

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Luciana Ferreira da Costa

**Análise de vibração de máquinas rotativas para detecção
de quebra na barra do rotor**

São Carlos

2019

Luciana Ferreira da Costa

**Análise de vibração de máquinas rotativas para detecção
de quebra na barra do rotor**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino

**São Carlos
2019**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

F383a Ferreira da Costa, Luciana
 Análise de vibração de máquinas rotativas para
 detecção de quebra na barra do rotor / Luciana Ferreira
 da Costa; orientador Rogério Andrade Flauzino. São
 Carlos, 2019.

 Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
 ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
 Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
 2019.

 1. Detecção de falhas. 2. Motor de Indução. 3.
 Monitoramento de condição. 4. Automação. 5. Análise de
 vibração. 6. Manutenção preditiva. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Luciana Ferreira da Costa

Título: “Análise de vibração de máquinas rotativas para detecção de quebra na barra do rotor”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado

em 25 / 11 / 2019,

com NOTA 9,5 (Nove, cinco), pela Comissão Julgadora:

Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino - Orientador - SEL/EESC/USP

Mestre Murilo Eduardo Casteroba Bento - Doutorando - SEL/EESC/USP

Mestre Daniel Ferreira Lima - Doutorando - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Lúcia e Manuel.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, a quem devo tudo. Obrigada por me guiarem e apoiarem nesse caminho e em todos os outros, que um dia escolhi seguir.

Agradeço ao Prof. Dr. Leonardo André Ambrosio, meu primeiro orientador, que muito me ensinou.

Ao Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino, que me guiou neste trabalho e muito contribuiu para meu aprendizado perante as dificuldades.

Ao colega Leandro Cunha, que muito me ajudou no início do estágio e também no final, com seu grande conhecimento técnico sobre tema deste trabalho.

Aos colegas do *Hotline* da SIEMENS, pelos empréstimos e apoios.

Agradeço também aos meus colegas e amigos de curso, com quem compartilhei diversos momentos e que muito me ajudaram durante a graduação. Em especial, à Renata e à Thayra, que tantas vezes me acolheram e me ajudaram.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica (SEL/EESC-USP), em especial à Jussara, ao José Carlos e ao Rui Berto, pelos auxílios não só durante a realização deste projeto, mas também por todo apoio durante a graduação.

À SIEMENS, pelo empréstimo de equipamentos utilizados neste projeto.

“As pessoas só observam as cores do dia no começo e no fim, mas para mim está muito claro que o dia se funde através de uma multidão de matizes e gradações, a cada momento que passa.”

“A menina que roubava livros” - Markus Zusak

RESUMO

COSTA, L. F. **Análise de vibração de máquinas rotativas para detecção de quebra na barra do rotor.** 2019. 90p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

As máquinas de indução possuem grande importância no contexto industrial e com isso, aspectos de eficiência na utilização, dimensionamento e controle dessas máquinas se tornam pontos cada vez mais relevantes. Neste sentido, soluções de manutenção preditiva, que permitam monitoramento das condições dessas máquinas permitem maior planejamento e eficiência em seu funcionamento, se tornando um recurso cada vez mais demandado pelo mercado. Tendo em vista essa gama de soluções comerciais voltadas para manutenção preditiva de máquinas elétricas, este trabalho propõe o uso de uma delas para realização de testes em bancada. Utilizando o módulo de monitoramento de condições integrado ao sistema de automação do fabricante SIEMENS, se busca analisar o comportamento dos espectros de frequência de uma máquina com rotores do tipo gaiola de esquilo que apresentam barras quebradas. Analisa-se também este comportamento, tendo níveis de severidade de falha maior e simulando níveis de carga maiores.

Palavras-chave: Detecção de falhas, Motor de Indução, Monitoramento de condição, Automação, Análise de vibração, Manutenção preditiva.

ABSTRACT

COSTA, L. F. **Vibration analysis of rotating machines for rotor bar breakage detection.** 2019. 90p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Induction machines are very relevant in the industrial context, therefore aspects as usage efficiency, project and control of these machines have become more and more important recently. Predictive maintenance solutions which provides to the user a good condition monitoring have been requested by the market, and these solutions provides to the industry more efficiency in their production and a better management of their machinery. This work has the objective to make tests using a commercial predictive maintenance solution. For the tests, a condition monitoring system by SIEMENS, integrated to the automation system is used to analyse the frequency spectra behavior of a squirrel cage rotor that presents broken bars. Also this behavior is analyzed according to the severity of the failure and load levels applied.

Keywords: Fault detection, Induction motor, Condition Monitoring, Automation, Vibration analysis, Predictive maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rotor bobinado.	25
Figura 2 – Motor de Indução com rotor bobinado.	26
Figura 3 – Construção do rotor tipo gaiola de esquilo.	26
Figura 4 – Componentes de um MIT.	27
Figura 5 – Fluxograma relacionando falhas em máquinas elétricas.	28
Figura 6 – Rotor com barras quebradas.	29
Figura 7 – Estrutura de um CLP.	31
Figura 8 – CPU com Módulo CMS1200.	32
Figura 9 – Etapas da aquisição de sinais de vibração	32
Figura 10 – Vista em corte de um acelerômetro piezoelétrico.	34
Figura 11 – Amostragem de função contínua no tempo.	34
Figura 12 – Relação entre os domínios do tempo e da frequência. a) Coordenadas tridimensionais de tempo, frequência e amplitude; b) Vista do domínio do tempo; c) Vista do domínio da frequência.	35
Figura 13 – Bancada experimental usada.	39
Figura 14 – Máquinas utilizadas no experimento.	40
Figura 15 – Inserção de falhas nos rotores.	41
Figura 16 – Rotores usados para testes.	41
Figura 17 – Identificação dos componentes do módulo.	42
Figura 18 – Tacômetro Digital.	42
Figura 19 – Acelerômetro Piezoelétrico IEPE.	43
Figura 20 – Pontos de fixação do acelerômetro.	43
Figura 21 – Montagem do transdutor à máquina de indução.	44
Figura 22 – Tela inicial do software TIA Portal.	45
Figura 23 – Telas de configuração dentro do TIA Portal.	45
Figura 24 – Blocos de configuração do módulo e do canal do CMS 1200.	45
Figura 25 – Métodos de monitoramento abordados pelo manual.	46
Figura 26 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor são, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$	47
Figura 27 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor são, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$	48
Figura 28 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor são, $v = 1717rpm$ e $T = 1,5N.m$	48
Figura 29 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor são, $v = 1717rpm$ e $T = 1,5N.m$	49

Figura 30 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor são, $v = 1605rpm$ e $T = 3,0N.m.$	49
Figura 31 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m.$	50
Figura 32 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m.$	51
Figura 33 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1720rpm$ e $T = 1,5N.m.$	51
Figura 34 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1720rpm$ e $T = 1,5N.m.$	52
Figura 35 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1585rpm$ e $T = 3,0N.m.$	52
Figura 36 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1585rpm$ e $T = 3,0N.m.$	53
Figura 37 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m.$	54
Figura 38 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m.$	54
Figura 39 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1719rpm$ e $T = 1,5N.m.$	55
Figura 40 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1719rpm$ e $T = 1,5N.m.$	55
Figura 41 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1574rpm$ e $T = 3,0N.m.$	56
Figura 42 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1574rpm$ e $T = 3,0N.m.$	56
Figura 43 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m.$	57
Figura 44 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m.$	58
Figura 45 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1716rpm$ e $T = 1,5N.m.$	58
Figura 46 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1716rpm$ e $T = 1,5N.m.$	59
Figura 47 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1568rpm$ e $T = 3,0N.m.$	59
Figura 48 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1568rpm$ e $T = 3,0N.m.$	60

Figura 49 – Gráficos do espectro de frequência da aceleração de vibração para $T=0,5$ N.m.	61
Figura 50 – Gráficos do espectro de frequência da aceleração de vibração para $T=1,5$ N.m.	61
Figura 51 – Gráficos do espectro de frequência da aceleração de vibração para $T=3,0$ N.m.	62
Figura 52 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor são, $v =$ $1774rpm$ e $T = 0,5N.m.$	68
Figura 53 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor são, $v =$ $1774rpm$ e $T = 0,5N.m.$	69
Figura 54 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor são, $v =$ $1717rpm$ e $T = 1,5N.m.$	70
Figura 55 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor são, $v =$ $1717rpm$ e $T = 1,5N.m.$	71
Figura 56 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor são, $v =$ $1605rpm$ e $T = 3,0N.m.$	72
Figura 57 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m.$	73
Figura 58 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m.$	74
Figura 59 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1720rpm$ e $T = 1,5N.m.$	75
Figura 60 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1720rpm$ e $T = 1,5N.m.$	76
Figura 61 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1585rpm$ e $T = 3,0N.m.$	77
Figura 62 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1585rpm$ e $T = 3,0N.m.$	78
Figura 63 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m.$	79
Figura 64 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m.$	80
Figura 65 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1719rpm$ e $T = 1,5N.m.$	81
Figura 66 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1719rpm$ e $T = 1,5N.m.$	82
Figura 67 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1574rpm$ e $T = 3,0N.m.$	83

Figura 68 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1574rpm$ e $T = 3,0N.m$	84
Figura 69 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$	85
Figura 70 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$	86
Figura 71 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1716rpm$ e $T = 1,5N.m$	87
Figura 72 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1716rpm$ e $T = 1,5N.m$	88
Figura 73 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1568rpm$ e $T = 3,0N.m$	89
Figura 74 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1568rpm$ e $T = 3,0N.m$	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
MIT	Motor de Indução Trifásico
CMS	<i>Condition Monitoring System</i>
ω_R	Velocidade mecânica do eixo
ω_s	Velocidade síncrona do motor
CLP	Controlador Lógico Programável
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
IEPE	<i>Integrated Electronic Piezo Electric</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Objetivos	23
1.2	Estrutura do Trabalho	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	Máquinas de Indução	25
2.2	Falhas em motores de indução	27
2.2.1	Quebra de barras do rotor	28
2.3	Métodos de detecção de falhas	29
2.3.1	Controladores Lógicos Programáveis	30
2.4	<i>Condition Monitoring System</i> - Detecção de falhas	31
2.5	Aquisição de sinais	32
2.6	Técnica de processamento de sinais	35
2.6.1	Análise no domínio da frequência	35
2.6.2	<i>Fast Fourier Transform</i>	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Materiais	39
3.1.1	Bancada experimental	39
3.1.2	Rotores utilizados para testes	40
3.1.3	Equipamentos de Instrumentação	42
3.2	Métodos	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	Testes com rotor são	47
4.2	Testes com rotor com 2 barras seccionadas	50
4.3	Testes com rotor com 3 barras seccionadas	53
4.4	Testes com rotor com 4 barras seccionadas	57
4.5	Comparação dos resultados obtidos	60
4.5.1	Gráficos da aceleração de vibração para $T=0,5$ N.m	61
4.5.2	Gráficos da aceleração de vibração para $T=1,5$ N.m	61
4.5.3	Gráficos da aceleração de vibração para $T=3,0$ N.m	62
5	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	65

	ANEXO A – IMAGENS DE TESTES	68
A.1	Testes com rotor são	68
A.2	Testes com rotor com 2 barras seccionadas	73
A.3	Testes com rotor com 3 barras seccionadas	79
A.4	Testes com rotor com 4 barras seccionadas	85

1 INTRODUÇÃO

O setor industrial, embora bastante afetado pela situação econômica atual, ainda é o setor que mais consome energia elétrica no país. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética, que presta serviços de estudo e pesquisa ao Ministério de Minas e Energia, entre os anos de 2015 e 2018 o consumo industrial representou aproximadamente 36% do consumo nacional anual de energia elétrica. Apenas em 2018, dos 472.242 GWh consumidos no Brasil, 169.549 GWh foram pela indústria.

Dado que em países industrializados, entre 40 e 75% da carga é constituída de motores de indução, essas máquinas se tornam itens bastante relevantes tanto no tangente do aumento de eficiência energética dentro da indústria, quanto no que diz respeito a produtividade deste segmento.

Com isso, torna-se importante a compreensão de funcionamento de máquinas de indução e a prevenção de falhas destes itens, visando a preservação de ativos de alto valor econômico e a conservação da produção industrial.

A manutenção preventiva e preditiva dessas máquinas passa a ser um investimento necessário, principalmente porque possibilitam maior planejamento de paradas e gestão de ativos, proteção das máquinas e evita-se parada de linhas em função de falhas com deterioração rápida.

Tendo em vista as demandas de mercado, diferentes fabricantes de equipamentos buscam agregar aos seus portfólios componentes que permitam monitoramento de máquinas, de forma a evitar danos a esses ativos. A SIEMENS, empresa multinacional voltada para soluções industriais e de eletrificação, também possui solução integrada à automação, que permite, através de análise do perfil vibratório da máquina, diagnóstico preciso de suas condições de funcionamento.

Para tanto, neste trabalho serão estudados elementos para detecção de barra rompida em motores de indução, utilizando sistema de monitoramento de condição comercial.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar e testar os elementos envolvidos na manutenção preditiva para detecção de falhas em máquinas de indução, em especial o rompimento de barras do rotor, utilizando-se o módulo de monitoramento de condições da SIEMENS.

A partir dos estudos realizados, será feita a configuração do módulo, seguida de testes em bancada, permitindo comparação de dados com aqueles obtidos com diferentes métodos de análise.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho possui cinco capítulos. O primeiro introduz o tema a ser discutido e estudado, além dos objetivos a serem atingidos. O segundo capítulo discute referências bibliográficas a serem seguidas neste trabalho. O terceiro capítulo contém materiais e métodos utilizados para análise. O quarto capítulo traz resultados e discussões acerca dos testes realizados. Por fim, o capítulo 5 expõe as conclusões deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos básicos, com intuito de familiarizar e contextualizar o leitor ao tema abordado no presente trabalho.

2.1 Máquinas de Indução

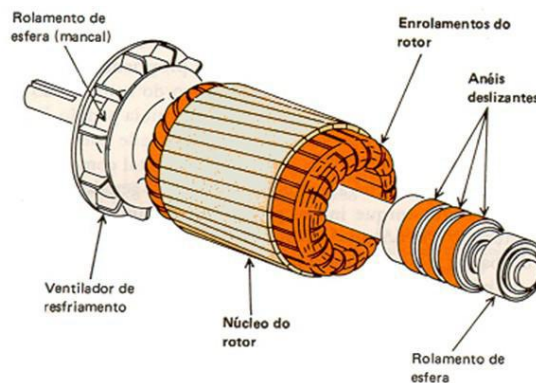
As chamadas Máquinas de Corrente Alternada (CA) são dispositivos elétricos que convertem energia elétrica em mecânica (motores) ou energia mecânica em elétrica (geradores) (CHAPMAN, 2013). Essas máquinas podem ser divididas em duas principais classes: as máquinas síncronas e as máquinas assíncronas, também chamadas de máquinas de indução.

As máquinas síncronas se caracterizam pelo fato da velocidade mecânica do eixo (ω_R) ser igual à velocidade síncrona da corrente fornecida ($\omega_s = 2\pi f_s$) (VIEIRA JR., 2016). Com isso, chamamos de máquinas assíncronas, aquelas em que não há tal sincronismo entre ω_R e ω_s .

Em específico, motores e geradores em que a tensão do rotor, a qual gera a corrente e o campo magnético neste enrolamento, é induzida pelos enrolamentos do estator, são chamados de máquinas de indução (CHAPMAN, 2013). A produção de torque nesse tipo de máquina ocorre devido à busca de alinhamento entre os fluxos girantes do estator e do rotor (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2002).

A construção do rotor de uma máquina de indução pode ser de dois tipos: bobinado ou gaiola de esquilo.

Figura 1 – Rotor bobinado.



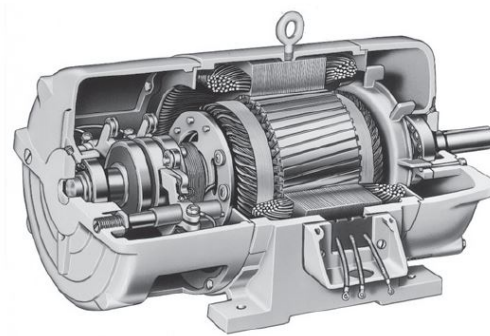
Fonte:(JUNIOR, 2017).

Os rotores bobinados possuem enrolamentos trifásicos semelhantes aos encontrados no estator e geralmente são ligados em Y. Nesse caso, os terminais dos enrolamentos

são ligados a anéis deslizantes isolados, que são presos ao eixo. O curto-circuito entre os enrolamentos do rotor são feitos através de escovas, que se apoiam aos anéis deslizantes, conforme representado na figura 1.

Com isso, neste tipo de motor, através das escovas, é possível medir as correntes do rotor, além permitir que se insira novas resistências ao circuito do rotor e consequentemente, se torna possível fazer alterações no comportamento do conjugado *versus* velocidade do motor (CHAPMAN, 2013). Na figura 2, é possível observar em corte um motor de indução de rotor bobinado.

Figura 2 – Motor de Indução com rotor bobinado.

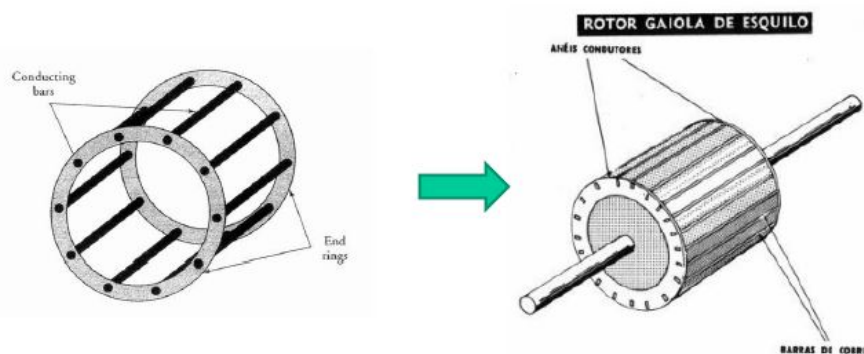


Fonte: (CHAPMAN, 2013).

As máquinas com rotor bobinado, por terem maior custo de fabricação e maior necessidade de manutenção, devido ao desgaste em anéis deslizantes e escovas, são menos utilizados que motores de rotor gaiola de esquilo.

O rotor do tipo gaiola de esquilo consiste em barras condutoras, encaixadas em ranhuras na superfície do rotor, com suas extremidades curto-circuitadas por anéis, geralmente de cobre ou alumínio. Essa estrutura pode ser observada na figura 3.

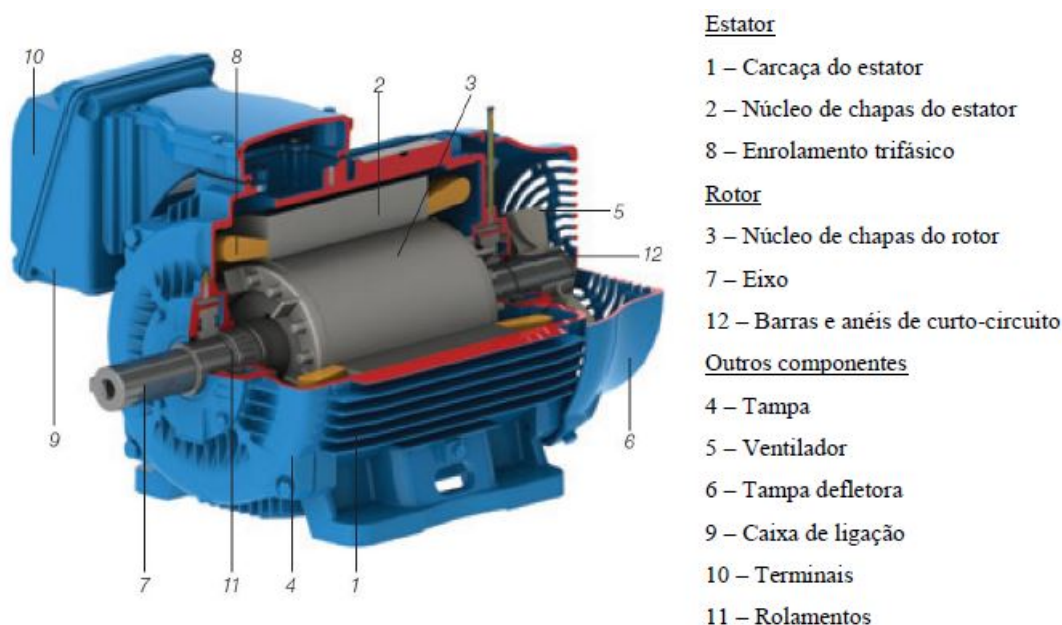
Figura 3 – Construção do rotor tipo gaiola de esquilo.



Fonte: (VIEIRA JR., 2016).

Na figura 4 abaixo, é possível observar de forma mais detalhada a construção de um Motor de Indução Trifásico (MIT), que será o tipo de máquina utilizada nos testes deste trabalho.

Figura 4 – Componentes de um MIT.



Fonte: (TREML, 2018).

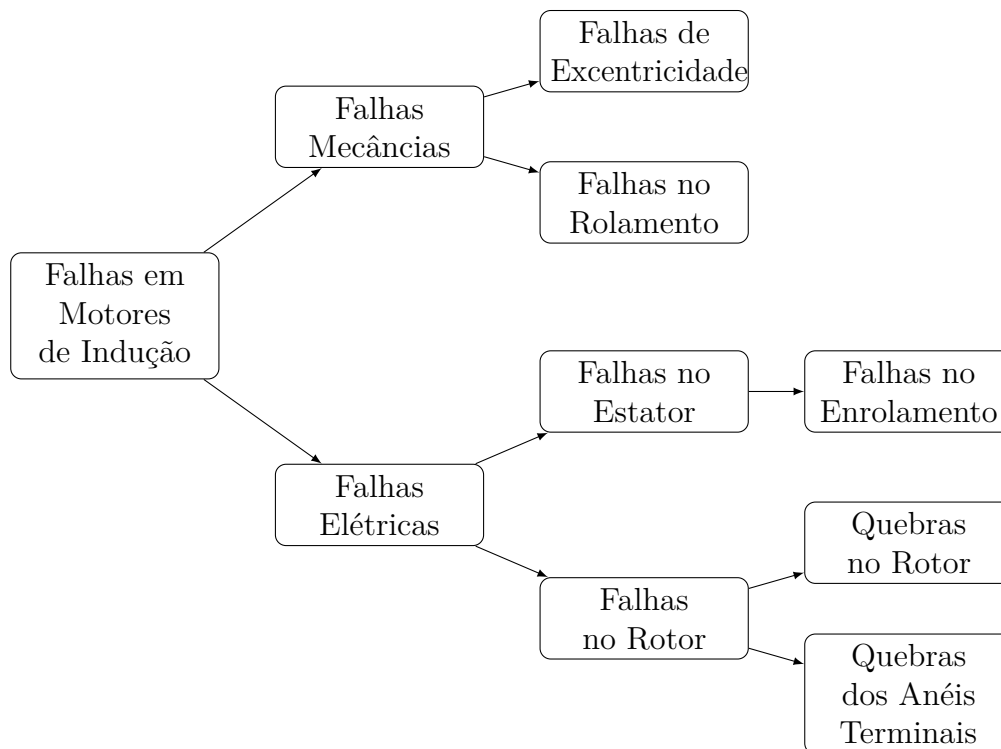
2.2 Falhas em motores de indução

Tendo em vista a ampla utilização dos MIT na indústria, a importância para alguns processos e o representativo consumo de energia dessas máquinas, aspectos como eficiência e qualidade energética, dimensionamento e controle mais precisos, identificação de falhas e manutenção preditiva dos MITs também se tornam fundamentais para a continuidade e eficiência do processo industrial.

Toda máquina possui uma vida útil devido a deterioração natural e dependendo das condições ambientais e diferentes cargas a que é exposta. Em decorrência a esse desgaste natural, defeitos podem surgir e nesse sentido, a detecção prematura de falhas passa a ser de suma importância. Assim, o monitoramento de condições de máquinas elétricas pode poupar a máquina de problemas mais severos, além de permitir maior planejamento da manutenção dessas máquinas, diminuindo custos de manutenção e tempo de máquina parada. Todos esses pontos aumentam a disponibilidade da máquina e podem permitir aumento da vida útil da mesma.

As falhas mais comuns em motores de indução podem ser classificadas conforme esquema abaixo da figura 5.

Figura 5 – Fluxograma relacionando falhas em máquinas elétricas.



Fonte: Adaptado de (SUETAKE, 2012)

Neste trabalho, as falhas elétricas tiveram maior enfoque, de forma mais específica, a quebra de barras do rotor.

2.2.1 Quebra de barras do rotor

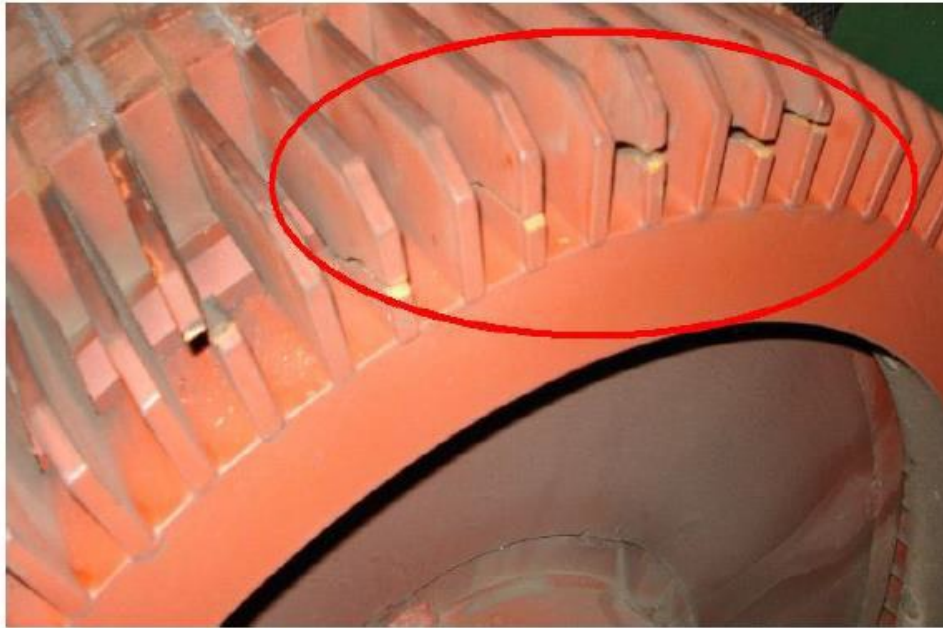
Falhas como quebra de barras do rotor ou rachaduras nos anéis da gaiola de esquilo representam entre 5% e 10% das falhas em MIT (SUETAKE, 2012).

Esse tipo de falha, em rotores gaiola de esquilo, geralmente ocorrem em função de tensões térmicas, mecânicas ou eletromagnéticas, ou devido à projetos inadequados da geometria do rotor, ou ainda à falhas de fabricação, podendo haver rompimento parcial ou completo de barras do rotor.

Em consequência à essa falha, observa-se tensões térmicas intensas e pulsação no torque eletromagnético, decorrente do desequilíbrio das correntes no rotor. Esse efeito causa redução do torque médio do motor, acarretando um funcionamento inadequado à operação desejada.

Na figura 6, apresenta-se imagem de um rotor com barras quebradas. Quando há rompimento de uma barra, pode-se gerar deterioração mais rápida das barras adjacentes devido ao aumento de tensões às quais ficam submetidas.

Figura 6 – Rotor com barras quebradas.



Fonte: ([TREML, 2018](#)).

Há casos em que a barra rompida do rotor pode se desprender do rotor, podendo se chocar com o núcleo magnético e enrolamento do estator, ou com núcleo magnético e outras barras do rotor, causando danos maiores ao motor ([TREML, 2018](#)).

2.3 Métodos de detecção de falhas

Visando evitar a ocorrência de falhas, as ações de manutenção passam a ser bastante relevantes no funcionamento das indústrias.

Manutenção envolve toda ação de conserto ou conservação de um ativo. É possível classificar essas ações em três: Manutenções Corretivas, Manutenções Preventivas e Manutenções Preditivas.

Manutenções Corretivas são aquelas que se fazem necessárias quando uma falha já ocorreu e o reestabelecimento do funcionamento da máquina é necessário. Manutenções Preventivas são ações de manutenção programadas e periódicas, feitas antes da ocorrência de falhas e que objetivam a redução do risco de paradas. Por fim, as Manutenções Preditivas se resumem às ações que visam monitorar as condições de funcionamento da máquina e possibilitem a predição do ponto ótimo para intervenções da manutenção. Esse tipo de manutenção permite que se utilize o ativo de forma mais eficiente, se amplie a vida útil da máquina, além de possibilitar maior planejamento das ações de manutenção e diminuição da necessidade de manter peças em estoque.

Modelagens matemáticas e técnicas de aquisição que possibilitem o monitoramento

e detecção de anomalias em MIT são amplamente estudados e diferentes parâmetros podem ser utilizados para a detecção de defeitos, como monitoramento do campo eletromagnético, medições de temperatura, reconhecimento infravermelho, monitoramento de emissões em radiofrequência, monitoramento de ruído e sinais de vibração, análise química, medições de ruído acústico, análise espectral da corrente elétrica e tensões do estator (TREML, 2018).

Neste trabalho, utiliza-se o monitoramento de parâmetros de vibração mecânica e velocidade da máquina, observando-os em função do tempo e da frequência.

