

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DENIS MEDEIROS DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EM LÓGICA
PARACONSISTENTE PARA A ANÁLISE E MONITORAMENTO DE RISCOS DE
CAVITAÇÃO DURANTE A OPERAÇÃO DE BOMBAS CENTRIFUGAS EM UMA
REFINARIA DE PETRÓLEO**

SANTOS/SP

2021

DENIS MEDEIROS DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EM LÓGICA
PARACONSISTENTE PARA A ANÁLISE E MONITORAMENTO DE RISCOS DE
CAVITAÇÃO DURANTE A OPERAÇÃO DE BOMBAS CENTRIFUGAS EM UMA
REFINARIA DE PETRÓLEO**

Dissertação apresentada a Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. João Inácio da Silva Filho.

SANTOS/SP

2021

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

511.31 dos Santos, Denis Medeiros.
S234d Desenvolvimento de um modelo em lógica paraconsistente para a análise e monitoramento de riscos de cavitação durante a operação de bombas centrífugas em uma refinaria de petróleo / Denis Medeiros dos Santos.
- 2021.
88 f.:il

Orientador: João Inácio da Silva Filho.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2021.

1. Lógica Paraconsistente Anotada. 2. Cavitação. 3. Bombas centrífugas. 4. Refinaria de petróleo. I. da Silva Filho, João Inácio, orient. II. Título.

Dedico este trabalho à minha mãe, minha esposa e meus filhos que tiveram paciência para suportar minha ausência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao meu orientador professor João Inácio da Silva Filho, pelo suporte, direcionamento, incentivo e dedicação. Obrigado pelo ensinamento, unindo a experiência acadêmica com o conhecimento técnico da indústria, minha expectativa é levar esses ensinamentos para toda a vida profissional.

O apoio e suporte da Sandra e Imaculada, sempre com muita paciência, ajudando com as questões burocráticas.

Todos os professores que lecionaram as disciplinas cursadas, em especial a professora Dora, pela dedicação, durante as aulas remotas.

Aos colegas de trabalho e amigos, Fábio, Takaki, Anderson e Sansão pelo apoio e amizade.

Finalizando agradeço, a toda a minha família: Minha mãe guerreira, pela memória do meu pai herói e minha maior referência de dedicação e amor a família, meus queridos irmãos, minha esposa Mariana que não mediu esforços, durante toda a nossa vida de união, meus filhotes Gabriel, Guilherme e Gregory, vocês são o alimento da minha alma que me fortalece e inspira.

E claro, minha gratidão ao Grande Arquiteto do Universo, pois graças a ele tudo se concretizou.

“Que nada nos limite, que nada nos defina, que nada nos sujeite. Que a liberdade seja nossa própria substância, já que viver é ser livre. Porque alguém disse e eu concordo que o tempo cura, que a mágoa passa, que decepção não mata. E que a vida sempre, sempre continua”.

Simone de Beauvoir

RESUMO

O aperfeiçoamento das ferramentas de monitoramento da condição operacional de equipamentos dinâmicos, em especial bombas centrífugas, é uma importante área de análise dentro das organizações, principalmente na indústria petroquímica, pois pode ser responsável por uma parcela significativa dos ganhos de produtividade e redução dos custos com manutenção nos sistemas produtivos. O objetivo do trabalho é investigar e propor novas configurações suportadas por uma lógica não clássica denominada de Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de 2 valores (LPA2v) para auxiliar na tomada de decisão com precisão e agilidade nos ajustes das variáveis de processo, mantendo o produto dentro do especificado e o equipamento operando dentro dos parâmetros adequados, do ponto de vista da confiabilidade e integridade mecânica. O método do trabalho foi o desenvolvimento de um modelo de análise automatizado, fundamentado em lógica paraconsistente, capaz de detectar o fenômeno da cavitação em bombas centrífugas aplicadas em unidade de refino de petróleo, classificando e oferecendo à operação um score que identifica em tempo real a condição operacional em vista ao risco de cavitação nas pás do impulsor da bomba centrífuga. Os principais resultados obtidos mostraram que os algoritmos fundamentados em LPA2v são eficientes nas abordagens de gerenciamento de processos para área industrial propostas na literatura e podem ser aplicados com êxito em áreas correlatas ao refino do petróleo. Do ponto de vista prático, esse estudo pode auxiliar os responsáveis pelo monitoramento e controle de processo, pois trata de elementos essenciais formando sistemas inteligentes que são necessários para o apoio oferecendo uma condução eficiente na operação de bombas centrífugas frente ao fenômeno da cavitação. De forma geral, visto em termos do processo industrial os resultados obtidos sugerem que as abordagens propostas na literatura tendem a ser sustentadas, ou seja, quando um processo é gerenciado, percebe-se melhoria na condição operacional e atuação com assertividade nas variáveis operacionais que comprometem a confiabilidade.

Palavras-chave: Cavitação. Lógica Paraconsistente. Monitoramento e Controle de Processo. Bomba Centrífuga. Refinaria de Petróleo.

ABSTRACT

The improvement of tools for monitoring the operational condition of dynamic equipment, especially centrifugal pumps, is an important area of analysis within organizations, especially in the petrochemical industry, as it can be responsible for a significant portion of productivity gains and cost reductions with maintenance in production systems. The present work aims to investigate and propose new configurations supported by a non-classical logic called Paraconsistent Annotated Logic with annotation of 2 values (PAL2v) to assist in decision making with precision and agility in the adjustments of process variables, keeping the product within the specified and the equipment operating within proper parameters from the standpoint of reliability and mechanical integrity. The method of work was the development of an automated analysis model, based on paraconsistent logic, capable of detecting the phenomenon of cavitation in centrifugal pumps applied in an oil refining unit, classifying and offering the operation a score that identifies in real time the operational condition in view of the risk of cavitation in the centrifugal pump impeller blades. The main results obtained showed that the algorithms based on PAL2v are efficient in the process management approaches for industrial area proposed in the literature and can be successfully applied in areas related to oil refining. From a practical point of view, this study can help those responsible for monitoring and controlling the process, as it deals with essential elements forming intelligent systems that are necessary for support offering an efficient conduction in the operation of centrifugal pumps against the phenomenon of cavitation. In general, seen in terms of the industrial process, the results obtained suggest that the approaches proposed in the literature tend to be sustained, that is, when a process is managed, there is an improvement in the operational condition and acting with assertiveness in the operational variables that compromise reliability.

Keywords: Cavitation. Paraconsistent Logic. Monitoring and Process Control. Centrifugal pump. Oil refinery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Determinação do grau de certeza de valor resultante real (G_{CR}) no reticulado da LPA2v quando $G_C < 0$	19
Figura 2. Reticulado de quatro vértices (Hasse)	21
Figura 3. Reticulado τ com o sistema de coordenadas.....	22
Figura 4. $\mathcal{L}$: Reticulado τ composto de um novo sistema de coordenadas	23
Figura 5. Aumento de escala de $\sqrt{2}$	23
Figura 6. Rotação de 45° em relação a origem $\sqrt{2}$	23
Figura 7. Translação de valores entre QUPC e o reticulado da LPA2v $\sqrt{2}$	24
Figura 8. Ponto de Interpolação (G_C , G_{CT}) e distância D	26
Figura 9. Grau de Certeza resultante real, G_{CR} no reticulado.	26
Figura 10. Valor do Grau de Evidência com variação linear e diretamente proporcional a grandeza medida.....	27
Figura 11. Valor do Grau de Evidência com variação linear e indiretamente proporcional a grandeza medida.....	28
Figura 12. Símbolo do NAP – Nó de Análise Paraconsistente	28
Figura 13. Símbolo do Algoritmo Paraconsistente Extrator de efeitos da Contradição.	30
Figura 14. Rede de Análise Paraconsistente em Configuração Simples.....	31
Figura 15. Curva característica da bomba centrífuga.	34
Figura 16. Efeito na confiabilidade causado pelo BEP.	34
Figura 17. Variações da Cavitação Incipiente; A) Fases da evolução do fenômeno de cavitação como uma sequência de eventos; B) Regiões dos regimes de cavitação e seus limites de acordo com a ISA.	38
Figura 18. Bombas centrífugas acionadas por motor de Indução assíncrono; A) Desenho das principais partes de um motor elétrico trifásico assíncrono; B) Processo de transferência de energia para o fluido de trabalho, em um típico sistema de transporte de líquidos com bomba centrífuga acionada por motor elétrico; C) Potências envolvidas em um conjunto Motobomba instalado em sistema de transporte de líquido.	42
Figura 19. <i>Lay Out</i> básico da instalação.	46
Figura 20. <i>Lay Out</i> básico da instalação dos tanques de sucção (1).....	47
Figura 21. <i>Lay Out</i> básico da instalação dos tanques de sucção (2).....	47

Figura 22. Lay Out dos acessórios da instalação da bomba.....	48
Figura 23. Fluxograma do tratamento de dados do processo.	50
Figura 24. Classificação operacional.	52
Figura 25. Módulo de comunicação entre o Excel e o PI.	53
Figura 26. Classificação do risco de cavitação considerando a vazão e a pressão de descarga.	54
Figura 27. Classificação do risco de cavitação considerando a corrente e a pressão de sucção.....	55
Figura 28. Visão geral do conjunto acionador e acionado.....	57
Figura 29. Visão geral do conjunto acionador e acionado.....	57
Figura 30. Bomba centrífuga instalada na base.....	58
Figura 31. Instrumentos de monitoramento das variáveis de processo.....	58
Figura 32. Trend do processo com o marcador na região analisada em regime estável.....	66
Figura 33. <i>Trend</i> do processo detalhando estabilidade do processo.....	66
Figura 34. Trend do processo, após descontrole operacional.....	68
Figura 35. Trend do processo, durante operação da bomba centrífuga.	68
Figura 36. Trend do processo, com tendência de redução da pressão de sucção e descarga.	69
Figura 37. Ampliação do trend do processo, com admissão de bolsas de gás.	70
Figura 38. Trend do processo, durante coleta do analisador paraconsistente.	71
Figura 39. Trend do processo com bombeamento de bolsas de gás.	72
Figura 40. Trend do processo com oscilação no suprimento de produto.	73
Figura 41. Histórico de ordens de manutenção para a bomba centrífuga.....	73

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Valoração do Grau de Evidência com variação linear com proporcionalidade direta a grandeza medida.....	59
Gráfico 2. Grandeza da fonte de informação – Variação da Corrente Elétrica do Motor – Variando de modo diretamente proporcional relacionada com o Grau de Evidência Normalizado.....	60
Gráfico 3. Grandeza da fonte de informação – Variação da Pressão de Sucção da Bomba – variando de modo diretamente proporcional relacionada com o Grau de Evidência Normalizado.....	61
Gráfico 4. Grandeza da fonte de informação – Variação da Vazão Volumétrica da Bomba – variando de modo diretamente proporcional relacionada com o Grau de Evidência Normalizado.....	62
Gráfico 5. Grandeza da fonte de informação – Variação da Pressão de Descarga da Bomba – variando de modo diretamente proporcional relacionada com o Grau de Evidência Normalizado.....	62
Gráfico 6. Distribuição dos resultados das análises por classificação.	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Características da bomba centrífuga objeto do estudo	45
Quadro 2. Classificação das amostra da J-1330.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Limites mínimo e máximo das faixas de trabalho.	56
Tabela 2. Característica da análise do grau de evidência resultante real obtido na saída do algoritmo.	63
Tabela 3. Grau de evidência da saída da rede NAP J-1330-BAIXO-NORMAL-01. ..	66
Tabela 4. Grau de evidencia da saída da rede NAP J-1330-ALTO-MODERADO-01.	67
Tabela 5. Grau de evidencia da saída da rede NAP J-1330-ALTO-CRÍTICO-01.....	69
Tabela 6. Grau de evidencia da saída da rede NAP J-1330-ALTO-CRÍTICO-02.....	70
Tabela 7. Grau de evidencia da saída da rede NAP J-1330-ALTO-PERIGO-01.	71
Tabela 8. Grau de evidencia da saída da rede NAP J-1330-ALTO-MODERADO-02.	72
Tabela 9. Grau de evidencia da saída da rede NAP J-1330-CRÍTICO-CRÍTICO-03.	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCI	Casa de Controle Integrado
Gc	Grau de Certeza
Gct	Grau de Contradição
IHM	Interface Homem-Máquina
LCC	Custo do Ciclo de Vida
LPA2v	Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de 2 valores
LPA's	Lógicas Paraconsistentes Anotadas
NAP	Nó de Análise Paraconsistente
QUPC	Quadrado Unitário no Plano Cartesiano
RAP	Rede de análise paraconsistente
SCADA	Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_c	Índice de cavitação
τ	Reticulado de Hasse
$\Re$	Conjunto número reais
μ_{ER}	Grau de evidência resultante real
E_τ	Lógica Anotada Evidencial
φ	Intervalo de evidência
$\mathcal{L}$	Reticulado finito munido novo sistema de coordenadas
$\perp$	Indeterminado ou Paracompleto
λ	Grau de evidência desfavorável
μ	Grau de evidência favorável
(μ, λ)	Anotação
γ	Peso específico
η	Eficiência
ηt	Eficiência de trabalho
t	True logical state
f	False logical state
T	Estado logico inconsistente
D	Distância
F	Falso
H	Altura manométrica
Ht	Altura manométrica de trabalho
kgf/cm^2	Unidade de medida de pressão em quilogramas força por centímetro ao quadrado
P	Pressão
Pt	Pressão de trabalho
Q	Vazão volumétrica
Qt	Vazão volumétrica de trabalho
T	Inconsistente
V	Verdadeiro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Importância	17
1.2 Problemática	18
1.3 Fundamentação teórica.....	18
1.3.1 Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v)	20
1.3.2 Relações algébricas entre o QUPC e o Reticulado da LPA2v	22
1.3.3 Graus de certeza e contradição	24
1.3.4 Geração dos graus de evidência (Modelagem com variação Linear)	27
1.3.5 Algoritmo Nó de Análise Paraconsistente (NAP)	28
1.3.6 Rede de análise paraconsistente (RAP).....	30
1.3.7 Sistema Supervisório Controle e Aquisição de Dados (SCADA)	31
1.3.8 Bombas centrífugas.....	32
1.3.9 Cavitação em bombas centrífugas	35
1.3.10 Motores elétricos de indução	38
1.3.11 Energias envolvidas no Sistema Motobomba	40
1.4 Justificativa.....	43
1.5 Objetivo	43
1.5.1 Objetivo geral.....	43
1.5.2 Objetivos específicos.....	44
2 MATERIAL E MÉTODOS	45
2.1 Materiais	45
2.1.1 Coleta de dados do processo	49
2.2 Métodos	49
2.2.1 Fundamento básico do controlador paraconsistente	49
2.2.2 Fundamento básico do controlador paraconsistente	50
2.2.3 Normalização.....	51
2.2.4 Evidências na Rede de Análise Paraconsistente - RAP	51
2.2.5 Extração dos efeitos de contradição.....	51
2.2.6 Funcionalidade do sistema.....	52
2.2.7 Valores para definição das métricas.....	55
2.2.8 Coleta de dados.....	56

2.2.9 Modelagem e normalização dos dados	58
2.2.10 Aplicação do Algoritmo Extrator De Efeitos de Contradição.....	63
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
3.1 Coleta dos dados	65
3.2 Processo estável e normal sem intervenção	65
3.3 Processo instável e anormal sem intervenção	67
3.4 Processo instável e anormal com intervenção	69
4 CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS.....	79
APÊNDICE A – Exemplo da obtenção dos dados de processo, através do <i>PI Data Link</i>.....	83
APÊNDICE B – Exemplo de processamento dos dados de processo NAP	84
APÊNDICE C – Exemplo de valores dos graus de evidência da saída da rede NAP	85
APÊNDICE D – Exemplo do extrator dos efeitos de contradição	86

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância

A indústria de petróleo e gás é, atualmente, dividida em três segmentos; “*Upstream*”, responsável pela exploração e extração e produção; “*Midstream*”, trata o armazenamento e transporte até os parques de refino; “*Downstream*”, engloba o refino, marketing e distribuição (KHAN *et al.*, 2017).

O segmento “*Downstream*”, mais especificamente o refino, atua em um mercado cada vez mais exigente e competitivo, devido à concorrência global e os preços praticados no mercado internacional, redução da demanda de consumo, rigorosas exigências normativas, saúde e meio ambiente segurança, crescimento de fontes alternativas de energia e pressões dos grupos de interesse em relação a interesses ambientais, sociais, econômicos e políticos (RATNAYAKE; MARKESSET, 2010). Nesse âmbito, além do investimento no aumento da capacidade para atender às demandas dos mercados, tais organizações devem também buscar o padrão de excelência em tecnologia, planejamento e gestão operacional (NEVES; PEREIRA; COSTA, 2015).

As bombas centrífugas possuem aplicação importante e crucial para atender o objetivo operacional da maioria dos processos de produção e está presente, praticamente, em qualquer sistema produtivo devido ao papel significativo em plantas industriais e precisam de monitoramento contínuo para minimizar as perdas de produção (ILOTT; GRIFFITHS, 1997). Dentro de uma refinaria de petróleo, sua função básica, é basicamente, atender as necessidades de deslocamento do inventário, ou até mesmo, especificação do produto e despacho aos clientes internos e externos.

A análise dos dados de processo de bombas centrífugas é uma ferramenta amplamente utilizada na engenharia de operação e otimização, com objetivo de avaliar o comportamento e definir ajustes operacionais. Com isso, as falhas devem ser localizadas, identificadas e classificadas o mais rápido possível, afim de corrigir e evitar inatividade do sistema, com perda financeira, devido a parada não programada do equipamento (FAROKHZAD *et al.*, 2012).

1.2 Problemática

As falhas ocorrem, normalmente, devido a alteração transitória, ou não, de variáveis que comprometem o rendimento e confiabilidade da bomba, onde destacam-se as alterações do líquido, dentre elas, podemos destacar; viscosidade, peso específico, temperatura, pressão de sucção, descarga e perda do regime contínuo do volume de fluído (FAROKHZAD *et al.*, 2012).

O monitoramento da condição operacional de equipamentos dinâmicos está bem estabelecido, utilizando a análise manual, que depende da experiência acumulada de um especialista. Esse modelo está perdendo espaço para as análises inteligentes e automatizadas (WALLACE *et al.*, 2013).

No contexto econômico, a predição de falhas para automação de processos corresponde a uma importante solução para a boa exploração das instalações industriais (HAFAIFA; GUEMANA; DAOUDI, 2012).

1.3 Fundamentação teórica

Esse trabalho utiliza a lógica não clássica denominada de Logica Paraconsistente Anotada com anotação de 2 valores (LPA2v) como base de um sistema de tomada de decisão para auxiliar e aumentar a precisão e agilidade no ajuste das variáveis de processo, a fim de manter o produto dentro do especificado e o equipamento operando dentro dos parâmetros considerados como ótimo, do ponto de vista da confiabilidade, e integridade mecânica (DA SILVA FILHO, 2006, 2012).

A LPA2v pode ser representada em um reticulado de quatro vértices, conforme mostrado na Figura 1 (DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2008). Neste caso dois valores originados de fontes de informações distintas e representados por graus de evidência são analisados e interpretados no Reticulado associado a LPA2v de modo que resultem em um estado lógico paraconsistente capaz de oferecer condições de tomadas de decisão mesmo sob condições contraditórias apresentadas pelas informações.

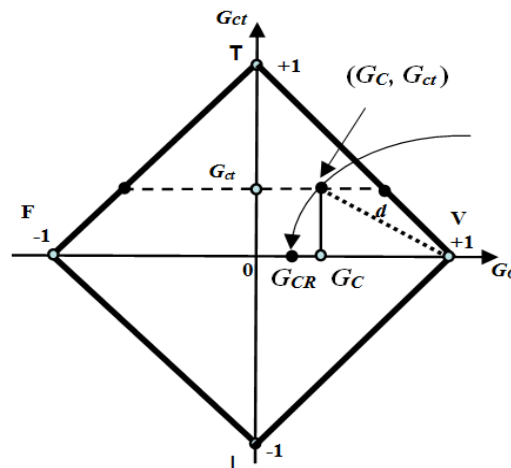


Figura 1. Determinação do grau de certeza de valor resultante real (G_{CR}) no reticulado da LPA2v quando $G_C < 0$

Fonte: da Silva Filho, Abe e Lambert-Torres (2008).

Para a utilização prática, durante a operação são obtidos e avaliados uma série de dados, que são muitas vezes contraditórios, e necessitam da interpretação de um especialista com conhecimentos operacionais e técnicos, o que dificulta o enquadramento da condição operacional adequada para o processo e a bomba centrífuga. A aplicação da LPA2v busca propor novas técnicas com maior capacidade de efetuar a minimização das complexas análises realizadas (DA SILVA FILHO, 2007), tornando o processo de ajuste operacional rápido e automatizado.

Nesta pesquisa os dados utilizados como fontes de informação são obtidos de controle supervisão padrão sistema de aquisição (SCADA) usado principalmente para monitoramento. Esses sistemas geralmente fornecem uma grande quantidade de dados coletados em intervalos de segundos, que podem vir incompletos, redundantes e expressando contradição entre as informações. Esses bancos de dados são considerados de conhecimento incerto e para que possam oferecer melhores técnicas de tratamento e análise deve-se aplicar modelos com algoritmos baseados em lógicas não clássicas (DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2008).

A sentença que expressa o princípio da não contradição, que é considerado um dos sustentáculos da lógica clássica, estabelece: quando duas proposições contraditórias, ou seja, uma negando a outro, uma delas é considerada como verdadeira (DE ALMEIDA, 2008).

O fundamento principal da lógica paraconsistente é a revogação do princípio da não contradição, com isso admite o tratamento de sinais contraditórios na sua estrutura teórica (DA SILVA FILHO, 1999).

A área de monitoramento e controle de processo, e suas aplicações, em sistemas inteligentes proporciona excelente aplicação da lógica paraconsistente, sendo que a característica principal é a admissão da contradição em sua estrutura teórica sem que o conflito de informações cause a nulidade da conclusão que define a decisão fina na saída (DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2008).

1.3.1 Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v)

A Lógica Paraconsistente LP tem aplicação quando se utiliza o conhecimento de evidências na resolução de conflitos, onde ocorre interferências inconsistentes. Este modo de análise baseado em LP tem se mostrado adequado quando se utiliza o conhecimento de evidências para ajudar a resolver conflitos, quando várias inferências inconsistentes ocorrem.

No reticulado associado a LP, são atribuídos valores às suas fórmulas proposicionais correspondentes, onde as constantes notacionais representarão os estados $\{T, V, F, \perp\}$, correspondentes respectivamente a Inconsistente (T), Verdadeiro (V), Falso (F) e Indeterminado ou Para completo ($\perp$).

As lógicas Paraconsistentes Anotadas (LPA's) são classes de lógicas Paraconsistentes τ com reticulado, onde os símbolos lógicos são representados em seus vértices, conforme a Figura 2.

Quando se utiliza duas fontes de informação distintas para obtenção dos graus de evidência relacionados a uma única proposição P, onde uma fonte gera o grau de evidência favorável a proposição, cujo símbolo é μ e outra o grau de evidência desfavorável, ou contrária, a proposição, cujo símbolo é λ , dizemos que trata-se de uma Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores LPA2v. A LPA2v, permite e admite, o tratamento de dados contraditórios, ambíguos e incompletos, com capacidade de conclusões e decisões em sistemas de análises (DA SILVA FILHO, 2006).

