

## Agradecimentos

Este trabalho significa o culminar de um período académico que acarretou sacrifícios e opções. Nele estão ainda contidas competências que ultrapassam as do seu autor. Sozinho seria possível fazê-lo, mas não seria a mesma coisa. Nesse sentido, agradeço a todos os que me ajudaram, mas destacando, os que tiveram envolvimento direto, como é o caso dos meus orientadores pelas dicas e ajudas, e da empresa Datanálise, onde foi executada a parte experimental. Os seus Diretores foram um elo importante, na medida em que permitiram a participação dos que se mostraram sempre prontos a auxiliar quando estavam na sede da empresa. Um agradecimento especial ao Sr. Eng. Nuno Leitão na análise de corrente e termografia, ao Sr. José Dominguez e ao Sr. Nuno Pereira na parte de análise de vibrações.

Agradeço ainda aos que comigo trabalham como é o caso do meu chefe, Eng. Marques que me permitiu flexibilizar o tempo para conseguir conciliar o emprego e os estudos. Ao Sr. Águas, que tem longos anos de experiência e cursos na área da eletricidade, por se ter disponibilizado a transmitir conhecimento, explicando conceitos práticos e ajuda na preparação do motor para ser simulado o curto-circuito. À minha Camarada e amiga Filipa, que mesmo sendo da área de comunicação, consentiu em ler a dissertação mais de uma vez otimizando a escrita.

À minha família pelas visitas adiadas e pelos momentos em que não estivemos juntos, devido à minha vida académica. Por fim, agradeço à minha namorada pelas vezes em que ouviu “não dá, tenho a dissertação para fazer”, e pela motivação e ajuda na vida académica e na dissertação.



## Resumo

Os motores elétricos trifásicos de indução são os mais utilizados na indústria, para o acionamento mecânico, devido à sua fiabilidade, robustez e baixa manutenção. A desvantagem da regulação da velocidade encontra-se ultrapassada pelos variadores de frequência. Apesar disto, é necessário garantir operações seguras e confiáveis, daí que se recorra à manutenção.

O trabalho a desenvolver nesta dissertação, é o diagnóstico de avarias em motores elétricos, numa vertente do controlo da condição. Com o objetivo de verificar quais as vantagens e desvantagens de cada tecnologia. Foram provocados 5 danos em motores diferentes e cada um deles foi submetido a um diagnóstico, através de três tecnologias de manutenção preditiva, análise de vibrações, análise corrente e análise termográfica.

Concluiu-se que, no caso da análise de corrente os resultados teóricos são validados através dos diagnósticos, mas esta não é aplicada para a deteção, devido ao tempo que demora uma aquisição e quando dois danos são diagnosticados através da mesma opção não deteta a causa, por exemplo, em danos nos rolamentos e excentricidade só revela que há variação do entreferro. Enquanto no caso da termografia, nesta dissertação, não mostrou dados satisfatórios, nem na deteção, como era esperado, mas a temperatura é muito importante no caso dos motores, logo deve estar presente. A análise de vibrações deteta grande parte dos danos numa fase incipiente mas os resultados necessitam de um diagnóstico cuidado. Sintetizando, no caso desta dissertação, as tecnologias complementaram-se e chegaram a um diagnóstico mais assertivo.

Palavras-chave: Motor de indução, controlo da condição, análise de corrente, análise de vibração, termografia, Barras-partidas, excentricidade, curto-circuito no estator, desequilíbrio.



## **A b s t r a c t**

The three-phase induction motors are the most used in industry for mechanical drive due to its reliability, robustness and low maintenance, the disadvantage of speed regulation is overcome by frequency inverters. Although it is necessary to ensure safe and reliable operations, hence it will turn maintenance.

The work in this thesis is the diagnosis of faults in electric motors, an arm of the control condition. In order to check the advantages and disadvantages of each technology. were caused 5 damages in different engines and each was subjected to a diagnostic of three predictive maintenance technologies through, vibration analysis, thermal analysis and flow analysis

It was concluded that, in the case of the MCSA theoretical results are validated through the diagnosis, but this is not applied to the detection, due to the time it takes an acquisition and when two injuries are diagnosed using the same option does not detect the cause for example, in damage to bearing eccentricity and only reveals that there is variation in air gap. While in the case of thermal imaging, this dissertation showed no satisfactory data, and the detection, as expected, but the temperature is very important in case of engines, must soon be present. Vibration analysis detects most of the damage at an early stage but the results require a careful diagnosis. Summarizing, in the case of this dissertation, the technologies are complementary and evolved into a more assertive diagnosis.

**Keywords:** induction motor, the control condition, Motor current signature analysis (MCSA), vibration analysis, thermography, broken bars, eccentricity, short circuit in stator and imbalance force.



## Lista de abreviaturas e símbolos

### Abreviaturas

BLDC – motor cc sem escovas (*Brush less DC motor*)

CA – Corrente alternada

CC – Corrente continua

EF – Espectro de frequência

FFT – Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)

FIT – Ficha de trabalho

LWIR – Onda Comprimento longo na gama de infravermelhos (Long wave infrared)

MCSA – Análise de corrente (*Motor current signature analysis*)

NG – Nível Global

PaP – Motores passo a passo

UMP – Força de desequilíbrio magnético (*Unbalance magnetic pull*)

## Símbolos

$\Delta U$  - Variação da energia interna de um sistema

$\zeta$  – Fator de amortecimento

A – Área

Cg – Campo girante

Dr - Diâmetro dos rolamentos

Dp - Diâmetro médio da pista.

E – diferença de potencial

$f$  – Frequência

F – Força

$f_{gai}$  - frequência da gaiola

F<sub>n</sub> – Frequência natural

FPB - Frequência de passagem das barras

FPPO - Frequência de passagem dos polos

Fr - Frequência de rotor

$f_{rext}$  - Frequência da pista exterior do rolamento

$f_{rint}$  - Frequência da pista interior do rolamento

$f_{rol}$  - Frequência das esferas

H - Intensidade do campo magnético

h - coeficiente de transferência térmica

I – Corrente

K - Rigidez

l – comprimento

La – Frequência de alimentação

m - Massa

N – Número de espiras

Nr - Numero de esferas

Ns - Frequência do campo eletromagnético

P – Pares de polos

Q - Energia térmica

RPM – Rotações por minuto

RPS – Rotações por segundo

Sf – Escorregamento

SFP - Frequência de passagem das cavas

t – Tempo

T – Período

Ts – Temperatura ambiente

Ti - temperatura do objeto

V - Tensão

v – velocidade



## Índice

1.	Introdução.....	1
2.	Estado da arte.....	4
3.	Motores elétricos .....	8
3.1	Motores de corrente contínua.....	8
3.1.1	Convencional .....	9
3.1.2	Sem escovas (Brushless):.....	11
3.2	Motores de corrente alternada.....	12
3.2.1	Motores de indução trifásicos.....	13
3.2.2	Monofásicos .....	16
3.2.3	Motor Universal.....	17
4.	Controlo da condição.....	20
4.1	Análise de vibrações .....	24
4.1.1	Fundamentos teóricos .....	24
4.1.2	Medições.....	29
4.1.3	Sensores .....	33
4.1.4	Técnicas utilizadas.....	38
4.2	Análise de corrente .....	47
4.2.1	Fundamentos teóricos .....	47
4.2.2	Medições.....	48
4.2.3	Sensores .....	49
4.2.4	Técnicas utilizadas.....	49
4.3	Termografia .....	50
4.3.1	Fundamentos teóricos .....	50
4.3.2	Medições.....	51
4.3.3	Sensores .....	52
4.3.4	Técnicas .....	53
5.	Danos e os seus sintomas .....	55
5.1	Tipo de danos.....	55
5.2	Veio empenado .....	58
5.2.1	Análise de vibrações .....	59
5.2.2	Análise de corrente .....	59
5.2.3	Termografia .....	59

5.3	Desiquilibrio do rotor.....	59
5.3.1	Análise de vibrações.....	60
5.3.2	Análise de corrente.....	60
5.3.3	Termografia.....	60
5.4	Excentricidade.....	61
5.4.1	Análise de vibrações.....	61
5.4.2	Análise corrente.....	62
5.4.3	Termografia.....	63
5.5	Barras partidas.....	63
5.5.1	Análise de vibração.....	64
5.5.2	Análise de corrente.....	65
5.5.3	Termografia.....	65
5.6	Curto-circuito.....	66
5.6.1	Análise de vibração.....	67
5.6.2	Análise de corrente.....	67
5.6.3	Termografia.....	70
5.7	Desequilíbrio de fases.....	70
5.7.1	Análise de vibrações.....	71
5.7.2	Análise de corrente.....	71
5.7.3	Termografia.....	71
5.8	Falta de uma fase.....	72
5.8.1	Análise de vibrações.....	72
5.8.2	Análise de corrente.....	73
5.8.3	Termografia.....	73
5.9	Dano nos rolamentos.....	73
5.9.1	Análise de vibrações.....	74
5.9.2	Análise de corrente.....	76
5.9.3	Termografia.....	76
5.10	Refrigeração insuficiente.....	77
5.10.1	Análise de vibrações.....	77
5.10.2	Análise de corrente.....	77
5.10.3	Termografia.....	77
6.	Análise experimental.....	79

6.1	Equipamento utilizado: .....	79
6.2	Resultados Obtidos .....	81
6.2.1	Barras partidas .....	84
6.2.2	Dano na pista exterior do rolamento.....	91
6.2.3	Curto-circuito no estator .....	102
6.2.4	Excentricidade .....	113
6.2.5	Rotor desequilibrado .....	119
7.	Conclusões.....	125
8.	Referências .....	127



## Índice de Figuras

Figura 1 - Crescimento populacional e previsões da “UN 2010 projections” [ <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/File:World-Population-1800-2100.svg">http://en.wikipedia.org/wiki/File:World-Population-1800-2100.svg</a> ] .....	1
Figura 2 - Projeções de vendas de veículos CE-Combustão interna HEV - híbrido e PHEV - Híbrido com plug-in [ <a href="http://www.eia.gov/forecasts/aeo/">http://www.eia.gov/forecasts/aeo/</a> ] .....	2
Figura 3 - Evolução dos preços do cobre nos últimos 24 anos [ <a href="http://www.infomine.com/investment/metal-prices/copper/all/">http://www.infomine.com/investment/metal-prices/copper/all/</a> ] .....	2
Figura 4 – Pesquisa até 2003 da monitorização da corrente do estator [1] .....	4
Figura 5 - Frequência padrão em vibração separadas por danos elétricos ou mecânicos [2] .....	5
Figura 6 - Esquema motor convencional de corrente contínua [ <a href="http://www.feiradeciencias.com.br">www.feiradeciencias.com.br</a> ] .....	9
Figura 7 - Indutor e induzido com alimentação independente .....	9
Figura 8 - Excitação paralelo, serie e compound (serie-paralelo) .....	9
Figura 9 - Constituintes de um motor coreless .....	10
Figura 10 - Exemplo de aplicação e motor de vibração .....	11
Figura 11 - Exemplo de controlador “MC33033” para motores sem escovas .....	12
Figura 12 - Constituição do motor de indução trifásico .....	13
Figura 13 - Estator de um motor de indução [WEG] .....	13
Figura 14 - Rotor gaiola de esquilo .....	14
Figura 15 - Gaiola de esquilo envolvida em chapa [12] .....	14
Figura 16 - Rotor bobinado .....	15
Figura 17- Motor Universal [12] .....	17
Figura 18 - Esquema de um motor Universal .....	18
Figura 19 - Manutenção integrada [15] .....	23
Figura 20 - Exemplo de uma ficha de trabalho (FIT) .....	24
Figura 21 - Representação e analogia entre uma vibração no domínio do tempo e frequência [16] .....	25
Figura 22 – Representação gráfica de uma harmónica e da sua expressão no tempo ....	25
Figura 23 - Analogia para identificação de uma vibração [16] .....	26
Figura 24 - Diagrama de corpo livre de um grau de liberdade [16] .....	27
Figura 25 – Vibração natural sem amortecimento e a sua expressão .....	27
Figura 26 - Vibração natural c/amortecimento e a sua expressão .....	28
Figura 27 - Tipos de amortecimento .....	28

Figura 28 - Cadeia de aquisição [17].....	29
Figura 29 - Relação entre as unidades de medida e a frequência [17] .....	30
Figura 30 - Escala linear versus logarítmica [17].....	31
Figura 31 - Equações para converter base linear para logaritimica.....	31
Figura 32 - Exemplo de pontos e direções a medir [18].....	31
Figura 33 - Severidade em vibrações segundo a norma ISO 10816.....	32
Figura 34 - Tipo de sensores [18].....	33
Figura 35 - Demonstração do funcionamento de um sensor de deslocamento [18].....	34
Figura 36 - Caracteristica da resposta dos sensores de velocidade Iberanalysis .....	34
Figura 37 - Resposta de acelerómetros com sensibilidades diferentes Iberanalysis .....	35
Figura 38 - Desvio da sensibilidade versus frequência [17].....	36
Figura 39 - Frequência em função da fixação [17].....	36
Figura 40 - Fatores influenciadores da aquisição dos sensores Brüel & Kjaer .....	37
Figura 41 - Nível Global e níveis de alerta.....	38
Figura 42 - Espectro PBC [15] .....	39
Figura 43- Tendência da variação NG [15] .....	39
Figura 44 - Variação da EF no tempo [15].....	40
Figura 45 - Equações da DFT.....	40
Figura 46 - Demonstração que o sinal amostrado diferente é do sinal real.....	41
Figura 47 - Demonstração da semelhança dos sinais quando a amostragem é superior ao sinal real.....	42
Figura 48 - Cálculo de outros parâmetros a partir da Freq max. e N .....	42
Figura 49 - Demonstração do nome dado ao erro “efeito janela” [22].....	43
Figura 50 - Espectros no topo s/ leakage no meio têm leakage e em baixo uma harmónica sem erro [16].....	43
Figura 51 - Visualização dos vários tipos de janela [23].....	44
Figura 52 - Comparação entre sinal com e sem janela [23] .....	44
Figura 53 - Efeito de cerca .....	45
Figura 54 - Representação de cepstrum a partir do domínio do tempo.....	46
Figura 55 - EF run -up ou cost down [16] .....	47
Figura 56 - Exemplos de pinças amperimétricas.....	49
Figura 57 - Tabela de emissividade termográfica [ <a href="http://www.vortex.com.br/raytek/emissividade.html#anchor127430">http://www.vortex.com.br/raytek/emissividade.html#anchor127430</a> ] .....	52
Figura 58 - Exemplo de sensor LWIR.....	53

Figura 59 - Exemplo de Espectro termográfico e a distribuição de temperatura. ....	53
Figura 60- Estudo da fiabilidade IEE sobre motores de indução [1] .....	55
Figura 61 - Estudo de fiabilidade EPRI em motores de indução [1].....	56
Figura 62 - Fontes de falhas nos motores [1] .....	57
Figura 63 - EF de um motor saudável em cima e c/veio quinado em baixo .....	59
Figura 64 – EF em aceleração com rotor saudável em cima e com desequilíbrio no de baixo .....	60
Figura 65 - Padrões EF para um motor saudável no topo e com 37% de excentricidade dinâmica em baixo, em ambos os casos o escorregamento é de 1,9% e o motor alimentado a 100Hz [33] .....	61
Figura 66 - EF de um motor com excentricidade [32] .....	62
Figura 67 - EF de motor saudável [32].....	62
Figura 68 - Representação da excentricidade e comparação com motor saudável [38].	63
Figura 69 - Motor sem defeito e em carga [34].....	64
Figura 70 - Motor com duas barras partidas e em carga [34].....	64
Figura 71 – Comparação do EF de análise de corrente de um motor saudável até 3 barras partidas.....	65
Figura 72 - Comparação de termografia entre um motor saudável e outro com barras partidas [27].....	65
Figura 73 - Comparação da velocidade (aquecimento) e temperatura entre motores saudáveis e c/barras partidas [27].....	66
Figura 74 - Na imagem lado esquerdo é um curto-circuito em espiras em que a sua evolução dá a imagem do lado direito [WEG] .....	66
Figura 75 – Motor em curto-circuito no estator .....	67
Figura 76 – Espiras do Estator em curto [38].....	68
Figura 77- Representação das 3fases do motor coluna 1 saudável 2 desequilíbrio na tensão 3 espiras em curto circuito [39].....	69
Figura 78 - Imagem termográfica de um motor com espiras em curto-circuito [31] .....	70
Figura 79 - EF de um motor saudável acima e motor com desequilíbrio de fases baixo	71
Figura 80 - Resultado experimental de um motor sujeito a desequilíbrios de fase [43]	71
Figura 81- EF de um motor saudável acima e motor sem uma fase em baixo.....	72
Figura 82 - Comparação entre um motor saudável e c\dano [36] .....	74
Figura 83 - Comparação entre motor saudável e c\dano em relação ao carregamento [37] .....	74

Figura 84 - Gráfico de rolamento danificado até três 3Khz [37] .....	75
Figura 85 - As 8 etapas de degradação até à rutura [15] .....	75
Figura 86 - Comparação de dois defeitos num motor com um saudável [40].....	76
Figura 87 - Visualização de um motor com danos nos rolamentos.....	76
Figura 88 - Comparação termográfica entre motor saudável e c/dano no sistema de refrigeração [27] .....	77
Figura 89 - Motor Leroy Sumer .....	79
Figura 90 - Motor ABB .....	79
Figura 91 Freio de Foucault .....	80
Figura 92 - Variador de frequência (vermelho) e caixa de ligações.....	80
Figura 93 – Analisador de vibrações .....	80
Figura 94 - Analisador de corrente (PDNA) .....	81
Figura 95 - Analisador de termografia .....	81
Figura 96 - EF do ruído provocado pela bancada de trabalho.....	82
Figura 97 - Exemplo de EF quando a maquete foi colocada no chão .....	83
Figura 98 – Rotor com quatro barras partidas .....	84
Figura 99 - Motor com duas barras partidas e em carga [8].....	84
Figura 100- Motor saudável em carga.....	85
Figura 101 - EF de um motor c/4 barras partidas em carga .....	86
Figura 102 - EF de um motor c/4 barras partidas em carga .....	87
Figura 103 - Comparação do EF de análise de corrente de um motor saudável até 3 barras partidas.....	88
Figura 104 - Excentricidade de motor sem defeito.....	88
Figura 105 - Motor com defeito sem carga .....	89
Figura 106 - Motor com defeito em carga.....	89
Figura 107- Imagem térmica de motor saudável em carga .....	91
Figura 108 - Visualização de dano semelhante ao do rolamento .....	91
Figura 109 - Comparação entre motor saudável e c\dano em relação ao carregamento [11] .....	92
Figura 110 - Motor saudável em peakvue sem carga .....	92
Figura 111 - Defeito no rolamento em carga.....	93
Figura 112 - Motor com defeito no rolamento agravado em carga.....	94
Figura 113 - Motor com defeito no rolamento agravado sem carga .....	95
Figura 114 - EF de um motor com excentricidade [32] .....	95

Figura 115 - Excentricidade de motor sem defeito em carga a alta frequência.....	96
Figura 116 - Excentricidade de motor sem defeito em carga a baixa frequência.....	96
Figura 117 - Motor com defeito sem carga .....	97
Figura 118 - Motor com defeito em carga .....	97
Figura 119 - Motor com defeito agravado sem carga.....	98
Figura 120 - Motor com defeito agravado em carga .....	98
Figura 121 - Motor com defeito agravado sem carga a baixa frequência .....	99
Figura 122- Motor com defeito agravado em carga a baixa frequência.....	99
Figura 123 - Motor saudável à esquerda e com defeito à direita.....	101
Figura 124 - Linha L4 do motor com dano na pista exterior do rolamento .....	101
Figura 125 - Espiras em curto-circuito .....	102
Figura 126 - Espectro padrão de motor em curto-circuito .....	102
Figura 127 - Motor saudável em carga vertical.....	103
Figura 128 -Motor saudável em carga horizontal.....	104
Figura 129 - Motor com uma espira em curto em carga vertical .....	105
Figura 130 - Motor com uma espira em curto em carga horizontal .....	106
Figura 131 - Motor com duas espiras em curto e em carga vertical.....	107
Figura 132 - Motor com duas espiras em curto e em carga horizontal .....	108
Figura 133 - Motor com três espiras em curto em carga vertical .....	109
Figura 134 - Motor com três espiras em curto e em carga horizontal.....	110
Figura 135 - Tabela com os valores de desequilíbrio da corrente e tensão, com e sem carga.....	111
Figura 136 - Prova de excentricidade ao motor em curto-circuito .....	111
Figura 137 - Prova de rotor ao motor em curto-circuito.....	112
Figura 138 - Motor saudável a esquerda e com dano à direita .....	112
Figura 139 - Espectro da zona onde foi efetuado o curto-circuito .....	113
Figura 140 - Motor utilizado para excentricidade .....	113
Figura 141 - Padrões EF para um motor saudável no topo e com 37% de excentricidade dinâmica em baixo, em ambos os casos o escorregamento é de 1,9% e o motor alimentado a 100Hz [33] .....	114
Figura 142 – Motor saudável em carga .....	114
Figura 143 - Motor com excentricidade com carga em velocidade .....	115
Figura 144 – Motor com excentricidade com carga em aceleração .....	116
Figura 145 - EF padrão de um motor com excentricidade [32].....	117

Figura 146 - motor sem defeito em carga.....	117
Figura 147 - Motor com defeito sem carga .....	117
Figura 148 - Motor com defeito em carga.....	118
Figura 149 - Espetros termográficos, à direita o motor saudável, no meio com excentricidade e à esquerda um local. ....	118
Figura 150 - EF em aceleração com rotor saudável em cima e com desequilíbrio no de baixo [8].....	119
Figura 151 - Motor novo em carga.....	120
Figura 152 - Rotor desequilibrado em carga vertical á direita e horizontal na esquerda .....	120
Figura 153 - Motor sem defeito em carga a alta frequência.....	121
Figura 154 - Excentricidade de motor sem defeito em carga a baixa frequência.....	121
Figura 155 – Rotor desequilibrado a altas frequências em carga.....	122
Figura 156 - Rotor desequilibrado a baixas frequências em carga.....	122
Figura 157- Espetros termográficos, à esquerda o motor saudável, à direita o motor com defeito e ambos em carga .....	123



# 1. INTRODUÇÃO

O jornal “O Público” a 6 de Agosto de 2013, publicou um artigo sobre “alimentação do amanhã”, que referia “será preciso aumentar em 70% a produção de carne para alimentar o mundo em 2050”. A partir deste indicador pode-se deduzir que todos os recursos necessários a vivência do Ser Humano também irão aumentar.

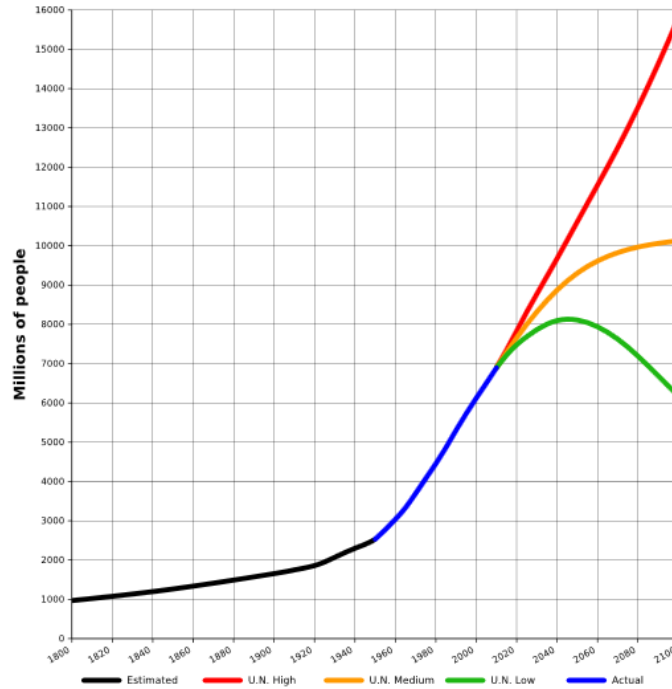


Figura 1 - Crescimento populacional e previsões da “UN 2010 projections”  
[<http://en.wikipedia.org/wiki/File:World-Population-1800-2100.svg>]

A evolução do mundo em que vivemos está a ser acompanhada por fatores como o crescimento da população, tal como indica a Figura 1, e as suas consequências, tal como o aumento das necessidades energéticas e a crescente importância da sustentabilidade (de energias renováveis), quando ainda somos muito dependentes dos combustíveis fósseis.

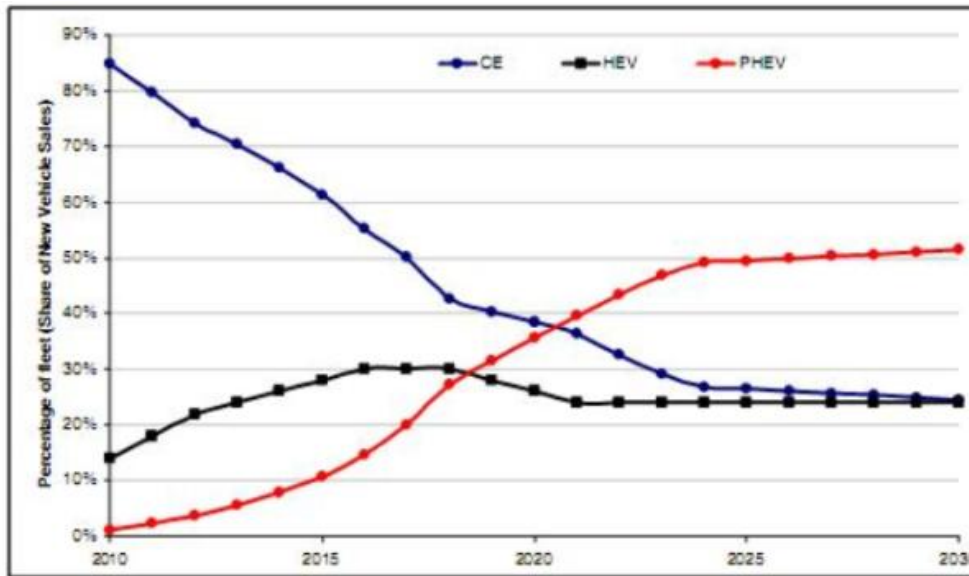


Figura 2 - Projeções de vendas de veículos CE-Combustão interna HEV - híbrido e PHEV - Híbrido com plug-in [<http://www.eia.gov/forecasts/aeo/>]

O desafio é exigente, porque os fatores do parágrafo anterior são antagónicos, mas a Humanidade já começou a trabalhar na solução, por exemplo, com a utilização de energias renováveis, em que na sua maioria o produto final é a eletricidade, esta é visível no caso da mobilidade rodoviária, em que se prevê os motores elétricos auxiliem ou substituam os motores de combustão, de acordo com a Figura 2. O lado negativo desta opção é que tal como os combustíveis, muitos dos recursos naturais não são renováveis, como é o caso dos minerais, que levam países a restringir a sua exportação, considerando-os estratégicos.



Figura 3 - Evolução dos preços do cobre nos últimos 24 anos [<http://www.infomine.com/investment/metal-prices/copper/all/>]

O acima descrito justifica a indispensabilidade de nos tornarmos eficientes, no sentido de poupar os recursos à nossa disposição, evitando a vertente económica-financeira por essa ser facilmente percecionada. Cada vez que se adquirem equipamentos novos, como motores, estes são a face de muitos recursos gastos, por exemplo, os minerais raros como os magnéticos, cobre (em que a sua procura têm vindo a aumentar, visto de maneira indireta através do seu valor monetário, como representa a Figura 3) e etc.

A segurança das pessoas e das instalações são duas das principais razões de se realizar manutenção, ao manter a fiabilidade inicial de um equipamento estamos a reduzir riscos de acidentes, da qual ainda deriva a vantagem de poupar recursos sejam eles financeiros, naturais ou humanos.

Grande parte dos artigos que abordam os motores de indução e a Manutenção condicionada “controlo da condição”, referem-se sobre os primeiros como sendo os mais utilizados na indústria pela sua robustez e a manutenção condicionada como sendo a preterida, devido à sua eficiência na deteção e diagnóstico de danos numa fase incipiente.

O trabalho a desenvolver nesta dissertação, é o diagnóstico de avarias em motores elétricos, numa vertente do controlo da condição. Com o objetivo de verificar quais as vantagens e desvantagens de cada tecnologia. Foram provocados 5 danos em motores diferentes e cada um deles foi submetido a um diagnóstico, através de três tecnologias de manutenção preditiva, análise de vibrações, análise corrente e análise termográfica.

A dissertação terá 8 capítulos, à posteriori desta introdução inicia-se com o “estado da arte”, em que a preocupação é dar perceção ao que se estuda e investiga, para além do tema central sobre motores e outras tecnologias abordando de maneira sucinta a sua evolução, apenas através de artigos, teses e dissertações, uma vez que o conhecimento sobre o tema será deste capítulo para a frente. O capítulo 3 fala sobre os tipos de motores elétricos existentes, o seu funcionamento e como são constituídos, o motor de indução será aprofundado por ser o “objeto” de estudo.

Na parte experimental da dissertação irá realizar-se o diagnóstico de avarias previamente provocadas através de três tecnologias integradas numa perspetiva de controlo da condição, mas este “diagnóstico” é um passo de uma caminhada, que foi previamente preparada. Apesar de existirem outros tipos de manutenção, a condicionada é distinta, por isso estruturou-se um capítulo com uma introdução à manutenção para enquadrar o “Controlo da Condição” na qual se descreveu a sua implementação para demonstrar o planeamento do caminho a trilhar para se obterem os benefícios, deste tipo de manutenção. É preciso frisar que na análise de vibrações desenvolveu-se a diferença entre deteção e diagnóstico, tal como outros conceitos que irão ser necessários para as tecnologias posteriormente descritas.

Previamente ao capítulo “Danos e os seus sintomas” é a apresentação dos intervenientes, porque é neste (Capítulo) que surge um apanhado da bibliografia em relação aos danos e sintomas de cada tipo de avaria, será daqui que se selecionará as avarias a provocar. Terminando na parte experimental em que apresentamos uma previsão de resultados que se esperam confirmados e sobre os quais se apresentam conclusões no último capítulo.

## 2. ESTADO DA ARTE

O artigo mais antigo [1] da bibliografia refere que “*aplicação do controlo da condição nas centrais elétricas e o seu desenvolvimento tornou-se num dos acontecimentos mais importantes para as empresas de energia desde 1990 e pode ser visto de duas perspetivas diferentes em que a primeira se refere à saúde e segurança nas operações do equipamento elétrico nas centrais e à redução de custos que isto pode ter. Enquanto a segunda perspetiva está relacionada com a eficiência do diagnóstico e o contributo que a informática, também em franco desenvolvimento, na vertente de inteligência artificial, têm neste campo.*”

AUTHOR / TIME	OBJECT / OBJECTIVE / FIND	INVOLVED TECHNOLOGY / INSTRUMENT / MAIN CONTENT	COMMENT
Benbouzid/99 [58,76]	To get easily distinguished spectral signature for detecting rotor eccentricity and broken bars, shaft speed oscillation, and bearings failure	High-resolution spectral analysis, including Eigenanalysis-based frequency estimators, MULTiple Signal Classification (MUSIC) and Root-MUSIC methods	Initial step for diagnostic purpose, Only voltage unbalance and stator open phase are proved
Nejjari/99 [77]	diagnosis of induction motor stator and phase conditions	fuzzy logic, fuzzy set theory	
Cardoso/99 [78]	On-line detection and location of inter-turn short circuits by non-invasive method	Stator current Park's Vector expression and patterns	Laboratory test, based on the appearance of elliptic patterns
Watson/99 [79]	Early detection of rotor faults	Finite element methods, including fixed mesh modelling and time step modelling, for simulating rotor faults	Transient simulation technique is being developed
Thomson/98 [80,81]	To find relationship between the severity of eccentricity and the magnitude of current spectra component	Time stepping finite element method for calculating EMF time domain waveform, FFT analysis technique, MATLAB	Developing new method for better diagnosis
Schoen/97 [56]	Removing arbitrary load effects from the current spectrum	Measuring three-phase current and voltage for estimation of the d-axis current of an ideal machine as a model reference value	Improving the detectability of current spectral
Schoen/95 [57,59]	Developing automatic diagnostic system [57]	Rule-based filter using expert system, neural network with clustering-type algorithms	Spectral characteristics of each machine must be learn first
	To find the relationship of the bearing vibration to the stator current spectrum [59]	Rolling-element bearing failure modes, Mathematical expression of harmonic frequencies related with different conditions	Initial research on efficacy of current monitoring for bearing

Figura 4 – Pesquisa até 2003 da monitorização da corrente do estator [1]

Sendo este artigo uma compilação da literatura “Literature Survey” a Figura 4 propõe-nos uma perspetiva dos estudos que têm sido feitos até 2003, e os métodos utilizados. Demonstra que o passo seguinte será a automação “*o problema atual é os resultados necessitarem de ser interpretados por seres humanos*” [2]

Enquanto no primeiro artigo a abordagem baseia-se em grande parte na análise de corrente, o que é compreensível por abordar o equipamento elétrico, perceptível pelo título “Condition monitoring techniques for electrical equipment - A literature survey” sendo um dos capítulos dedicado aos motores de indução elétricos. No próximo artigo [2], também de 2003 e igualmente baseado em pesquisas, mas este por sua vez direcionada para os motores de indução, sobretudo através da análise de vibrações. “*Trata-se de uma discussão sobre o estado da arte da monitorização (...) dos motores*

de indução e pesquisas sobre o seu diagnóstico e desenvolvimento em particular, destacando a parte analítica e as considerações técnicas como também as várias questões práticas abordadas na literatura das novas tecnologias para monitorização dos motores de indução.”

O segundo capítulo é dedicado a um modelo e à sua análise, em que no geral as experiências se baseiam em “simular avarias através de um modelo em computadores e comparar os resultados na prática” [2].

Vibration frequency components due to electrical faults										
Type of faults	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Unbalanced supply voltage	1X	2f-13f	f	2f13f	4f					
Single phasing of the supply or loose in the connectors	1X	2f-13f	f	2f13f	4f					
Unbalanced stator resistance, Inter-turn insulation faults, Phase to earth insulation faults, Phase to phase insulation faults	1X	f	2f							
Stator shorted laminations	1X	2X	2f							
Stator loose iron	1X	2X	2f							
Broken rotor bars	1Xfp	1X-fp								
Broken rotor shorting rings	1Xfp	1X-fp								
Bad joints between rotors bar and shorting rings	1Xfp	1X-fp								
Shorted rotor laminations	1Xfp	1X-fp								
Cracked rotor bars	1Xfp	1X-fp	3Xfp	4Xfp	5Xfp	6Xfp	7Xfp			

Vibration frequency components due to mechanical faults										
Type of faults	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Stator eccentricity	1X	2X	2f <sub>i</sub>	–	–	–	–	–	–	–
Stator loose iron	1X	2X	2f <sub>i</sub>	–	–	–	–	–	–	–
Eccentric rotor (variable air gap)	f <sub>p</sub>	1X	2f <sub>i</sub>	2f <sub>i</sub> +f <sub>p</sub>	2f <sub>i</sub> -f <sub>p</sub>	–	–	–	–	–
Loose rotors bars	1X	2X	RBPF+2f <sub>i</sub>	RBPF-2f <sub>i</sub>	–	–	–	–	–	–
Roll bearing defect (early stage)	FTF	BPFO	BPF1	BSF	2BPF1	–	–	–	–	–
Roll bearing defect (advance stage)	FTF	1X	2X	3X	BPF1	BPFO	BSF	RHF	–	–
Misalignment (angular, parallel and bearing)	1X	2X	3X	–	–	–	–	–	–	–
Unbalanced (force, couple, and overhung rotor)	1X	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Eccentric rotor	1X	–	–	–	–	–	V	–	–	–
Bent shaft	1X	2X	–	–	–	–	–	–	–	–
Mechanical looseness (depends on the type of looseness)	0.5X	1X	1.5X	2X	3X	4X	5X	6X	7X	8X
Rotor rub	0.5X	1X	1.5X	2X	2.5X	3X	3.5X	4X	4.5X	4X

Figura 5 - Frequência padrão em vibração separadas por danos elétricos ou mecânicos [2]

No quinto capítulo são apresentadas duas tabelas, expostas na Figura 5, sendo estas um dos mais completos resumos sobre as frequências padrão dos diversos danos, separados por elétricos e mecânicos. Têm também outros temas relacionados, tal como, *wavelet transform* em que segundo o autor “recentemente se encontrou aplicações em vários ramos da ciência. E apesar de ser madura a sua aplicação em máquina está numa fase incipiente” [2]. Abordado igualmente o tema da inteligência artificial.

Os artigos usados para edificar esta dissertação podem ser classificados por vários tipos:

Tipo estado da arte em que são exemplo os artigos [1] e [2], abordados nos parágrafos anteriores, servem para demonstrar o que existia anteriormente a 2003, ano limite dos artigos utilizados.

Tipo “Fault diagnosis” em que a estrutura é abordar os motores, as suas falhas, as tecnologias existentes e escolher uma delas, a mais usual foi a análise de corrente, e padronizam as falhas com maior probabilidade de ocorrer, comparativamente com as fórmulas teóricas.

O Tipo “Comparasion” que tem uma estrutura semelhante á “fault diagnosis” mas neste são comparadas várias técnicas.

O Tipo de dano em que o objetivo é recorrer a uma ou a várias tecnologias para detetar um dano em particular. O dano sobre o qual mais bibliografia foi recolhida foram as “barras partidas”.

Relacionado com o tema, mas de forma indireta existem outros artigos e dissertações, que servem para nos dar uma ideia de desenvolvimentos paralelos (ao tema). Como Introdução surge a necessidade de sermos independentes dos combustíveis fósseis [3] *“Neste artigo, analisa-se o surgimento de uma trajetória baseada na mobilidade elétrica. Descrevendo a evolução dos veículos elétricos após 2005. O tema central do artigo é que a mobilidade elétrica ultrapassou um limiar crítico e beneficia de vários fatos de crescente importância: altos preços do petróleo, as restrições de carbono e aumento de partilha de carro organizado e intermodalidade.”*

Como tal é necessário de estudar os motores adequados para a evolução das viaturas elétricas. O que revela a dissertação da Feup [4] em que fala sobre a escolha do motor mais adequado para a viatura “FIAT Ellettra Seicento”.

Quanto ao estudo da eficiência temos dos autores [5] em que num artigo sobre a classificação, de acordo com eficiência, destaca-se *“os limites viáveis para IE4 classe são analisados tendo em conta os níveis de eficiência da melhor tecnologia disponível e comercial esperado. Os resultados apresentados podem ser úteis para definir o futuro padrão internacional “super-premium” ou os níveis de classe IE4, bem como para definir estratégias de transformação de mercado.”*

A indústria foi e continua a ser a principal utilizadora de motores, e nesse contexto há problemas que advêm de fatores externos, por exemplo, da rede de alimentação, nesse sentido surge dissertações como, [6] que utilizam um programa para possibilitar o estudo do impacto das tensões de alimentação. Na mesma direção surge o artigo [7] mas aqui é criado e treinado um modelo. É importante frisar que os modelos servem para simulações e este é um campo que está a evoluir em todas as áreas.

A tese [8] fala sobre a gestão da manutenção de infraestruturas ferroviárias e contém duas frases logo no resumo que referem a importância do controlo da condição em que o objetivo do estudo *“visa sobretudo implementar processos de previsão da condição”*, *“No entanto, os processos de previsão da condição não são passíveis de aplicação a todos os equipamentos, face à vasta gama de tecnologias utilizadas.”* Demonstra-se que há consciência da importância do controlo da condição e que esta deve ser uma prioridade.

Em 2009 temos no [9] que contribui para a definição do estado de condição falando sobre manutenção e em particular, da tecnologia de vibrações.

Num futuro próximo talvez se possa aplicar em larga escala a manutenção condicionada através da Internet, exemplo disso é o seguinte artigo [10].



### 3. MOTORES ELÉTRICOS

Estes equipamentos acompanham o nosso dia-a-dia, de manhã está presente na máquina do café, na escova de dentes (elétrica), na máquina de barbear. Quando nos dirigimos para a nossa viatura eles normalmente estão lá, responsáveis por nos abrir as portas, acomodar o banco, os retrovisores e para o arranque da viatura. Até o telemóvel no modo vibração utiliza motores.

Estes aparelhos têm a função de transformar energia elétrica em energia mecânica. Mas mediante as características pretendidas estes são de vários tipos, o que leva à utilização de diferentes tecnologias. Neste capítulo irão abordar-se os tipos de motores elétricos mais conhecidos, o seu funcionamento, os seus controladores e suas aplicações.

O motor de indução será focado e deste capítulo para a frente, quando se refere motor elétrico, deve-se subentender motor de indução trifásico.

#### Princípio de funcionamento

O Funcionamento será descrito através de experiências comuns, no qual vamos acrescentando a teoria do eletromagnetismo.

Os Imanes atraem-se e repelem-se de acordo como os polos que se apresentam virados uns para os outros, os opostos atraem-se e os semelhantes repelem-se. De uma maneira simplificada vamos imaginar um motor composto por dois ímanes. Em que o do centro é uma bússola, logo só têm um grau de liberdade que é a rotação, e outro íman está a ser deslocado descrevendo um círculo à volta da bússola. Neste caso a agulha está acompanhar a trajetória do Íman. Agora substituímos o Íman exterior por um eletroíman (um fio condutor no qual passa uma corrente elétrica, com um núcleo ferrítico (magnético) produz-se um campo magnético), ou seja, a bússola continua a ter o mesmo comportamento.

Em vez de se rodar o eletroíman à volta da bússola colocam-se três(eletrímanes) igualmente afastados, e faz-se atuar uma de cada vez, logo neste caso a agulha movimenta-se para a espira que foi acionada. Se o acionamento tiver um sentido e for repetido a agulha ganha rotação.

De acordo com a analogia acima o estátor é formado as espiras em que os polos estão continuamente a mover-se, o rotor é a bússola que acompanha o movimento dos polos sem que haja contacto.

As espiras ou gaiola do rotor, são responsáveis pelo sentido da corrente (só no rotor). Resultando num binário em que o seu sentido dá origem à rotação do motor.

#### 3.1 MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

A corrente contínua não sofre alteração no tempo e normalmente para a ter necessitamos de a transformar, por a a rede nos fornecer corrente alterna.

### 3.1.1 Convencional

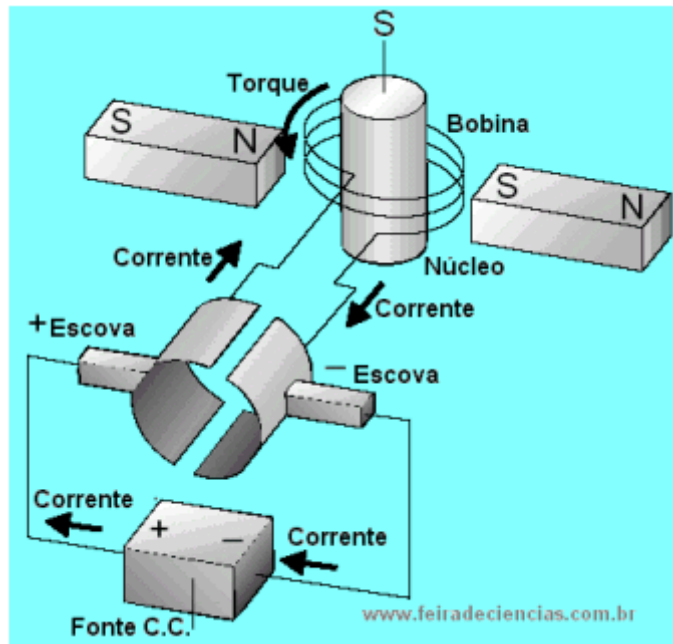


Figura 6 - Esquema motor convencional de corrente contínua [www.feiradeciencias.com.br]

O campo girante do estator é criado por eletroímãs quando alimentado por corrente. O campo do rotor é criado igualmente por enrolamentos alimentados através das escovas. Cada lado torna-se um polo (norte ou sul).

Este tipo de motor segue o princípio geral de funcionamento mas neste caso as espiras do rotor vão sendo continuamente comutadas de acordo com a passagem destas pelas escovas, que estão fixas, seguindo a regra da mão direita temos o sentido de rotação.

Estes motores quanto ao tipo de excitação podem ser:

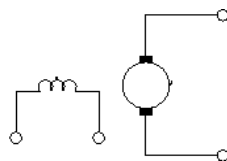


Figura 7 - Indutor e induzido com alimentação independente

Excitação independente em que a alimentação do estator não é a mesma do rotor

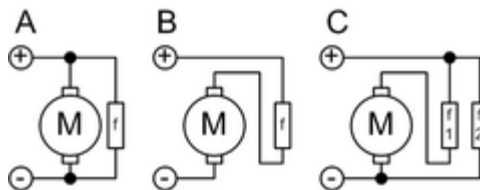


Figura 8 - Excitação paralelo, serie e compound (serie-paralelo)

Excitação em paralelo: Têm a particularidade da sua velocidade variar pouco com a carga, sendo o seu binário de arranque menor que o motor em série [12]

Excitação série: O binário é proporcional ao quadrado da corrente. É resistente a sobrecargas mecânicas, mantendo o consumo de corrente moderado. Têm binário de arranque elevado e uma má regulação em velocidade.

Este motor atinge elevadas velocidades a cargas reduzidas. Quando se reduz consideravelmente a carga existe o perigo de este embalar acabando por se destruir.

Excitação serie-paralelo (compound): Este motor reúne o melhor da excitação em série e da excitação em paralelo, ou seja, é um motor com elevado binário de arranque e uma boa regulação de velocidade.

Íman permanente: O seu funcionamento é idêntico ao do motor CC convencional, mas o estator possui excitação natural através de Ímans em vez de corrente eléctrica. Sendo que o sentido de rotação está de acordo com a polaridade que adoptamos e a sua velocidade varia com a variação de corrente.

A sua fácil construção e conseqüente preço baixo tornam-o muito utilizado em pequenas potências. Desde brinquedos, accionamentos, entre outros.

Sem núcleo (coreless): À semelhança do motor de Íman permanente o estator deste também é constituído por ímanes, mas o rotor é apenas bobinado, não possui núcleo, daí advém a sua designação.

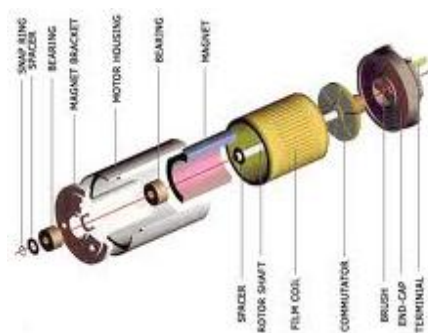


Figura 9 - Constituintes de um motor coreless

O seu princípio de funcionamento é igual ao dos ímanes permanentes. A leveza do rotor torna-o mais ágil, mas têm o inconveniente da fraca refrigeração, por dissipar pouco calor, logo a sua carga e os períodos de utilização devem de ser curtos.



Figura 10 - Exemplo de aplicação e motor de vibração

Este tipo de motor é o ideal quando se pretendem arranques rápidos e velocidades elevadas na ordem das 10000 RPM. Como exemplos de aplicações destes motores podem-se considerar os telemóveis tal como na Figura 10, equipamentos de modelismos e comandos de jogos.

### 3.1.2 Sem escovas (Brushless):

Os motores sem escova, também conhecidos como motores comutados eletronicamente, são motores elétricos ativados por eletricidade de corrente contínua e com sistemas de comutação eletrônica, em vez de comutadores mecânicos (escovas).

Estes possuem ímanes permanentes no rotor e têm de ter um controlador que recebe a informação de sensores de Hall ( na presença de um campo magnético gera aos seus terminais uma tensão eléctrica designada de tensão de efeito Hall) e comuta os enrolamentos do estator.

Tipicamente os motores industriais CC sem escovas têm enrolamentos de três fases ligadas em estrela, sendo cada fase constituída por várias bobinas e respectivos pólos magnéticos.

O rotor deste tipo de motor é constituído por ímanes permanentes e com vários pares de polos alternadamente N-S.

O princípio de funcionamento deste motor é semelhante aos motores CC convencionais mas com a particularidade que a comutação em vez de ser mecânica, feita por escovas, está a cargo de um controlador, que mediante a leitura dos sensores (Hall), os parâmetros de velocidade, o sentido de rotação e o binário desejado, comuta as bobinas do estator.



### 3.2.1 Motores de indução trifásicos

Os motores trifásicos são dos mais utilizados na indústria, e diferem dos de corrente contínua por serem alimentados através do estator que induz o rotor, daí a designação de motores de indução.

#### 3.2.1.1 Constituição

A figura a baixo mostra os constituintes deste motor.