2.3.1 Controladores Lógicos Programáveis

Controladores Lógicos Programáveis (CLP) são equipamentos eletrônicos confeccionados para aplicações industriais. Surgiram no final da década de 1960 para substituir os painéis de sequenciamento a relés que eram utilizados no controle de linhas de montagem de veículos da *General Motors*. Naquele contexto, a empresa tinha interesse de utilizar computadores para executarem tal função. Com isso, em 1969, a *Modcon* e a *Allen Bradley* produziram os primeiros CLPs (BRANDÃO, 2016).

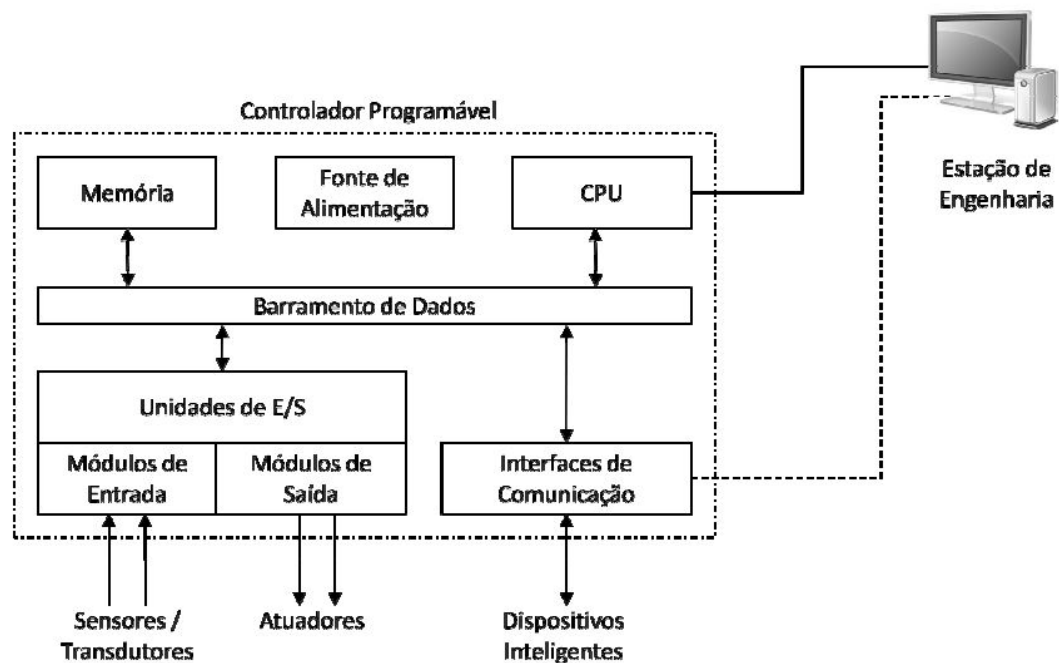
Essa tecnologia vem se desenvolvendo de forma bastante rápida e hoje, através do uso de CLPs, é possível executar tarefas de acionamentos, contagens, cálculos e comparações, com variáveis digitais e analógicas, além de permitir comunicações via rede.

A estrutura básica de um Controlador Lógico Programável composta por:

- *Central Processing Unit* (CPU): Unidade central de processamento;
- Unidade de alimentação: Pode ser um cartão integrado à CPU, que é alimentado externamente e fornece energia à CPU;
- Memória: costuma ser interna à CPU e armazena dados de programa, sistema operacional (*firmware*);
- Interfaces ou cartões de Entradas e Saídas: são pontos de interligação entre o CLP e as variáveis externas, provenientes de sensores e atuadores. Possuem circuitos eletrônicos que fazem o condicionamento dos sinais digitais e analógicos adquiridos. As interfaces de entradas e saídas podem ser integrados às CPUs, bem como podem estar em módulos de expansão, variando de acordo com modelo e fabricante do equipamento;
- Interface de comunicação: podem ser módulos de comunicação ou portas integradas ao CLP, que permitem a comunicação do CLP com outros dispositivos de automação, sistema de supervisão e dispositivos de programação do CLP. Uma interface de comunicação necessariamente segue protocolos de comunicação, que podem ser abertos ou proprietários.

Pode-se observar essa estrutura na figura 7 abaixo.

Figura 7 – Estrutura de um CLP.



Fonte: (BRANDÃO, 2016).

2.4 Condition Monitoring System - Detecção de falhas

Com o aumento das tecnologias empregadas à automação industrial, cada vez mais aplicações e configurações são possíveis com o emprego de CLPs.

Hoje, os recursos disponíveis permitem a coleta de maior volume de dados da produção e também dos dispositivos empregados para a produção. Assim, é possível ampliar a automatização dos processos produtivos, aumentar a eficiência no processo e também a eficiência energética, além de fornecer mais informações para as tomadas de decisão.

Nesse sentido, também as ferramentas de manutenção agregadas à automação vem sendo ampliadas e desenvolvidas. A exemplo disso, diversas soluções voltadas à manutenção preditiva de máquinas são comercializadas, como o módulo CMS1200 do fabricante SIEMENS.

O CMS1200 é um módulo pertencente à linha de controladores básicos da SIEMENS, SIMATIC S7-1200 e funciona em conjunto com a CPU do CLP, conforme observa-se na figura 8 abaixo.

Figura 8 – CPU com Módulo CMS1200.



Fonte: autoria própria

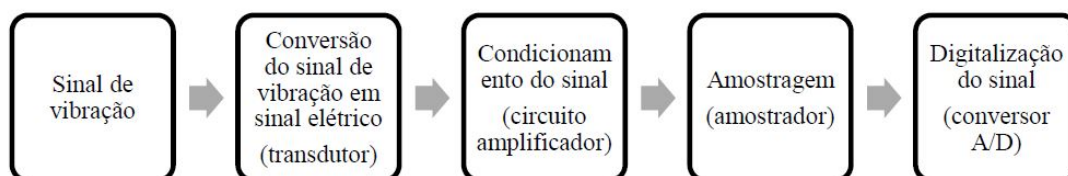
Com o uso do módulo, é possível fazer diagnóstico das falhas mais comuns em MIT. Para falhas mecânicas, é possível detecção de ressonâncias, desequilíbrios, danos nos rolamentos, erro de engrenamento, erro de alinhamento, e falhas na frequência de passagem de pás. Para falhas elétricas, pode-se detectar falhas no campo do estator e ruptura de barras no rotor.

O diagnóstico preciso destas falhas são possíveis através da aquisição de parâmetros vibratórios, parâmetros de velocidade da máquina e o processamento dos sinais. Para esse fim, o módulo se utiliza da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transformer*), abordada nas próximas seções.

2.5 Aquisição de sinais

Pode-se separar a aquisição de sinais de vibração em cinco etapas, conforme a figura 9 abaixo.

Figura 9 – Etapas da aquisição de sinais de vibração



Fonte: (TREML, 2018)

O uso de transdutores é a primeira etapa para a aquisição de sinais. Esses dispositivos, que recebem sinais em uma forma de energia e convertem esse sinal em outra

grandeza física, permitem a medição de grandezas a partir da relação especificada que possuem entre seus sinais de entrada e sinais de saída. Os termopares e acelerômetros são exemplos de transdutores, que medem grandezas físicas e transformam-nas em grandezas elétricas.

Os chamados acelerômetros são comumente usados para mensurar o movimento oscilatório do equipamento monitorado. É possível se utilizar parâmetros de velocidade e de deslocamento, tendo em vista a possibilidade de integração do sinal usado ([TREML, 2018](#)).

O princípio de funcionamento desse tipo de transdutor se baseia na segunda lei de Newton, tendo em vista que a ação de uma força de excitação, gera aceleração da massa inercial do transdutor, a qual é transformada em sinal elétrico.

Os principais transdutores usados para a medição de vibração são os piezoelétricos, os piezorresistivos e os capacitivos. Em especial, os acelerômetros piezoelétricos são o tipo mais amplamente utilizados, em função da aplicabilidade em grande espectro de frequência; boa linearidade em ampla faixa dinâmica; é bastante compacto e possui alta sensibilidade em relação à massa; adequação à aplicação em diferentes condições ambientais, mantendo sua precisão adequada; e ainda possui longa durabilidade, por não possuir partes móveis ([TREML, 2018](#)).

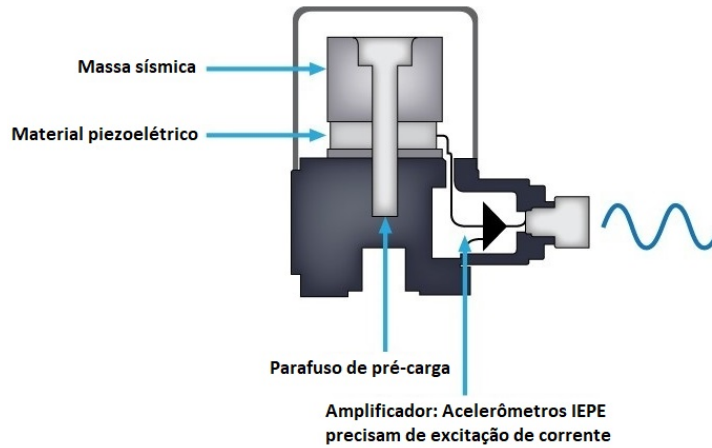
As propriedades piezoelétricas de um material se devem à estrutura cristalina de baixo grau de simetria que os compõe. Dessa forma, quando expostos à deformação, esses materiais se tornam polarizados, gerando um campo elétrico interno e diferença de potencial entre as extremidades do material.

Para todo transdutor, há uma faixa de funcionamento em que se tem comportamento conhecido e proporcional entre a grandeza de entrada e a grandeza de saída. Esse intervalo entre a amplitude máxima e mínima de medição, sem que hajam distorções, é chamado de faixa dinâmica. Na faixa dinâmica, tem-se uma relação linear entre a deformação mecânica sofrida pelo acelerômetro piezoelétrico e o sinal elétrico medido.

Na figura 10, pode-se observar a construção de um acelerômetro. A aceleração da estrutura de teste é transmitida a uma massa sísmica, a qual exerce força no material piezoelétrico, que por sua vez gera um sinal elétrico proporcional à vibração.

O sinal elétrico gerado pelo piezoelétrico é pequeno e por isso precisa de um amplificador externo ou amplificador de carga em linha. Há ainda modelos de acelerômetros que já possuem amplificador sensível a carga incluído e são chamados sensores piezoelétricos com eletrônica embarcada (IEPE). Esse tipo de acelerômetro trabalha com fonte de corrente constante e sua impedância se altera de forma proporcional à variação de carga no cristal piezoelétrico ([NATIONAL... , 2019](#)).

Figura 10 – Vista em corte de um acelerômetro piezoelétrico.

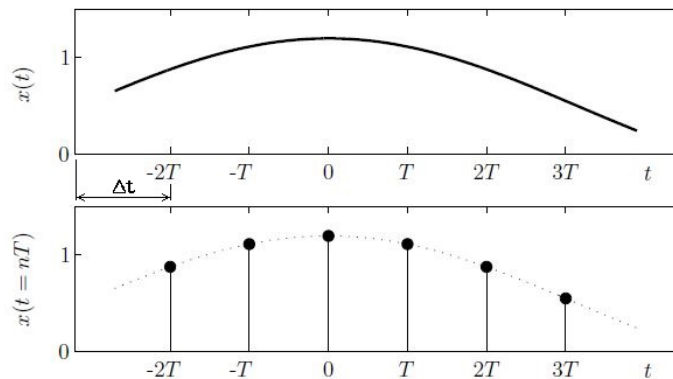


Fonte: adaptado de ([NATIONAL... , 2019](#))

Com isso, o sinal de saída do sensor de vibração IEPE, já condicionado, passa pelo procedimento de amostragem. Esse procedimento consiste em transformar o sinal obtido em função de uma variável contínua, $x(t)$, em um sinal discreto x_n , constituído por N amostras, e cujas amplitudes são registradas em instantes pré-fixados. Neste caso, podemos dizer que o sinal foi amostrado no tempo, ou seja, o sinal produz uma amostra a cada período T de tempo.

O intervalo entre as amostras coletadas, Δt , é chamado de intervalo de amostragem e a taxa de amostragem é um parâmetro bastante importante para a qualidade do sinal amostrado. Para evitar erros, como o fenômeno de falseamento (*aliasing*), utiliza-se o Critério de Nyquist para definição da taxa de amostragem. Este critério define que a frequência de amostragem seja pelo menos duas vezes a máxima frequência esperada para o sinal de entrada.

Figura 11 – Amostragem de função contínua no tempo.



Fonte: adaptado de ([OPPENHEIM A. V.; SCHAFER, 1998](#))

Por fim, o sinal analógico discretizado é convertido para um sinal digital, ou seja, o sinal analógico passa a ser representado por uma série de dados binários que podem ser armazenados e processados.

2.6 Técnica de processamento de sinais

A condição de monitoramento e o processamento do sinal são itens bastante preponderantes para a detecção bem-sucedida de falhas. Para isso, as ferramentas utilizadas são aplicadas ao domínio do tempo, ao domínio da frequência ou também ao domínio tempo-frequência.

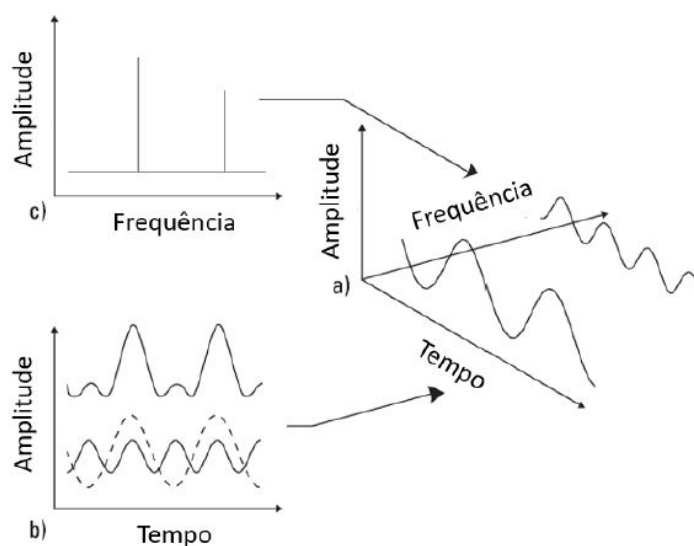
A análise do comportamento vibracional de uma MIT no domínio do tempo pode ser uma técnica para detecção de alterações nas características da máquina e identificação de falhas. Essa técnica pode ser interessante devido a sua simplicidade de implementação, contudo, a sensibilidade desse método é baixa.

No contexto do uso do módulo CMS 1200, esse tipo de análise pode ser feita, e níveis de vibração de aviso e alarme podem ser configurados para que, quando ultrapassados, o usuário possa ser avisado e tome as ações necessárias.

2.6.1 Análise no domínio da frequência

A caracterização de defeitos no domínio da frequência é uma forma mais precisa de detectar variações nas componentes espectrais que eventualmente ficam mascaradas quando analisadas no domínio do tempo.

Figura 12 – Relação entre os domínios do tempo e da frequência. a) Coordenadas tridimensionais de tempo, frequência e amplitude; b) Vista do domínio do tempo; c) Vista do domínio da frequência.



Fonte: (TREML, 2018)

A figura 12 resume de forma gráfica a relação entre a representação no domínio do tempo, em que se tem a amplitude de um sinal em função do tempo, e a representação no domínio da frequência, em que se tem o comportamento da amplitude do sinal em função da frequência.

Conforme descrito anteriormente, os dados são medidos em função do tempo e para que se possa analisar tais sinais no espectro de frequência, utiliza-se de ferramentas matemáticas, chamadas transformadas, para fazer a mudança do domínio do tempo para o domínio da frequência. A Transformada de Fourier é a ferramenta matemática mais usada para essa transformação e definição de parâmetros como amplitude, frequência e fase do sinal transformado.

Utilizando-se dos estudos e descobertas feitas por Jean Baptiste Joseph Fourier, tem-se que qualquer sinal periódico $x(t)$ no tempo t , com período T , pode ser escrito como uma série trigonométrica infinita, conhecida como série de Fourier. A partir da manipulação desta série, é possível fazer a dedução das equações do par Transformada de Fourier, mostradas abaixo:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot e^{j2\pi ft} df \quad (2.2)$$

Onde $X(f)$ é a Transformada de Fourier de $x(t)$ na forma complexa.

Levando em consideração que os sinais a serem analisados no contexto de detecção de falhas são sinais já amostrados, e portanto sinais discretos, utiliza-se a Transformada Discreta de Fourier, do inglês DFT.

Tomando por base a representação da série de Fourier de um sinal discreto, é possível deduzir as equações de análise (equação 2.3) e de síntese (equação 2.4) da DFT abaixo:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (2.3)$$

$$x[n] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \cdot e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (2.4)$$

2.6.2 Fast Fourier Transform

A transformada rápida de Fourier, em inglês, *Fast Fourier Transform* (FFT) é um importante algoritmo computacional que revolucionou a análise de sinais. Este algoritmo faz o cálculo da DFT (TREML, 2018).

A FFT é um método numericamente eficiente para a análise de sinais estacionários e periódicos em uma janela de tempo. Além disso, se mostra a maneira mais simples de explorar as propriedades dos sinais ([TREML, 2018](#)).

Contudo, para detecção de falhas em condições não estacionárias, ou de componentes de frequências características próximas à frequência natural, esse método se mostra pouco eficiente, principalmente devido à sua baixa resolução ([TREML, 2018](#)).

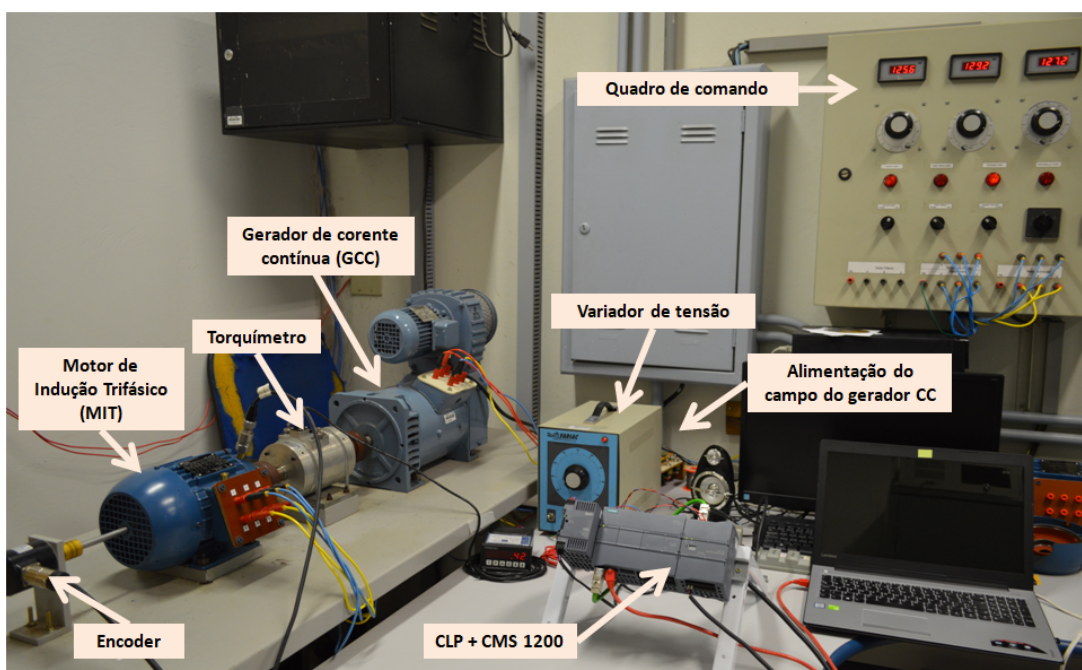
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Bancada experimental

Para a realização dos testes utilizando o módulo CMS 1200, utilizou-se do espaço de laboratórios e da bancada experimental retratada na figura 13 abaixo.

Figura 13 – Bancada experimental usada.



Fonte: autoria própria (2019)

A bancada experimental é composta por um MIT acoplada a uma Máquina CC, que funciona como gerador para que possamos simular uma carga resistente. Essas máquinas estão conectadas por um eixo que possui torquímetro rotativo.

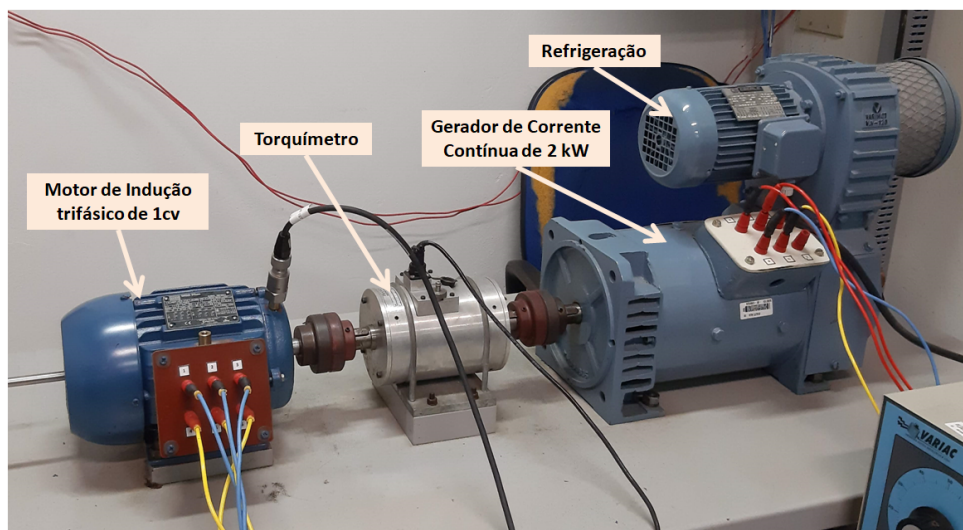
O motor de indução trifásico é o modelo W22 da linha *standard* de fabricação da empresa WEG. É um motor de 1cv, 220/380V, 3,02A/1,75A, 4 polos, 60Hz, torque nominal de 4,1 N.m e velocidade nominal de 1715 rpm. O rotor dessa máquina é do tipo gaiola de esquilo, composta por 34 barras. O acionamento dessa máquina é feito através do quadro de comando.

O gerador de corrente contínua tem potência igual a 2 kW, tensão nominal de campo de 190V e tensão nominal de armadura igual a 250V. Possui ventilação forçada através de um motoventilador montado de forma externa, cujo modelo corresponde ao BN 100 L do fabricante Varimont. O acionamento da máquina CC é feito por um circuito de

alimentação da bobina de campo, de forma que através do Variac (variador de tensão), se consiga variar a tensão de campo e consequentemente ajustar o torque resistente imposto ao eixo.

O torquímetro rotativo presente na bancada é do modelo MT-103 do fabricante Transtec. Possui rotação máxima igual a 2000 rpm e sensibilidade de 2 mV/V. Este equipamento permite a visualização do torque aplicado, de forma a servir de parâmetro para os ensaios realizados.

Figura 14 – Máquinas utilizadas no experimento.



Fonte: autoria própria (2019)

3.1.2 Rotores utilizados para testes

Para que se pudesse observar o comportamento da máquina sob grau maior ou menor de severidade de falhas, foram utilizados quatro rotores diferentes.

Os rotores utilizados foram perfurados com o auxílio de uma furadeira de bancada, com broca de 6 mm de diâmetro e furos iguais de 20 mm de profundidade. Os furos nos rotores foram feitos de forma a romper barras adjacentes, buscando aproximar o ensaio das condições reais em que esse tipo de falha ocorre.

Utilizou-se um rotor sem rompimento de barras, ou seja, um rotor são, um segundo com duas barras quebradas, com três barras rompidas e com quatro barras rompidas, conforme ilustrado nas figuras 15 e 16 a seguir.

Figura 15 – Inserção de falhas nos rotores.

- (a) Procedimento para rompimento de barras
(b) Rotor com duas barras rompidas



Fonte: (SUETAKE, 2012)

Figura 16 – Rotores usados para testes.

- (a) Rotor com três barras seccionadas
(b) Rotor com quatro barras seccionadas



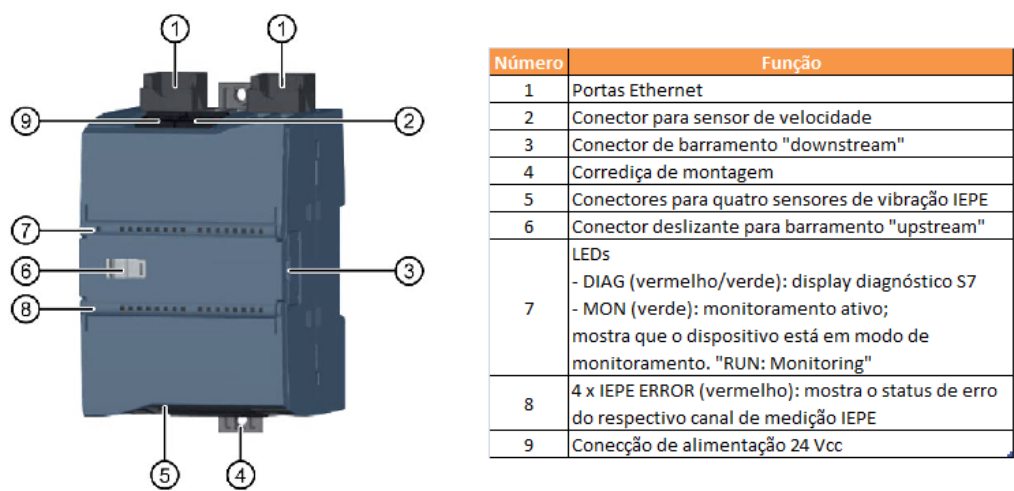
Fonte: autoria própria (2019)

3.1.3 Equipamentos de Instrumentação

Os testes foram realizados utilizando o SIPLUS CMS 1200, módulo de modelo SM1281, em conjunto com uma CPU modelo 1215C do fabricante SIEMENS.

Na figura 17, tem-se uma breve descrição dos componentes do módulo utilizado. As configurações feitas para uso do mesmo estão descritas na seção “Métodos”.

Figura 17 – Identificação dos componentes do módulo.

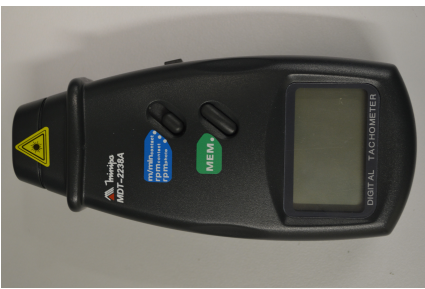


Fonte: (SIEMENS, 2019)

Para o uso correto do módulo CMS 1200, se faz necessária uma referência de velocidade. Há no próprio módulo possibilidade de uso da velocidade configurada via rede ethernet, colhendo dados de um inversor de frequência comercial, ou há a possibilidade de uso da entrada digital recebendo sinais de um *encoder* de velocidade. Para o uso correto de *encoder*, há necessidade de adequação do sinal enviado pelo *encoder* à entrada digital do módulo, tendo em vista sua limitação de até 100 pulsos por revolução. Para os testes do presente trabalho, os dados de velocidade foram lidos com o auxílio de um tacômetro digital e inseridos à configuração do módulo de forma manual.

O Tacômetro Digital usado é do modelo MDT-2238A do fabricante Minipa.

Figura 18 – Tacômetro Digital.



Fonte: autoria própria (2019)

Na figura 17, também é possível notar a existência de quatro entradas para sensores de vibração diretamente no módulo. A uma dessas portas, ligou-se um acelerômetro piezoelétrico do modelo SIPLUS CMS2000 VIB-Sensor (6AT8002-4AB00) do fabricante SIEMENS, padrão IEPE com sensibilidade de 100 mV/g ($\pm 10\%$), faixa de frequência de 0,5 a 15000 Hz e invólucro em aço inoxidável.

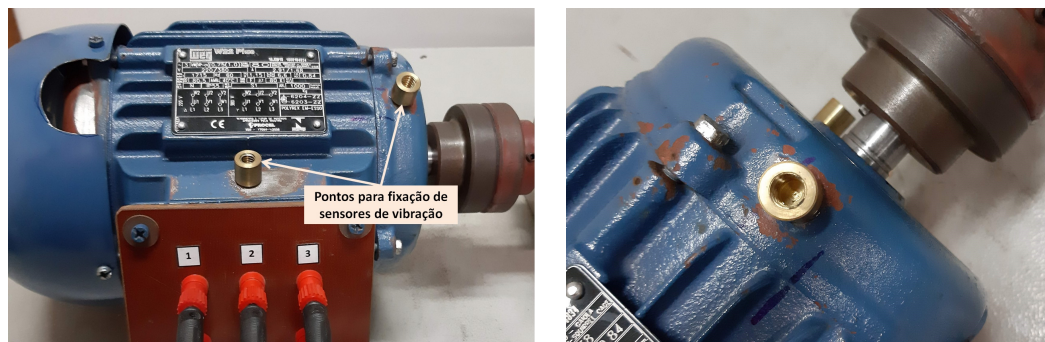
Figura 19 – Acelerômetro Piezoelétrico IEPE.



Fonte: autoria própria (2019)

O sensor foi fixado em posição radial, no lado acionado do MIT. A fixação do transdutor foi feita através de parafuso, confeccionado na oficina mecânica, rosqueado a um adaptador fixado de forma permanente à máquina, através de adesivo a base química de etilcianoacrilato. Na figura 20, é possível verificar o adaptador usado para fixar o sensor à máquina.