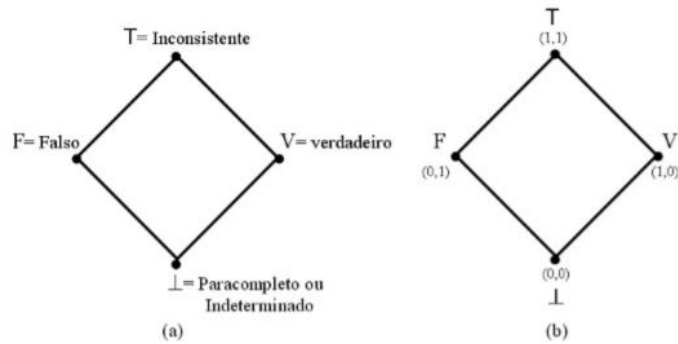


Figura 2. Reticulado de quatro vértices (Hasse)

Fonte: da Silva Filho, Abe e Lambert-Torres (2008).

Quando se utiliza um reticulado de quatro vértices e com 12 regiões delimitadas representando os estados lógicos as saídas do algoritmo são denominadas como estados lógicos resultantes.

No reticulado da Figura 2, tem-se:

- $P(\mu, \lambda) = P(1,0)$: indicando ‘existência de evidência favorável total e evidência desfavorável nula’, atribuindo uma conotação de Verdade à proposição;
- $P(\mu, \lambda) = P(0,1)$: indicando ‘existência de evidência favorável nula e evidência desfavorável total’, atribuindo uma conotação de Falsidade à proposição;
- $P(\mu, \lambda) = P(1,1)$: indicando ‘existência de evidência favorável total e evidência desfavorável total’ atribuindo uma conotação de Inconsistência à proposição;
- $P(\mu, \lambda) = P(0,0)$: indicando ‘existência de evidência favorável nula e evidência desfavorável nula’, atribuindo uma conotação de Indeterminação à proposição (DA SILVA FILHO, 2009).

Para os algoritmos que utilizam o tipo de análise com configuração de 12 estados, as saídas de estado extremo são classificadas com Falso, Verdadeiro, Inconsistente e Paracompleto e existem mais 8 estados lógicos definidos como as saídas de estado não extremos, que recebem denominações referentes as suas proximidades com os estados extremos (DA SILVA FILHO, 1999).

Neste trabalho serão utilizados algoritmos que utilizam equações interpretadas em um reticulado associado à LPA2v, conforme visto a seguir.

1.3.2 Relações algébricas entre o QUPC e o Reticulado da LPA2v

A representação da anotação em LPA2v e a metodologia de interpretação do reticulado τ , permite o emprego da Lógica Paraconsistente para o tratamento de incertezas, com isso, são necessárias algumas interpretações algébricas, envolvendo um Quadrado Unitário no Plano Cartesiano (QUPC) e reticulado representativo da LPA2v (TORRES *et al.*, 2011).

Para tal, adota-se um sistema de coordenadas cartesianas para o plano, com isso, as anotações, da proposição dada, serão representadas por pontos do plano, a Figura 3 representa o reticulado τ com o sistema de coordenadas (DA SILVA FILHO, 2006).

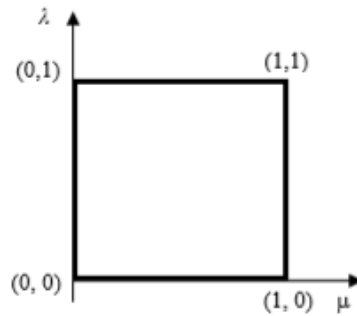


Figura 3. Reticulado τ com o sistema de coordenadas.

Fonte: da Silva Filho, Abe e Lambert-Torres (2008).

Na Figura 3 identifica-se a anotação (μ, λ) onde, cada ponto de intersecção pode ser encontrado em outro sistema de coordenadas. Dessa forma, sistema pode ser fixado para τ , com isso, definimos a transformação entre QUPC e $\mathcal{L}$, implementando outro sistema de coordenadas no reticulado τ (TORRES *et al.*, 2011).

Analogamente, como feito no QUPC, nesse reticulado $\mathcal{L}$, associamos **T** a $(0, 1)$, **L** a $(0, -1)$, **F** a $(-1, 0)$ e **V** a $(1, 0)$. Desse modo, o reticulado $\mathcal{L}$ será composto do seguinte sistema de coordenadas (DA SILVA FILHO, 2012), conforme mostrado na Figura 4.

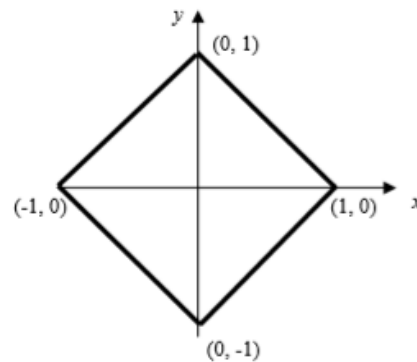


Figura 4. $\mathcal{L}$: Reticulado τ composto de um novo sistema de coordenadas

Fonte: da Silva Filho, Abe e Lambert-Torres (2008).

As transformações entre QUPC e $\mathcal{L}$ são definidas da seguinte forma onde $\mathcal{L}$ pode ser obtido a partir de QUPC através de três fases: 1 - mudança de escala com aumento de $\sqrt{2}$, 2 – rotação 45 graus e; 3 - translação no eixo de origem (DA SILVA FILHO, 2012). Estas fases originam uma transformação linear, e seus passos são representados nas Figuras 5, 6 e 7.

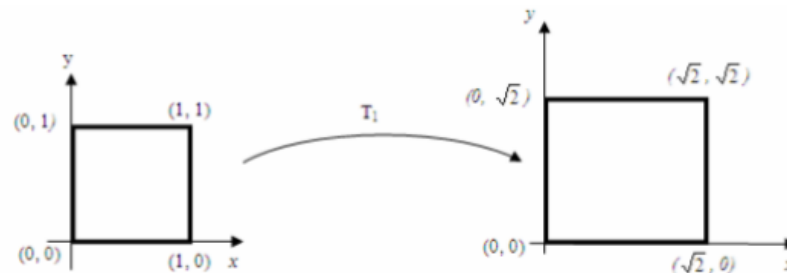


Figura 5. Aumento de escala de $\sqrt{2}$

Fonte: Torres et al. (2011).

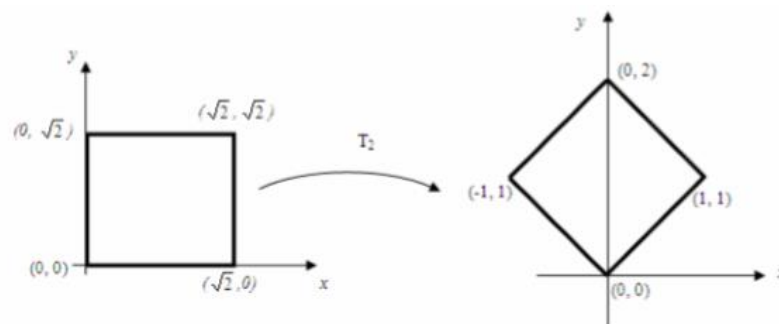


Figura 6. Rotação de 45° em relação a origem $\sqrt{2}$

Fonte: Torres et al. (2011).

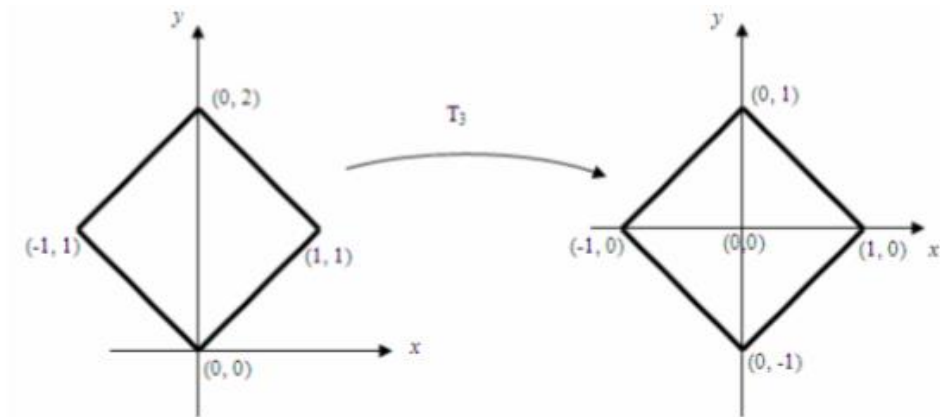


Figura 7. Translação de valores entre QUPC e o reticulado da LPA2v $\sqrt{2}$
 Fonte: Torres *et al.* (2011).

Através de transformações lineares no quadrado unitário no plano cartesiano e o Reticulado representativo da LPA, obtém-se a seguinte transformação (TORRES *et al.*, 2011):

$$T(X, Y) = (x - y, x + y - 1) \quad (1)$$

A partir da equação 1 obtém-se os graus de certeza e de contradição conforme expostos a seguir.

1.3.3 Graus de certeza e contradição

Na transformação $T(X, Y)$ os componentes estão relacionados, conforme a nomenclatura usual na LPA2v (DA SILVA FILHO, 2006, 2012), onde:

- $x = \mu \rightarrow$ Grau de evidência favorável;
- $y = \lambda \rightarrow$ Grau de evidência desfavorável, obtido:

Do primeiro termo, no par ordenado, da equação de transformação, determinando o Grau de certeza (Gc), com isso, é obtido pela seguinte equação:

$$Gc = \mu - \lambda \quad (2)$$

E seus valores, que pertencem ao conjunto $\Re$, variam no intervalo fechado +1 e -1, no eixo horizontal do reticulado, denominado “Eixo do Grau de Certeza”.

$G_c \rightarrow$ Resultando em +1, significa que o estado lógico, resultante da análise paraconsistente, é verdadeiro (V), quando resulta em -1 o estado lógico resultante da análise é falso (F).

O segundo termo obtido, no par ordenado da equação da transformação, é representado por: $x + y - 1 = \mu + \lambda - 1 \rightarrow$, determinando o grau de contradição G_{ct} , obtendo a seguinte equação:

$$G_{ct} = \mu + \lambda - 1 \quad (3)$$

E seus valores, que pertencem ao conjunto $\mathfrak{R}$, variam no intervalo fechado +1 e -1, no eixo horizontal do reticulado, denominado “Eixo do Grau de Contradição” (TORRES *et al.*, 2011).

G_{ct} Resultando em +1, representa o estado lógico da análise paraconsistente é inconsistente (T).

G_c Resultando em -1 representa o estado lógico da análise paraconsistente é indeterminado ($\perp$).

Pode-se calcular o estado lógico paraconsistente, utilizando os graus de contradição (G_{ct}) e os graus de certeza (G_c), gerando o ponto (G_c, G_{ct}) (DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2008).

Os valores, quando plotados, no quadrado unitário do plano cartesiano, pode-se estender a análise em uma representação de 2 eixos:

- Valores do grau de contradição, num eixo;
- Valores do grau de certeza, no outro eixo.

Os dois eixos são sobrepostos com o reticulado do LPA2v, onde pode-se delimitar regiões para comparações e determinação dos estados lógicos paraconsistente (DA SILVA FILHO, 2006, 2012).

Com isso, a análise paraconsistente é interpretada, através de dados que são recebidos como grau de evidência desfavorável (descrença) representados por μ e grau de evidência favorável (crença) representado por λ , produzindo resultados denominados como grau de contradição e grau de certeza, subsidiando o sistema para a decisão de um estado lógico (TORRES *et al.*, 2011).

A análise pode ser aprofundada com o Grau de Certeza Real G_{cr} que é obtido, como um valor projetado no eixo dos graus de certeza do reticulado, através das

equações conforme mostrado geometricamente nas figuras 8 e 9 (DA SILVA FILHO, 2012).

Com base nos cálculos descritos é possível traçar uma reta com distância D até o limite V , para o caso de $G_C > 0$ e até o limite F , para o caso de $G_C < 0$. A interpolação em conjunto com a distância é apresentada na Figura 8 representado no vértice direito do grau de certeza real (DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2008).

A distância é calculada, conforme equação 7. Após calculada a distância D , será obtido, através da projeção da reta D o grau de certeza, valor real, no eixo do grau de certeza, conforme Figuras 8 e 9.

$$D = \sqrt{(1 - |G_C|)^2 + G_{CT}^2} \quad (4)$$

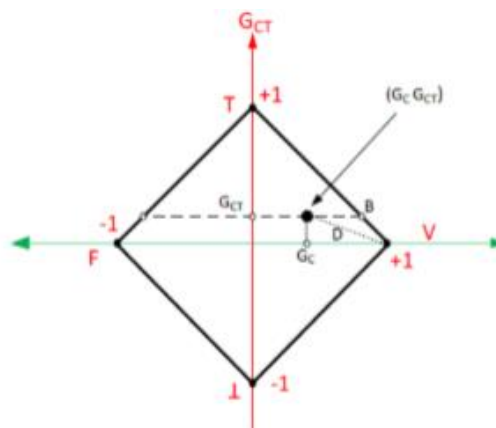


Figura 8. Ponto de Interpolação (G_C , G_{CT}) e distância D .
Fonte: da Silva Filho, Abe e Lambert-Torres (2008).

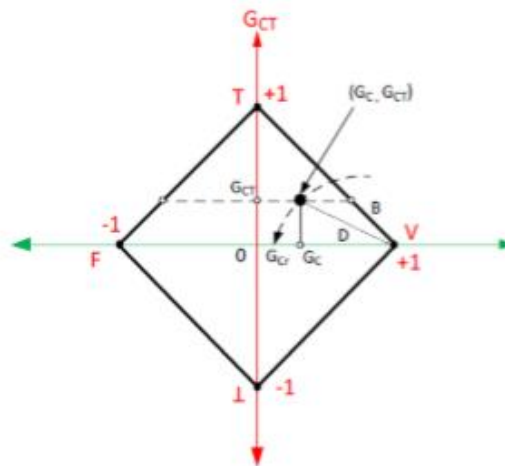


Figura 9. Grau de Certeza resultante real, G_{Cr} no reticulado.
Fonte: da Silva Filho, Abe e Lambert-Torres (2008).

$$Gcr = \sqrt{(1 - |Gc|)^2 + Gct^2} \quad (5)$$

Se $Gc > 0$

$$Gcr = \sqrt{(1 - |Gc|)^2 + Gct^2} - 1 \quad (6)$$

Se $Gc < 0$

Após a obtenção de Gcr , é possível, encontrar o valor normalizado, denominado como Grau de Evidência Resultante μ_{ER} (DA SILVA FILHO, 2012), portanto:

$$\mu_{ER} = \frac{G_{CR} + 1}{2} \quad (7)$$

1.3.4 Geração dos graus de evidência (Modelagem com variação Linear)

A extração do conhecimento é feita a partir da fonte de informação. Pode-se considerar que a variação das evidências de uma determinada proposição seja linear, de tal forma que a sua variação ocorra em um universo do discurso, compreendido, desde um valor do limite inferior de medição da grandeza, simbolizado por a_1 , até o valor do limite superior da grandeza, cujo símbolo, é a_2 . Dessa forma a evidência possui variação linear e proporcionalidade direta ao valor da grandeza (DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2008). A 0 representa a variação nesse contexto.

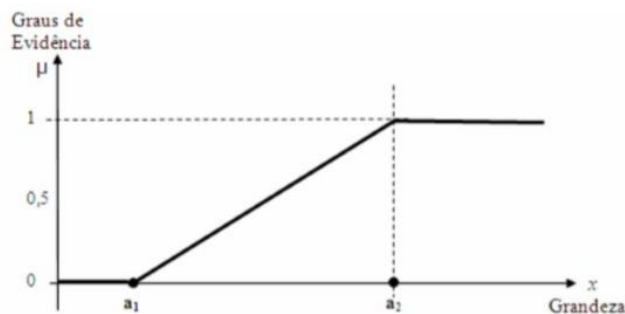


Figura 10. Valor do Grau de Evidência com variação linear e diretamente proporcional a grandeza medida

Fonte: da Silva Filho, Abe e Lambert-Torres (2008).

Baseado no universo de discurso, caso a variação das evidências de determinada proposição for linear de modo indiretamente proporcional, a valoração dos Graus de Evidência de entrada, conforme descrito a seguir.

No universo de discurso, compreendido entre o valor limite inferior da medição da grandeza simbolizado por a_1 e o valor do limite superior da medição da grandeza simbolizado por a_2 , na qual, a variação é linear e indiretamente proporcional ao valor da grandeza.

O gráfico com a variação do Grau de Evidência é apresentado, conforme a Figura 11.

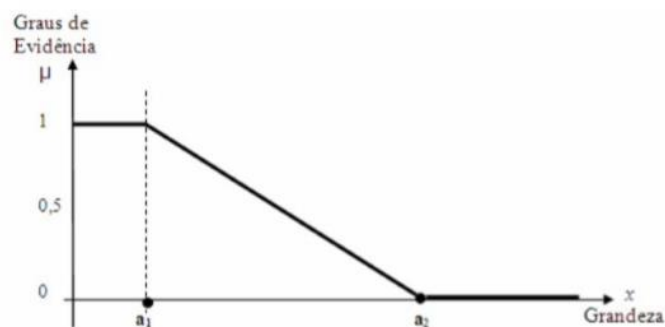


Figura 11. Valor do Grau de Evidencia com variação linear e indiretamente proporcional a grandeza medida

Fonte: da Silva Filho, Abe e Lambert-Torres (2008).

1.3.5 Algoritmo Nó de Análise Paraconsistente (NAP)

Das equações da LPA2v são obtidos algoritmos para tratamento e análise de sinais de informação, com aplicação em forma de Graus de Evidência. Os métodos aplicados no tratamento lógico paraconsistente poderão estar relacionados à análise efetuada por um algoritmo denominado de NAP (Figura 12) (DA SILVA FILHO *et al.*, 2012), conforme detalhado a seguir.

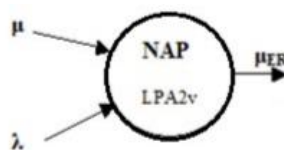


Figura 12. Símbolo do NAP – Nó de Análise Paraconsistente

Fonte: da Silva Filho *et al.* (2012).

a) valores de entrada:

- μ Grau de Evidência favorável $0 \leq \mu \leq 1$;
- λ Grau de Evidência desfavorável $0 \leq \lambda \leq 1$;

b) cálculo do grau de certeza:

$$Gc = \mu - \lambda \quad (8)$$

c) cálculo do grau de contradição:

$$Gct = \mu + \lambda - 1 \quad (9)$$

d) cálculo do Intervalo de Certeza $\varphi(\pm)$:

$$\varphi(\pm) = 1 - |Gct - 1| \quad (10)$$

e) cálculo da distância D:

$$D = \sqrt{(1 - |Gc|)^2 + Gct^2} \quad (11)$$

f) cálculo do Grau de Contradição normalizado:

$$\mu_{ctr} = \frac{\mu + \lambda}{2} \quad (12)$$

g) determinação do sinal de saída:

- se $Gc > 1$, então faça:

$$S1 = 0,5 \text{ e } S = \varphi_{E(\pm)} \quad (13)$$

- Indefinição, finaliza o algoritmo, caso contrário, ir para o próximo item;

h) determinação do grau de certeza real:

$$\text{Se } G_C > 0 \rightarrow G_{CR} = (1 - D)$$

$$\text{Se } G_C < 0 \rightarrow G_{CR} = (D - 1)$$

i) cálculo do grau de evidência resultante real:

$$\mu_{ER} = \frac{G_{CR} + 1}{2} \quad (14)$$

j) apresentação dos resultados de saída:

$$S1 = \mu_{ER} \text{ e } S = \varphi_{E(\pm)} \quad (15)$$

Para a formação de redes de análises paraconsistentes, pode-se interligar os algoritmos NAP's, conforme a Figura 13.

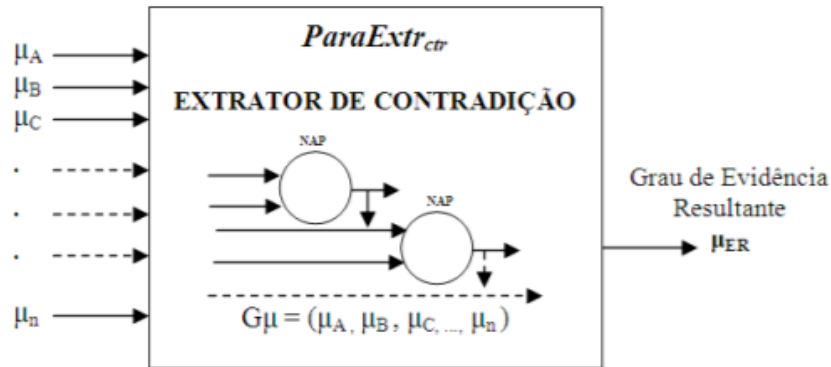


Figura 13. Símbolo do Algoritmo Paraconsistente Extrator de efeitos da Contradição.
Fonte: da Silva Filho *et al.* (2016).

1.3.6 Rede de análise paraconsistente (RAP)

A rede RAP é composta por dois ou mais algoritmos NAPs interligados, de tal forma que cada nó execute a análise de uma única proposição. Com o objetivo de obter valores suficientes para a tomada de decisão sobre a proposição, o resultado da análise paraconsistente produzido em cada NAP é associado aos resultados dos outros NAP's (DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2008).

As combinações dos NAPs em uma RAP devem considerar três circunstâncias; As proposições analisadas em cada nó podem ser logicamente combinadas através de Graus de Certeza reais resultantes originando diferentes interligações; Os valores dos Graus de Certeza reais resultantes e os Intervalos de Certeza Reais advindos dos NAPs de diferentes proposições poderão fazer uso de conectivos “E” e disjunção “OU” conforme desenho topológico da RAP; Os valores dos Graus de Certeza reais resultantes poderão ser normalizados em valores entre 0 e 1 no intervalo real e assim considerados como Graus de Evidência usados na entrada de outras proposições que

estão sendo analisados por diferentes NAPs (DA SILVA FILHO, 2007; DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2008).

Dessa forma, na configuração básica, a análise preliminar no NAP apresenta um intervalo de certeza sinalizado $\varphi(\pm)$ e o grau de certeza real GCR fazem referência a uma única proposição, consequentemente, produzirão um único valor de evidência (DA SILVA FILHO, 2007; DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2008), conforme demonstrado na Figura 14.

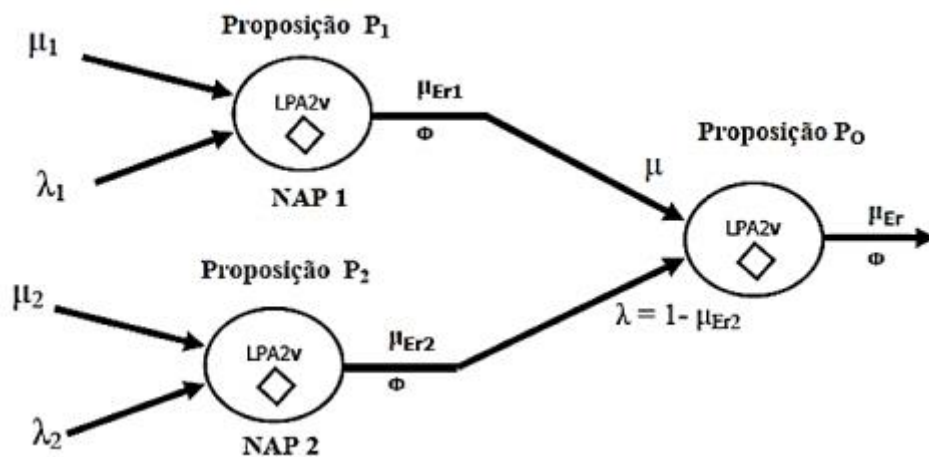


Figura 14. Rede de Análise Paraconsistente em Configuração Simples.
Fonte: da Silva Filho, Abe e Lambert-Torres (2008).

