}{120} = 41,67 \times 10^{-3} \text{ A} \quad (\text{C.58})$$

então, utilizando-se os demais valores já conhecidos na expressão (C.57), calcula-se:

$$|\vec{I}_1| = 100,49 \times 10^{-3} \text{ A} \quad (\text{C.59})$$

Este é o valor da corrente necessária no primário para que, no enrolamento secundário, se estabeleça uma tensão de 5 Volts sobre a ponte de extensômetros.

Assim conclui-se o projeto do transformador que será constituído de um enrolamento primário com 107 espiras e um secundário com 160 espiras ambos de fio nº 28 AWG.

C.2.2- Resultados experimentais

Montado o transformador conforme o projeto e realizando-se o ensaio com carga obtém-se:

$$\begin{aligned} V_1 &= 5 \text{ Volts,} & I_1 &= 134 \text{ mA,} & R_1 &= 8,82 \text{ ohms} \\ V_2 &= 4,8 \text{ Volts,} & I_2 &= 40 \text{ mA,} & R_2 &= 9,15 \text{ ohms} \end{aligned}$$

No ensaio sem carga mede-se:

$$V_1 = 5 \text{ Volts, } I_1 = 127 \text{ mA e } V_2 = 5,51 \text{ Volts}$$

Verifica-se pois que segundo as expressões utilizadas no projeto M será dado por:

$$M = V_2/wI_1 = 1,38 \times 10^{-3} \quad (\text{C.60})$$

Comparando-se os resultados experimentais com aqueles previstos teoricamente conclui-se que o modelo de projeto é bastante bom, permitindo uma boa aproximação aos valores desejados.

C.3- CONCLUSÕES

Resolvendo-se o problema do acoplamento para transferência de sinal e energia entre o elemento girante e o condicionador, é possível realizar todo o tipo de medida que

empregue extensômetros de resistência elétrica em elementos girantes.

A escolha entre acoplamento com anéis e escovas ou transformadores rotativos dependerá da situação (nível de sinal disponível, possibilidade de instalação) e da disponibilidade dos mesmos. Na prática, considerando que na medida direta de torque, proposta neste trabalho, procura-se uma solução geral do problema, a utilização de transformadores rotativos seria recomendável sob todos os aspectos (obviamente isto implica em projetá-los para cada aplicação pois os diâmetros dos mesmos serão diferentes em cada situação).

Os transformadores rotativos podem ser construídos com formas bipartidas para serem montadas nos eixos ou dispositivos girantes. Os enrolamentos podem ser realizados com cabos multiveias ("flat cables") acomodados nas formas em rebaixos especialmente usinados.

BIBLIOGRAFIA

1. ARAÚJO, J.R. Transdutor de torque construído à base de extensômetros de resistência elétrica. In : 2º SIMPÓSIO DE MANUTENÇÃO DE INSTRUMENTOS. Porto Alegre 26-28 set 1984. Anais... Rio de Janeiro, IBP, 1984 p.288-295.
2. ARAÚJO, J.R. Transdutores estáticos e dinâmicos de torque. Porto Alegre, PPGEMM/UFRGS, 1986. 88 p. Diss. mest.
3. BASSANI, F.A. Estudo do elemento Elástico tipo cruciforme vazado. Porto Alegre.PPGEMM/UFRGS, 1987. 112 p. Diss. Mest.
4. BECKWITH, T.G.; BUCK, W.L.; MARANGONI, R.D. Mechanical Measurements. 3rd edition . Addison Wesley Reading. Mass. 1982.
5. BORCHARDT, I. G. & HOLLAND, L. R. Pseudo-bridge: a different way to compare resistences. Rev. Sci.Instrum.,v. 46, nº 1, jan 1975, p. 67 - 70.
6. BORCHARDT, I. G. & ZARO, M. A. Extensômetros de resistência elétrica. Porto Alegre,Ed.da Universidade,UFRGS, 1982, 69 p.
7. BORCHARDT, I. G. ; Condicionador universal para uso em extensometria. In: 2º SIMPÓSIO DE MANUTENÇÃO DE INSTRUMENTOS. Porto Alegre 26 - 28 set 1984. Anais... Rio de janeiro, IBP, 1984 p.265 - 273.
8. BORCHARDT, I. G., BRITO, R. M.; Instrumentação para monitoração e controle de processos - Caderno Técnico - INMETAL - PPGEM - 1991 - 48p.
9. BRITO, R.M. et ali Transformadores rotativos: uma geometria alternativa. In: Congresso da ABM. Belo horizonte, 1990. Anais.

10. BRITO, R.M. et ali Torquímetro Rotativo com transferência de sinais por transformador. In :1º Seminário de automação e Instrumentação, Belo Horizonte 22 - 24, nov 1989. Anais...Belo Horizonte, ABM, 1989, p. 119 - 128.
11. BROWN, G. M. Applications of operational amplifiers in strain gauge circuits. Strain. apr. 1973, p. 50 - 55.
12. CAUDURO, C.R. Uma Metodologia Para Auxílio Ao Projeto Mecânico De Transdutores Extensométricos. Porto Alegre, PPGEMM/UFRGS, 1992. 144 p. Tese de Doutorado.
13. CONSIDINE, D. M. Handbook of Applied Instrumentation. McGraw Hill. New York 1964.
14. COOK, N.H. & RABINOWICZ E. Physical Measurements and Analisisys. Addison Wesley Reading. Mass. 1963.
15. CROWLE, T.B.; SCOTT, L.H.; BANDOPDHAYAY, P.C. A compact Torque meter. In:Journal of physics E Scientific Instruments- Vol. 21 Iss.12 p. 1159-62. 1988.
16. DICKIE, R.H.; The Measurement of thermal radiation at microwave frequencies. Rev. Sci. Instrum., 17, (7), pp 268 - 275.
17. DOEBELIN, E.D. Measurement Systems Application and Design. Fourth Edition. McGraw Hill .1990.
18. DRAPPER, Mc KAY, LEES; Instrumentation engineering, Vol 3, p.58, Mcgraw Hill, New York, 1955.
19. EMMERLING, A. A. A torque measurement transducer system. Electrical engineering. oct 1963, p. 621 - 625.
20. FERREIRA, CHIENG, C.T. Torquímetro dinâmico óptico em frequência modulada. In: 6º Congresso Brasileiro de

Automática. Belo Horizonte 1986. Anais.