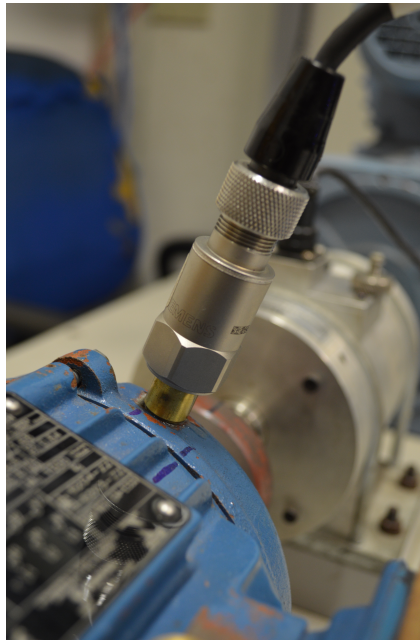
Figura 20 – Pontos de fixação do acelerômetro.



Fonte: autoria própria (2019)

Com isso, utilizou-se graxa de silicone para lubrificação do acoplamento do sensor. Na figura 21, verifica-se a configuração final do sensor acoplado ao MIT.

Figura 21 – Montagem do transdutor à máquina de indução.



Fonte: autoria própria (2019)

3.2 Métodos

Para que o uso do módulo CMS 1200 se dê de forma correta, se faz necessária a observação de alguns requisitos de *hardware* e *software*:

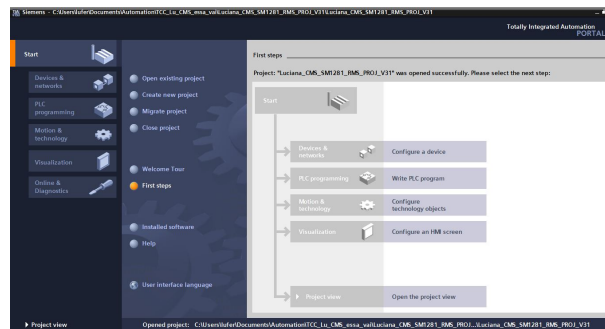
- A versão de *firmware* da CPU usada deve ser no mínimo versão 4.0;
- Há versões mais antigas de *firmware* do módulo. As versões mais novas apresentam correções de falhas e por isso recomenda-se manter o módulo e CPU em suas versões mais atuais;
- Deve-se observar a compatibilidade entre a biblioteca usada para configuração do módulo e a versão de *firmware* instalado no módulo.

Para o uso do módulo CMS 1200, o mesmo deve ser configurado através do TIA Portal, o *software* de automação da SIEMENS.

Através do site do suporte do fabricante, é possível ter acesso à manuais, bibliotecas, exemplos de aplicação e dúvidas frequentes do produto. As configurações básicas e dados importantes para a configuração usadas neste projeto, se encontram no documento ([SIEMENS, 2019](#)).

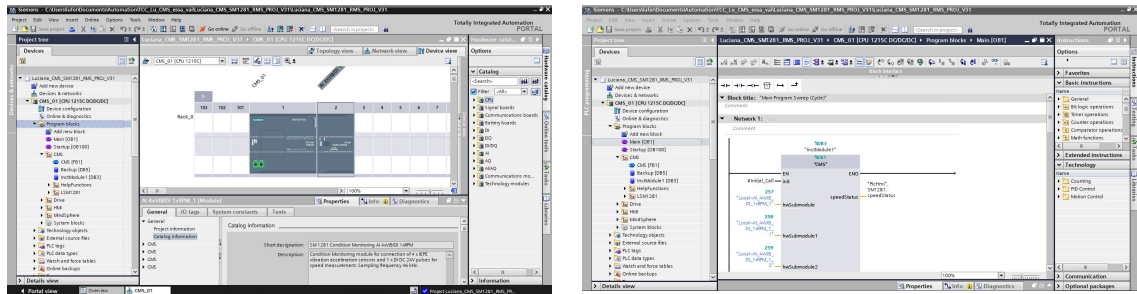
Tendo a biblioteca correta já disponível, configura-se o bloco relativo ao módulo e em seguida, configura-se um bloco para cada canal de aquisição do módulo (no máximo quatro canais por módulo).

Figura 22 – Tela inicial do software TIA Portal.



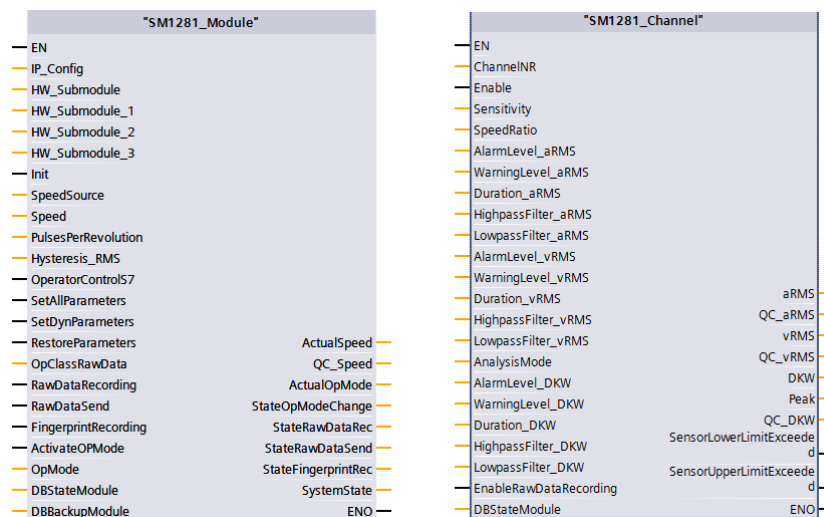
Fonte: autoria própria (2019)

Figura 23 – Telas de configuração dentro do TIA Portal.



Fonte: autoria própria (2019)

Figura 24 – Blocos de configuração do módulo e do canal do CMS 1200.



Fonte: (SIEMENS, 2019)

Conforme demonstrado na figura 24, a partir da configuração dos blocos, atribui-se ao módulo endereço IP, dados do sensor usado, parâmetros de operação e valores esperados de aviso e alarme.

Através da definição do parâmetro ”*SpeedSource*“ como 1, que define que a referência de velocidade será oriunda do S7-1200 através da variável *Speed* do bloco de configuração, é possível inserir valores reais na variável ”*Speed*“ de forma manual para configuração da velocidade de funcionamento do MIT correspondente.

Foram observados aspectos do manual do equipamento para definição dos espectros de frequência a serem observados e possíveis medições que poderiam ser esperadas. Os métodos indicados pelo fabricante do módulo são resumidos na figura 25 abaixo.

Se verifica na tabela da figura 25, que há indicação do fabricante quanto aos parâmetros que devem ser analisados para detecção de cada falha. Através das três últimas linhas, percebe-se que o valor RMS pode ser observado para diagnóstico de falhas elétricas no domínio do tempo. Da mesma forma, observa-se que no espectro da frequência, para diagnósticos de falhas elétricas, os espectros de velocidade e aceleração de vibração devem ser monitorados.

Figura 25 – Métodos de monitoramento abordados pelo manual.

Tipo de falha	Medição de vibração no domínio do tempo (procedimento de análise do valor característico)	Análise no domínio da frequência		
		Velocidade de vibração	Aceleração de vibração	Espectro do envelope
Desbalanceamento	RMS	1x frequência de rotação f_n	-	-
Desalinhamento, defeito de acoplamento	RMS	1x frequência de rotação f_n 2x frequência de rotação f_n	-	-
Defeito de montagem	RMS	1x frequência de rotação f_n 2x frequência de rotação f_n 3x frequência de rotação f_n	-	-
Frequência de passagem das pás	RMS	$f_{sp} \leq 1 \text{ kHz}$	$f_{sp} > 1 \text{ kHz}$	-
Falha de engrenamento	-	$f_z \leq 1 \text{ kHz}$	$f_z > 1 \text{ kHz}$	-
Falha de correia	RMS	$f_R \leq 1 \text{ kHz}$	$f_R > 1 \text{ kHz}$	-
Ressonância	RMS	Frequência de ressonância = frequência de rotação f_n	-	-
Rolamento (Bearing wear)	DKW	-	$3 \text{ kHz} \leq f_{LE} \leq 10 \text{ kHz}$	-
Bearing damage frequency	DKW	-	-	Dependente da geometria para: pista interna, pista externa, gaiola e esfera
Falha elétrica de estator	RMS	2x frequência de rede f_{line}	-	-
Falha elétrica de rotor	RMS	$f_{bar} \leq 1 \text{ kHz}$	$f_{bar} > 1 \text{ kHz}$	-
Quebra de barra no rotor	RMS	2x frequência de rede f_{line} Modulação com frequência de escorregamento f_{slip}	-	-

Fonte: (SIEMENS, 2019)

Com isso, e através do página *web* integrada ao módulo, foram realizados os testes, variando o torque resistente imposto ao eixo da MIT e verificando os espectros da velocidade e aceleração de vibração, no domínio da frequência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos a partir dos testes efetuados.

Os valores registrados nas tabelas são valores do domínio do tempo, sendo eles: aRMS (Intervalo real, valor RMS da aceleração da vibração em m/s^2); vRMS (Valor real, valor RMS da velocidade da vibração em mm/s); DKW (Valor real, valor característico do diagnóstico, formado pela razão de $(aRMS * Pico)$ para um valor inicial); aPeak (Intervalo real, valor de pico da aceleração da vibração em m/s^2).

Tendo em vista o objetivo deste trabalho de analisar parâmetros em função da frequência, os valores no domínio do tempo, registrados nas tabelas, não são analisados, principalmente dada a situação em que não se tem registro histórico de dados do motor analisado.

4.1 Testes com rotor são

Tabela 1 – Valores no espectro do tempo medidos com Rotor sem barras seccionadas.

Velocidade (rpm)	Torque (N.m)	aRMS (m/s^2)	vRMS (mm/s)	DKW	aPeak (m/s^2)
1774	0,5	0,65	7,51	13,15	5,99
1717	1,5	0,69	10,85	32,62	8,83
1605	3	1,1	23,71	47,9	10,57

Abaixo, os espectros encontrados para velocidade de 1774 rpm e torque 0,5 N.m e rotor são.

Figura 26 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor são, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$.

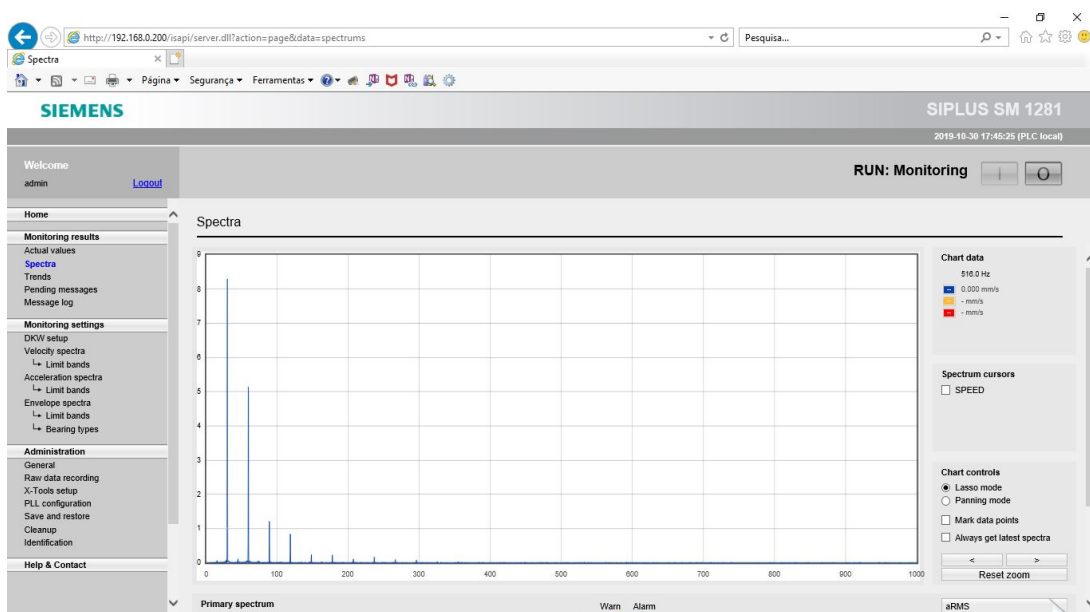
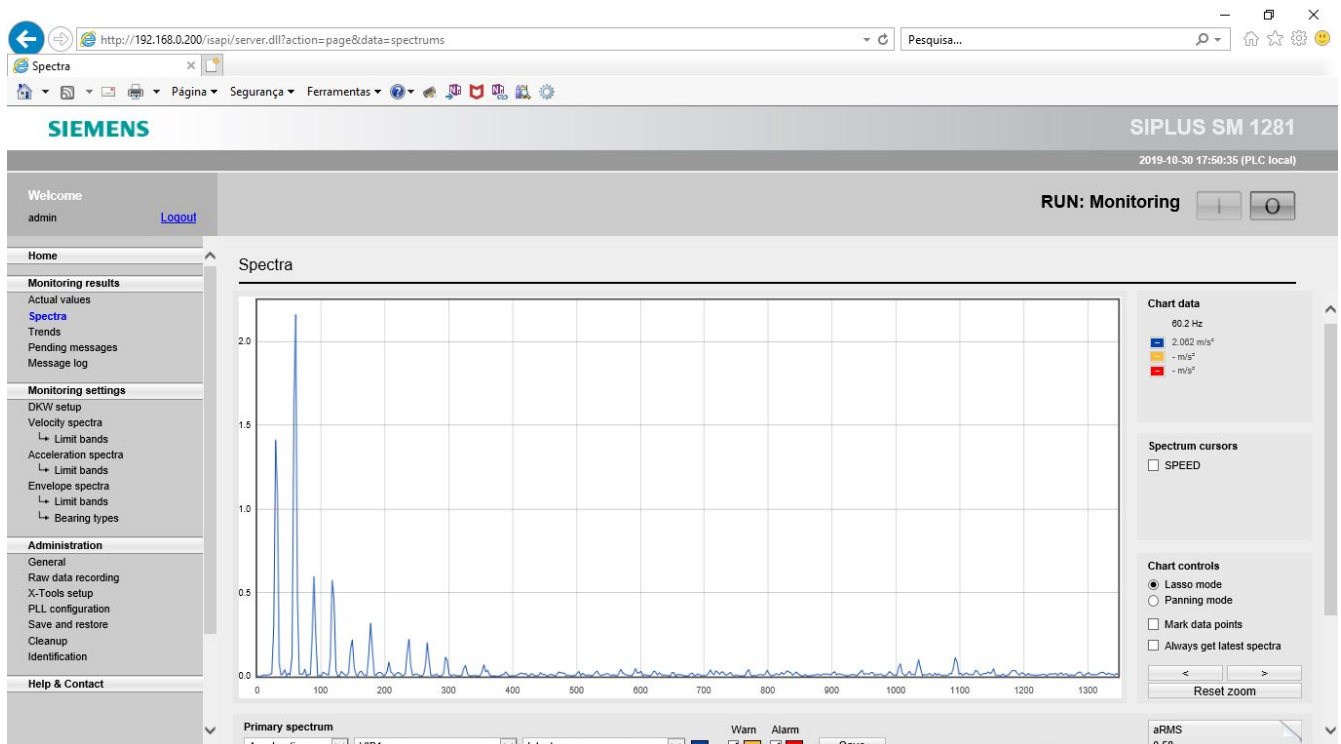


Figura 27 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor são, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$.



Abaixo, se encontram os espectros encontrados para velocidade de 1717 rpm e torque 1,5 N.m e rotor são.

Figura 28 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor são, $v = 1717rpm$ e $T = 1,5N.m$.

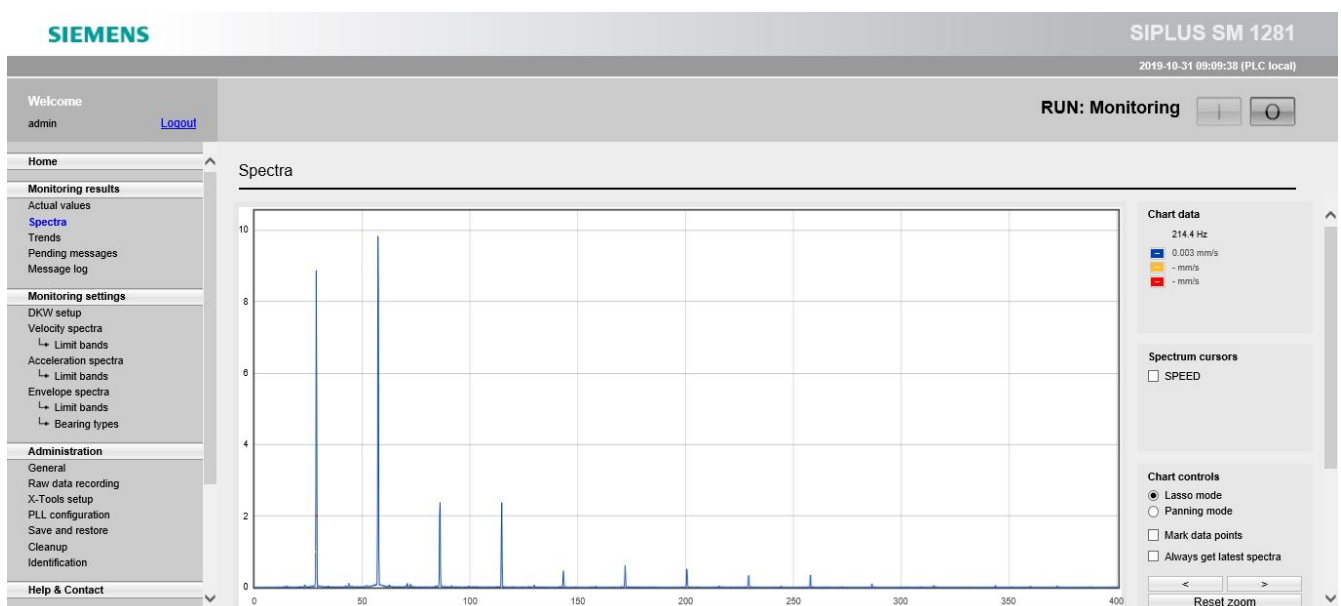
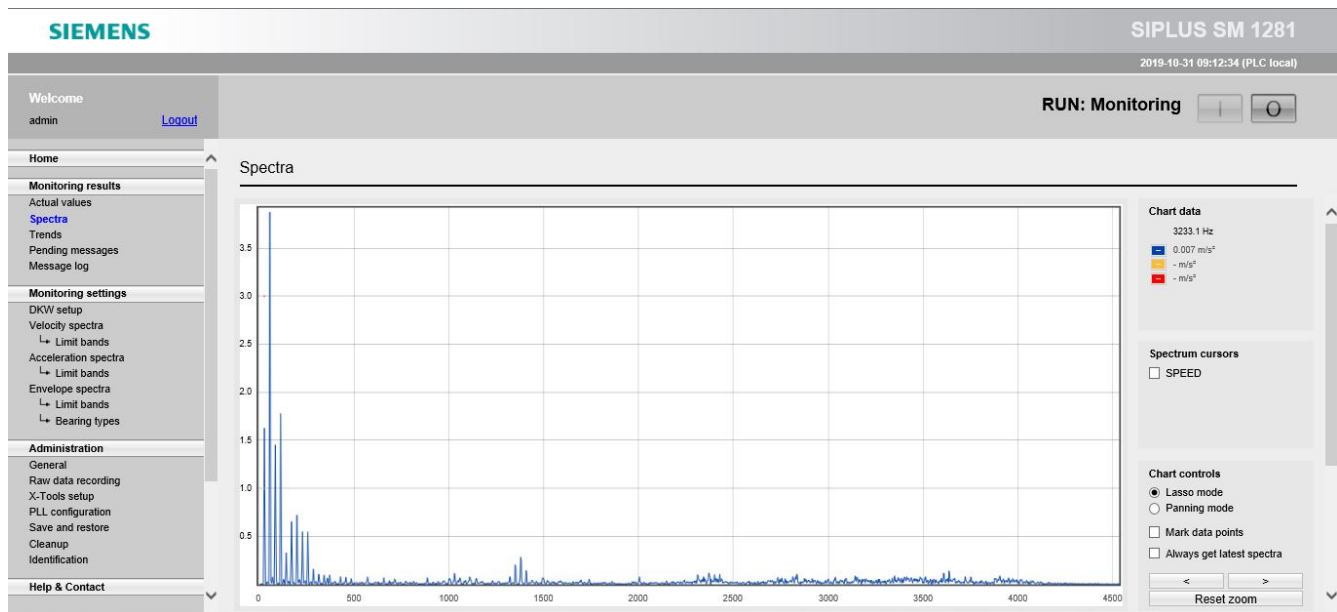
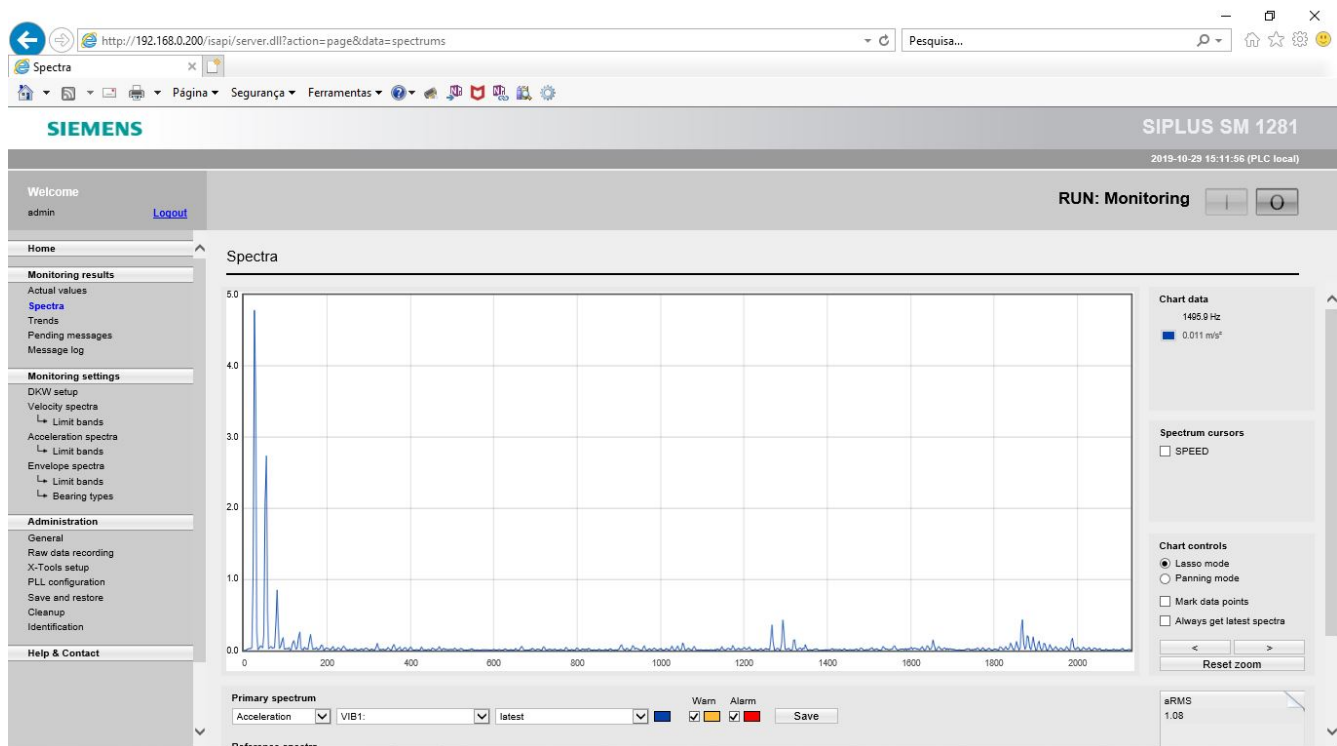


Figura 29 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor são, $v = 1717rpm$ e $T = 1,5N.m$.



Abaixo, se encontra o espectro de aceleração encontrado para velocidade de rotação de 1605 rpm e torque 3,0 N.m e rotor são.

Figura 30 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor são, $v = 1605rpm$ e $T = 3,0N.m$.



Comparando os dados obtidos para os diferentes regimes de funcionamento com o rotor são, com a alteração do toque resistente, percebe-se que conforme há aumento na carga, o nível de vibração se elevam, fenômeno que se reflete na amplitude das frequências analisadas.

4.2 Testes com rotor com 2 barras seccionadas

Tabela 2 – Valores no espectro do tempo medidos com rotor com 2 barras seccionadas.

Velocidade (rpm)	Torque (N.m)	aRMS (m/s^2)	vRMS(mm/s)	DKW	aPeak (m/s^2)
1774	0,5	0,49	8,67	18,84	6,95
1720	1,5	0,57	7,76	16,65	6,48
1585	3	1,14	21,44	38,34	9,51

Abaixo, se encontram os espectros encontrados para velocidade de rotação igual a 1774 rpm e torque 0,5 N.m, com rotor com 2 barras quebradas.

Figura 31 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1774\text{rpm}$ e $T = 0,5\text{N.m}$.

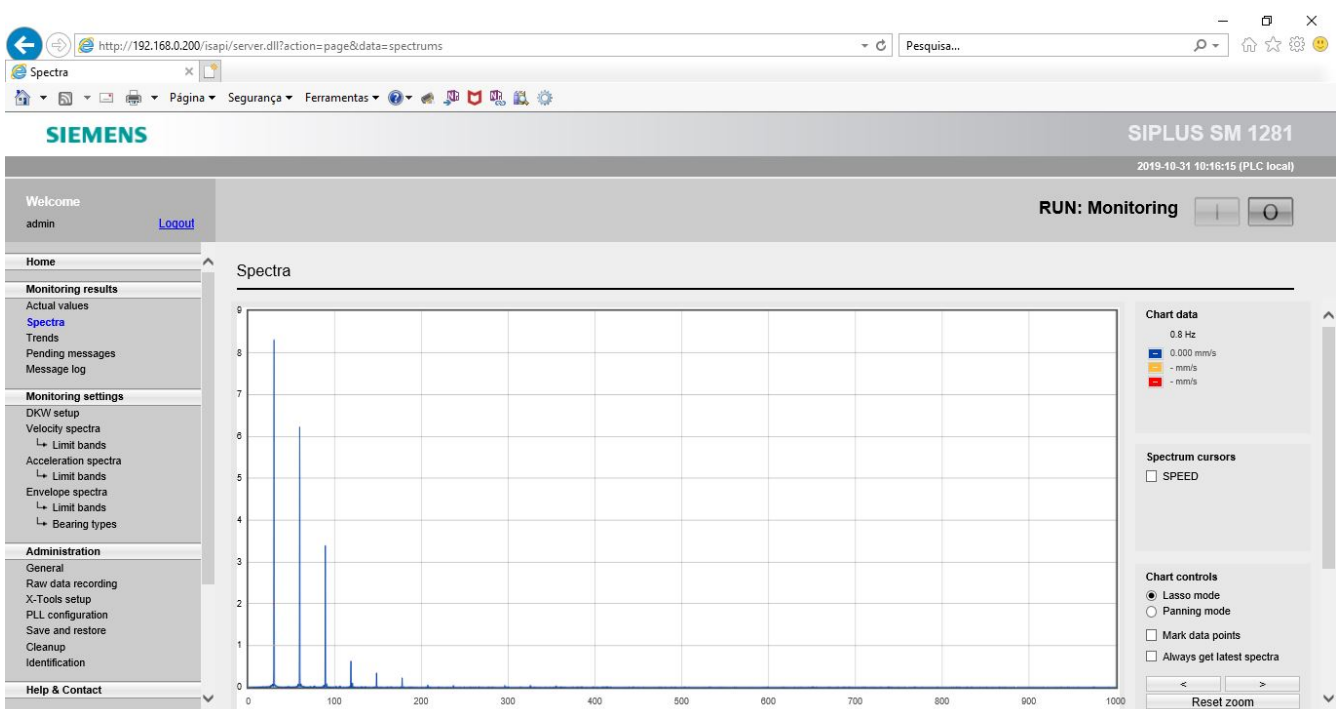
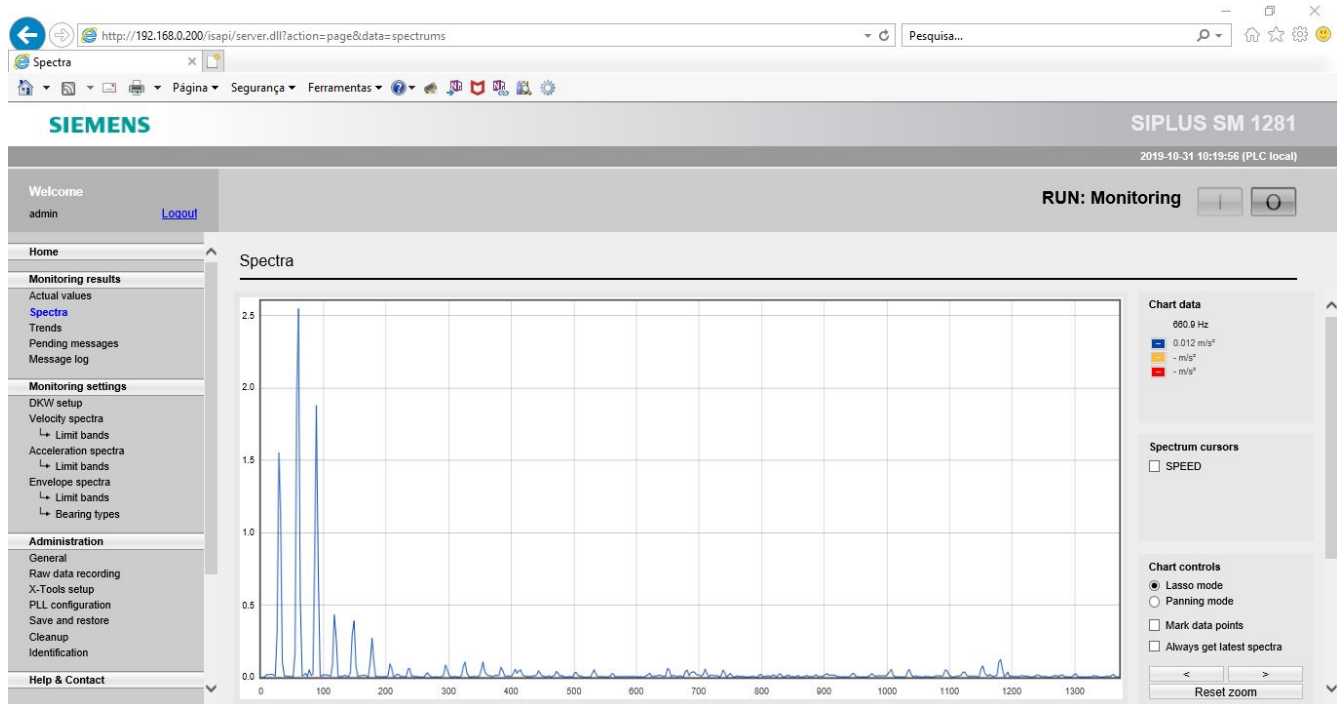


Figura 32 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$.