1.3.7 Sistema Supervisório Controle e Aquisição de Dados (SCADA)

Os processos industriais são monitorados e controlados por sistemas assistidos por computador, denominados *Industrial Control Systems* (ICS). O Controle Supervisório e Aquisição de Dados (SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition) é pertencente a essa categoria. Os complexos sistemas ou, até mesmo, todas as plantas industriais são monitoradas e controladas por sistemas integrados, normalmente denominados como SCADA (BAGRI; NETTO; JHAVERI, 2014). Trata-se de uma tecnologia que oferece aos operadores eficiência no envio de dados de controle e coleta de informações remotas. O SCADA reduz, ou até mesmo, elimina a presença humana nas instalações de processamento industrial (BAGRI; NETTO; JHAVERI, 2014; SHAHZAD *et al.*, 2016).

O monitoramento pelo SCADA contribui, significativamente, na redução de custos e o aumento da disponibilidade operacional, resultando em aumento na lucratividade das operações. Nos últimos anos, foi observado avanço em termos de

aplicação, funcionalidade e desempenho dos sistemas. São considerados como alternativas ao desenvolvimento interno de sistemas de controle extremamente complexos, como por exemplo, uma refinaria de petróleo (BAGRI; NETTO; JHAVERI, 2014).

O funcionamento do sistema SCADA ocorre através da conexão remota dos equipamentos de campo ao controlador principal. No controlador, a interface homem-máquina (IHM) é projetada, de tal forma, que gerência a comunicação geral e realiza a aquisição e manipulação dos dados do sistema SCADA. A IHM é uma fonte importante para os operadores responsáveis pelo gerenciamento e controle dos dispositivos de campo. Geralmente, as informações de aquisição e controle de dados são apresentadas graficamente, tornando a interface sistema/operador mais amigável, facilitando a interpretação e controle (BAGRI; NETTO; JHAVERI, 2014). Nas telas de acompanhamento e controle o sistema SCADA é apresentado, por meio de gráficos e tendências. Por exemplo, no sistema de bombeamento, os níveis do reservatório de sucção são monitorados usando sensores. No caso do nível, apresentar-se, alto ou baixo, os sensores definem o status de alarme, após isso, serão visualizados simultaneamente na HMI e na Casa de Controle Integrado (CCI) (BAGRI; NETTO; JHAVERI, 2014; SHAHZAD *et al.*, 2016).

1.3.8 Bombas centrífugas

A principal característica, de uma bomba centrífuga, é a versatilidade operacional, motivo de sua ampla aplicação nas indústrias, principalmente no setor de óleo e gás, mais especificamente, nas refinarias de petróleo. A aplicação é ampla, porém sua performance pode variar para diferentes processos ou requerimentos de trabalho, com isso, não é possível, fornecer desempenho adequado em todos (LARRALDE; OCAMPO, 2010; WENT, 2008).

As principais consequências de uma bomba operando inadequadamente é, desperdício de energia e danos aos componentes internos ou periféricos. Portanto, considerando a seleção adequada, deve-se observar as variáveis operacionais e característica do fluído bombeado, sendo, fundamental para garantir a integridade do equipamento e a confiabilidade da planta em níveis adequados (LARRALDE; OCAMPO, 2010).

Os aspectos que devem ser verificados, perante a mudança de uma, ou mais, variáveis do processo, são as descritas abaixo:

- a) conhecer os principais parâmetros do processo; vazão, pressão e temperatura;
- b) descrição das características do fluído; temperatura, densidade, viscosidade, taxa de corrosão e erosão, pressão de vapor, suspensão de sólidos e volatilidade;
- c) incremento da perda de carga no sistema, por conta de incrustações ou válvulas;
- d) conhecer e aplicar os limites de trabalho da bomba, por exemplo, vazão, pressão de sucção e descarga, levando em consideração qualquer as variações de pressão ou temperatura;
- e) as variáveis transientes, principalmente, durante o comissionamento para partida ou parada do sistema (LARRALDE; OCAMPO, 2010).

As bombas são dimensionadas, conforme os requisitos do trabalho, a qual será submetida, incluindo, especificação dos parâmetros de trabalho e do fluído bombeado, bem como as características físicas das instalações. O resultado desse projeto dá origem a uma curva que representam a altura manométrica, consumo de energia, *Net Positive Suction Head* (NPSH) disponível (LARRALDE; OCAMPO, 2010; WENT, 2008).

Por fim, a eficiência real é determinada com a comparação da eficiência do ponto de operação da bomba e a máxima eficiência que pode ser atingida. As diferenças, consideradas, excessivas não devem ser permitidas.

A comparação ocorre pela interseção da curva característica do sistema com a curva do *head* da bomba, com isso, determina-se o ponto de operação da bomba e, conseqüentemente, sua relação com o *Best Efficiency Point* (BEP). É recomendado a operação entre 80% e 110%, denominada faixa de trabalho, em relação ao BEP, conforme a Figura 15 (CIESLAK, 2008; LARRALDE; OCAMPO, 2010).

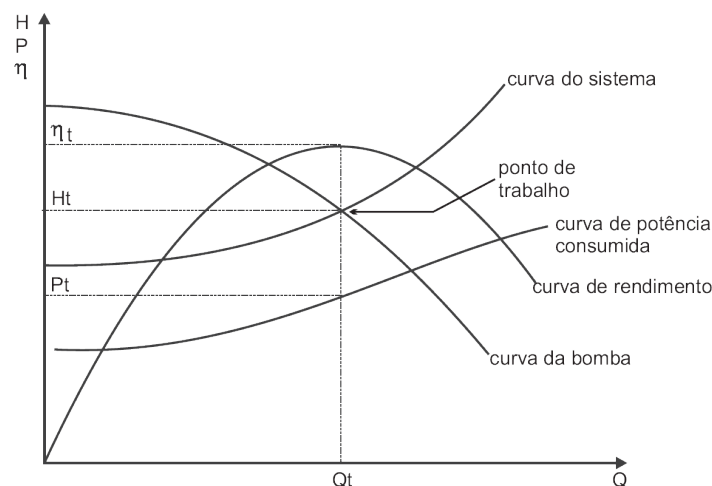


Figura 15. Curva característica da bomba centrífuga.

Fonte: Went (2008).

A operação fora da faixa de trabalho gera perda de energia, representando de 30% a 90% do custo do ciclo de vida (LCC) e desgaste acentuado dos componentes da bomba (CIESLAK, 2008).

De acordo com as variações nos requisitos e necessidades do processo, a bomba pode trabalhar em vários pontos dentro da faixa de trabalho. Caso o ponto de operação ocorra fora da faixa de trabalho, diferentes problemas, podem ocorrer com o equipamento, gerando perda financeira e redução da confiabilidade do sistema (CIESLAK, 2008; WENT, 2008), conforme a Figura 16.

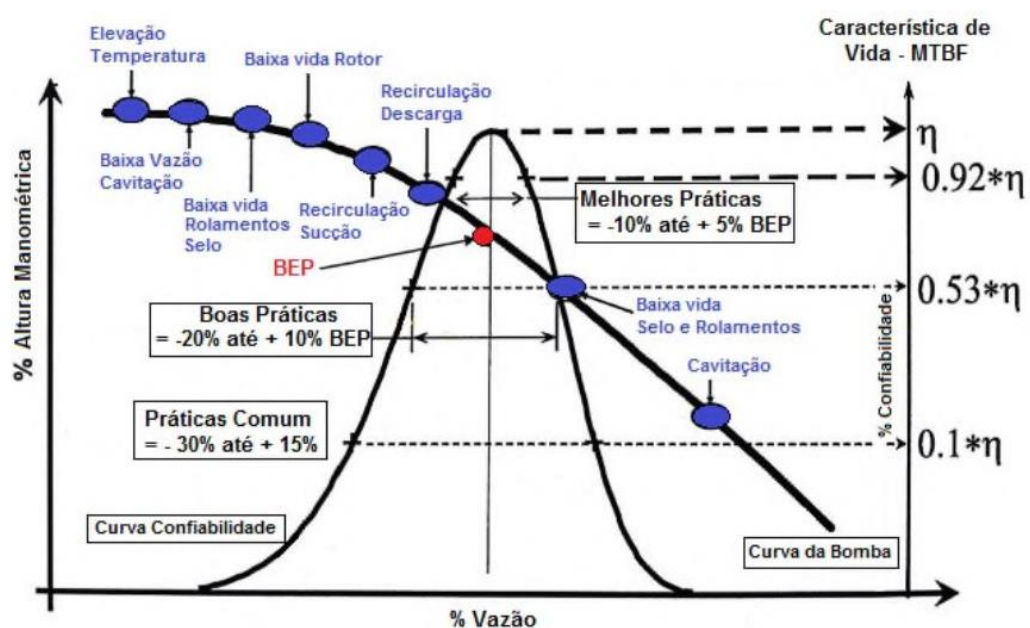


Figura 16. Efeito na confiabilidade causado pelo BEP.

Fonte: Larralde e Ocampo (2010).

1.3.9 Cavitação em bombas centrífugas

A cavitação é um fenômeno físico comum em bombas centrífugas, onde ocorre a formação da fase vapor no líquido bombeado, isso ocorre quando é submetido a pressões mais baixas. Com a redução de pressão o vapor preenche, gradativamente, os espaços dentro da região de sucção e voluta da bomba centrífuga, gerando bolhas (LI *et al.*, 2018). Por sua vez, essas são submetidas a pressões mais elevadas que a pressão de vaporização, quando estão no interior da bomba, com isso as bolhas implodem, formando micro jatos de alta velocidade (GUO *et al.*, 2015; TAN *et al.*, 2014).

Os micros jatos geram desgaste prematuro dos componentes internos, gerado pelo choque mecânico e a vibração excessiva, como por exemplo; impelidor, mancais e selo mecânico, sendo esse último, responsável pela contenção primária do produto bombeado que, normalmente é tóxico ou inflamável, quando se trata de aplicação em refinarias de petróleo (ČDINA, 2003).

O efeito da cavitação no sistema hidráulico resulta na alteração do desempenho e desgaste, como mencionado no parágrafo anterior, portanto, é de grande interesse para os responsáveis pelo monitoramento da condição preverem com antecedência e precisão o comportamento de cavitação (LI *et al.*, 2018).

Um dos grandes desafios para o gerenciamento da condição de bombas centrífugas, em especial, avaliar a presença do processo de cavitação, em tempo real, está em coletar e correlacionar dados de processo, de forma que o aviso seja enviado, de tal forma, que seja possível uma ação antecipada, evitando o início do processo e possíveis danos ao equipamento.

Na avaliação funcional do sistema proposto observa-se como necessidade:

- a) monitoramento simultâneo de variáveis que combinados, representam a instabilidade operacional oriundo do processo de cavitação;
- b) classificação da condição operacional, baseado no risco de cavitação do equipamento;
- c) possibilidade de resposta antecipada, através de ajustes das variáveis, que quando alteradas sugerem o início do processo de cavitação.

Em uma bomba centrífuga a cavitação ocorre quando a altura líquida positiva de sucção disponível na instalação, NPSH_{Av} (Net Positive Suction Head Available) é menor que a altura líquida positiva requerida pela bomba NPSH_{Req} (Net Positive

suction Head Required). Isto indica que deve existir uma maior pressão disponível no sistema a qual a bomba centrífuga requer em seu funcionamento para não haver a ocorrência de cavitação (CARVALHO, *et al.*, 2021; SAKTHIVEL; NAIR; SUGUMARAN, 2012; XUE *et al.*, 2014).

O valor do NPSH_{Av} é uma função somente da instalação em que a bomba opera e tem a sua definição como sendo a energia absoluta por unidade de peso existente na entrada de sucção da bomba acima da pressão de vapor do líquido.

Para as análises dos índices de severidade da cavitação, um parâmetro adimensional foi adotado como prática recomendada pela *International Society of Automation* (ISA) em RP75.23.01. Este parâmetro que é denominado índice de cavitação pode ser calculado por (BOFFI *et al.*, 2019; ULANICKI; PICINALI; JANUS, 2015; YEDIDIAH, 2002, 2003):

$$\sigma_c = \frac{P_o - P_{vapor}}{0.5\rho V^2} \quad (16)$$

Onde:

ρ (is the density of the fluid) é a densidade do fluido (kg/m³);

P_o (local or reference pressure) é a pressão de referência (Pa);

P_{vapor} (vapor pressure of the fluid) é a pressão do vapor do fluido (Pa);

V (characteristic velocity of the flow) velocidade característica do fluido (m/s).

O índice de cavitação também pode ser calculado em termos de valores de pressão, tal que:

$$\sigma_c = \frac{P_1 - P_{vapor}}{P_1 - P_2} \quad (17)$$

onde P₁ e P₂ são os valores das pressões medidas suficientemente distantes a montante e a jusante da bomba centrífuga a fim de fornecer valores confiáveis da queda bruta de pressão, e P_{vapor} é a pressão de vapor (BOFFI *et al.*, 2019; ISA, 1995; ULANICKI; PICINALI; JANUS, 2015).

O índice de cavitação σ_c representa a razão entre as forças do fluido tentando prevenir a cavitação (sistema ou dispositivo de pressão) e as forças tentando causar a cavitação (queda de pressão sobre a válvula). Quanto menor o valor de σ_c mais provável será o aparecimento e intensificação da cavitação severa.

De acordo com a norma ISA (1995), diferentes regimes de cavitação podem ser identificados medindo os efeitos indiretos induzidos por fenômenos de cavitação em um sistema hidráulico (ULANICKI; PICINALI; JANUS, 2015; YEDIDIAH. 2003):

- 1) REGIME I: ausência de cavitação;
- 2) REGIME II: cavitação incipiente, ou seja, o início da cavitação, onde apenas pequenas bolhas de vapor são formadas no fluxo. Esta condição é detectada quando ocorre um aumento abrupto do nível de vibração induzida após o colapso das bolhas e a condensação do vapor;
- 3) REGIME III: cavitação constante, envolvendo um volume de vapor suficientemente grande para produzir um nível uniforme e constante de cavitação;
- 4) REGIME IV: vibração máxima, ou seja, o nível de cavitação associado à ocorrência da condição de estrangulamento.

Na Figura 17B são apresentados os regimes de cavitação em função o índice σ_c onde é verificado que cada regime apresenta um perfil de nível de pressão sonora ou aceleração.

Nota-se que antes do σ_{icv} , limite do regime I, o nível medido é devido a vibração hidrodinâmica do fluido. No regime II, que é caracterizado como região de cavitação incipiente, a taxa do nível é máxima, ou seja, abaixo do valor indicado como início da cavitação incipiente, σ_{icv} . Neste regime os níveis de pressão sonora e aceleração têm aumentos consideráveis para pequenas variações de σ_v (ISA, 1995; ULANICKI; PICINALI; JANUS, 2015).

No regime III é indicado como cavitação constante e no regime IV é descrito como vibração de cavitação máxima.

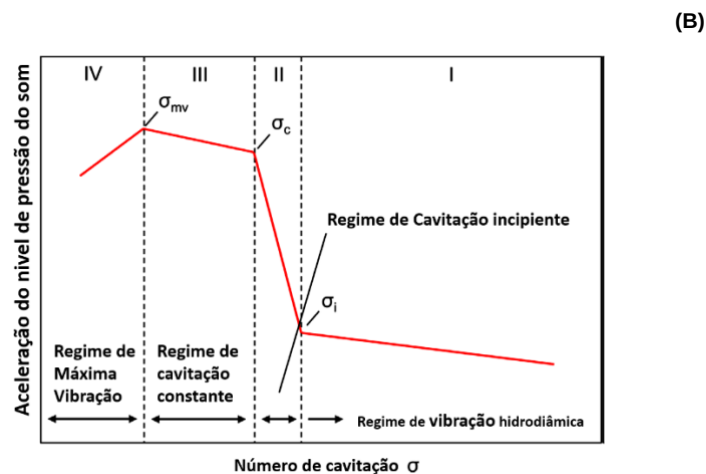
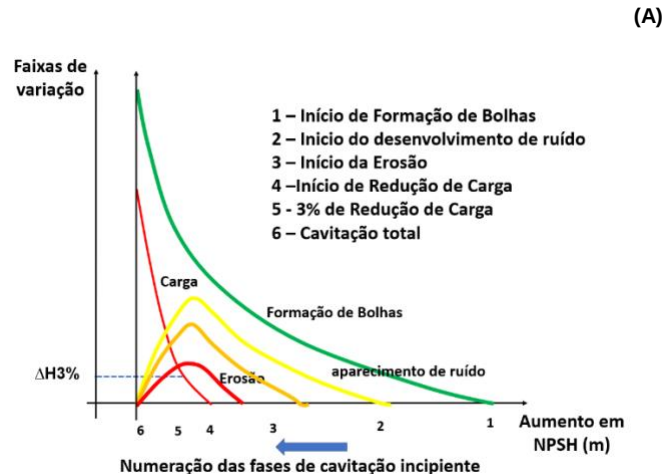


Figura 17. Variações da Cavitação Incipiente; A) Fases da evolução do fenômeno de cavitação como uma sequência de eventos; B) Regiões dos regimes de cavitação e seus limites de acordo com a ISA.

Fonte: A) Boffi *et al.* (2019); B) Boffi *et al.* (2019); ISA (1995).

1.3.10 Motores elétricos de indução

A bomba centrífuga, funciona com base na criação de duas zonas de pressão, uma de baixa pressão, que acontece na sucção, e uma de alta pressão, que acontece no recalque (descarga de líquido). Para que isto ocorra, é preciso que exista a transformação de energia mecânica, ou de potência, fornecida pelo motor (máquina motriz), primeiramente em energia cinética, conferindo velocidade ao fluido. Nos sistemas típicos de transporte de líquidos através das bombas centrífugas acionadas por motores elétricos a energia elétrica é transformada em energia mecânica que é então convertida em energia hidráulica. Em seguida o líquido é transportado pela energia hidráulica que é posteriormente, convertida de volta em energia mecânica (HUGHES, 2013; STOPA; CARDOSO FILHO, 2012).

Basicamente os motores elétricos são máquinas que possuem a função de transformar energia elétrica em energia mecânica e funciona a partir da propriedade da corrente elétrica de gerar um campo magnético. Por outro lado, o campo magnético varia em relação a um condutor, provocando neste uma corrente elétrica formando-se dois ímãs, um no estator e outro no rotor, cuja interação provoca o movimento do motor.

Nos motores síncronos de corrente alternada, o rotor é constituído por um ímã permanente ou bobinas alimentadas em corrente contínua mediante anéis coletores. Nesse caso, o rotor gira com uma velocidade diretamente proporcional a frequência da corrente no estator e inversamente proporcional ao número de pólos magnéticos do motor. Os motores de indução assíncronos, funcionam também com corrente alternada, mas devido ao escorregamento, a velocidade de rotação não coincide exatamente como na rotação síncrona.

Os motores de indução trifásicos assíncronos funcionam com corrente alternada e são muito utilizados para o acionamento de bombas centrífugas.

Na Figura 18A são mostradas as principais partes de um motor elétrico trifásico assíncrono utilizado no acionamento de bombas centrífugas.

Para um motor elétrico trifásico alimentado por uma fonte de tensão senoidal trifásica balanceada e trabalhando uma carga constante, a tensão do estator, a corrente elétrica e a potência instantânea total podem ser escritas como (HUGHES, 2013; LUO *et al.*, 2015).

$$V_{phAB}(t) = \sqrt{2}V_{LL} \cos(\omega t), \quad (18)$$

$$i_{A,0}(t) = \sqrt{2}I_L \cos\left(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{6}\right) \quad e$$

(19)

$$P_{A,0}(t) = V_{LL} I_L \left[\cos\left(2\omega t - \varphi - \frac{\pi}{6}\right) + \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) \right] \quad (20)$$

Onde:

V_{phAB} Tensão de linha entre as fases A e B em volts;

$i_{A,0}(t)$ Corrente da fase em amperes;

$P_{A,0}(t)$ Potência instantânea total em va;

V_{LL}	Raiz media quadrática da tensão de linha;
I_L	Raiz media quadrática da corrente de linha amperes.
ω	Frequência angular em rad/s;
φ	Ângulo de carga em rad.

Para o motor elétrico, verifica-se que, se a carga não varia, então a potência de entrada instantânea total é constante e igual à potência real média fornecida ao motor. Quando ocorre uma falha, como o fenômeno da cavitação na bomba centrífuga que provoca vibração mecânica, o motor elétrico sente que esta condição é uma ocorrência de variação da carga e assim, o torque, a velocidade e a corrente do motor são afetadas de forma periódica, refletindo nas variações do seu valor eficaz (rms). Dessa forma no transporte de líquidos, o motor elétrico de indução age no sistema como um transdutor que tem como características detectar presença de variações paramétricas (HUGHES, 2013).

Considerando o fato de que as faltas relacionadas a cavitação, irão produzir esforços oscilatórios que são transmitidos para o motor de acionamento por meio do eixo em comum com a bomba centrífuga, a resposta do motor elétrico a estes esforços, que é dada por meio de efeitos na modulação das correntes, pode ser utilizada como informação (LUO *et al.*, 2015).

1.3.11 Energias envolvidas no Sistema Motobomba

Durante a operação de transferência de líquidos ocorrem perdas de energia no motor elétrico, bomba centrífuga e tubulações, e nem toda a potência é utilizada para gerar pressão e fluxo. Uma parte da energia é transformada em calor (devido ao atrito) dentro da bomba e a energia pode também ser perdida em virtude da recirculação de fluido entre o rotor e a voluta.

Desse modo pode-se equacionar as potencias (HUGHES, 2013; STOPA; CARDOSO FILHO, 2012; STOPA; CARDOSO FILHO; MARTINEZ, 2012):

Potência fornecida pelo motor elétrico no eixo da bomba centrífuga:

$$P_{pcs} = \frac{\gamma Q H_{pc}}{\eta_{pc}} \quad (21)$$

Onde:

γ = peso específico do líquido (N/m³)

Q = Vazão (m³/s)

H_{pc} = altura manométrica referencial a bomba centrífuga (mca)

η_{pc} = rendimento da bomba centrífuga

Potência entregue pela bomba centrífuga ao fluido:

$$P_{pcf} = \gamma Q H_{pc} \quad (22)$$

Potência elétrica consumida da rede elétrica pelo motor elétrico:

$$P_{el} = \frac{\gamma Q H_{pc}}{\eta_{pc} \eta_{el}} \quad (23)$$

A potência consumida da rede elétrica trifásica pode ser obtida, também, pela seguinte expressão:

$$P_{el} = \sqrt{3} V_{ph} I_{rms} \cos \varphi \quad (24)$$

$\sqrt{3}$ Para sistemas trifásicos

V_{ph} Voltagem entre fases (Volts)

I_{rms} Corrente elétrica rms (Ampéres)

$\cos \varphi$ Fator de potência do motor elétrico

Portanto igualando (23) e (24):

$$\frac{\gamma Q H_{pc}}{\eta_{pc} \eta_{el}} = \sqrt{3} V_{ph} I_{rms} \cos \varphi \quad (25)$$

De onde podemos isolar o valor da corrente, tal que:

$$\frac{\gamma Q H_{pc}}{\sqrt{3} V_{ph} \eta_{pc} \eta_{el} \cos \varphi} = I_{rms} \quad (26)$$

Portanto, conforme a equação (26) verifica-se que, no sistema motobomba, diminuindo uma das variáveis γ , Q e H_{pc} o valor eficaz da corrente do motor síncrono também diminuirá (HUGHES, 2013).