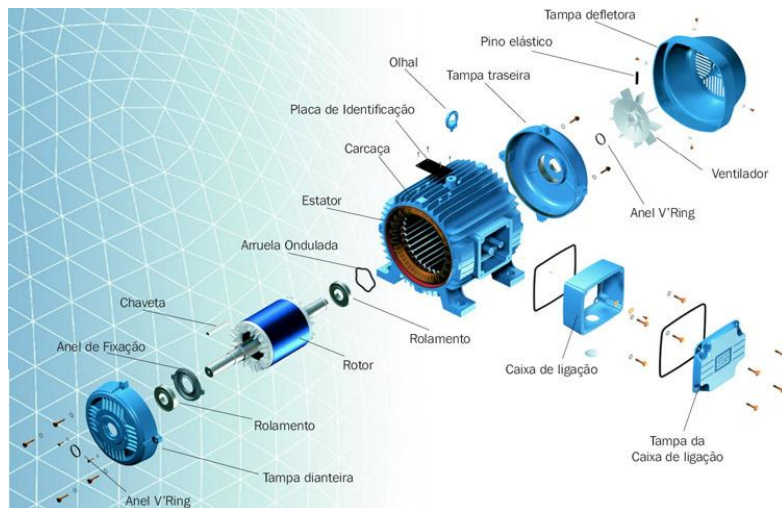


Figura 12 - Constituição do motor de indução trifásico

A carcaça é a parte do motor que liga os vários componentes do motor, é onde está alojado o estator e a caixa de terminais dos finais dos enrolamentos. Através das tampas e dos rolamentos acoplados é possível manter o rotor apenas com um grau de liberdade, o de rodar sobre si mesmo.

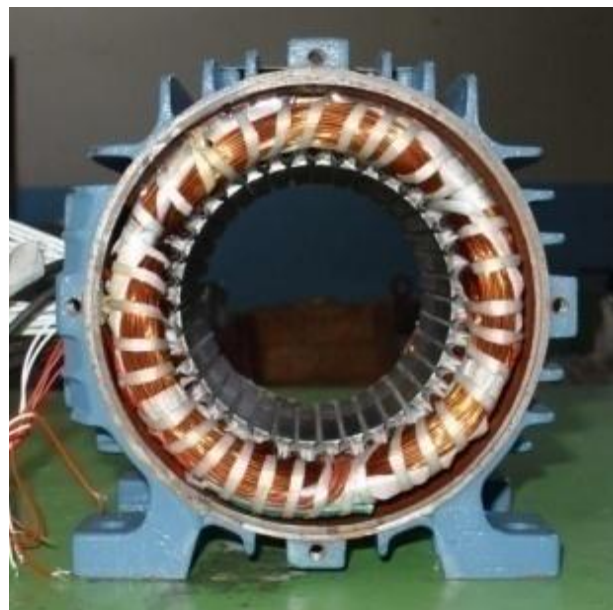


Figura 13 - Estator de um motor de indução [WEG]

O estator, parte física da máquina, é constituído por chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas entre si, para reduzir as perdas por histerese e as correntes de Foucault. As chapas possuem ranhuras nas quais são colocados os enrolamentos que são alimentados por corrente trifásica. [12]

Os enrolamentos que constituem o estator são espaçados à mesma distância, uns dos outros, cada um cria um campo magnético e todos criam um campo girante. Se em cada fase existirem duas bobinas ligadas em série o motor tem dois polos.

O rotor é a parte móvel da máquina apoiada à carcaça através de rolamentos. Os fenómenos de indução dão-se no entre-ferro que é o espaçamento entre o rotor e o estator.

### Tipos de rotor

Gaiola de esquilo

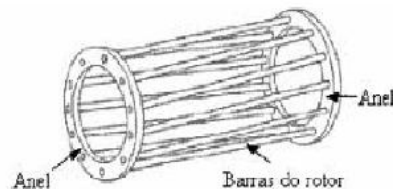


Figura 14 - Rotor gaiola de esquilo

O nome gaiola de esquilo advém da característica da estrutura do rotor que é composta por dois anéis ligados por barras paralelas, gerando curto-circuito. Se repararmos na Figura 14 as barras estão dispostas com uma inclinação que serve para melhorar as propriedades do arranque e diminuir os ruídos.

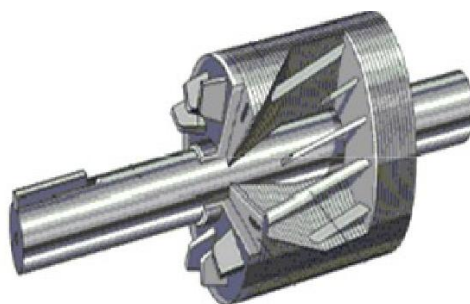


Figura 15 - Gaiola de esquilo envolvida em chapa [12]

De referir que na Figura 15 estrutura gaiola de esquilo está envolvida em chapas laminadas dispostas perpendicularmente às barras.

Rotor Bobinado

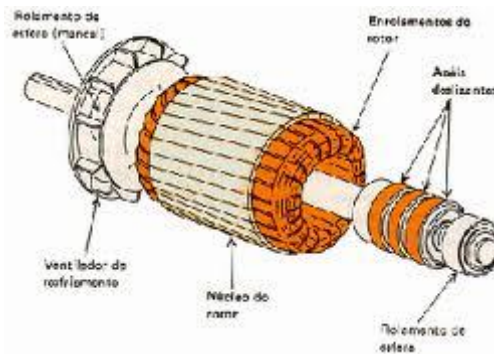


Figura 16 - Rotor bobinado

Este tipo de rotor tem esta denominação por conter enrolamentos, estes estão em contacto através das suas extremidades por anéis colectores, também estes colocados no veio, tal como surge ilustrado na Figura 16. Os colectores estão ligados ao exterior por escovas, em série com o rolamento trifásico do motor.

O princípio de funcionamento destes motores pode ser observado através do que anteriormente foi descrito no item **Princípio de funcionamento** aqui apenas se fará um resumo e adaptar-se-à aos motores de indução.

As bobinas do estator criam um campo girante de acordo com a frequência de alimentação e gera no rotor correntes induzidas criando forças de atração e repulsão. O sentido da rotação obedece a regra da mão direita.

Estes tipos de motores são assíncronos, isto deve-se à gaiola de esquilo em curto circuito estar sujeita a forças magnéticas induzidas gerando correntes induzidas, que por sua vez, também criam um campo magnético. Tal como indica a lei de Faraday, a corrente advém e é proporcional à variação de fluxo magnético, ou seja, se hipoteticamente a rotação do rotor atingisse a velocidade do campo girante deixaria de haver fluxo o que provocaria ausência de correntes (induzidas), o que implica a inexistência de força (binário) [13]. O desfazamento entre as velocidades (campo girante e rotor) é denominada de escorregamento. De seguida as equações do campo girante "Cg" e do escorregamento "Sf":

$$(1) Cg = \frac{La}{P}$$
$$(2) Sf = \frac{La - rps}{La}$$

Sendo "La" a frequência de alimentação; P os pares de polos; rps a rotação do veio por segundo. As formulas acima estão em rotação por segundo, caso seja pretendido em minutos deve-se multiplicar por 60 (segundos).

Um dos grandes beneficios deste tipo de motor tem sido a evolução de equipamentos de controlo de velocidade "variadores de velocidade". Os sistemas modernos de controlo de velocidade baseados em conversores electrónicos de potência permitem controlar ao mesmo tempo a tensão e a frequência de alimentação dos motores de indução, permitindo o arranque e o controlo de velocidade. O número de polos também influencia a velocidade, este era o método utilizado antes dos conversores de frequência.

### 3.2.1.2 Arranque de motores trifásicos

O motor arranca quando o seu binário for superior ao binário resistente, a intensidade de corrente será elevada neste instante. Logo que este binário seja superior ao resistente, a velocidade terá tendência a aumentar e a corrente a diminuir até aos seus valores nominais.

As ligações mais utilizadas são:

**Estrela-triângulo:** Um comutador liga o estator em estrela inicialmente e após uma certa velocidade comuta a ligação para triângulo, aumentando a tensão aplicada a cada um dos enrolamentos. Antes da utilização dos conversores eletrónicos este era o método de arranque mais comum. Este tipo de arranque só é possível caso a caixa de ligações do motor tenha seis terminais. Em baixa tensão isto só é possível se na placa característica do motor a tensão indicada para ligação a em triângulo for superior ou igual 400V. A utilização deste tipo de arranque deve-se à necessidade de reduzir a amperagem inicial para evitar disparar as proteções em instalações de baixa tensão.

**Arrancadores electrónicos:** Equipamento de controlo da velocidade e arranque do motor. Este elimina os problemas dos arranques clássicos, tornando-os mais suaves. Evitam os choques mecânicos, o que diminui a necessidade de manutenção, logo aumenta a vida dos motores.

Os motores de indução de gaiola de esquilo são os mais utilizados na indústria devido à sua robustez, baixo preço, produção em série, manutenção reduzida e arranque fácil. A sua utilização está a aumentar devido à evolução dos controladores de velocidade.

O motor de rotor bobinado usa-se quando a força necessária para o arranque transcende os limites do rotor gaiola de esquilo. Estes motores podem ser aplicados em monofásico desde que a sua potência seja inferior à da rede.

### 3.2.2 Monofásicos

A constituição é semelhante à de um trifásico, sendo que a diferença está no estator que é simplificado a duas bobinas para trabalhar apenas com fase e neutro. Neste caso, não se utiliza rotor bobinado.

O princípio de funcionamento é o mesmo com a diferença de o motor trifásico ter mais enrolamentos, logo o campo girante desliza, neste caso com apenas duas bobinas torna-se pulsante. O anteriormente descrito neste parágrafo é válido após o arranque, porque este necessita de um enrolamento auxiliar desfazado cerca de 90° da fase com a finalidade de provocar um desfasamento entre as correntes do enrolamento principal e auxiliar, de forma a que o campo magnético girante seja diferente de zero. Na prática este funciona como um "motor de arranque" uma vez que se rodassemos o veio manualmente este continuaria a girar num sentido de rotação arbitrado.

Mediante as características de arranque este pode ter várias designações:

Fase dividida: É por intermédio de uma bobine que se desliga após o arranque.

Condensador de arranque: Um condensador que se mantém em série com a bobine que se desliga após o arranque, para aplicações que necessitem de maior binário.

Condensador permanente: Têm a mesma configuração do anterior mas neste caso fica ligado em permanência, que o faz perder binário no arranque mas mantém uma melhor velocidade nominal.

Condensador duplo: A bobine auxiliar fica em série com o paralelo de condensadores, em que um deles é só para arranque e o outro é permanente, mantêm as qualidades dos dois ultimos tipos, têm força no arranque e após desligar-se um deles mantém uma boa velocidade nominal.

Polos sombreados: O motor tem entre uma e duas espiras em cada polo. A corrente induzida nesta espira faz com que o fluxo que a atravessa sofra um atraso em relação ao fluxo da parte não abraçada pela mesma. Este motor têm o binário de arranque mais baixo do que os acima referidos e um baixo rendimento, a grande vantagem é a sua concessão simples e económica.

### 3.2.3 Motor Universal

Motor semelhante ao de CC em série, mas com a vantagem de poder funcionar com corrente alterna monofásica, como pode ser visto na Figura 17.



Figura 17- Motor Universal [12]

É constituído por um rotor e estator ligados em série através de um comutador no colectador.

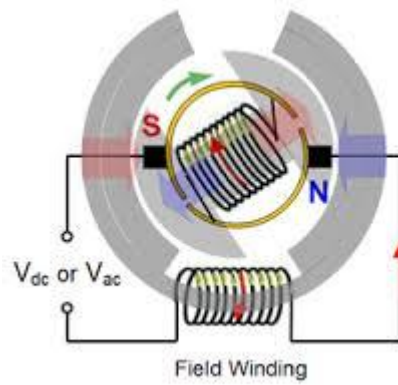


Figura 18 - Esquema de um motor Universal

O funcionamento é o mesmo dos motores CC, visto estarem em série a bobine e o estator faz com que a corrente seja a mesma.

Estes motores são adequados para aplicações que necessitem de velocidades constante e são utilizados em situações em que é necessário um bom binário e baixo peso, como por exemplo, ferramentas portáteis.



## 4. CONTROLO DA CONDIÇÃO

A fiabilidade de um equipamento é um requisito de projeto, que se deve manter durante todo o ciclo de vida e um conceito estatístico que traduz a confiança com que um equipamento irá operar sem que ocorram falhas. É ótimo para decisões gerais, por exemplo, a redundância que deveremos ter a um determinado sistema e muito utilizada na definição de intervalo de intervenção em manutenção preventiva sistemática. Apresenta alguma vulnerabilidade estatística a ocorrências fora do comum o que é prejudicial num curto espaço de tempo. Tal como foi referido em capítulos anteriores manutenção está em constante evolução e para cobrir a zona cinzenta deixada pela fiabilidade chegamos ao controlo da condição (Manutenção preditiva). Cujo objetivo é monitorização do estado de um equipamento e diagnóstico de avarias.

As vantagens são detetar danos (avarias) em fase embrionária, monitorizar a sua progressão de degradação com o intuito de estimar o tempo até ocorrer a falha, podendo assim escolher o momento mais adequado para intervir no equipamento.

Este tipo de manutenção também está de acordo com a filosofia Lean, em que produzir para *stock* é um grande desperdício, por se perder tempo, empatar recursos humanos, materiais e monetários sem proveito. De maneira análoga, quando numa manutenção preventiva sistemática se verifica que o componente ainda teria um longo período de utilização antes da necessidade de substituição, é desperdício. Em controlo da condição isto seria evitado, tal como o nome indica só há intervenção se o componente estiver num estado que se justifique.

Este tipo de manutenção também permite saber se as intervenções efetuadas deixaram o equipamento na qualidade (condição) satisfatória ou previsível, ou seja, controlo da qualidade.

O controlo da condição baseia-se em várias tecnologias de acordo com o melhor método para cada equipamento e o disponível na organização. Convém frisar que as diferentes tecnologias não concorrem entre si mas complementam-se. As mais utilizadas são:

- Análise de vibrações;
- Termografia;
- Análise de parâmetros de rendimento;
- Inspeção visual;
- Análise ultras sónica;
- Análise de parâmetros processuais;
- Análise correntes elétricas (utilizada em máquinas rotativas elétricas);
- Análise de Lubrificantes;
- Espectrometria.

Das tecnologias acima muitas delas baseiam-se na medição de ondas eletromagnéticas a diferentes frequências.

## Implementação

Apesar da definição do objetivo do Controlo da condição ter sido definido numa frase, em parágrafo anterior, a sua implementação têm quatro passos para ser bem-sucedida, conseguindo-se assim os seguintes benefícios:

- Redução das falhas dos equipamentos;
- Redução da probabilidade das avarias catastróficas;
- Aumento da produção devido ao aumento da disponibilidade dos equipamentos;
- Controlo da qualidade das intervenções, logo um incremento para melhoria destas e de quem as executa (trabalhador dos quadros ou de empresas subcontratadas);
- Diminuição de *stocks* necessários a intervenção;
- Melhoria nas condições de segurança do pessoal e instalações devido à diminuição das falhas catastróficas

As etapas são:

1. Estudar a instalação
2. Selecionar máquinas
3. Selecionar técnicas
4. Estabelecer o sistema

A primeira etapa: Estudar a instalação, é aqui que os parâmetros a definir podem encorajar a implementação ou verificar que os custos são inferiores aos proveitos, por exemplo, quando existem poucos equipamentos e estes têm bastantes redundâncias pode não ser vantajoso. Os parâmetros são:

- Segurança de pessoal;
- Segurança do material e instalações;
- Segurança ambiental;
- Disponibilidade da instalação;
- Fiabilidade dos sistemas e máquinas;
- Manutibilidade dos equipamentos;
- Viabilidade económica (retorno do investimento, poupanças e etc.);
- Legislação e seguros.

Segunda etapa: Selecionar as máquinas tendo sempre em vista que o número destas deve ser reduzido para facilitar o arranque do sistema e o conhecimento adquirido. De acordo com a etapa anterior os equipamentos selecionados devem ser aqueles que ponham em risco a segurança das pessoas, material, instalações e ambiente. De seguida os bens críticos na produção, sem esquecer os equipamentos ou subequipamentos que acarretam elevados custos nas intervenções, por exemplo, nos casos em que seja necessário subcontratar uma grua de grande tonelagem para reparar avarias. Resumindo,

tirando a segurança das pessoas (que não tem preço) deve-se avaliar sempre os custos diretos e indiretos da manutenção.

Terceira etapa: Selecionar técnicas, para isso, os equipamentos selecionados devem de ser determinados:

- Modos de falha das máquinas;
- A determinação das relações custo/eficácia para cada técnica ou combinações de técnicas
- A seleção de uma técnica principal

De acordo com o modo de falha de cada máquina procura-se as técnicas que a detetam mais cedo. Por exemplo, a combinação de várias técnicas (vibrações, parâmetros processuais, inspeção visual, termografia, análises de óleos...) deve-se ter em conta que, quanto mais forem usadas, maior será o investimento, na aquisição de equipamentos e formação dos operadores ou caso seja mais vantajoso a subcontratação de especialistas.

Se houver necessidade na aquisição de equipamentos estes devem permitir a aquisição automatizada de dados, pode ser *online* ou realizada por um operador.

As técnicas devem de ser integradas, cada técnica contribui, com pesos adequados, para a mesma base de dados e deverá permitir a fácil e rápida definição de percursos, a análise de tendência e elaboração automática de relatórios

Quarta etapa: Estabelecer o programa

Um programa de manutenção condicionada não pode ser considerado isoladamente. A avaliação de estado de uma máquina não se pode basear só nas medições resultantes da implementação de determinadas técnicas de controlo de condição, sob pena de se cometerem erros enormes. Na verdade, o historial de manutenção da máquina (relatórios de reparações e manutenções preventivas sistemáticas, registos de funcionamento, relatórios da produção, etc.), a informação disponível do fabricante e muitos outros fatores influenciam a decisão, ou seja, a manutenção integrada.

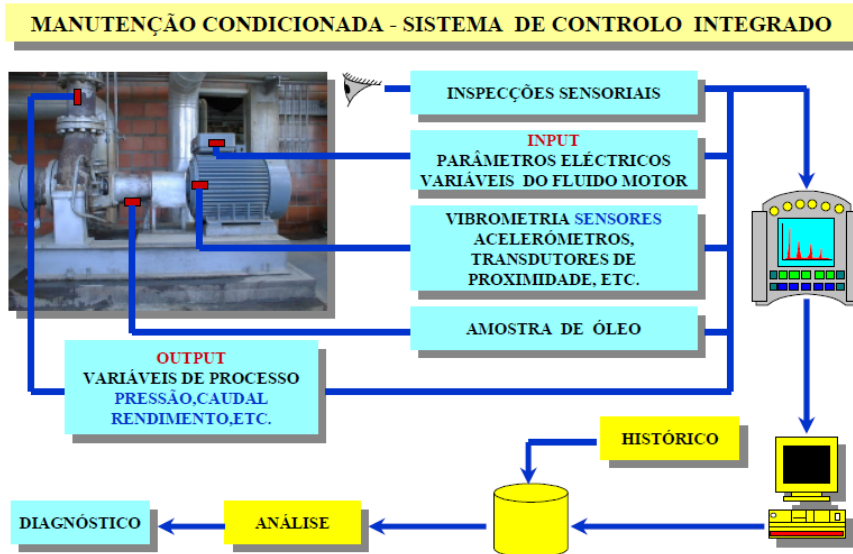


Figura 19 - Manutenção integrada [15]

Este passo não é mais que a organização da informação, planeamento e controlo da manutenção. Entre outros abaixo definidos.

- Estrutura de funcionamento: Diagrama de gestão da manutenção em que está definida a hierarquia de decisão, o processo desde a deteção do dano até a sua reparação, bem como os documentos envolvidos;
- Planeamento: Definição dos trabalhos a executar;
- Execução: Quem executa e que recursos são necessários, de acordo com planeamento, preparação e programação;
- Controlo: Registos dos custos, mão-de-obra, materiais utilizados e observações.

O sucesso de um programa de manutenção condicionada depende dos seguintes fatores:

Organização da Manutenção, documentação, conhecimento das máquinas e sistemas controlados, monitorização de parâmetros chave, indicadores de alterações na condição das máquinas, critérios de severidade, meios humanos e técnicos.


SOM / SMP		FIT:	
<b>FICHA DE TRABALHO</b>		VERSÃO:	ESTADO:
		PÁG. 1 de 3	
EQUIPAMENTO/ CONJUNTO: Marca/Modelo/nº serie: SIMPE3FAIP/ 5310.139/010220886/ Rolos			
TÍTULO: Ajustar as correntes dos rolos		TIPO MANUTENÇÃO:	Preditiva
		PERIODICIDADE (m):	M
		MANUTENÇÃO RELACIONADA (n):	
ELEMENTOS ADICIONAIS: FREM: LIMS:		EXECUTANTE (n):	H x h Cabo 1.5
DOCUMENTAÇÃO DE REFERÊNCIA: (Manuais/ Desenhos/ Etc.)		TOTAL:	
		TEMPO EXECUÇÃO:	1 Hora
RISCOS E PRECAUÇÕES DE SEGURANÇA: Usar luvas			
EQUIPAMENTOS DE TESTE, FERRAMENTAS, SOBRESSALENTES E MATERIAL DE CONSUMO: Alavanca (1); Chaves caixa 13 e 19; Chaves de boca nº17 aumento para chaves de caixa; Aspirador; Chaves de umbralque nº 5; vassoura "pequena"			
PROCEDIMENTO: 1- Remover as tampas, uma do centro e duas que circunscrevem os rolos  2- Remover a sujidade possível, principalmente areias em componentes com movimento.			
FIT:	ELABORAÇÃO:	HOMOLOGAÇÃO:	DATA:

Figura 20 - Exemplo de uma ficha de trabalho (FIT)

Um documento de manutenção bem elaborado é um bom passo para uma intervenção bem executada, na Figura 20 encontra-se um exemplo de uma ficha de trabalho (FIT) em que apresenta campos tais como: código de identificação do documento, título, executante, periodicidade, local de execução, tipo de manutenção, documentos adicionais, documentos de referência, material necessário à execução, precauções (riscos) e os procedimentos.

## 4.1 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

As vibrações são usadas em diversos tipos de trabalhos, tais como, alimentadores, peneiros, teste às resistências das montagens aos fenómenos vibratórios e etc. Neste item serão abordadas como uma ferramenta de manutenção de equipamentos.

### 4.1.1 Fundamentos teóricos

A vibração é o movimento de um ponto ou sistema oscilando em torno de uma posição de referência em equilíbrio estático.

Na generalidade as vibrações nos equipamentos devem-se aos efeitos dinâmicos das tolerâncias construtivas, folgas, rolamentos, atritos, desequilíbrios (mesmo dentro das tolerâncias), forças exteriores desequilibradas, muito comum em máquinas rotativas. Ou seja, estas resultam de não haver materiais ou montagens teoricamente perfeitas, por isso, na prática existe uma elevadíssima dificuldade em eliminá-las. Também são

frequentes vibrações insignificantes excitarem ressonâncias de estruturas (ou outros componentes maiores) e serem amplificadas.

Têm como objetivo de estudo da vibração:

- Compreensão do fenómeno, identificar as propriedades dinâmicas;
- Análise da vibração deteção e diagnóstico;
- Solucionar os problemas, absorção de equilíbrio etc;
- Previsão do comportamento dos sistemas dinâmicos.

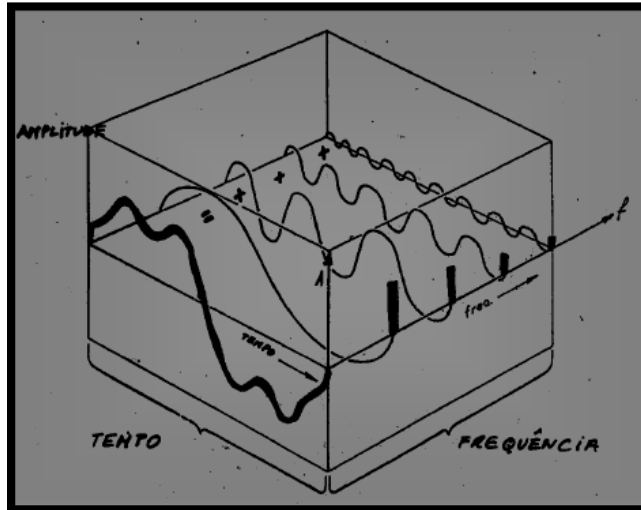


Figura 21 - Representação e analogia entre uma vibração no domínio do tempo e frequência [16]

A Figura 21 é uma imagem clássica e uma excelente representação de um sinal vibratório. Nela pode-se observar que um sinal não é mais que a soma das harmónicas e como se representa um espectro de frequências (EF).

Harmónica é a vibração mais simples que podemos ter e caracteriza-se pela seguinte expressão:

$$(3) x(t) = X \cos(2\pi f * t + \alpha)$$

$$(4) f = \frac{1}{T}$$

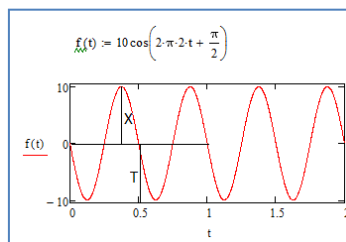


Figura 22 – Representação gráfica de uma harmónica e da sua expressão no tempo

X - É a amplitude de pico da onda

T - É o período da onda, ou seja, o tempo que esta demora a fazer um ciclo completo

F - É o inverso do período

$\alpha$  - É a fase

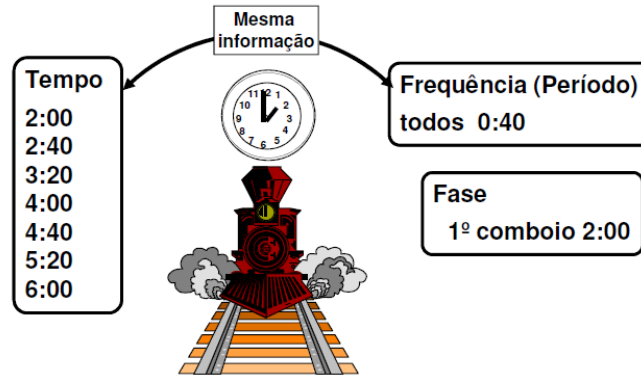


Figura 23 - Analogia para identificação de uma vibração [16]

A amplitude, a frequência e a fase definem uma harmónica, a Figura 23 ajuda a fazer uma analogia para uma melhor interiorização do significado das componentes que definem uma harmónica. Derivando pode-se ter a aceleração e a velocidade:

$$(5) \dot{x}(t) = 2\pi f * X \cos\left(2\pi f t + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) = \dot{X} \cos(2\pi f t + \dot{\alpha})$$

$$\ddot{x}(t) = (2\pi f)^2 * X \cos\left(2\pi f t + \alpha + \pi\right) = 2\pi f * \dot{X} \cos\left(2\pi f t + \dot{\alpha} + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$= \ddot{X} \cos(2\pi f t + \ddot{\alpha})$$

Representação vetorial de uma harmónica, ou seja, um vetor rotativo no plano de Argand:

$$(6) x(t) = X e^{j(\omega t + \alpha)}$$

Neste momento é oportuno referir o conceito de energia, em que duas harmónicas que apenas diferem na amplitude, a que têm maior amplitude é a que têm maior nível energético, da mesma maneira que se a diferença for na frequência aquela em que esta for maior é a que têm mais energia. Uma maneira de traduzir a energia é através do seu valor eficaz (Nível global é um exemplo).

Esta noção é importante porque na monitorização devemos-nos preocupar com parâmetros e/ou harmónicas que apresentem maior nível de energia.

#### 4.1.1.1 Elementos das vibrações e classificação quanto à presença de excitação

Existem três elementos bases que compõem um sistema vibratório, são eles a massa ou a inércia, a mola que representa a rigidez e o amortecedor responsável pela dissipação de energia. Na realidade estes elementos fazem parte das propriedades físicas dos materiais, são uns dos responsáveis de o aço ter um comportamento diferente da borracha.

Para simplificação iremos considerar um sistema de um grau de liberdade.

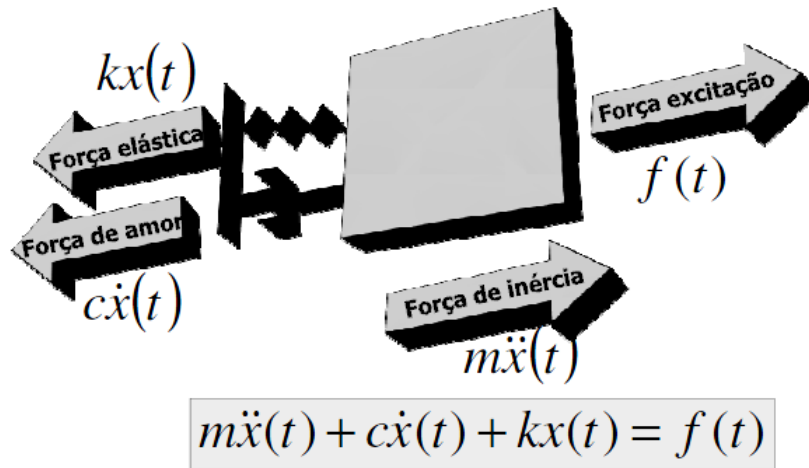


Figura 24 - Diagrama de corpo livre de um grau de liberdade [16]

Na Figura 24 que representa o diagrama de corpo livre de um grau de liberdade, a equação é igual a  $f(t)$ , que representa uma força variável no tempo, se o seu valor for zero então representa uma vibração livre, se for diferente de zero representa vibração forçada. A frequência da vibração livre denomina-se por frequência natural e só depende das propriedades do sistema, uma vez que se subordinam aos valores dos seus elementos (inércia, rigidez e amortecimento). Ou seja classifica-se de vibração livre se o sistema estiver a vibrar em frequência natural e vibração forçada se houver força de excitação.

A expressão da frequência natural:

$$(7) F_n = \frac{\sqrt{\frac{k}{m}}}{2\pi}$$

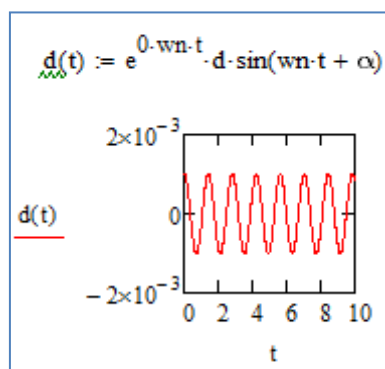


Figura 25 – Vibração natural sem amortecimento e a sua expressão

Na Figura 25 pode-se verificar que o gráfico é uma harmónica perfeita e na expressão o coeficiente de amortecimento foi substituído por zero e em que  $\omega_n$  é a frequência natural em radianos por segundos.

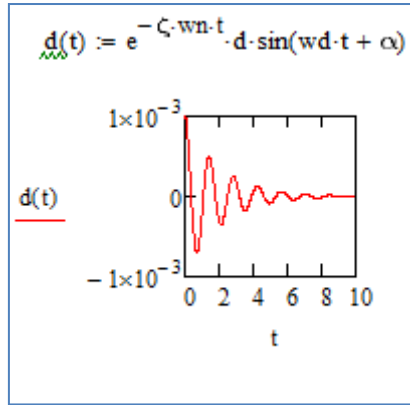


Figura 26 - Vibração natural c/amortecimento e a sua expressão

Da Figura 25 para a Figura 26 adicionou-se o fator de amortecimento e a frequência natural passou a ser amortecida. Tanto para a vibração livre como para a forçada a presença de amortecimento têm três situações distintas.

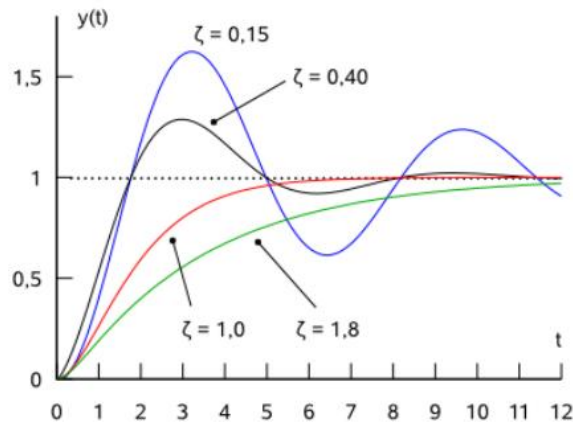


Figura 27 - Tipos de amortecimento

- Subamortecido – “fator de amortecimento”  $\zeta$  é inferior a um.
- Criticamente amortecido – a mola e o amortecedor equilibram-se, sistema tende para uma zona estacionária sem a ultrapassar (linha de referência), neste caso o “1”  $\zeta=1$
- Sobre amortecido existe a predominância do amortecedor, sistema tende para uma zona estacionária sem a ultrapassar, mas num tempo maior que o criticamente amortecido  $\zeta > 1$ , tal como indica na Figura 27 a verde.
- Ressonância - Dá-se quando uma vibração interna ou externa for igual à frequência de ressonância, que em sistemas teóricos pode ser a  $\omega_n$  mas em sistemas reais é a frequência natural amortecida, esta tem de ser evitada.

#### 4.1.1.2 Tipos de vibrações



- Estacionárias ou contínuas: Duram mais que o intervalo de tempo da aquisição, ou seja são constantes e quando se faz uma aquisição apenas se recolhe amostra, são as mais usuais em máquinas rotativas. Estas dividem-se em aleatórias e determinísticas.
- Aleatórias: Que têm por base fenómenos estocásticos quando somente as médias estatísticas (Média, variância, correlação) são constantes, exemplo deste tipo de vibração são as cavitações em máquinas hidráulicas.
- Determinista: Quando é previsível a posição de um ponto para os vários instantes de tempo, ou seja, a cada ciclo dá-se a repetição dos fenómenos. Estas podem ser periódicas ou quase periódicas. No caso de serem periódicas, todas estas frequências discretas são múltiplas de determinada frequência fundamental. Nos sinais "quase periódicos", as frequências das diferentes sinusoides não se relacionam harmonicamente.
- Sinais não estacionários: Significam que apresentam descontinuidade no tempo. Podem ser contínuas quando variam constantemente no tempo, por exemplo, a fala, ou transientes em que têm uma duração muito curta, por exemplo, o arranque de uma máquina ou um choque.

#### 4.1.2 Medições

Medir é obter valores e comparar, esta é parte integrante da cadeia de deteção e diagnóstico.

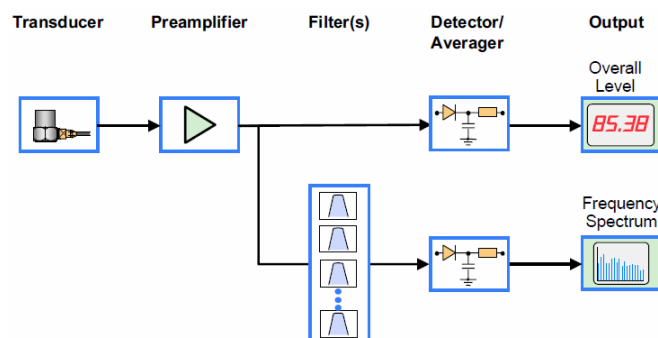


Figura 28 - Cadeia de aquisição [17]

Convém lembrar que a cadeia nunca é mais forte que a sua ligação mais fraca [17]. Há grandes diferenças entre as medições para deteção de avaria e de diagnóstico. Por exemplo o estado da máquina pode ser controlado por um indicador que dê uma “imagem” geral (vantagens e desvantagens são analisadas à frente), enquanto no diagnóstico há necessidade recorrer a várias técnicas.

#### Parâmetros de medida

As vibrações podem ser medidas em deslocamento [mm], a velocidade [mm/s], aceleração [ $m/s^2$ ] ou [g]. Vejamos a importância da escolha da unidade de medida, como regra prática nas baixas frequências mede-se em deslocamentos, nas médias em velocidades e nas altas em aceleração.

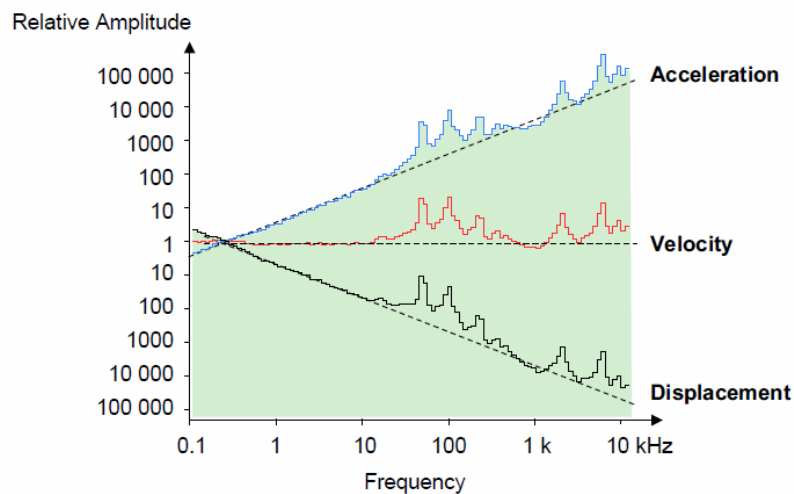


Figura 29 - Relação entre as unidades de medida e a frequência [17]

A Figura 29 demonstra de uma forma simples a importância da escolha dos transdutores. Os deslocamentos utilizam-se quando as frequências são baixas e existe uma grande amplitude, se forem utilizados em altas frequências as amplitudes normalmente são pequenas, devido à energia, estas ainda as reduzem mais, de tal forma que podem ficar submersas em ruído. Por sua vez a aceleração é ideal para medir em altas frequências, uma vez que amplia as amplitudes. A velocidade dá igual peso as baixas e altas frequências.

Com a evolução dos transdutores, conhecimento dos padrões de avaria a altas frequências e os equipamentos de recolha abrangerem uma gama de frequências até aos ultrassons, os acelerómetros são muitas vezes utilizados para medições em toda a gama.

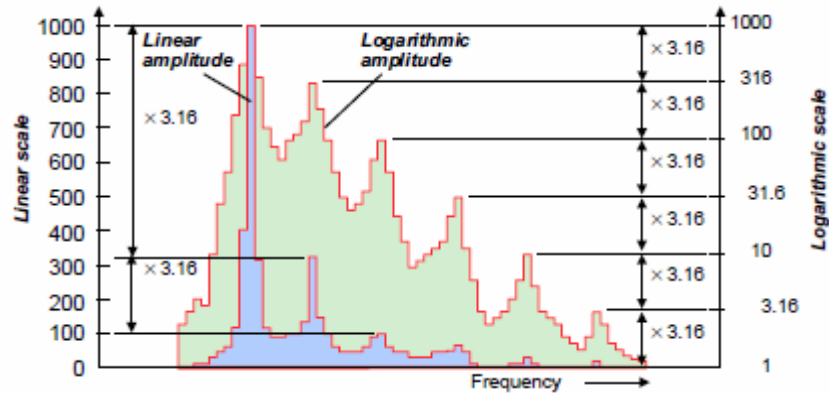


Figura 30 - Escala linear versus logarítmica [17]

De maneira geral a base logarítmica relativiza as amplitudes, cujo o demonstra a Figura 30. Isto é muito importante na análise porque existem padrões de diagnóstico em que as amplitudes são pequenas e se estiverem na escala linear podem passar despercebidas, mas na base logarítmica são perceptíveis. Não pondo em causa que a escala real nos dá uma melhor perceção da realidade isto porque uma pequena variação na base logarítmica pode ser uma grande variação na base real.

$$dB = 10 \log\left(\frac{X}{10^{-12}}\right) \quad dB = 10 \log\left(\frac{\dot{X}}{10^{-9}}\right) \quad dB = 10 \log\left(\frac{\ddot{X}}{10^{-6}}\right)$$

$X$  – deslocação     $\dot{X}$  – velocidade     $\ddot{X}$  – aceleração

Figura 31 - Equações para converter base linear para logarítmica

As fórmulas acima servem para converter as amplitudes da base linear para a base logarítmica.

#### 4.1.2.1 Detecção

As medições neste item devem de ser periódicas, rápidas, precisas e standardizadas, também para não ser um processo oneroso. Como tal, antes da colocação do transdutor, há aspetos gerais da medição a considerar, tal como utilizar sempre o mesmo acelerómetro, medir sempre no mesmo ponto, não comparar valores obtidos em condições de leitura diferentes. Resumindo o processo de deteção é aquisição, tratamento estatístico e comparação.

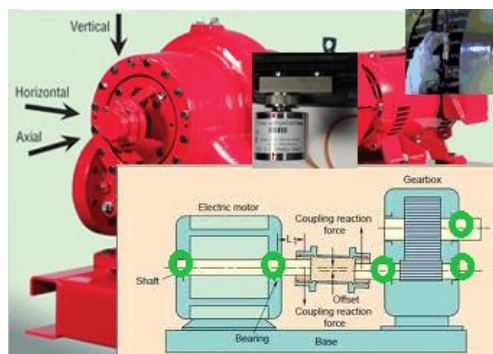


Figura 32 - Exemplo de pontos e direções a medir [18]

A Figura 32 representa numa só imagem o exemplo de a verde, os locais a adquirir o sinal que devem de ser predefinidos de acordo com cada tipo de máquina. Em cada local devem de estar três pontos (áreas), por exemplo, numa chumaceira os três pontos são a medição na horizontal, vertical e Axial. As áreas para colocação do transdutor devem de ser distintas e obedecer a regras, tais como, as indicadas no Item 4.1.3 Sensores. A aquisição deve de ser feita com a mesma carga e a mesma velocidade, quanto à recolha, esta pode ser feita *online* ou necessitar de meios humanos.

Um obstáculo na aquisição são as interferências (ruído) que outros equipamentos induzem, para evitar esta situação normalmente são feitas várias aquisições e o sinal no tempo que obtemos é a média “no tempo”. Nesta fase de deteção faz-se entre 4 a 21 médias, e o valor é escolhido por questões económicas, por exemplo, se houver necessidade de recolher 400 sinais e se perder mais 30s em cada um seria muito tempo, logo aumenta os custos.

A próxima fase que é a comparação, em que o sinal adquirido é comparado com um de referência. Se o valor do sinal de alerta ou perigo, ou seja, a referência, não está bem definida, seja por excesso ou por diferença, têm-se falsos alarmes que podem ter consequências graves. Basta imaginar o que aconteceria a uma empresa tipo Autoeuropa, se o responsável pela manutenção mandar parar a linha e depois verificar que o dano induzido aguentaria até uma paragem já pré-determinada (excesso), ou se a linha parasse por avaria (diferença) de um equipamento monitorado. Os valores de referência podem ser comparados com três tipos:

Normas, por exemplo ISO 10816:

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816						
	Machine		Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
	in/s	mm/s				
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28				
	0.02	0.45				
	0.03	0.71			good	
	0.04	1.12				
	0.07	1.80				
	0.11	2.80		satisfactory		
	0.18	4.50				
	0.28	7.10		unsatisfactory		
	0.44	11.2				
	0.70	18.0				
	0.71	28.0		unacceptable		
1.10	45.0					

Figura 33 - Severidade em vibrações segundo a norma ISO 10816

Em que de acordo com o nosso tipo de equipamento podemos saber qual o seu estado, mas atenção porque os valores das normas são retirados em condições diferentes das que existem na maioria das empresas.

Histórico: Estes serão os alarmes mais fidedignos visto basearem-se no conhecimento que dispomos sobre o equipamento, quanto mais longo for o registo temporal de aquisições, melhor se percecionam as alterações.

Equipamentos semelhantes: São menos fidedignos que no caso anterior, mas se a comparação for feita com outros equipamentos mas dentro das mesmas instalações, é mais fácil estar-se sensível para diferenças das condições entre equipamentos. Caso seja com equipamentos exteriores às instalações deve-se estar atento por as condições poderem apresentar diferenças.

Normalmente utilizam-se dois níveis em que o primeiro é o de alerta e o segundo é o de perigo. O de alerta é cerca de 2,5 vezes maior que a referência de normal e o perigo é cerca de 10 vezes. Estes valores são empíricos e de boas práticas, ou seja, não são regra, o que leva diferentes organismos a adotar valores baseados em históricos e podem ser alterados de acordo com as opções do utilizador.

#### 4.1.2.2 Diagnóstico

Enquanto na deteção deve-se perder o menor tempo possível, no diagnóstico o objetivo é a resposta às seguintes questões: Onde está o dano? De que tipo é? Qual a sua gravidade? Quanto tempo se dispõe até se dar a avaria? Aqui é necessária especialidade, uma vez que se baseia numa vasta manipulação de dados e utilização de meios complementares que podem ser outras tecnologias. É normal nesta fase também se utilizarem parâmetros que serviram para a deteção.

#### 4.1.3 Sensores

Os sensores fazem parte dos transdutores, sensor é o recetor do estímulo físico de entrada e responde com um sinal elétrico possuindo uma relação conhecida com a primeira. Enquanto um transdutor é um dispositivo que converte energia de entrada em energia de saída. Daqui em diante irá ser designado apenas por “sensor”.

Estes elementos são os que efetivamente estão ligados à máquina, onde se pretende saber a sua condição, são os responsáveis pela aquisição do sinal. Logo a sua importância é extrema, o que leva a ser necessário um grande cuidado na sua escolha. No caso das medições de vibrações estes podem ser de deslocamento, velocidade e aceleração. Dentro da velocidade estes podem ser sísmicos ou piezoelétricos.



Figura 34 - Tipo de sensores [18]

Deslocamentos: Estes sensores devem de ser usados em baixas frequências normalmente até 10hz, são sensores de não contacto e do tipo permanente uma vez que têm de ser calibrados no local. Uma das desvantagens é serem sensíveis a irregularidades do veio.

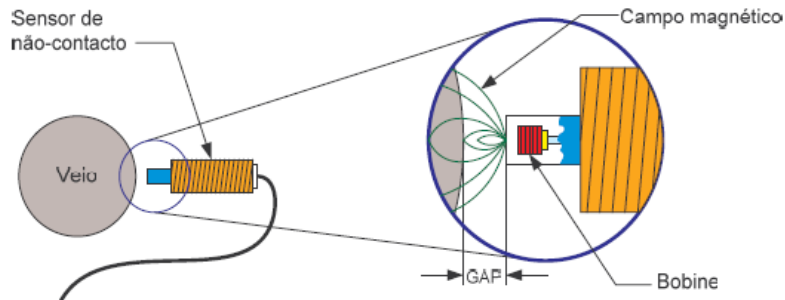


Figura 35 - Demonstração do funcionamento de um sensor de deslocamento [18]

Velocidade: Estes sensores são utilizados numa banda de frequência que pode ir desde dos 10hz até 1Khz

Materiais Piezoelétrico têm a capacidade de converter energia mecânica em energia elétrica e vice-versa. [19] Ou seja, quando é submetido a uma tensão (Tração ou compressão) apresenta aos seus terminais uma tensão elétrica equivalente.

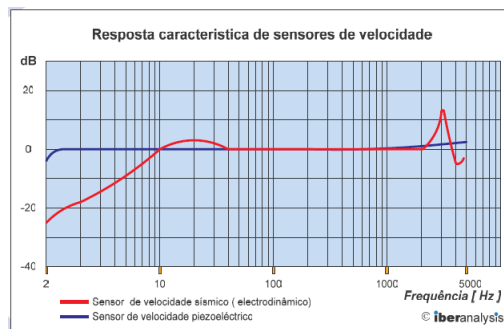


Figura 36 - Característica da resposta dos sensores de velocidade Iberanalysis

Como se pode observar os sensores piezoelétricos têm uma resposta mais linear dentro das frequências medidas em velocidade.

Aceleração: A gama de frequência acima de 1Khz

Os parâmetros de medida de vibração estão relacionados entre si, podem ser obtidos a partir uns dos outros. No entanto, a variação na amplitude de vibração com a velocidade da máquina, a par de limitações intrínsecas a cada tipo de sensor, muitas vezes significa que só um dos parâmetros fornecerá a informação necessária à análise.

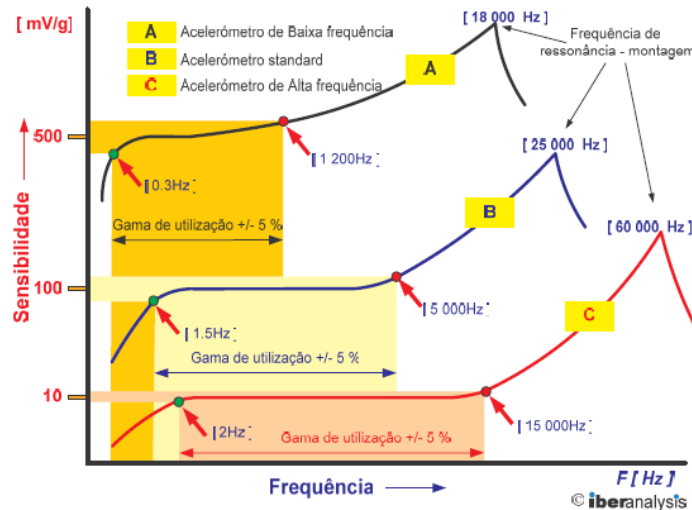


Figura 37 - Resposta de acelerómetros com sensibilidades diferentes Iberanalysis

Na escolha dos sensores em geral, apesar do exemplo ser dado com acelerómetros deve-se ter em atenção as seguintes características:

**Sensibilidade:** De um modo genérico, a sensibilidade de um instrumento de medição é o quociente da variação da resposta do instrumento de medição, pela variação correspondente ao estímulo. Corresponde à razão entre o incremento da leitura (saída) e o incremento da variável que o originou (entrada). E quanto maior for este parâmetro melhor, ou seja, pequenas variações no sinal medido (entrada) irão ocorrer grandes variações.