Abaixo, se encontram os espectros encontrados para velocidade de rotação igual a 1720 rpm e torque 1,5 N.m, com rotor com 2 barras quebradas.

Figura 33 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1720rpm$ e $T = 1,5N.m$.

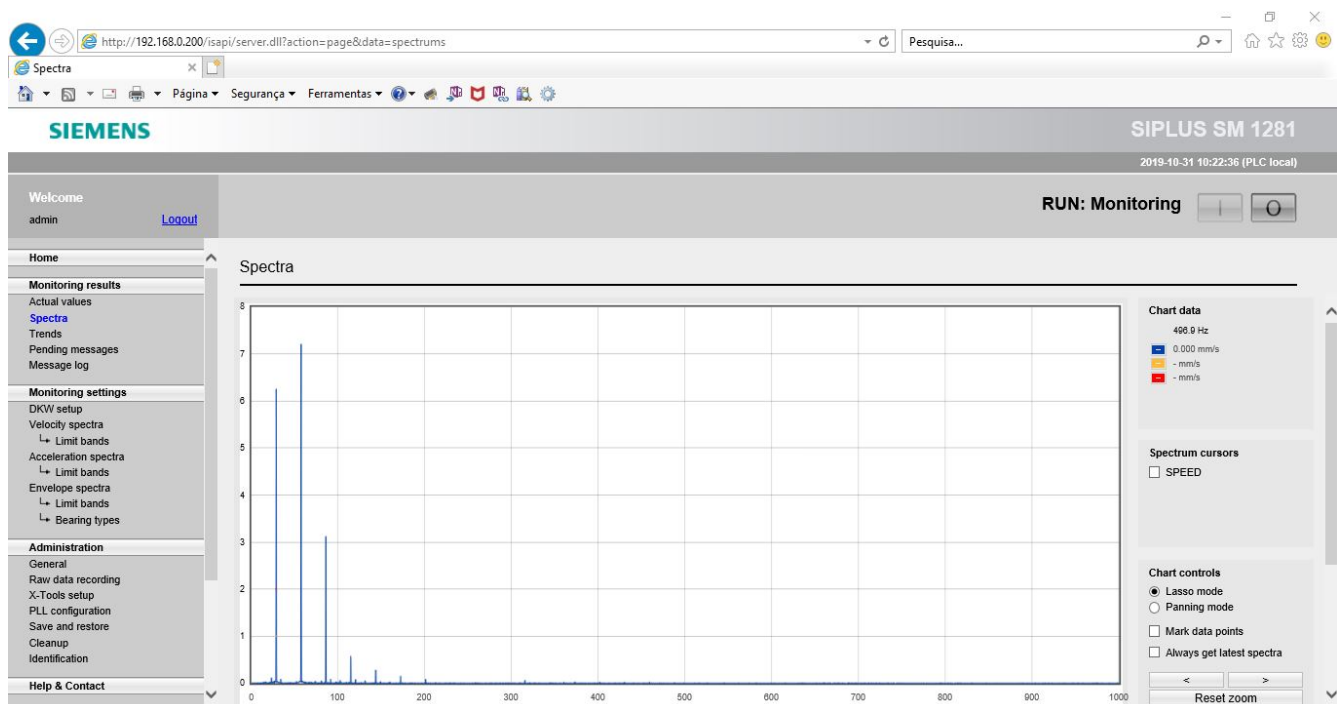
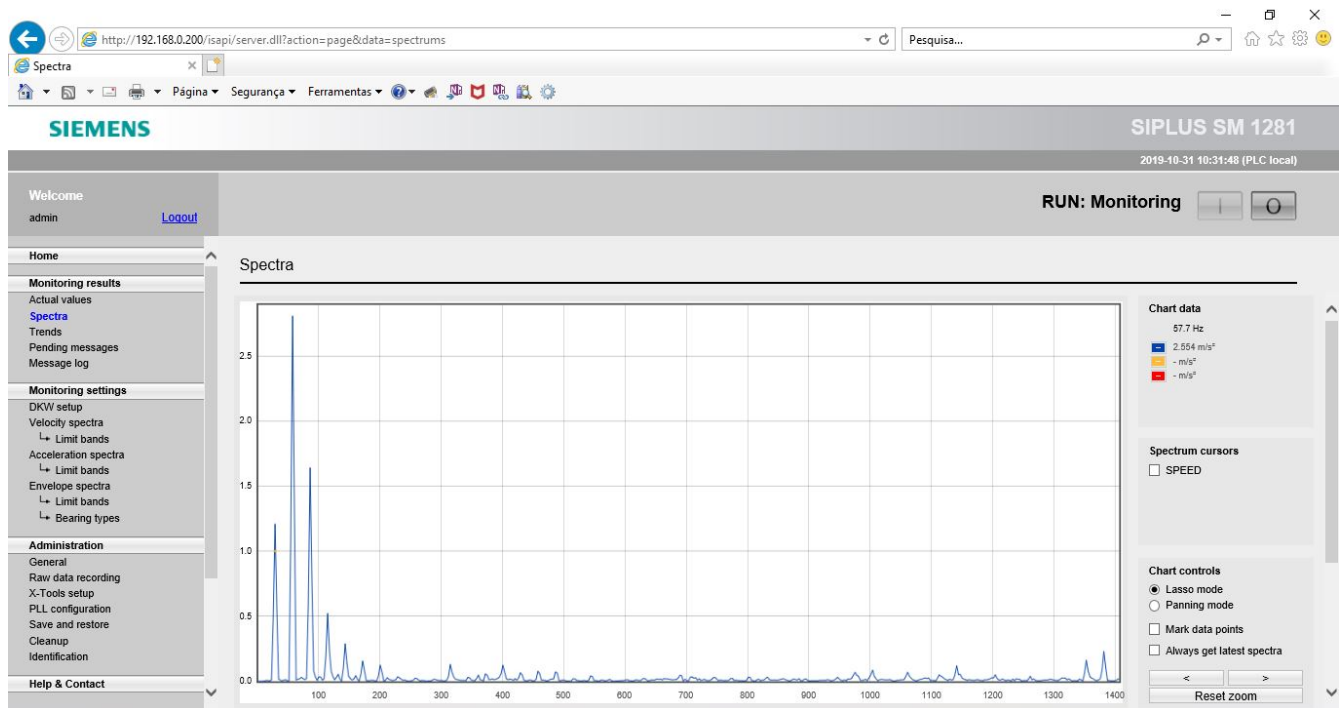


Figura 34 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1720rpm$ e $T = 1,5N.m$.



Abaixo, se encontram os espectros encontrados para velocidade de rotação igual a 1585 rpm e torque 3,0 N.m, com rotor com 2 barras quebradas.

Figura 35 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1585rpm$ e $T = 3,0N.m$.

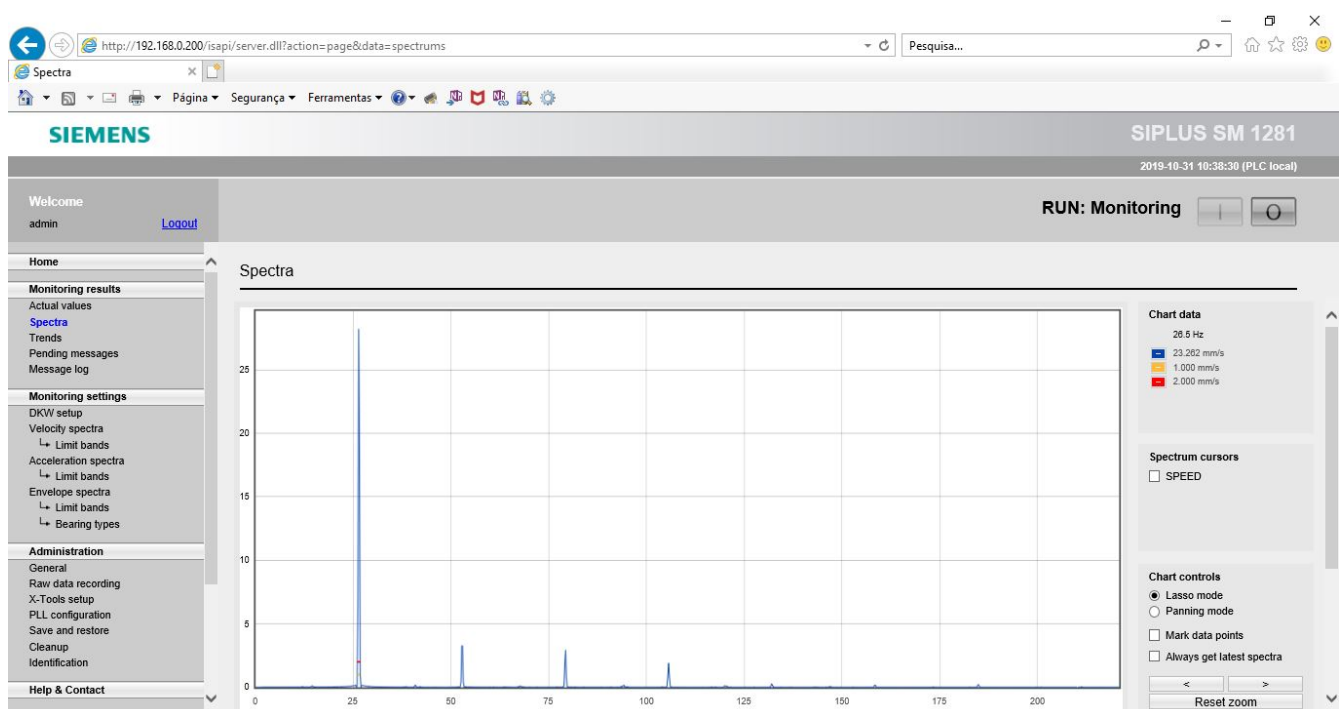
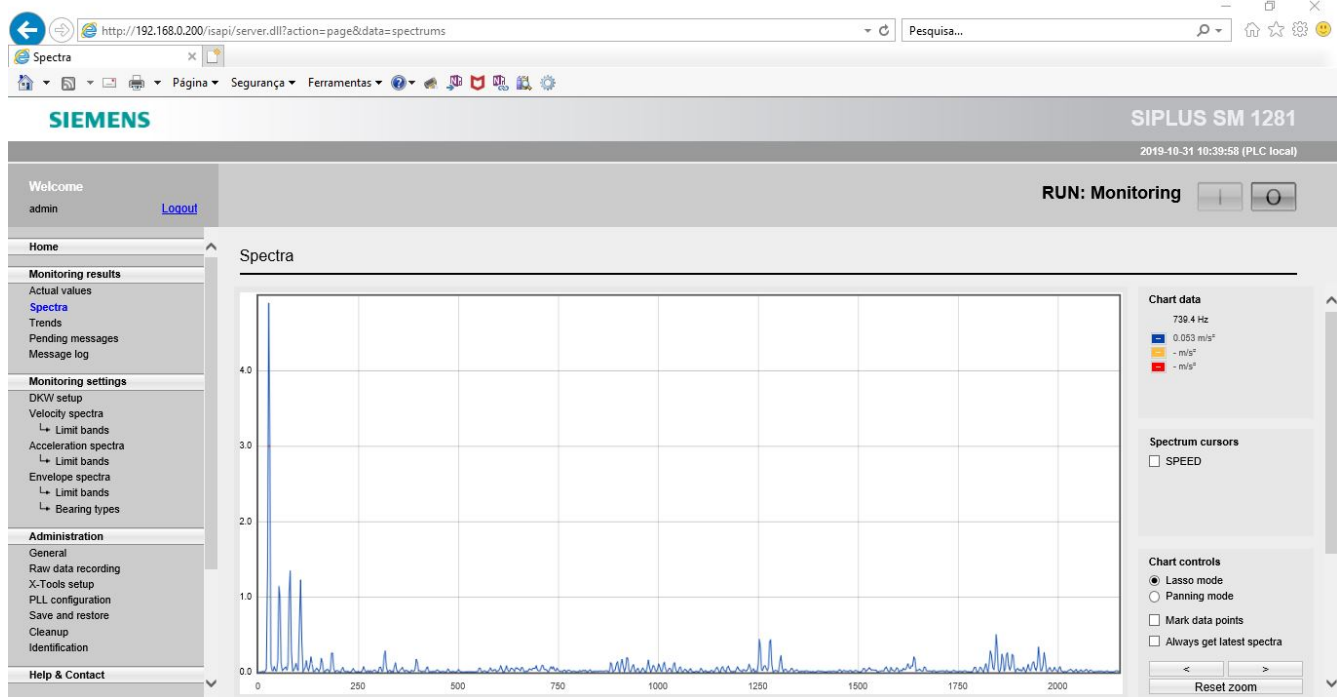


Figura 36 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1585rpm$ e $T = 3,0N.m$.



Da mesma forma que percebido para o rotor são, percebe-se também o aumento de amplitudes das frequências verificadas, conforme há o aumento de carga.

Analisando os dados colhidos tanto para o rotor são e para o rotor com 2 barras quebradas, percebe-se sutil alteração em relação às amplitudes das frequências, contudo é possível perceber alteração do perfil do espectro de frequência, verificando-se alteração na relação de amplitudes entre as frequências.

4.3 Testes com rotor com 3 barras seccionadas

Tabela 3 – Valores no espectro do tempo medidos com rotor com 3 barras seccionadas.

Velocidade (rpm)	Torque (N.m)	aRMS (m/s^2)	vRMS(mm/s)	DKW	aPeak (m/s^2)
1774	0,5	0,56	8,45	9,03	4,84
1719	1,5	0,65	9,03	10,59	5,4
1574	3	1,4	26,41	46,24	10,25

Abaixo, se encontram os espectros encontrados para velocidade de rotação igual a 1774 rpm e torque 0,5 N.m, com rotor com 3 barras quebradas.

Figura 37 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$.

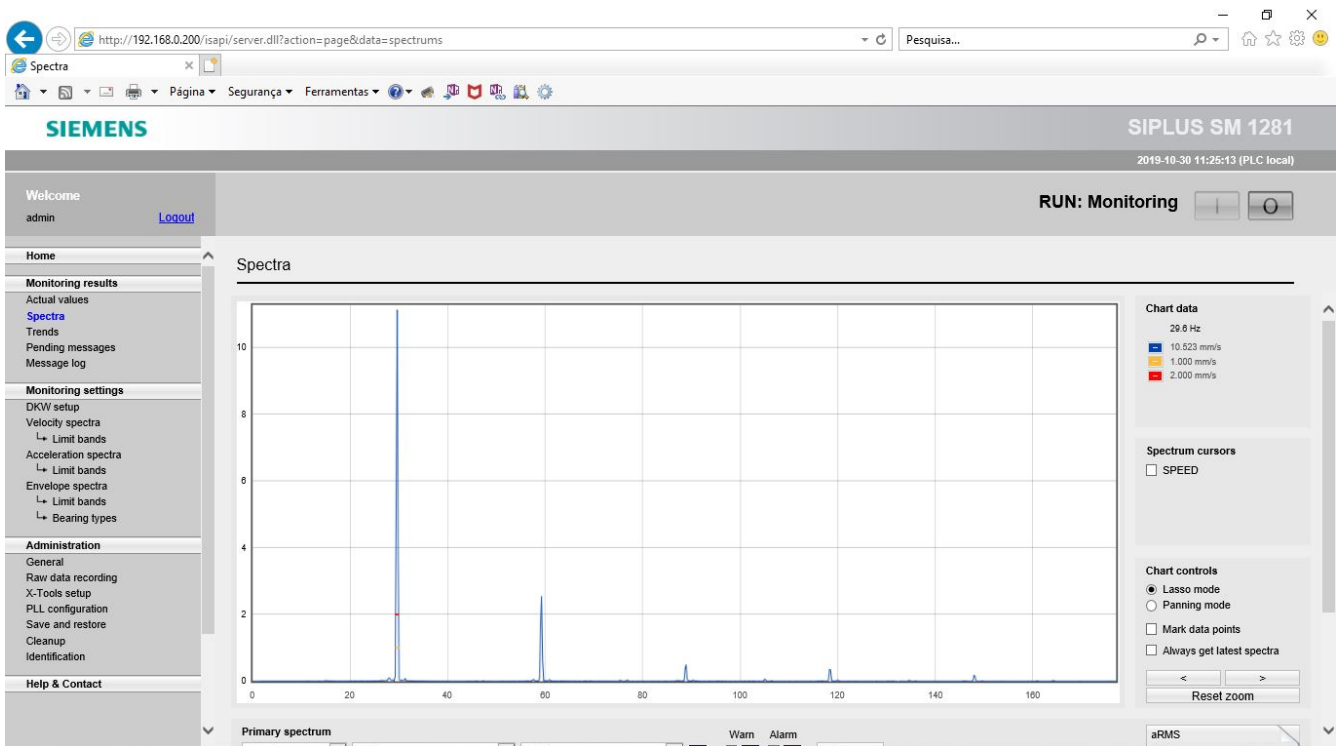
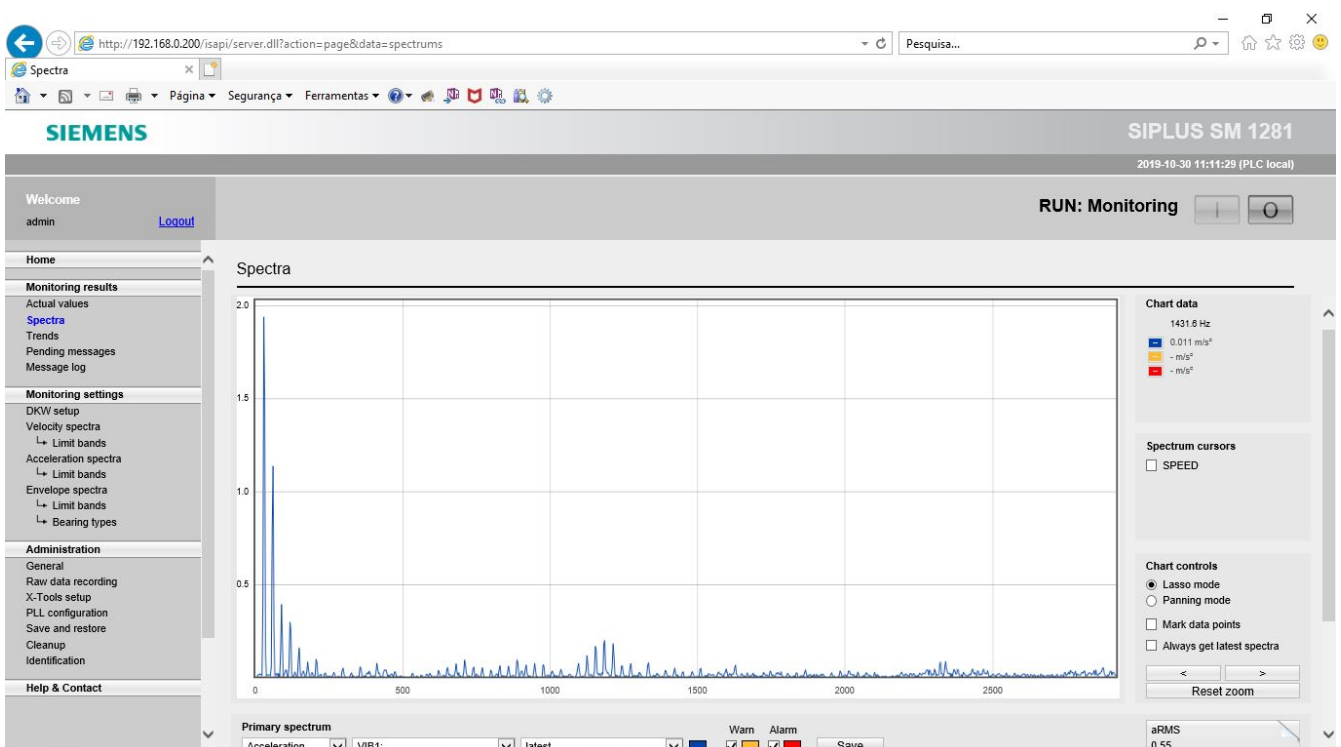


Figura 38 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$.



Abaixo, se encontram os espectros encontrados para velocidade de rotação igual a 1719 rpm e torque 1,5 N.m, com rotor com 3 barras quebradas.

Figura 39 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1719rpm$ e $T = 1,5N.m$.

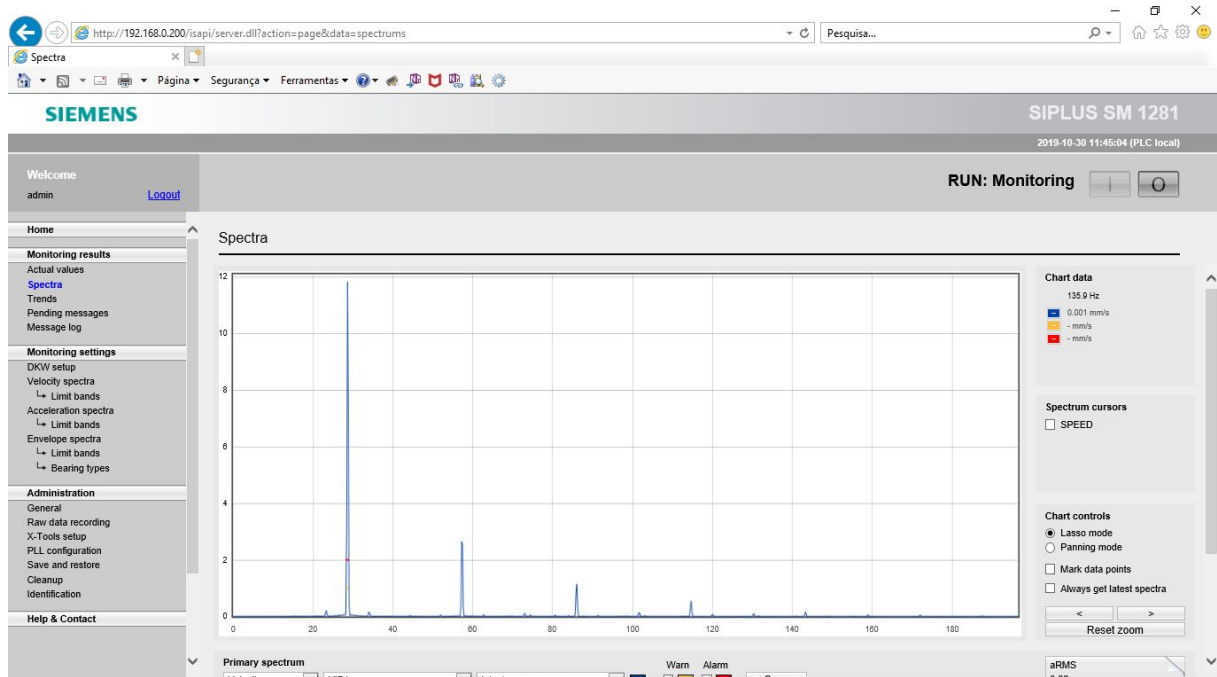
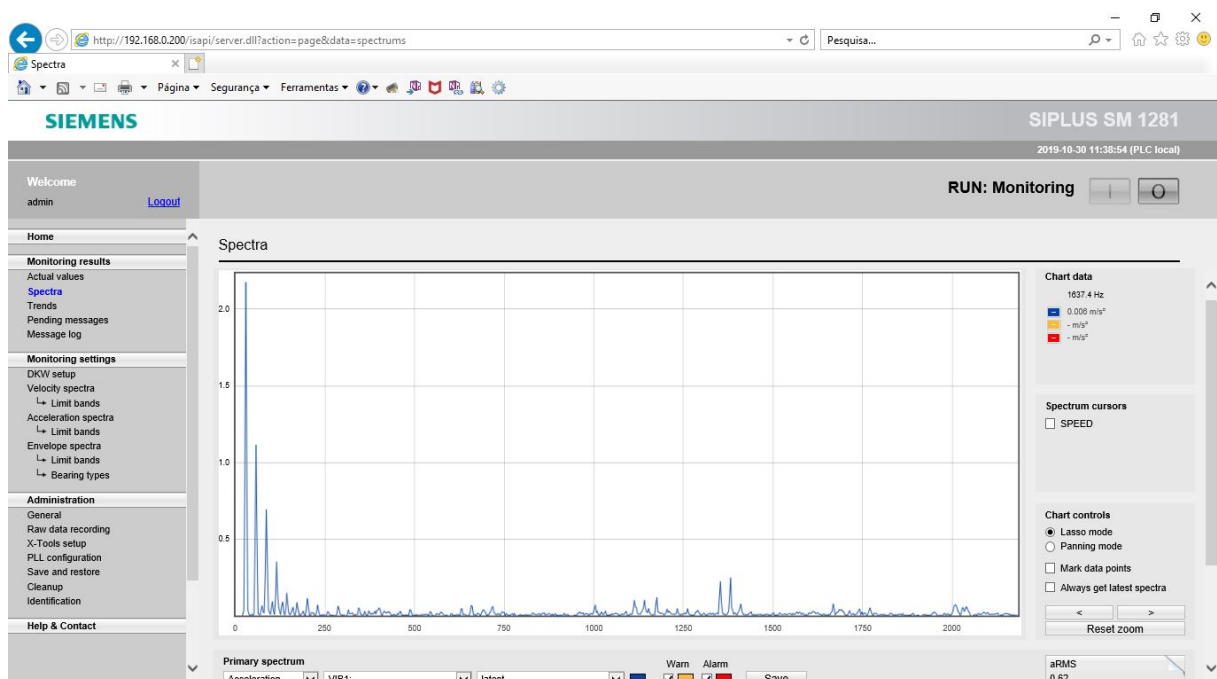


Figura 40 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1719rpm$ e $T = 1,5N.m$.



Abaixo, se encontram os espectros encontrados para velocidade de rotação igual a 1574 rpm e torque 3,0 N.m, com rotor com 3 barras quebradas.

Figura 41 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1574 \text{ rpm}$ e $T = 3,0 \text{ N.m}$.

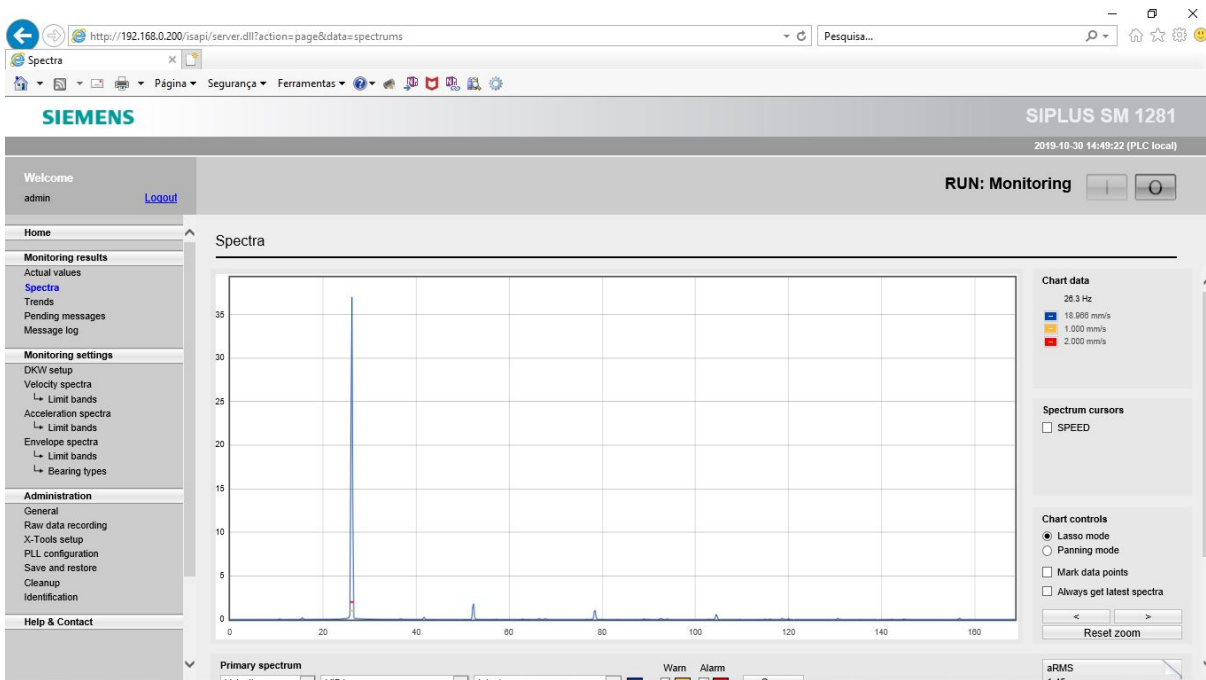
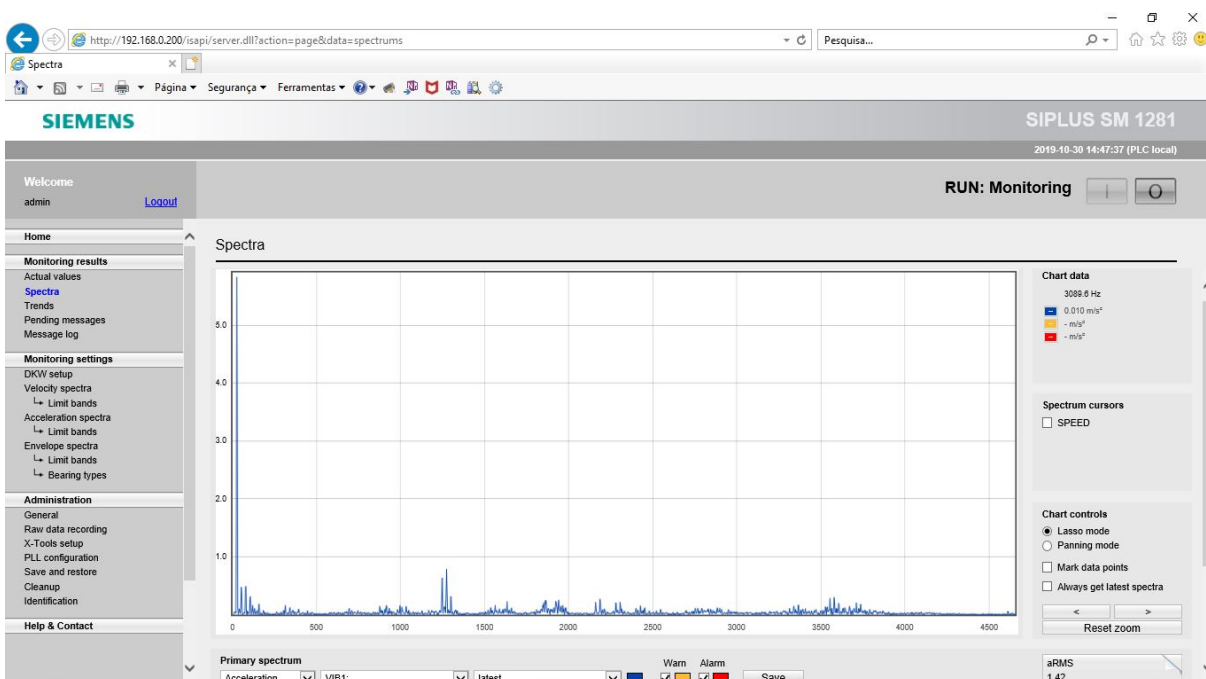


Figura 42 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1574 \text{ rpm}$ e $T = 3,0 \text{ N.m}$.