A Figura 18B mostra o processo de transferência de energia para o fluido de trabalho, em um típico sistema de transporte de líquidos com destaque para as potencias envolvidas no motor e a bomba centrífuga.

A Figura 18C as potencias envolvidas em uma instalação típica de um motor elétrico acionando uma bomba centrífuga em processo de transporte de produto líquido por tubulações.

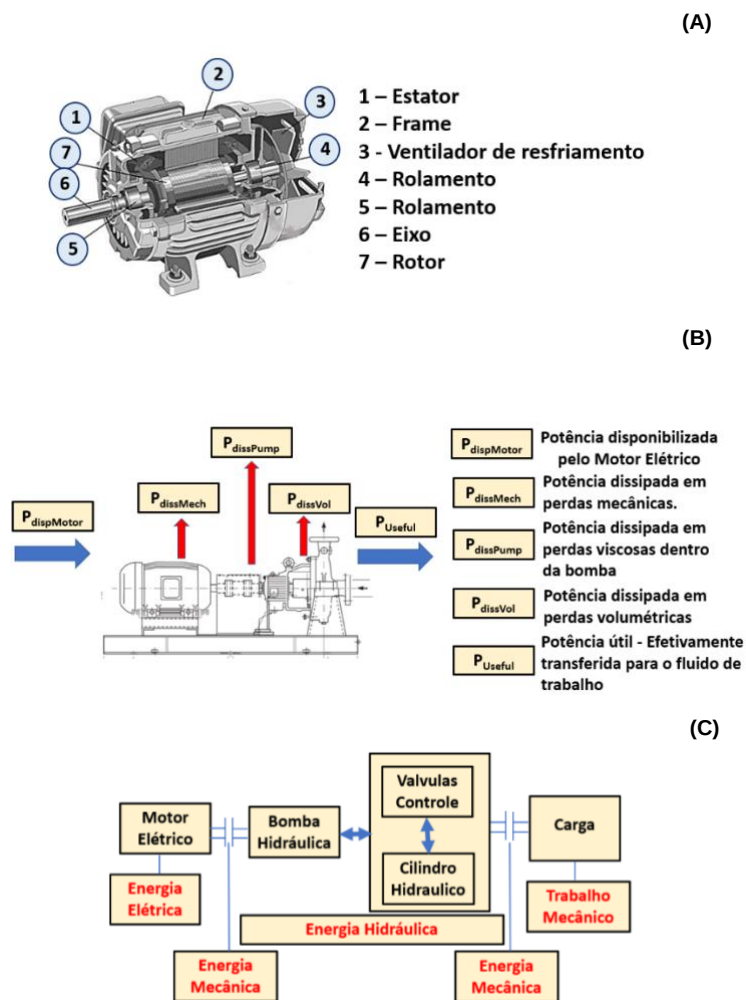


Figura 18. Bombas centrífugas acionadas por motor de Indução assíncrono; A) Desenho das principais partes de um motor elétrico trifásico assíncrono; B) Processo de transferência de energia para o fluido de trabalho, em um típico sistema de transporte de líquidos com bomba centrífuga acionada por motor elétrico; C) Potencias envolvidas em um conjunto Motobomba instalado em sistema de transporte de líquido.

1.4 Justificativa

Neste trabalho, estudamos a operação de uma bomba centrífuga aplicada na indústria de petróleo.

Entre os vários métodos para o monitoramento de condições de máquinas rotativas, as redes de algoritmos configurados para análises de variáveis tornaram-se nas últimas décadas o excelente método que explora suas propriedades de classificação de padrões, oferecendo vantagens para a detecção e identificação automáticas de condições que podem levar à falha da bomba, enquanto elas não exigem, do responsável pela operação, um conhecimento profundo do comportamento do sistema.

O aperfeiçoamento das condições da operação de bombas centrífugas, através de métodos para o monitoramento de condições de máquinas rotativas, com aplicação de redes neurais artificiais de análise das condições operacionais é, foco deste trabalho, uma área importante dentro das refinarias de petróleo, pois pode ser responsável por uma parcela dos ganhos de produtividade nos sistemas de produção, bem como reduzir os custos de manutenção e acidentes industriais (HAFAIFA; GUEMANA; DAOUDI, 2012; RAJAKARUNAKARAN *et al.*, 2008).

Nesse contexto, surge a questão de como minimizar as perdas de produtividade, geradas por quebra, durante o processo de cavitação, na operação de bombas centrífugas no setor de refino de petróleo por meio do gerenciamento automatizado das variáveis de processo. A utilização de algoritmos de monitoramento que utiliza lógica não clássica para a análise dos dados que trazem informações em tempo real que possa evidenciar ocorrências de cavitação, pode ser uma solução.

Na literatura pesquisada não foi evidenciado trabalhos dedicados para a identificação de cavitação que incipiente em bombas centrifugas com acoplamento magnético.

1.5 Objetivo

1.5.1 Objetivo geral

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver um modelo algorítmico de análise automatizado, fundamentado em lógica paraconsistente, para a análise de

variáveis do processo que suporta a tomada de decisão, detectando o processo de cavitação em bombas centrífugas aplicadas em unidades de processo de uma refinaria de petróleo, classificando o equipamento em faixas de operação que são divididos em risco baixo, moderado e elevado com relação a cavitação nas pás do impulsor da bomba centrífuga.

1.5.2 Objetivos específicos

Visando alcançar o objetivo geral do trabalho, teve-se como objetivos específicos:

- a) Acoplar o modelo de monitoramento baseado em Lógica Paraconsistente a um Sistema Supervisório de controle e Aquisição de dados SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition na forma de um protótipo.
- b) Sistema Inteligente dedicado ao apoio à operação na detecção e tomada de decisão frente a riscos de cavitação de bombas centrífugas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os dados das variáveis operacionais, utilizados neste trabalho, foram obtidos a partir de um processo de bombeamento de nafta contaminada da unidade de reforma catalítica, que integra uma planta de refino de petróleo, localizada na região industrial de Cubatão, SP, Brasil. A contaminação da nafta é gerada pela presença de até 0,5% de enxofre, 1% de benzeno e 0,8% de nitrogênio, gerando variações da composição final do produto, uma vez que essa contaminação não é controlada, favorecendo a instabilidade operacional da bomba centrífuga.

Trata-se de uma planta que está em operação desde 2011, após um processo de modernização, durante sua operação, desde então, apresenta eventos de cavitação que reduzem a confiabilidade e constantes paradas para revisão dos componentes mecânicos. A bomba empregada, nesse processo, é centrífuga com acoplamento magnético e impelidor, em balanço, fabricação Sulzer, modelo ZEM 80-3315.

A bomba, modelo ZEM 80-3315, objeto da análise, possui as seguintes características de projeto, conforme o Quadro 1.

Quadro 1. Características da bomba centrífuga objeto do estudo

Descrição	Parâmetro
Tipo da bomba e tamanho	ZEM 80-3315
Rotação nominal	3565 rpm
Vazão projetada	106,2 m ³ /h
Vazão BEP	96,6 m ³ /h
Altura manométrica total	m
Eficiência	57,9%
Potência	46,2 kW
Densidade fluído	0,724 kg/dm ³
Viscosidade fluído	0,44 cP
NPSH requerido	3,9 m
NPSH disponível	7,2 m
Pressão de sucção	-0,2 kgf/cm ² g
Pressão de descarga	9,0 kgf/cm ² g
Temperatura do fluído	25°C

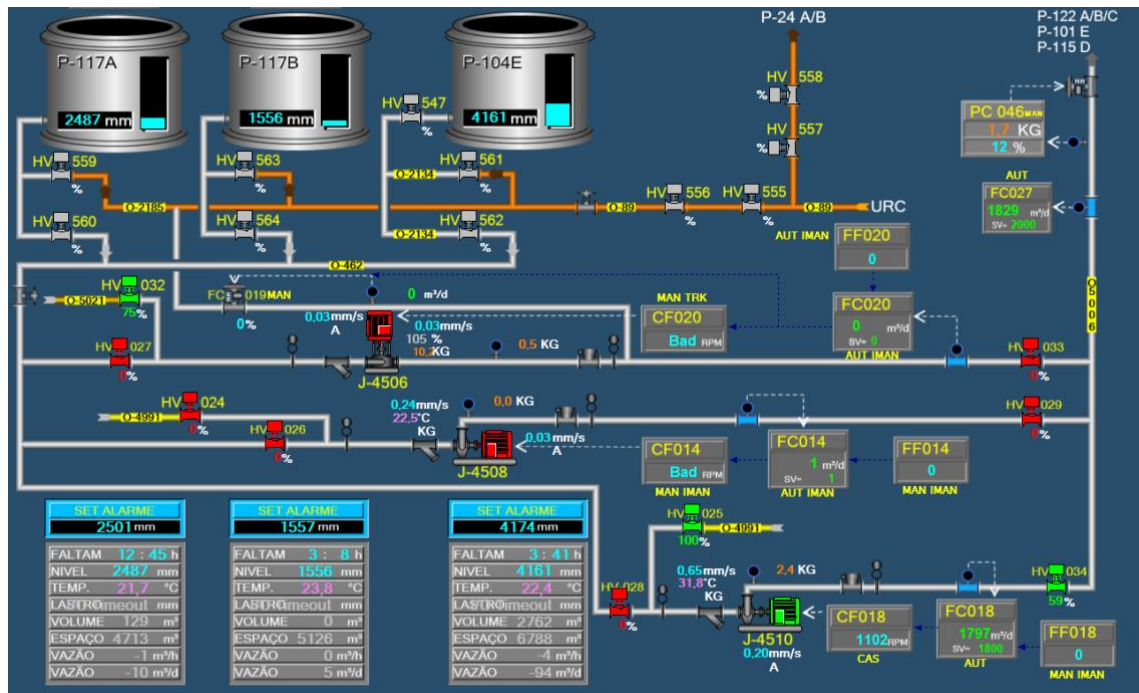


Figura 20. Lay Out básico da instalação dos tanques de sucção (1).



Figura 21. Lay Out básico da instalação dos tanques de sucção (2)

Na Figura 22 é mostrado o esquema básico com detalhes da instalação da bomba centrífuga que foi utilizada neste estudo.

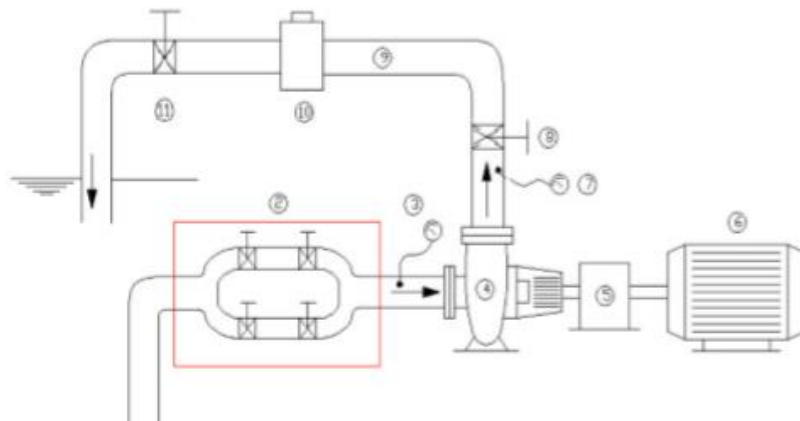


Figura 22. Lay Out dos acessórios da instalação da bomba.

Descrição dos componentes da Figura 22:

- item 2: **filtro tipo cônico** – aplicado para retenção de partículas sólidas, e para proteção do equipamento, durante a operação;
- item 3: **medidor de pressão** – medição da pressão de sucção e, deve ser posicionado a uma distância do flange sucção da bomba de, no mínimo, 2 vezes o diâmetro, sendo o valor mínimo de 200 mm;
- item 4: **bomba centrífuga**;
- item 5: **acoplamento** – responsável pela transmissão de torque entre motor e bomba;
- item 6: **motor elétrico**;
- item 7: **medidor de pressão** – medição da pressão de descarga e, deve ser posicionado a uma distância do flange descarga da bomba de, no mínimo, 2 vezes o diâmetro, sendo o valor mínimo de 160 mm;
- item 8: **válvula da tubulação de recalque** – aplicada para ajuste de vazão;
- item 9: **tubulação de recalque** – responsável pelo encaminhamento do produto para a próxima etapa do processo;
- item 10: **medidor de vazão** – medição da vazão do produto bombeado;
- item 11: **válvula de retenção** – impede o retorno de fluido para a sucção.

Nesta pesquisa o diagnóstico da bomba será feito com o objetivo de classificar a operação dentro de uma faixa, considerada adequada, de tal forma, que a *performance* atenda aos requisitos da planta e mantenha preservada a integridade mecânica do conjunto. Para isto é estabelecida uma combinação de diferentes variáveis, de tal modo que, quando existe a alterações de duas ou mais variáveis,

simultaneamente, a conclusão seja alcançada devido a efeitos sensorizados em diferentes ajustes no processo.

2.1.1 Coleta de dados do processo

As amostras são obtidas do software PI “*Plant Information*” e correspondem a um conjunto de módulos servidor/cliente para monitoramento do parque de refino. O PI Universal Data Server (PI UDS) é a núcleo deste sistema, atuando baseado em Microsoft Windows.

O *Archive Subsystem*, integrante do PI UDS, é responsável pelo armazenamento e recuperação de dados numéricos. Um sistema PI típico consiste de vários computadores executando, simultaneamente, *software* que trabalha em cooperação com o PI UDS.

2.2 Métodos

2.2.1 Fundamento básico do controlador paraconsistente

A base de dados de cada variável é de 60 minutos, sendo que cada amostra de cada variável é coletada a cada 1 minuto. Os dados, inicialmente, são migrados para planilha excell, via suplemento, PI DataLink (Apêndice A).

Após armazenamento os dados são padronizados e submetidos aos algoritmos, para o tratamento lógico adequado através de uma rede de análise Paraconsistente – RAP.

A RAP é composta de algoritmos Nós de Analise Paraconsistente - NAPs e, os cálculos, no caso específico desse estudo, os sinais de entrada são obtidos, através de quatro variáveis observáveis que são combinadas aos pares, conforme descrição: Vazão do sistema em m³/dia (**Vazão**); Pressão de Descarga do fluido em kgf/cm² (**P.Descarga**); Corrente do motor elétrico em Amperes (**Corrente**); Pressão de Sucção do fluido em kgf/cm² (**P.Sucção**) (apêndice A).

Um algoritmo estruturado em Excel com apoio do suplemento PI Data Link, é inicialmente utilizado para importar o arquivo com as métricas do processo que combinadas de forma histórica e em tempo real, após as análises paraconsistentes determinam a normalidade ou anormalidade do processo. Para o tratamento dos

sinais as métricas são separadas, e após isso, é gerado uma simulação que normaliza os dados de acordo com a LPA2v, armazenando as últimas dez leituras e executando a RAP exportando os resultados de saída dos filtros e do indicador da condição operacional, exibindo os resultados categorizado.

Este procedimento é mostrado no diagrama de blocos da Figura 23.

2.2.2 Fundamento básico do controlador paraconsistente

Os valores dos sinais recebidos dos instrumentos de processo, e a suas transformações em graus evidências são realizadas através de algoritmos gerados dos fundamentos da Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores LPA2v.

Para este trabalho, nas transformações de medições em graus de evidência buscam valores de Pressão de sucção $P_{Sucção}$, Pressão de descarga $P_{Descarga}$, Vazão volumétrica da bomba $Vazão$ e Corrente do motor $Corrente$ de um banco de dados com coleta em tempo real. O analisador da condição operacional utiliza uma RAP que associada ao algoritmo extrator dos efeitos de contradição é representado, através da Figura 23.

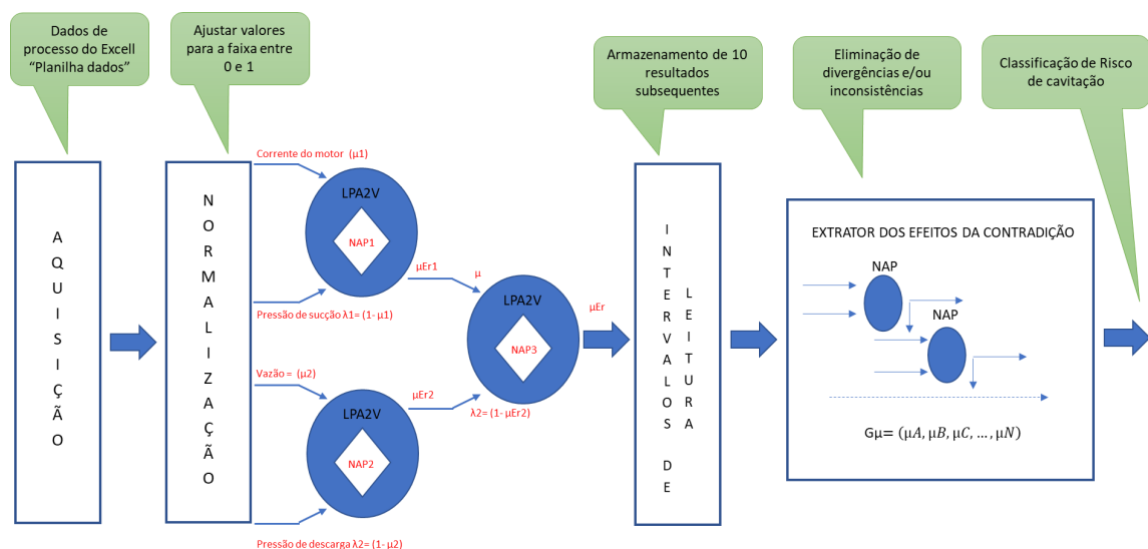


Figura 23. Fluxograma do tratamento de dados do processo.

Os detalhes de funcionamento dessa configuração são mostrados a seguir.

2.2.3 Normalização

Os sinais, nessa primeira etapa, entram num processo de modelagem, nas unidades métricas originais, no intervalo predefinido, após isso, são normalizados e os valores inseridos dentro de um intervalo fechado compreendido entre $[0,1]$, representando os graus de evidência μ_E para a LPA2v e pertencente ao conjunto de números reais (apêndice A).

2.2.4 Evidências na Rede de Análise Paraconsistente - RAP

As evidências favoráveis às proposições iniciais na RAP (apêndice B) que buscam os valores de evidência real que serão aplicados e analisados na próxima etapa, após a formação de um grupo de 10 leituras (apêndice C). Essa quantidade foi definida a fim de manter o sinal integro, eliminando possíveis divergências e/ou inconsistências que podem ser causadas por leituras efetuadas na condição de instabilidade momentânea de curta duração do processo durante o período do recebimento de 10 leituras.

2.2.5 Extração dos efeitos de contradição

Os sinais que são representados por Graus de Evidência serão inicialmente analisados por Algoritmos da Lógica Paraconsistente, através de uma rede de análises paraconsistente RAP. Após este tratamento inicial os valores resultantes que formam o grupo de 10 que é associado a um algoritmo extrator de efeitos de contradição (apêndice D). Esse grupo de sinais é independente de outras informações externas e tem como principal função a execução de uma análise paraconsistente em seus valores, subtraindo os efeitos causados pela contradição e apresenta um único Grau de Evidência Real.

O grau de Evidência da proposição “Classificação do grau de risco de cavitação” para cada pacote de dados operacionais analisados que compõe os instrumentos monitorados no banco de dados *on-line* que são extraídos e avaliados. Após essa análise, os valores de Grau de Evidência Favorável são comparados a cinco faixas, que são denominadas como; BAIXO-NORMAL de Cavitação, BAIXO-

MODERADO de Cavitação, ALTO-MODERADO de cavitação, ALTO-CRÍTICO de cavitação, e ALTO-PERIGO de Cavitação, conforme representado na Figura 24.

Classificação Operacional
BAIXO-NORMAL
BAIXO-MODERADO
ALTO-MODERADO
ALTO-CRÍTICO
ALTO-PERIGO

Figura 24. Classificação operacional.

A classificação operacional remete ao risco do início do processo de cavitação, durante a operação da bomba centrífuga nas condições avaliadas, onde a classificação “BAIXO-NORMAL” remete ao menor risco da presença de cavitação no processo de bombeamento e “ALTO-PERIGO” a condição mais favorável para a ocorrência da cavitação.

2.2.6 Funcionalidade do sistema

A interface de comunicação entre o aplicativo Excel e o PI foi empregada, através do suplemento excel PI Data Link, conforme Figura 25. Este procedimento foi escolhido pela sua facilidade em tratamento de dados do Excel e sua capacidade configuração dos dados de coleta e ajuste dos intervalos de aquisição, gerando a possibilidade de acompanhar em diferentes contextos operacionais, como por exemplo em uma partida de planta, onde os intervalos devem ser menores, na ordem de 10 segundos entre as coletas e, durante o regime normal com intervalo de 1 minuto.

Quando iniciado a coleta de dados do PI para o Excel, ativando o módulo de coleta on-line e, a cada intervalo de 1 minuto, as informações dos instrumentos selecionadas são capturadas e inseridas no banco de dados (tabela do aplicativo Excel de dados) para posterior tratamento, conforme mostrado na Figura 25.

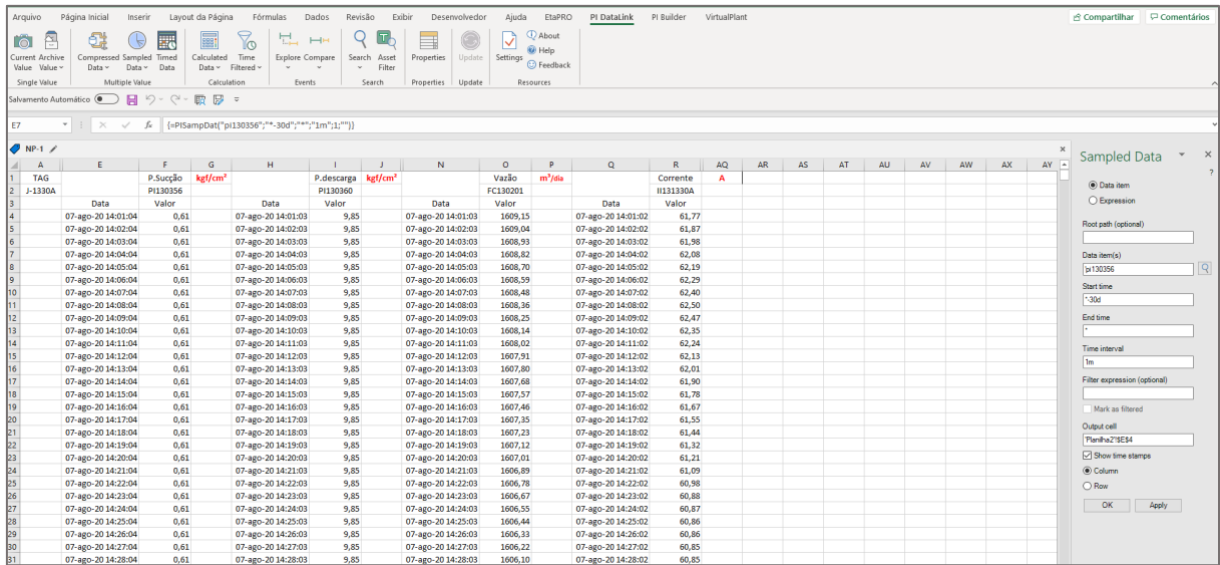


Figura 25. Módulo de comunicação entre o aplicativo Excel e o PI.