Nos acelerómetros de vibrações a linha anterior também se aplica mas como está relacionado com a frequência, temos de seleccionar de acordo com o sinal previsto de saída.

**Linearidade:** O termo linearidade descreve o máximo desvio da curva em relação a regressão linear. A Figura 37 representa a linearidade dos acelerómetros face à frequência, tal como, na sensibilidade, quando alargamos a gama de frequências perdemos algo, neste caso, a resposta linear. O significado do limite dos 5% é a frequência onde ocorrerá um desvio de 5% entre o valor medido e o nível de vibração efetivamente existente aplicado à base do sensor. Esta frequência corresponde a aproximadamente 1/5 (0.22) da frequência de ressonância de montagem do sensor.

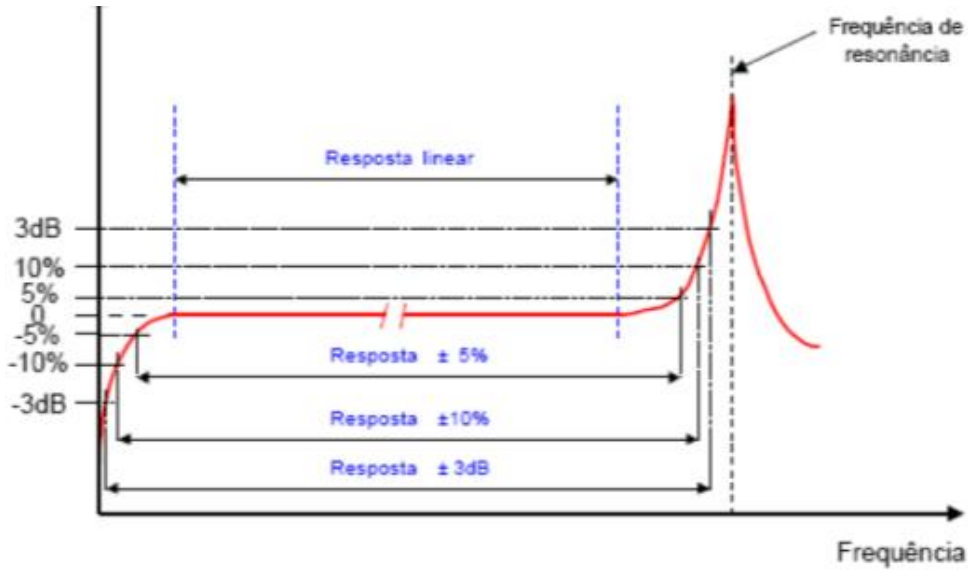


Figura 38 - Desvio da sensibilidade versus frequência [17]

No caso da sensibilidade e linearidade é válido para todos os sensores.

#### 4.1.3.1 Método de fixação

A ligação dos sensores às máquinas, que mais uma vez utilizaremos como exemplo, o acelerómetro, do mesmo tipo dos de velocidade e apenas difere para os de deslocamento. A fixação pode ser de 4 tipos:

- Fixação por perno roscado;
- Por colagem;
- Por base magnética;
- Por utilização de ponteira.

Os métodos escolhidos têm como consequências, a redução da frequência de ressonância do conjunto (fixação mais acelerómetro).

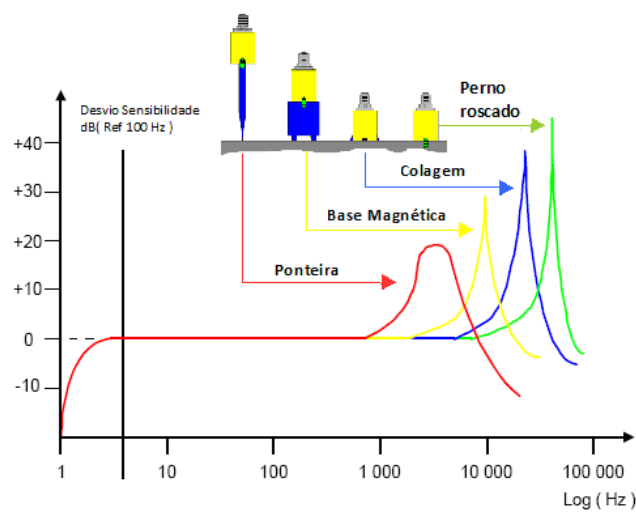


Figura 39 - Frequência em função da fixação [17]

Segundo a Figura 39 o melhor método de fixação para medir é o que utiliza o perno roscado, a ser evitado temos a ponteira. Mas, mais uma vez, a escolha também irá depender do equipamento, ou dos conjuntos de equipamentos a medir.

#### 4.1.3.2 Influência de fatores externos [17]

Acelerómetros modernos e seus cabos são projetados para ter uma sensibilidade mínima às muitas influências externas descritas na Figura 40.

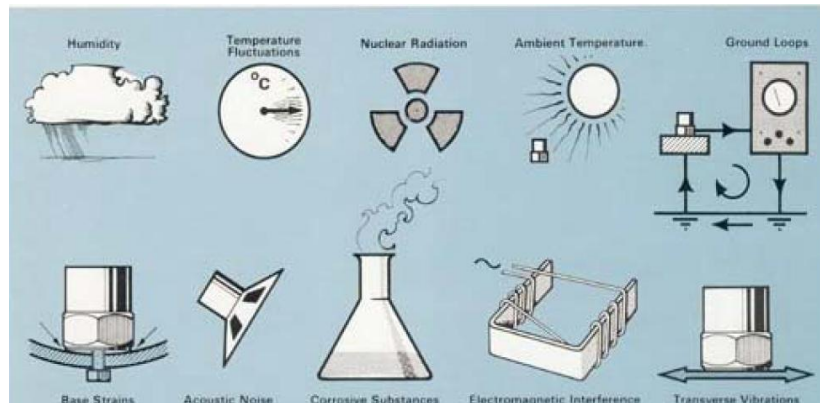


Figura 40 - Fatores influenciadores da aquisição dos sensores Brüel & Kjær

A Figura 40 tem várias ilustrações dos fatores mais comuns que podem influenciar as medidas. Para a montagem do acelerómetro devemos de ter em conta os seguintes aspetos:

- Temperatura: Na sua generalidade os acelerómetros suportam temperaturas superiores a 250 graus, mas caso se preveja que a temperatura é acima deste valor deve-se optar por sensores preparados para temperaturas mais elevadas ou colocar uma mica isoladora. À medida que a temperatura aumenta a cerâmica piezoelétrica começa a despolarizar.
- Ligação a terra: As correntes elétricas podem percorrer o acelerómetro e provocar ligações à terra mas estas também podem ser cessadas se recorrermos a uma mica.
- Ruído eletromagnético: Normalmente é induzido por máquinas elétricas na vizinhança pode ser colmatado através de um cabo com dupla proteção ou em casos de severidade extrema deve-se equilibrar o acelerómetro e usar um pré-amplificador diferencial.
- Tensões na base: Se o sensor é montado numa base que está em tensão, esta vai ser induzida na medida. Deve ser evitado mas se não for possível existem bases para reduzir o efeito.

Existem outros fatores que influenciam tal como a acústica, a humidade, etc. De um modo geral, resta dizer que, os transdutores suportam estes tipos de agressões e que devemos de ter cuidado para as minimizar, mas se o ambiente for propício a que ocorram existem soluções.

#### 4.1.4 Técnicas utilizadas

As técnicas são usadas mediante as necessidades, as especificidades estão contidas na explicação de cada uma em particular, mas no geral, podem-se dividir em três partes, a deteção, o diagnóstico e as que servem para ambas.

As duas primeiras técnicas apresentadas são de deteção, a terceira e a quarta servem para ambas e as restantes são de diagnóstico.

##### 4.1.4.1 Nível global

É um valor de deteção, por ser a média dos somatórios do quadrado das amplitudes, tem pouca sensibilidade por não ser estimulado para danos localizados, por exemplo, se uma das harmónicas, que representa um determinado fenómeno (dano), aumentar três vezes a sua amplitude e o seu valor normal é muito inferior à das outras harmónicas que compõem o espectro, o NG não terá uma variação significativa mas na realidade já temos uma situação de alarme. Na Figura 41 a verde os valores normais, amarelo o nível de alerta e a vermelho o perigo.

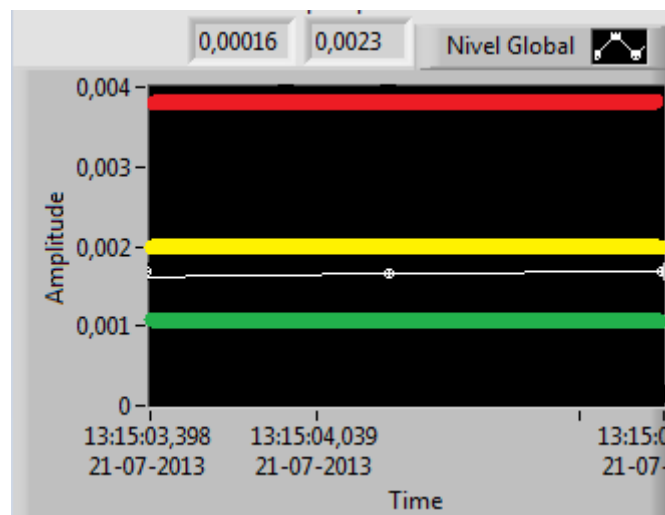


Figura 41 - Nível Global e níveis de alerta

##### 4.1.4.2 O espectro PBC (percentagem de banda constante)

É um espectro de frequência tal como a FFT, mas em que as bandas têm um espaçamento de percentagem constante, a sua largura é em função da frequência central. Este também é conhecido por espectro de oitavas em que  $1\text{oitava}=70,7\%$ ;  $1/3\text{oitava}=23,1\%$  e  $1/12\text{oitava}=6\%$ . A grande diferença entre este EF e a FFT é utilizar a base logarítmica e as bandas em função da frequência que o faz ter uma boa resolução a baixas frequências e uma grande resolução a altas frequências permitindo a observação de avarias a baixa e a alta frequência num só espectro e suporta pequenas variações de velocidade o que diminui a ocorrência de falsos alarmes [20]. Logo é mais sensível, uma vez que monitoriza por harmónica.

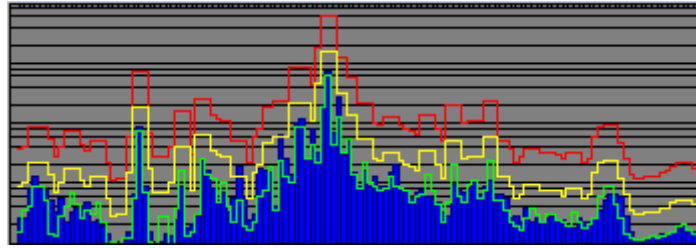


Figura 42 - Espectro PBC [15]

#### 4.1.4.3 Domínio do tempo

O sinal vibratório no tempo é um sinal puro, é nele que se inicia a deteção, mas também pode ser utilizado como auxiliar no diagnóstico. O diagnóstico neste domínio baseia-se na filtragem e na escolha da escala do tempo (longa ou curta). Para a maior parte das máquinas industriais a escala longa cobre um período de 5 a 10 segundos, este intervalo é equivalente a cerca de 50 a 100 ciclos, dependendo da frequência de interesse dominante. É usada para detetar alterações de amplitude e fase de modo a determinar se o sistema passa por frequências de ressonância e como se comporta nesses casos. A análise com escala curta contém normalmente 50 a 200 milissegundos. Esta forma de visualização permite examinar os detalhes das vibrações de interesse. [15]

Outra das técnicas onde se usa o domínio do tempo é a média no tempo, esta tal como o nome indica, resulta da recolha de vários sinais síncronos e faz-se a média, o que contribui para a redução do ruído e realçar as características da onda.

#### 4.1.4.4 Análise tendência

Esta técnica beneficiou com a evolução dos computadores, em sistemas de controlo da condição mais recentes, pode ser uma técnica de deteção mas é usada principalmente em diagnósticos. Baseia-se na amostra dos dados de parâmetros recolhidos no domínio do tempo e/ou frequência dispostos pela ordem de recolha permitindo ter a perceção da sua variação.

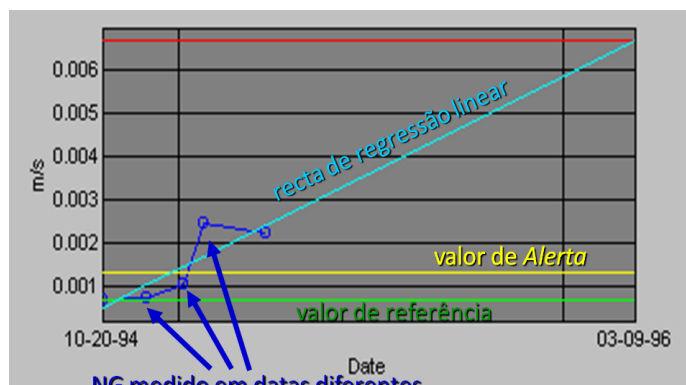


Figura 43- Tendência da variação NG [15]

Este item abre condições para se recolher mais informações das técnicas utilizadas, através de exemplos. A partir do NG, como se pode observar na Figura 43, a linha azul claro, traça a reta tendência dando a indicação da sua progressão e de acordo com esta, ou a evolução está como era esperado ou temos de passar para a fase de diagnóstico.

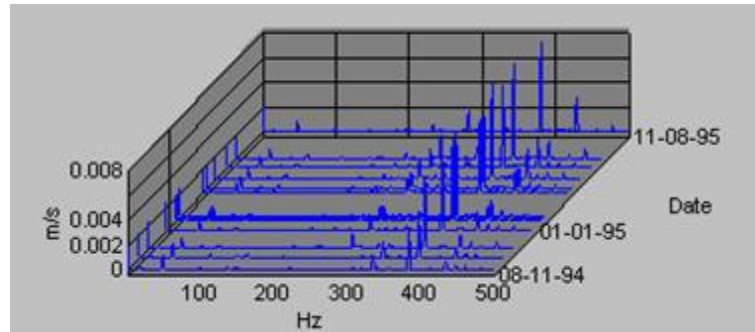


Figura 44 - Variação da EF no tempo [15]

A Figura 44 é a cascata em que podemos ter as amplitudes em função da frequência e a sua variação num espaço de tempo. No cálculo da tendência do dano, pode ser previsto o tempo que temos para intervir.

#### 4.1.4.5 Análise em frequência

É o método mais vulgar no diagnóstico em que a frequência refere-se ao local do dano e a amplitude refere-se à gravidade.

#### FFT (FFT - Fast Fourier Transform)

Análise em frequência mais popular é a FFT, que em português significa Transformada Rápida de Fourier. É um algoritmo que se baseia nas transformadas discretas de Fourier. Segundo Joseph Fourier (1768-1830), físico e matemático, qualquer função complexa, periódica ou não periódica, pode ser decomposta numa série de componentes harmónicas de diferentes frequências. Esta técnica baseia-se nas conhecidas Transformadas de Fourier.

Em que a direta serve para passar do sinal no tempo para o domínio da frequência e a inversa tal como o nome indica passa do domínio da frequência para o tempo.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

$$X_k = \frac{1}{N} \left( x_0 e^{-j\frac{2\pi 0k}{N}} + x_1 e^{-j\frac{2\pi 1k}{N}} + x_2 e^{-j\frac{2\pi 2k}{N}} + \dots + x_{N-1} e^{-j\frac{2\pi(N-1)k}{N}} \right)$$

Figura 45 - Equações da DFT

Na Figura 45 estão expostas equações apenas para demonstrar a evolução, em que no início se usa integrais e em baixo o desenvolvimento de um somatório. Ou seja, é necessário fazer N somas, mais N multiplicações, o que é demasiado quando se recolhe sinais para N superiores a 1024.

Foi então em 1965 surgiu um algoritmo, conhecido por FFT ou Fast Fourier Transform, que revolucionou o processamento do sinal digital em virtude de reduzir significativamente o tempo de processamento. Esta implementação prática do cálculo da

DFT envolve algumas manipulações matemáticas que obtêm vantagem da simetria de partes da transformada. De facto, a FFT obtém o mesmo resultado que a DFT mas com  $N \log_2 N$  multiplicações, o que para o caso típico de 1024 leituras ( $N=1024$ ) implica uma redução de 100 vezes no tempo de cálculo.

As principais características da análise FFT são [16]:

- A rapidez e eficiência de cálculo da DFT.
- O espectro de frequência é discreto e equidistante, logo o sinal no tempo é analisado em larguras de banda absolutas e constantes.
- A possibilidade de síntese. A retenção da informação sobre a fase torna possível a transformada numa e outra direção, de forma relativamente simples.
- O processamento do sinal no tempo em blocos. Cada bloco de registos é guardado em memória para posterior processamento pelo algoritmo FFT.
- O cálculo de elevado número de funções aplicáveis a medições multicanal e análise de sistema como sejam a correlação, a coerência, as funções de resposta em frequência, etc.

A FFT é talvez, ainda, a mais importante técnica isolada de análise disponível. A limitação da aplicação do algoritmo FFT é a mesma da DFT e deve-se basicamente à natureza finita e discreta do algoritmo DFT. Estas limitações podem ser resumidas em três efeitos:

- Aliasing.
- Efeitos de janela (Windows effects) ou leakage.
- Picket fence effect.

**Aliasing:** Deve-se à perda de informação contida num sinal de amostra, é necessário que a frequência de leitura ou de amostragem seja pelo menos o dobro da maior frequência de interesse contida no sinal, ou seja, a aplicação do "Nyquist-Shannon Sampling Theorem". [21]

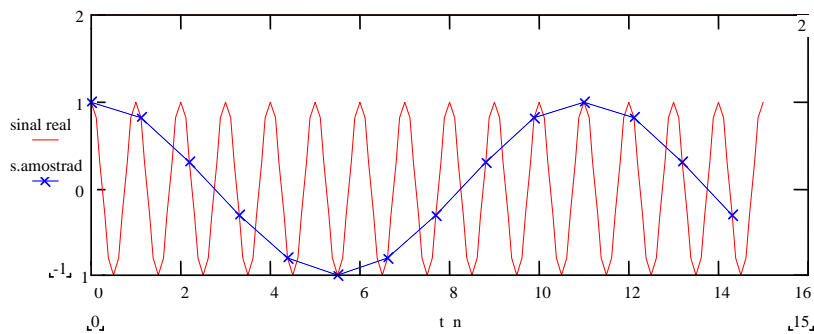


Figura 46 - Demonstração que o sinal amostrado diferente é do sinal real

Na Figura 46 o sinal real tem uma frequência de 1Hz enquanto o sinal de amostra possui 0,09hz. Logo a recolha de amostras por unidade de tempo não foi a suficiente para representar o sinal real.

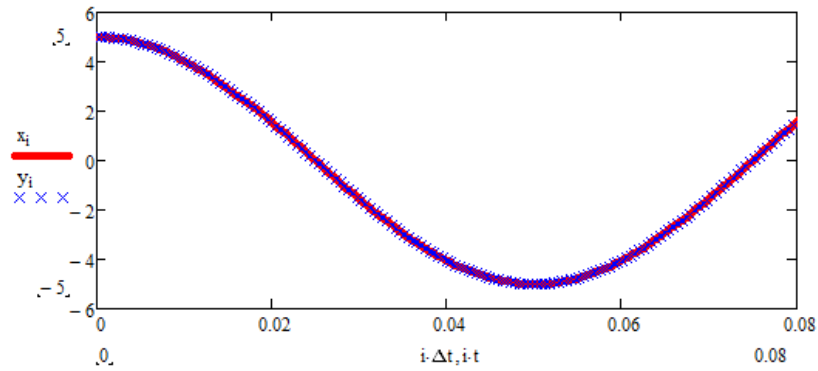


Figura 47 - Demonstração da semelhança dos sinais quando a amostragem é superior ao sinal real

Enquanto na Figura 47, considera-se “xi” o sinal real e “yi” considera-se que representa amostragem do sinal real. Este fenómeno pode trazer erros de leitura que para serem evitados a maioria dos aparelhos de leitura cortam as frequências inferiores a “frequência de amostragem” a dividir por 2,56 em vez de metade, ou seja, se amostragem é de 1024hz a máxima frequência lida é 500hz.

Nº amostras, $N$	1024	2048
Freq. máx, $f_{máx}$	500 Hz	1000 Hz
Nº linhas espectro, $N/2.56$	400	800
Resolução em frequência, $df=f_{máx}/(N/2.56)$	1.25 Hz	1.25 Hz
Período de amostragem, $T$	0.8 s	0.8 s
Frequência de amostragem, $f_a=N/T$	1280 Hz	2560 Hz
Resolução no tempo, $dt=T/N$	0.00078 s	0.00039 s

Figura 48 - Cálculo de outros parâmetros a partir da Freq max. e  $N$

Nos coletores de dados costuma-se optar por selecionar a frequência máxima e o número de amostras, tal como indica o exemplo da Figura 48.

**Efeitos de janela (Windows effects) ou leakage:** O nome efeito janela (Windows effects), Windowing surge de quando se adquire um sinal de uma máquina, é como se no momento da aquisição o nosso equipamento de recolha fosse uma janela que nos permita olhar para dentro da máquina e se a janela não tiver a “forma” adequada surgem más interpretações.

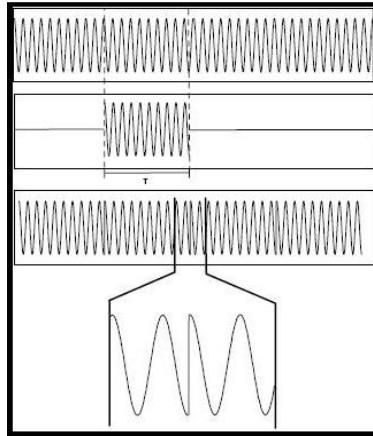


Figura 49 - Demonstração do nome dado ao erro “efeito janela” [22]

Para a FFT ser perfeita o sinal deveria de começar e acabar no mesmo ponto. Então o erro surge porque quando se retira um sinal há uma probabilidade reduzida de este coincidir com um número inteiro de ciclos e ainda diminui mais a probabilidade, devido ao facto de o sinal retirado dos equipamentos, as várias harmónicas envolvidas tem fases diferentes.

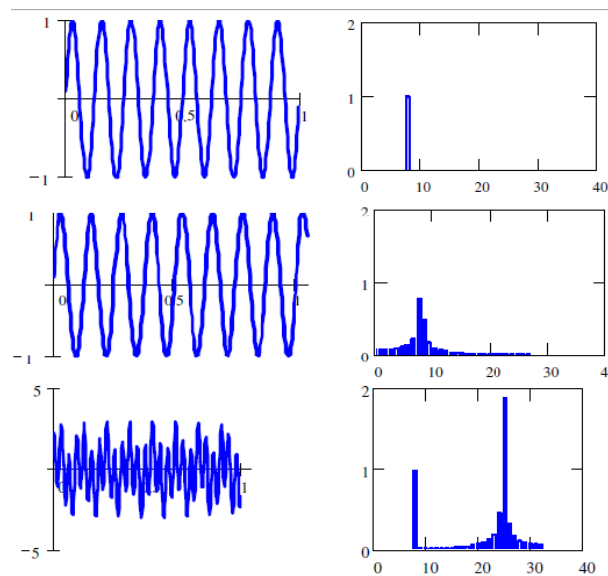


Figura 50 - Espectros no topo s/ leakage no meio têm leakage e em baixo uma harmónica sem erro [16]

A Figura 50 dá-nos uma boa demonstração do efeito deste tipo de erro, no topo a harmónica cumpre o estabelecido para não ter erro. No meio a harmónica é a mesma do topo e por comparação nota-se um esbatimento e não atinge a amplitude de 1, que seria o correto. Em baixo uma harmónica cumpre os critérios para não haver erro e a outra não, por isso o esbatimento.

No processamento de sinal, neste caso para ultrapassar as limitações da FFT, existem (os equipamentos incluem) as ferramentas normalmente chamadas de janelas. Em que a escolha da mais adequada tem de ser ponderada.

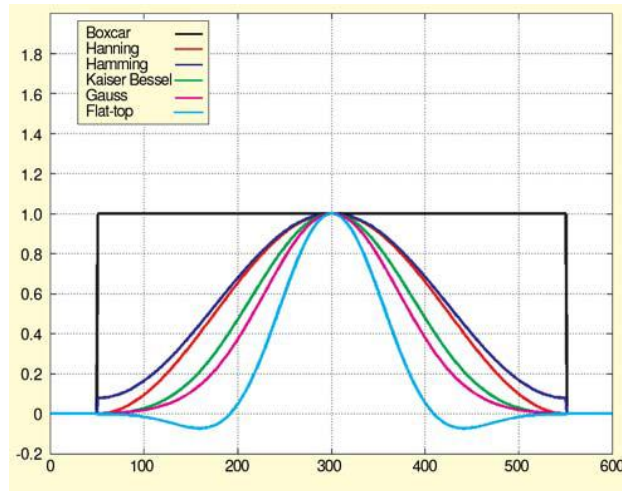


Figura 51 - Visualização dos vários tipos de janela [23]

A Figura 51 mostra seis janelas, a sua aplicação é baseada no teorema da convulsão, que de maneira resumida, é uma função que resulta da interação entre duas funções, seja no domínio do tempo ou da frequência. Precisamos de uma janela para a análise do espectro de vibração, porque o início não corresponde ao final da amostra (dados) que se está a analisar e porque raramente têm um número inteiro de períodos de qualquer informação cíclica no segmento de sinal / bloco. [23]

Analísadores FFT modernos estão equipados com uma multiplicidade de funções de ponderação, cada uma projetada para minimizar os erros de medição para uma determinada aplicação. [16] No final desta dissertação, vamos discutir duas funções básicas de janelas, retangulares e Hanning, bem como seus efeitos sobre os dados.

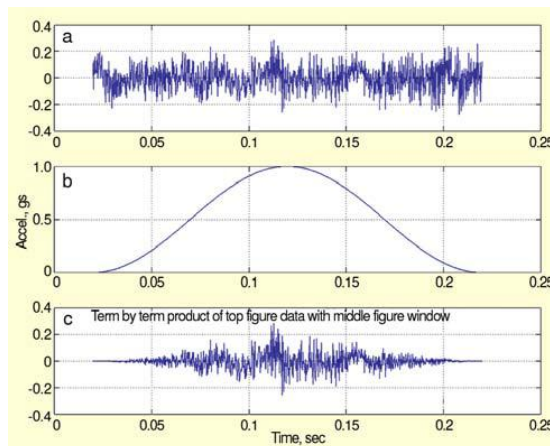


Figura 52 - Comparação entre sinal com e sem janela [23]

A Figura 52 demonstra os efeitos da aplicação de janela Hanning e o seu efeito no sinal do tempo. Sem entrar em pormenores, será apresentado o efeito prático da escolha de janelas.

No caso da utilização do martelo para verificação das frequências naturais. Se o impulso ocorre num momento próximo de zero ou afastado do centro da janela, este vai ser

completamente eliminado ou envolvido (confundido) pelo ruído, portanto não haverá dados úteis e ocorrem erros no domínio da frequência. Mesmo se o impulso ocorre no centro da janela de Hanning, a amplitude medida será superior à real. Há outras limitações associadas ao uso da janela de Hanning, tais como "peak fence effect" devido a redução na resolução. [24]

Uma boa escolha quando se trabalha com "eventos" transitórios, como o exposto, é a utilização da janela retangular (Boxcar na Figura 52), na verdade, é não aplicar nenhuma janela o que faz sentido para este tipo de sinal, como a vibração transiente que tipicamente começa e termina em zero e de amplitude finita no sinal adquirido. Não são necessárias correções de amplitude, logo utiliza-se a janela retangular, uma vez que pesa todo o sinal de maneira uniforme. [23]

**Efeito de cerca "Peak fence effect":** Como indicado anteriormente, FFT só pode produzir resultados da análise de espectros de frequências discretas:  $0, \Delta f \times 1, \Delta f \times 2, \dots, f \Delta \times N / 2$ , onde  $N$  é o tamanho da FFT e  $\Delta f = f_s / N$ .

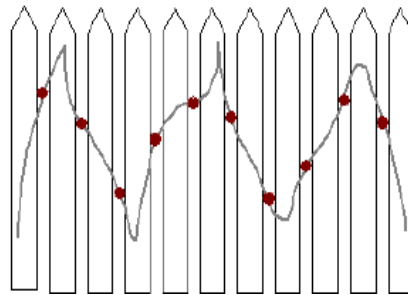


Figura 53 - Efeito de cerca

Observação do espectro da FFT da Figura 53 é análogo a observar através de uma cerca. Se um pico fica exatamente em cima de uma linha spectral FFT, então ele vai ser visto com a amplitude correta, caso contrário, a sua energia será partilhada pelas suas linhas espectrais FFT adjacentes, ou seja, o efeito do pico fica indetetável. Uma forma de reduzir o efeito cerca é a alteração do intervalo de pontos ( $N$ ) do tempo de aquisição e acrescentando zeros no final do registo original, assim mantém – se o sinal adquirido intacto. Isto altera a localização da linha do espectro FFT e desta forma, as componentes inicialmente escondidas da vista FFT podem ser desviadas para os pontos onde podem ser observadas.

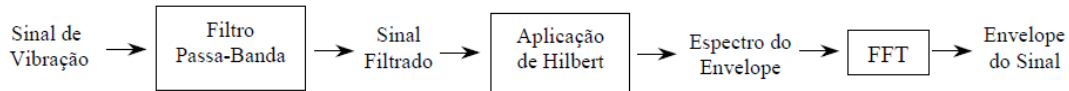
#### 4.1.4.6 Média na frequência

A média de espetros serve para atenuar ou eliminar as componentes aleatórias ou ruído presentes no sinal medido e realçar as que verdadeiramente nos interessam.

#### 4.1.4.7 Envelope

A deteção do Envelope, também referida como "desmodulação de amplitude", é uma técnica de processamento de sinal bem conhecida e usada no campo da eletrónica e das telecomunicações. Durante a década de 80, a monitorização da condição de uma máquina começou a utilizar esta técnica principalmente para deteção e diagnóstico de

defeitos em rolamentos. À medida que a tecnologia digital evoluiu e facilitou a implementação de tais técnicas a baixo custo e com instrumentos fáceis de usar em campo, a análise de envelope tornou-se uma ferramenta muito popular entre as pessoas que trabalham em manutenção. [25]



A compreensão do esquema acima pode ser exemplificada com uma das aplicações da técnica de envelope. Exemplificando o diagrama para o caso dos rolamentos observa-se o valor mais baixo e o mais alto do “ monte”, na FFT, coloca-se então um filtro passa-banda (fazemos uma nova recolha no equipamento ou passamos o sinal para o domínio do tempo, entre as frequências desejadas) de seguida desmodulasse através da função de Hilbert o sinal no tempo (ficamos com a portadora), a seguir volta-se aplicar a FFT.

#### 4.1.4.8 Cepstrum (cepstro):

O nome “cepstrum” obtém-se ao inverter a ordem das primeiras quatro letras de “spectrum”. Este método permite-nos separar os efeitos da fonte e do meio de transmissão. Se tivermos um sinal composto por duas sinusoides, uma variando lentamente no tempo e a outra rapidamente, isto é, uma de baixa frequência e a outra de alta frequência, a correspondente à baixa frequência surgirá na parte “baixa” do espectro e a correspondente à alta frequência na parte “superior”. É esta lógica que está na base da separação das variações rápidas do espectro devido à fonte das variações lentas do filtro. [26]

Isto é conseguido matematicamente como espectro de um espectro logarítmico (amplitude logarítmica e escala de frequência linear). A amplitude logarítmica contribui para a redução do ruído.

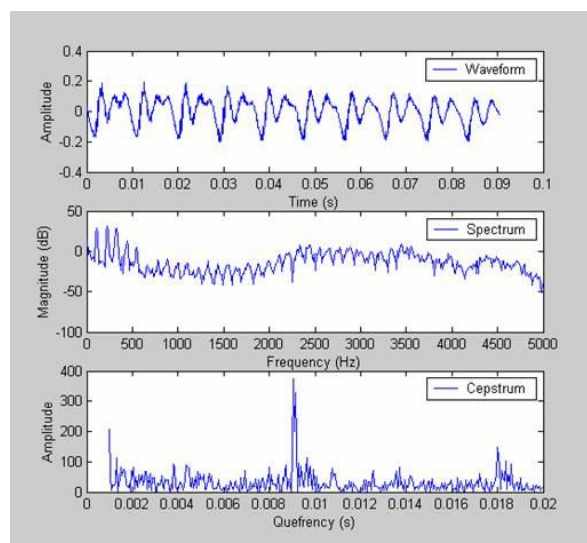


Figura 54 - Representação de cepstrum a partir do domínio do tempo

Na Figura 54 está exemplificada a função do cepstrum, ou seja, reúne uma família de harmónicas. Esta técnica é largamente utilizada na medicina, por exemplo da fala. Em engenharia, na área de controlo da condição é utilizada em rolamentos e engrenagens. Tem como vantagens a insensibilidade, por exemplo a variação de carga ou caminhos de transmissão uma vez que reduz uma família de bandas laterais a uma frequência. Mas só se deve comparar “cepstrum” obtidos com ruído de fundo semelhante (medição nas mesmas condições) e ampliações (*zooms*) só são comparáveis se tiverem a mesma frequência.

#### 4.1.4.9 Run-up ou run-down

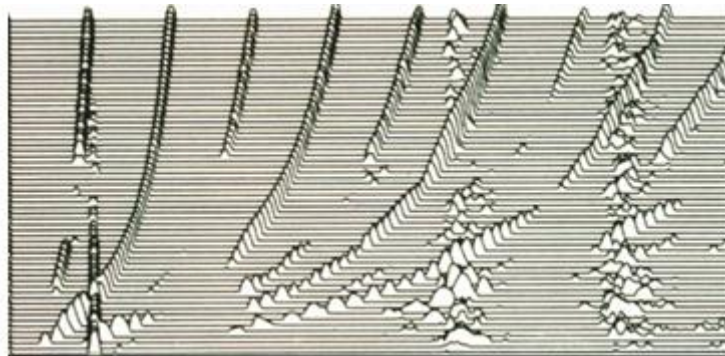


Figura 55 - EF run -up ou cost down [16]

A Figura 55 é tipicamente chamada de run-up ou run-down, dependendo se a medição representa o arranque da máquina ou a paragem em máquinas rotativas. É utilizado para saber o valor das frequências naturais, visto estas serem a resposta do sistema e constantes na frequência. Da análise do gráfico acima vemos a frequência que acompanha a rotação, chamadas de síncronas e outras que são constantes, logo essas representam a frequência de ressonância.

## 4.2 ANÁLISE DE CORRENTE

Na área da engenharia (eletrotécnica) existe a necessidade de ter conhecimento de como se comportam os circuitos elétricos e o fornecimento da rede elétrica, bem como a sua qualidade. A evolução começou com a medição de corrente e tensões, com a chegada dos osciloscópios já era possível ver a forma da onda, até que hoje com auxílio de avanços em áreas paralelas, por exemplo, das tecnologias de telecomunicações, consegue-se extrair mais informação. Um motor não é mais que um circuito elétrico e devido à sua importância a tecnologia foi adaptada em prol da verificação do seu estado.

### 4.2.1 Fundamentos teóricos

De uma maneira simplista, na eletricidade existem dois parâmetros importantíssimos, a tensão e a corrente, normalmente um deles é fixo e o outro varia consoante a necessidade do equipamento. Relativamente a muitos outros fenómenos a eletricidade tem uma resposta imediata, ou seja, a variação dos seus parâmetros é instantâneo.

Esta pequena introdução serve para explicar o funcionamento da análise de corrente, geralmente num motor a tensão é fixa (na rede elétrica nacional é 220v) e a intensidade

varia consoante as necessidades do motor, por exemplo, quando o motor arranca necessita de muita potência, esta necessidade vai decaindo até este atingir a sua velocidade nominal, logo a corrente elétrica que ele irá absorver será muito elevada no início e diminuirá à medida que este se aproxima da velocidade nominal. No seu funcionamento o mesmo acontece na variação da carga, o consumo de corrente é proporcional a essa variação, da mesma maneira que quando existe um curto-circuito, mesmo que momentâneo, a corrente aumenta.

Na técnica de análise de corrente o que provoca a variação da intensidade da corrente pode ser detetado e diagnosticado, no capítulo sobre eletromagnetismo foi explicado que qualquer variação magnética provoca variação de corrente, logo pode-se utilizar esta técnica em fenómenos que provoquem a variação eletromagnética. As variações mecânicas provocam atritos que fazem aumentar a carga, que por sua vez aumentam as necessidades de corrente, ou aumentam e diminuem distâncias, por exemplo, entre os dois principais componentes do motor, rotor e estator, isto provoca variações magnéticas.

Resumindo, praticamente qualquer mudança de estado de um motor pode traduzir-se em variações de corrente, logo é este facto que torna esta tecnologia adequada a monitorização de motores elétricos.

A outra grande vantagem é detetar problemas a montante e a jusante. Isto está relacionado com um dos princípios de funcionamento, em que o motor transforma a variação (frequência) da tensão em variação (frequência) de corrente. Logo se o problema for na frequência da voltagem está relacionado com o fornecimento de energia, se for na amperagem está relacionado com o próprio motor [44].

#### **4.2.2 Medições**

A análise de corrente elétrica serve essencialmente para diagnóstico, este pode ser feito com a máquina em funcionamento mas quando se faz uma avaliação geral do estado da máquina pode-se ser obrigado a desligar-lhe a alimentação elétrica, quando utilizamos esta tecnologia está-se à procura de algum problema já detetado, ou seja, tem que se diagnosticar.

Os equipamentos fazem a avaliação e ao contrário da análise de vibrações, apresentação dos níveis de referência é feito de modo automático, baseado nas seguintes normas:

IEEE 43-2000: refere-se ao teste de isolamento em máquinas elétricas em potências superiores a 750W.

IEEE 389-1996: refere-se a métodos de ensaio de bobinas considerando os seguintes parâmetros: indutância, impedância, ângulo de fase e de resposta em frequência.

IEEE112-2004: refere-se ao teste de eficiência de motores.

IEEE519-1992: refere-se a um guia de recomendações práticas e requisitos para conversores de potência estáticos de harmónicas

IEEE252-1995: refere-se a instruções para conduzir e relatar os testes aplicáveis para determinar as características de motores de indução polifásicos com líquido no entreferro.

IEEE432-1992: refere-se a um guia com padrões de informação necessária apresentar para permitir uma avaliação eficaz dos sistemas de isolamento de máquinas rotativas pequenas e médias. O guia destina-se a aplicar, em geral, aparelhos de refrigeração industriais classificados a partir de 5 HP a 10.000 HP.

As Informação necessária a fornecer a um programa antes da aquisição (salvo se estiver na base de dados) e para posterior análise é:

- Potência kw ou Hp
- Rotação RPM (o equipamento faz uma estimativa que tem de ser confirmada e ajustada)
- N° de Cavas
- N° de barras

#### 4.2.3 Sensores

Neste caso não há necessidade de um “sensor”, basta uma ligação elétrica, aqui o verdadeiro transdutor está no entreferro. Qualquer variação nos seus parâmetros resulta numa variação de corrente.



Figura 56 - Exemplos de pinças amperimétricas

As ligações elétricas, no caso da corrente, são pinças amperimétricas que permitem aquisição de dados sem contacto físico, a tensão utiliza “crocodilos” e é feita por contacto físico, metal com metal.

#### 4.2.4 Técnicas utilizadas

Na análise de vibrações apresentaram-se os conceitos básicos de um sinal vibratório, grande parte desses conceitos também são válidos para este capítulo, uma vez que após

o sinal passar pelo elemento sensível este não é mais que um sinal elétrico lido com equipamento próprio.

Os processos de análise utilizados são os mesmos ou muito semelhantes aos de análise de vibrações, por exemplo o tratamento utiliza as mesmas ferramentas (FFT, Envelope, análise tendência e etc.)

### 4.3 TERMOGRAFIA

A termografia permite verificar as temperaturas dos objetos, sem contacto físico com este, através da emissão de radiação infravermelha. Estas são ondas eletromagnéticas em que a sua frequência se situa na denominada zona infravermelha, permitindo estes aparelhos estender a visão humana.

#### 4.3.1 Fundamentos teóricos

Um motor transforma energia elétrica em energia mecânica mais calor. A energia dissipada é diretamente proporcional ao trabalho realizado pelo motor e causa variação na energia interna da máquina, esta pode ser medida de maneira indireta através da temperatura. Quando o motor alcançar o equilíbrio térmico, o calor dissipado é igual ao calor gerado (primeira lei da termodinâmica, “*energia total transferida para um sistema é igual à variação da sua energia interna*”). [27].

$$(8) \quad Q = P_p - \Delta U$$

$\Delta U$  - Variação da energia interna de um sistema

Q - Energia térmica

A variação da energia interna é igual a zero, porque neste caso o calor não gera trabalho (pelo contrário, é gerado a partir do trabalho)

$$(9) \quad \Delta U = 0$$

$$(10) \quad Q = P_e - P_{mec}$$

O calor é dissipado por convecção e radiação, logo:

$$(11) \quad Q = Q_{rad} + Q_{conv}$$

Dissipação por convecção ( $Q_{conv}$ ): O motor de indução têm de ser arrefecido, a temperatura é o parâmetro a que se deve dar mais atenção, como tal, inclui um dispositivo de arrefecimento acoplado (por exemplo a ventoinha). Esta dissipação é por convecção forçada, ou seja, o fluido (ar ou líquido) passa pelo motor e trás consigo o calor da carcaça.

$$(12) \quad Q_{conv} = h(T_s - T_i)A$$

h = coeficiente de transferência térmica (W/(m<sup>2</sup>K))

A= área

Ts= temperatura ambiente ou do fluido (°)

Ti= temperatura do objeto

Dissipação por radiação (Qrad): Todos os corpos acima de 0° Kelvin emitem radiação. Os estudos sobre a radiação térmica, transferência de calor, baseiam-se essencialmente, na energia emitida pelos objetos devido à sua temperatura, que representa a diferença entre a quantidade de energia absorvida e a transmitida. Lei Stefan-Boltzmann proporciona a transferência de calor por radiação entre a carcaça do motor e a envolvente.

$$(13) \quad Q_{conv} = A\sigma\epsilon(T_s^4 - T_{ref}^4)$$

$\sigma$ = constante de Stefan ( $5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ );

$\epsilon$ = emissividade é a relação entre o poder emissivo de corpo e o corpo negro.

Sintetizando, quando a dissipação de calor aumenta e as condições de trabalho são as mesmas (carga) há uma anomalia no sistema, que se traduz em aumento de temperatura.

#### 4.3.2 Medições

Esta técnica tem uma especial relevância em situações onde é difícil chegar para colocação de sensores que caracterizam outras técnicas de controlo da condição. Têm como uma grande vantagem ser exercida sempre com os equipamentos em funcionamento e como grande parte das avarias se caracterizam por aumento da temperatura a sua localização torna-se intuitiva.

O equipamento deve estar a funcionar durante algum tempo, através da temperatura localiza-se a zona mais quente, é um método de execução rápida e com análise feita praticamente em simultâneo por comparação com outros métodos. Também possui a vantagem de não necessitar, de paragens do equipamento, pelo contrário é aconselhável que tudo esteja à carga máxima.

A emissividade é o parâmetro mais importante, é o único a colocar na camara termográfica, para haver uma relação entre a emissão do objeto e a sua temperatura absoluta, para isso existem tabelas como a da figura abaixo, apesar de esta também variar com a cor.

	1.0 $\mu$ m	1.6 $\mu$ m	8-14 $\mu$ m
<b>Alumínio</b>			
Unoxidado	0.1-0.2	0.02-0.2	n.r.
Oxidado	0.4	0.4	0.2-0.4
<b>Alloy A3003</b>			
Oxidado	n.r.	0.4	0.3
Roughened	0.2-0.8	0.2-0.6	0.1-0.3
Polido	0.1-0.2	0.02-0.1	n.r.
<b>Brass</b>			
Polido	0.8-0.95	0.01-0.05	n.r.
Burnished	n.r.	n.r.	0.3
Oxidado	0.6	0.6	0.5
Chromium	0.4	0.4	n.r.
<b>Copper</b>			
Polido	n.r.	0.03	n.r.
Roughened	n.r.	0.05-0.2	n.r.
Oxidado	0.2-0.8	0.2-0.9	0.4-0.8

Figura 57 - Tabela de emissividade termográfica  
[<http://www.vortex.com.br/raytek/emissividade.html#anchor127430>]

O isolamento é a parte da máquina mais sensível ao calor, que se for em demasia acaba por o derreter e com esta tecnologia podemos monitorizar o estado do equipamento usando um dos três métodos: [28]

- Medição local, através de sensores incrustados, mas tem a desvantagem de o ponto escolhido não ser o da temperatura mais elevada.
- Uso de imagens térmicas, contudo, podem continuar a existir zonas abaixo da superfície exposta em que as altas temperaturas não sejam detetadas.
- Colocação de sensores em vários pontos do sistema de refrigeração pode monitorizar, até pela relação entre a temperatura do motor e do líquido de refrigeração.

Tal como todos os outros, este método tem evoluído, atualmente já se consegue detetar (gravar dados) fenómenos transientes. É uma técnica sobretudo de deteção porque a temperatura é um parâmetro do estado do motor e o diagnóstico é dificultado por só não se conseguir analisar o que não está a vista. No caso do motor a carcaça uniformiza o calor, apesar de se esperar que a zona mais fria seja perto da ventoinha. Mesmo assim é possível detetar falhas nos rolamentos e espiras em curto-circuito. [27].

### 4.3.3 Sensores

A gama do infravermelho é próxima da visível pelo ser humano, mas os nossos olhos não são sensíveis a esta radiação, esta é captada por sensores infravermelhos que compõe as lentes das câmaras de Termo visão. Também são usados noutras aplicações, tais como, leitores de códigos de barras, detetores de objetos, alarmes de passagem, encoders e chaves óticas.



Figura 58 - Exemplo de sensor LWIR

Os sensores que existem não podem cobrir toda gama da radiação infravermelha espectro, logo tem de se adequar ao tipo de radiação pretendida, os usados em termografia para gerar imagens térmicas são os que operam na faixa infravermelha de onda longa (LWIR).

#### 4.3.4 Técnicas

O espectro gera uma imagem semelhante às câmaras de filmar, mas as cores em vez de serem as reais (ao olho do ser humano) estão numa escala diretamente relacionada com a temperatura. As técnicas termográficas consistem na medição da distribuição da temperatura da superfície num espectro termográfico, de tal forma que as anomalias são representadas pela comparação com valores de referência. Estas técnicas ganham precisão devido ao desenvolvimento de *softwares* próprios.

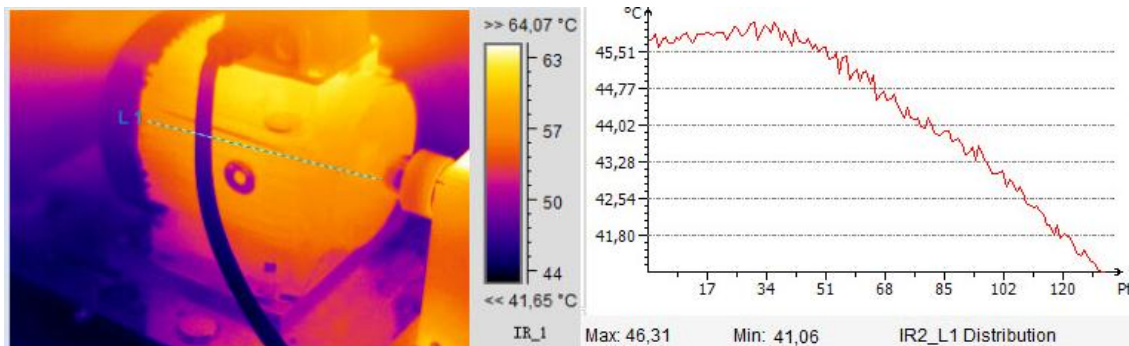


Figura 59 - Exemplo de Espectro termográfico e a distribuição de temperatura.