Conforme observado com os rotores previamente analisados, percebe-se também para o rotor com 3 barras quebradas, o aumento de amplitudes das frequências, conforme há o aumento de carga.

Além disso, comparativamente, o aumento da amplitude das frequências verificadas em relação ao rotor são, foram mais perceptíveis no rotor com 3 barras quebradas quando o torque resistente se encontrava ao nível de 3,0 N.m. Percebe-se também para esse caso, alteração do perfil do espectro de frequência, observando-se alteração na relação de amplitudes entre as frequências.

4.4 Testes com rotor com 4 barras seccionadas

Tabela 4 – Valores no espectro do tempo medidos com rotor com 4 barras seccionadas.

Velocidade (rpm)	Torque (N.m)	aRMS (m/s^2)	vRMS(mm/s)	DKW	aPeak (m/s^2)
1774	0,5	0,6	4,93	4,52	3,67
1716	1,5	0,67	8,55	17,25	6,89
1568	3	1,38	11,12	23,83	8,93

Abaixo, se encontram os espectros encontrados para velocidade de rotação igual a 1774 rpm e torque 0,5 N.m, com rotor com 4 barras quebradas.

Figura 43 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$.

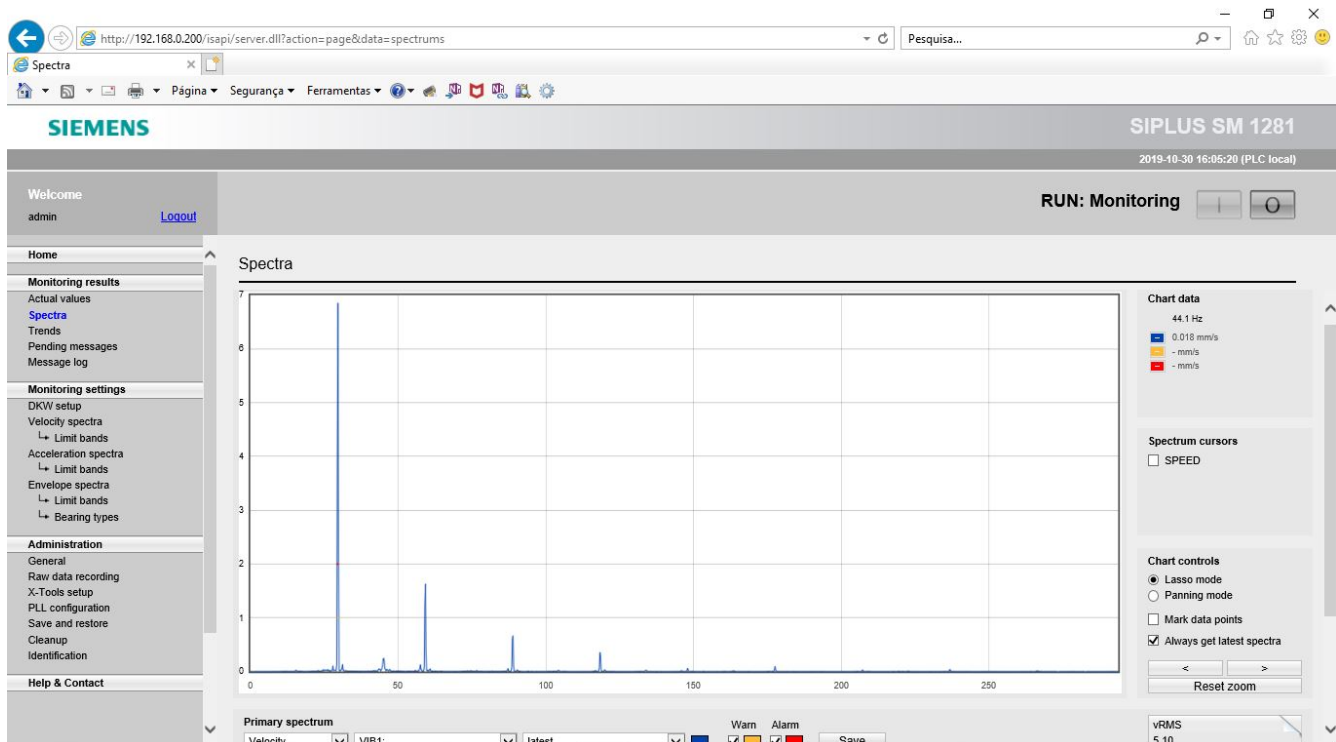
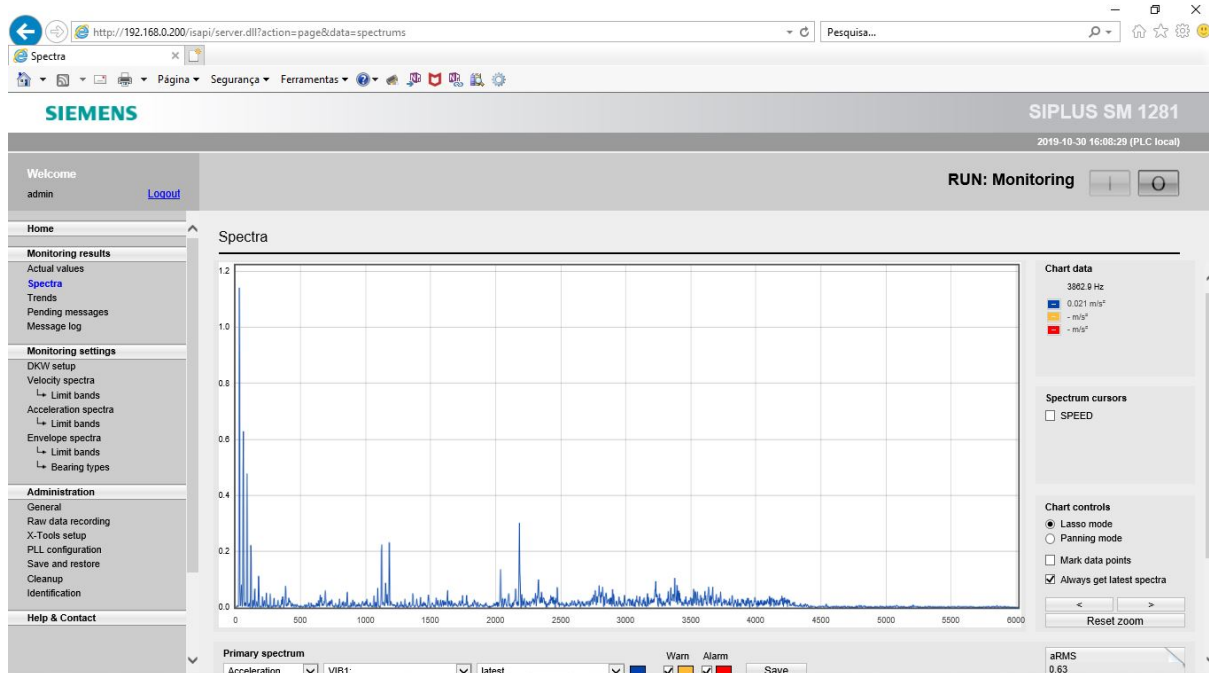


Figura 44 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$.



Abaixo, se encontram os espectros encontrados para velocidade de rotação igual a 1716 rpm e torque 1,5 N.m, com rotor com 4 barras quebradas.

Figura 45 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1716rpm$ e $T = 1,5N.m$.

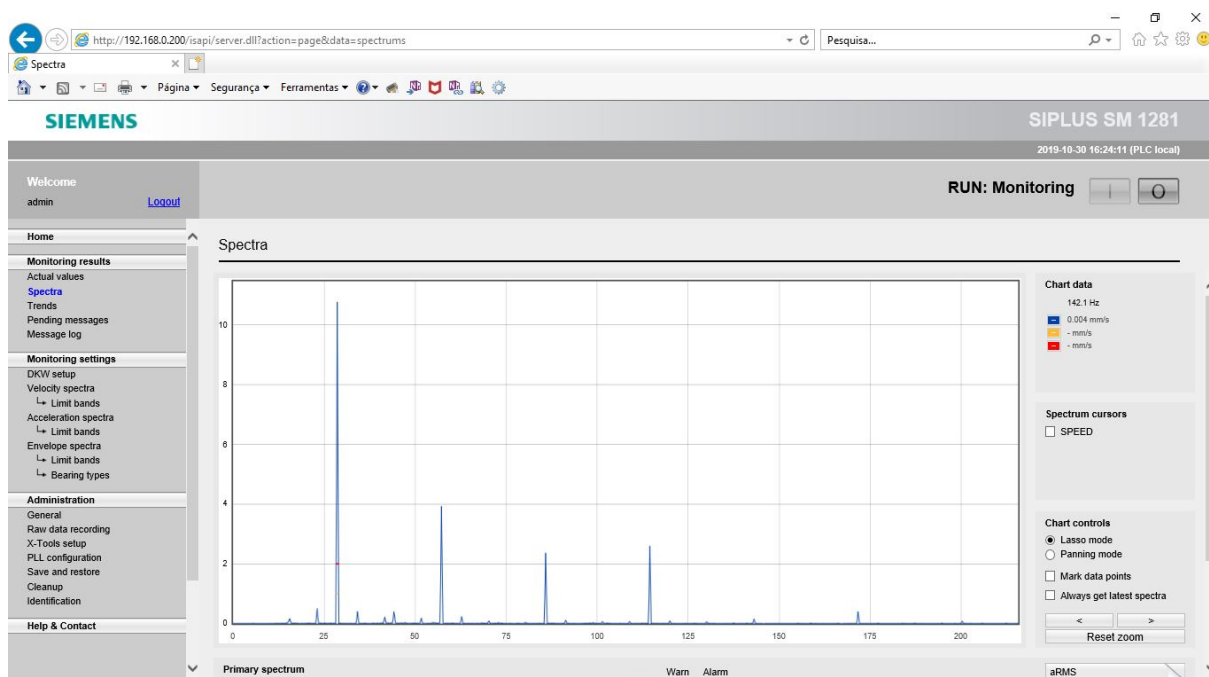
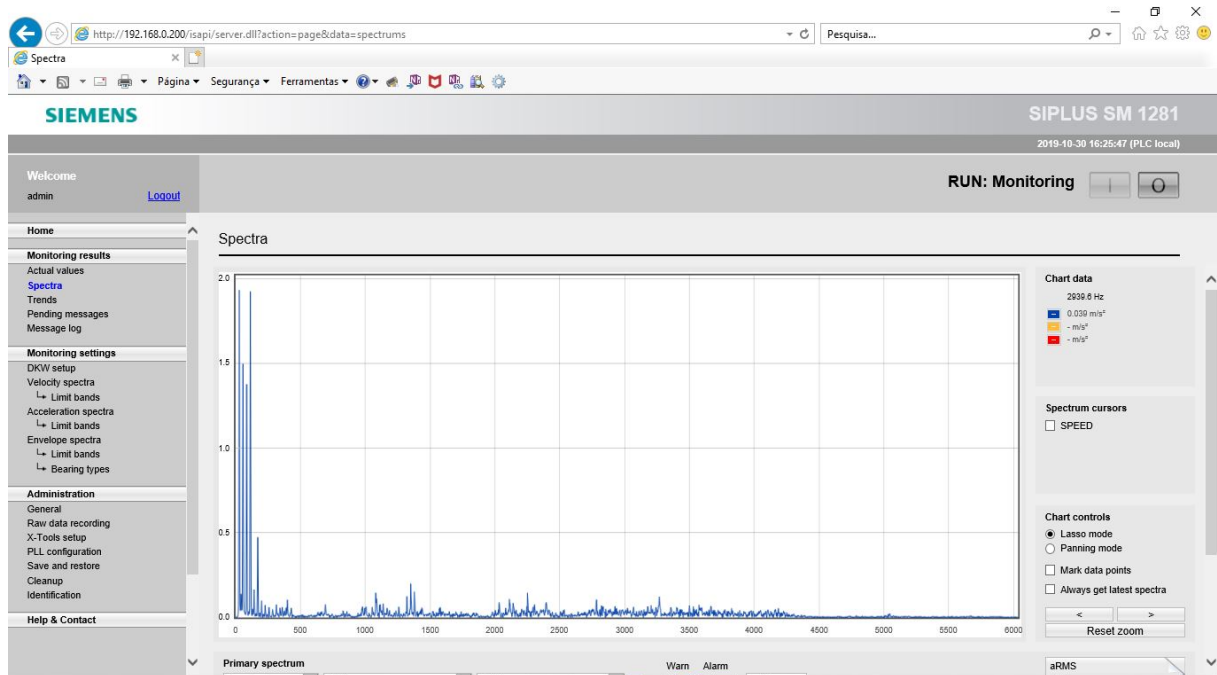


Figura 46 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1716rpm$ e $T = 1,5N.m$.



Abaixo, se encontram os espectros encontrados para velocidade de rotação igual a 1568 rpm e torque 3,0 N.m, com rotor com 4 barras quebradas.

Figura 47 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1568rpm$ e $T = 3,0N.m$.

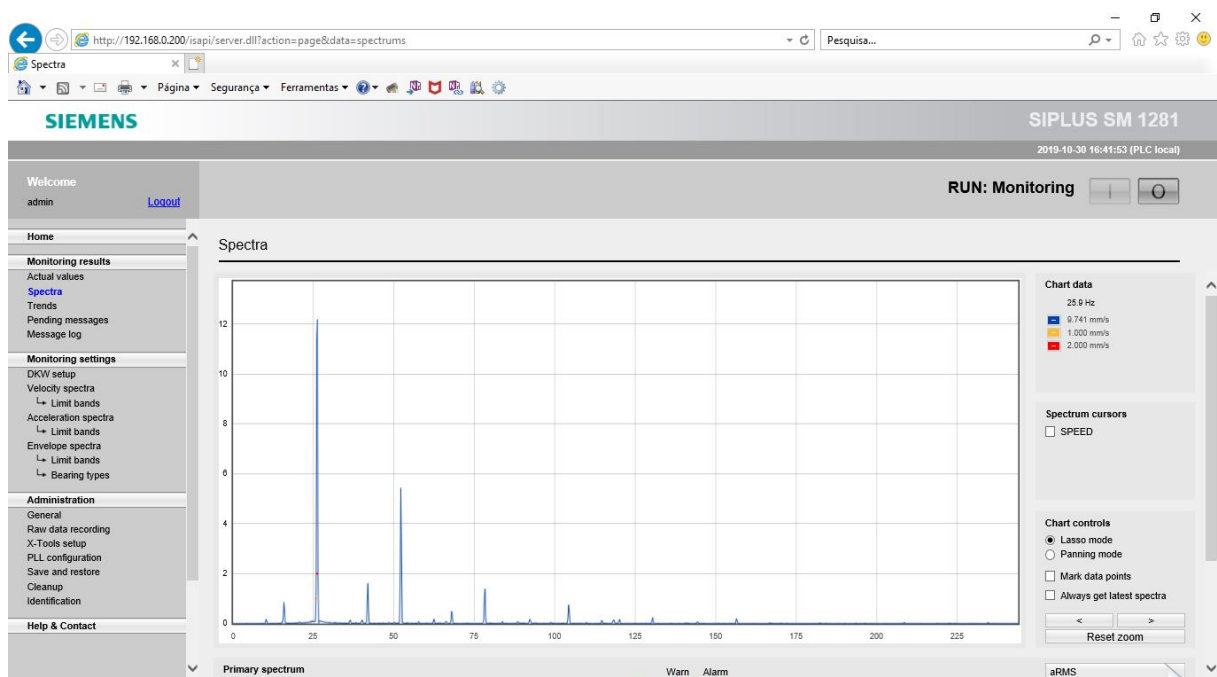
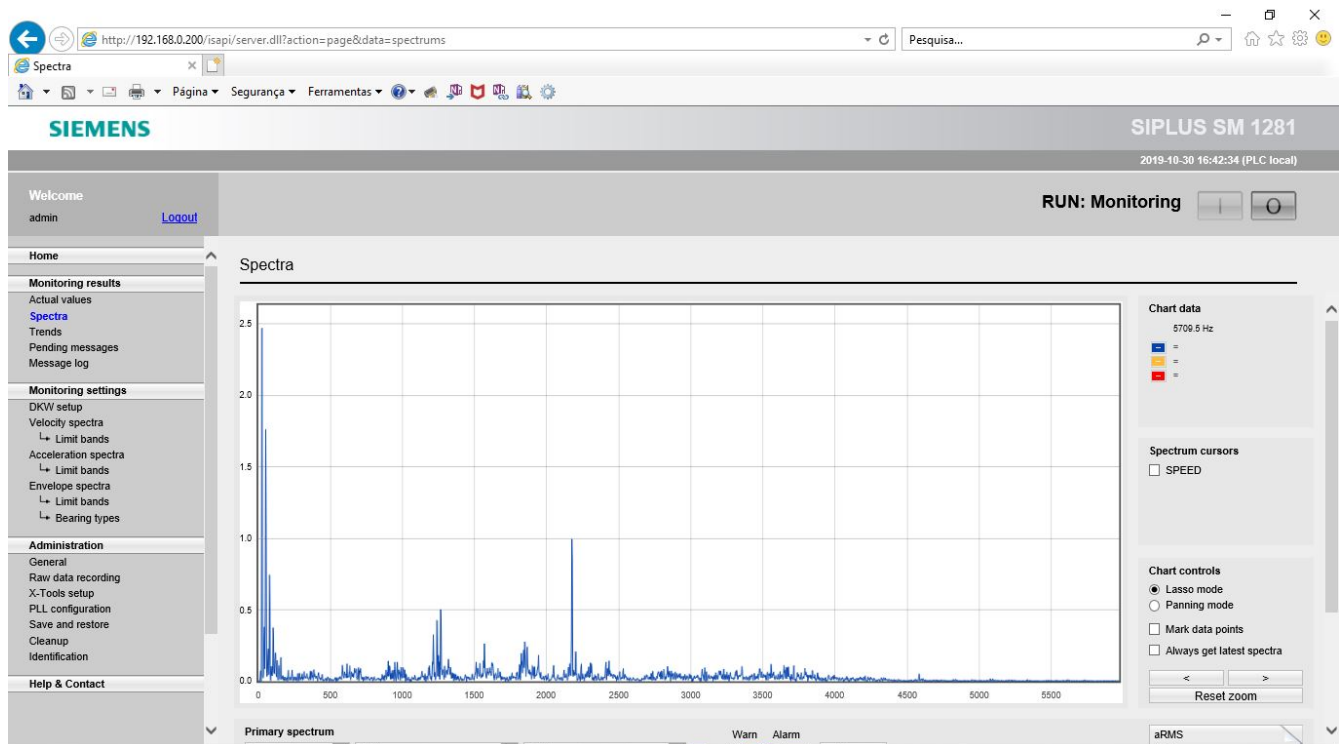


Figura 48 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1568rpm$ e $T = 3,0Nm$.



Da mesma forma que os rotores previamente analisados, percebe-se para o rotor com 4 barras quebradas, o aumento de amplitudes das frequências, conforme se impõe o aumento de carga.

Se comparado com o rotor são, percebe-se amplitudes das frequências verificadas mais baixas, contudo, percebe-se alteração no perfil do espectro, de forma a haverem frequências mais altas com amplitudes que se destacam mais, quando comparados com os outros rotores.

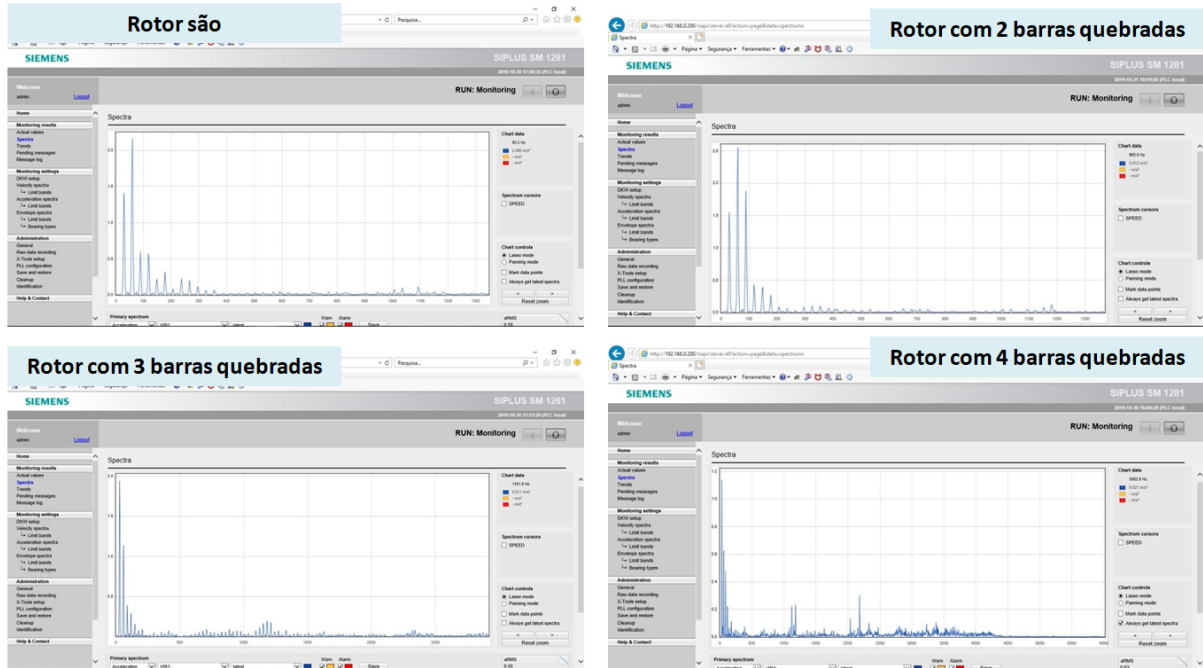
4.5 Comparação dos resultados obtidos

Observando os parâmetros da tabela da imagem 25, é possível fazer comparação entre os resultados obtidos para o mesmo rotor, em diferentes situações de carregamento, bem como se pode comparar os gráficos obtidos para cada situação de carregamento, com os diferentes rotores utilizados.

Para a segunda forma de comparação mencionada, tem-se abaixo os gráficos comparativos nas figuras 49, 50 e 51 abaixo.

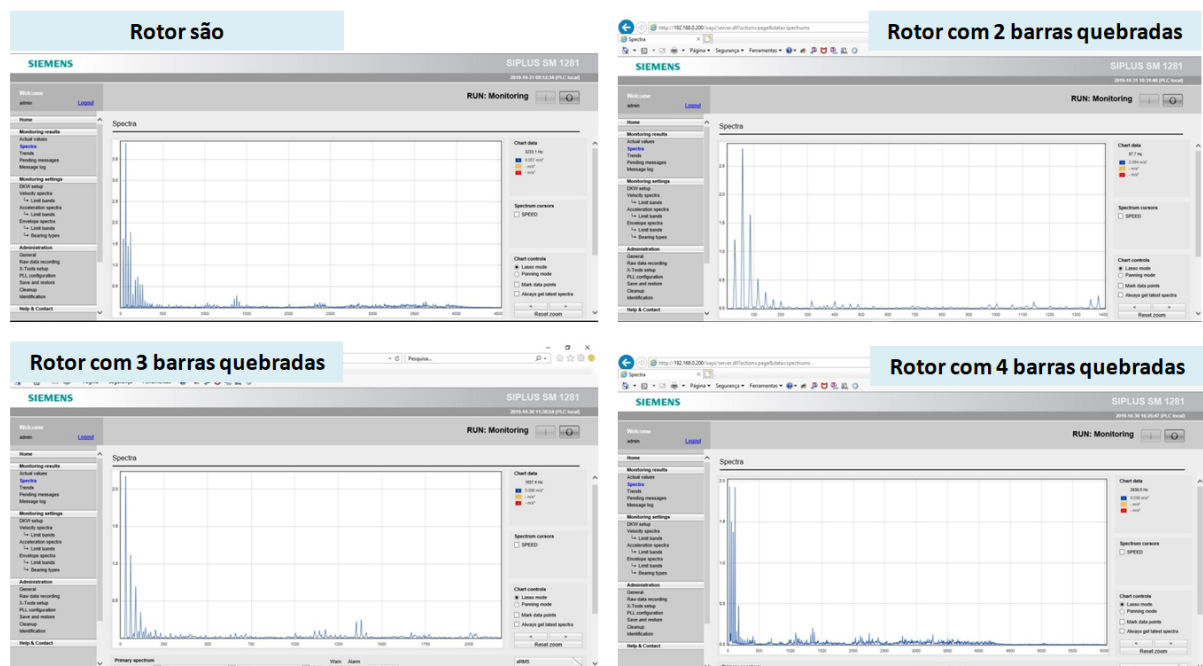
4.5.1 Gráficos da aceleração de vibração para $T=0,5$ N.m

Figura 49 – Gráficos do espectro de frequência da aceleração de vibração para $T=0,5$ N.m.



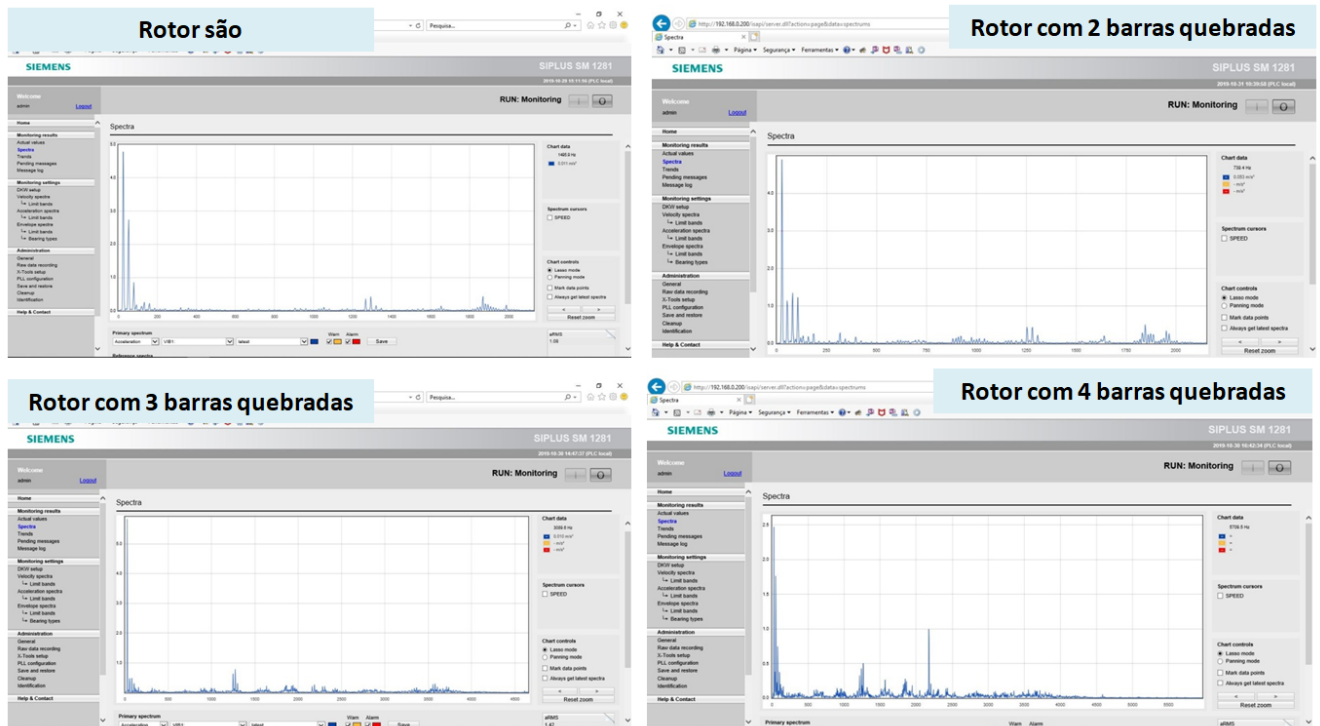
4.5.2 Gráficos da aceleração de vibração para $T=1,5$ N.m

Figura 50 – Gráficos do espectro de frequência da aceleração de vibração para $T=1,5$ N.m.