Ao final do processamento, uma função grava as informações geradas e o valor é classificado dentro das cinco faixas possíveis. Essa classificação é relacionada aos pares entre quatro variáveis operacionais; Vazão volumétrica da bomba versus Pressão de descarga da bomba e corrente do motor elétrico versus pressão de sucção com as regiões de classificação.

As Figuras 26 e 27 representam a combinação das variáveis e a classificação década faixa operacional

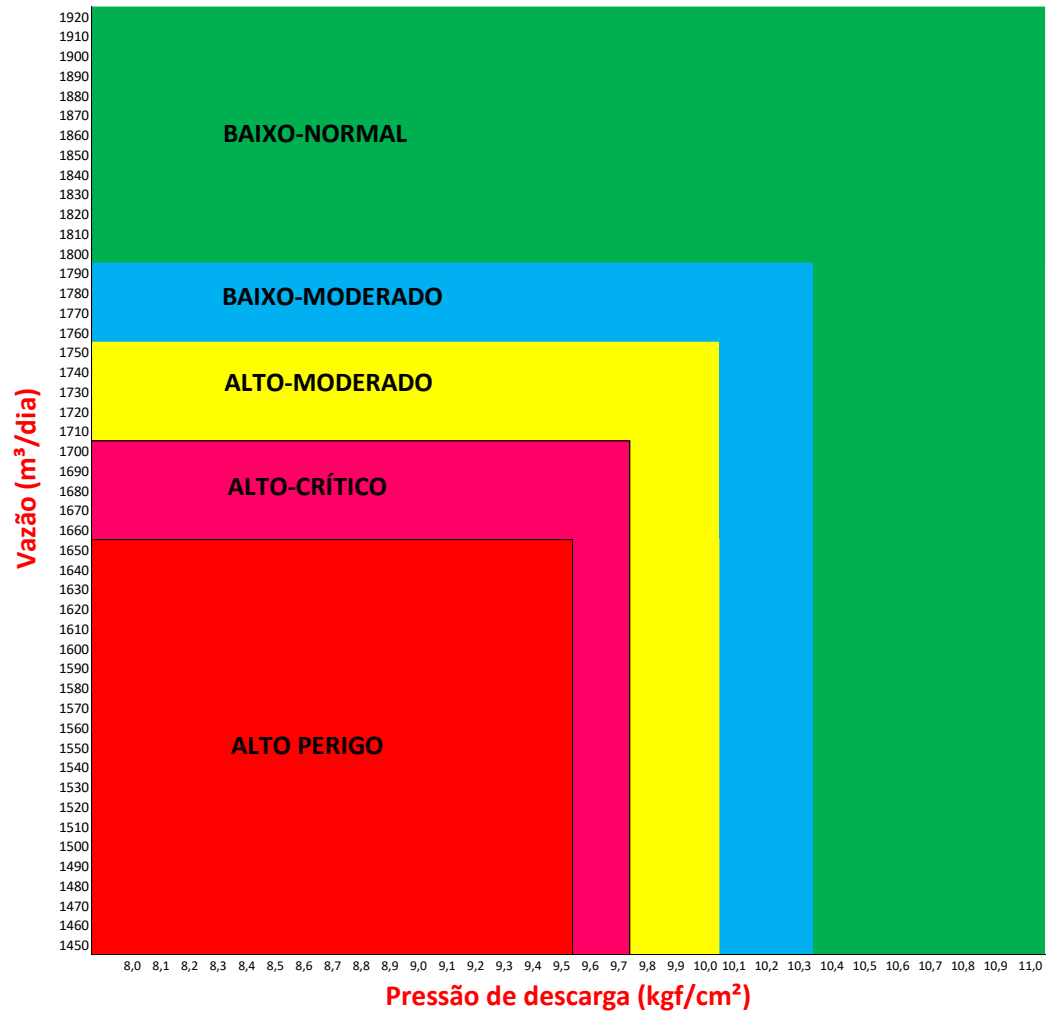


Figura 26. Classificação do risco de cavitação considerando a vazão e a pressão de descarga.

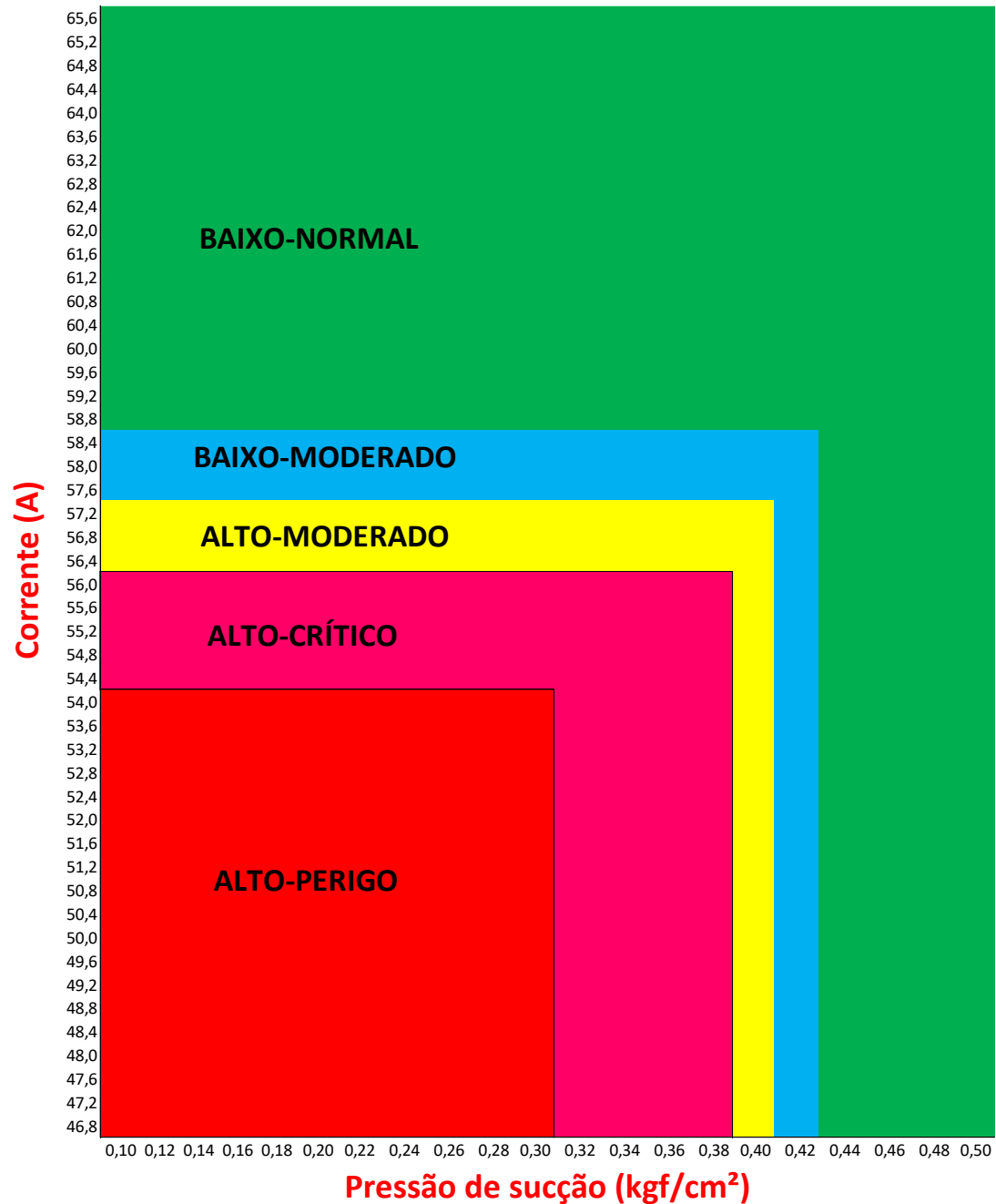


Figura 27. Classificação do risco de cavitação considerando a corrente e a pressão de sucção.

2.2.7 Valores para definição das métricas

O início do fenômeno da cavitação, na região da tubulação de entrada e a região de admissão, em bomba centrífugas, ocorre na redução da pressão de sucção, com consequência o trabalho executado pelo sistema é reduzido e com isso podemos relacionar com a corrente elétrica do motor. Dessa forma, ocorre a necessidade de manter valores que representem faixas de operação que demonstrem o risco associado ao processo de cavitação.

Os valores foram obtidos e definido, através de observações e análises comparativas da folha de dados e valores providenciados no supervisório durante a etapa de bombeamento, conforme a Tabela 1:

- Pressão de sucção - $P_{sucção}$;
- Corrente do motor – *Corrente*.

A pressão de descarga apresenta associação direta com a vazão volumétrica, uma vez iniciado a cavitação a *performance* da bomba é comprometido, reduzindo os valores de vazão volumétrica e pressão de descarga. Da mesma forma que ocorreu com o par de variáveis pressão de sucção e corrente de motor, as faixas de trabalhos foram obtidas, através de observações em campo e dados do manual do equipamento e definidas na prática.

- Pressão de descarga - $P_{descarga}$.
- Vazão volumétrica da bomba - *Vazão*.

Tabela 1. Limites mínimo e máximo das faixas de trabalho.

	Pressão sucção (kgf/cm²)		Pressão descarga (kgf/cm²)		Vazão (m³/dia)		Corrente (Amperes)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
ALTO-PERIGO	0,10	0,30	7,90	9,50	1450,00	1650,00	46,80	54,00
ALTO-CRÍTICO	0,31	0,38	9,51	9,70	1651,00	1700,00	54,10	56,00
ALTO-MODERADO	0,39	0,40	9,71	10,00	1701,00	1750,00	56,10	57,20
BAIXO-MODERADO	0,41	0,42	10,01	10,30	1751,00	1800,00	57,30	58,50
BAIXO-NORMAL	0,42	0,50	10,31	11,00	1801,00	1920,00	58,60	65,60

2.2.8 Coleta de dados

No desenvolvimento da pesquisa considera-se a coleta de dados, via *software* de armazenamento de dados históricos de processo (PI). O intervalo entre as coletas foi de 1 minuto. Esse intervalo foi considerado por conta dos transientes operacional que causam cavitação, como por exemplo a formação de bolsão de gás na esfera, vaso de sucção. Com esses intervalos podem ser identificados, através do sistema especialista, o estágio inicial do fenômeno de cavitação e assim os ajustes operacionais podem ser executados em tempo, a fim de evitar danos ao conjunto mecânico, principalmente o selo mecânico, uma vez que a refrigeração do selo ocorre com o próprio produto bombeando. Também podem ser tomadas as providencias na presença de gás quando ocorre aquecimento, devido a deficiência do fluxo do produto para troca térmica na região de selagem, gerando aquecimento e assim que o produto

chega gera choque térmico, podendo ocasionar a quebra do mancal que é fabricado em silício.

Nas figuras 28 até 31 é apresentado o equipamento instalado na unidade de reforma catalítica, bem como os instrumentos que fornecem os dados para o desenvolvimento desse trabalho:



Figura 28. Visão geral do conjunto acionador e acionado.



Figura 29. Visão geral do conjunto acionador e acionado.



Figura 30. Bomba centrífuga instalada na base.



Figura 31. Instrumentos de monitoramento das variáveis de processo.

2.2.9 Modelagem e normalização dos dados

O processo de normalização é definido com os valores das grandezas, obtidas das variáveis de processo de bombeamento, onde foram estabelecidas as características de modelagens para uma variação diretamente proporcional na extração do Grau de Evidência a partir de uma equação da reta. O valor mínimo da grandeza que será avaliado é denominado como a_1 . O valor máximo da grandeza que será avaliado é denominado como a_2 .

A representação gráfica de uma grandeza que varia aumentando proporcionalmente e relacionada com o Grau de Evidência Normalizado μ , será representada conforme o Gráfico 1.

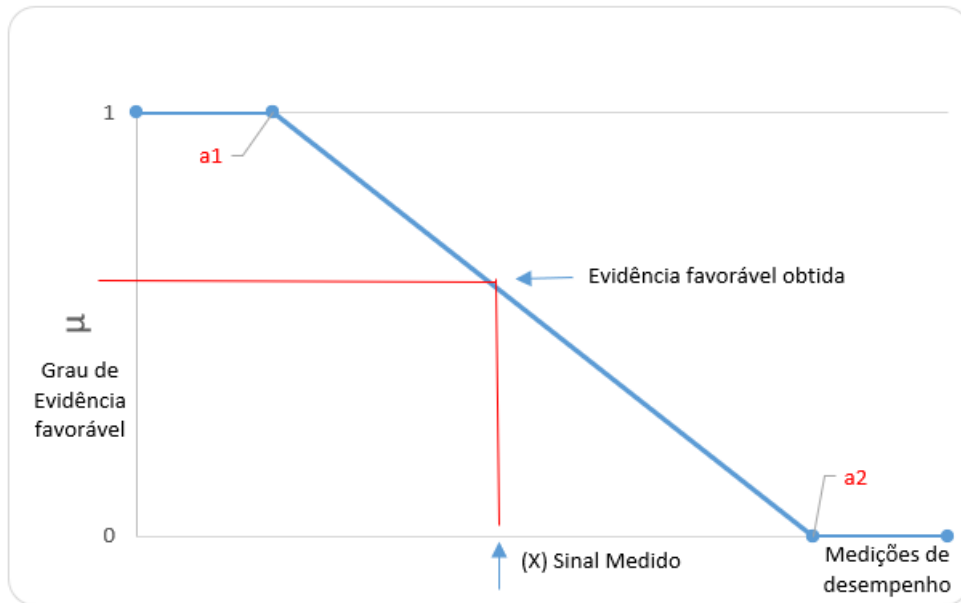


Gráfico 1. Valoração do Grau de Evidência com variação linear com proporcionalidade direta a grandeza medida.

O Grau de evidência para uma variação linear é determinado, através da equação a seguir:

$$\text{Se } x \in [a1; a2] \quad \mu_{(x)} = \frac{x-a1}{a1-a2} \quad (27)$$

$$\text{Se } x > a2 \quad \mu = 0$$

$$\text{Se } x < a1 \quad \mu = 1$$

Onde:

- x é o valor da grandeza medida;
- a1 = Valor mínimo a ser analisado;
- a2 = Valor máximo a ser analisado;
- μ = Grau de evidência favorável (Grandeza normalizada).

Para a determinação do grau de evidência do risco de cavitação foram considerados os eventos de menor e maior valor referenciados nas Figuras 26 e 27 e aplicados a proposição do estudo. Após a conclusão desta etapa, foi adotado de forma empírica a normalização de valores das medidas de leituras das variáveis de processo, através de modelagem com variação linear e diretamente proporcional à

grandeza medida, resultando em um valor normalizado entre 0 e 1, demonstrando assim, o grau de evidência do sinal obtido da fonte de informação.

Considerando o referendado acima, cada medição caracterizou a obtenção do Grau de Evidência Favorável de cada grandeza conforme proposição do estudo como se segue:

Para o NAP1 as duas fontes de informação são utilizadas como graus de evidência favorável:

- μ_1 = Evidência Favorável - Corrente do Motor Elétrico modelada no Gráfico 2;
- μ_2 = Evidência Desfavorável - Pressão de Sucção da Bomba modelada no gráfico 3;

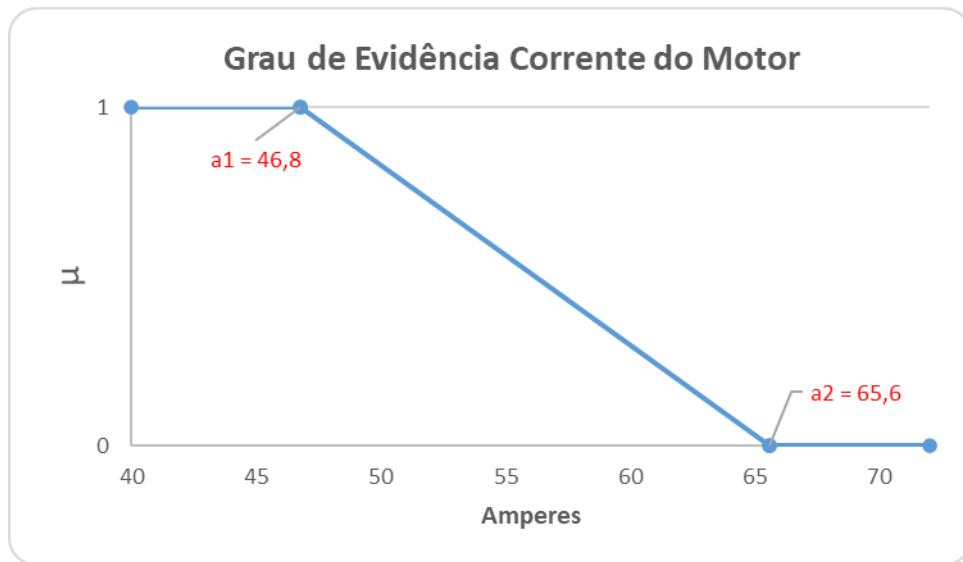


Gráfico 2. Grandeza da fonte de informação – Variação da Corrente Elétrica do Motor – Variando de modo diretamente proporcional relacionada com o Grau de Evidência Normalizado.

Se	Corrente do motor	> 65,6	$\mu=0$
Se	Corrente do motor	< 46,8	$\mu=1$

$$\text{Se } x \in [46,8; 65,6] \quad \mu_{V.Sucção} = \frac{x-65,6}{46,8-65,6} \quad (28)$$

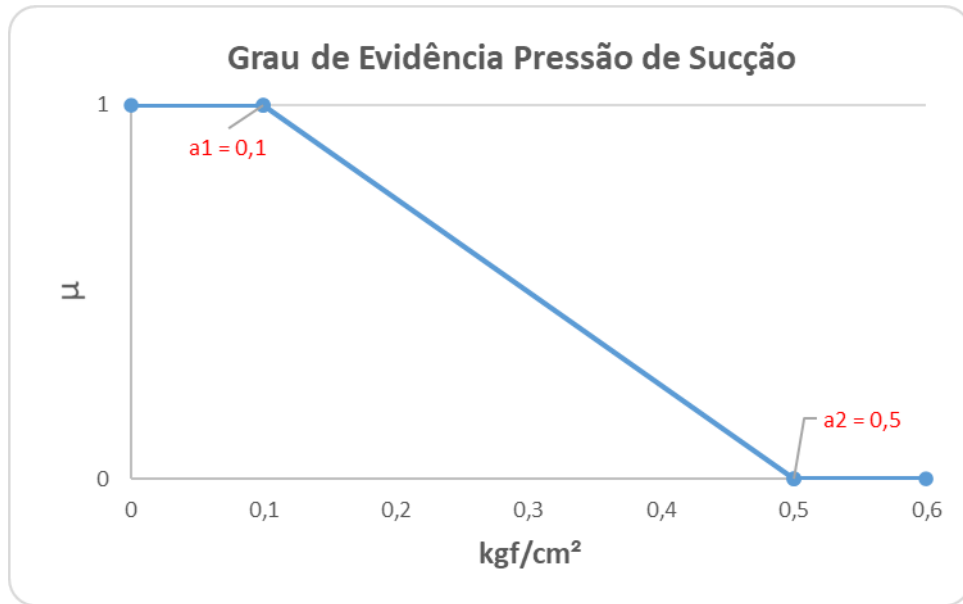


Gráfico 3. Grandeza da fonte de informação – Variação da Pressão de Sucção da Bomba – variando de modo diretamente proporcional relacionada com o Grau de Evidência Normalizado

Se Pressão de sucção > 0,50 $\mu=0$

Se Pressão de sucção < 0,10 $\mu=1$

$$\text{Se } x \in [0,10; 0,50] \quad \mu_{V.Sucção} = \frac{x-0,50}{0,10-0,50} \quad (29)$$

Para o NAP2 as duas fontes de informação são utilizadas como graus de evidência favorável:

- μ_1 = Evidência Favorável - Vazão Volumétrica da Bomba modelada no gráfico 4;
- μ_2 = Evidência Desfavorável - Pressão de Descarga da Bomba modelada no gráfico 5;

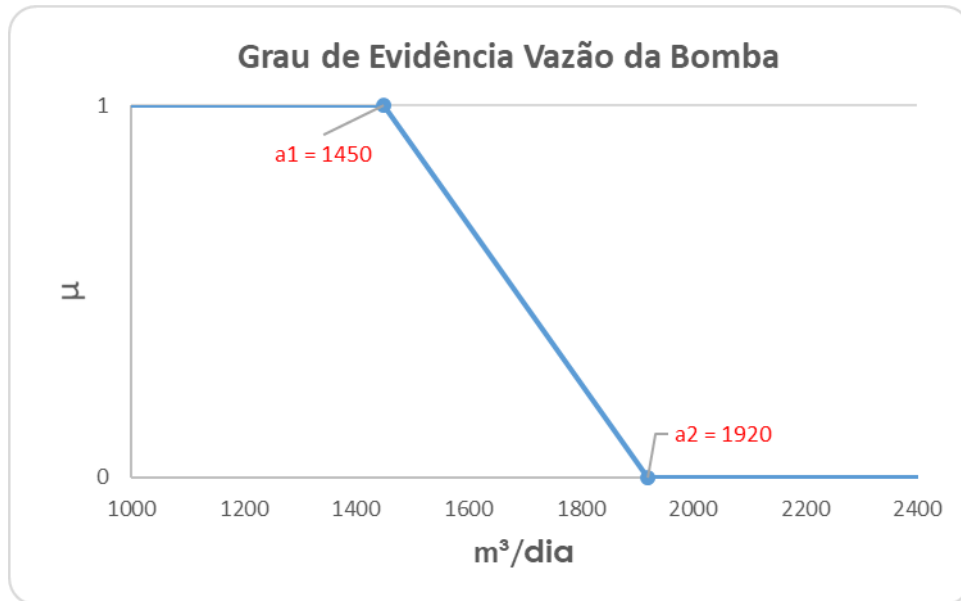


Gráfico 4. Grandeza da fonte de informação – Variação da Vazão Volumétrica da Bomba – variando de modo diretamente proporcional relacionada com o Grau de Evidência Normalizado

Se Vazão da bomba > 1920 $\mu=0$

Se Vazão da bomba < 1450 $\mu=1$

$$\text{Se } x \in [1450; 1920] \quad \mu_{V.Sucção} = \frac{x-1920}{1450-1920} \quad (30)$$

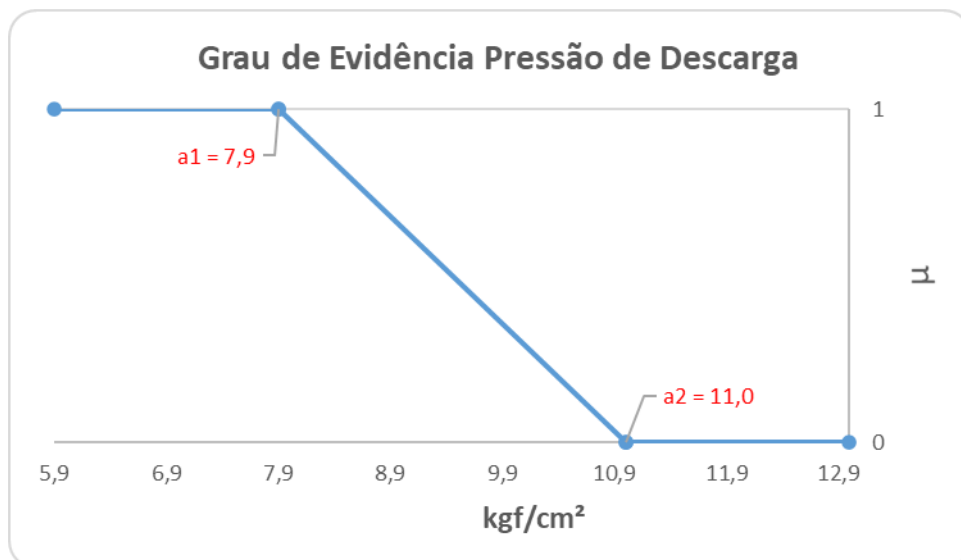


Gráfico 5. Grandeza da fonte de informação – Variação da Pressão de Descarga da Bomba – variando de modo diretamente proporcional relacionada com o Grau de Evidência Normalizado.