Na Figura 59 está um exemplo, em que após se recolher o espectro termográfico este é trabalhado num programa dedicado à análise termográfica onde temos a distribuição das temperaturas através de uma linha traçada no espectro, neste caso “L1”.



## 5. DANOS E OS SEUS SINTOMAS

Neste capítulo serão abordados os danos e as suas características dependendo da tecnologia que utilizamos para o detetar.

Houve intenção de na bibliografia encontrar danos semelhantes para as três tecnologias, mas as contrariedades levaram a que alguns só sejam referenciados numa ou duas delas.

Alguns dos danos podem ser derivados de outros, por exemplo, o curto-circuito gera um desequilíbrio de fases, mas se for numa só espira o desequilíbrio é impercetível e vai-se agravando à medida que as espiras em curto aumentam, o que desencadeia sintomas semelhantes.

### 5.1 TIPO DE DANOS

O motor de indução, mesmo sendo das máquinas mais fiáveis e mesmo sendo o controlo da condição, independente da tecnologia que se usa, um grande adversário das falhas, convém frisar que elas são inevitáveis, segue a estatística retirada de [1]

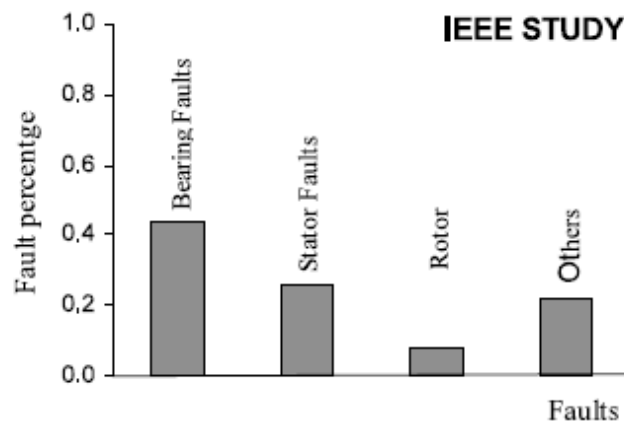


Figura 60- Estudo da fiabilidade IEE sobre motores de indução [1]

A Figura 60 representa um estudo em que se resume os componentes que sofrem mais danos. Existem várias razões para haver falhas, tal como, tolerâncias de fabrico, montagem, instalação, ambiente de trabalho, tipo de cargas a que é sujeito e a manutenção que se executa. As falhas podem dividir-se em dois grandes grupos, mecânicos e elétricos. No entanto, os problemas cruzam-se entre si, por exemplo, a temperatura demasiado alta aumenta a probabilidade de haver um curto circuito, isto é válido para as espiras do estator como para as placas do rotor, logo irá traduzir-se numa falha elétrica. Iremos dividir as falhas em 4 grupos:

**Mecânicos:** As tensões mecânicas são as principais causas para os danos de isolamento devem-se ao movimento das espiras, bem como aos toques do rotor no estator (dano nos rolamentos ou empenos no veio). A força que atua nas espiras é o quadrado da corrente, que atinge valores máximos nos momentos de maior esforço em que está englobado o

arranque. Estas forças fazem as espiras movimentar-se o que por sua vez danifica o isolamento.

Elétricos: A tensão elétrica deve-se ao dielétrico de alguns componentes elétricos, por exemplo, os condensadores, no momento em que os materiais passam de não condutores a condutores.

Térmicos: As tensões térmicas, afectam significativamente a operacionalidade da máquina, por exemplo, a subida da temperatura em 10° desce a vida do isolamento em 50% [29]. O envelhecimento, não causa a falha mas deixa o motor mais vulnerável. Outra agressão ao isolamento são os sobreaquecimentos que ocorrem devido à variação da tensão em função de desequilíbrios das fases, falha do sistema de refrigeração ou temperatura ambiente elevada. Por isso pode-se optar por isolamento da mais alta qualidade ou diminuir a temperatura de operação para aumentar a vida dos motores.

Ambiental: A tensão ambiental deve-se à limpeza do meio onde está inserido, os químicos utilizados, a humidade etc.

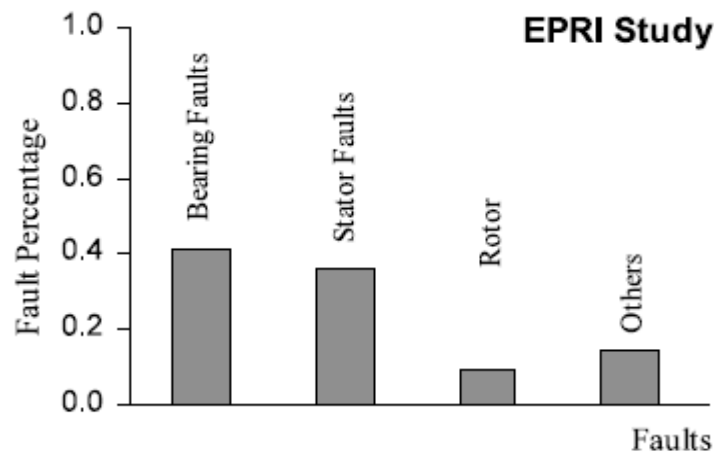


Figura 61 - Estudo de fiabilidade EPRI em motores de indução [1]

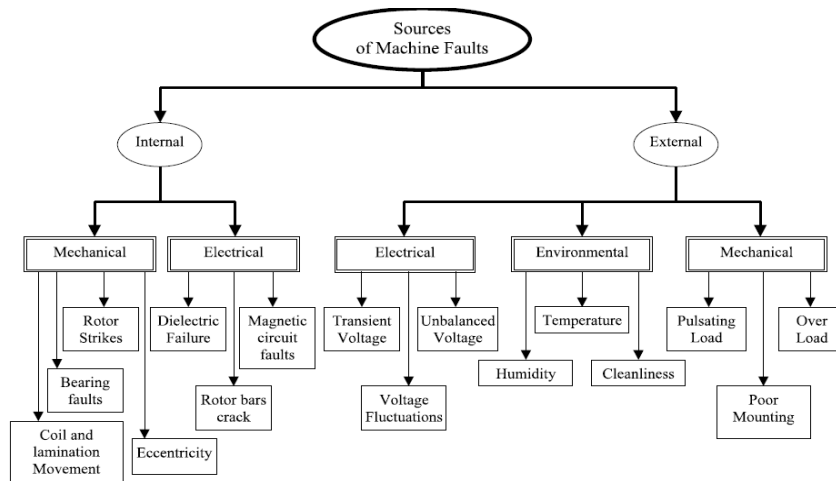


Figura 62 - Fontes de falhas nos motores [1]

No artigo [1] da qual se retirou as Figura 60 e Figura 61 estão as estatísticas de duas entidades diferentes mas os resultados são aproximados. Na Figura 62 resume as falhas por tipo clarificando as fontes que as podem causar.

Abaixo os danos por constituintes do motor.

**Estator:** Enquanto que para motores de alta tensão os padrões verificam-se , para os motores de baixa tensão, os procedimentos de detecção de falhas do estator estão ainda a ser padronizados. [30] Os danos no estator podem ser: Falta de fase [31] ; desequilíbrio de fases e Circuito aberto, que é a descontinuidade do material condutor, que pode dever-se a fios partidos, ligações desconectadas (aqui podem-se incluir maus contactos). Este ultimo raramente acontece, comparado com os curto-circuitos, apenas provoca o mau funcionamento do motor.

**Rotor (Gaiola de esquilo):** No rotor os problemas normalmente são mecânicos, tais como: As barras partidas, veio enpenado ou torcido, perda de material normalmente devido a toques com o estator[31].

**Carcaça:** Aloja o estator e os seus danos estão relacionados com folgas ou fendas, exemplo disso é a “pata coxa” denominada quando pelo menos um dos apoios do motor está livre. A sua liberdade pode dever-se a parafusos desapertados ou gastos, ou apoios (patas) partidos. [15]

**Rolamentos:** Nos motores por indução são o único contacto entre a estrutura da máquina e o rotor, sendo que o ultimo é onde se concentram todas as forças exercidas. Logo qualquer anomalia que afecte o veio é absorvido pelas chumaceiras de precisão (rolamentos) e aqui se justifica o facto de representar o componente com maior numero de intervenções, a sua substituição.

Na análise de vibrações e corrente a técnica mais utilizada é EF, como tal, um dos aspetos mais importantes é conhecer as frequências padrão do equipamento a monitorizar, para o caso do motor de indução são:

Frequência de escorregamento ( $Sf$ ): É a diferença entre a rotação do motor e a frequência do campo electromagnético do estator.

$$rps = \frac{rpm}{60}$$

$$Ns = 2 \frac{La}{P}$$

$$Sf = Ns - rps$$

$Ns$  = Freq. do campo eletromagnético;

$La$  = Freq. de alimentação, em muitos casos é a da rede (hz);

$P$  = N° de pólos;

$Rps$  = Frequência de rotação (Rotações do veio por segundo ou hz).

O escorregamento aumenta com a carga. Daí aconselhar-se a monitorização de certas avarias em plena carga, como se verificará no capítulo experimental.

Frequência de passagem das cavas, ( $SFP$ ): As cavas, onde encaixam os condutores no estator, criam forças de atracção magnéticas desequilibradas, resultantes de uma variação efectiva no campo magnético. A frequência de passagem das cavas é característica de excentricidades no rotor e no estator.

$$SFP = R * rps$$

$R$  = N° de cavas (ou ranhuras).

Frequência de passagem dos polos ( $FPPO$ ): A velocidade depende do número de pares de polos do motor, antes dos variadores de frequência, a variação de velocidade era feita através do número polos.

$$FPPO = P * NS$$

No caso da termografia o acompanhamento da temperatura é muito importante em vários processos, tais como o quadro de eléctricos, superfícies de equipamentos estacionários e chumaceiras de máquinas rotativas, entre outros. Em motores, geradores e transformadores, a termografia deve ser aplicada de forma correlacionada com outras técnicas, como a análise de vibração (por exemplo) [27]. Talvez, devido esse facto houve grande dificuldade em obter artigos com o diagnóstico a motores eléctricos através desta tecnologia.

## 5.2 VEIO EMPENADO

Este dano deve-se a vários fatores, desde o excesso de carga no veio aos choques térmicos, ou ao desgaste provocado por toques entre o rotor e o estator. [30]

### 5.2.1 Análise de vibrações

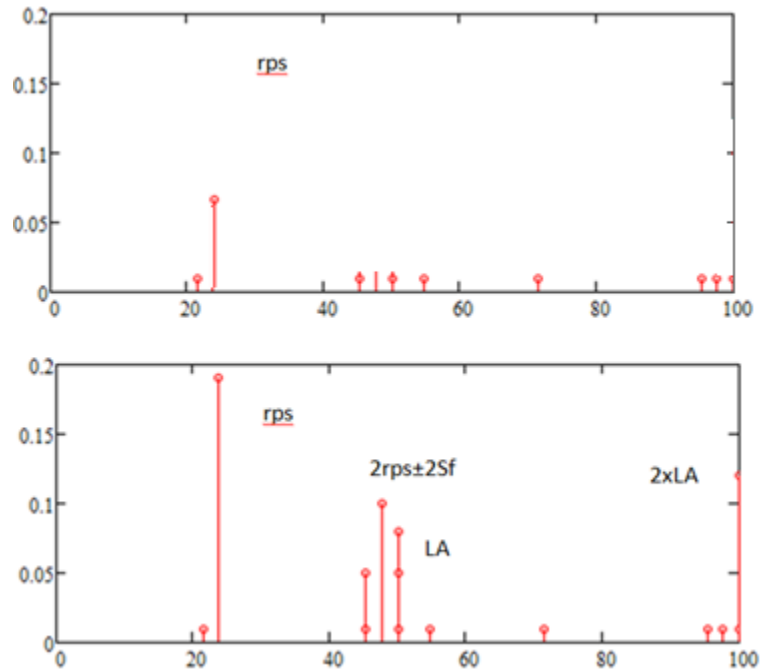


Figura 63 - EF de um motor saudável em cima e c/veio quinado em baixo

As frequências padrão são [31]:

- Frequência de alimentação 1X, 2X;
- Frequência de rotação 1X, 2X, com bandas laterais  $2rps \pm 2Sf$ ;

### 5.2.2 Análise de corrente

O veio enpenado dá origem à variação entreferros que origina um desequilíbrio magnético, esse facto leva a que o EF seja semelhante ao de excentricidade [31], no item 5.4.2.

### 5.2.3 Termografia

Na bibliografia não se encontrou espectros termográficos para este dano, mas tal como no caso da excentricidade os rolamentos vão absorver os choques o que para além de um aumento da temperatura gerado devido a necessidade de mais corrente devido ao esforço será mais visível na zona dos rolamentos.

## 5.3 DESIQUILIBRIO DO ROTOR

Falhas como o desequilíbrio de massas no rotor ocorrem principalmente durante a produção do mesmo, caso contrário acontece após um longo período de operação, a distribuição irregular da massa à volta do centro, causa excessiva vibração com aumento de velocidade, que resulta numa variação constante do entreferro, se este problema continuar poderá provocar o empeno do veio [38].

### 5.3.1 Análise de vibrações

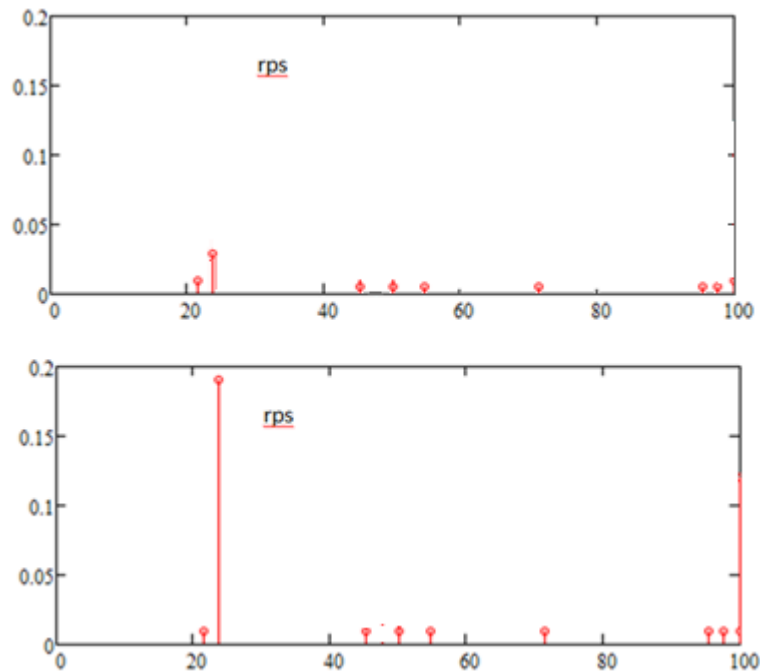


Figura 64 – EF em aceleração com rotor saudável em cima e com desequilíbrio no de baixo

As frequências padrão foram retiradas de uma dissertação [41] em que se pretende criar um sistema para monitorizar motores por análise de vibrações, um dos danos experimentados foi rotor desequilibrado em que os autores não mencionam as frequências padrão mas nos vários EF é visível que há um grande aumento da velocidade de rotação tal com demonstra a Figura 64, isto verifica-se na horizontal e na vertical sendo que o angulo deve de ser próximo de 90°.

As frequências padrão são [1]:

- Componentes elevadas a frequência de rotação 1x.

### 5.3.2 Análise de corrente

O desequilíbrio magnético é originado pela evolução das forças centrífugas devido ao desequilíbrio das massas [35] no rotor que produz uma elevada vibração tanto no rotor como no estator, provocando uma variação no entreferro [42]. As frequências padrão são  $L_a \pm FR$  [40] equivalentes a excentricidade estática como pode ser verificado através da Figura 68 que representa o EF em análise de corrente para baixas frequências.

### 5.3.3 Termografia

Os rolamentos serão aqueles que irão suportar o desequilíbrio do rotor, como tal, a sua temperatura irá aumentar, logo no espectro termográfico prevê-se que a temperatura do motor aumente e que esta seja mais significativa na zona dos rolamentos, mas não foi encontrada bibliografia.

## 5.4 EXCENTRICIDADE

Este fenómeno é fruto de um desequilíbrio de forças, em que a resultante provoca o descentramento do rotor fase ao estator. São de tipo, estático quando varia radialmente e dinâmico quando a variação é ao longo do eixo. Pode ser evidente a existência de apenas um tipo mas os dois estão presentes, em qualquer motor, desde do fabrico, mesmo que cumpra todas as normas. Isto deve-se a problemas intrinsecos como facto de os materiais que não são os ideais (teóricos), desequilíbrios magnéticos, ovalização do rotor e/ou carcaça, carga não homogénia, choques mecanicos e etc. Logo este fenomeno só se torna um problema quando ultrapassa certos valores. O trabalho experimental realizado em atração magnética desequilibrada (UMP), devido à excentricidade estática mostrou que o UMP aumenta rapidamente à medida que o motor é carregado. Enquanto a excentricidade dinâmica diminuiu à medida que o motor é carregado a partir de qualquer carga. [32]

### 5.4.1 Análise de vibrações

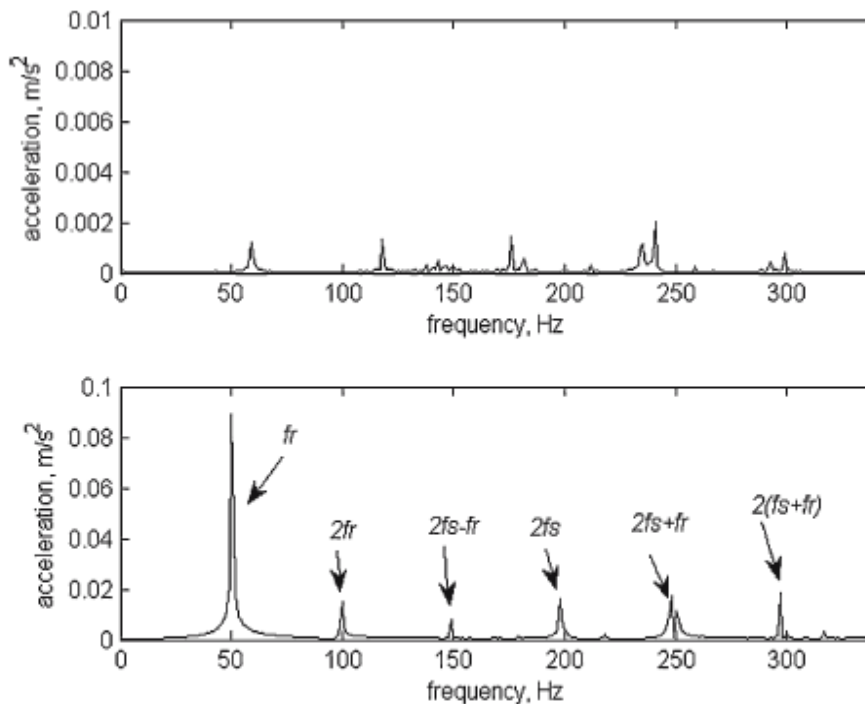


Figura 65 - Padrões EF para um motor saudável no topo e com 37% de excentricidade dinâmica em baixo, em ambos os casos o escorregamento é de 1,9% e o motor alimentado a 100Hz [33]

Em vibrações este dano caracteriza-se pelo aparecimento no EF da frequência de rotação e é perfeitamente visível, mas também se destaca a frequência de alimentação "La" (na figura está representada por fs), FR; 2xFR; 2xLa bandas laterais a rps e 2(La ±FR). Se este padrão for pouco alterado ao aparecerem outros componentes nomeadamente mais bandas laterais, isto significa a presença de excentricidade dinâmica. No caso do artigo onde foi retirada a imagem a frequência de alimentação é 100hz o que equivale a duas vezes a velocidade do rotor. [33]

As frequências padrão são:

- Amplitude elevada a frequência de rotação 1x e 2x;
- Frequência de alimentação 2x com bandas laterais a frequência de rotação e  $2(La \pm FR)$

#### 5.4.2 Análise corrente

Existem várias causas para a excentricidade e uma delas é devido aos rolamentos. No artigo [36] o teste aos rolamentos utilizando a tecnologia de análise de corrente é feito pela medição da variação da folga do entreferro. Logo a sintomatologia referida neste item também é válida para rolamentos.

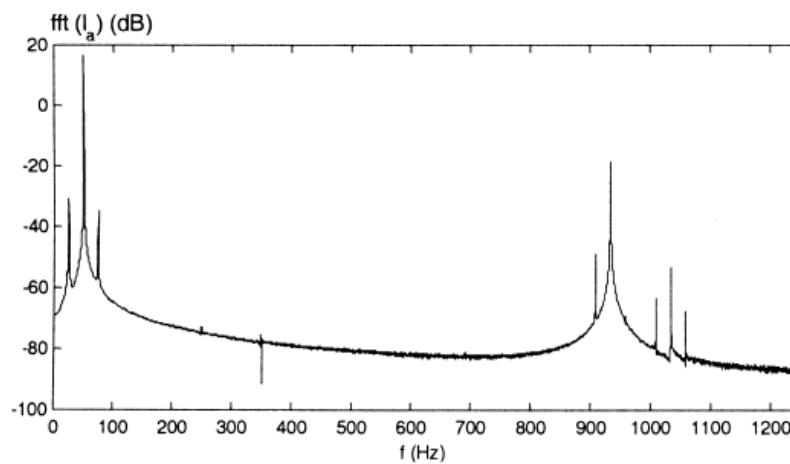


Figura 66 - EF de um motor com excentricidade [32]

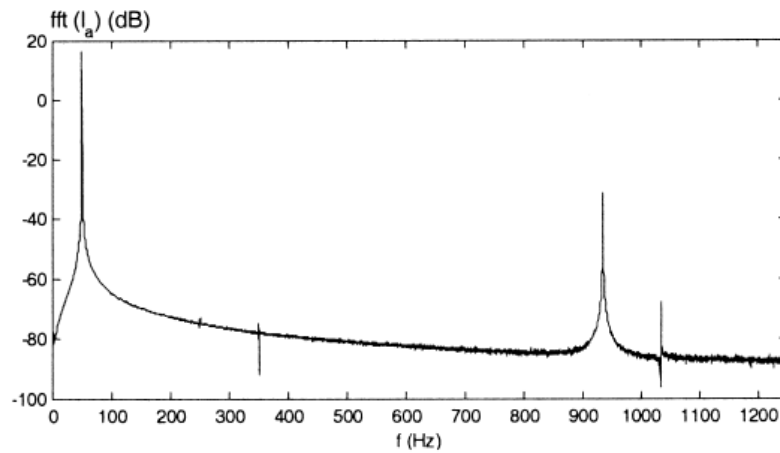


Figura 67 - EF de motor saudável [32]

As figuras acima apresentam motores com excentricidade na primeira Figura 66 (5% estática e 15% dinâmica) e saudável na segunda. Servem para demonstrar que este dano pode ser visível a baixas frequências (a rondar a frequência de alimentação) e a altas frequências (barras do rotor vezes a velocidade de rotação deste). Na teoria se a excentricidade for estática só é notória a baixas frequência enquanto que dinâmica seria a altas frequências. Na prática como existem as duas componentes juntas.

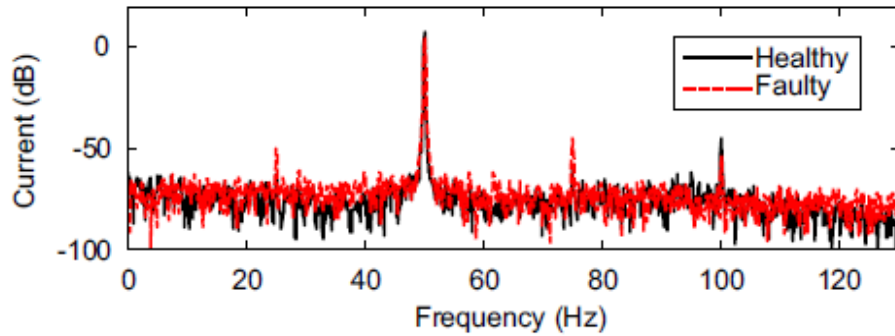


Figura 68 - Representação da excentricidade e comparação com motor saudável [38]

A Figura 68 representa sobreposição, a vermelho o motor com excentricidade de 40% (entre ferro têm 0,25mm e introduziu-se 0,1mm) alimentado a frequência de 50Hz e com uma velocidade de 1495RPM. Logo as suas frequências são:

Ao centro é a freq. alimentação de 50Hz com bandas laterais á frequência de rotação, como tal, temos à esquerda (da frequência de alimentação)  $50 - \frac{1495}{60} = 25.083$  e à direita

$$50 + \frac{1495}{60} = 74.917$$

As frequências padrão são:

- Frequência de alimentação com bandas laterais da frequência de rotação  $L_a \pm F_r$ , a baixas frequências está associado a excentricidade estática.
- Frequência de passagem das barras com bandas laterais à frequência de alimentação, este sintoma têm maior visibilidade quanto maior for a componente dinamica,  $F_b \pm L_a$ , podem surgir ainda bandas laterais desta frequência com o aumento da componente dinamica.

### 5.4.3 Termografia

A bibliografia que abordava este dano não referia sintomas para a tecnologia de termografia mas de igual forma aos casos do desequilíbrio do veio e o veio empenado preve-se um aumento de temperatura geral do motor, mas mais acentuada nos rolamentos.

## 5.5 BARRAS PARTIDAS

Tal como o nome refere, é quando as barras que formam a “gaiola de esquilo” estão partidas, fracturadas e/ou dessoldadas. As causas desta avaria, não contando com defeitos de fabrico, podem dever-se a arranques e variações de carga constantes. Este defeito é válido para qualquer quebra na estrutura que forma a gaiola de esquilo, tal como os anéis.

### 5.5.1 Análise de vibração

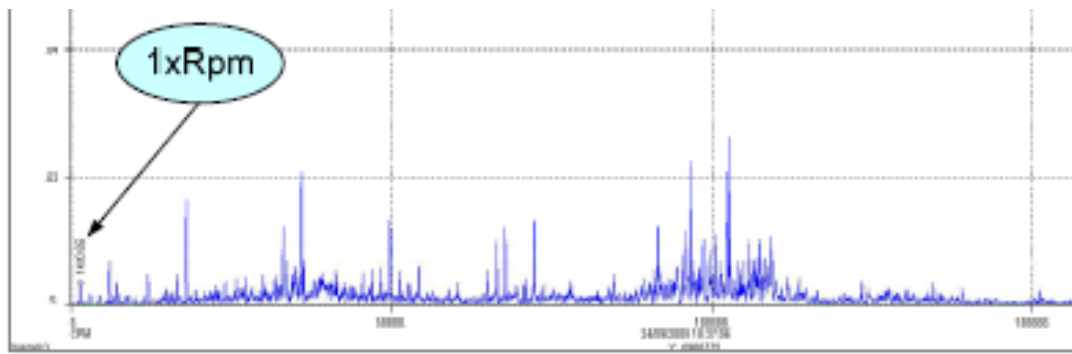


Figura 69 - Motor sem defeito e em carga [34]

A Figura 69 representa um motor em carga sem defeito medido em aceleração ou em g's. O escorregamento, que é o rácio da diferença de velocidade de escorregamento sobre a velocidade do campo girante, característico dos motores assíncronos como é o caso deste, está em função da carga, ou seja, aumenta quando a carga aumenta. Significando que em vazio o escorregamento é pequeno logo há uma maior dificuldade em ser observado o dano. Por isso na figura seguinte introduzir-se-á carga.

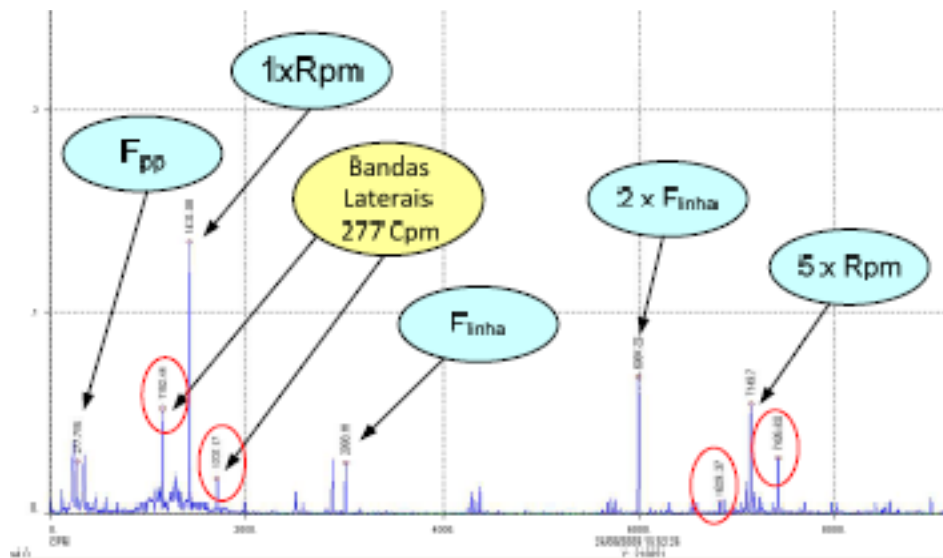


Figura 70 - Motor com duas barras partidas e em carga [34]

As frequências padrão :

- FPPO ao escorregamento, ou seja  $P \times N_s$ , em que  $P$  é o numero de polos e  $N_s$  a velocidade de escorregamento;
- Apresenta a frequência de rotação do rotor ( $1x$ ) e harmónicas ( $2x, 3x, 4x, \dots, xrpm$ ) com bandas laterais à frequência de passagem dos pólos ao escorregamento ( limitado ao alcance do espectro);
- Freq de passagem das barras a  $1X$  e  $2X$ ;
- Freq da rede com bandas laterais de  $(1-2s)LA$  .

A semelhança com a excentricidade deve-se ao facto de as barras partidas desequilibrarem o rotor. A grande diferença é a frequência de passagem dos polos. Apesar de as vibrações serem o método mais conhecido, segundo o artigo [35] é mínima a quantidade de diagnósticos certos a este dano.

### 5.5.2 Análise de corrente

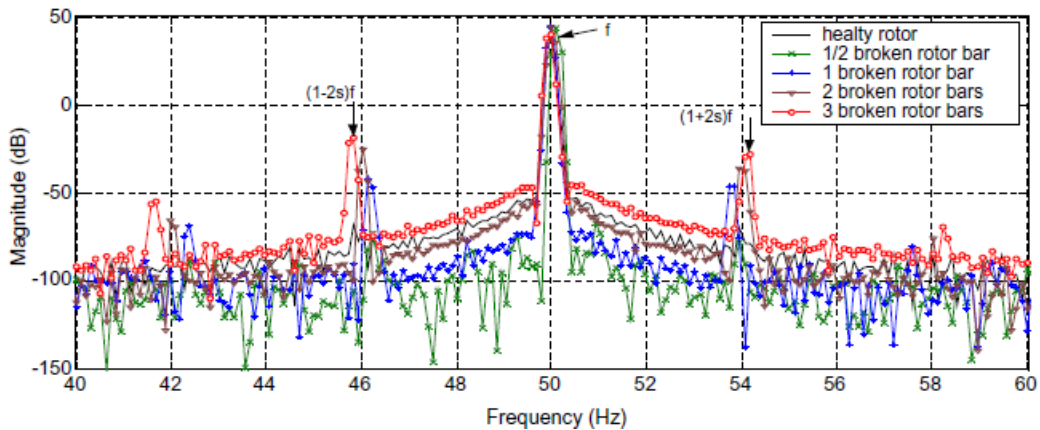


Figura 71 – Comparação do EF de análise de corrente de um motor saudável até 3 barras partidas

Antes de proceder à análise da Figura 71 convém salientar que é possível nos EF em motores saudáveis, quando fazemos o diagnóstico por análise de corrente, possam surgir bandas laterais devido a heterogeneidade da resistência da barra do rotor, devido ao processo de fundição. [30]

Na Figura 71 é através da sobreposição de vários espectros que temos uma boa visão da variação, tanto da amplitude como da frequência dos motores, em função do número de barras partidas.

As frequências padrão são:

- A frequência de alimentação “La” ao centro com bandas laterais  $La(1-2s)$ , consoante a gravidade pode haver K bandas laterais. Como se pode observar na figura para o número de barras partidas superiores a 1.

### 5.5.3 Termografia

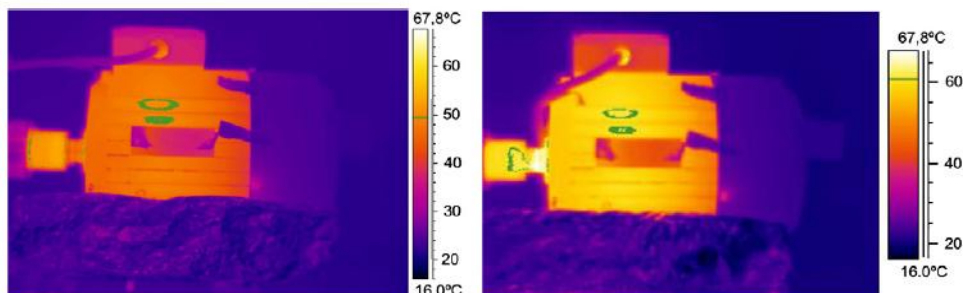


Figura 72 - Comparação de termografia entre um motor saudável e outro com barras partidas [27]

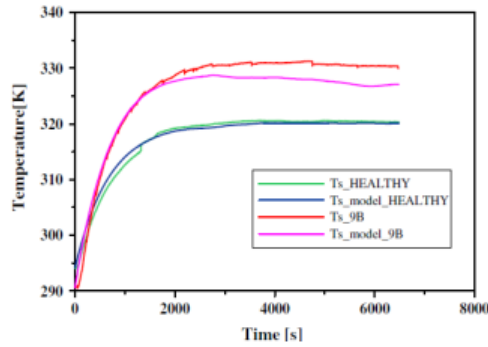


Figura 73 - Comparação da velocidade (aquecimento) e temperatura entre motores saudáveis e c/barras partidas [27]

Neste método nota-se um aumento geral da temperatura e a perda de eficiência, uma vez que no artigo de onde a imagem foi retirada os parâmetros de funcionamento (potência fornecida, potência mecânica e energia dissipada) estavam a ser monitorizados. Na Figura 73 observa-se que a temperatura máxima atingida é mais elevada nos que têm dano em cerca de 10 graus, no caso deste artigo.

## 5.6 CURTO-CIRCUITO

A corrente eleva-se mais que o normal de funcionamento, este aumento é acompanhado pela temperatura que acaba por derreter o isolamento (diminuindo-o) provocando o contacto nas bobinas que aumenta a área em curto-circuito até ter uma fase à terra, é o início do fim do motor. [29]. Foi demonstrado, através de modelagem e experimentação que estas falhas resultam em assimetria na impedância da máquina causando correntes de fase desequilibradas provocadas pelas correntes de sequência negativa. No entanto, as correntes de sequência negativa também podem ser causadas por desequilíbrio de tensão, saturação da máquina e etc. [30] Ou seja, A deterioração do isolamento do estator normalmente começa com o curto-circuito envolvendo poucas espiras de uma mesma fase o que acaba por também provocar um desequilíbrio de fases, que evolui e pode acabar com o motor.

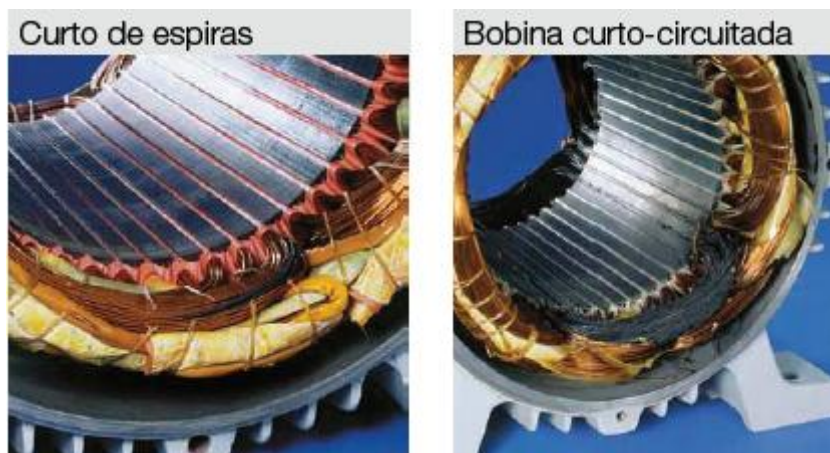


Figura 74 - Na imagem lado esquerdo é um curto-circuito em espiras em que a sua evolução dá a imagem do lado direito [WEG]

A previsão de falha através do acompanhamento da evolução do curto-circuito entre espiras é difícil de estimar, por depender das condições de operação do motor. [31]

### 5.6.1 Análise de vibração

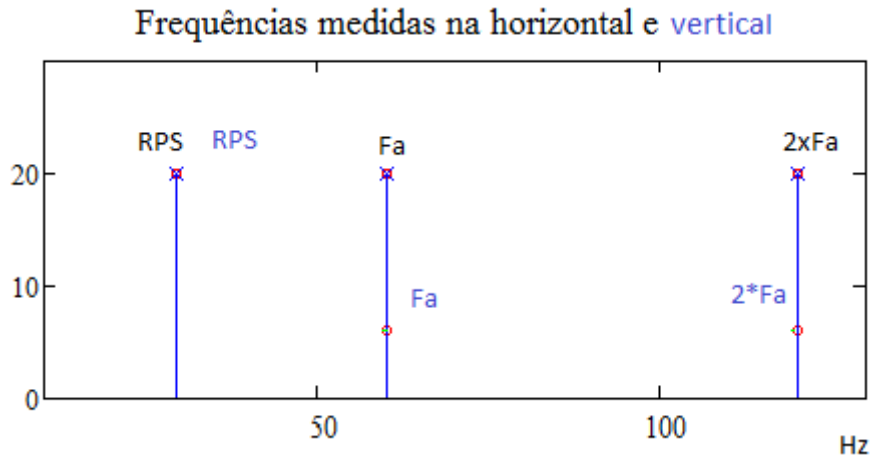


Figura 75 – Motor em curto-circuito no estator

Na Figura 75 apresenta a sobreposição do espectro com a aquisição feita na horizontal com a designação das frequências a preto e a azul a horizontal. Desde já pode-se concluir que este dano necessita de medições em pelo menos duas direções. Vibrações não variam com a carga.

As frequências padrão são: [2]

- A amplitude varia com a direção de medição da frequência de alimentação 1x; 2x.
- A frequência de rotação.

### 5.6.2 Análise de corrente

O desequilíbrio de fases e o curto-circuito em análise de corrente apresentam sintomas muito semelhantes, neste item vamos começar por retratar o curto-circuito e depois a diferença com o desequilíbrio das fases.

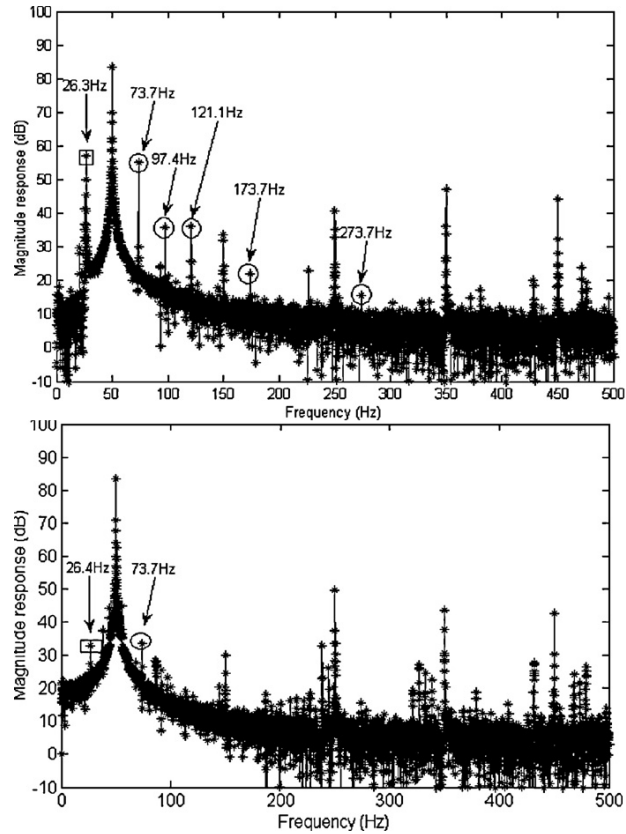


Figura 76 – Espiras do Estator em curto [38]

Na Figura 76, que representa a FFT, em que temos o motor danificado no topo e o saudável em baixo. Para este caso os dados são:  $LA=50\text{Hz}$ ,  $s= 0,047$  (para o saudável),  $s=0,042$  (para o danificado).

$$(14) \quad F_{sp} = LA \left[ \frac{(1-s)n}{P} + k \right]$$

A equação dá a harmónica onde se localiza o dano, em que “n” é o número da harmónica, por exemplo,  $n=1$  são as primeiras harmónicas adjacentes a frequências da rede, se  $n=2$  são as segundas harmónicas.  $K = 1$  é a primeira frequência da rede  $1*50\text{Hz}$ , se  $k=2$  representa  $2*50\text{Hz}$ .

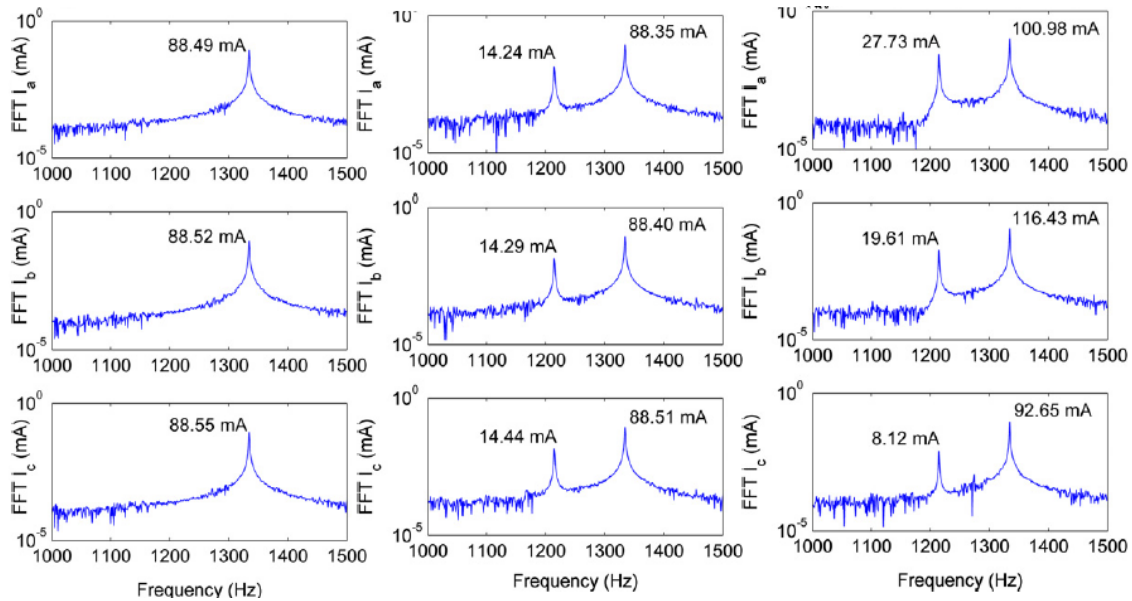


Figura 77- Representação das 3fases do motor coluna 1 saudável 2 desequilíbrio na tensão 3 espiras em curto circuito [39]

Na Figura 77 estão representados vários gráficos do mesmo motor, em que as linhas são as fases e as colunas são o estado (1ªsaudável, 2ªdesequilíbrio de tensão e na 3ª espiras em curto-circuito). Como se pode observar da primeira para as outras colunas há uma evolução de uma harmónica, logo significa que pode haver erro no diagnóstico entre desequilíbrio de tensão e curto. Mas entre a segunda e a última coluna vemos que para ser espiras em curto-circuito as diversas fases têm valores diferentes de amplitude. O cálculo da frequência a baixo está calculado para os seguintes valores:  $F_a=60\text{Hz}$ ;  $k=1$ ;  $s=0.035$ ;  $P=2, N_r$  (A sigla costuma referir-se à velocidade de rotação, mas neste caso é o numero barras do rotor)  $=44$

$$F_{std} := F_a \cdot \left[ \frac{N_r}{P} \cdot (1 - s) + k \right] = 1.334 \times 10^3 \quad F_{ste} := F_a \cdot \left[ \frac{N_r}{P} \cdot (1 - s) - k \right] = 1.214 \times 10^3$$

### 5.6.3 Termografia

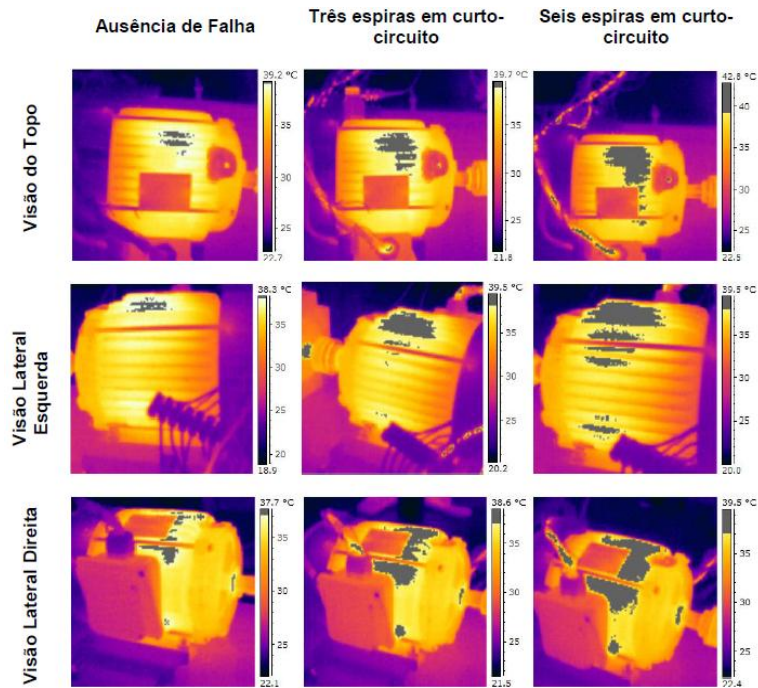


Figura 78 - Imagem termográfica de um motor com espiras em curto-circuito [31]

A Figura 78 tem como intenção demonstrar que a termografia deteta problemas mas é necessário “filmar” todo o motor. Tal como noutros danos existe o aumento da temperatura mas neste conseguimos localizar e este aumenta com a gravidade do dano. Extrapolando para o dano nos rolamentos do item 5.9, o autor da dissertação não refere, mas se observar na Figura 78, a “área” da temperatura máxima também aumenta na zona do rolamento, isto é apenas uma “impressão” por o curto-circuito provocar excentricidade e esta manifestar-se nos rolamentos.

### 5.7 DESEQUILIBRIO DE FASES

O desequilíbrio de fases é quando a tensão de alimentação é diferente da tensão de referência, por exemplo, a tensão de alimentação em Portugal é 220V se num determinado período está a 180V pode-se considerar desequilibrada. Os danos que advém do facto de o motor variar a corrente para compensar as variações de tensão, quando a corrente aumenta provoca um aumento da temperatura (a potência dissipada varia ao quadrado com a intensidade) que por sua vez enfraquece o isolamento o que poderá originar curto-circuito e destruição do motor.

### 5.7.1 Análise de vibrações

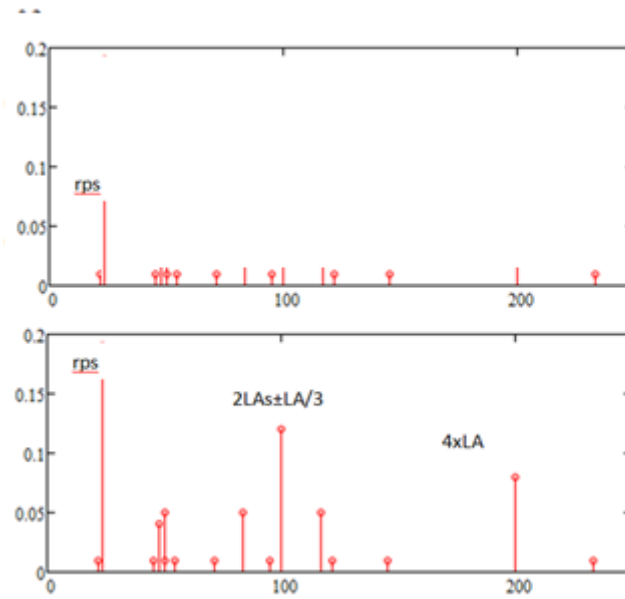


Figura 79 - EF de um motor saudável acima e motor com desequilíbrio de fases baixo

As frequências padrão são:

- Frequência de rotação
- Frequência de alimentação 2X, com bandas laterais  $2XLA \pm LA/3$  e 4X

### 5.7.2 Análise de corrente

O desequilíbrio de fases e o curto-circuito são ambos danos eléctricos e apresentam sintomas idênticos, por esse motivo, no item 5.6.2 apresenta o EF típico de desequilíbrio e a sua diferença em relação ao curto-circuito através da Figura 77.