4.5.3 Gráficos da aceleração de vibração para $T=3,0$ N.m

Figura 51 – Gráficos do espectro de frequência da aceleração de vibração para $T=3,0$ N.m.



Foram observados os gráficos da aceleração de vibração no espectro de frequência, os quais apresentaram maior alterações, conforme aplicados os diferentes rotores.

Era esperado que os gráficos com o rotor são não apresentassem alterações, conforme apresentaram. Além disso, percebe-se que conforme há um aumento de carregamento, e aumento da severidade da falha, obtém-se resultados com frequências mais altas representadas. Este comportamento apresenta maior similaridade com as frequências esperadas, conforme informação contida no manual do equipamento (figura 25).

5 CONCLUSÃO

Quando comparados os valores obtidos e os valores esperados, considerando frequências relacionadas na figura 25, conclui-se que os espectros de frequência para as curvas de velocidade de vibração representam alterações esperadas para as falhas elétricas presentes nos testes. No entanto, as frequências esperadas para o espectro da aceleração da vibração não correspondem exatamente às esperadas.

Contudo, os resultados adquiridos permitem apontar diferenças entre os rotores usados, tendo em vista as falhas conhecidas.

Um estudo mais aprofundado poderia ser realizado observando os pontos de medição e a forma como o uso de mais de um sensor poderia influenciar em resultados mais precisos e diagnósticos mais apurados.

Além disso, os aspectos temporais da realização do teste podem influenciar os resultados, tendo em vista que as medições feitas não consideraram a máquina em um regime contínuo de funcionamento.

Adicionalmente, pode-se ressaltar a influência que a medição contínua da referência de velocidade tem nos resultados obtidos. É bastante provável que se obtenha resultados mais precisos quando se utiliza métodos de aquisição contínua através de *encoder* ou *pick-ups* de velocidade, diferente da referência utilizada, com inclusão manual deste valor.

Por fim, é interessante observar que o equipamento utilizado não possui enfoque em detecção específica de falhas elétricas, sendo essa uma de suas funcionalidades. Ainda assim, a possibilidade da análise de vibração através do espectro de frequência para fins de manutenção preditiva, se mostra bastante eficaz.

REFERÊNCIAS

- BRANDÃO, D. **Notas de Aula – SEL0406**. 2016.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas (Portuguese Edition)**. [S.l.]: AMGH, 2013. ISBN 978-85-8055-207-2.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Electric Machinery (McGraw-Hill Series in Electrical Engineering. Power and Energy)**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002. ISBN 0-07-112193-5.
- JUNIOR, N. A. **Conversão de Energia - Motor Trifásico de Induções**. 2017. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/83838/>>.
- NATIONAL Instruments - Medição de vibração com acelerômetros. 2019. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/measuring-vibration-with-accelerometers.html>>.
- OPPENHEIM A. V.; SCHAFER, R. W. B. J. R. **Discrete-Time Signal Processing**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 1998.
- SIEMENS. **SM 1281 Condition Monitoring - Operating Instructions**. [S.l.], 2019.
- SIEMENS (Ed.). **SM1281 - Visão Geral**. [s.n.], 2019. Disponível em: <<https://support.industry.siemens.com/cs/document/109755279/sm-1281-%E2%80%93-vis%C3%A3o-geral?dti=0&lc=pt-BR>>.
- SUETAKE, M. **Sistemas Inteligentes para Diagnósticos de Falhas em Motores de Indução Trifásicos**. 2012. Tese de Doutorado, 2012.
- TREML, A. E. **Deteção e Diagnóstico de Defeitos em Motores Elétricos de Indução**. 2018. Tese (Doutorado), 2018.
- VIEIRA JR., J. C. M. **Notas de Aula - SEL 329 – Conversão Eletromecânica de Energia**. 2016.

ANEXO A – IMAGENS DE TESTES

A.1 Testes com rotor sã

Figura 52 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor sã, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$.

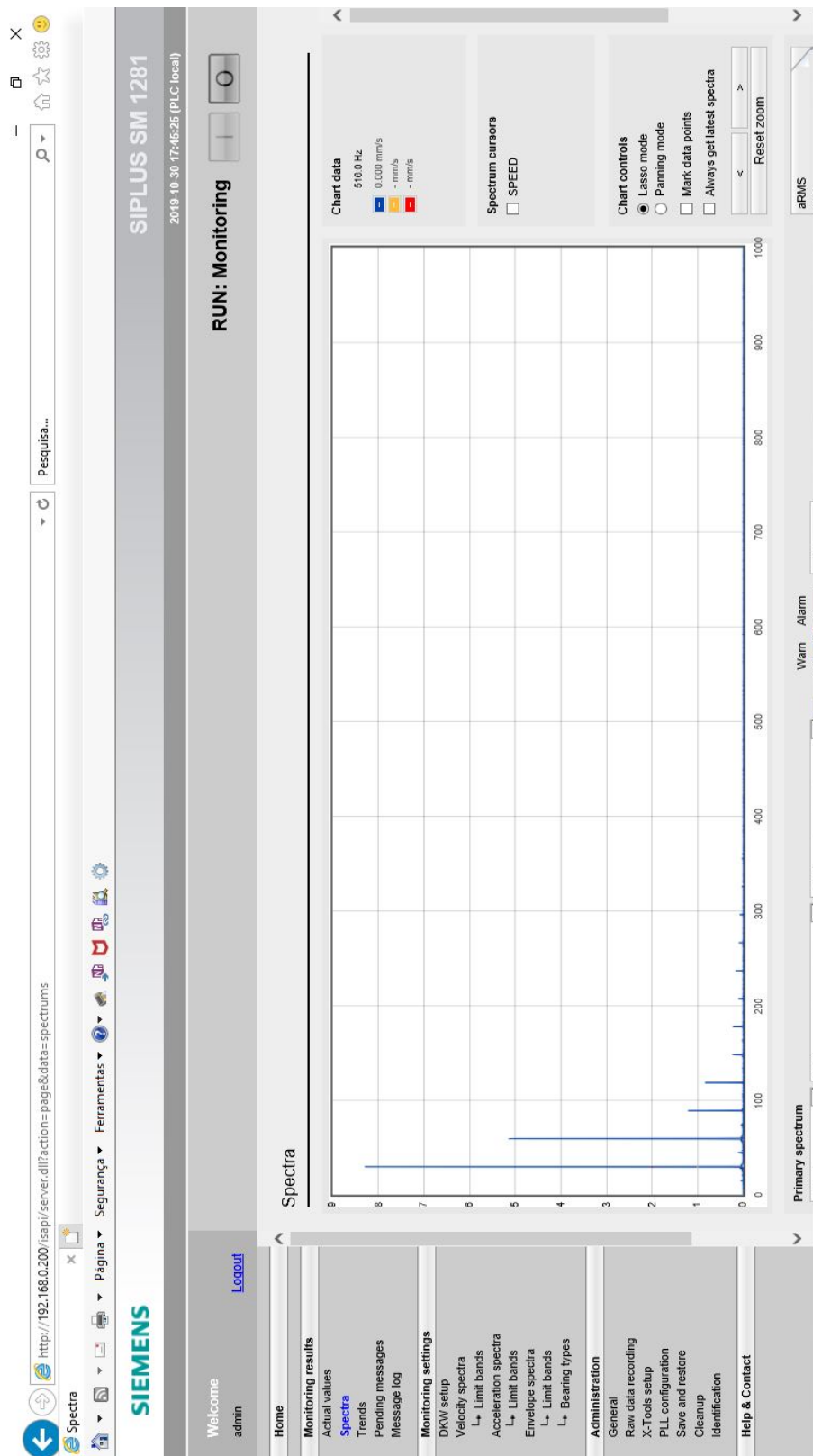


Figura 53 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor são, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$.

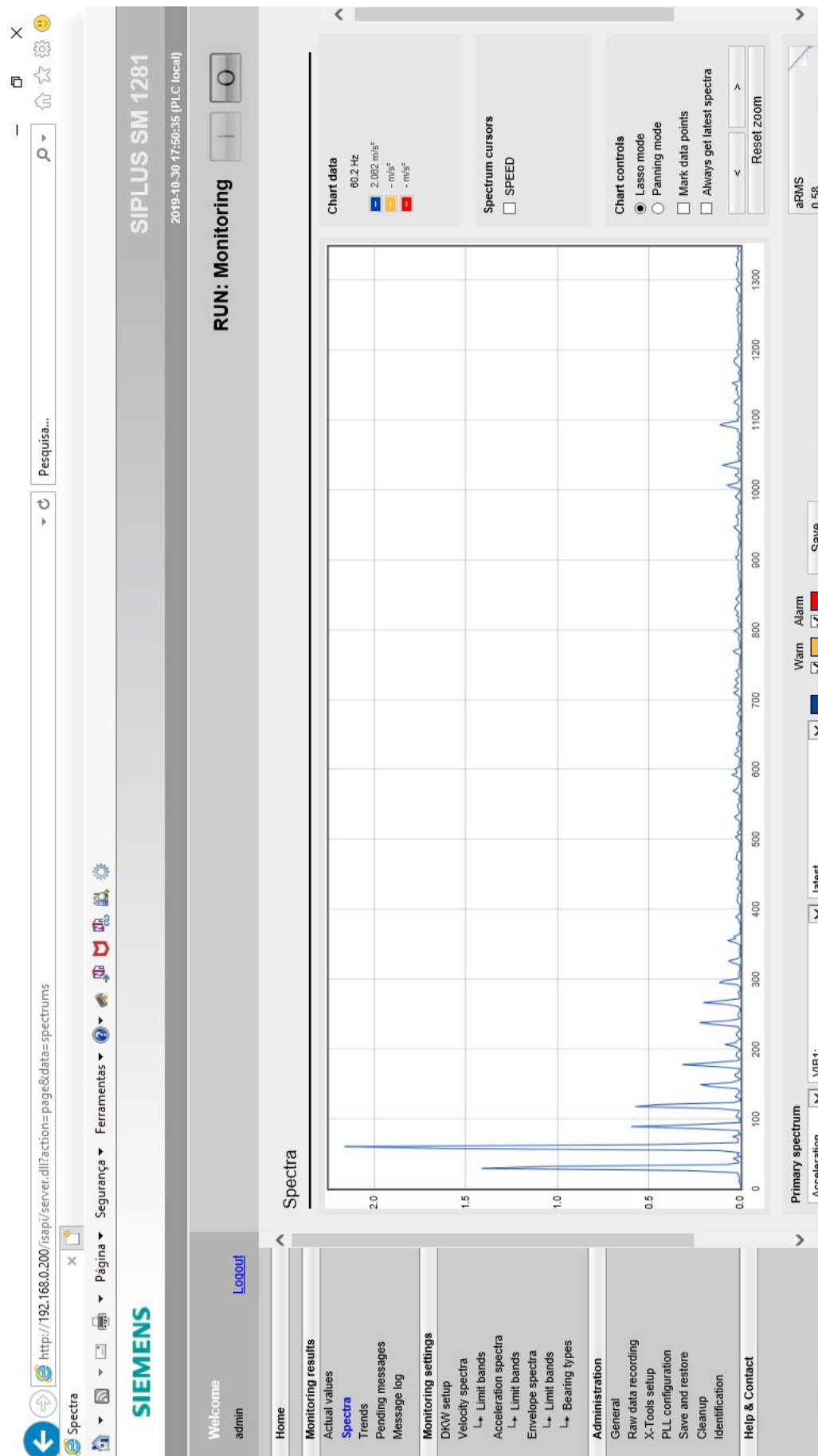


Figura 54 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor são, $v = 1717rpm$ e $T = 1,5N.m$.

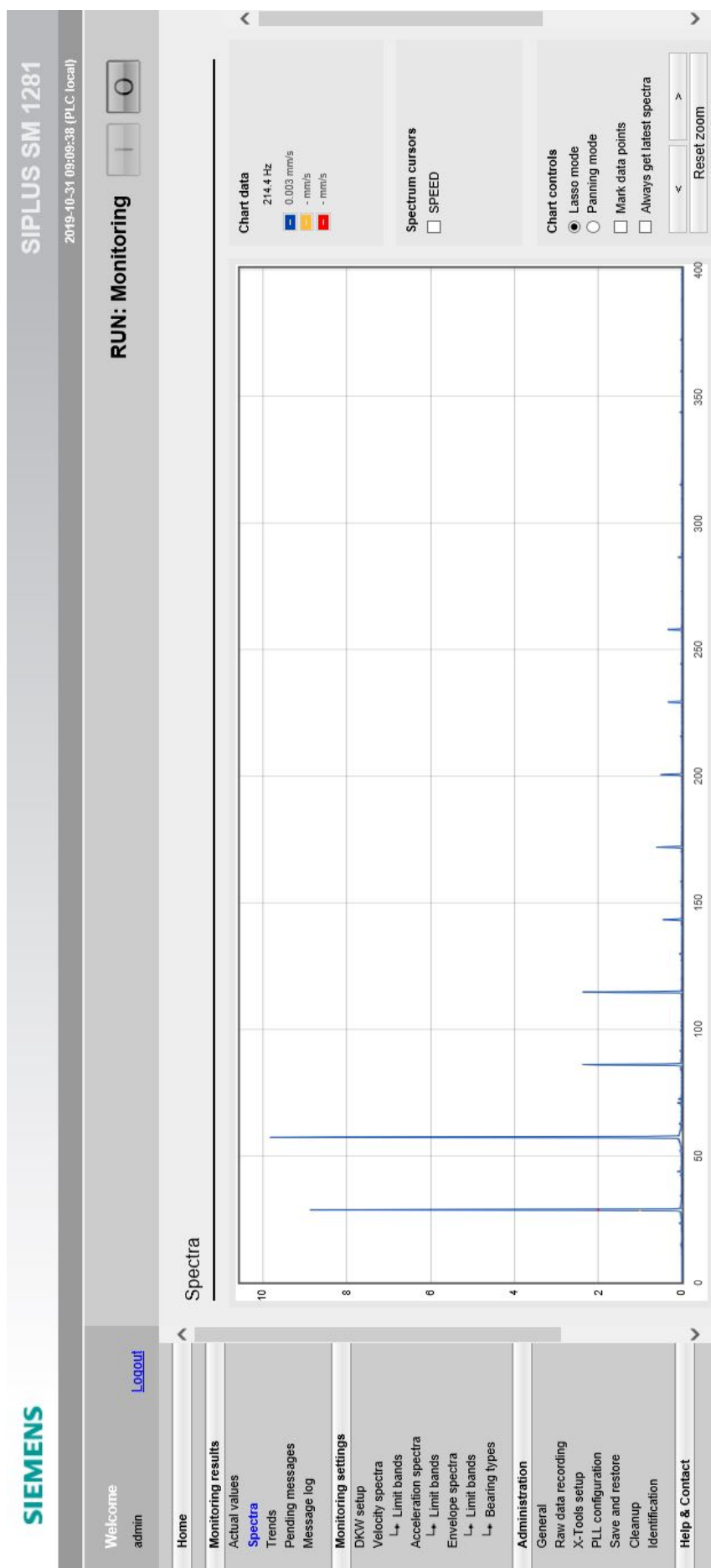


Figura 55 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor são, $v = 1717rpm$ e $T = 1,5N.m$.

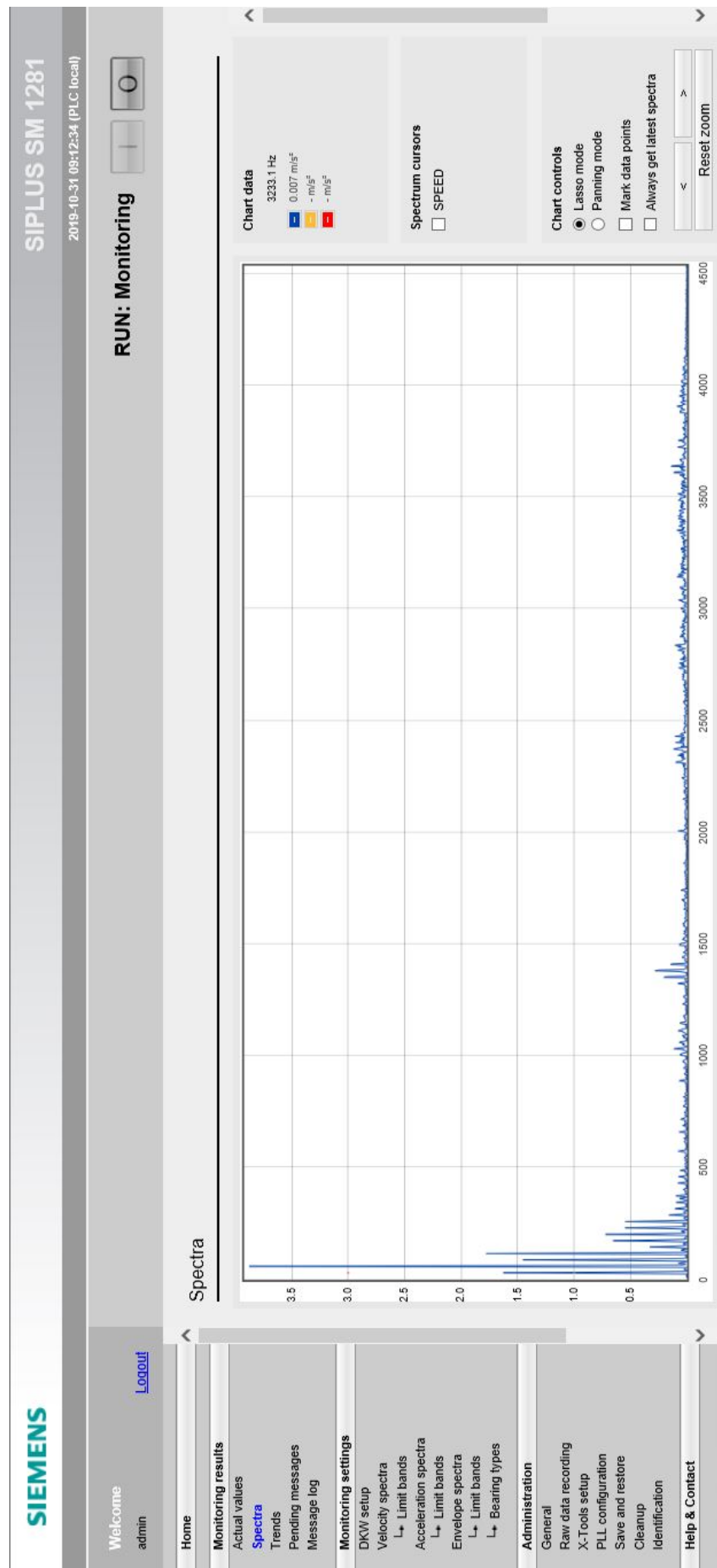
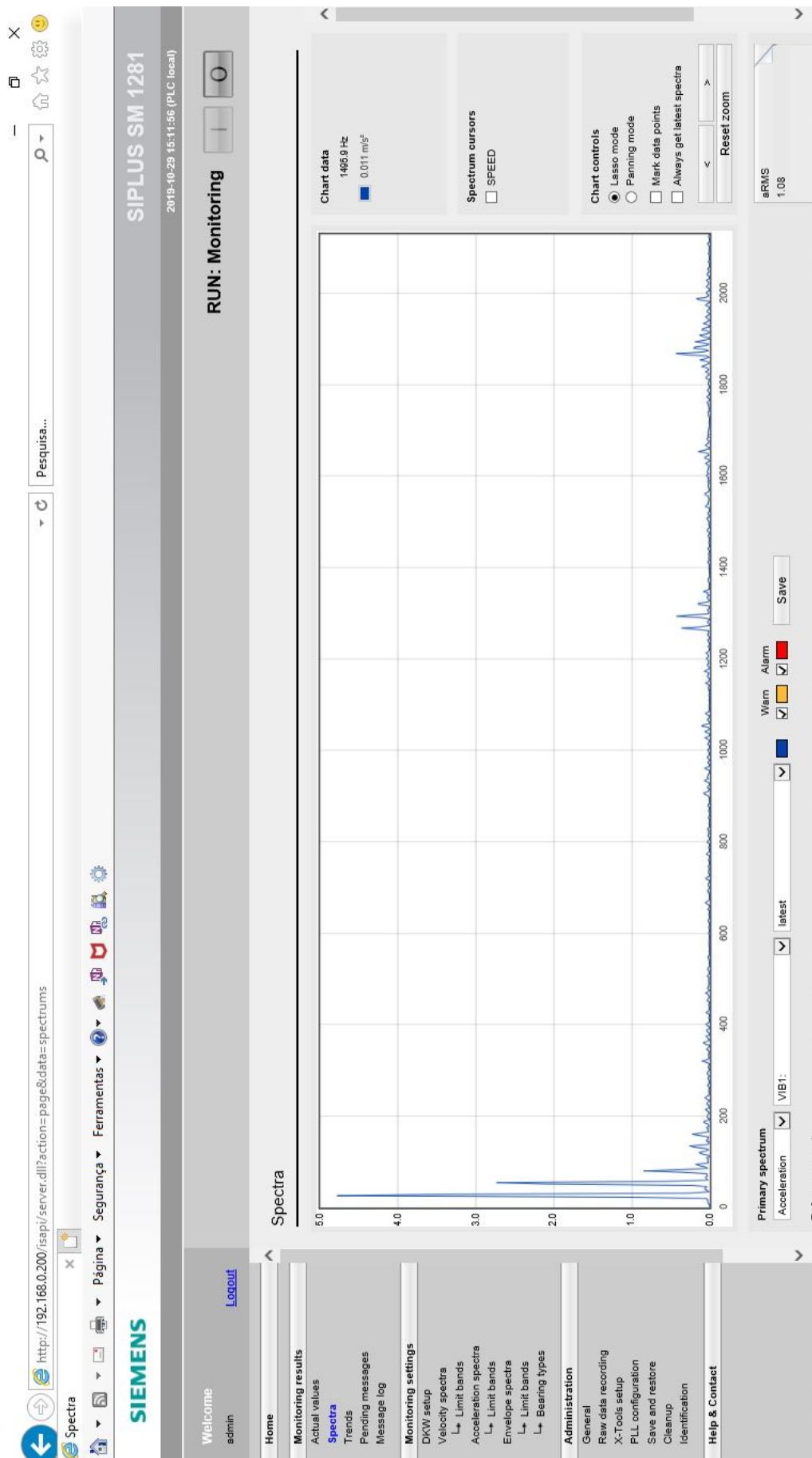


Figura 56 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor são, $v = 1605rpm$ e $T = 3,0N.m$.



A.2 Testes com rotor com 2 barras seccionadas

Figura 57 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$.

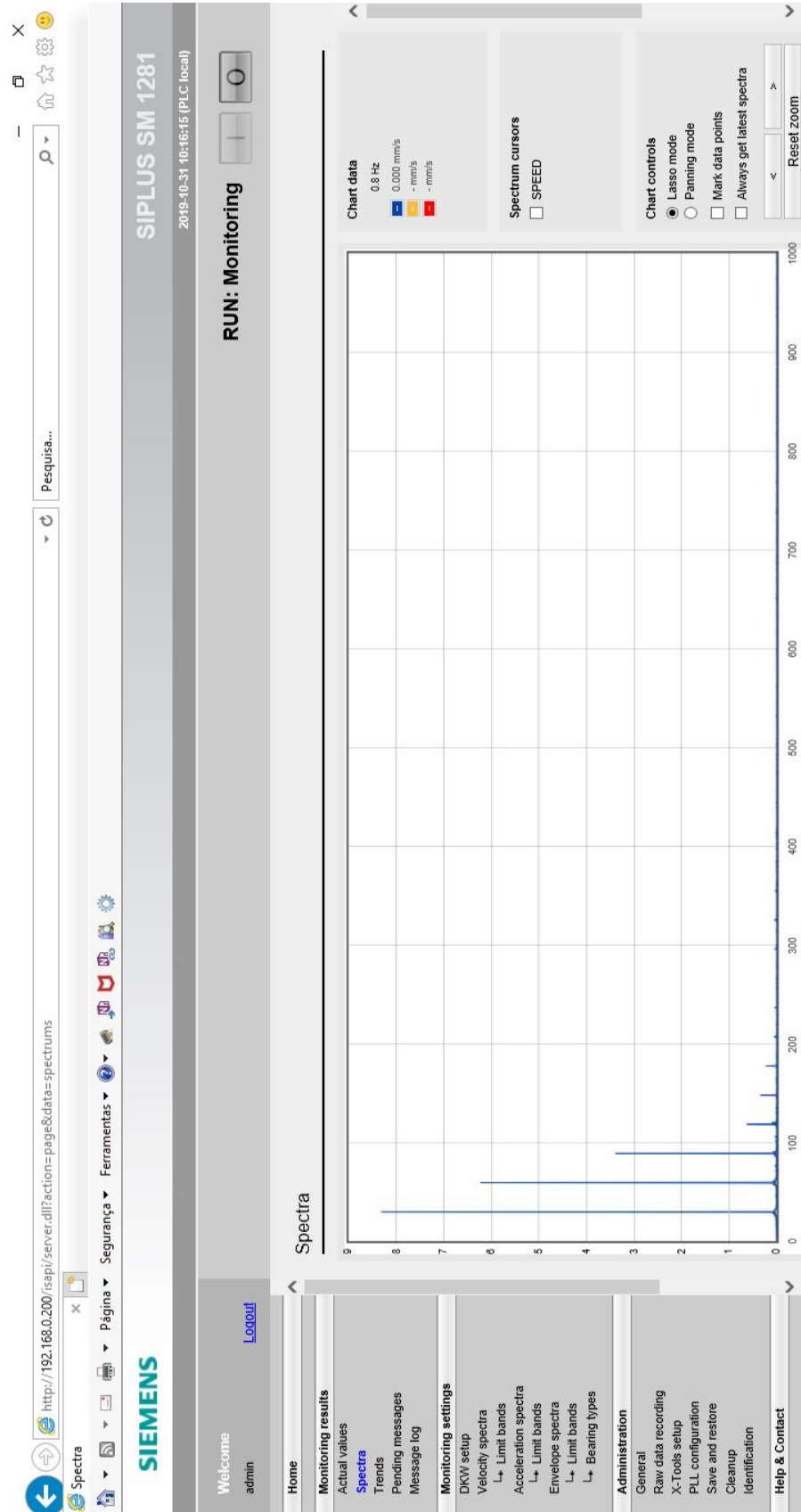


Figura 58 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$.

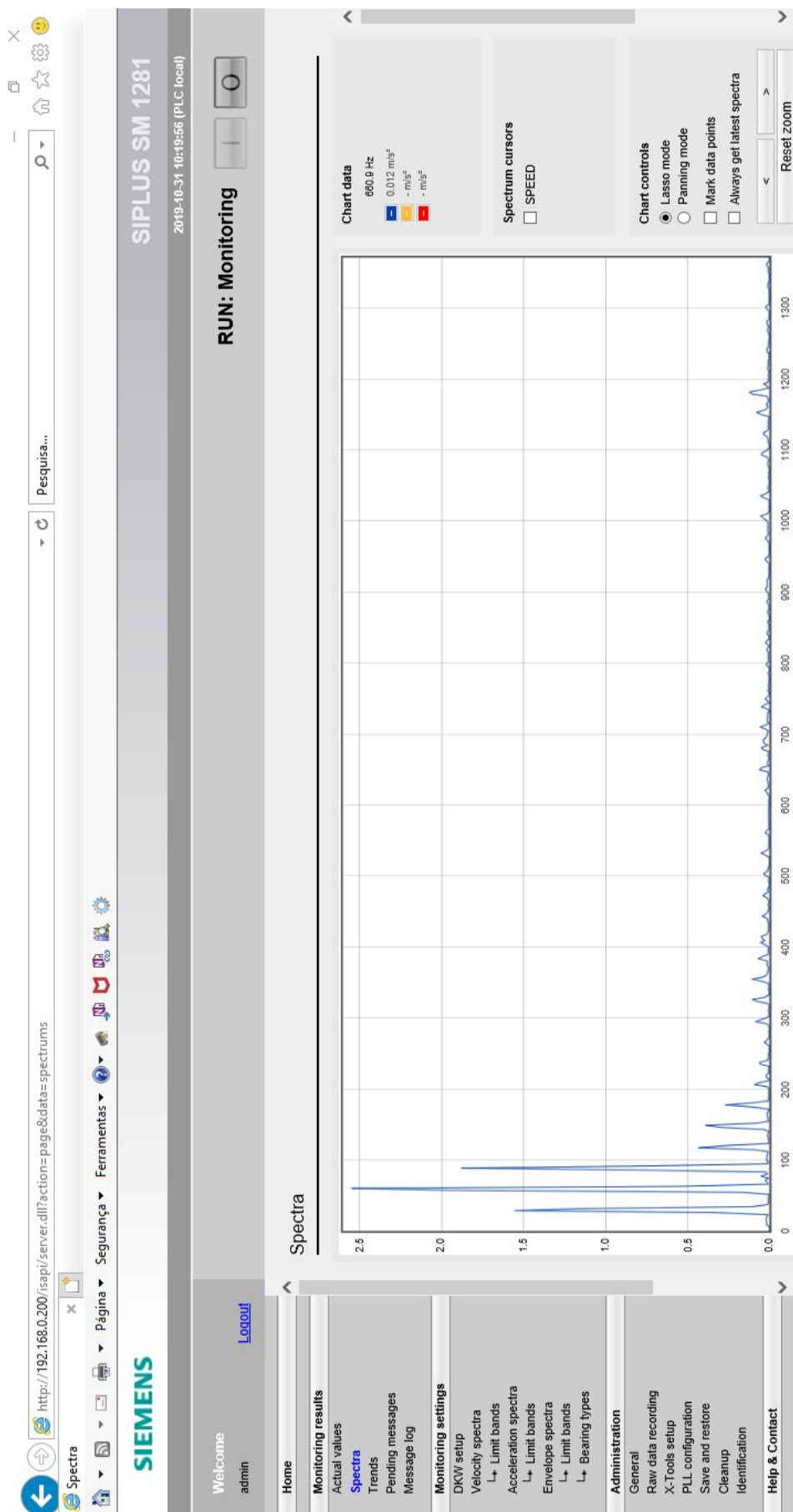


Figura 59 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1720rpm$ e $T = 1,5N.m$.