Se	Pressão de Descarga	> 11,0	$\mu=0$
Se	Pressão de Descarga	< 7,9	$\mu=1$

$$\text{Se } x \in [7,9; 11,0] \quad \mu_{V.Sucção} = \frac{x-11,0}{7,9-11,0} \quad (31)$$

Para o NAP3 as duas fontes de informação são utilizadas como graus de evidência favorável:

- Evidência Resultante Real obtida no NAP1 (Corrente do Motor X Pressão de Sucção);
- Evidência Resultante Real obtida no NAP2 (Vazão Volumétrica X Pressão de Descarga).

A saída desse NAP pode ser analisada com base nos limites estabelecidos do μ_{ER} mínimo e máximo, obtidos após a inserção manual dos limites de cada faixa operacional na planilha de monitoramento da condição operacional, e os valores são demonstrados na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2. Característica da análise do grau de evidência resultante real obtido na saída do algoritmo.

(μ_{ER}) - Grau de Evidência Resultante Mínimo	(μ_{ER}) - Grau de Evidência Resultante Máximo	Análise da Saída
0,7500000000000000	0,520705494422444	ALTO-PERIGO
0,520705494422445	0,454748722684919	ALTO-CRÍTICO
0,454748722684920	0,393176505890480	ALTO-MODERADO
0,393176505890481	0,378439779164523	BAIXO-MODERADO
0,378439779164524	0,0000000000000000	BAIXO-NORMAL

2.2.10 Aplicação do Algoritmo Extrator De Efeitos de Contradição

Com a obtenção do resultado dos graus de evidência real da proposição objeto que acontece após 10 leituras, subsequentes de informação, foi aplicado o Algoritmo Extrator de Efeitos da Contradição para obtenção do grau de evidência do risco de cavitação da bomba. O processo de extração reduz os efeitos das inconsistências, que eventualmente podem existir, e apresenta como resposta uma valoração de saída mais próxima da condição real da condição de operação da bomba centrífuga.

O Sistema de monitoramento Paraconsistente de risco de cavitação foi projetado para analisar da seguinte forma:

- Quando o Grau de Evidência resultante for igual a 1 representa que as evidências analisadas e representadas pelas proposições parciais estão confirmando a proposição objeto, ou seja, risco elevado de cavitação. À medida que o valor do Grau de Evidência resultante se distancia de 1 e aproxima-se de 0,5, por consequência, do estado Indefinido, denominado como risco moderado de cavitação, demonstrando que as informações estão trazendo evidências que enfraquecem a afirmativa à proposição.

Em contrapartida quando o Grau de Evidência resultante avança o valor de indefinição 0,5 e se aproxima de zero significa que as informações que levam as evidências para a análise sobre as proposições parciais estão indicando uma maior contestação à proposição objeto. Portanto, as evidências de risco de cavitação, relacionados à atual configuração do Sistema Especialista, sugerem que está se aproximando de uma situação de baixo risco de cavitação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram obtidos a partir do monitoramento do processo com apoio do suplemento PI Datalink que transfere em tempo real do supervisório do PI para o Excel e o sinal dos instrumentos requeridos no analisador paraconsistente.

3.1 Coleta dos dados

A Coleta de dados foi feita com intervalo de 1 minuto entre cada amostra, portanto os resultados são mostrados em uma planilha possuindo 60 amostras, perfazendo um total de 1 hora de acompanhamento.

O analisador paraconsistente foi instalado no computador do supervisório, trazendo uma classificação do processo com relação ao risco de cavitação, a cada 10 minutos, com isso possibilita o monitoramento sem que haja a necessidade de uma interpretação das variáveis que está vinculada a experiência cada pode operador. Para esta pesquisa os resultados são mostrados nas condições de campo onde o monitoramento ficou ativo durante 24 horas por dia e foi utilizado por cinco operadores.

Serão apresentados os resultados do sistema especialista paraconsistente em ensaios de monitoramento onde foram analisadas as 4 variáveis da bomba em condições normais e estáveis e anormais e instáveis e caracterizando as condições dos riscos referentes a cavitação estabelecidas nesta pesquisa.

3.2 Processo estável e normal sem intervenção

A classificação BAIXO-NORMAL sugere que a bomba centrífuga aplicada no processo de bombeamento encontra-se em condições normais e com baixo risco de cavitação.

Na Tabela 3 o processo foi monitorado minuto a minuto, durante 1 hora e gerou 6 classificações, todas consideradas como BAIXO-NORMAL sugerindo baixo risco de cavitação com as quatro variáveis do modelo paraconsistente estáveis, conforme *trend* da Figura 32, observar que o cursor está na região analisada, nessas condições não requereu nenhuma intervenção do operador no processo de bombeamento de nafta.

Tabela 3. Grau de evidência da saída da rede NAP J-1330-BAIXO-NORMAL-01.

Tempo	0'	10'	20'	30'	40'	50'
1'	0,3530720	0,3553548	0,3576466	0,3593022	0,3602288	0,3622569
2'	0,3532998	0,3555837	0,3578763	0,3592437	0,3629262	0,3586241
3'	0,3535279	0,3558125	0,3581060	0,3591852	0,3651210	0,3592472
4'	0,3537559	0,3560413	0,3583359	0,3591265	0,3668125	0,3642913
5'	0,3539841	0,3562705	0,3585657	0,3590679	0,3680086	0,3571104
6'	0,3542123	0,3610931	0,3587959	0,3590093	0,3679012	0,3569732
7'	0,3544406	0,3567289	0,3590259	0,3589507	0,3582079	0,3568362
8'	0,3546690	0,3569582	0,3593840	0,3588921	0,3580706	0,3566993
9'	0,3548975	0,3571876	0,3594193	0,3588335	0,3579334	0,3565623
10'	0,3551262	0,3574170	0,3593607	0,3587748	0,3577960	0,3564254
μEr3	0,3533568	0,3556409	0,3579338	0,3588481	0,3580905	0,3565965
Classificação Operacional	BAIXO-NORMAL	BAIXO-NORMAL	BAIXO-NORMAL	BAIXO-NORMAL	BAIXO-NORMAL	BAIXO-NORMAL

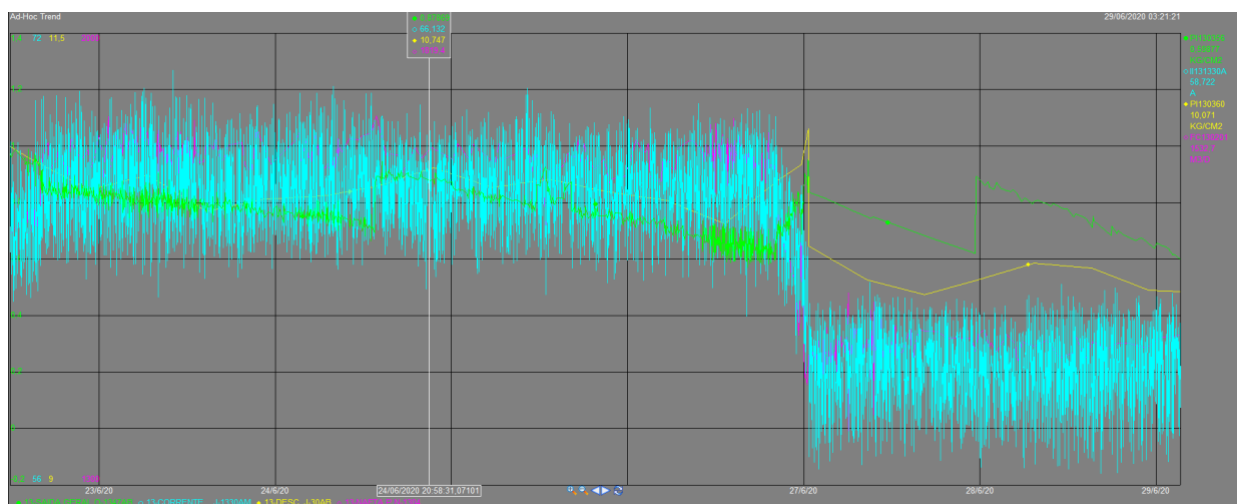


Figura 32. Trend do processo com o marcador na região analisada em regime estável.

Na Figura 33 encontra-se a ampliação do *trend*, demonstrando a estabilidade do processo no período estudado.

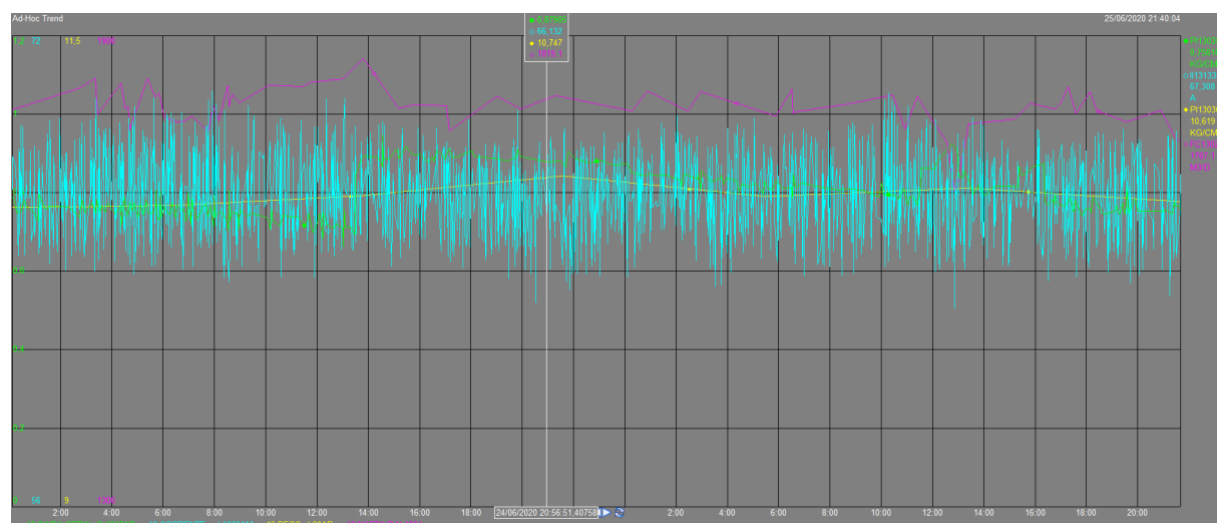


Figura 33. Trend do processo detalhando estabilidade do processo.

3.3 Processo instável e anormal sem intervenção

A classificação ALTO-MODERADO, ALTO-CRÍTICO e ALTO-PERIGO indicam que a bomba centrífuga aplicada no processo de bombeamento encontra-se em condições anormais e com alto risco de cavitação.

Na Tabela 4 foi destacado 1 hora de operação do processo de bombeamento de nafta com alteração das variáveis de processo, com reporte adequado nas indicações monitoradas pelo analisador paraconsistente, sugerindo inicialmente risco BAIXO-MODERADO de cavitação e, após 40 minutos de acompanhamento, foi gerada a quinta classificação que mostrou que o processo encontrava-se com risco ALTO-MODERADO de cavitação, com isso o operador de painel comunicou-se, via rádio comunicador, com o operador de campo que confirmou os ruídos característicos de cavitação, iniciando os ajustes, afim de restabelecer a condição operacional da bomba centrífuga.

Tabela 4. Grau de evidencia da saída da rede NAP J-1330-ALTO-MODERADO-01.

Tempo	10'	20'	30'	40'	50'	60'
1'	0,4088230	0,4142986	0,3896200	0,3911501	0,4118838	0,3855114
2'	0,4069744	0,4258351	0,3661078	0,4156754	0,4158740	0,3879751
3'	0,4050792	0,4206126	0,3796520	0,3723295	0,4196952	0,3903920
4'	0,4031364	0,4150004	0,3917814	0,3780350	0,4170086	0,3925335
5'	0,4011447	0,4102472	0,4025879	0,3835172	0,4048935	0,3921403
6'	0,3991028	0,4061654	0,4121957	0,3887796	0,4335114	0,3917454
7'	0,3970097	0,4018815	0,4122847	0,3938261	0,4145794	0,3913488
8'	0,3948642	0,3973882	0,4065626	0,3986615	0,3906521	0,3909506
9'	0,3926653	0,3926788	0,4004792	0,4032914	0,3804424	0,3905508
10'	0,3904119	0,3865271	0,3940149	0,4077166	0,3830006	0,3900397
μEr3	0,3932162	0,3938614	0,3821684	0,3794130	0,3858052	0,3884923
Classificação Operacional	ALTO-MODERADO	ALTO-MODERADO	BAIXO-MODERADO	BAIXO-MODERADO	BAIXO-MODERADO	BAIXO-MODERADO

Na Figura 34, observa-se que o cursor está na região analisada, é visualizado alteração nas variáveis operacionais, em relação ao período antecessor, oriundo do processo de cavitação.

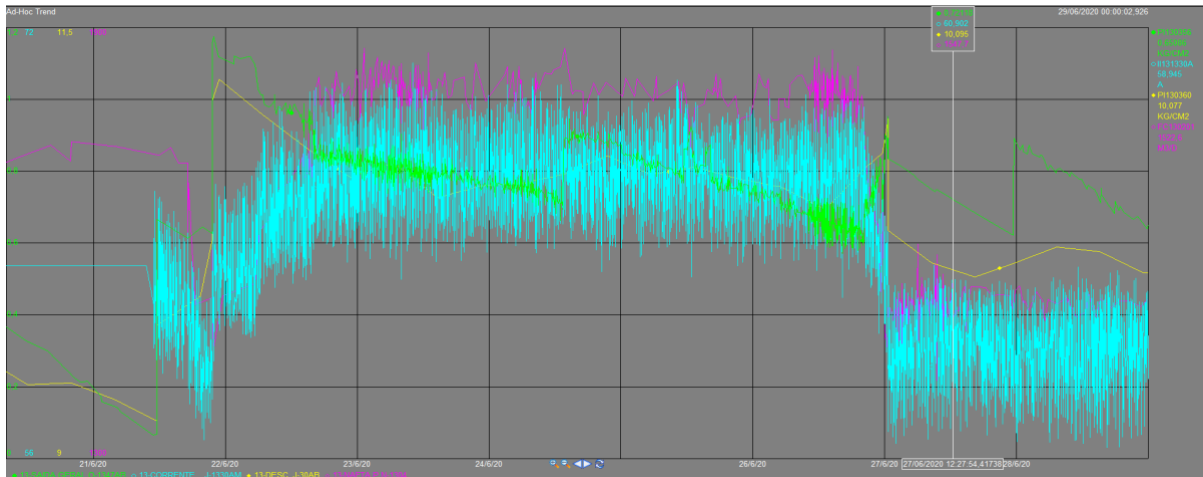


Figura 34. Trend do processo, após descontrola operacional.

Na Figura 35 encontra-se a ampliação do *trend*, demonstrando a instabilidade do processo no período estudado, com a presença de tendência de queda da pressão de sucção e descarga da bomba centrífuga.

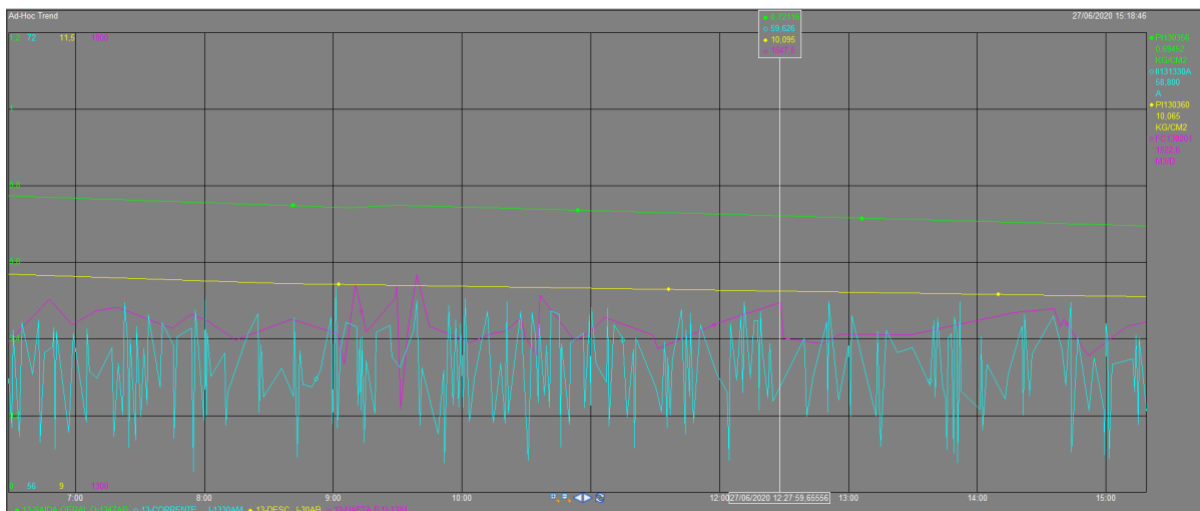


Figura 35. Trend do processo, durante operação da bomba centrífuga.

Na Tabela 5 mostra o processo de bombeamento apresentando uma classificação, com relação ao risco de cavitação, como ALTO-CRÍTICO, indicando a operação da bomba em situação crítica e podendo ocasionar danos aos componentes mecânicos, principalmente o sistema de selagem.

Tabela 5. Grau de evidencia da saída da rede NAP J-1330-ALTO-CRÍTICO-01.

Tempo	10'	20'	30'	40'	50'	60'
1'	0,4819587	0,4878713	0,4890978	0,4891004	0,4909511	0,4922833
2'	0,4844374	0,4852923	0,4943206	0,4897598	0,4910835	0,4937733
3'	0,4873093	0,4904007	0,4837287	0,4898922	0,4912160	0,4910825
4'	0,4875304	0,4876379	0,4855108	0,4900246	0,4907501	0,4934171
5'	0,4877530	0,4845519	0,4881093	0,4901569	0,4894355	0,4952661
6'	0,4879768	0,4887595	0,4914640	0,4902893	0,4893272	0,4939969
7'	0,4882021	0,4874373	0,4923040	0,4904217	0,4893711	0,4928382
8'	0,4884288	0,4864509	0,4891947	0,4905540	0,4894160	0,4917933
9'	0,4886567	0,4872760	0,4874536	0,4906864	0,4897687	0,4908654
10'	0,4888861	0,4881589	0,4860253	0,4908189	0,4909152	0,4900573
μEr3	0,4851570	0,4855822	0,4857541	0,4897929	0,4894143	0,4909815
Classificação Operacional	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO

Na Figura 36 é demonstrando a instabilidade do processo no período estudado, com a presença de tendência de queda da pressão de sucção e descarga da bomba centrífuga e operando com vazão abaixo do histórico do processo.

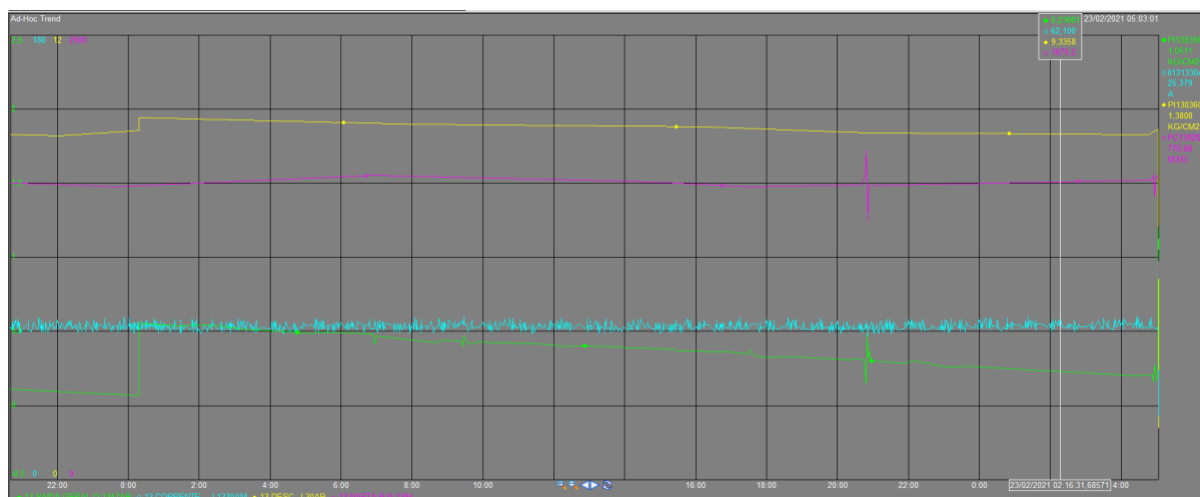


Figura 36. Trend do processo, com tendência de redução da pressão de sucção e descarga.

3.4 Processo instável e anormal com intervenção

A análise e monitoramento das variáveis operacionais da bomba centrífuga, nesta etapa do estudo, foram realizadas de forma *on-line* e, assim que classificado como alto foi realizado uma intervenção operacional, a fim de reposicionar os valores do processo dentro na faixa considerada como estável e normal.

Na Tabela 6, mostra a oscilação das classificações, durante o período acompanhado, o operador constatou que incidência de bolsas de gás na linha de sucção da bomba centrífuga, após alerta do operador de painel ao operador de

campo. Após tentativas de ajuste foi necessário a parada do bombeamento e purga de gás do sistema, após isso o bombeamento foi retomado e considerado com risco ao processo de cavitação BAIXO-NORMAL.

Tabela 6. Grau de evidencia da saída da rede NAP J-1330-ALTO-CRÍTICO-02.