### 5.7.3 Termografia

	$V_{CA}$ [Volt]	$V_{BC}$ [Volt]	$V_{AB}$ [Volt]	$V_p$	$V_n$	$V_0$	VUF( % )	Temperature	condition
balance	88	88	88	88	0	0	0	Rising	LR
balance	380	380	380	380	0	0	0	Falling	nL
balance	380	380	380	380	0	0	0	Falling	nL
1φ- OV	88	97	88	91.1	4.55	4.55	5	Rising	LR
1φ- OV	88	109.25	88	95	9.5	9.5	10	Rising	LR
1φ- UV	88	79	88	85	8.5	8.5	10	Rising	LR
2φ- UV	380	340	300	340	17	17	5	Falling	nL
2φ- UV	380	340	300	340	1	17	5	Rising	nL
2φ- UV	380	340	300	340	34	34	10	Rising	nL
2φ- UV	380	340	300	340	17	17	5	Rising	nL
2φ- OV	380	420	420	380	19	19	5	Rising	nL

Figura 80 - Resultado experimental de um motor sujeito a desequilíbrios de fase [43]

A Figura 80 é o resultado experimental de um motor sujeito a desequilíbrio de tensão na alimentação, em que foram colocados 6 sensores de temperatura, dois no rotor e quatro no estator.

Na primeira coluna refere se a tensão “balance” está equilibrada, “UV” se está abaixo da tensão nominal ou “OV” acima, segunda à quarta coluna é a tensão em cada fase,

“VUF” é a percentagem do desequilíbrio da alimentação, da quinta à sétima é sequência positiva, negativa neutra, na última coluna “Lr” significa rotor trancado (simulação de sobrecarga) e nLr rotor sem carga.

De acordo com os resultados experimentais, a temperatura do motor depende da sequência positiva, negativa e neutra. Quando o desequilíbrio é maior a temperatura do motor aumenta devido ao aumento das perdas das espiras causadas pela sequência negativa e zero.

## 5.8 FALTA DE UMA FASE

A falta de energia numa das fases pode ser consequência de um curto-circuito ou circuito aberto. Os motores sem uma fase, arrancam com um elevado ruído, não chega atingir a sua velocidade inicial, enquanto estiverem em funcionamento a sua velocidade diminui, em ambos os casos eles param embora no segundo demore mais tempo dependendo da carga. As fases ativas elevam a corrente para tentar compensar a falta de energia o que eleva a temperatura danificando o isolamento ajudando o aparecimento do curto-circuito, que deve de ser evitado.

### 5.8.1 Análise de vibrações

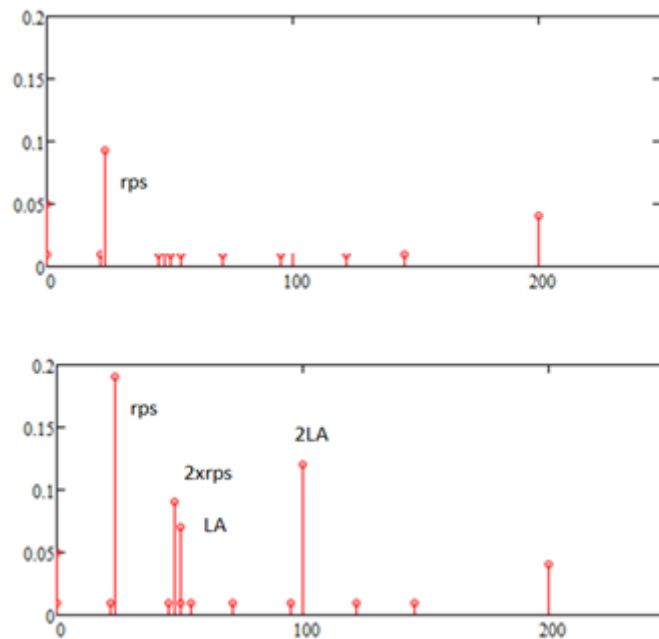


Figura 81- EF de um motor saudável acima e motor sem uma fase em baixo

As frequências padrão são [15]:

- Componentes elevadas a frequência de rotação 1x, 2x, com subarmónicas.
- Componente elevadas a frequência de alimentação 1x, 2x, com subarmónicas.
- Ressonâncias.

### 5.8.2 Análise de corrente

O equipamento de aquisição faz a leitura nas três fases, se uma delas não existir o coletor indicaria um erro, mas se este fosse ignorado o espectro de frequência seria semelhante ao desequilíbrio de fases e ao curto-circuito em que a diferença seria que num EF semelhante ao da Figura 77 numa das fases estaria a zero.

### 5.8.3 Termografia

A bibliografia conseguida para este dano não indicou sintomas para a, mas para este item prevê-se um grande aumento da temperatura gerada pela corrente que o motor irá absorver para repor a potência equivalente as três fases em que se irá notar que na zona em que á falta de fase uma temperatura mais baixa.

## 5.9 DANO NOS ROLAMENTOS

Os rolamentos são os componentes mais substituídos nos motores de indução, como tal, é de grande importância detetar as suas falhas atempadamente, as frequências características dos seus elementos são:

Frequência de dano da pista exterior:

$$(15) \quad f_{rext} = \frac{Nr}{2} * fr(1 - \frac{Dr}{Dp} \cos \beta)$$

Frequência de dano da pista interior:

$$(16) \quad f_{rint} = \frac{Nr}{2} * fr(1 + \frac{Dr}{Dp} \cos \beta)$$

Frequência de dano do elemento rolante:

$$(17) \quad f_{rol} = \frac{Dp}{Dr} * fr(1 + (\frac{Dr}{Dp})^2 \cos \beta)$$

Frequência de dano da Gaiola:

$$(18) \quad f_{gai} = \frac{1}{2} * fr(1 - \frac{Dr}{Dp} \cos \beta)$$

Nr = Numero de esferas; Fr = Velocidade do rotor em Hz; Dr = Diâmetro dos rolamentos; Dp = Diâmetro médio da pista.

### 5.9.1 Análise de vibrações

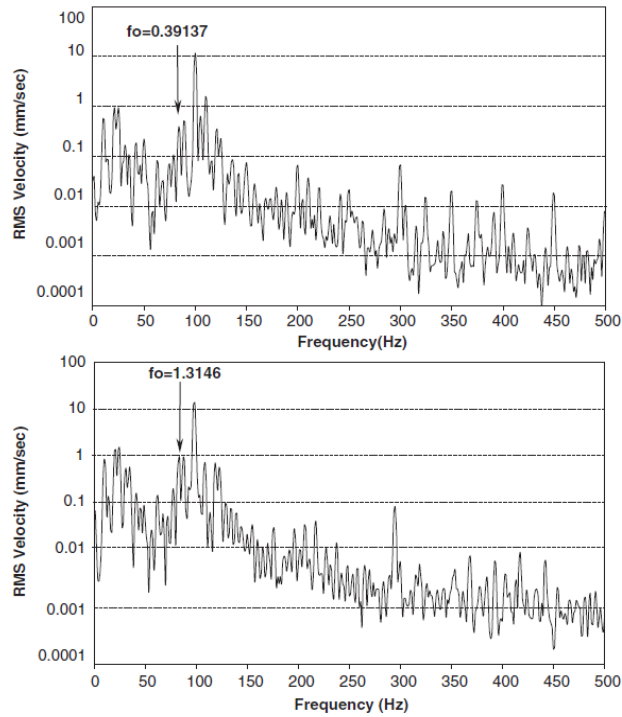


Figura 82 - Comparação entre um motor saudável e c\damo [36]

A Figura 82 demonstra a comparação entre um motor danificado e um saudável, como pode ser verificado a frequência da pista exterior eleva-se.

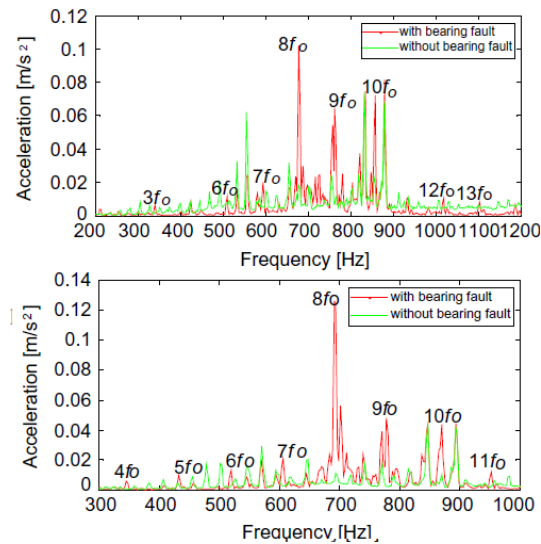


Figura 83 - Comparação entre motor saudável e c\damo em relação ao carregamento [37]

Na Figura 83 o vermelho representa o motor com dano e a verde o saudável, no gráfico do topo os rolamentos tem a carga máxima, no de baixo são sem carga. De reparar que neste caso a gama varia entre a frequência de 200 a 1200 Hz.

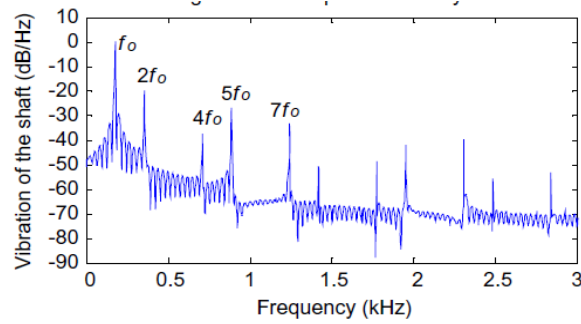


Figura 84 - Gráfico de rolagamento danificado até três 3Khz [37]

De referir que as FFT dos danos nos rolamentos se expandem para os ultrassons.

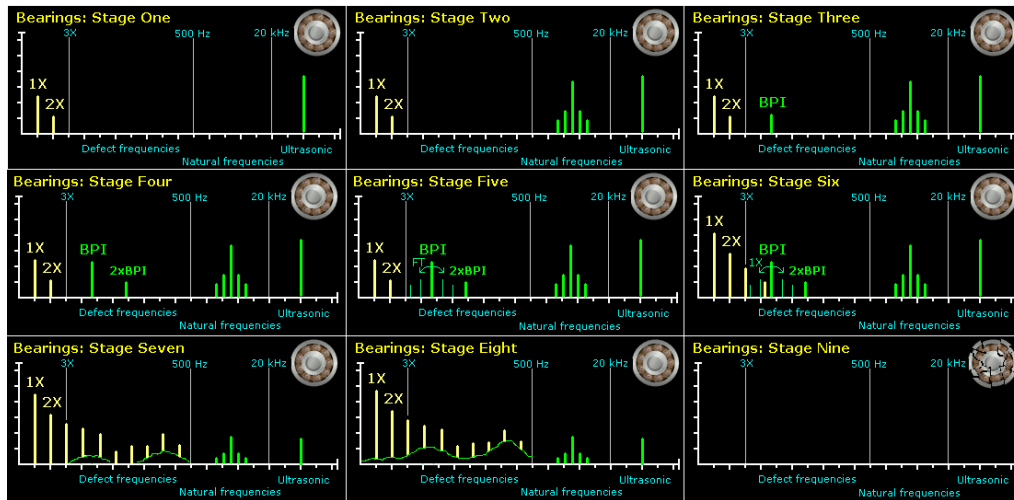


Figura 85 - As 8 etapas de degradação até à rutura [15]

Na Figura 85 estão representados os oito espectros em frequência, em que cada um é uma fase do ciclo de vida de um rolamento. Serão desenvolvidas as mais importantes.

Observando os EF obtêm-se desde já duas conclusões, de que os dados devem de ser retirados em aceleração por haver valores superiores a 1Khz e a frequência para diagnóstico do dano vai até aos ultrassons pelo que é aconselhável que a gama de frequência do aparelho de medição tenha essa capacidade, apesar de haver frequências de falha até aos 500hz.

O monte entre os 500hz e os 20Khz é a excitação de ressonância da caixa do rolamento. O BPI (frequência de falha na pista interior) e aparece na terceira etapa, para se distinguir deve-se usar a escala logarítmica.

Na etapa número cinco já há falhas no elemento rolante. O som é audível a partir da etapa seis e é aqui que se aconselha a substituir o rolamento ou pelo menos, planear a sua substituição de acordo com a evolução (se esta se encontrar registada). Também convém salientar que a partir da 4ª etapa no sinal do tempo começam-se a notar impactos, quando medidos em aceleração.

Sintetizando, se houver falhas nos rolamentos a frequência característica de um dos seus elementos irá aparecer no espetro, normalmente a primeira será a pista exterior por ter a distância mais curta até ao sensor.

As frequências padrão são:

- A amplitude eleva-se à frequência de rotação 1x, 2x
- Aparecimento de frequências características dos elementos que compõe o rolamento com subarmonicas 1x, 2x...

### 5.9.2 Análise de corrente

Em toda a bibliografia a deteção de danos nos rolamentos através de análise de corrente é dada pela excentricidade. Como tal, através do artigo [40] apresenta-se a Figura 86 na qual se observa que o motor possui dois danos, desequilíbrio na corrente do estator, originado por curtos circuitos nas espiras e assimetria dinâmica que neste deve-se a falhas nos rolamentos.

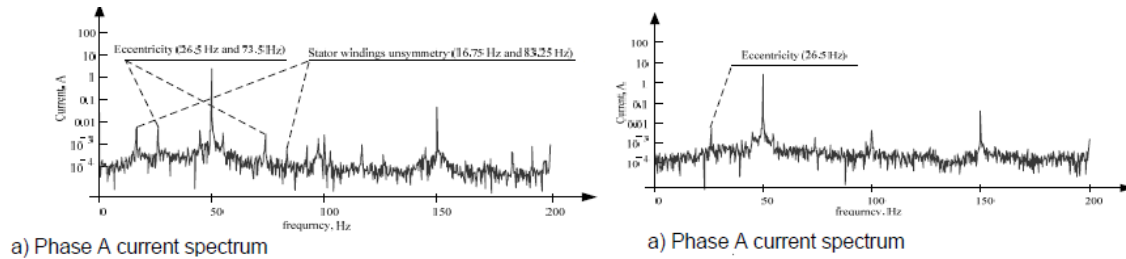


Figura 86 - Comparação de dois defeitos num motor com um saudável [40]

As expressões para o desequilíbrio de fases para frequências inferiores a 500hz também se aplicam a este caso bem como as expressões de excentricidade.

### 5.9.3 Termografia

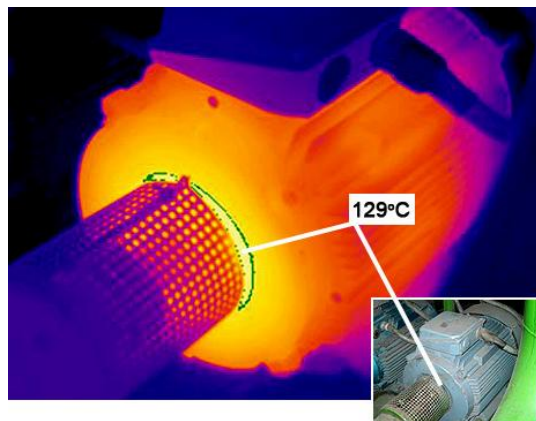


Figura 87 - Visualização de um motor com danos nos rolamentos

No caso da Figura 87 não temos a legenda com os gradientes da temperatura, mas a imagem pretende mostrar que a zona mais quente encontra-se na chumaceira e como é intuitivo detetar o elemento em falha, isto porque os rolamentos normalmente são a consequência do dano.

## 5.10 REFRIGERAÇÃO INSUFICIENTE

Os motores podem ser arrefecidos a ar ou liquido, mas as causas das suas falhas podem ser semelhantes, passagem obstruída, turbinas ou bomba de água corroída, funcionamento do motor no sentido contrário ao de rotação(em motores com sentido único).

### 5.10.1 Análise de vibrações

A bibliografia recolhida não indica sintomas para este dano para as tecnologias de análise de vibração e corrente, mas não se prevê que o aumento de temperatura irá ter qualquer sintoma relacionado diretamente, apenas de maneira indireta através da degradação do isolamento que dará origem a dano como o do curto-circuito.

### 5.10.2 Análise de corrente

O referido no 5.10.1 também é válido para este item.

### 5.10.3 Termografia

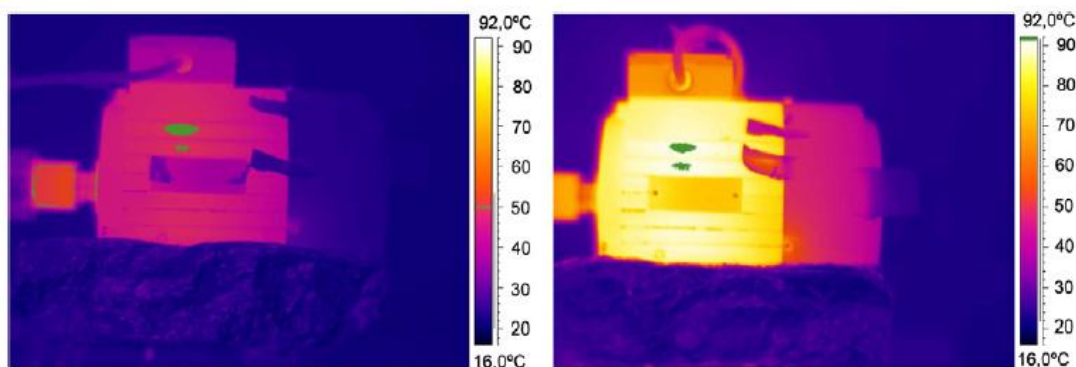


Figura 88 - Comparação termográfica entre motor saudável e c/dano no sistema de refrigeração [27]

Neste caso há um grande aumento da temperatura mas o facto mais decisivo para se identificar a causa é o de na refrigeração, que é a zona da ventoinha, há uma temperatura que se distingue do meio envolvente e a temperatura da carcaça é praticamente constante enquanto num motor saudável fica dissimulada e a gradação da temperatura vai subindo desde a zona da ventoinha até ao centro [27].



## 6. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Neste capítulo vai-se proceder ao ensaio de cinco avarias, com danos provocados (barras partidas, curto-circuito no estator, na pista exterior do rolamento, Excentricidade e desequilíbrio do rotor), o motor estará a ser monitorizado por três tecnologias (análise de vibrações, análise de corrente e termografia). Os resultados obtidos serão comparados com as fórmulas teóricas e os padrões de cada avaria retirados do capítulo anterior.

### 6.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO:

**Motor:** Foram utilizados 4 motores em que 3 são Leroy Somer, Figura 89, de 0,5CV (0,37Kw), 4 polos, 24 cavas, 34 barras, foram utilizados para a simulação de “novo”, excentricidade, barras partidas e o quarto motor é um ABB, Figura 90, de 0,5CV (0,37Kw), na qual será simulado o curto circuito.

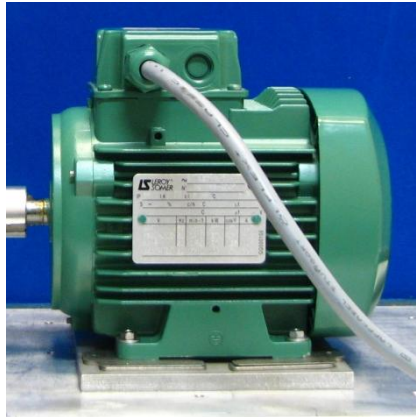


Figura 89 - Motor Leroy Sumer



Figura 90 - Motor ABB

**Variador de carga:** Freio de Foucault, unidade de variação de carga.



Figura 91 Freio de Foucault

**Quadro elétrico de controlo do motor:** No quadro de controlo do motor está um variador de frequência, responsável pela variação de velocidade, ligações das fases e botão on/off.

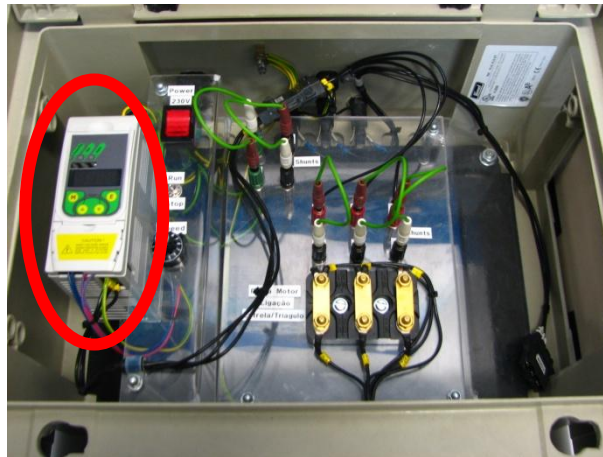


Figura 92 - Variador de frequência (vermelho) e caixa de ligações

**Coletor de dados:** Neste projeto os equipamentos utilizados na recolha de dados também os analisavam.

Analizador de vibrações: CSI 2130 Machinery Health™



Figura 93 – Analizador de vibrações

Analizador de dados de corrente: PDMA com Modulo MCE e EMAX, equipamento para adquirir dados e tratamentos de dados.



Figura 94 - Analisador de corrente (PDNA)

Analizador de dados termográficos: PDMA com Modulo MCE e EMAX, equipamento para adquirir dados e tratamentos de dados.

Analizador de termografia: Camara Cantronic IR980



Figura 95 - Analisador de termografia

### Outros equipamentos

Lâmpada estroboscópica: Rheintacho modelo Pocket Strobe Rolux

## 6.2 RESULTADOS OBTIDOS

Neste item estão os resultados adquiridos pelos três analisadores, em cada dano e por tecnologia serão expostos três EF no mínimo, um a indicar o que se espera obter, o motor saudável e o do dano provocado. Mediante a especificidade de cada dano surgirá outros espetros, por exemplo com carga, sem carga e tabelas.

Na parte experimental houve vários constrangimentos, que apesar de dificultarem a análise, servem de amostra com o que acontece na realidade:

Ruídos alheios ao dano provocado, detetados na análise. Exemplo disso é a frequência que se situa entre os 7,5 e os 8Hz que aparece, na maioria dos EF de vibrómetria, este deve-se à reposta da mesa de trabalho à excitação provocada pelo motor.

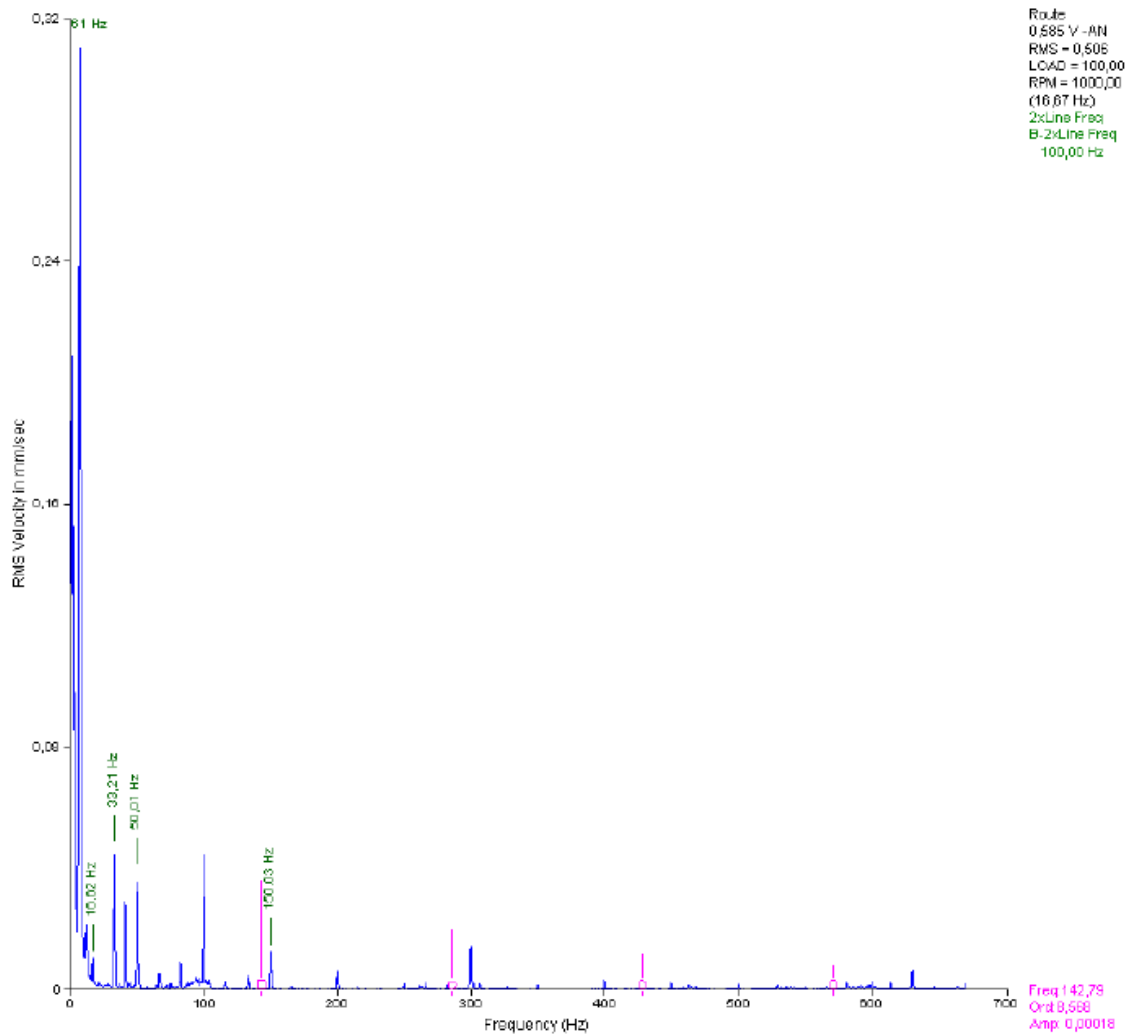


Figura 96 - EF do ruído provocado pela bancada de trabalho

A Figura 96 representa o EF da bancada onde estava a maquete de simulação, a harmónica com maior energia, é a de 7,61Hz, com amplitude cerca de 4 vezes superior a seguinte. De reparar que a velocidade de rotação 16,62Hz fica “esbatida” no ruído, apenas a sua segunda harmónica e as da rede se destacam, estas são as frequências padrão para problemas de desaperto ou folgas, exemplo é a “pata coxa”.

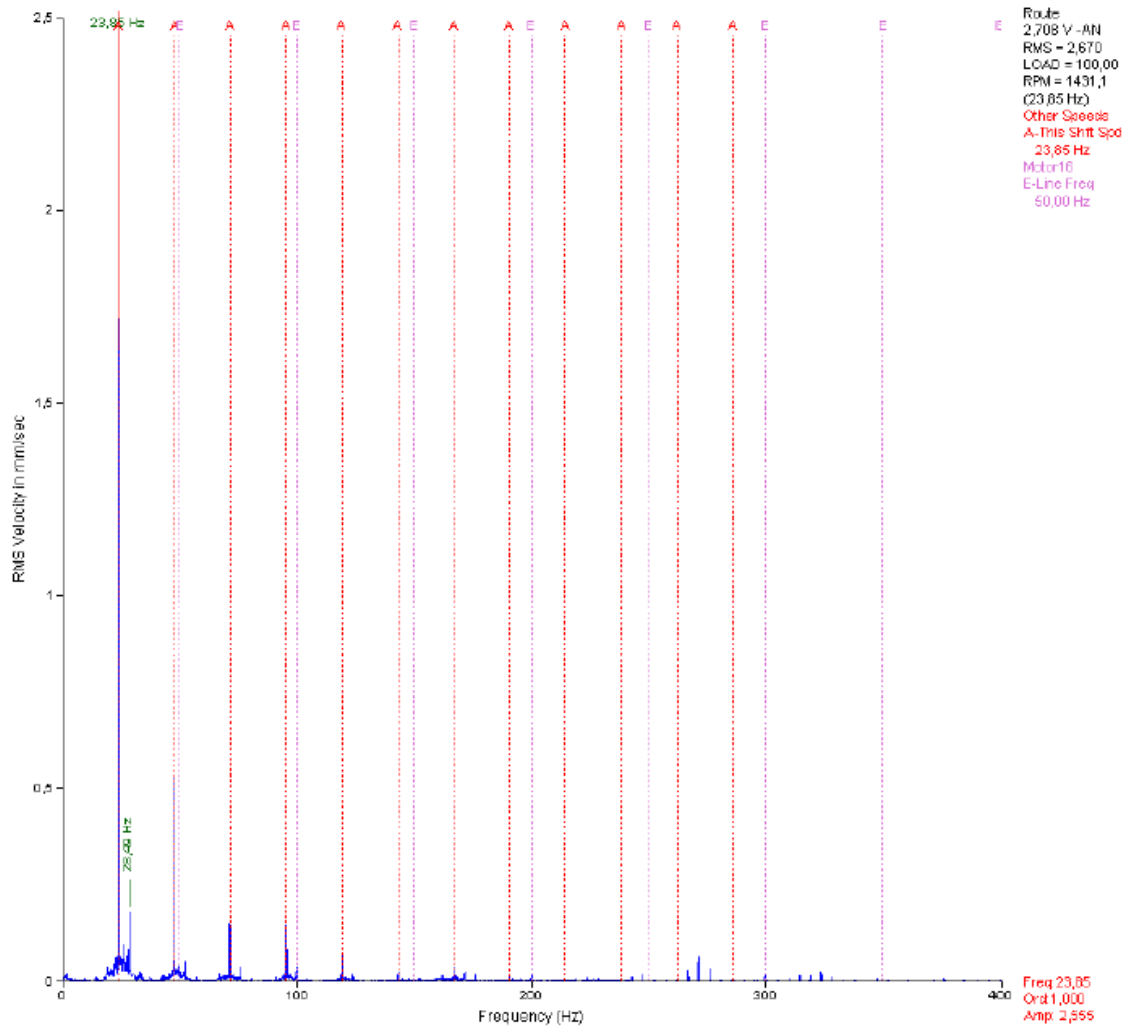


Figura 97 - Exemplo de EF quando a maquete foi colocada no chão

Na tentativa de diminuir o ruído, colocou-se a maquete no chão e a diferença nas baixas frequências é notória, desapareceu a frequência da mesa e grande parte do ruído. No entanto surgiu outro incómodo, sempre que alguma viatura passava em frente ao edifício sentia-se o chão estremecer, logo essas aquisições tinham de ser repetidas.

A carga a que os motores estavam sujeitos era quantificada pela amperagem, o que se verificou ser um indicador pouco preciso, devido à variação da corrente e à variação da carga (freio de Foucault) com a temperatura.

## 6.2.1 Barras partidas

Para simular este defeito utilizou-se um modelo didático em que quatro barras no rotor foram rompidas tal como pode ser visto na Figura 98.

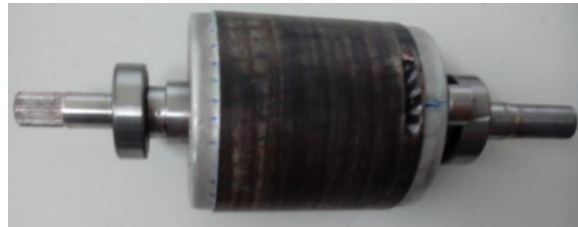


Figura 98 – Rotor com quatro barras partidas

### 6.2.1.1 Análise de Vibrações

O EF que se espera obter é:

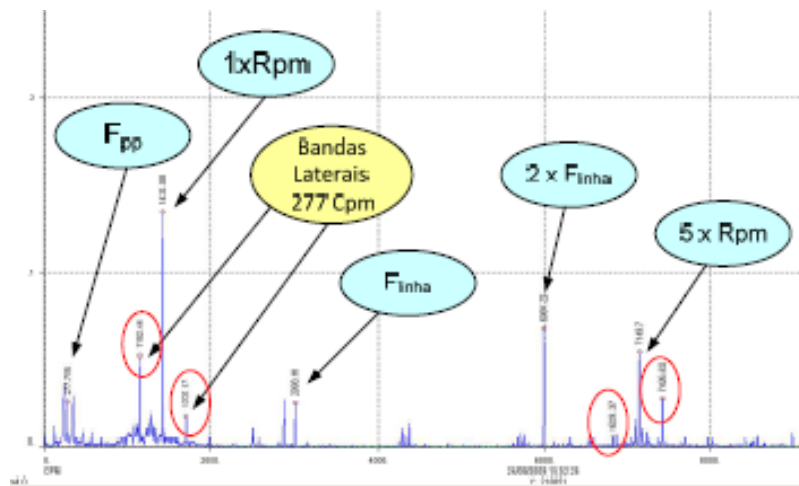


Figura 99 - Motor com duas barras partidas e em carga [8]

Resultados experimentais:

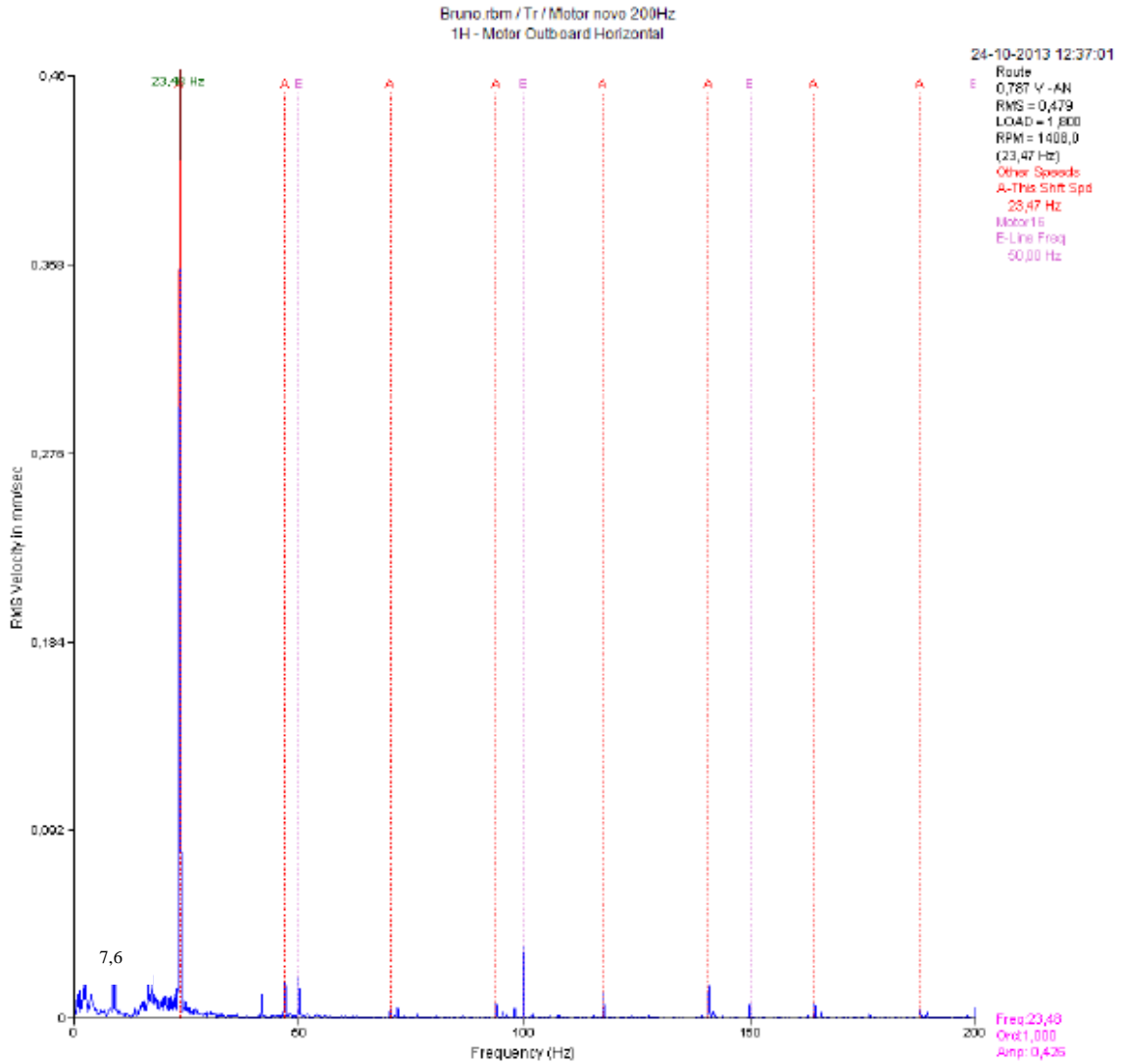


Figura 100- Motor saudável em carga

A figura acima representa um motor saudável em que é predominante a velocidade do veio, a amplitude é cerca de 5 vezes superior às restantes, as suas harmónicas estão representadas pela letra "A", enquanto a letra "E" representa as harmónicas da frequência de alimentação. De salientar que no espetro acima está presente o ruído da bancada de trabalho a frequência de 7,6Hz.

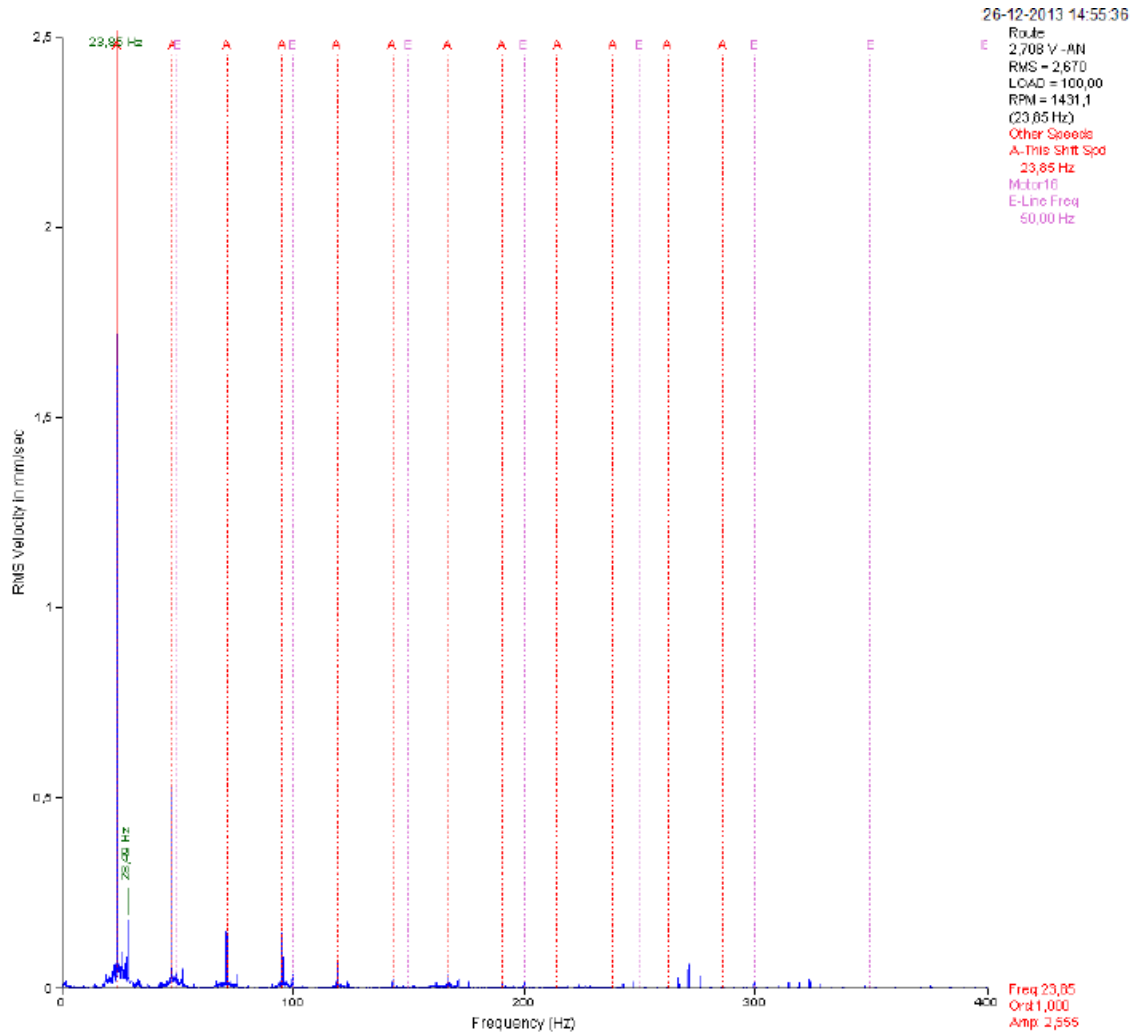


Figura 101 - EF de um motor c/4 barras partidas em carga

A diferença entre a Figura 101 e a Figura 102 são as unidades, a Figura 101 serve apenas para comparar amplitudes com a Figura 100. E nota-se que o motor com dano as amplitudes de rotação são 6 vezes superiores ao saudável, a segunda harmónica da frequência de alimentação é 7 vezes superior.

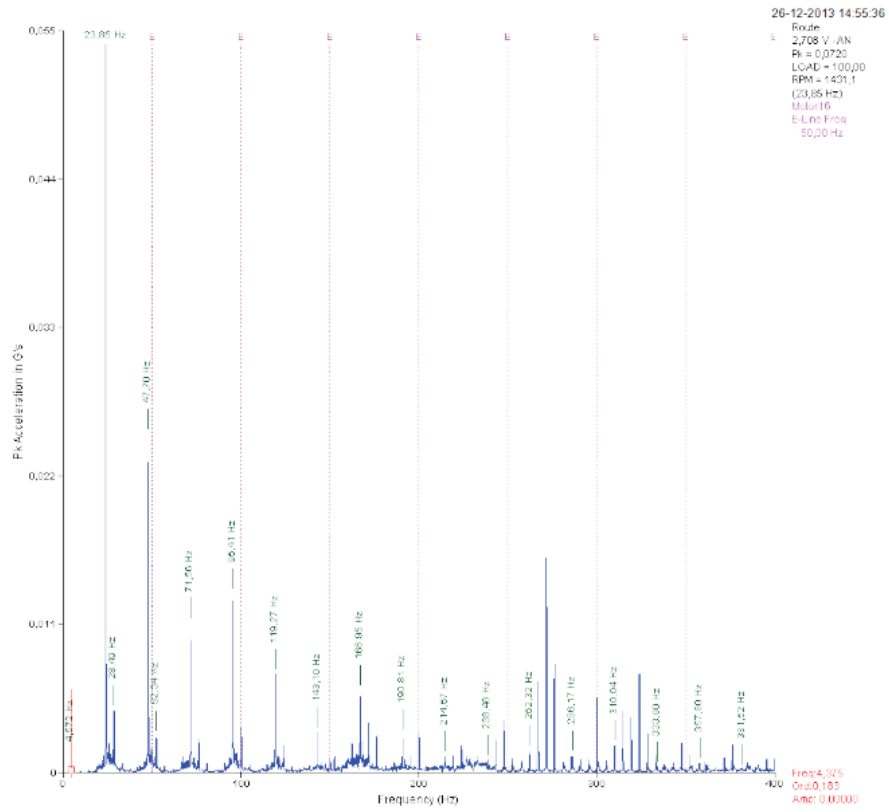


Figura 102 - EF de um motor c/4 barras partidas em carga

O EF da Figura 102 foi adquirido em aceleração para as frequências superiores não ficarem esbatidas. Para a rotação de 23,85 Hz, obtêm-se as frequências padrão da passagem dos polos (FPPO), 4,6Hz, que não é visível, no entanto as harmónicas da velocidade de rotação apresentam a banda à sua esquerda espaçada a FPPO e a frequência de alimentação com as suas harmónicas também estão presentes, indicadas pela letra “E”. Conclui-se que existe dano no motor mas existem diferenças entre as frequências padrão esperadas e as obtidas.

### 6.2.1.2 Análise de Corrente

O EF que se espera obter é:

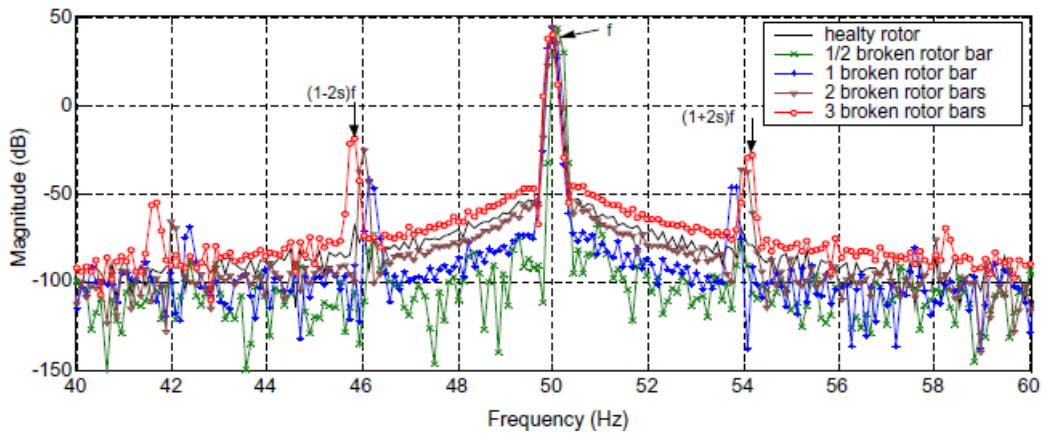


Figura 103 - Comparação do EF de análise de corrente de um motor saudável até 3 barras partidas

Resultados experimentais:

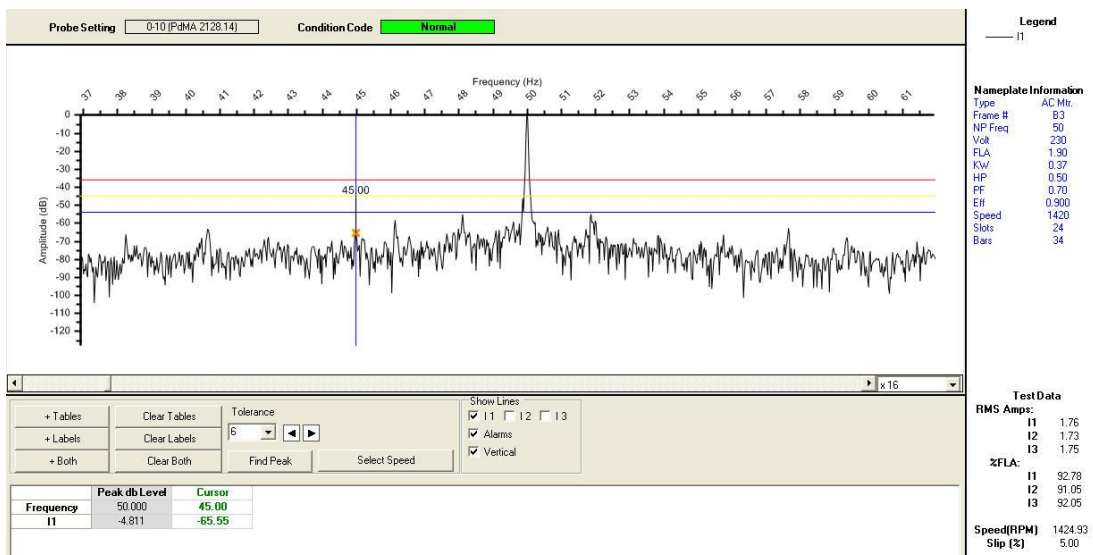


Figura 104 - Excentricidade de motor sem defeito

O referido neste parágrafo é válido para todos os espectros de análise de corrente, em todos eles estarão três linhas de nível de alerta, azul, amarelo e vermelha. Antes da linha amarela considera-se que o equipamento não possui deficiências, acima desta deve de ser agendada uma intervenção, se ultrapassar a linha vermelha o dano é severo e o equipamento deve de ser intervencionado logo que seja possível.