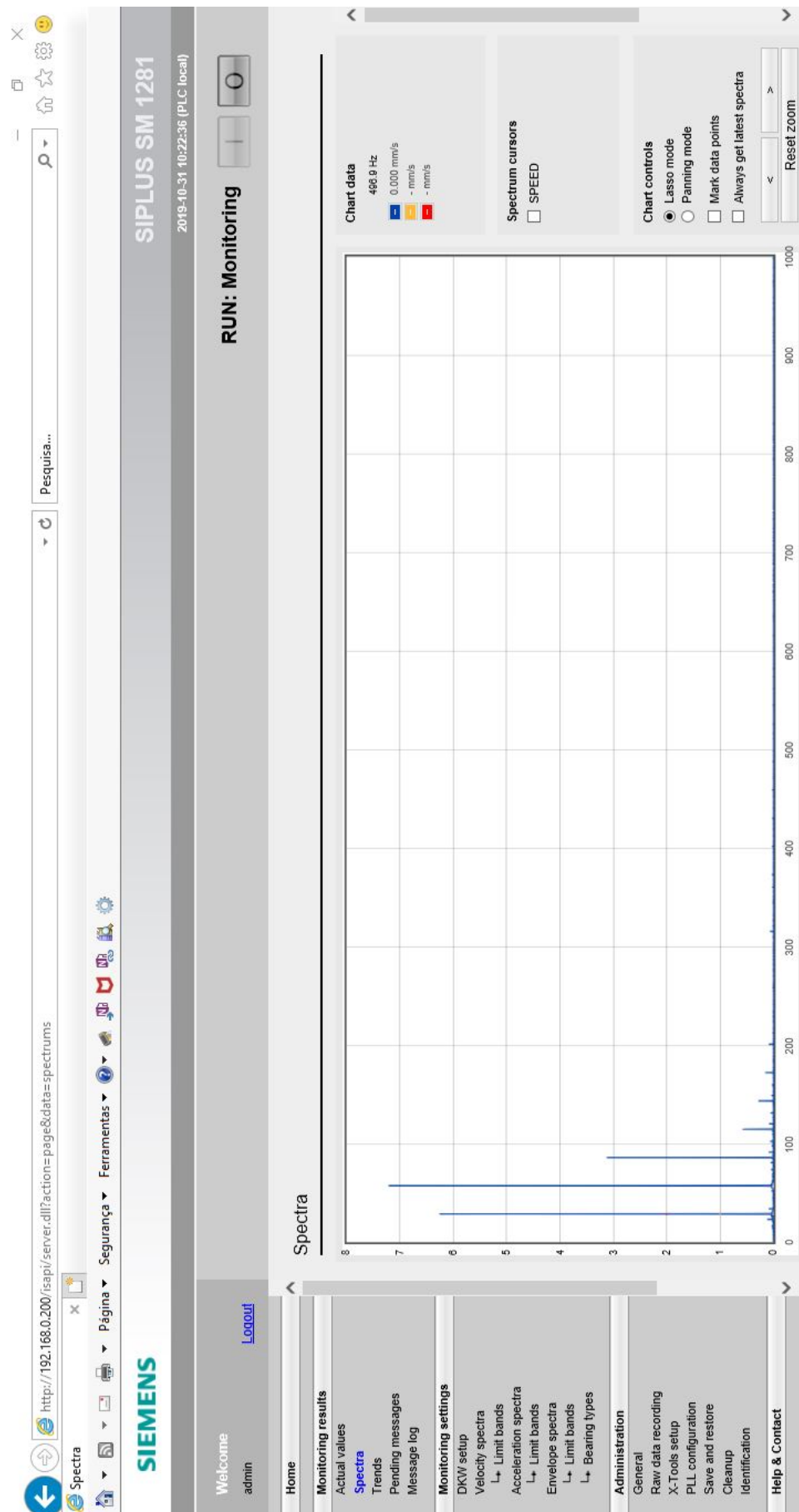


Figura 60 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1720rpm$ e $T = 1,5Nm$.

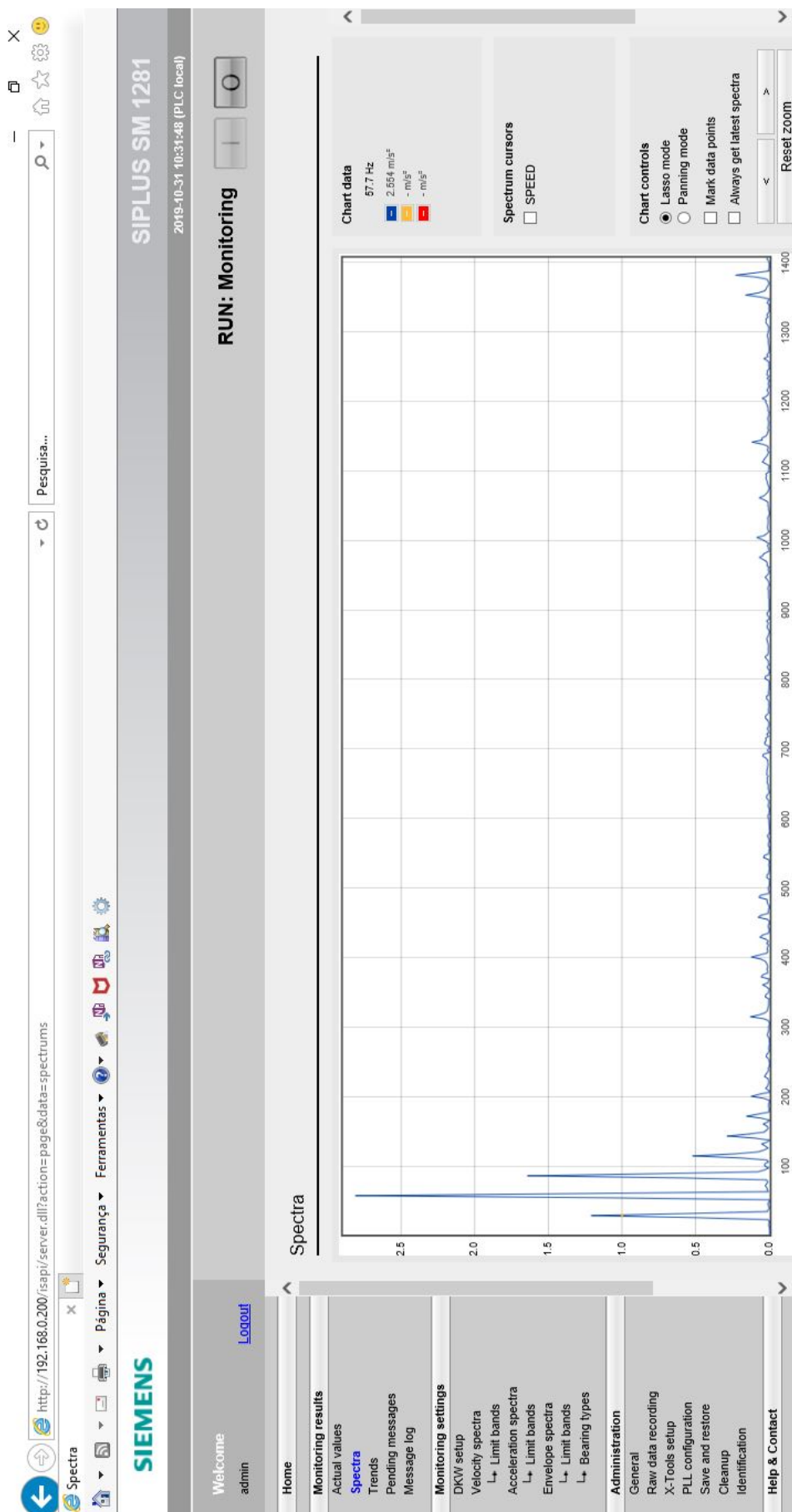


Figura 61 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1585rpm$ e $T = 3,0N.m$.

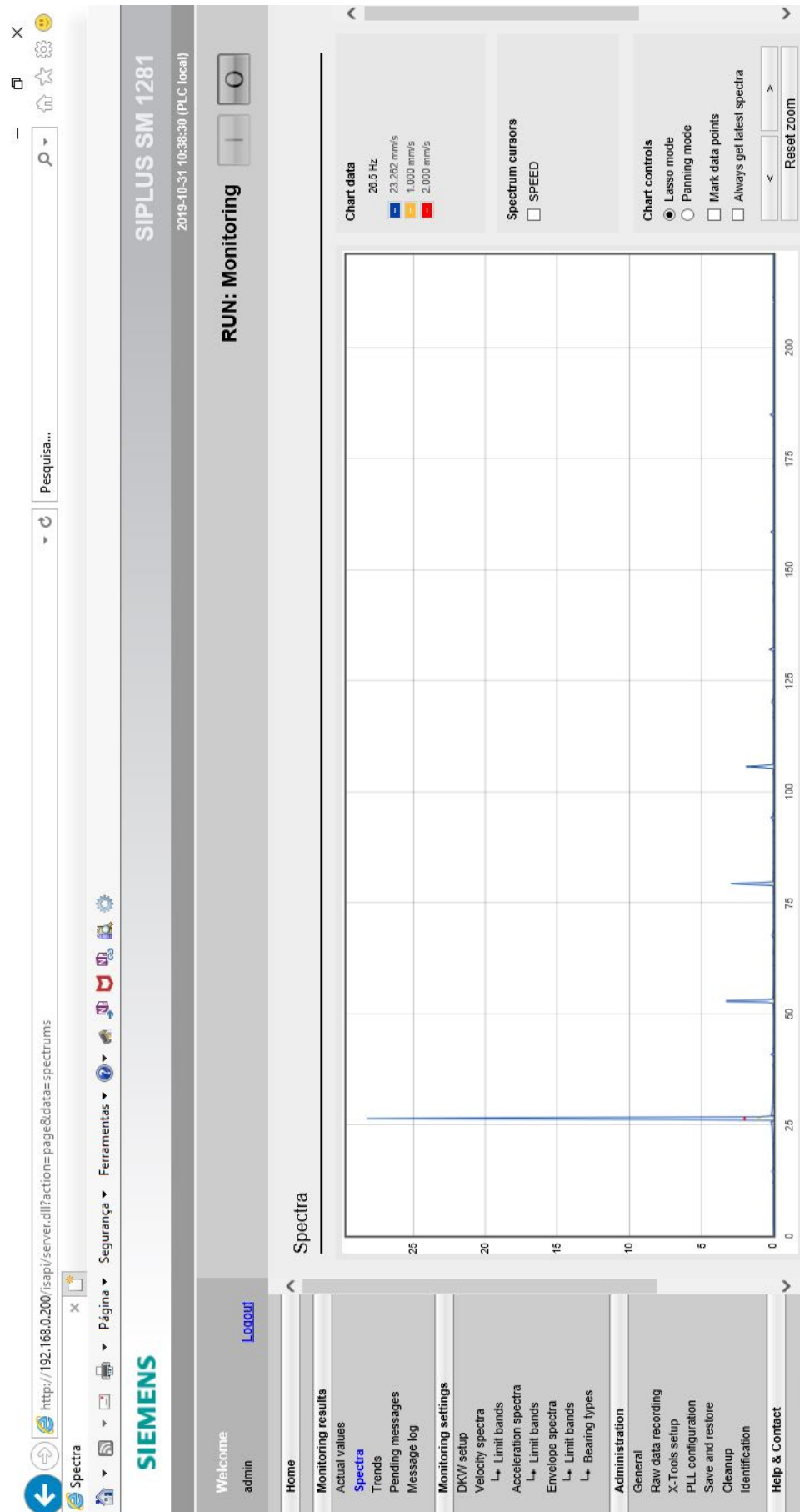
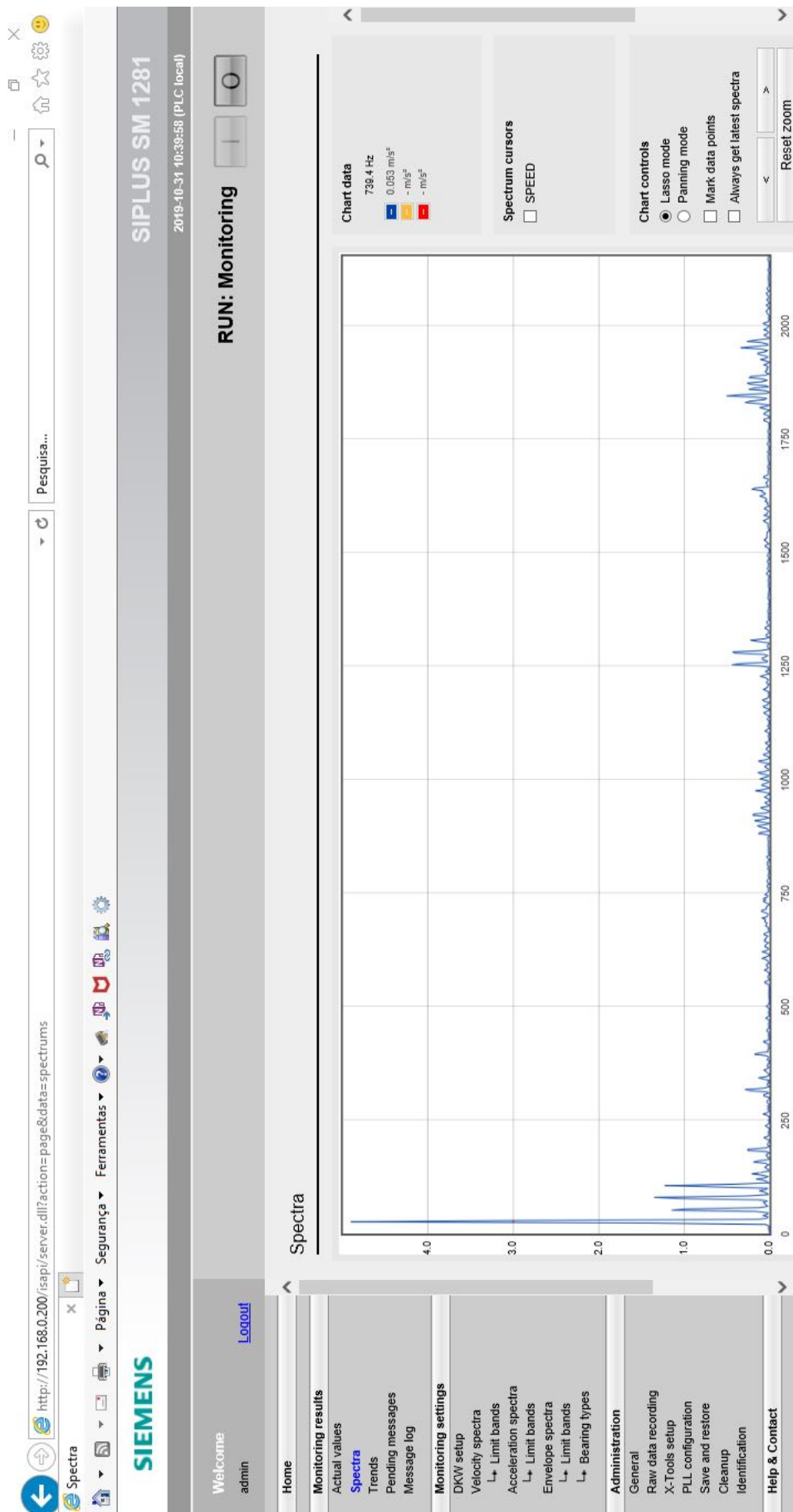


Figura 62 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 2 barras quebradas, $v = 1585rpm$ e $T = 3,0N.m$.



A.3 Testes com rotor com 3 barras seccionadas

Figura 63 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$.

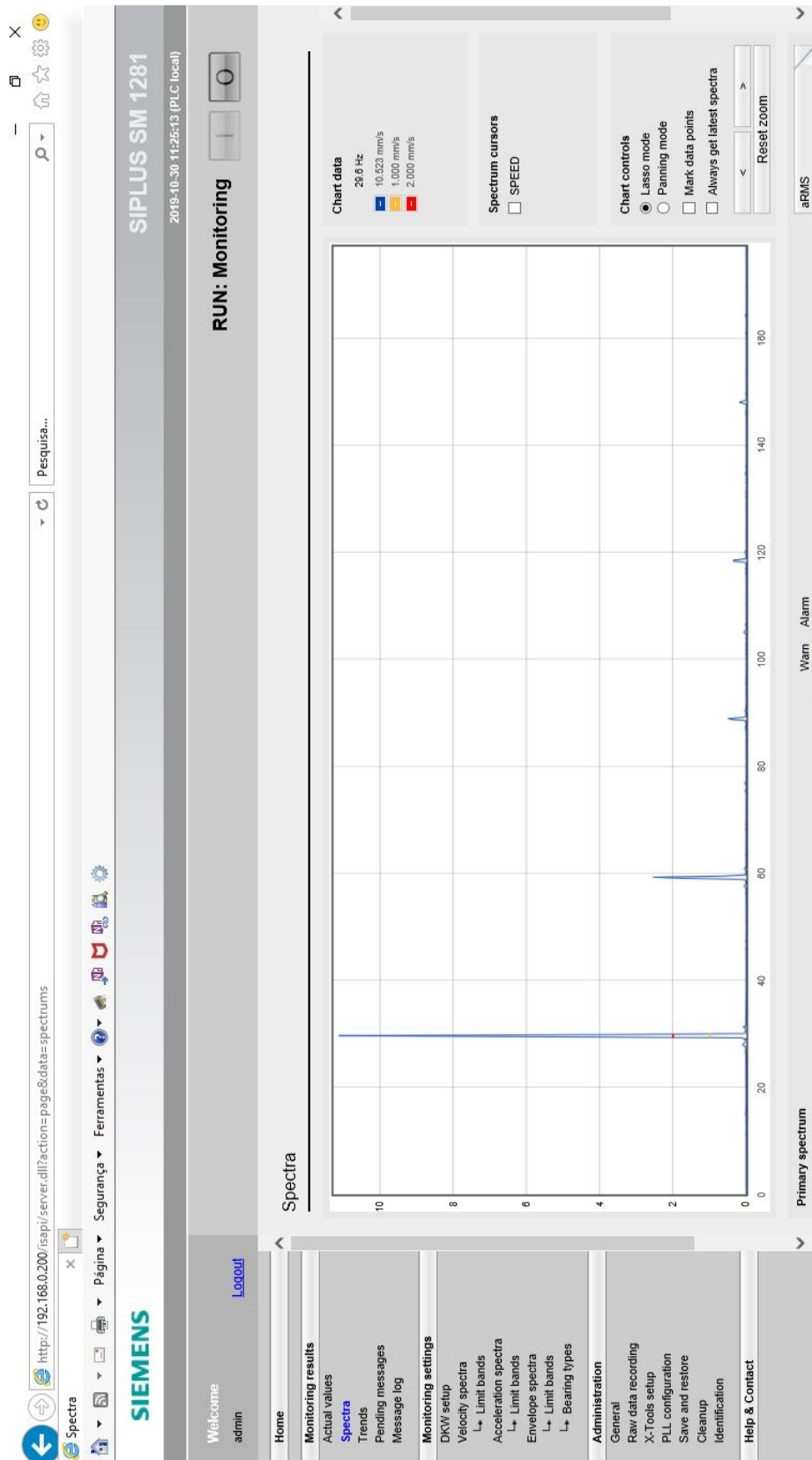


Figura 64 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$.

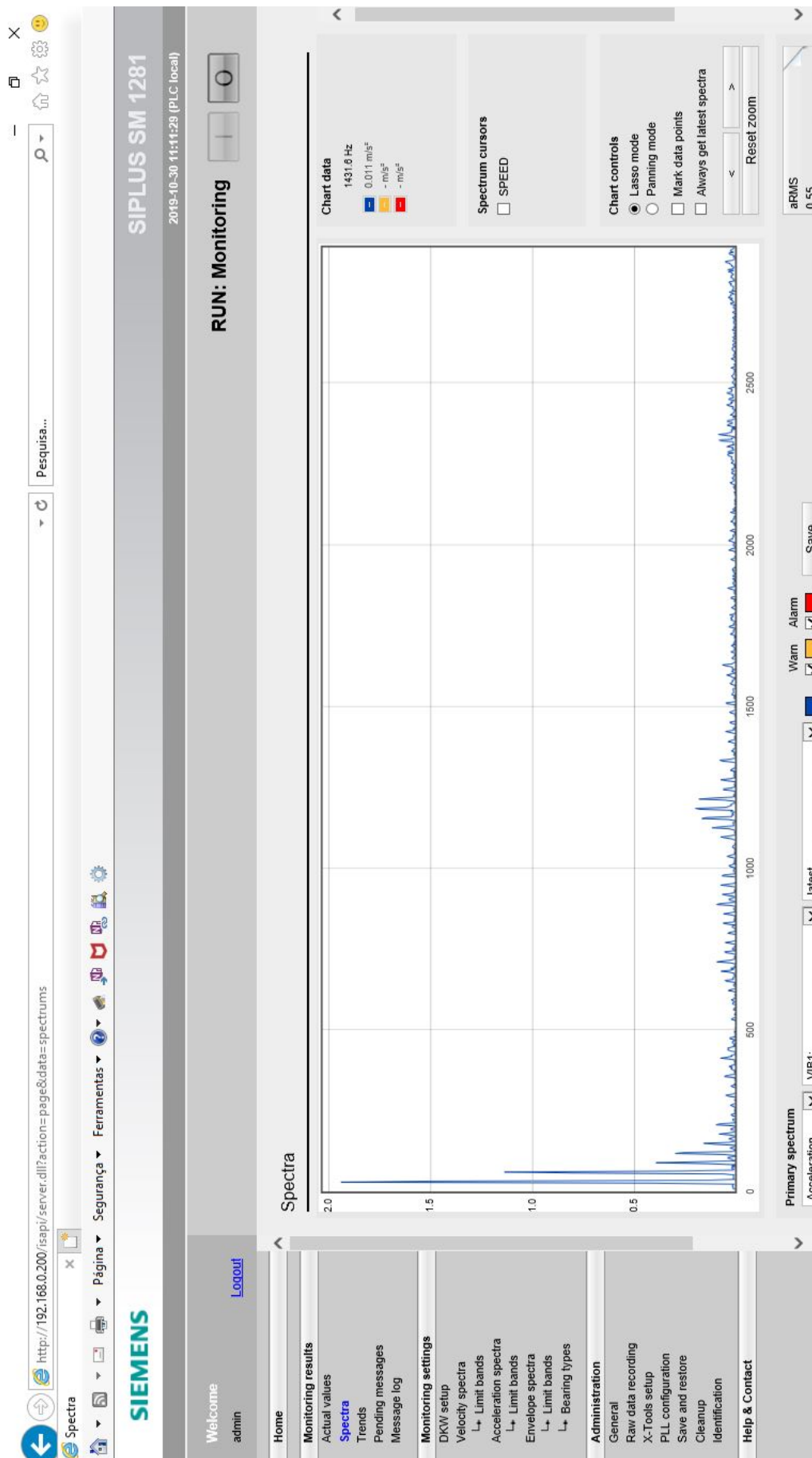


Figura 65 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1719rpm$ e $T = 1,5Nm$.

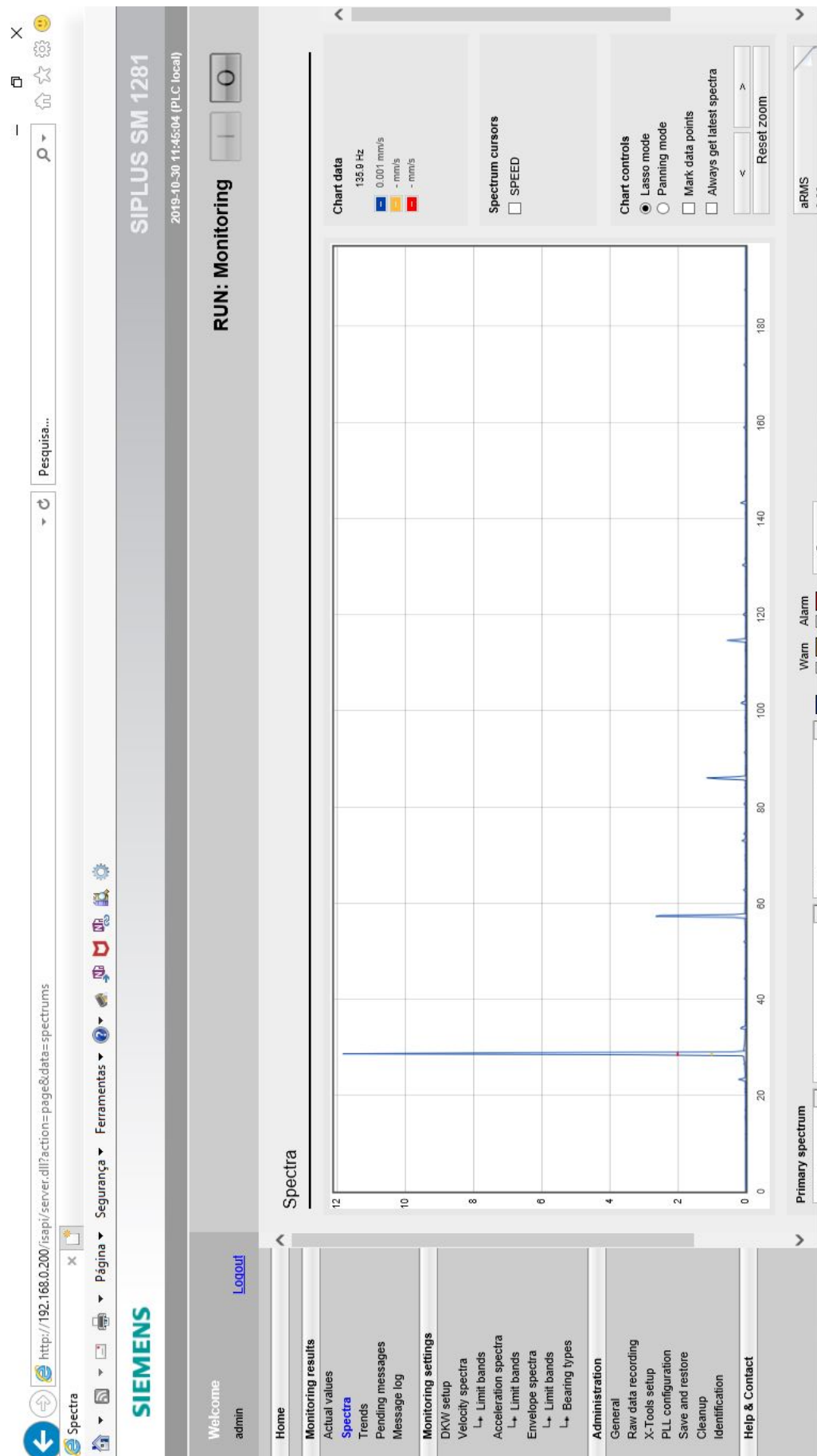


Figura 66 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1719rpm$ e $T = 1,5N.m$.