21. GEESDORF, G. Introdução ao Estudo do Transformador Rotativo para Transferência de Sinal em Torquímetros Dinâmicos. Porto Alegre, PPGEMM/UFRGS 1988. 68 p. Diss. Mest.
22. GINDY, S.S. Force and Torque measurement, a technology overview. Part II - Torque. Experimental Techniques. july, 1985. p. 9 - 15.
23. HIX, C. Physical Laws and Effects . General Electric series. New York. 291 p. John Willey & Sons.
24. HOFFMANN, K. Practical hints for the application of strain gauges. Darmstadt, HBM, 1979, 47 p.
25. HOFMANN, K An Introduction to Measurements using Strain Gages. HBM Damastadt 1989.
26. HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH. The proper use of torque transducers. Darmstadt. Germany. 1990. 59 p.
27. HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK. Operating Manual: Convert Unit N 3556 C, Darmstadt, HBM, s.d., 8 p.
28. HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK. Operating Manual: Torque transducer T30FN, Darmstadt, HBM, s.d., 16 p.
29. HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK. Operating Manual: Convert unit Torque MD 3555, Darmstadt, HBM, s.d., 12 p.
30. HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK. The BLM Modular System for Brushless Measured-value Transmission: BLM, Darmstadt, HBM, s.d., 22 p.
31. INMETAL; Sistema computadorizado de uma bancada de testes para ensaio de torquímetros rotativos. Projeto PADCT, Ref.

52.89.05.26.00 - 1989.

32. JUVINALL, R.C. Fundamental of machine components design. John Willey & Sons 1983.
33. KEIL, S. On the strain gages 50th jubilee - a review of its evolution an 33 years strain gage production at Darmstadt. Reports in Applied mechanics. 1988, v. 4, n° 2, p. 39 - 48.
34. KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD. Torque transducers for experimental, Research and instrumentation purposes. Kiowa, Tokio sept. 84/2000. 10 p.
35. LEBOW ASSOCIATES INCORPORATION. Lebow torque sensor & dynamometer catalog. Troy, 1979, 58p.
36. LEUNG, W. S. An Experimental investigation of transient torques. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. v. IM-36 n° 1, march 1987.
37. MANSFIELD, P. Electrical transducers for industrial measurement. London, Butterworth, 1973.
38. MARX, S. H. & BOUNDS, R.W. A kilowatt Rotary Power Transformer. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems. v. AES - 7 , n° 6 nov. 1971.
39. MEADE M.L. Lock-in amplifiers: principles and applications. Peter Peregrinus Ltds., London U.K. 1983. 232 p.
40. NORTON, H. Handbook of transducers for electronic measuring systems. Englewood Cliffs, Prentice hall, 1969. 704 p.
41. O'BRIEN, W. F. AC or DC excitation : which is best for transducers? Electronic design. jun 1965 p. 26-31.
42. OLSEN, R.L. Torquímetro Girante Com Transmissão de Sinal Sem

- Contato Elétrico. Dissertação de mestrado. Porto Alegre, PPGEMM/UFRGS, 75 p., 1992.
43. OLSEN, R. L. et ali. Modelo para cálculo e projeto de transformador rotativo. In 46º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais - ABM. São Paulo, setembro/1991. Anais p. 377-387.
44. PERRY, C.C. & LISSNER, H.R. The strain gage primer. New York, McGraw Hill, 1955.
45. PREOBRAZHENSKY, V.P.; Measurements and Instrumentation in the Heat Engineering - Mir Publishers. URSS - 1980.
46. RESENDE, E.M.; Materiais utilizados em eletrotécnica. Livraria interciência. Rio de Janeiro. 1977. p.284 a 285.
47. SCHABERL, W. Non-Contact torque measurements on a test-rig for electrical drives. Report in Applied measurements. v. 5, nº 2 1989.
48. STEIN, H. & SHIMONY . Limitation on Measurements. Proceedings of the international School of Physics . Enrico Fermi course, 49 - 1970 In: Italian Physical Society . Varena. Italy.
49. SZYMANSKI, D. Strain-gage-based torque measuring test bench for stepping motors. Reports in Applied Measurements. v.2, nº1; 1986, p. 1 - 4.
50. WECH, L. Efficiency measurements on hypoid gears used in car axle drives. Reports in Applied Measurements. v. 7, Nº 1, 1991.
51. WEG E. Manual de Motores elétricos. Jaraguá do Sul, Santa Catarina. 1982, 2ª ed. 54 p.

52. WOLFENBUTELL, R.F.; FOERSTER, J.A. Non contact capacitive torque sensor for use on rotating axle. In: IEEE Transaction Measurements . Vol 39 Iss 6 p.1008-13.dez. 1990.

53. ZECH, J.; MÜLLER, T. Measurements on drive of a solar-powered commercial vehicle. Report in Applied Measurement. v. 7, N° 1, 1991.