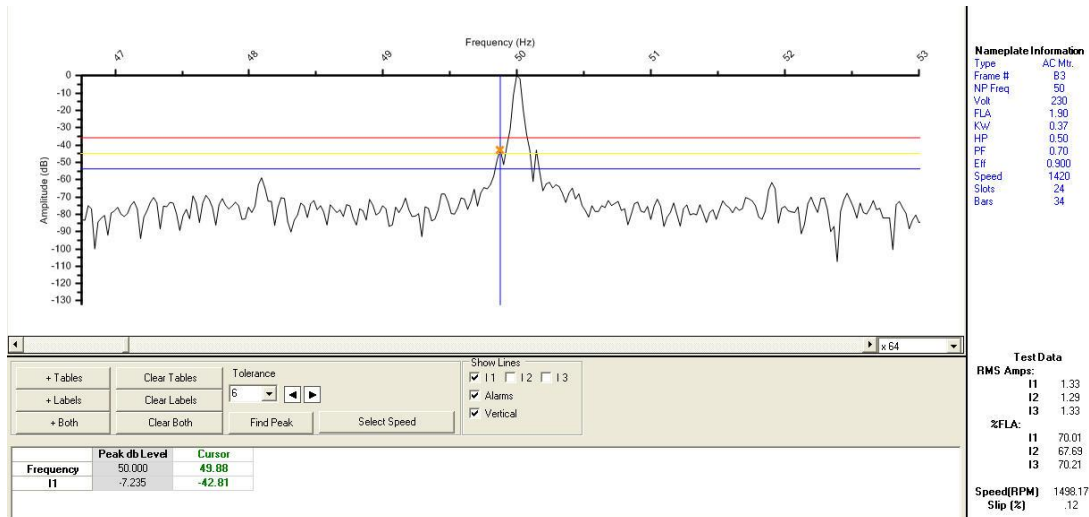


Figura 105 - Motor com defeito sem carga

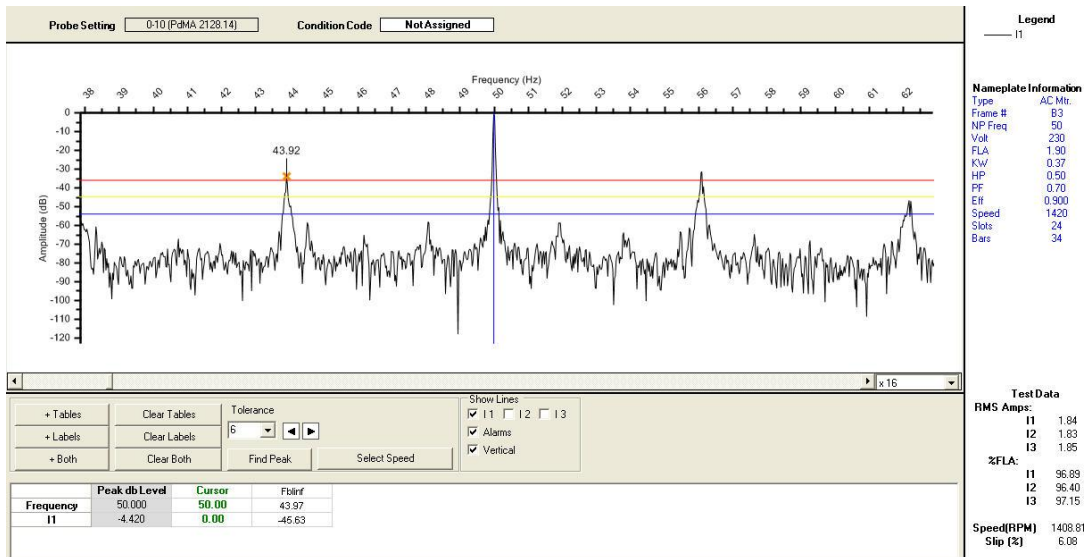


Figura 106 - Motor com defeito em carga

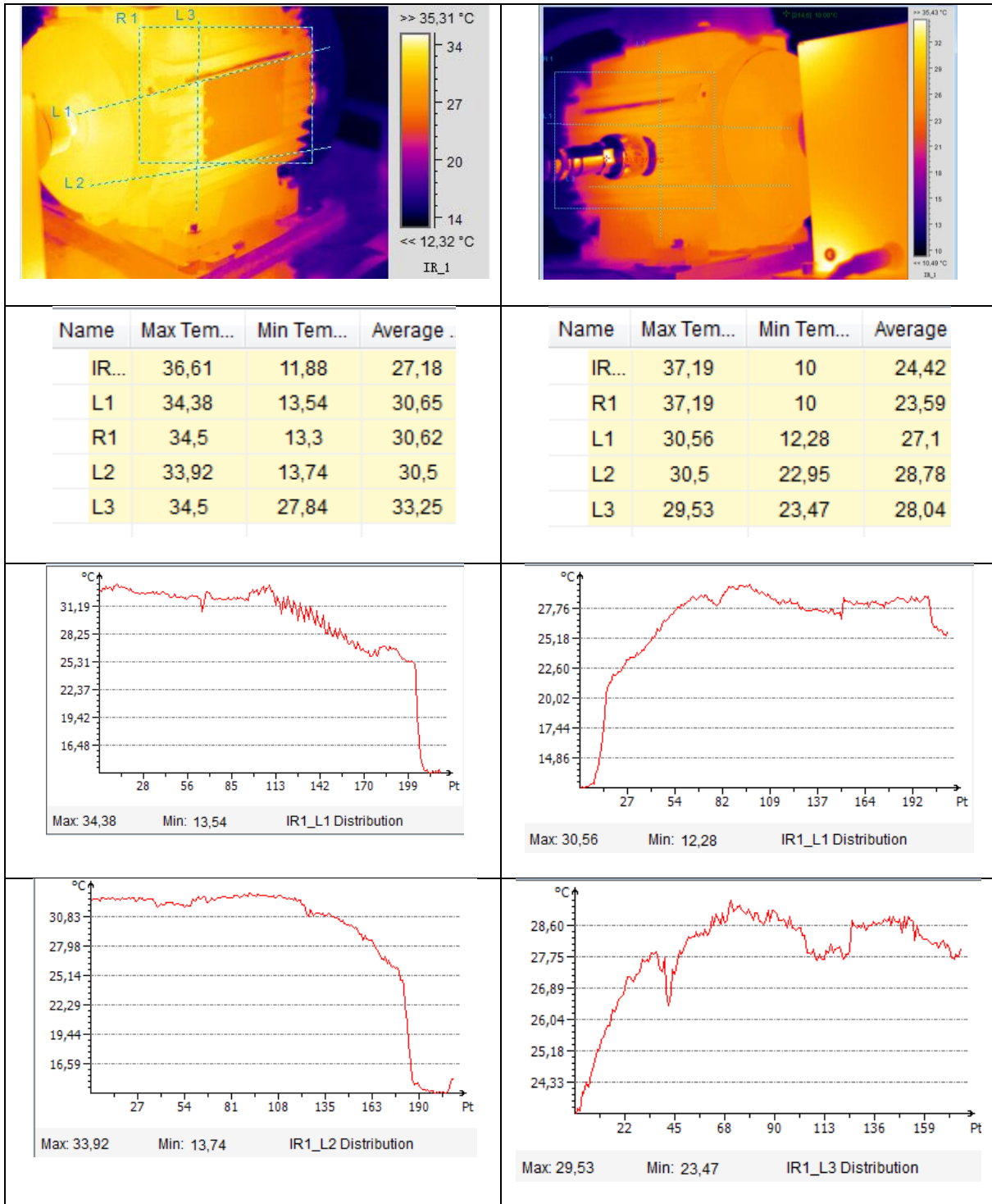
Nas duas figuras anteriores é visível o dano, em que o equipamento utilizado de modo automático coloca os níveis de alerta, ao centro a frequência de alimentação com bandas laterais espaçadas de acordo com os valores teóricos.

$$FBL1 := LF \cdot (1 - 2 \cdot s) = 43.921$$

$$FBL2 := LF \cdot (1 + 2 \cdot s) = 56.079$$

O facto de na Figura 105 o espaçamento entre as bandas ser pequeno deve-se a velocidade de escorregamento, que é proporcional à carga, ser diminuta por o motor estar a trabalhar em vazio (sem carga).

### 6.2.1.3 Análise de termográfica



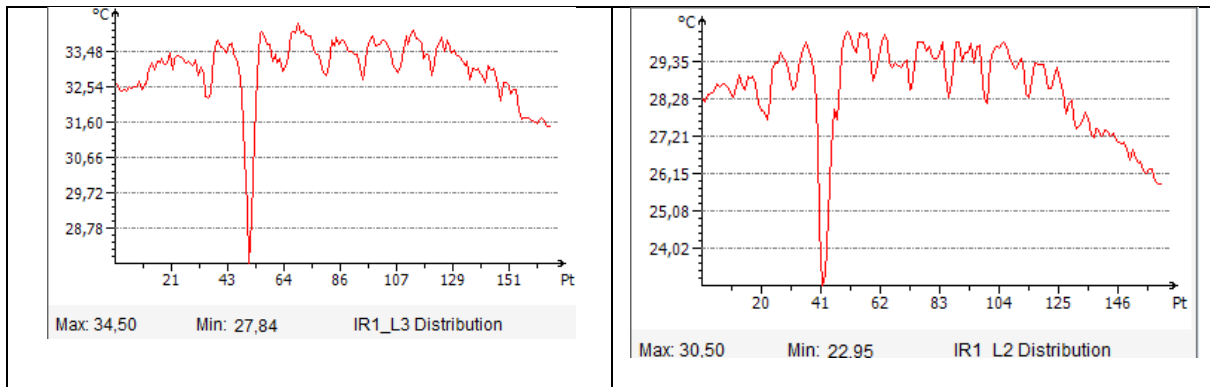


Figura 107- Imagem térmica de motor saudável em carga

Na Figura 107 as linhas estão ordenadas no motor saudável, L1, L2, etc. no de barras partidas colocou-se a linha semelhante. Da comparação dos dois espetros, o motor saudável apresenta sempre uma temperatura superior à daquele que têm o dano, podendo-se concluir que a termografia não detetou o dano severo provocado no rotor, talvez devido a constrangimentos.

### 6.2.2 Dano na pista exterior do rolamento

O objetivo de provocar um dano na pista exterior do rolamento do lado de ataque (SKF 6202) sem ferir outro elemento, foi conseguido através de uma caneta elétrica, sem outra forma encontrada para demonstrar o dano na Figura 108, tentou-se reproduzir um semelhante na pista interior de um rolamento para dar a perceção do defeito.



Figura 108 - Visualização de dano semelhante ao do rolamento

### 6.2.2.1 Análise de Vibrações

O EF que se espera obter é:

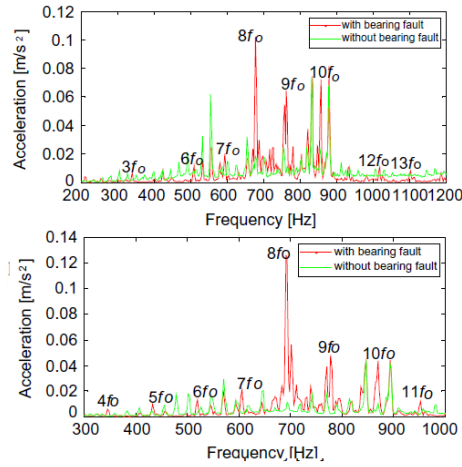


Figura 109 - Comparação entre motor saudável e c/dano em relação ao carregamento [11]

De referir que na figura acima o valor com carga máxima do EF do topo, apesar de a amplitude ser inferior, é em carga e o de baixo é sem carga.

Resultados experimentais:

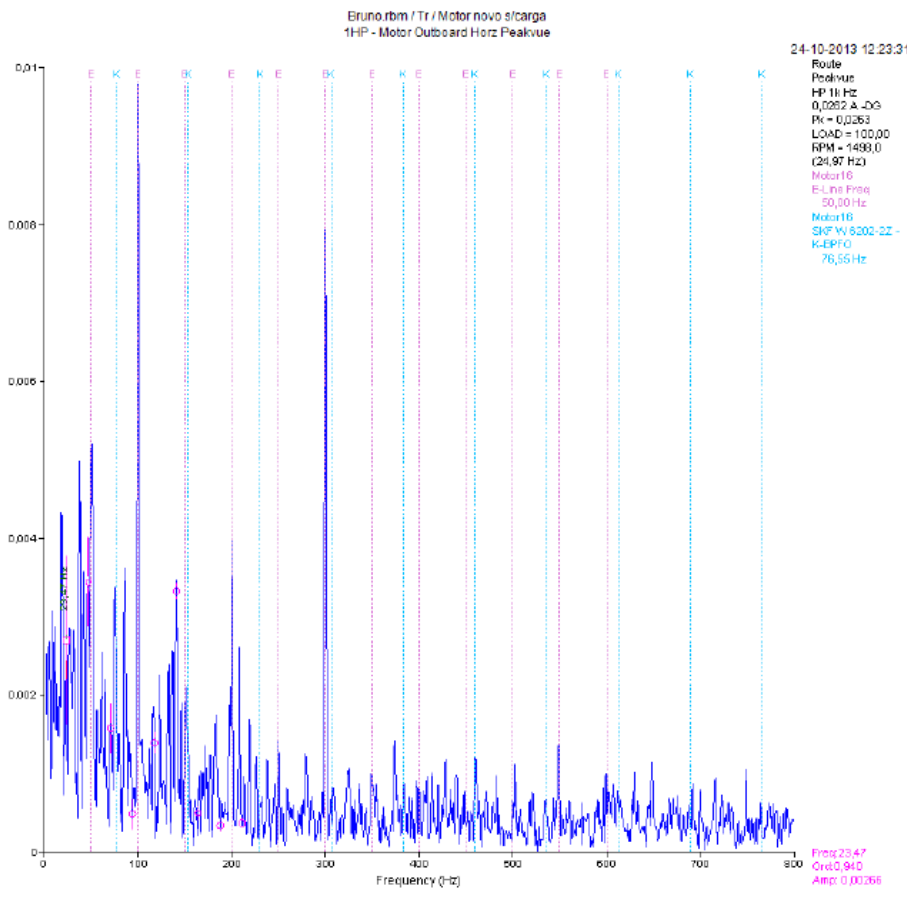


Figura 110 - Motor saudável em peakvue sem carga

A Figura 110 está em peakvue que é um parâmetro específico desenvolvido pelo fabricante do aparelho para se visualizar defeitos em rolamentos ou engrenagens a unidade de medida é g's. No espetro a letra “K”, a azul-bebé, representa o dano na pista exterior do rolamento e a letra “E”, a violeta, é a frequência da rede.

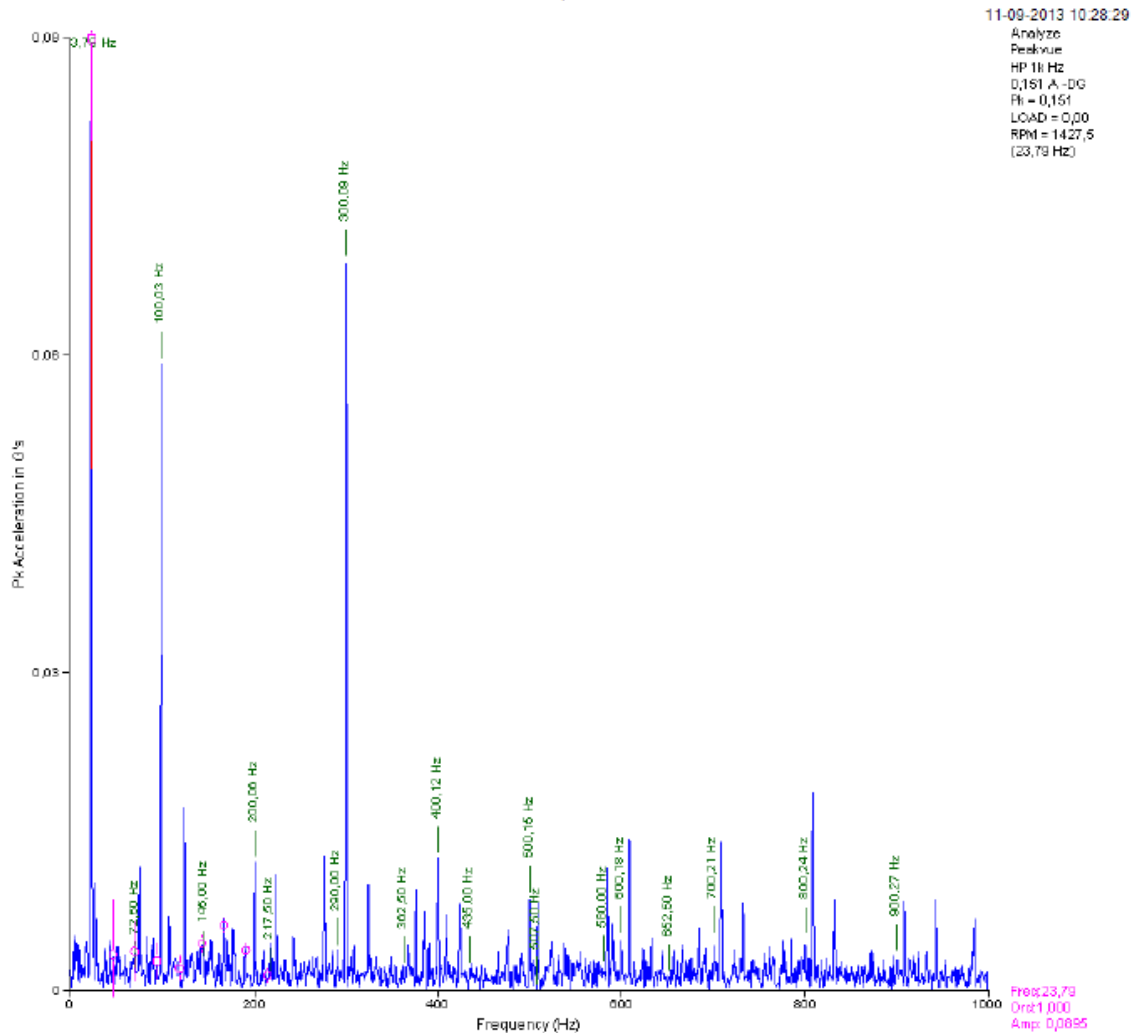


Figura 111 - Defeito no rolamento em carga

O motor gira a 23,79 hz, calculando as frequências padrão para este dano, na própria frequência de rotação houve um ligeiro aumento da amplitude e a frequência de dano na pista exterior do rolamento, retirado da base de dados do programa de análise, que é  $3,04999 \times 23,79 = 72,56$ , na Figura 111 verificamos que esta harmónica e as suas sub-harmónicas confundem-se, ou são ruído. Visíveis são as frequências de alimentação mas estas devem-se aos constrangimentos. Conclui-se que não existe evidência do dano, como tal, este necessitou de ser agravado.

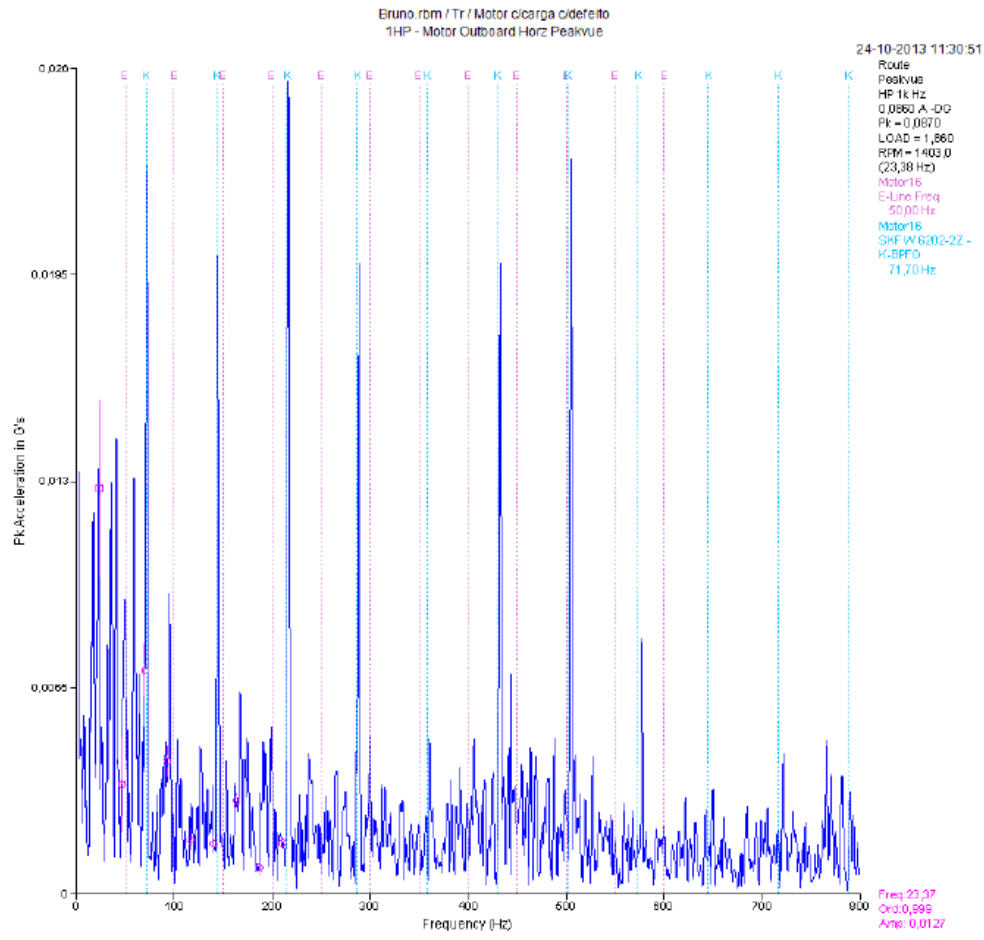


Figura 112 - Motor com defeito no rolamento agravado em carga

No espetro acima o “K” que representa o defeito na pista exterior do rolamento em que a primeira harmónica tem o valor de 71,07hz com as subarmónicas, sendo que a de maior amplitude é a “7X” ao contrário da Figura 109 que indica ser a 8ª subarmónica.

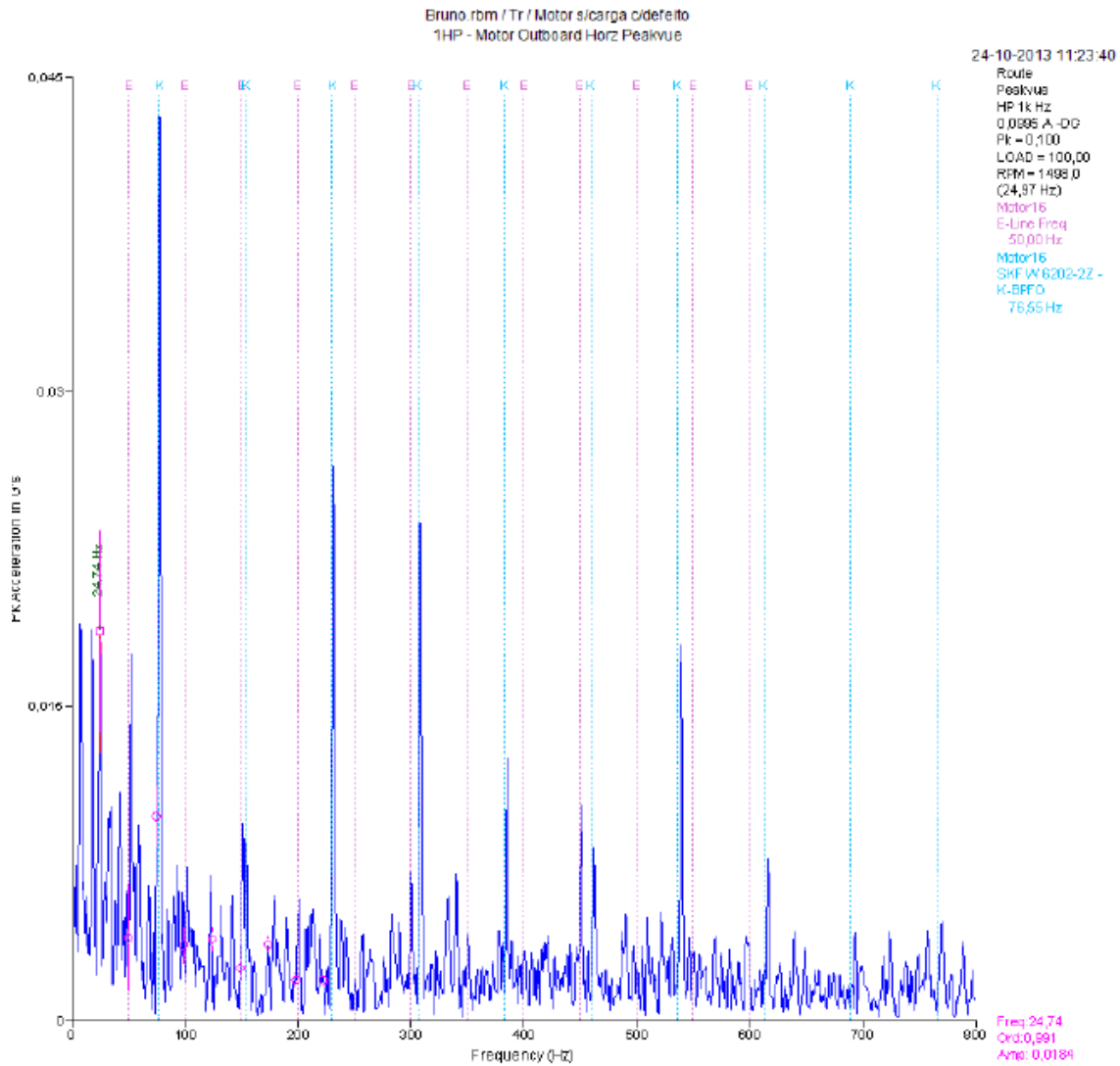


Figura 113 - Motor com defeito no rolamento agravado sem carga

No espectro acima convém frisar que o dano no rolamento têm maior visibilidade sem carga, este facto está de acordo com o esperado. O diagnóstico é conclusivo, existe dano e situa-se na pista exterior do rolamento.

### 6.2.2.2 Análise corrente

O EF que se espera obter é:

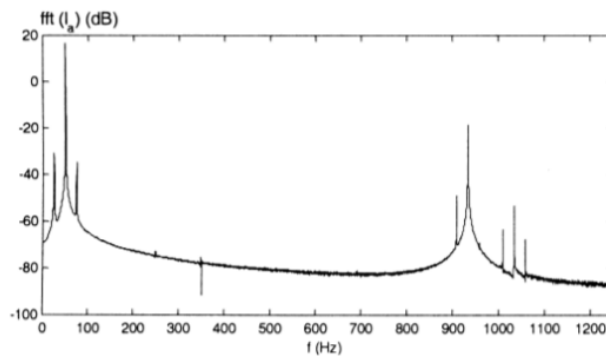


Figura 114 - EF de um motor com excentricidade [32]

A Figura 114 representa o EF padrão para o dano da excentricidade a baixas e a altas frequências.

Resultados experimentais:

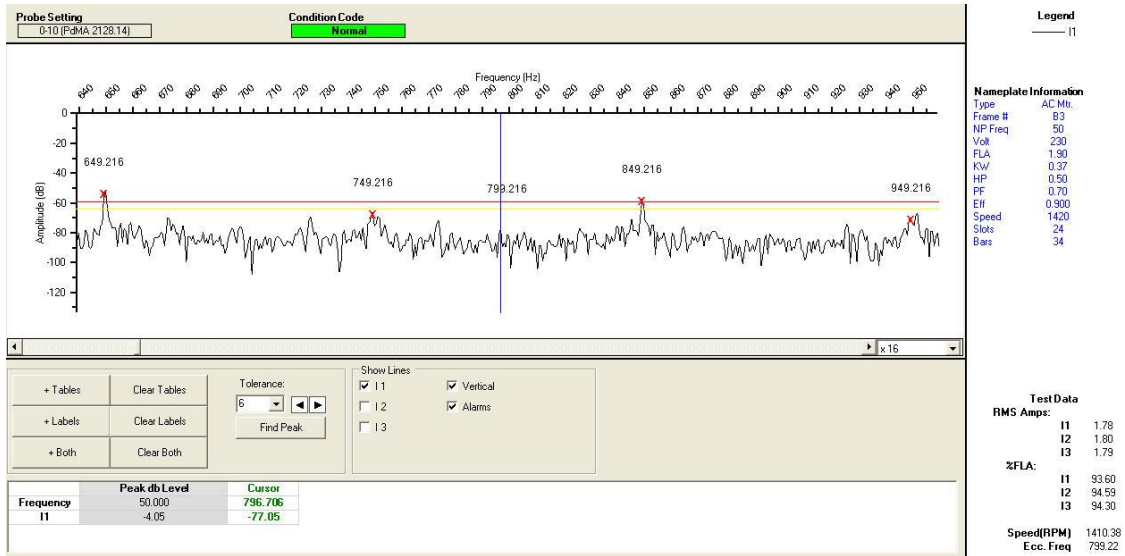


Figura 115 - Excentricidade de motor sem defeito em carga a alta frequência

Na Figura 115 apenas a banda lateral do lado direito da frequência das barras ( $34 \times 1410 / 60 = 799$ ) chega à linha vermelha, denota-se dano mas este é tolerável, para ser um problema de excentricidade deveriam tanto a frequência central como as bandas ficar perto ou ultrapassar a linha de nível.

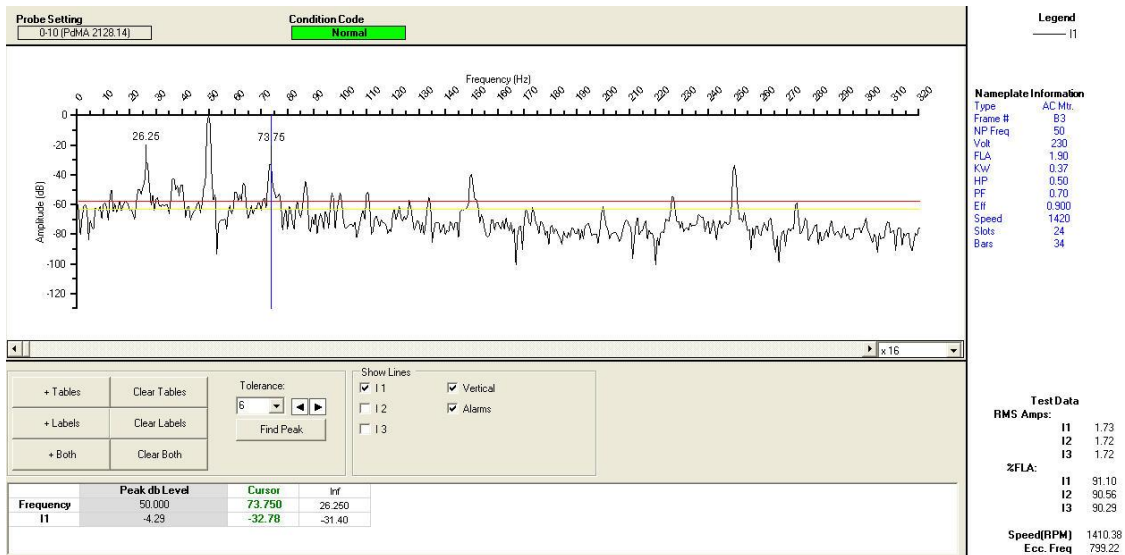


Figura 116 - Excentricidade de motor sem defeito em carga a baixa frequência

A baixa frequência representa a excentricidade estática em que o valor central é a frequência da rede com bandas laterais a frequência de rotação, embora seja notório as bandas laterais, que não era previsto para um motor novo, a linha vermelha está ao nível do ruído, significando que a sua expressão é pequena.

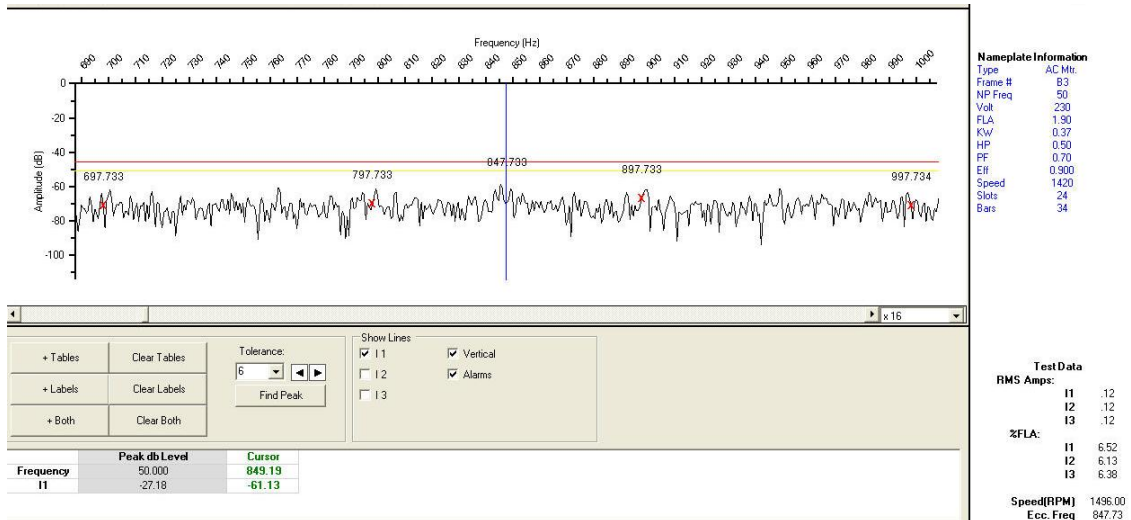


Figura 117 - Motor com defeito sem carga

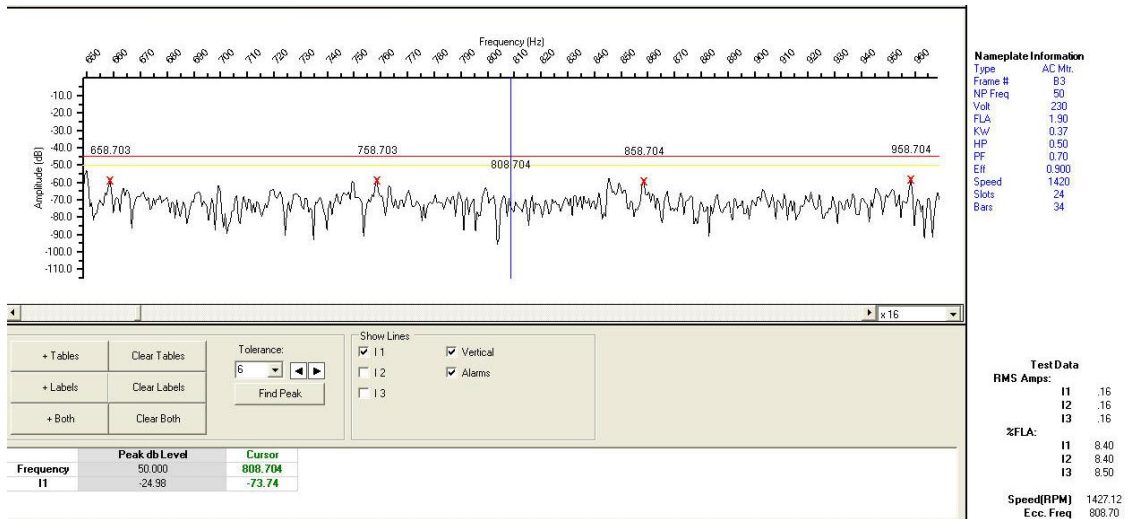


Figura 118 - Motor com defeito em carga

As duas figuras anteriores referem-se a um motor com excentricidade dinâmica, na Figura 117 está sem carga enquanto na Figura 118 têm carga, em ambas, as frequências padrão estão mergulhadas no ruído, embora no caso do motor sem carga as bandas laterais estejam mais salientes. Na comparação com o EF do motor saudável pode-se concluir que não há defeitos.

## Motor com o defeito no rolamento agravado



Figura 119 - Motor com defeito agravado sem carga

Após se agravar o dano no rolamento o EF apresenta valores padrão em que as três harmónicas estão perto da linha vermelha. Ao contrário do motor saudável em que a frequência de passagem das barras está mergulhada em ruído.

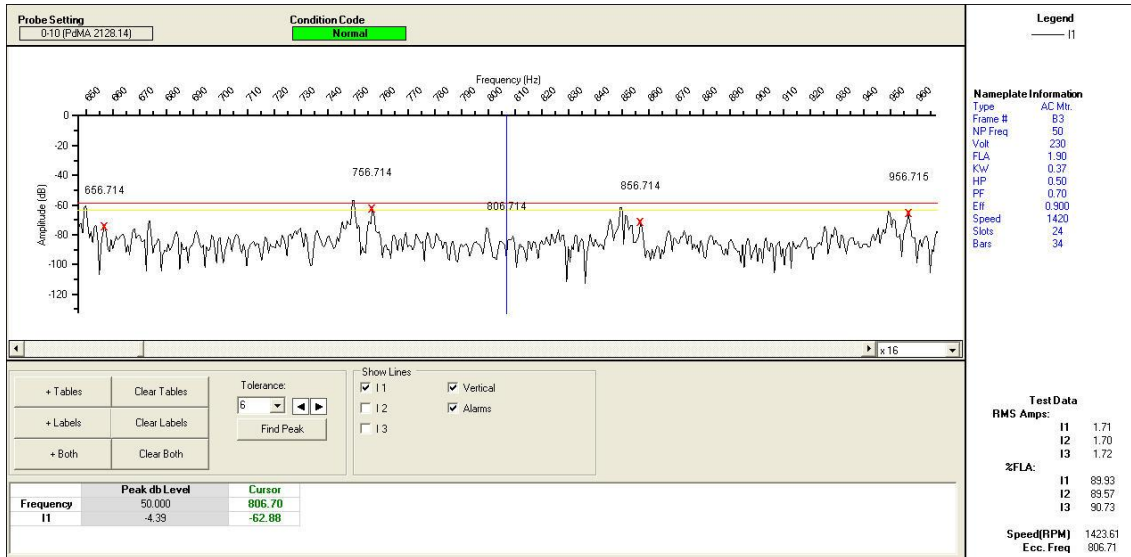


Figura 120 - Motor com defeito agravado em carga

No caso da Figura 120 desapareceu a harmónica da passagem das barras e o ruído “aumentou”, o EF não apresenta as frequências padrão o que é normal porque no caso dos danos relacionados com folgas a carga diminui a “visibilidade” do dano.

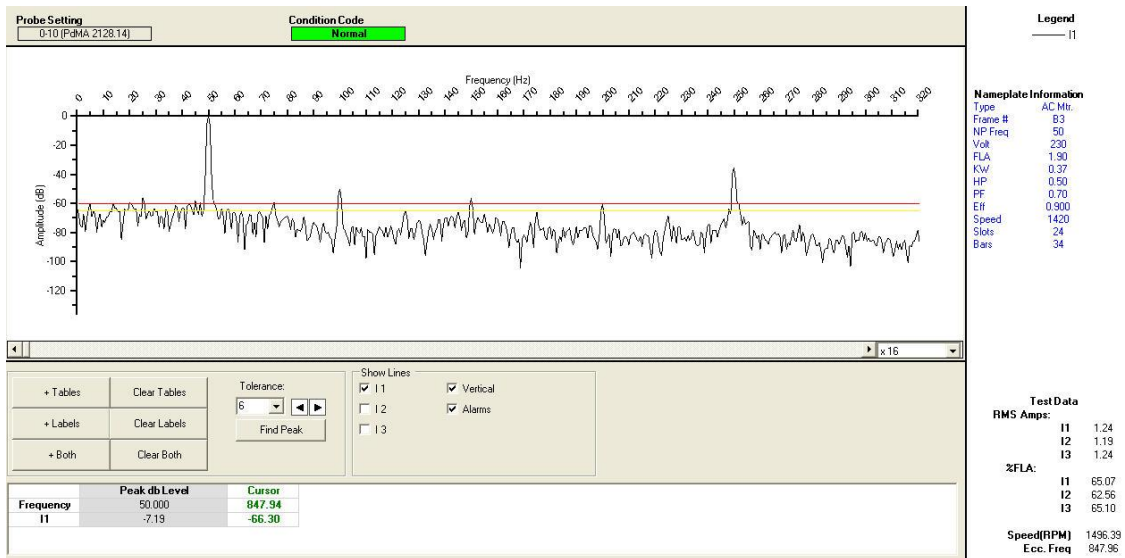


Figura 121 - Motor com defeito agravado sem carga a baixa frequência

Na Figura 121 as bandas laterais estão submersas em ruído o que representa a ausência de excentricidade estática.

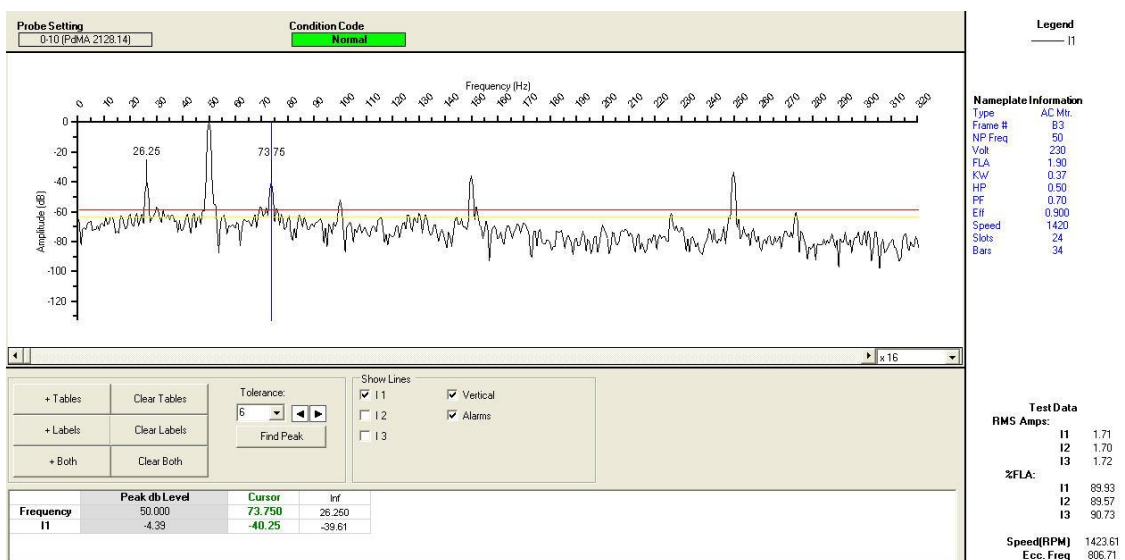
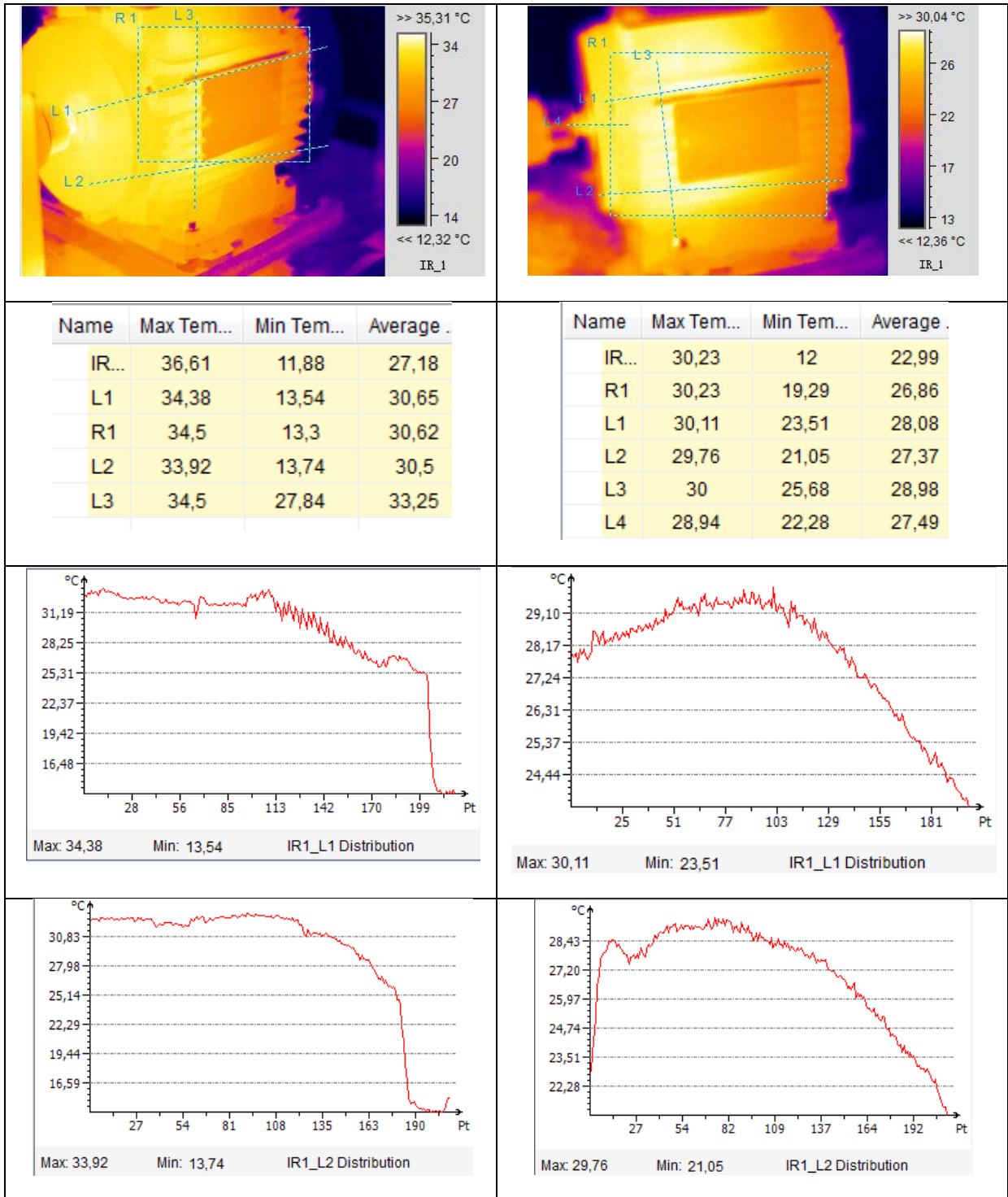


Figura 122- Motor com defeito agravado em carga a baixa frequência

A adição de carga ao motor diminuiu a “visibilidade” da excentricidade dinâmica mas salientou a estática, em relação EF do motor saudável houve uma diminuição do ruído, apesar de pouco significativa. O agravamento do dano foi evidenciado pelos EF em que é mais notório na excentricidade dinâmica para o caso do motor sem carga, a estática era esperado mais do que um ténue abaixar do ruído. Nota-se que existe um dano na sua fase incipiente mas não se consegue localizar.

### 6.2.2.3 Análise de termográfica



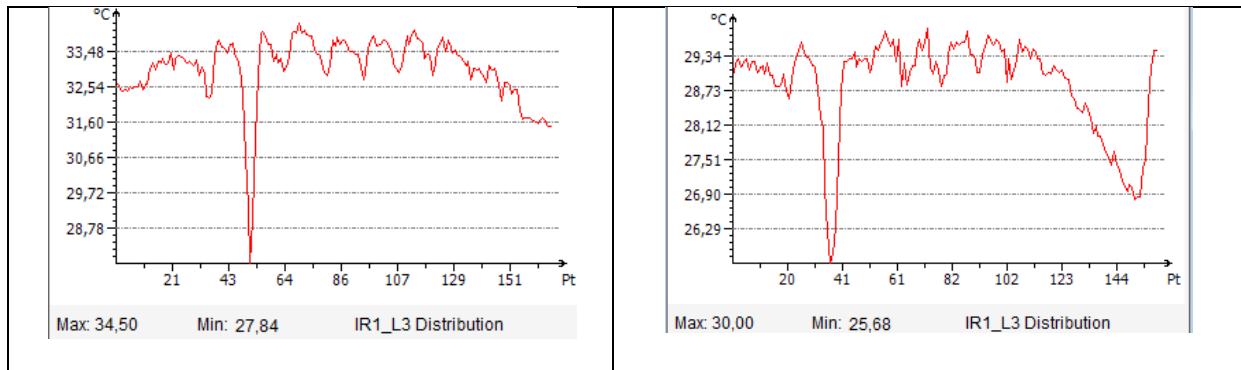


Figura 123 - Motor saudável à esquerda e com defeito à direita

Na Figura 123 estão representados dados de imagens térmicas, em que a temperatura é mais elevada no motor saudável.

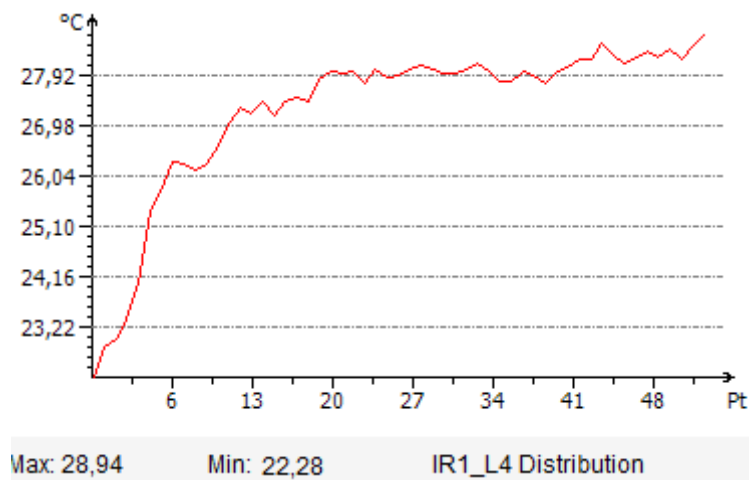


Figura 124 - Linha L4 do motor com dano na pista exterior do rolamento

A linha L1, no espetro do motor saudável, apresenta uma temperatura máxima de 34,38 graus e pelo gráfico da distribuição de temperatura indica-nos que esta se encontra no seu começo, que é na zona da caixa do rolamento, enquanto a temperatura, no motor com dano, visto pela sua distribuição está abaixo dos 26graus. Conclui-se assim que através da termografia o dano não foi encontrado.