Tempo	10'	20'	30'	40'	50'	60'
1'	0,2500000	0,4883796	0,4591462	0,5408852	0,4294054	0,3637513
2'	0,3285646	0,4609671	0,5334353	0,4611213	0,4416383	0,3421096
3'	0,2918184	0,4694297	0,5244576	0,4875767	0,3712325	0,2992581
4'	0,3459801	0,4623084	0,5155852	0,4708567	0,4332944	0,3254474
5'	0,3212753	0,4668096	0,5068195	0,5061223	0,3876811	0,3524578
6'	0,3121928	0,4589297	0,4981613	0,4498222	0,3447754	0,3103139
7'	0,3341733	0,4660423	0,4896116	0,5244201	0,3549729	0,3235388
8'	0,3568075	0,4611367	0,4816530	0,3751406	0,3653404	0,2967538
9'	0,3689304	0,4678199	0,4738903	0,3910543	0,3663662	0,2877614
10'	0,3582940	0,4613676	0,4662227	0,4174360	0,3482168	0,3049748
μEr3	0,2970431	0,4611265	0,4681793	0,3988741	0,3504031	0,2977938
Classificação Operacional	BAIXO-NORMAL	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-MODERADO	BAIXO-NORMAL	BAIXO-NORMAL

Na Figura 37 é demonstrando dois eventos de oscilação abrupta das variáveis de processo, remetendo a entrada de bolsas de gás na sucção da bomba.



Figura 37. Ampliação do trend do processo, com admissão de bolsas de gás.

A Tabela 7 mostra a bomba operando numa região com ALTO-PERIGO e ALTO-CRÍTICO com relação a incidência de cavitação, devido a condição da planta de processo não foi possível realizar ajuste no processo, pois encontrava-se em processo de condicionamento e partida, posto isso foi estabelecido ações de acompanhamento até que a ajuste fosse possível e viável.

Tabela 7. Grau de evidencia da saída da rede NAP J-1330-ALTO-PERIGO-01.

Tempo	10'	20'	30'	40'	50'	60'
1'	0,5297420	0,5294823	0,5308946	0,5235648	0,5275871	0,4790574
2'	0,5286214	0,5310237	0,5188931	0,5288896	0,5245020	0,4818983
3'	0,5275433	0,5326324	0,5185302	0,5276778	0,4768210	0,4854898
4'	0,5265076	0,5343069	0,5173696	0,5267227	0,4768743	0,4897602
5'	0,5255145	0,5360457	0,5279784	0,5258219	0,4769513	0,4912772
6'	0,5223790	0,5352286	0,5148190	0,5219330	0,4770516	0,4905520
7'	0,5194731	0,5171912	0,5146762	0,5176493	0,4771755	0,4898885
8'	0,5252750	0,5195728	0,5205815	0,5245513	0,4773227	0,5342288
9'	0,5266066	0,5226650	0,5267326	0,5352967	0,4774932	0,5295201
10'	0,5280094	0,5264472	0,5152108	0,5311902	0,4776870	0,5043143
μEr3	0,5231014	0,5204267	0,5151371	0,5223405	0,4770603	0,4828880
Classificação Operacional	ALTO-PERIGO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-PERIGO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO

Na Figura 38 é demonstrando instabilidade das variáveis operacionais, durante o condicionamento da planta, pois a bomba em estudo é a uma das principais do processo, com isso é aplicada para condicionar outros sistemas, durante o procedimento de partida, gerando a possibilidade de operar em condições não ideais, com relação ao risco de cavitação.

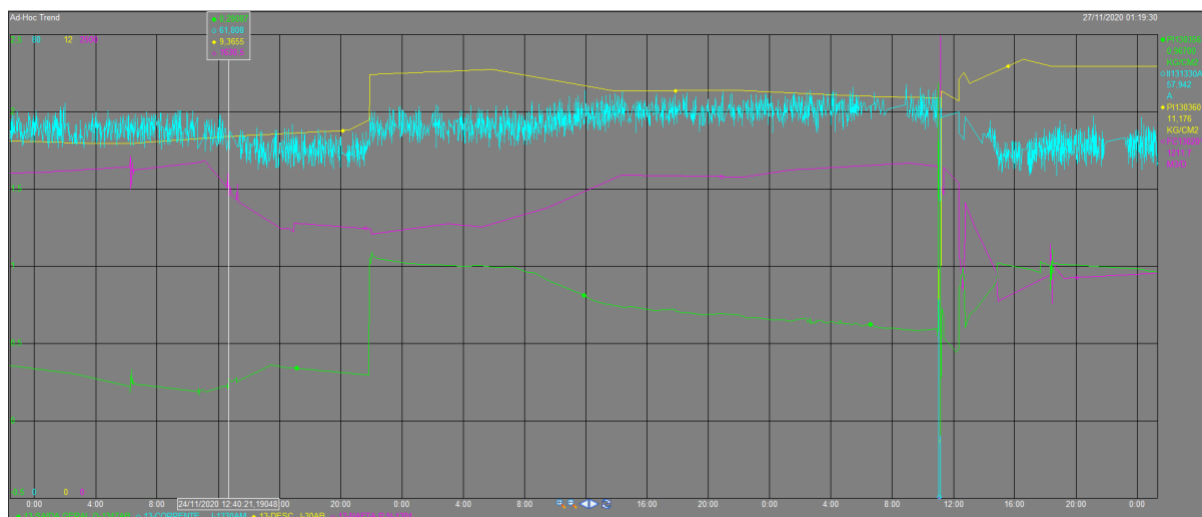


Figura 38. Trend do processo, durante coleta do analisador paraconsistente.

A Tabela 8 mostra a bomba operando com oscilações nas classificações com relação ao risco operacional, essa instabilidade ocorreu, devido a mudança de campanha da unidade, onde a produção é alternada entre nafta e gasolina, com isso ocorre variações e ajuste para enquadramento na nova campanha de processamento, conforme programação da produção e demanda de mercado consumidor.

Tabela 8. Grau de evidencia da saída da rede NAP J-1330-ALTO-MODERADO-02.

Tempo	10'	20'	30'	40'	50'	60'
1'	0,4693776	0,4122429	0,3881174	0,3618743	0,4171585	0,3834591
2'	0,4624266	0,4261217	0,4304923	0,4143101	0,3912559	0,2987799
3'	0,4562305	0,4277391	0,3825583	0,4351171	0,3494601	0,3068309
4'	0,4050235	0,4144544	0,4432020	0,4396401	0,3739439	0,3071441
5'	0,4304117	0,4438843	0,3840623	0,4348937	0,3904923	0,2916802
6'	0,4318799	0,4102419	0,4051054	0,4403716	0,3760061	0,3533902
7'	0,4282546	0,4344534	0,3640460	0,4690864	0,3618838	0,2942797
8'	0,4237792	0,4284530	0,3622186	0,4739118	0,3480881	0,3074327
9'	0,4198161	0,4113767	0,4429377	0,4538650	0,3561722	0,3394951
10'	0,4160164	0,3996222	0,4123819	0,3832827	0,3373853	0,3154731
μEr3	0,4169946	0,4107474	0,3687612	0,3912703	0,3491089	0,2958777
Classificação Operacional	ALTO-MODERADO	ALTO-MODERADO	BAIXO-NORMAL	BAIXO-MODERADO	BAIXO-NORMAL	BAIXO-NORMAL

A Figura 39 é demonstrando instabilidade das variáveis operacionais, devido a troca da campanha operacional para gasolina, observado na parte inicial do *trend* com mais relevância ao processo e a possibilidade de gerar cavitação, durante o processo de enquadramento operacional na nova campanha de produção.

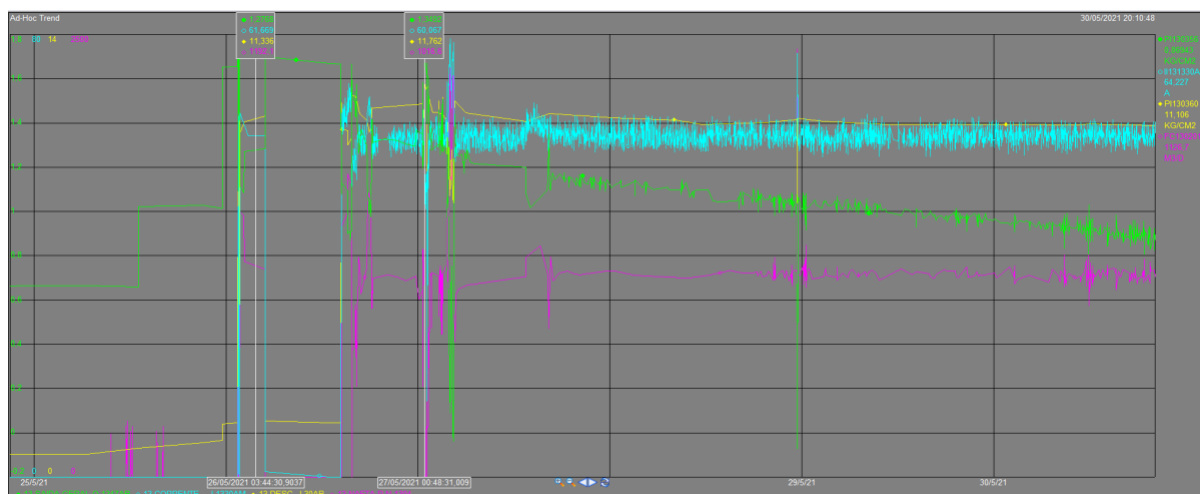


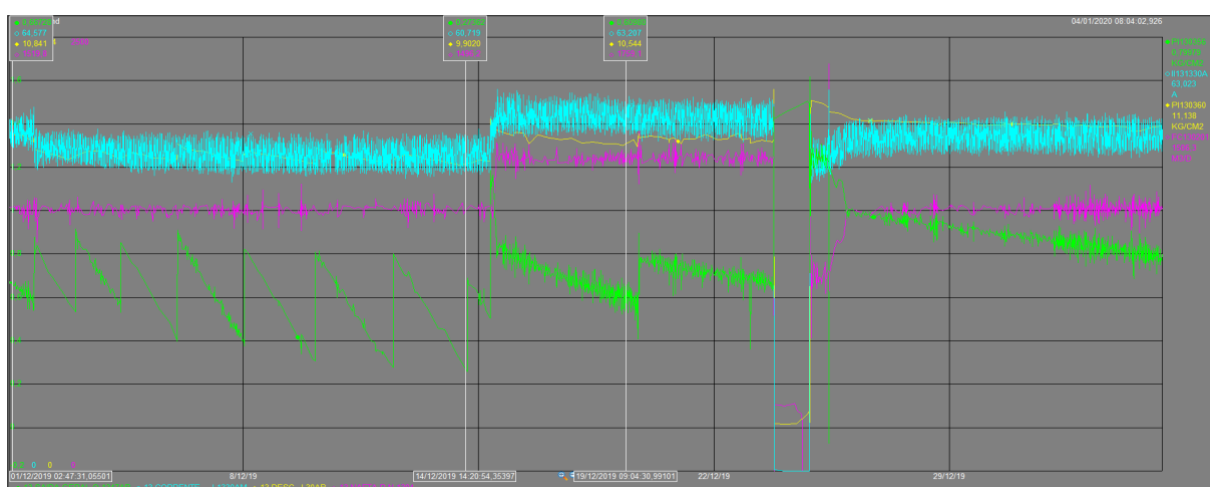
Figura 39. Trend do processo com bombeamento de bolsas de gás.

A Tabela 9 mostra a bomba operando com a pressão de sucção em tendência de queda, devido a redução da demanda de produto no tanque que é utilizado pelo vaso de sucção, com isso a altura do nível varia consideravelmente refletindo diretamente na pressão verificada no sensor monitoramento da sucção, gerando cavitação, nos momentos que a pressão se encontra nos valores mínimos, percebido nas inspeções de campo e alertado com a classificação ALTO-CRÍTICO, após análise do analisador paraconsistente.

Tabela 9. Grau de evidencia da saída da rede NAP J-1330-CRÍTICO-CRÍTICO-03.

Tempo	10'	20'	30'	40'	50'	60'
1'	0,5006526	0,5044971	0,5291495	0,4995819	0,4994610	0,5250379
2'	0,5002213	0,5019755	0,5060228	0,4971532	0,5009782	0,5335548
3'	0,5031054	0,4994445	0,5070944	0,4985640	0,5003531	0,5021195
4'	0,5122159	0,5009113	0,5044347	0,5061405	0,4997364	0,4968722
5'	0,5023653	0,5051567	0,5022467	0,5048889	0,4991279	0,4993717
6'	0,5014046	0,5091688	0,5014798	0,5038532	0,4985279	0,5015281
7'	0,5152238	0,5261335	0,5236919	0,5029775	0,4979369	0,5031500
8'	0,4974218	0,5058710	0,5219889	0,5020990	0,4965936	0,5043752
9'	0,5088700	0,4996376	0,5061997	0,5012191	0,5046578	0,4999986
10'	0,4998198	0,5047874	0,5188718	0,5003394	0,5107759	0,4976543
μEr3	0,4999238	0,4999559	0,5027928	0,4988187	0,4980859	0,4980842
Classificação Operacional	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO

A Figura 40 mostra a bomba operando com a pressão de sucção oscilando consideravelmente, devido a baixa demanda de entrada no vaso de sucção, gerado pela instabilidade de outra unidade dentro da mesma planta petroquímica.

**Figura 40. Trend do processo com oscilação no suprimento de produto.**

Constatou-se que o sistema especialista, utilizando as variáveis do processo, através do sistema de monitoramento de processo PI “Plant Information” e avaliados por comparação com os padrões gerados pelos especialistas em análise de processo de bombeamento em planta petroquímica retrataram o condição do risco relacionando ao início do processo de cavitação em todas as amostras que analisamos, onde foi possível realizar a conferência, através de inspeção em campo e análise dos especialistas no histórico de dados do software de monitoramento.

As amostras submetidas aos estudos foram coletadas, durante eventos transientes da unidade, gerados por manobras no processo, partida da planta,

enquadramento em novos parâmetros do controle de produção e demanda de mercado e até mesmo eventos não desejados ou esperados, como por exemplo, bolsas de gás presente no fluído bombeado.

O estudo total gerou quarenta e duas classificações do processo distribuídas em sete resultados por amostras, denominadas conforme a classificação mais alta em relação ao risco de cavitação, sendo que a amostra ALTO-NORMAL-01 foi coletada, durante o processo considerado estável e adequado e os demais em eventos transitórios considerados anormais do ponto de vista ao risco de cavitação no equipamento, conforme observado no Quadro 2.

Quadro 2. Classificação das amostra da J-1330.

	ALTO-CRÍTICO-01	ALTO-CRÍTICO-02	ALTO-MODERADO-01	ALTO-PERIGO-01	ALTO-CRÍTICO-03	ALTO-MODERADO-02	ALTO-NORMAL-01
10'	ALTO-CRÍTICO	BAIXO-NORMAL	ALTO-MODERADO	ALTO-PERIGO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-MODERADO	BAIXO-NORMAL
20'	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-MODERADO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-MODERADO	BAIXO-NORMAL
30'	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	BAIXO-MODERADO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	BAIXO-NORMAL	BAIXO-NORMAL
40'	ALTO-CRÍTICO	ALTO-MODERADO	BAIXO-MODERADO	ALTO-PERIGO	ALTO-CRÍTICO	BAIXO-MODERADO	BAIXO-NORMAL
50'	ALTO-CRÍTICO	BAIXO-NORMAL	BAIXO-MODERADO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	BAIXO-NORMAL	BAIXO-NORMAL
60'	ALTO-CRÍTICO	BAIXO-NORMAL	BAIXO-MODERADO	ALTO-CRÍTICO	ALTO-CRÍTICO	BAIXO-NORMAL	BAIXO-NORMAL

No Gráfico 6 é apresentado o resumo da distribuição dos resultados das análises classificações operacionais.

A classificação predominante das sete amostras foi o ALTO-CRÍTICO verificado em 42,86% das análises, seguido do NORMAL-BAIXO com 28,57%, BAIXO-MODERADO e ALTO-MODERADO com 11,90%, cada uma e finalizado por ALTO-PERIGO com 4,76%.

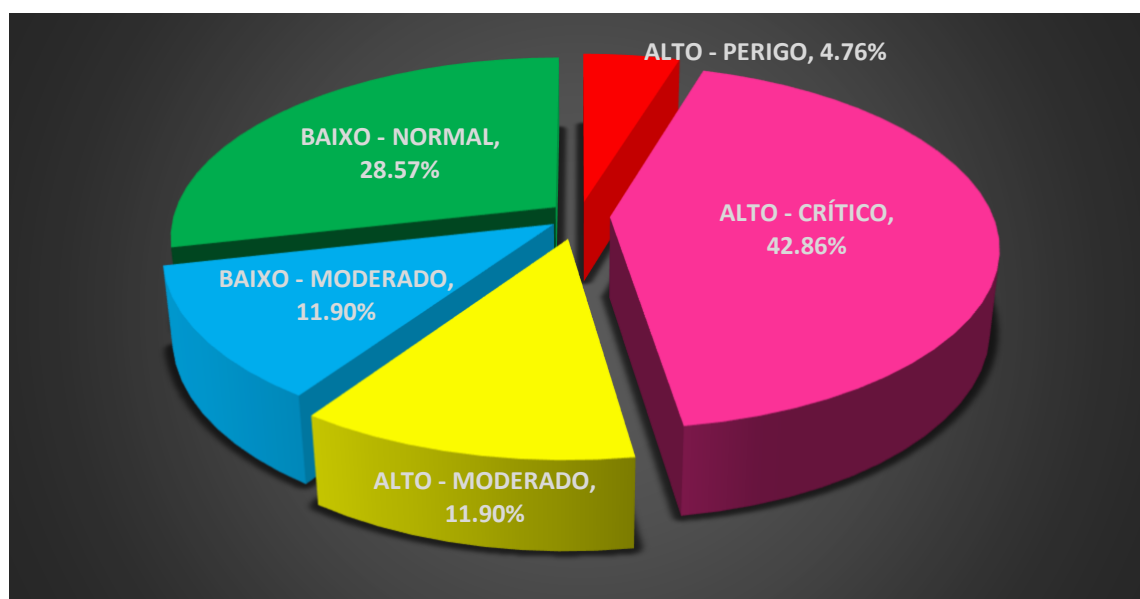


Gráfico 6. Distribuição dos resultados das análises por classificação.

O algoritmo analisador paraconsistente, mostrou-se, uma eficiente ferramenta para monitoramento do risco de cavitação, durante o processo de bombeio, utilizando bombas centrífugas, pois, os eventos de cavitação e descontrole do processo ocorreu oportunidade de intervenção ou ação de atenuação, de forma imediata, em 57% das amostras. Essa redução indica importantes ganhos, em termos, de confiabilidade operacional e custos de manutenção, gerando uma economia anual de 10% na intervenção de equipamentos dessa família (MOTWANI; JAIN; PATEL, 2013).

Comparando-se ao acompanhamento sem a Rede de Análise Paraconsistente para obter o mesmo resultado seria necessário que o operador estivesse observando exatamente esse sistema. No entanto, em algumas situações verifica-se que o operador durante o turno de trabalho, pode ficar responsável pelo acompanhamento de até 15 sistemas, com aproximadamente um total de 20 bombas centrífugas que são submetidas ao risco de cavitação. Sem o Sistema de monitoramento os alarmes emitidos pelo Sistema SCADA são acionados baseados em cada uma das variáveis. Desse modo a análise em modo convencional falha em algumas situações gerando muitos alarmes falsos. Dessa forma a implementação do Sistema de Monitoramento Paraconsistente oferecendo um monitoramento em tempo real baseado em 4 variáveis oferece possibilidades de gerar alarmes com mais confiabilidade sendo muito importante como ferramenta de apoio a operação visto que esta condição seja típica em áreas industriais.

Também o Sistema de Monitoramento Paraconsistente é dinâmico e fácil de ser configurado para as novas condições em que pode-se acrescentar outras variáveis as análises paraconsistente adequando o monitoramento a novo produto que exige outras condições de bombeio onde essa possibilidade pode se alterar.

Em relação, as linhas de pesquisa que utilizam controle avançado, inclusive com o controle de rotação, com a implementação do inversor, o presente trabalho, mostra-se, uma alternativa com custo reduzido de aplicação, pois não gera modificação nas instalações físicas e aquisição de *hardware*.

Com a implementação dessa ferramenta a especialização em análise de processo passa a não ser um pré-requisito obrigatório para o operador de painel e pode acompanhar, simultaneamente diferentes sistemas, sem decréscimo da qualidade da análise, informando rapidamente ao operador de campo os riscos de cavitação que a bomba centrífuga está submetida naquele momento.

Outro ponto de ganho é a normalização do método e resultado da análise, pois pode ocorrer alterações nos diagnósticos baseados nos fatores humanos de cada operador, inclusive relacionado ao conhecimento acumulado de cada um. Sendo inclusive um dos objetivos do LPA2v que trata de replicar de forma autônoma as melhores práticas e conhecimento técnico acumulado sobre determinado assunto.

A bomba centrífuga não apresentou defeito ou falha oriundo do processo de cavitação no período de acompanhamento que é compreendido de janeiro de 2019 até dezembro de 2021 com o algoritmo paraconsistente, sendo que a taxa anterior era de uma falha a cada, aproximadamente, dois anos, conforme figura 41.

	Data de referência ▼	Equipam.	Ordem
	07.02.2018	1220587	2016756930
	17.05.2016	1220587	2012914869
	28.10.2014	1220587	2012230013

Figura 41. Histórico de ordens de manutenção para a bomba centrífuga

4 CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou investigar como um modelo de análise paraconsistente para tomada de decisão, durante a operação de bomba centrífuga, pode auxiliar a detectar riscos de cavitação em bombas centrífugas e assim minimizar as perdas de produtividade, proporcionando maior nível de confiabilidade, na manutenção industrial no setor de refino de petróleo. O presente estudo apresentou contribuições teóricas e práticas para a área de monitoramento e tratamento de dados e nos procedimentos para monitorar e tomar decisões frente a riscos de cavitação em bombas centrífugas aplicadas em refinaria de petróleo. Do ponto de vista teórico, o estudo auxiliou na consolidação de aplicação de uma lógica não clássica capaz de tratar sinais contraditórios denominada Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores LPA2v. Para as análises e tratamentos dos dados foi implementada uma estrutura composta de algoritmos interligados compondo uma rede de análises de um sistema de monitoramento paraconsistente. Os resultados obtidos mostraram que os algoritmos fundamentados em LPA2v são eficientes nas abordagens de gerenciamento de processos para área industrial propostas na literatura e podem ser aplicados em áreas correlatas ao refino do petróleo. Do ponto de vista prático, esse estudo pode auxiliar os responsáveis pelo monitoramento e controle de processo, pois trata de elementos essenciais formando sistemas inteligentes que são necessários para o apoio oferecendo uma condução eficiente na operação de bombas centrífugas. De forma geral, visto em termos do processo industrial os resultados obtidos sugerem que as abordagens propostas na literatura tendem a ser sustentadas, ou seja, quando um processo é gerenciado, percebe-se melhoria na condição operacional e atuação com assertividade nas variáveis operacionais que comprometem a confiabilidade.

4.1 Trabalhos futuros

As pesquisas resultaram em um Sistema de monitoramento Paraconsistente em uma primeira versão que é capaz de coletar variáveis relacionadas a cavitação de bombas centrífugas e oferecer informações para a operação tomar decisões mais assertivas. Esta primeira versão pode ser acoplada a um sistema SCADA para a coleta de dados e mostrar em tela os resultados tanto em forma de gráficos como na

forma de *Score* oferecendo assim uma boa ferramenta computacional para tomada de decisão.

Mesmo utilizando 4 variáveis que evidenciaram o aparecimento de cavitação nas bombas centrífugas, é importante frisar, as limitações desse estudo, o qual não abordou de forma aprofundada todos os aspectos relacionados às etapas de monitoramento e controle operacional, tais como obstrução de filtros, variação da qualidade do petróleo. Ademais, os resultados aqui apresentados refletem diretamente evidências empíricas do caso analisado, sendo oportuno a aplicação da mesma abordagem em outros contextos. Portanto, novas pesquisas com a inclusão destas variáveis trata-se de oportunidades de futuros trabalhos que podem ser exploradas.