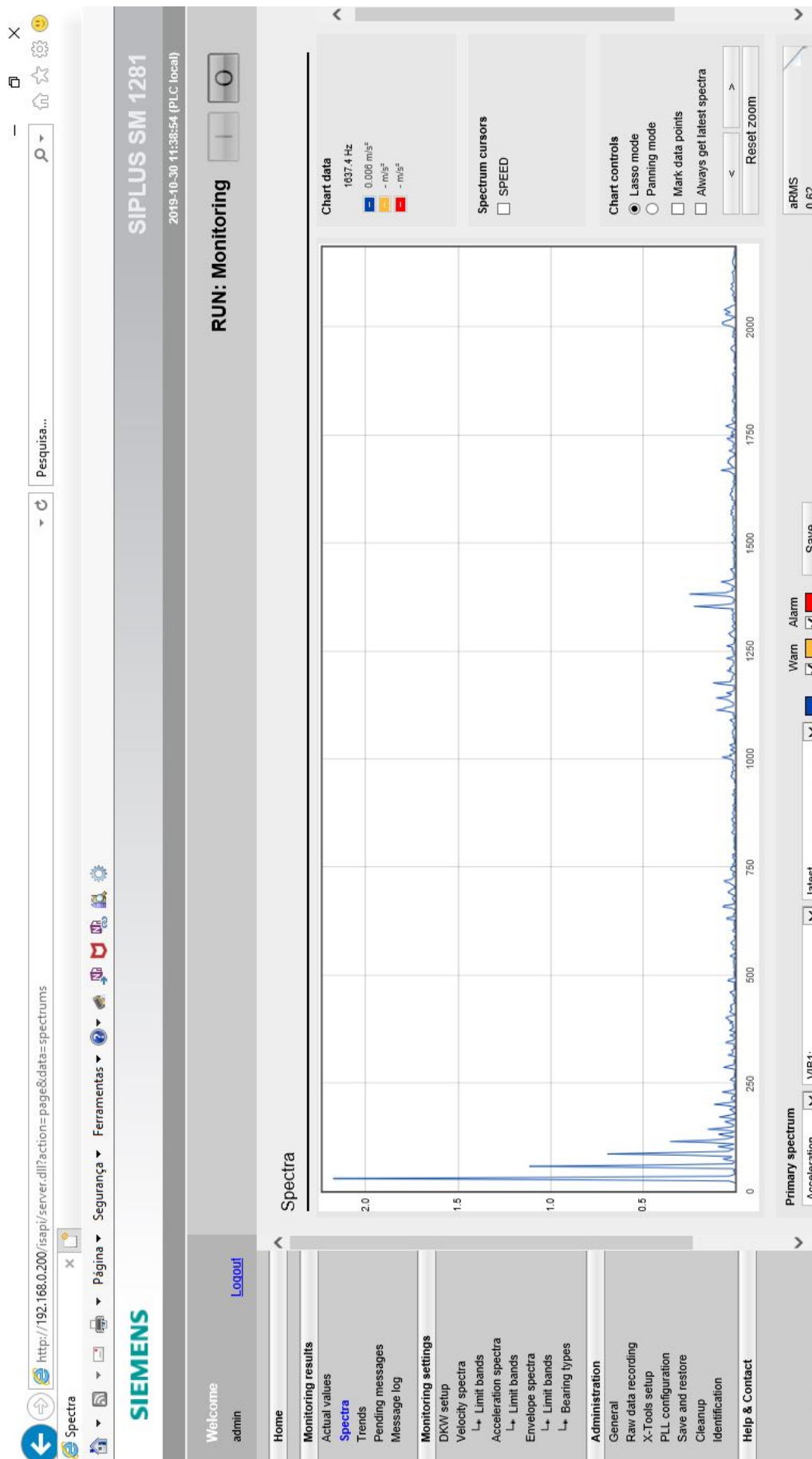


Figura 67 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1574rpm$ e $T = 3,0N.m$.

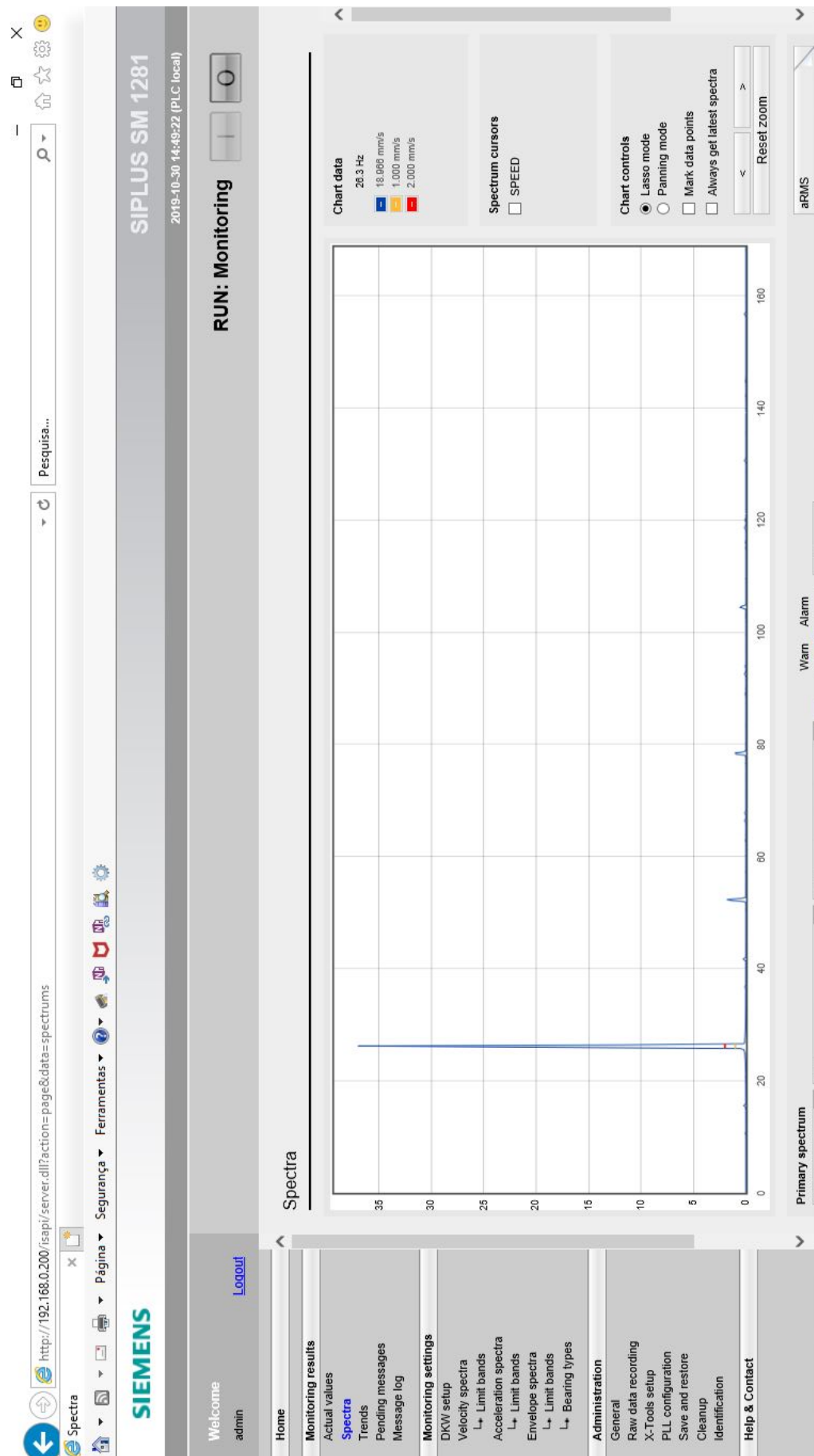
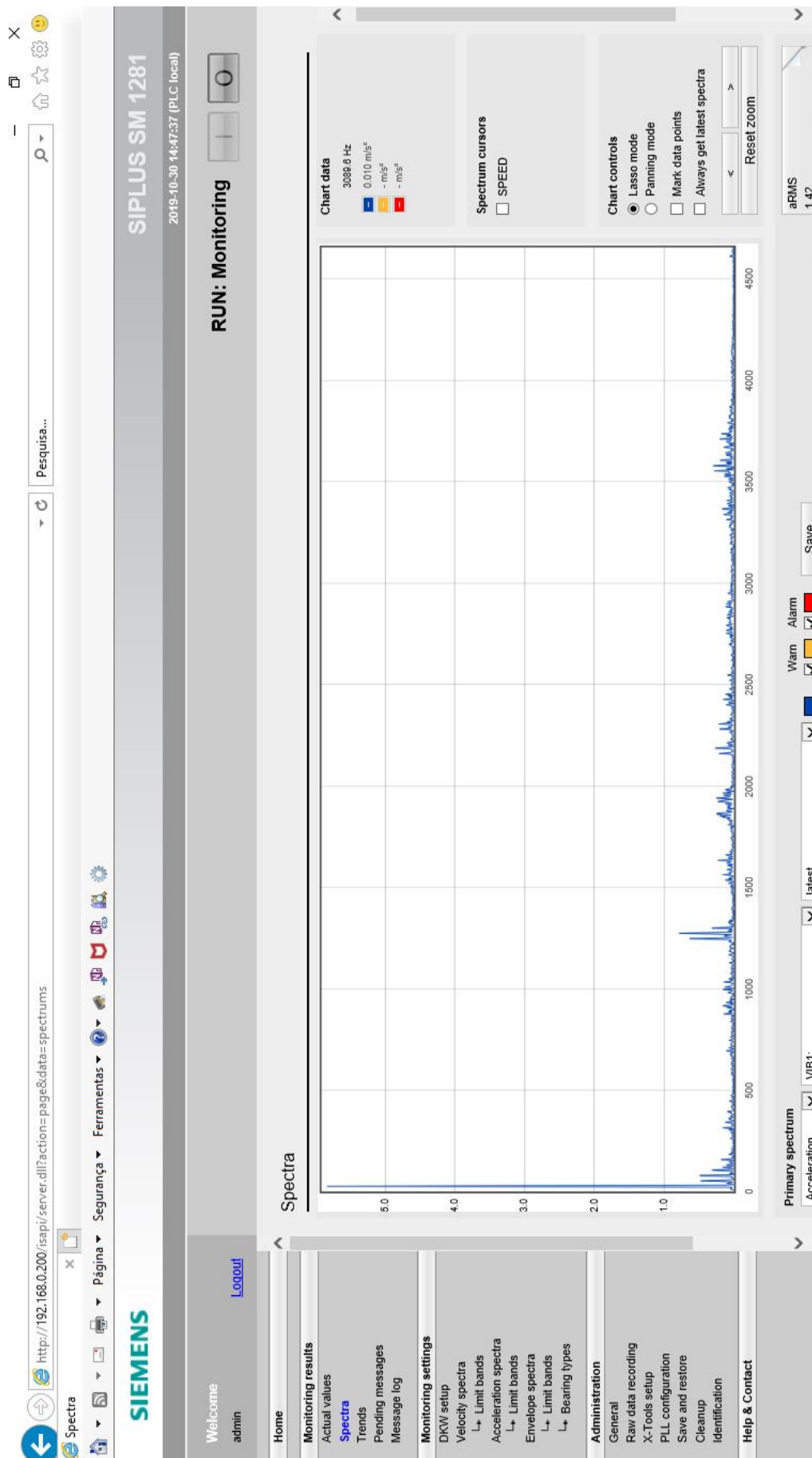


Figura 68 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 3 barras quebradas, $v = 1574rpm$ e $T = 3,0N.m$.



A.4 Testes com rotor com 4 barras seccionadas

Figura 69 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$.

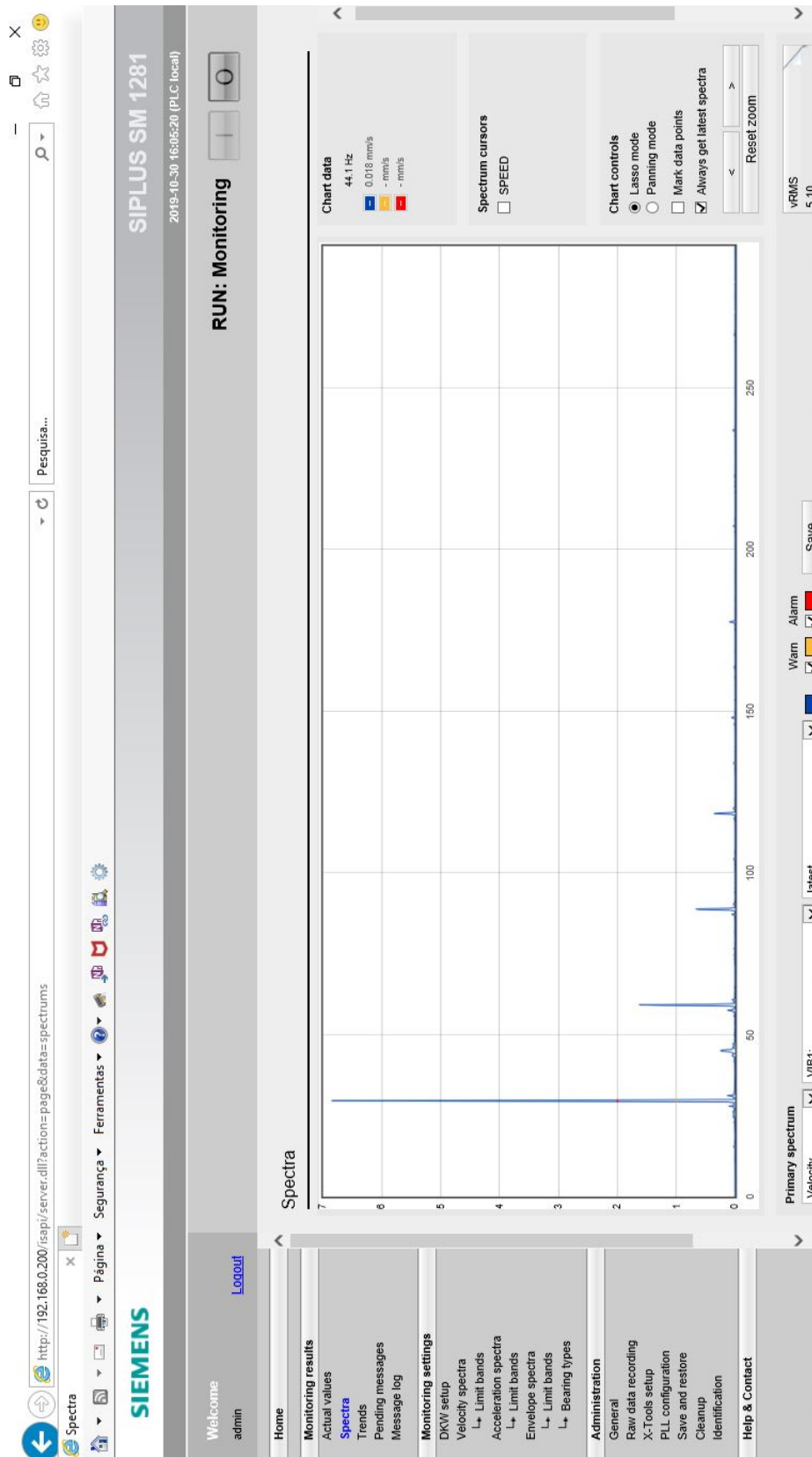


Figura 70 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1774rpm$ e $T = 0,5N.m$.

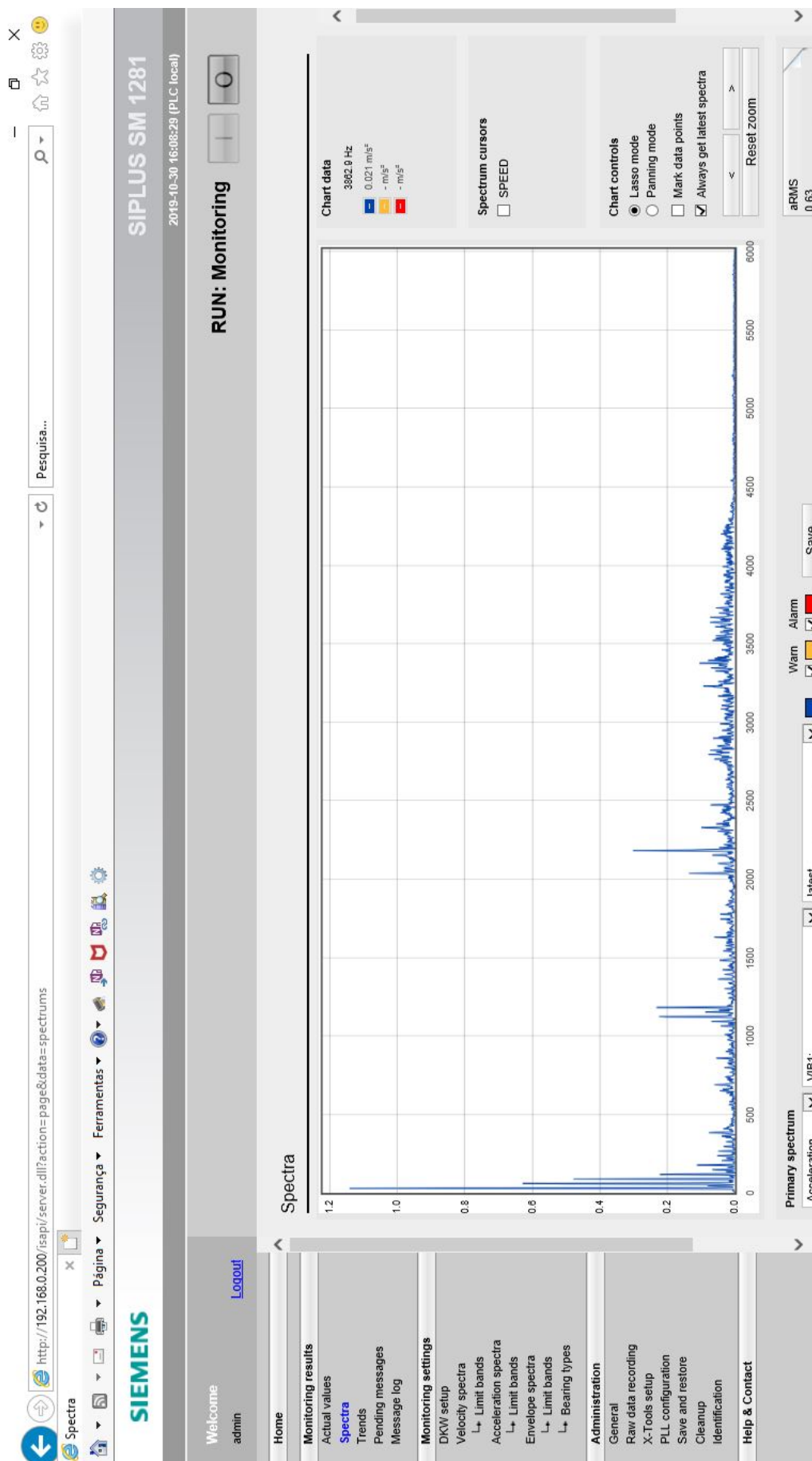


Figura 71 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1716rpm$ e $T = 1,5N.m$.

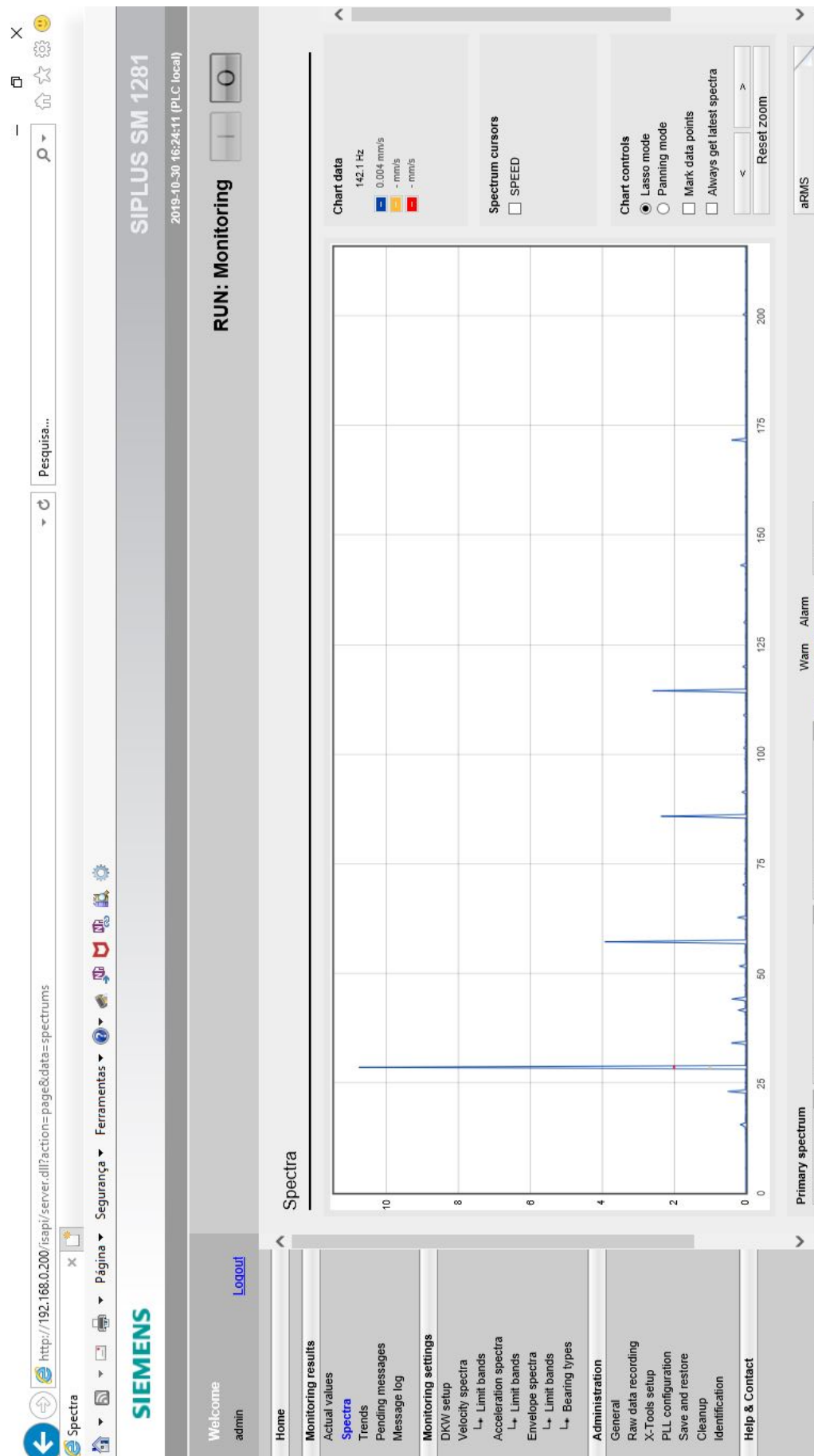


Figura 72 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1716rpm$ e $T = 1,5N.m$.

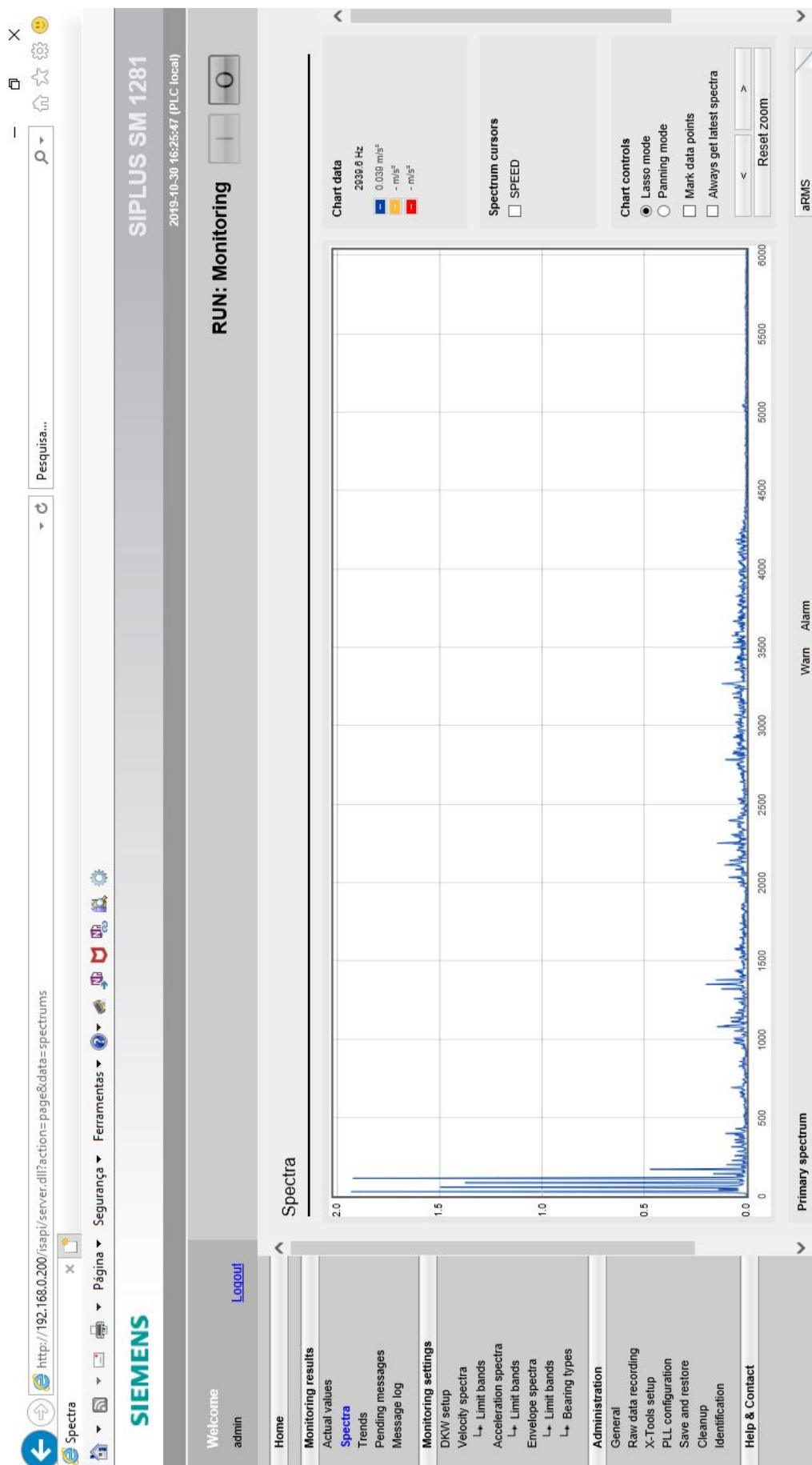


Figura 73 – Espectro da velocidade no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1568rpm$ e $T = 3,0N.m$.

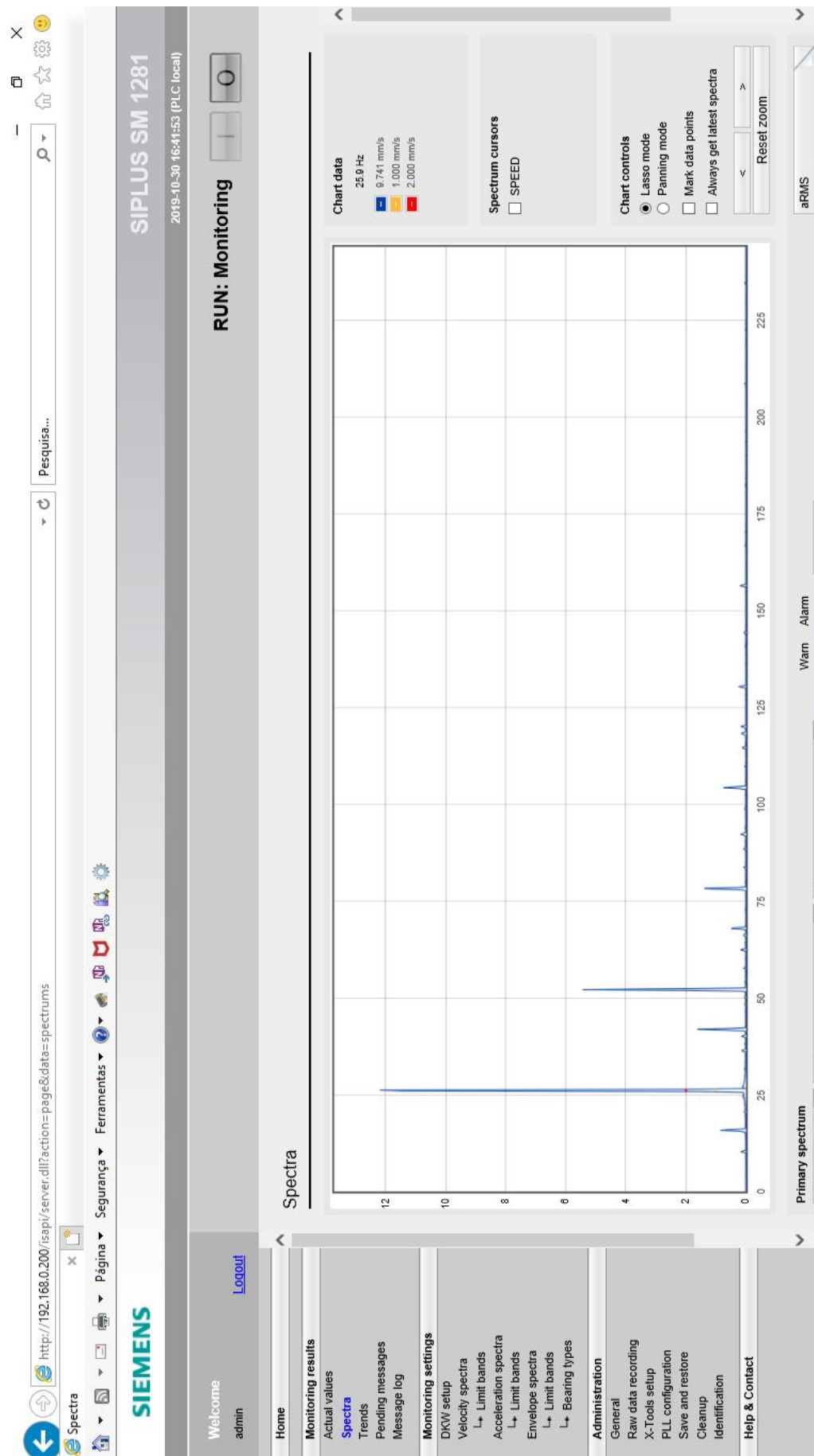


Figura 74 – Espectro da aceleração no domínio da frequência para rotor com 4 barras quebradas, $v = 1568rpm$ e $T = 3,0N.m$.