### 6.2.3 Curto-circuito no estator

O motor ABB foi utilizado para criar um modelo em que através de interruptores se curto-circuitavam espiras, no máximo três. Para cada uma das tecnologias teremos o motor com e sem carga até três curto-circuitos.

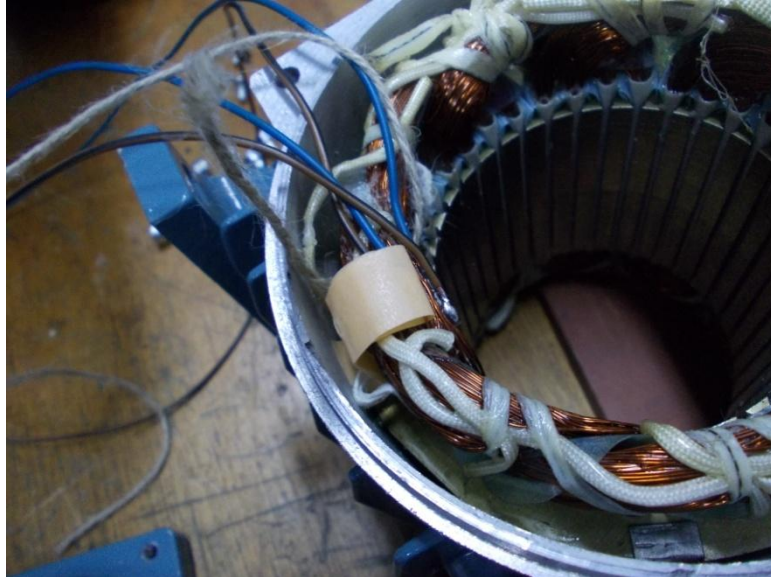


Figura 125 - Espiras em curto-circuito

O objetivo é simular a quebra (ou falha) no isolamento, para isso as espiras onde se provocou o curto-circuito estão localizadas na mesma zona, na frente, parte de baixo do motor (como demonstra a imagem da Figura 125), não havendo a preocupação de saber o que ia afetar, se duas espiras consecutivas, se o mesmo enrolamento, etc.

#### 6.2.3.1 Análise de Vibrações

O que se espera obter:

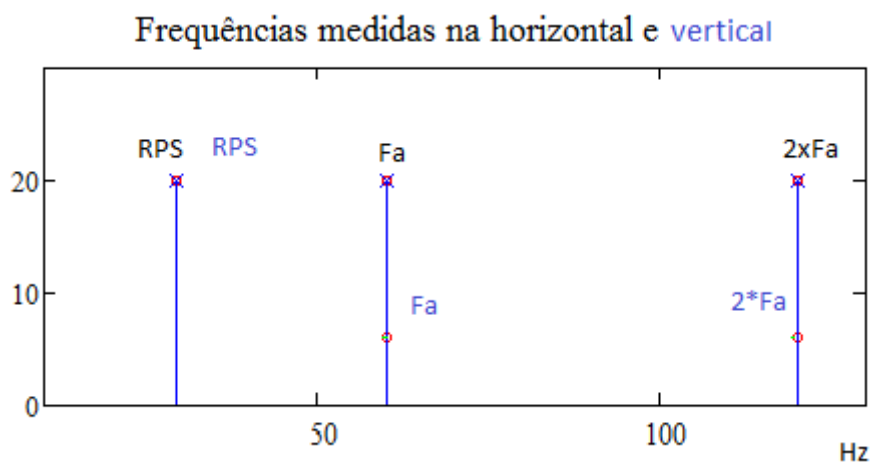


Figura 126 - Espectro padrão de motor em curto-circuito

Resultados experimentais:

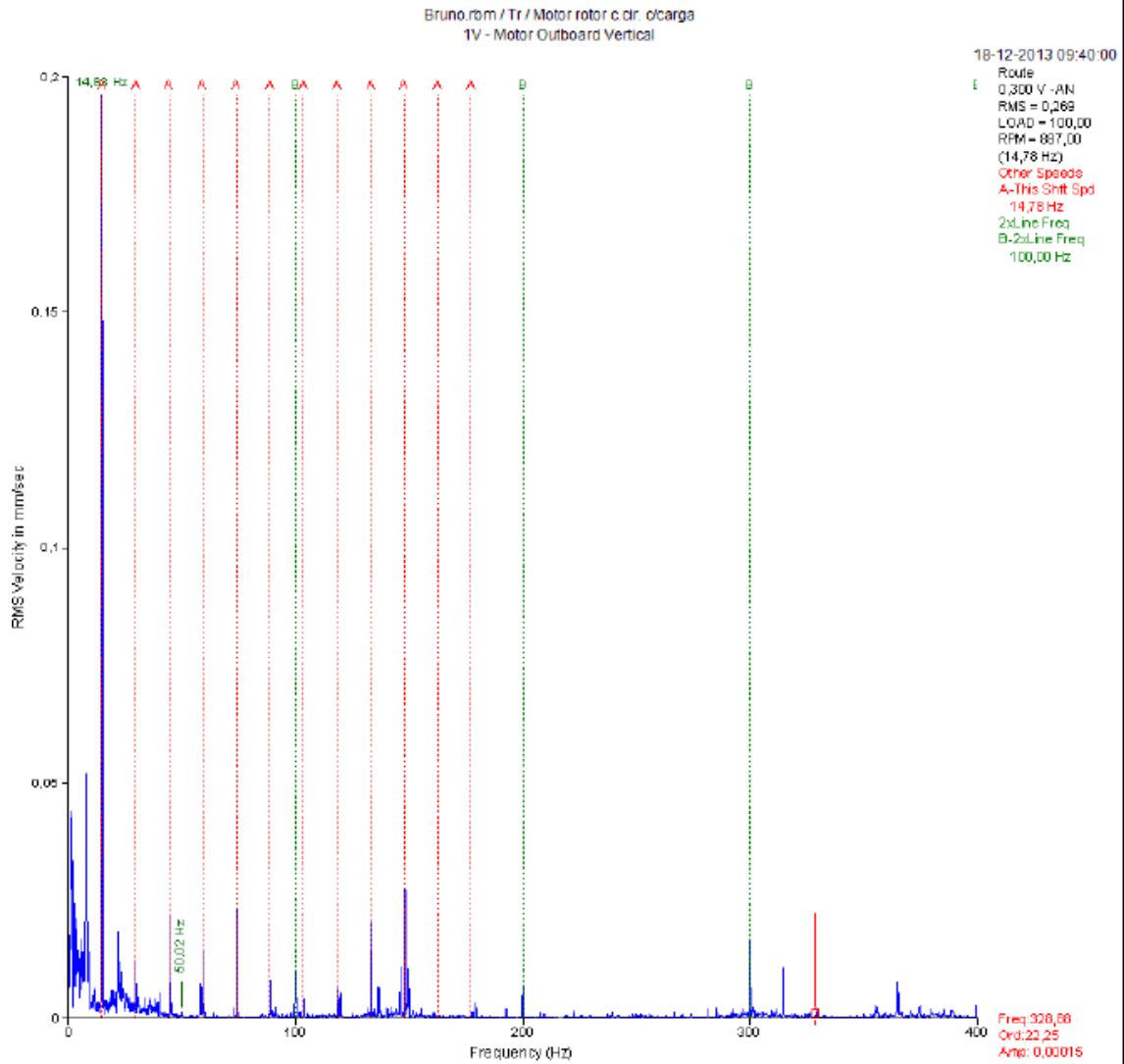


Figura 127 - Motor saudável em carga vertical

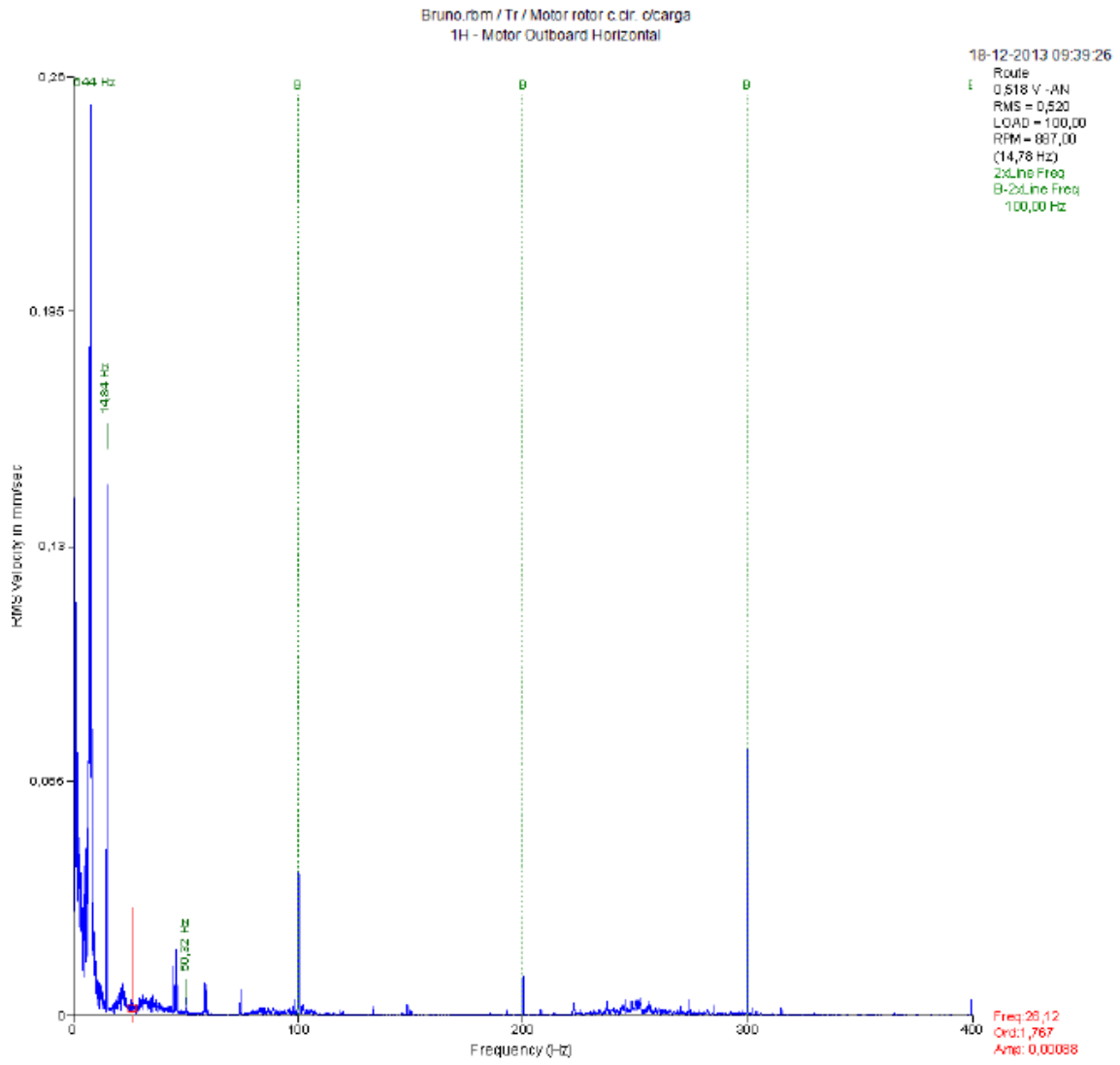


Figura 128 -Motor saudável em carga horizontal

Nos dois espetros anteriores, as amplitudes de rotação são próximas, enquanto as subarmónicas da frequência de alimentação na “horizontal” são cerca de duas vezes superiores.

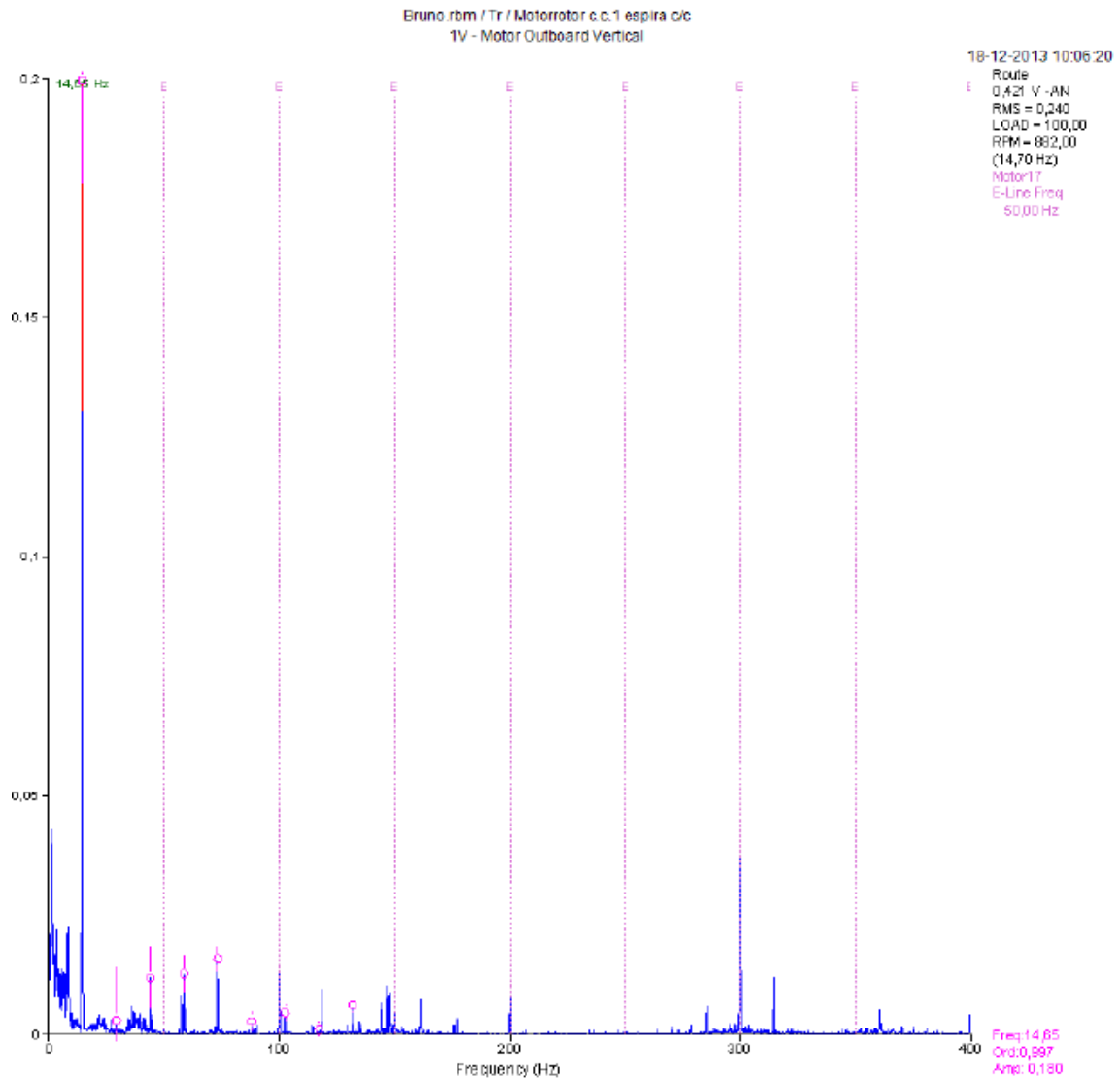


Figura 129 - Motor com uma espira em curto em carga vertical

Comparando a Figura 127 com Figura 129, na segunda a velocidade de rotação subiu 0,03 mm/s e a frequência da rede só à 6ª subarmónica é que subiu enquanto as restantes baixaram ou mantiveram-se.

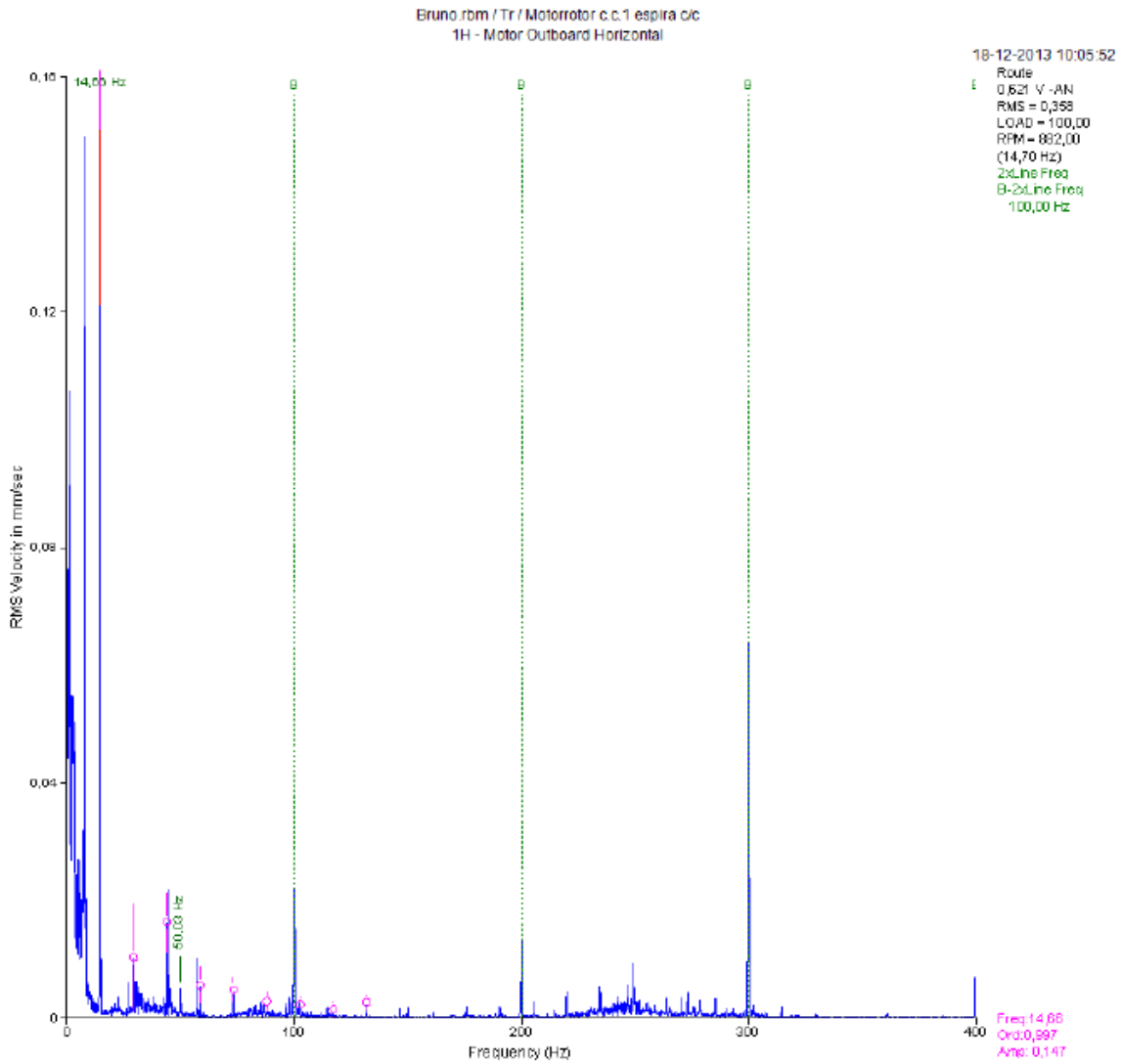


Figura 130 - Motor com uma espira em curto em carga horizontal

Comparando a Figura 128 com Figura 130 a velocidade de rotação e a frequência da rede mantiveram-se. As frequências que aparecem à esquerda da velocidade de rotação são ruído devido à instabilidade da bancada de trabalho, este têm maior visibilidade nos espectros horizontais.

Da comparação entre os espectros horizontal e vertical com uma espira em curto-circuito nota-se que na vertical a velocidade de rotação é mais elevada cerca 0,03mm/s e na horizontal a 6ª subarmónica contínua próxima do dobro, enquanto as restantes igualaram.

Para uma espira não se obteve um espectro do dano de acordo com o esperado, mas nota-se diferença no som do motor quando liga o interruptor.

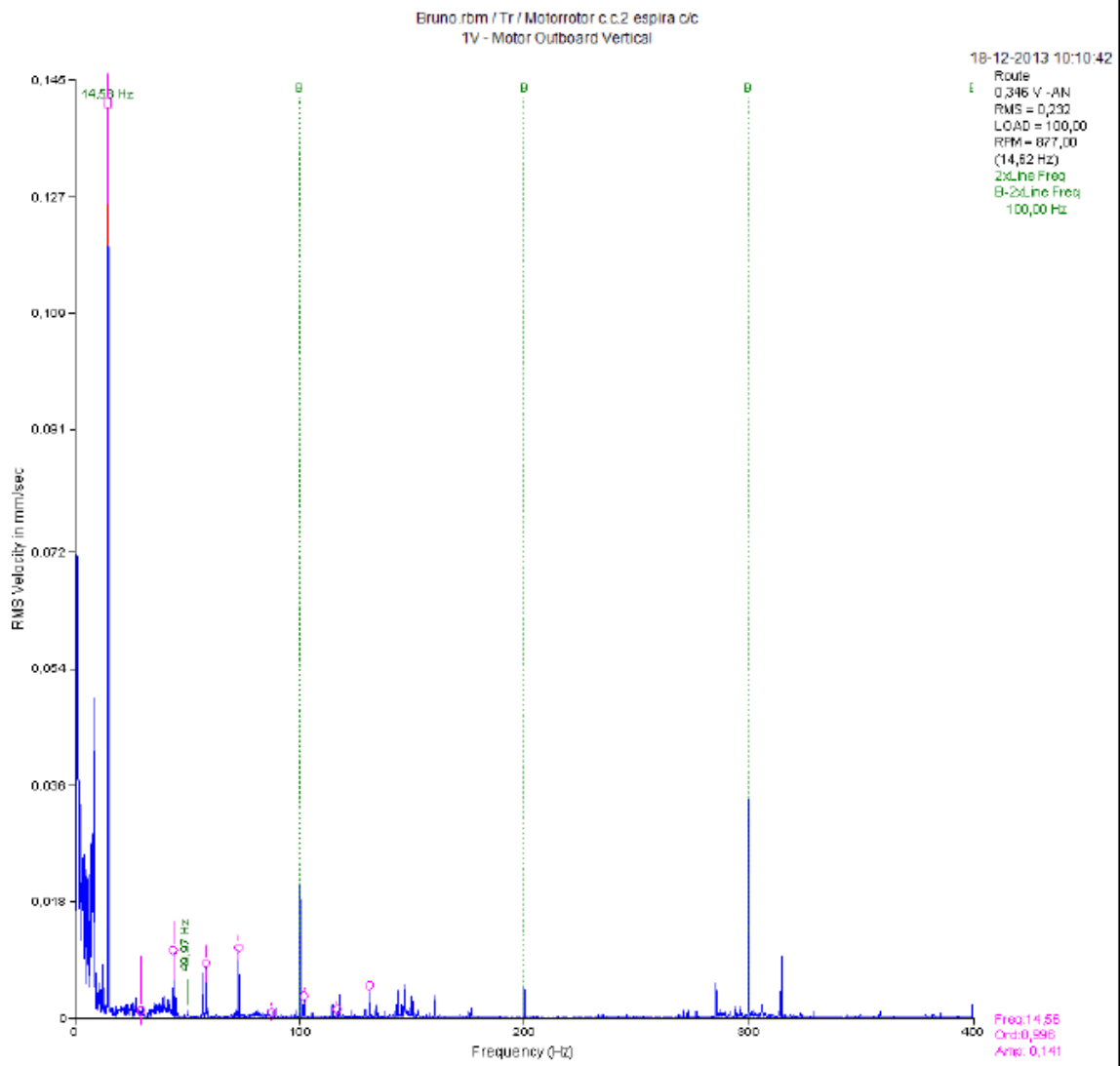


Figura 131 - Motor com duas espiras em curto e em carga vertical

A velocidade de rotação baixou em relação ao espectro anteriores deste dano, e a segunda e a sexta subarmónica deste dano aumentaram.

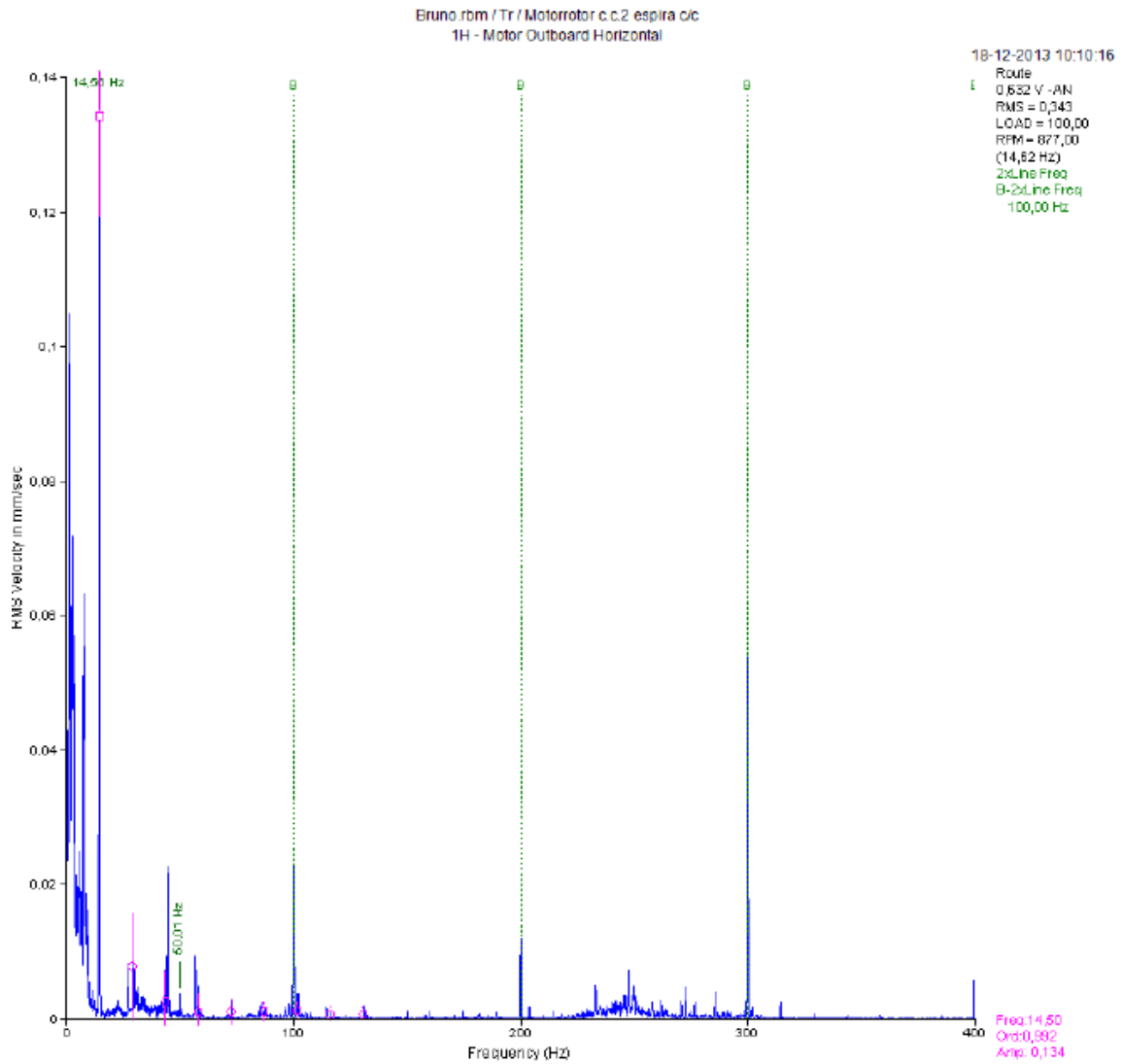


Figura 132 - Motor com duas espiras em curto e em carga horizontal

A velocidade de rotação baixou em relação ao motor sem dano enquanto harmónicas da frequência de alimentação se mantiveram.

Comparando os EF entre de duas espiras em curto só a 6ª harmónica da frequência de alimentação é maior na horizontal, as restantes são iguais.

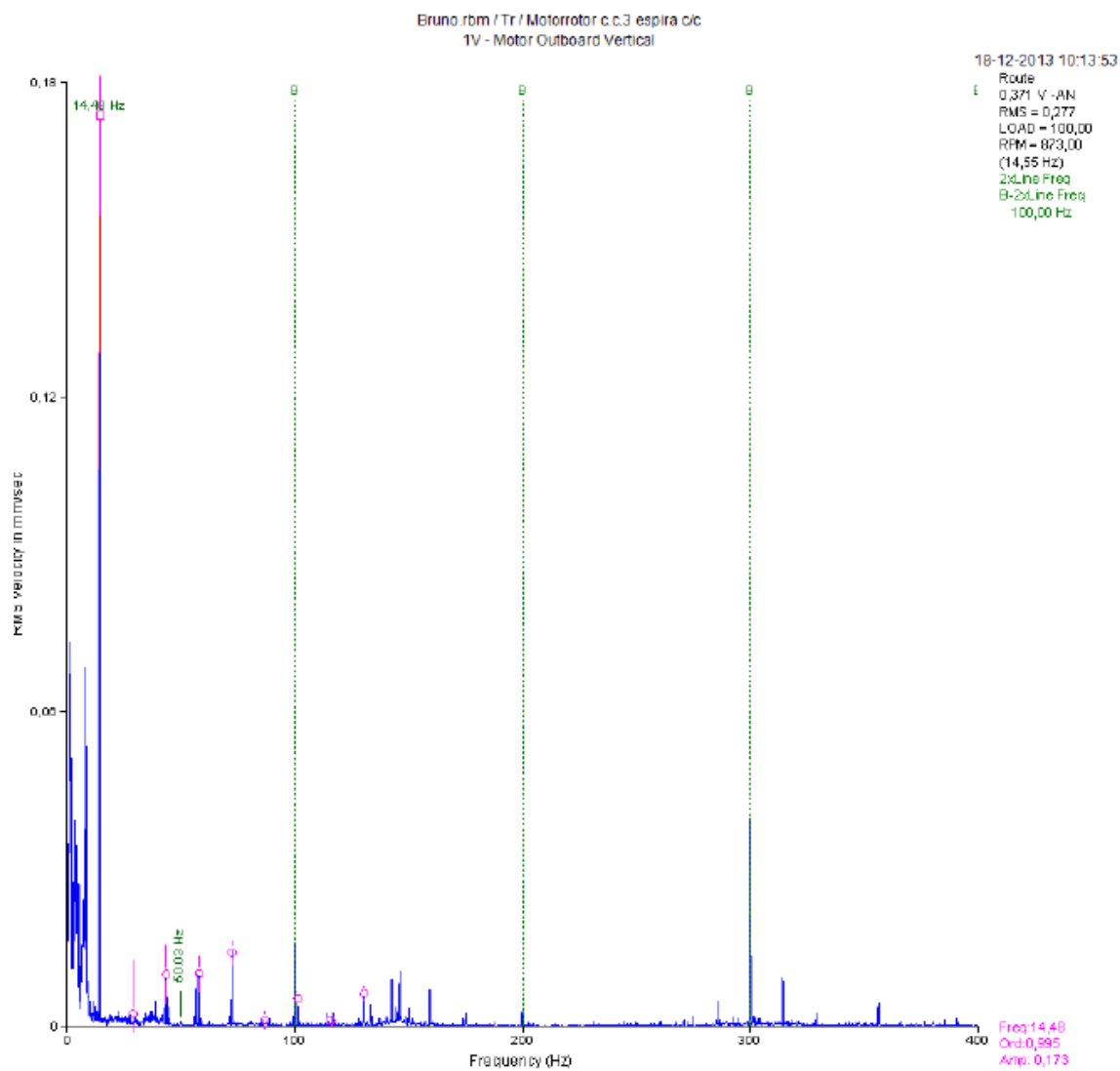


Figura 133 - Motor com três espiras em curto em carga vertical

A velocidade de rotação e as harmónicas da frequência de alimentação são iguais ao motor saudável.

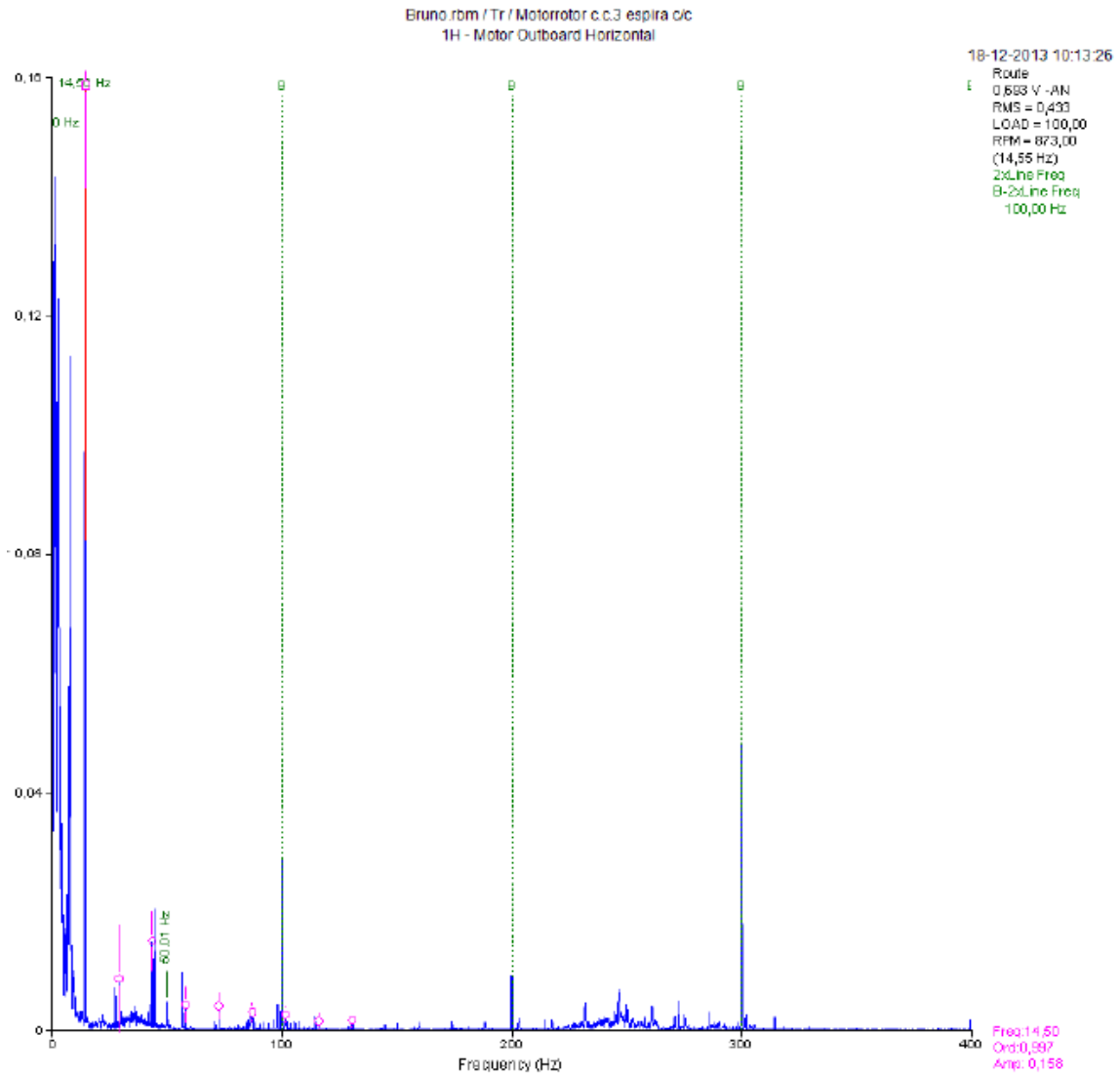


Figura 134 - Motor com três espiras em curto e em carga horizontal

O verificado no caso do parágrafo anterior também é válido para este. Significando que o dano provocado pode ter sido mascarado pelas flutuações da corrente, originadas tanto pelo curto-circuito da espiras bem como pelas pequenas diferenças de carga no freio de faucault e instabilidade da mesa de trabalho. Conclui-se que a análise de vibrações não deteta o dano.

### 6.2.3.2 Análise de Corrente

Resultados experimentais:

Parametros	Normal em vazio	1 espira em vazio	2 espiras em vazio	3 espiras em vazio
Voltage 1 (Fund RMS)	135,31	134,93	134,66	135,04
Voltage 2 (Fund RMS)	136,4	136,23	136,24	136,45
Voltage 3 (Fund RMS)	134,9	135,16	134,77	134,83
Average Ph-N	135,54	135,44	135,22	135,44
Voltage Imbalance Ph-N	0,64	0,58	0,75	0,74
Current 1 (RMS)	1,35	1,32	1,32	1,33
Current 2 (RMS)	1,35	1,35	1,35	1,35
Current 3 (RMS)	1,36	1,41	1,41	1,42
Average Current	1,35	1,36	1,36	1,37
% Current Imbalance	0,5	3,47	3,71	3,87
Self Imped Imbalance	5,88	15,25	16,3	17,41
Parametros	Normal em carga	1 espira em carga	2 espiras em carga	3 espiras em carga
Voltage 1 (Fund RMS)	131,48	130,91	130,5	130,68
Voltage 2 (Fund RMS)	132,6	131,77	131,88	131,75
Voltage 3 (Fund RMS)	131,32	130,8	130,07	130,61
Average Ph-N	131,8	131,16	130,82	131,01
Voltage Imbalance Ph-N	0,6	0,47	0,81	0,56
Current 1 (RMS)	1,55	1,49	1,51	1,52
Current 2 (RMS)	1,54	1,48	1,5	1,49
Current 3 (RMS)	1,56	1,51	1,55	1,59
Average Current	1,55	1,49	1,52	1,53
% Current Imbalance	0,7	0,97	2,15	3,69
Self Imped Imbalance	1,49	1,6	3,47	5,1

Figura 135 - Tabela com os valores de desequilíbrio da corrente e tensão, com e sem carga

No quadro acima, Figura 135, os valores das correntes entre fases diferem pouco quando não há espiras em curto-circuito, na medida que se “shunta” as espiras a corrente sobe numa das fases. Nos valores que representam o motor em carga, primeira coluna, todos os valores descem em relação aos valores da segunda coluna, isto deve – se ao facto de ao aumentarmos a carga o motor consome mais corrente e após algum tempo a amperagem baixa (fenómeno idêntico ao arranque). De referir que após este fenómeno o esperado acontece e a corrente aumenta com o número de espiras.

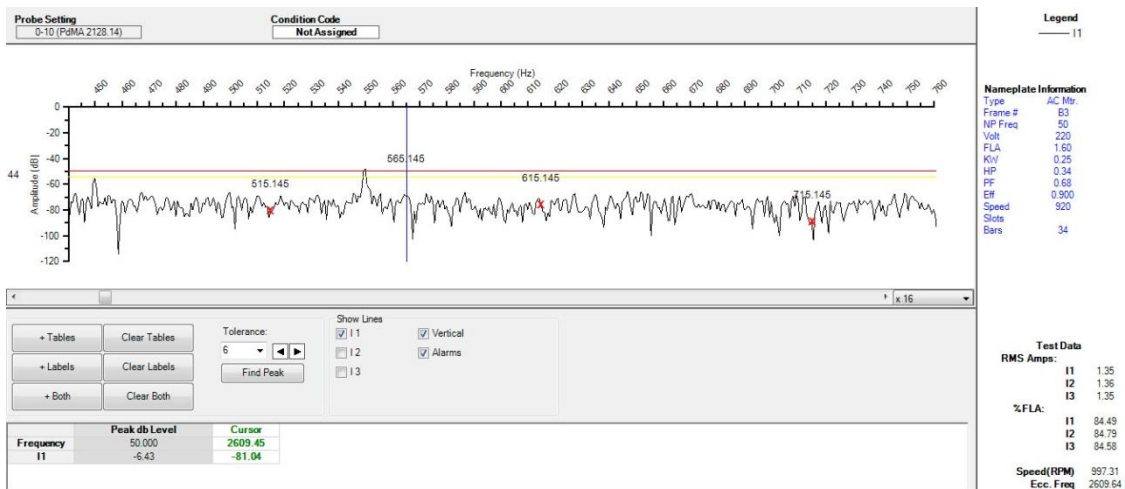


Figura 136 - Prova de excentricidade ao motor em curto-circuito

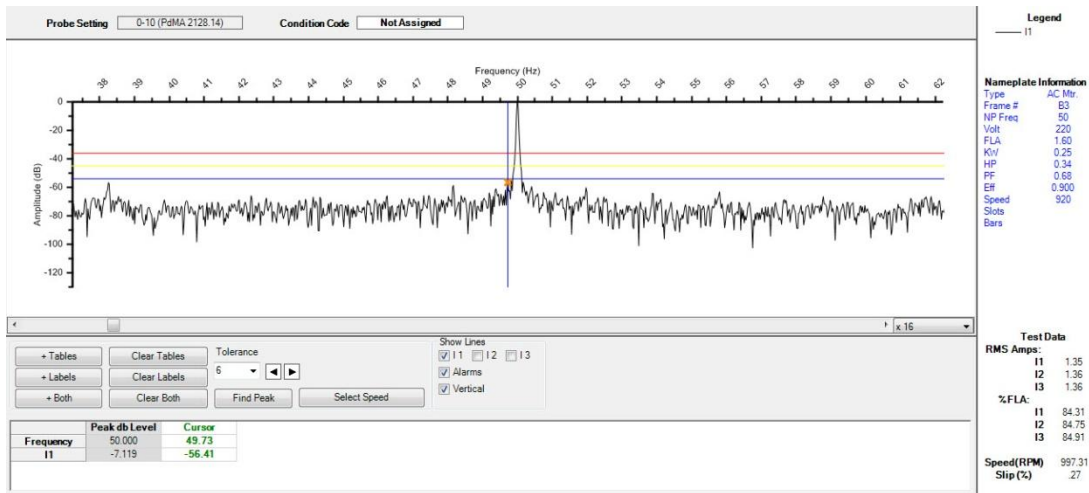


Figura 137 - Prova de rotor ao motor em curto-circuito

As figuras acima servem para demonstrar que apesar de haver danos estes não são visíveis nas provas de Excentricidade e do rotor.

### 6.2.3.3 Análise de termográfica

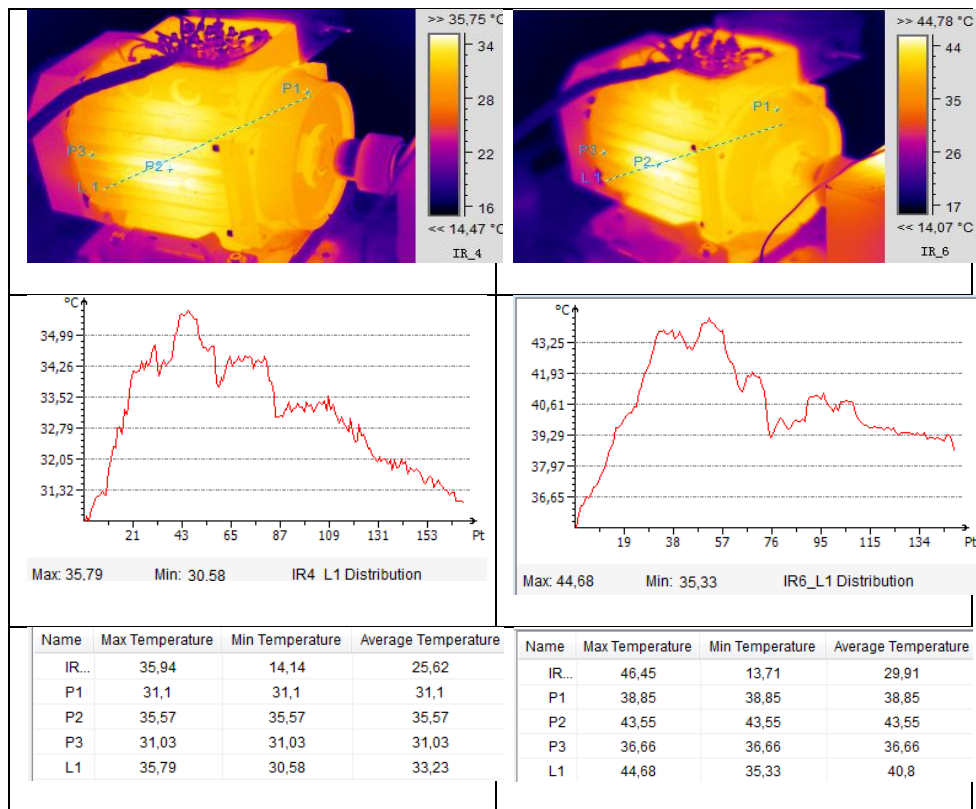


Figura 138 - Motor saudável a esquerda e com dano à direita

Em média “IR” a temperatura subiu 4° no motor com dano em relação ao saudável, mas este é um valor que nos dá uma noção global que pode ser errada porque verifica-se que “P2”, o ponto mais quente, a temperatura subiu cerca de 10°, provocando descida da vida do isolamento em 50% [2].

Comparando a diferença entre a temperatura máxima e mínima do espectro, no caso do motor saudável é  $5,21^\circ$  enquanto no que têm dano é  $9,05^\circ$  o que mais uma vez significa que existe avaria.

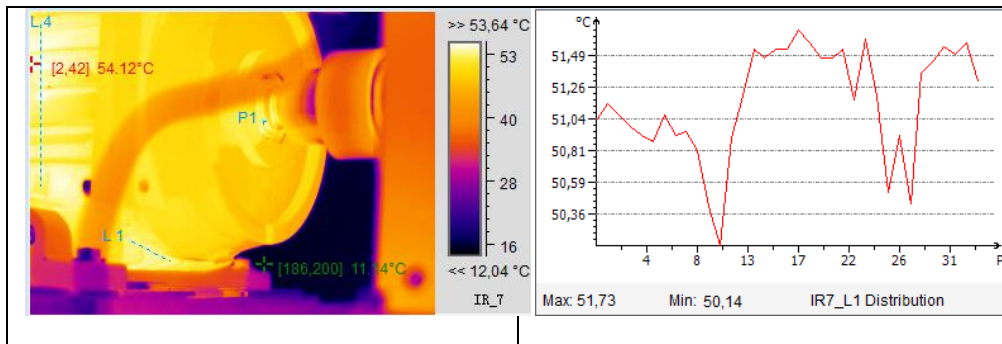


Figura 139 - Espectro da zona onde foi efetuado o curto-circuito

A imagem acima é apresentada com o intuito de demonstrar se o ponto mais quente estaria na zona onde se “shuntou” as espiras o que não se verificou. Podendo-se concluir que a termografia detetou o aumento de temperatura mas não o diagnosticou (localizou).

#### 6.2.4 Excentricidade

O dano de excentricidade foi conseguido através de motor preparado para o efeito. Em que através do aperto e desaperto dos parafusos forçamos o rotor a mover-se.



Figura 140 - Motor utilizado para excentricidade

A Excentricidade pode ser dinâmica e estática, sendo que na prática existem sempre as duas, neste item apenas vamos tratar da dinâmica, visto que a estática está presente nos danos de desequilíbrio do rotor e na pista exterior do rolamento.

### 6.2.4.1 Análise de Vibrações

O EF que se espera obter é:

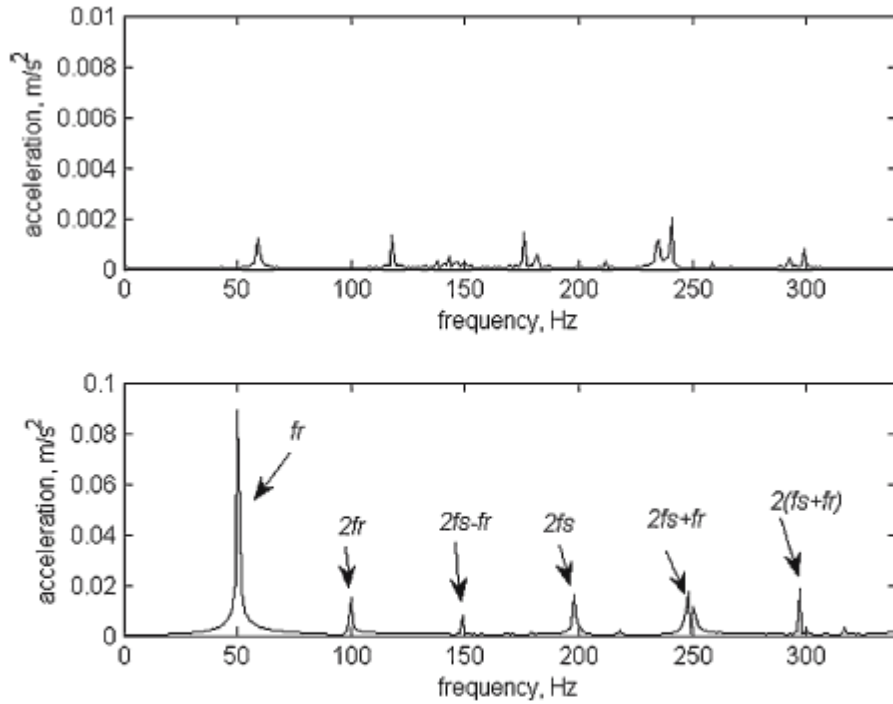


Figura 141 - Padrões EF para um motor saudável no topo e com 37% de excentricidade dinâmica em baixo, em ambos os casos o escorregamento é de 1,9% e o motor alimentado a 100Hz [33]

Resultados experimentais:

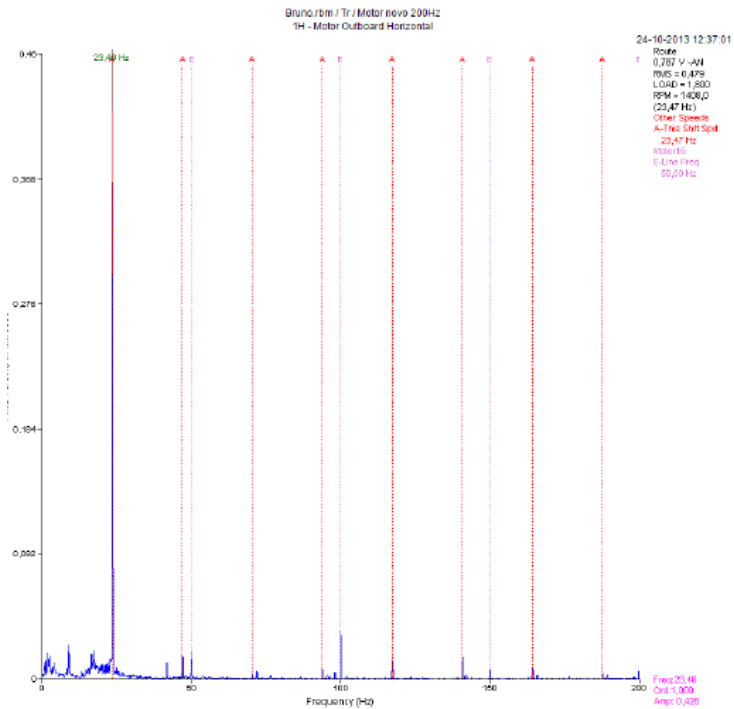


Figura 142 – Motor saudável em carga

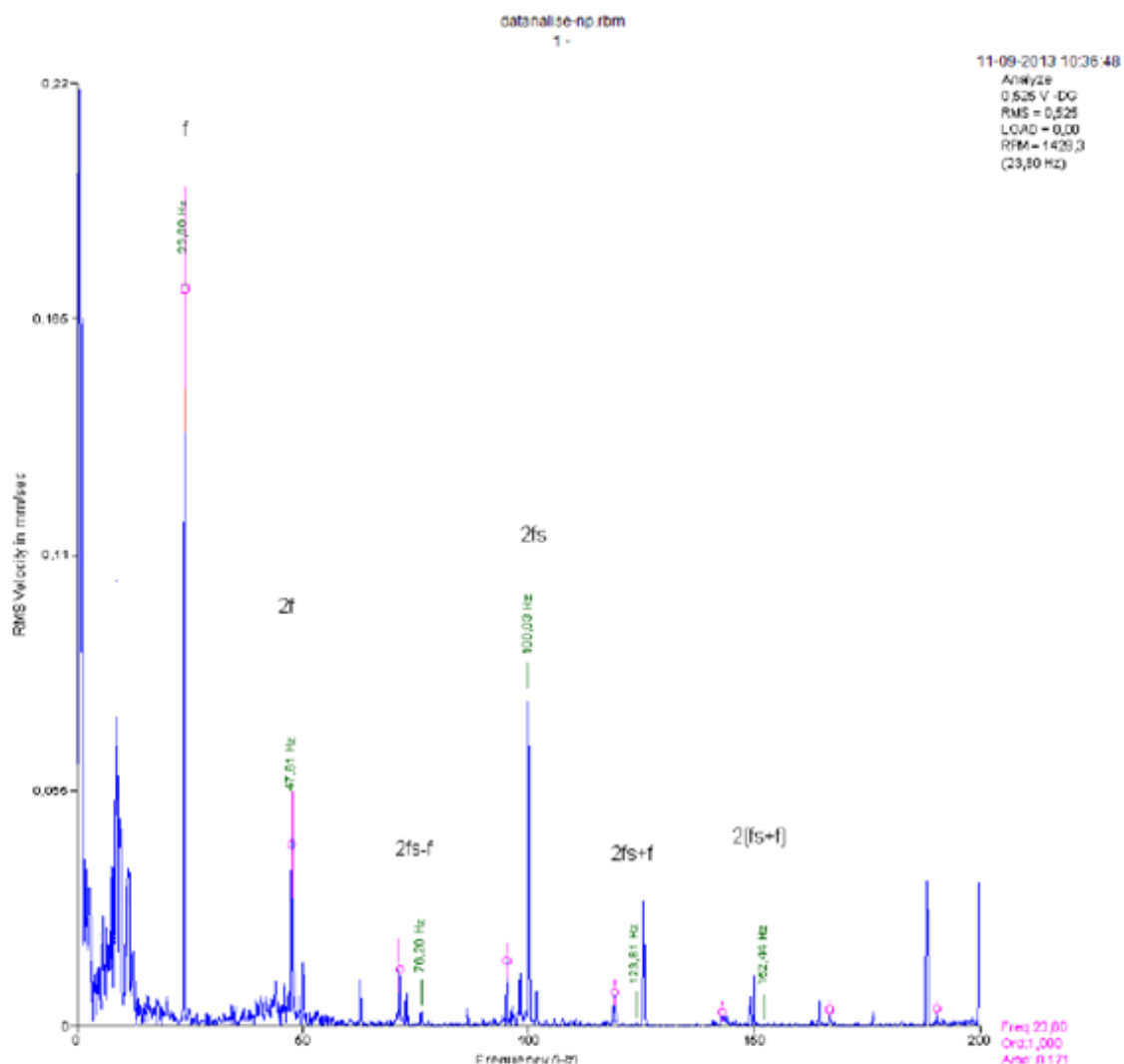


Figura 143 - Motor com excentricidade com carga em velocidade

A figura acima foi colocada em velocidades para ser comparada com as amplitudes do espectro do motor saudável e pode-se verificar que estas reduziram para metade, o que não era esperado e a amplitude da bancada de trabalho subiu drasticamente.

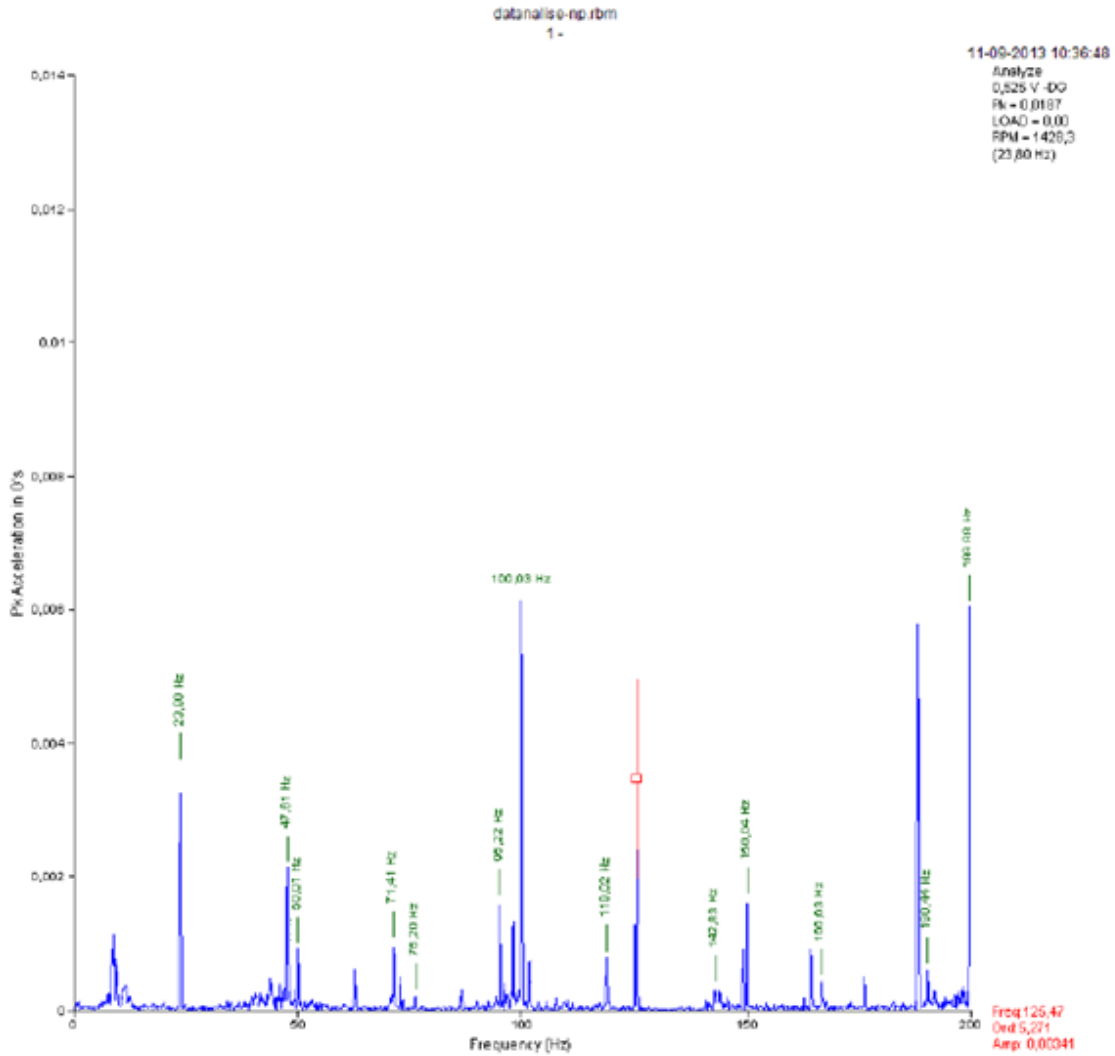


Figura 144 – Motor com excentricidade com carga em aceleração

O EF da Figura 144 foi retirado em aceleração para ficar de acordo com o espectro que se espera obter. As frequências de danos estão de acordo com EF “esperado” sendo Frequência de rotação  $Fr=23,80$  hz;  $2Fr=47,81$ hz; Frequência da rede  $2Fs-Fr=76,20$  apesar de ser pouco expressivo;  $2Fs=100$ ; As frequências não encontradas foram  $2Fs+Fr= 123,8$  e  $2(Fs+Fr)$  . De salientar que  $2*Fs$  têm uma amplitude elevada, conclui-se não haver necessidade de repetir o diagnóstico, porque apesar dos sintomas apontarem para pata coxa a 2 harmónica da rotação está abaixo da primeira e deve-se “descontar” o ruído da bancada de trabalho.

#### 6.2.4.2 Análise de Corrente

O EF que se espera obter é:

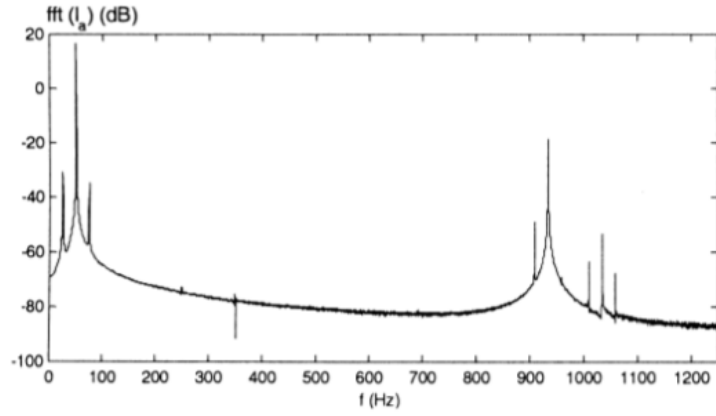


Figura 145 - EF padrão de um motor com excentricidade [32]

Resultados experimentais:



Figura 146 - motor sem defeito em carga

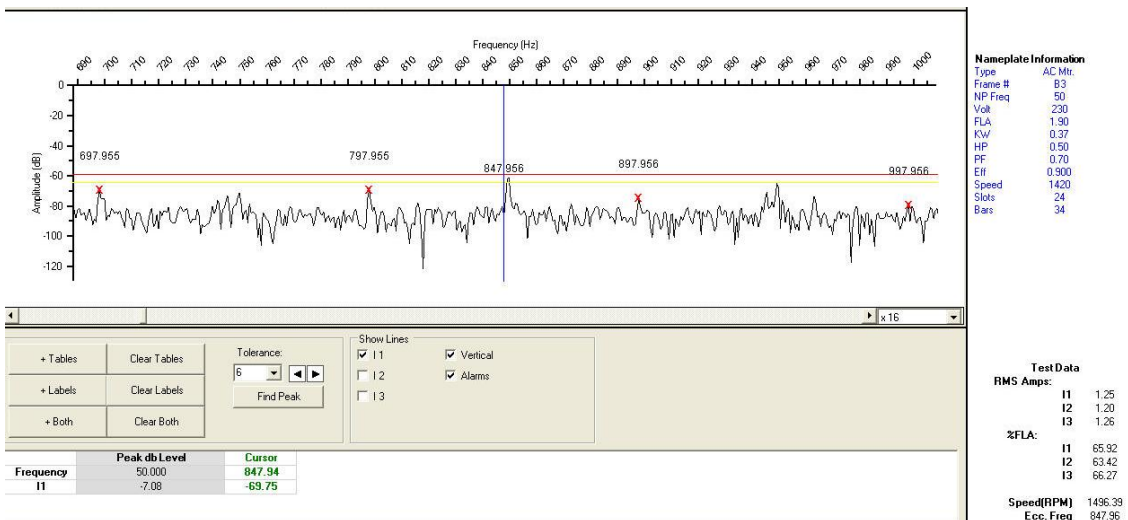


Figura 147 - Motor com defeito sem carga

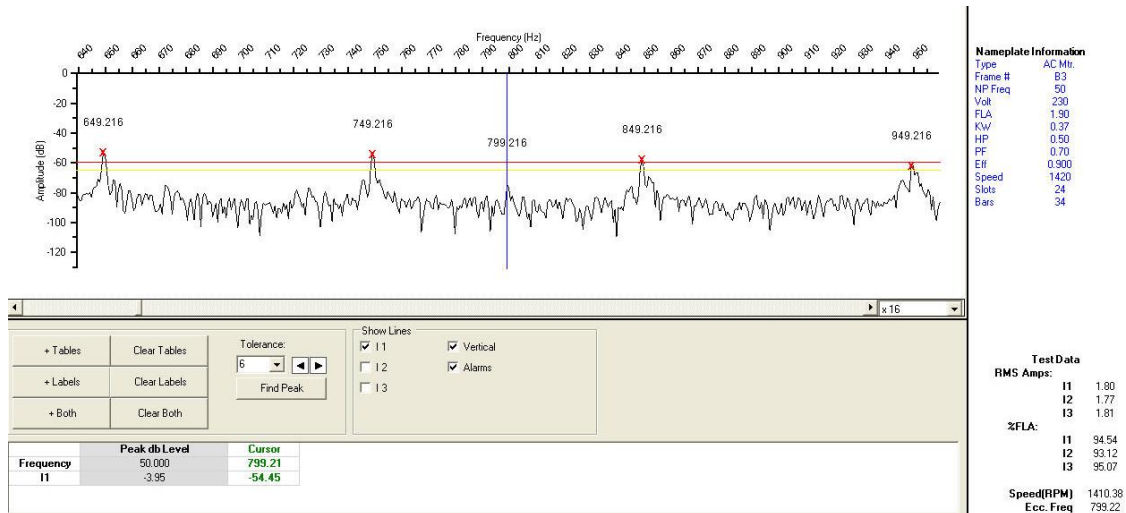


Figura 148 - Motor com defeito em carga

Das figuras anteriores é visível o aparecimento das frequências padrão, mas ainda não estão no nível de alerta “vermelho”, para isso deveriam as três frequências de tocar ou ultrapassar e na figura acima se as bandas laterais tocam a do centro (frequência de passagem das barras) não.

### 6.2.4.3 Análise termográfica

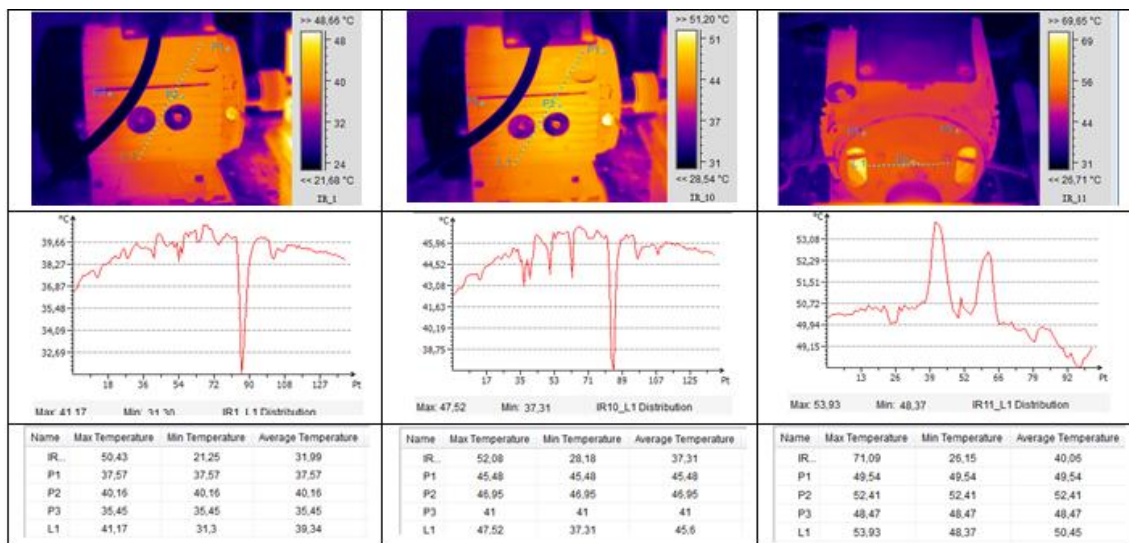


Figura 149 - Espectros termográficos, à direita o motor saudável, no meio com excentricidade e à esquerda um local.

Neste caso todos os parâmetros aumentaram cerca de 5graus, na terceira coluna o ponto “P2” revela uma temperatura muito elevada, mas este valor pode dever-se à emissividade não ser a indicada para o objeto, através da comparação de um motor saudável recolhido com a mesma emissividade revelou temperaturas equivalentes, concluindo-se que esta tecnologia detetou mas deixou dúvidas na localização do dano (diagnóstico).

### 6.2.5 Rotor desequilibrado

Na execução do modelo para simular o desequilíbrio do rotor colocámos uma porca no veio de um motor (saudável) de 4,5 gramas sem qualquer dano.

#### 6.2.5.1 Análise de Vibrações

O EF que se espera obter é:

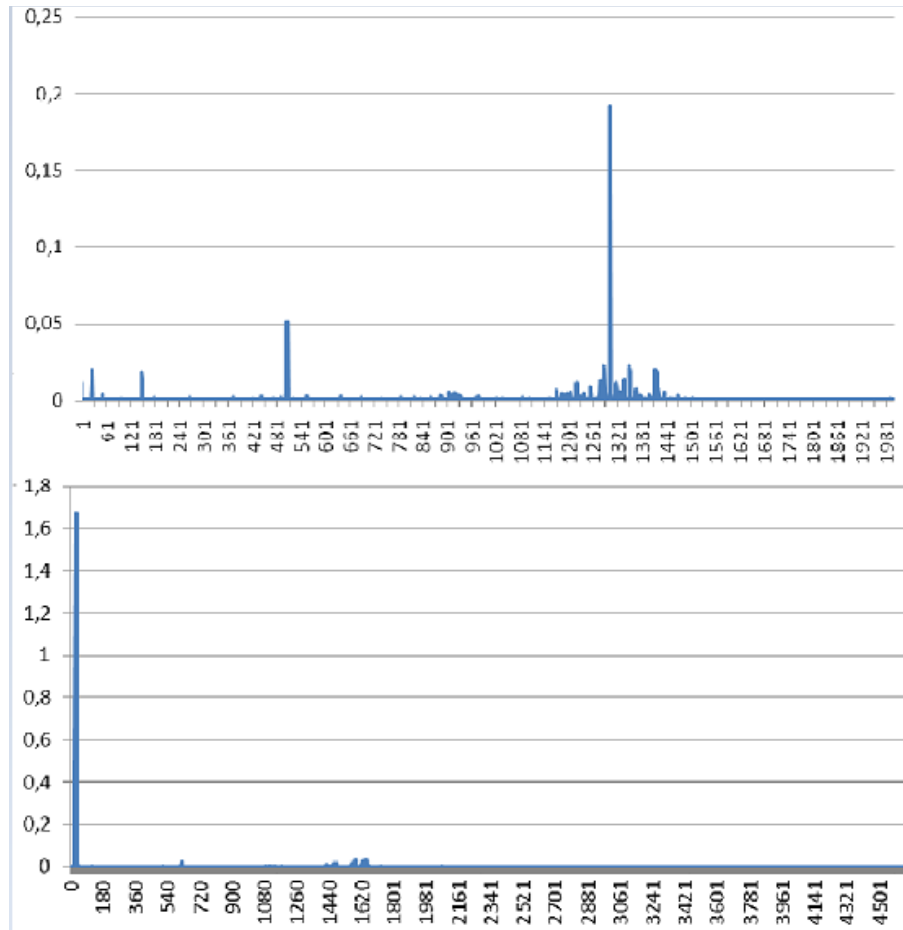


Figura 150 - EF em aceleração com rotor saudável em cima e com desequilíbrio no de baixo [8]

Resultados experimentais:

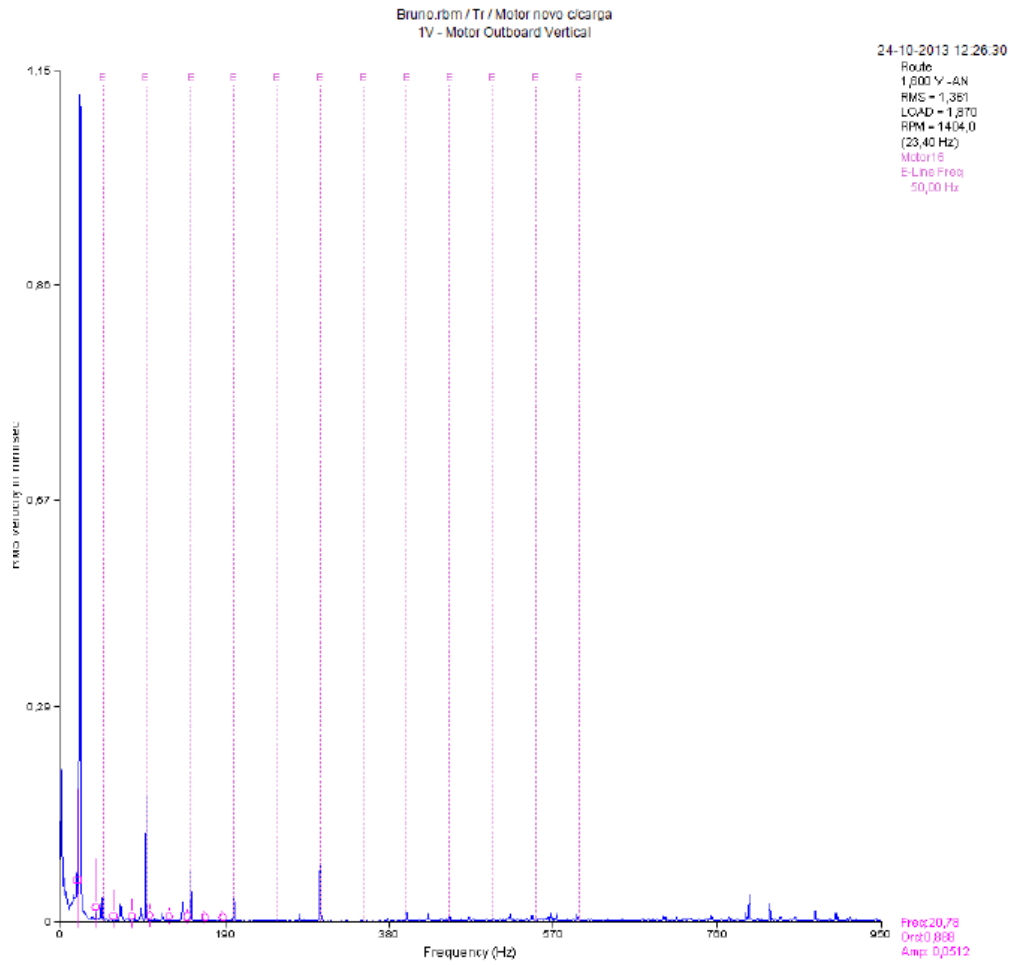


Figura 151 - Motor novo em carga

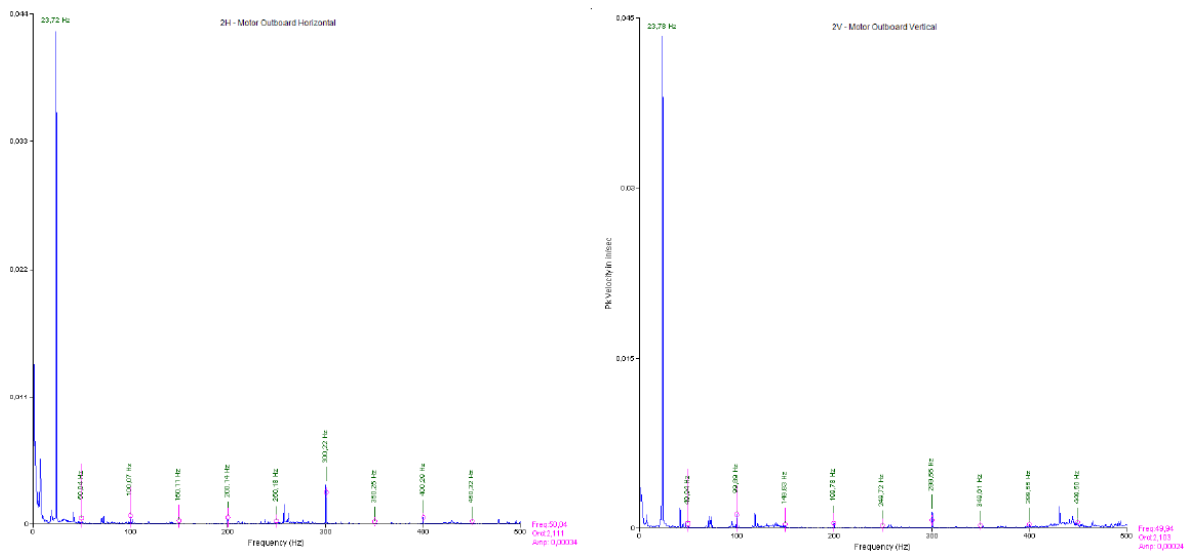


Figura 152 - Rotor desequilibrado em carga vertical á direita e horizontal na esquerda

O peso adicionado não provocou alterações no espectro do motor, ambos os espectros a velocidade está em pico e próxima do valor 0,044In/s, que é equivalente 0,8 mm/s RMS, logo têm menor energia quando comparado com Figura 151.

### 6.2.5.2 Análise de corrente

O EF que se espera obter é igual Figura 114

Resultados experimentais:

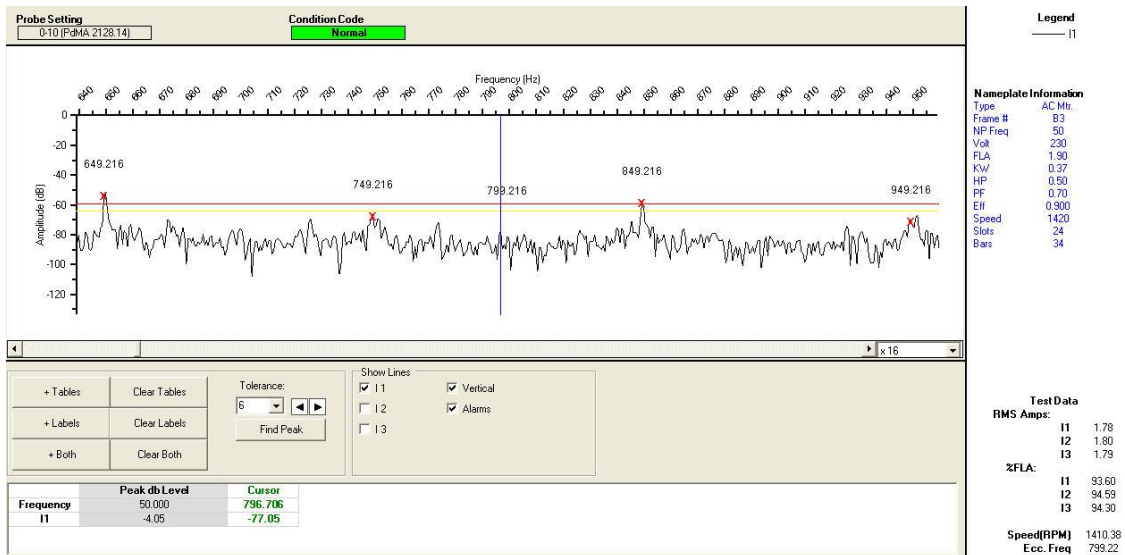


Figura 153 - Motor sem defeito em carga a alta frequência

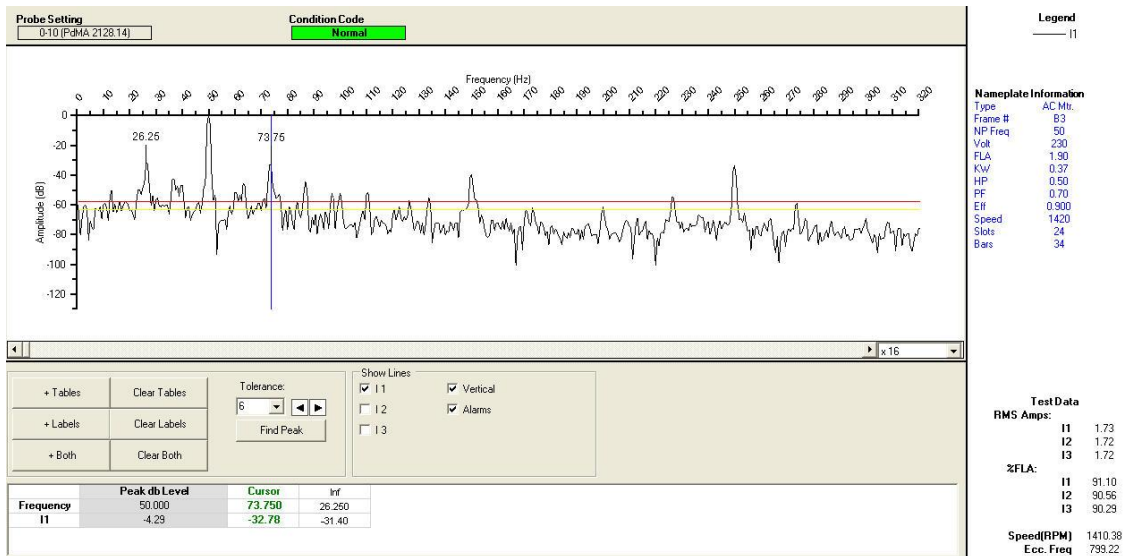


Figura 154 - Excentricidade de motor sem defeito em carga a baixa frequência

O espectro acima representa a excentricidade estática e apesar de aparecerem as bandas laterais, é de lembrar que a linha vermelha está ao nível de ruído, o que pode sugerir dano, mas não é mais do que uma comparação de ruído com ruído.

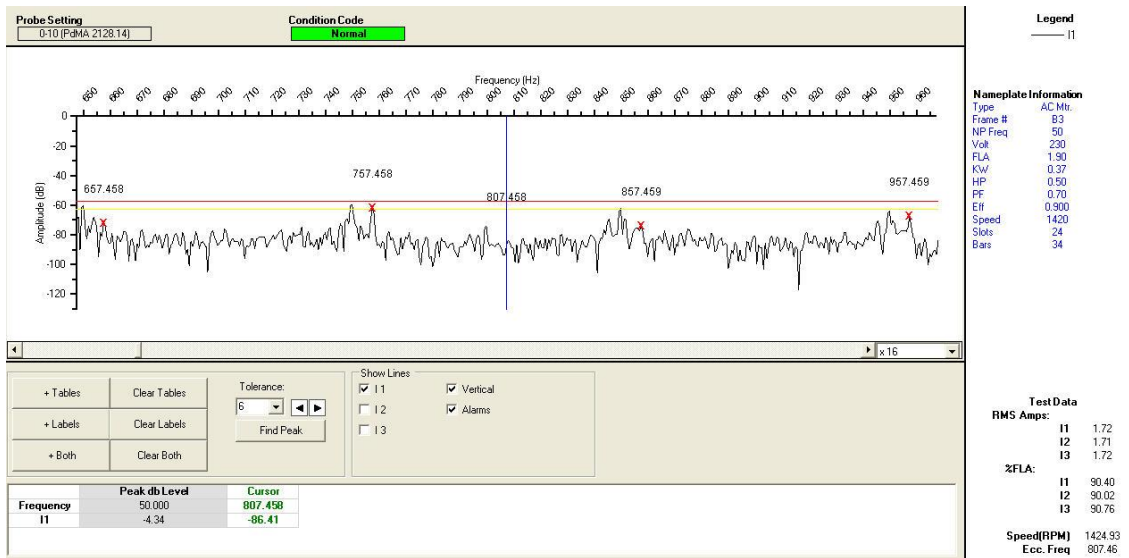


Figura 155 – Rotor desequilibrado a altas frequências em carga

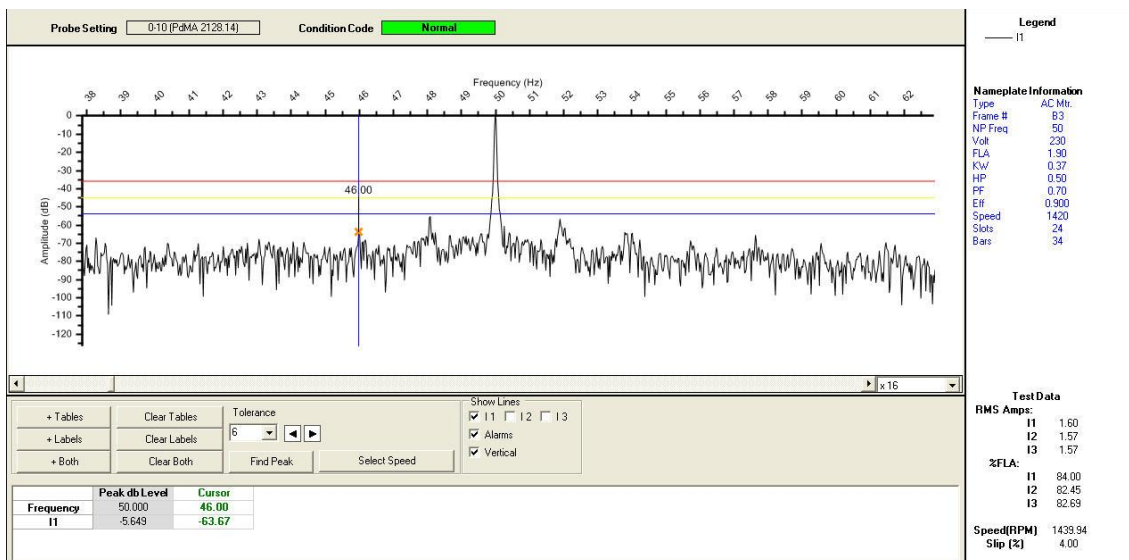


Figura 156 - Rotor desequilibrado a baixas frequências em carga

O desequilíbrio do rotor por análise de corrente é representado na Excentricidade estática, ou seja, a baixas frequências em que comparamos o motor sem defeito (Figura 154) com o espectro da Figura 156 e é visível que a linha saiu do nível de ruído, mas tal como no caso da excentricidade dinâmica, as alterações foram inexpressivas. O espectro que se espera obter encontra-se na Figura 145 (repetidas várias vezes).

### 6.2.5.3 Análise termográfica

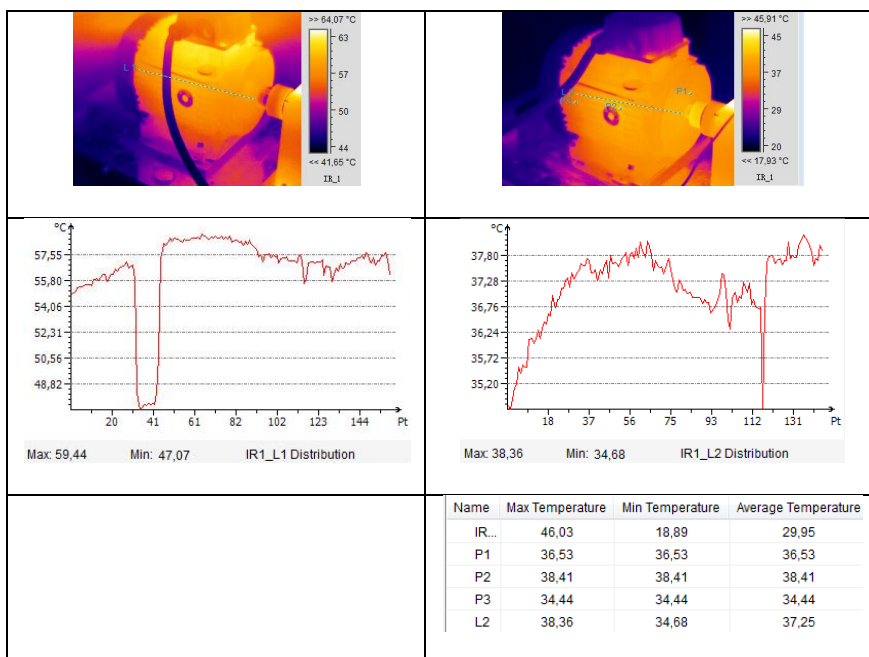


Figura 157- Espectros termográficos, à esquerda o motor saudável, à direita o motor com defeito e ambos em carga

Comparando os espectros todos os parâmetros de temperatura disponíveis no motor saudável são superiores ao motor com o rotor desequilibrado, logo não se detetou dano.



## 7. CONCLUSÕES

Os resultados neste capítulo serão analisados por tecnologia, será uma abordagem complementar aos dois últimos capítulos, feita por dano, em comparação com os valores teóricos. E uma das dificuldades para além dos constrangimentos, é estes estarem relacionados entre si, por exemplo a falha num dos rolamentos causa excentricidade que por sua vez influencia o equilíbrio de forças magnéticas, esta é uma das causas para as semelhanças de espetros nos vários danos dentro da mesma tecnologia.

No caso das vibrações uma das vantagens de monitorar os equipamentos, é detetar as falhas em fases incipientes, mas quanto mais cedo tentarmos detetar maior é a dificuldade, como pode ser visto na Figura 111 do EF dos rolamentos, antes de agravar o dano, por este ser ténue, as frequências padrão confundem-se com o ruído, isto também é válido para as bandas laterais que têm amplitudes inferiores à frequência central, por exemplo, nos vários espetros (barras partidas, excentricidade, rolamentos) são visíveis a frequência de rotação e a de alimentação, as diferenças entre estes são que no caso da excentricidade a de alimentação é bastante prenunciada e não estavam visíveis as bandas laterais, na simulação de barras partidas é a frequência de passagem dos polos e bandas laterais (a FPPO), na frequência de rotação, que deveriam estar salientes.

Na análise de corrente os resultados, talvez favorecidos pelo automatismo do aparelho, são limpos, ou seja, existe à partida uma grande semelhança entre o dano simulado e o teórico o que se torna uma benesse no caso de diagnóstico. Têm o contra de em danos semelhantes não se conseguir fazer o correto diagnóstico, exemplificando o caso da excentricidade, desequilíbrios e rolamento os EF têm os mesmos padrões.

Análise termográfica, dentro das condições simuladas, só indicou dano no caso do curto-circuito e na simulação onde o dano, provocado, era ligeiro (Excentricidade e curto-circuito) o que não torna fiável o restantes dados obtidos.

Sintetizando, no caso desta dissertação, as tecnologias complementam-se e juntas chegam a um diagnóstico mais assertivo.

Esta dissertação teve por base reconhecer frequências padrões e os danos implementados não foram quantificados, por exemplo, provocou-se excentricidade mas não houve preocupação em saber a sua percentagem. Em trabalhos futuros sugiro que se centrem apenas num dos danos que mais ocorrem, o quantifiquem e o implementem em vários motores com diferentes potências e acoplado a um mecanismo.



## 8. REFERÊNCIAS

- [1] Y. Han e Y. Song, “Condition monitoring techniques for electrical equipment - A literature survey”, *IEEE transactions on power delivery*, vol. 18, no. 1, pp. 4-13, Jan 2003.
- [2] G. Singh e S. Al Kazzaz, “Induction machine drive condition monitoring and diagno. stic research - a survey”, *Electric power systems research*, vol. 64, no. 2, pp. 145-158, Feb 2003.
- [3] M. Dijk, R. J. Orsato e R. Kemp, “The emergence of an electric mobility trajectory”, *Energy Policy*, vol. 52, no. 0, pp. 135-145, 2013.
- [4] N. A. B. G. Grilo, “Concepção e caracterização de um motor de indução para integração num veículo eléctrico comercial”, Dissertação de mestrado em Engenharia, Instituto Superior Técnico, 2010.
- [5] A. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira e J. Fong, “Standards for Super-Premium Efficiency class for electric motors”, em *Industrial Commercial Power Systems Technical Conference - Conference Record 2009 IEEE*, 2009.
- [6] J. A. R. Gonçalves, “Estudo do comportamento do motor de indução trifásico sujeito a perturbações na qualidade da energia”, Dissertação de mestrado em Engenharia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2007.
- [7] J. E. A. de Oliveira, et al, “Modelagem de um Motor de Indução Trifásico Acionado com Tensões Desequilibradas por meio de Redes Neurais Artificiais”, Universidade Estadual Paulista, 2007.
- [8] F. M. C. Filipe, “Gestão e organização da manutenção, de equipamento de conservação e manutenção de infra-estruturas ferroviárias”, Dissertação de mestrado em Engenharia Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- [9] R. M. R. Parreira, “Análise de dados de vibração”, Dissertação de mestrado Estatística e Gestão da Informação, Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [10] W. Yang, P. Tavner e R. Court, “An online technique for condition monitoring the induction generators used in wind and marine turbines”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 38, no. 1, pp. 103-112, 2013.
- [11] T. R. Kuphaldt, “DC Lessons ElectricCircuit I”, 15 ed., vol. 1, [openbookproject.net/electricCircuits](http://openbookproject.net/electricCircuits), 2006, pp. 461-524.
- [12] A. Francisco, “Motores Eléctricos”, 4ª ed., E. E. técnicas e profissionais, Ed., Lidel

- Edições técnicas, lda, 2009, p. 177.
- [13] M. F. Alves, “ABC das máquinas elétricas”, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Mar 2003.
- [14] J. Sobral, “Manutenção produtiva total e gestão lean”, Diapositivos, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa 2011/2012.
- [15] C. S. A. Roque, “Unidade Curricular de Controlo da condição”, Diapositivos, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011/2012.
- [16] C. Sampaio, “Unidade curricular Ruido e Vibrações”, Diapositivos, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2012/2013.
- [17] Brüel Kjaer, “Vibration measurement and analysis” BA 7676-12
- [18] A. A. Roque, “Sensores – Especificação, Seleção e Montagem”, 2006.
- [19] W. M. Rubio, F. Buiocchi, J. C. Adamowski e E. C. N. Silva, “Modeling of functionally graded piezoelectric ultrasonic transducers”, Ultrasonics, vol. 49, no. 4, pp. 484-494, 2009.
- [20] J. Matos, “Espectro PBC - Percentagem de banda constante”, Jornadas da Engenharia Mecânica, Instituto Politécnico da Guarda, Maio 1999.
- [21] W. Hongwei, “FFT Basics and Case Study using Multi-Instrument”, Virtins Technology, Rev 1, May 2009.
- [22] U. Lowell, “Windows and Leakage Brief Overview” Dinamic System, Rev 070606.
- [23] H. A. Gaberson, “A Comprehensive Windows Tutorial”, Oxnard, California, 2003.
- [24] M. E. Corporation, Ask the Expert: Selecting the Right FFT Window, [https://www.endevco.com/news/emails/2012\\_01/f\\_ate.html](https://www.endevco.com/news/emails/2012_01/f_ate.html), 2013.
- [25] C. Sampaio, “Integração de técnicas de controlo de condição aplicadas às bombas centrífugas”, Dissertação de mestrado em Engenharia, Instituto Superior Técnico, 1995.
- [26] J. P. Teixeira, et al, “Análise acústica vocal - determinação do jitter e shimmer para diagnóstico de patologias da fala”, Instituto Superior Técnico de Bragança, Ref: CLME'2011\_0706A, 2011.
- [27] M. Picazo-RÃ denas, R. Royo, J. Antonino. -Daviu e J. Roger-Folch, “Use of the

infrared data for heating curve computation in induction motors: Application to fault diagnosis”, *Engineering Failure Analysis*, no. 0, pp. - , 2013.

- [28] P. J. Tavner, “Review of condition monitoring of rotating electrical machines”, *IET electric power applications*, vol. 2, no. 4, pp. 215-247, Jul 2008.
- [29] S. Grubic, J. M. Aller, B. Lu e T. G. Habetler, “A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems”, *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4127-4136, Dec 2008.
- [30] S. Nandi, H. Toliyat e X. Li, “Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors - A review”, *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 719-729, Dec 2005.
- [31] V. A. D. Silva, “Detecção de curto-circuito entre espiras do enrolamento do estator utilizando análise termográfica.”, Relatório final de pós graduação, Universidade Federal de São João de El Rei, 2009.
- [32] J. FAIZ, I. TABATABAEI e E. SHARIFI-GHAZVINI, “A Precise Electromagnetic Modeling and Performance Analysis of a Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor under Mixed Eccentricity Condition”, *Electromagnetics*, vol. 24, no. 6, pp. 471-489, 2004.
- [33] P. Jover Rodríguez, A. Belahcen, A. Arkkio, A. Laiho e J. Antonino. -Daviu, “Air-gap force distribution and vibration pattern of Induction motors under dynamic eccentricity”, *Electrical Engineering*, vol. 90, no. 3, pp. 209-218, 2008.
- [34] A. A. Roque, Et al “Controlo de Condição de Motores Eléctricos de Indução Trifásicos”, *DataAnálise*, 2009.
- [35] B. L. R. Samaga e K. P. Vittal, “Comprehensive study of mixed eccentricity fault diagnosis in induction motors using signature analysis”, *International journal of electrical power & energy systems*, vol. 35, no. 1, pp. 180-185, Feb 2012.
- [36] G. Y. K. R. N. Tandon, “A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defect in induction motor ball bearings”, *ISA transactions*, vol. 21, no. 5, p. 244–256, Sep 2005.
- [37] A. R. A. N. A. Djerdirb e M. Mekideche, “Experimental investigation of vibration monitoring technique for online detection of bearing fault in induction motors”, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 27, no. 4, pp. 496-506, 2012.
- [38] M. Akar, “Detection of a static eccentricity fault in a closed loop driven induction

motor by using the angular domain order tracking analysis method”, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 34, no. 1, pp. 173-182, 2013.

- [39] R. Sharifi e M. Ebrahimi, “Detection of stator winding faults in induction motors using three-phase current monitoring”, ISA Transactions, vol. 50, no. 1, pp. 14-20, 2011.
- [40] D. M. A. K. Mykhaylo Zagirnyak, “Comparison of induction motor diagnostic methods based on spectra analysis of current and instantaneous power signals”, 2012.
- [41] J. R. Mercuri, “Desenvolvimento de um sistema supervisorio para análise de motores elétricos através da vibração mecânica”, trabalho de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011
- [42] S.K. Ahamed, “Novel Diagnosis Technique of Mass Unbalance in rotor of Induction Motor by the Analysis of Motor Starting Current at No Load Through Wavelet Transform”, 6th International Conference on Electrical and Computer Engineering, 210.
- [43] Hassan Feshki Farahani, Abdorreza Rabiee, “Evaluating the Thermal Behavior of Induction Motor under unbalanced voltage”, 2012.
- [44] C. Hernández, “Monitoreo de condicion en motores elétricos”, Seminário, Ue System, 2012.