Sugere-se também para trabalhos futuros, o estudo de um algoritmo baseado em LPA2v com interligação ao sistema de controle de processo, gerando ajustes automáticos em abertura de válvula, controle de vazão e até mesmo comando do desligamento automático, a fim de evitar danos permanente ao sistema mecânico e evitando vazamento de fluido para ambiente externo, devido a ruptura do selo mecânico.

Recomenda-se, também, como trabalho futuro novas versões do Sistema de Monitoramento Paraconsistente com os ajustes nos parâmetros de trabalho do algoritmo paraconsistente e o tempo de resposta de cada classificação. Estes ajustes seriam baseados nas análises das informações do analisador paraconsistente, acumuladas ao longo do tempo. Portanto, com estas informações armazenadas em um banco de dados histórico teriam o intuito de melhorar os acertos na identificação do risco de cavitação.

REFERÊNCIAS

- BAGRI, A.; NETTO, R.; JHAVERI, D. Supervisory control and data acquisition. **International Journal of Computer Applications**, New York, v. 102, n. 10, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5120/17848-8797>
- BOFFI, P. *et al.* Coherent optical fiber interferometric sensor for incipient cavitation index detection. **Flow Measurement and Instrumentation**, [s. l.], v. 66, p. 37-43, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.11.005>.
- CARVALHO, A. *et al.* Roary Inverted Pendulum Identification for Control by Paraconsistent Neural Network. **IEEE Access**, New Jersey, v. 9, n. 74155-74167, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3080176>.
- ČDINA, M. Detection of cavitation phenomenon in a centrifugal pump using. *In*: **Mechanical Systems and Signal Processing**, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 1355-1347, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1006/mssp.2002.1514>.
- CIESLAK, M. Life cycle costs of pumping stations. **World Pumps**, Oxford, v. 2008, n. 505, p. 30-33, 2008. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(08\)70344-4](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(08)70344-4).
- DA SILVA FILHO, J. I. Algoritmo paraconsistente extrator de efeitos da contradição-ParaExtrctr. **Revista Seleção Documental do GLPA**, Santos, V. 4, n. 15, p. 21-25, 2009. Disponível em: <http://paralogike.com.br/wp-content/uploads/2018/08/Algoritmo-Paraconsistente-Extrator-de-efeitos-da-Contradicao-ParaExtrctr.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2021.
- DA SILVA FILHO, J. I. *et al.* Electric power system operation decision support by expert system built with paraconsistent annotated Logic. *In*: VIZUREANU, P. (ed.). **Advances in expert systems**. London: IntechOpen, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5772/51379>.
- DA SILVA FILHO, J. I. *et al.* Paraconsistent analysis network applied in the treatment of Raman spectroscopy data to support medical diagnosis of skin cancer. **Medical & Biological Engineering & Computing**, Stevenage, v. 54, n. 10, p. 1453-1467, Oct. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11517-016-1471-3>.
- DA SILVA FILHO, J. I. Introdução às células neurais artificiais paraconsistentes. **Revista Seleção Documental do GLPA**, Santos, v. 2, n. 8, p. 5-14, 2007. Disponível em: <http://paralogike.com.br/wp-content/uploads/2018/08/Introducao-as-Celulas-Neurais-Artificiais-Paraconsistentes.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2021.
- DA SILVA FILHO, J. I. Métodos de Aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores-LPA2v. **Revista Seleção Documental do GLPA**, Santos, v. 1, n. 1, p. 18-25, 2006. Disponível em: <http://paralogike.com.br/wp-content/uploads/2018/08/Logica-Paraconsistente-Anotada-com-anotacao-de-dois-valores-LPA2v.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2021.

DA SILVA FILHO, J. I. **Métodos de aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação com dois Valores (LPA2v) com construção de algoritmo e implementação de circuitos eletrônicos**. 1999. 226f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

DA SILVA FILHO, J. I. Treatment of uncertainties with algorithms of the paraconsistent annotated logic. **Journal of Intelligent Learning Systems and Applications**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 144-154, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4236/jilsa.2012.42014>.

DA SILVA FILHO, J. I.; ABE, J. M.; LAMBERT-TORRES, G. **Inteligência artificial com as redes de análises paraconsistentes**. São Paulo: LTC, 2008.

DE ALMEIDA, N. E. Os princípios de verdade no Livro IV da Metafísica de Aristóteles. **Princípios: Revista de Filosofia**, Natal, v. 15, n. 23, p. 5-63, 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/principios/article/view/452>. Acesso em: 22 jul. 2021.

FAROKHZAD, S. *et al.* Artificial neural network based classification of faults in centrifugal water pump. **Journal of Vibroengineering**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 1734-1744, 2012.

GUO, X. *et al.* Numerical and experimental investigations on the cavitation characteristics of a highspeed centrifugal pump with a splitter-blade inducer. **Journal of Mechanical Science and Technology**, Seoul, v. 29, n. 1, p. 259-267, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/S12206-014-1232-X>

HAFAIFA, A.; GUEMANA, M.; DAOUDI, A. Spectral analysis approach applied to the vibrations detection and isolation in centrifugal pump used in petroleum industry. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS ON TECHNICAL DIAGNOSTICS, 5., September 2012, Kraków, Poland. **Annals [...]**. Kraków: Univeristy of Science and Technology, 2012.

HAFAIFA, A.; GUEMANA, M.; DAOUDI, A. Spectral analysis approach applied to the vibrations detection and isolation in centrifugal pump used in petroleum industry. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS ON TECHNICAL DIAGNOSTICS, 5., September 2012, Kraków, Poland. **Annals [...]**. Kraków: Univeristy of Science and Technology, 2012.

HUGHES, A. **Electric motors and drives: fundamentals, types and applications**. Amsterdam: Newnes, 2013.

ILOTT, P. W.; GRIFFITHS, A. J. Fault diagnosis of pumping machinery using artificial neural networks. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**, London, v. 211, n. 3, p. 185-194, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1243/0954408971529665>.

INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION (ISA). **ISA RP75.23: considerations for Evaluating Control Valve Cavitation**. Pittsburgh: ISA, 1995.

KHAN, W. Z. *et al.* A reliable Internet of Things based architecture for oil and gas industry. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMMUNICATION TECHNOLOGY (ICACT)*, 19., 2017, Bongpyeong, South Korea. **Annals [...]**. New Jersey: IEEE, 2017. p. 705-710. DOI: <https://doi.org/10.23919/ICACT.2017.7890184>.

LARRALDE, E.; OCAMPO, R. Centrifugal pump selection process. **World Pumps**, Oxford, v. 2010, n. 2, p. 24-28, 2010. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(10\)70029-8](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(10)70029-8).

LI, X. *et al.* Entropy generation analysis for the cavitating head-drop characteristic of a centrifugal pump. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**, London, v. 232, n. 24, p. 4637-4646, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406217753458>.

LUO, Y. *et al.* Research on the induction motor current signature for centrifugal pump at cavitation condition. **Advances in Mechanical Engineering**, [London], v. 7, n. 11, p. 1-13, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814015617134>.

MOTWANI, K. H.; JAIN, S. V.; PATEL, R. N. Cost analysis of pump as turbine for pico hydropower plants: a case study. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 51, p. 721-726, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.103>.

NEVES, R. B.; PEREIRA, V.; COSTA, H. G. Auxílio multicritério à decisão aplicado ao planejamento e gestão na indústria de petróleo e gás. **Production**, v. 25, n. 1, p. 43-53, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132013005000060>.

RAJAKARUNAKARAN, S. *et al.* Artificial neural network approach for fault detection in rotary system. **Applied Soft Computing**, Amsterdam, v. 8, n. 1, p. 740-748, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.06.002>.

RATNAYAKE, R. M. C.; MARKESET, T. Technical integrity management: measuring HSE awareness using AHP in selecting a maintenance strategy. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 44-63, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552511011030327>.

SAKTHIVEL, N.; NAIR, B.; SUGUMARAN, V. Soft computing approach to fault diagnosis of centrifugal pump. **Applied Soft Computing**, Amsterdam, v. 12, n. 5, p. 1574-1581, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.12.009>.

SHAHZAD, A. *et al.* The protocol design and New approach for SCADA security enhancement during sensors broadcasting system. **Multimedia Tools and Applications**, [s. l.], v. 75, n. 22, p. 14641-14668, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-015-3050-2>.

STOPA, M. M.; CARDOSO FILHO, B. J. Load Torque Signature Analysis: An Alternative to MCSA to Detect Faults in Motor Driven Loads. *In: IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION (ECCE)*, 2012, Raleigh, NC. **Annals [...]**. New Jersey: IEEE, 2012. p. 4029-4036. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342276>.

STOPA, M. M.; CARDOSO FILHO, B. J.; MARTINEZ, C. B. Detection of Incipient Cavitation Phenomenon in a Centrifugal Pump. *In: IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING (IAS)*, 2012, Las Vegas. **Annals [...]**. New Jersey: IEEE, 2012. p. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2012.6374080>.

TAN, L. *et al.* Numerical simulation of unsteady cavitation flow in a centrifugal pump at off-design conditions. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**, London, v. 228, n. 11, 1994-2006, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406213514573>.

TORRES, R. C. *et al.* Autonomous Mobile Robot Emmy III. **Jornal Intechopen**, [Brasil], p. 1-3, 2011.

ULANICKI, B.; PICINALI, L.; JANUS, T. Measurements and Analysis of Cavitation in a Pressure Reducing Valve During Operation: a Case Study. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 119, p. 270-279, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.886>.

WALLACE, C. *et al.* Integrated condition monitoring for plant-wide prognostics. **Chemical Engineering Transactions**, Milano, v. 33, p. 859-864, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1333144>.

WENT, B. The systems approach to reducing carbon emissions. **World Pumps**, Oxford, v. 2008, n. 500, p. 52-55, 2008. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(08\)70153-6](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(08)70153-6).

XUE, H. T. *et al.* Intelligent Diagnosis Method for Centrifugal Pump System Using Vibration Signal and Support Vector Machine. **Shock and Vibration**, [London], v. 2014, p. 407570, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/407570>.

YEDIDIAH, S. G. An overview of methods for calculating the head of a rotordynamic impeller and their practical significance. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal Process Mechanical Engineering**, London, v. 217, n. 3, p. 221-232, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1243/095440803322328872>.

YEDIDIAH, S. G. Effects of pump geometry on the flow within a centrifugal impeller. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, London, v. 216, n. 11, p. 1145-1149, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1243/095440602761609506>.

APÊNDICE A – Exemplo da obtenção dos dados de processo, através do *PI Data Link*.

P.Sucção (kgf/cm²)				P.descarga (kgf/cm²)				Vazão (m³/dia)			Corrente (A)		
Data	Valor (μ)	μ2	λ2	Data	Valor	μ4	λ4	Data	Valor	μ3	Data	Valor	μ1
24/6/20 23:00	0,882865846	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:00	10,73500252	0,0854831	0,9145169	24/6/20 23:00	1812,407	0,2289213	24/6/20 23:00	66,60166931	0,0000000
24/6/20 23:01	0,882612646	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:01	10,73477173	0,0855575	0,9144425	24/6/20 23:01	1812,298	0,2291527	24/6/20 23:01	64,66899872	0,0495213
24/6/20 23:02	0,882350087	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:02	10,73454094	0,0856320	0,9143680	24/6/20 23:02	1812,19	0,2293839	24/6/20 23:02	64,84792328	0,0400041
24/6/20 23:03	0,882087529	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:03	10,73431015	0,0857064	0,9142936	24/6/20 23:03	1812,081	0,2296153	24/6/20 23:03	66,42875671	0,0000000
24/6/20 23:04	0,88182497	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:04	10,73407936	0,0857809	0,9142191	24/6/20 23:04	1811,972	0,2298465	24/6/20 23:04	66,86174011	0,0000000
24/6/20 23:05	0,881562412	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:05	10,73384857	0,0858553	0,9141447	24/6/20 23:05	1811,863	0,2300779	24/6/20 23:05	67,29472351	0,0000000
24/6/20 23:06	0,881299853	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:06	10,73361778	0,0859297	0,9140703	24/6/20 23:06	1811,755	0,2303090	24/6/20 23:06	67,5405426	0,0000000
24/6/20 23:07	0,881037235	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:07	10,73338699	0,0860042	0,9139958	24/6/20 23:07	1811,646	0,2305402	24/6/20 23:07	65,93952179	0,0000000
24/6/20 23:08	0,880774677	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:08	10,7331562	0,0860786	0,9139214	24/6/20 23:08	1811,537	0,2307716	24/6/20 23:08	66,5672226	0,0000000
24/6/20 23:09	0,880512118	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:09	10,73292542	0,0861531	0,9138469	24/6/20 23:09	1811,429	0,2310027	24/6/20 23:09	67,1949234	0,0000000
24/6/20 23:10	0,88024956	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:10	10,73269463	0,0862275	0,9137725	24/6/20 23:10	1811,32	0,2312342	24/6/20 23:10	67,82261658	0,0000000
24/6/20 23:11	0,879793346	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:11	10,73246384	0,0863020	0,9136980	24/6/20 23:11	1811,211	0,2314653	24/6/20 23:11	68,45031738	0,0000000
24/6/20 23:12	0,879128814	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:12	10,73223305	0,0863764	0,9136236	24/6/20 23:12	1811,103	0,2316967	24/6/20 23:12	67,82507324	0,0000000
24/6/20 23:13	0,878464341	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:13	10,73200226	0,0864509	0,9135491	24/6/20 23:13	1810,994	0,2319279	24/6/20 23:13	66,44150543	0,0000000
24/6/20 23:14	0,877799809	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:14	10,73177147	0,0865253	0,9134747	24/6/20 23:14	1810,885	0,2321593	24/6/20 23:14	66,63189697	0,0000000
24/6/20 23:15	0,877135277	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:15	10,73154068	0,0865998	0,9134002	24/6/20 23:15	1810,776	0,2323904	24/6/20 23:15	66,82228851	0,0000000
24/6/20 23:16	0,876470745	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:16	10,73130989	0,0866742	0,9133258	24/6/20 23:16	1810,668	0,2326216	24/6/20 23:16	67,01268005	0,0000000
24/6/20 23:17	0,875806212	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:17	10,7310791	0,0867487	0,9132513	24/6/20 23:17	1810,559	0,2328530	24/6/20 23:17	67,20307159	0,0000000
24/6/20 23:18	0,87514168	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:18	10,73084831	0,0868231	0,9131769	24/6/20 23:18	1810,45	0,2330842	24/6/20 23:18	66,59343719	0,0000000
24/6/20 23:19	0,874477148	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:19	10,73061752	0,0868976	0,9131024	24/6/20 23:19	1810,342	0,2333156	24/6/20 23:19	65,40894318	0,0101626
24/6/20 23:20	0,873812616	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:20	10,73038673	0,0869720	0,9130280	24/6/20 23:20	1810,233	0,2335467	24/6/20 23:20	65,79399109	0,0000000
24/6/20 23:21	0,873148084	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:21	10,73015594	0,0870465	0,9129535	24/6/20 23:21	1810,124	0,2337782	24/6/20 23:21	67,16552734	0,0000000
24/6/20 23:22	0,872483552	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:22	10,72992516	0,0871209	0,9128791	24/6/20 23:22	1810,016	0,2340093	24/6/20 23:22	66,93480682	0,0000000
24/6/20 23:23	0,871819079	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:23	10,72969437	0,0871954	0,9128046	24/6/20 23:23	1809,907	0,2342405	24/6/20 23:23	66,7040863	0,0000000
24/6/20 23:24	0,87168177	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:24	10,72946358	0,0872698	0,9127302	24/6/20 23:24	1809,798	0,2344719	24/6/20 23:24	66,47337341	0,0000000
24/6/20 23:25	0,871728539	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:25	10,72923279	0,0873443	0,9126557	24/6/20 23:25	1809,69	0,2347030	24/6/20 23:25	66,24265289	0,0000000
24/6/20 23:26	0,871688843	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:26	10,729002	0,0874187	0,9125813	24/6/20 23:26	1809,581	0,2349344	24/6/20 23:26	66,01193327	0,0000000
24/6/20 23:27	0,871649146	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:27	10,72877121	0,0874932	0,9125068	24/6/20 23:27	1809,472	0,2351656	24/6/20 23:27	65,78121185	0,0000000
24/6/20 23:28	0,871609509	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:28	10,72854042	0,0875676	0,9124324	24/6/20 23:28	1809,363	0,2353970	24/6/20 23:28	65,55049896	0,0026330
24/6/20 23:29	0,871569812	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:29	10,72830963	0,0876421	0,9123579	24/6/20 23:29	1809,255	0,2356282	24/6/20 23:29	65,64714813	0,0000000
24/6/20 23:30	0,871530116	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:30	10,7280798	0,0877162	0,9122838	24/6/20 23:30	1809,146	0,2358596	24/6/20 23:30	65,97861481	0,0000000
24/6/20 23:31	0,871490479	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:31	10,72784901	0,0877906	0,9122094	24/6/20 23:31	1809,037	0,2360907	24/6/20 23:31	66,31007385	0,0000000
24/6/20 23:32	0,871450782	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:32	10,72761822	0,0878651	0,9121349	24/6/20 23:32	1808,929	0,2363219	24/6/20 23:32	66,6415329	0,0000000
24/6/20 23:33	0,871411085	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:33	10,72738743	0,0879395	0,9120605	24/6/20 23:33	1808,82	0,2365533	24/6/20 23:33	66,97299194	0,0000000
24/6/20 23:34	0,871371448	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:34	10,72715664	0,0880140	0,9119860	24/6/20 23:34	1808,711	0,2367845	24/6/20 23:34	67,30445099	0,0000000
24/6/20 23:35	0,871331751	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:35	10,72692585	0,0880884	0,9119116	24/6/20 23:35	1808,603	0,2370159	24/6/20 23:35	67,63591003	0,0000000
24/6/20 23:36	0,871292055	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:36	10,72669506	0,0881629	0,9118371	24/6/20 23:36	1808,494	0,2372470	24/6/20 23:36	67,96736908	0,0000000
24/6/20 23:37	0,871252418	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:37	10,72646427	0,0882373	0,9117627	24/6/20 23:37	1808,385	0,2374784	24/6/20 23:37	65,38227081	0,0115813
24/6/20 23:38	0,871212721	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:38	10,72623348	0,0883118	0,9116882	24/6/20 23:38	1808,276	0,2377096	24/6/20 23:38	65,86032104	0,0000000
24/6/20 23:39	0,871173024	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:39	10,72600269	0,0883862	0,9116138	24/6/20 23:39	1808,168	0,2379408	24/6/20 23:39	66,33837128	0,0000000
24/6/20 23:40	0,871133387	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:40	10,7257719	0,0884607	0,9115393	24/6/20 23:40	1808,059	0,2381722	24/6/20 23:40	66,81641388	0,0000000
24/6/20 23:41	0,871166348	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:41	10,72554111	0,0885351	0,9114649	24/6/20 23:41	1807,95	0,2384033	24/6/20 23:41	67,29446411	0,0000000
24/6/20 23:42	0,871277332	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:42	10,72531033	0,0886096	0,9113904	24/6/20 23:42	1807,842	0,2386347	24/6/20 23:42	67,64521027	0,0000000
24/6/20 23:43	0,871388316	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:43	10,72507954	0,0886840	0,9113160	24/6/20 23:43	1807,733	0,2388659	24/6/20 23:43	66,57826996	0,0000000
24/6/20 23:44	0,8714993	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:44	10,72484875	0,0887585	0,9112415	24/6/20 23:44	1807,624	0,2390973	24/6/20 23:44	67,43987274	0,0000000
24/6/20 23:45	0,871610343	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:45	10,72461796	0,0888329	0,9111671	24/6/20 23:45	1807,516	0,2393285	24/6/20 23:45	67,48932648	0,0000000
24/6/20 23:46	0,871721327	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:46	10,72438717	0,0889074	0,9110926	24/6/20 23:46	1807,407	0,2395599	24/6/20 23:46	65,96424103	0,0000000
24/6/20 23:47	0,871832311	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:47	10,72415638	0,0889818	0,9110182	24/6/20 23:47	1807,298	0,2397910	24/6/20 23:47	66,78179169	0,0000000
24/6/20 23:48	0,871943295	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:48	10,72392559	0,0890563	0,9109437	24/6/20 23:48	1807,19	0,2400222	24/6/20 23:48	67,4879837	0,0000000
24/6/20 23:49	0,872054279	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:49	10,7236948	0,0891307	0,9108693	24/6/20 23:49	1807,081	0,2402536	24/6/20 23:49	66,90979767	0,0000000
24/6/20 23:50	0,872165263	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:50	10,72346401	0,0892052	0,9107948	24/6/20 23:50	1806,972	0,2404847	24/6/20 23:50	66,33161163	0,0000000
24/6/20 23:51	0,872276247	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:51	10,72323322	0,0892796	0,9107204	24/6/20 23:51	1806,863	0,2407162	24/6/20 23:51	65,75343323	0,0000000
24/6/20 23:52	0,87238729	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:52	10,72300243	0,0893541	0,9106459	24/6/20 23:52	1806,755	0,2409473	24/6/20 23:52	65,17524719	0,0225932
24/6/20 23:53	0,872498274	0,0000000	1,0000000	24/6/20 23:53	10,72277164	0,0894285	0,9105715	24/6/20 23:53	1806,646	0,2411787	24/6/20 23:53	66,26594543	0,0000000
24/6/20 23:54	0,8												

APÊNDICE B – Exemplo de processamento dos dados de processo NAP

Data	NAP1 - P(μ_1, λ_2)					NAP2 - P(μ_3, λ_4)					NAP3 - P($\mu_{Er1}, (1-\mu_{Er2})$)				
	Gc	Gct	d	Gcr	μ_{Er1}	Gc	Gct	d	Gcr	μ_{Er2}	Gc	Gct	d	Gcr	μ_{Er3}
24/6/20 23:00	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6855956	-0,0854831	0,3258181	-0,67418	0,162909	-0,83709	-0,67418	0,693585	-0,30641	0,346793
24/6/20 23:01	-0,9504787	0,0495213	0,070034	-0,92997	0,035017	-0,6852898	-0,0155237	0,3150929	-0,68491	0,157546	-0,80744	-0,68491	0,711462	-0,28854	0,355731
24/6/20 23:02	-0,9599959	0,0400041	0,056574	-0,94343	0,028287	-0,6849842	-0,0290576	0,3163532	-0,68365	0,158177	-0,81354	-0,68365	0,70862	-0,29138	0,35431
24/6/20 23:03	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6846783	-0,0857064	0,3267619	-0,67324	0,163381	-0,83662	-0,67324	0,692779	-0,30722	0,34639
24/6/20 23:04	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6843727	-0,0857809	0,3270764	-0,67292	0,163538	-0,83646	-0,67292	0,692511	-0,30749	0,346255
24/6/20 23:05	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6840668	-0,0858553	0,3273910	-0,67261	0,163696	-0,8363	-0,67261	0,692242	-0,30776	0,346121
24/6/20 23:06	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6837612	-0,0859297	0,3277055	-0,67229	0,163853	-0,83615	-0,67229	0,691974	-0,30803	0,345987
24/6/20 23:07	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6834556	-0,0860042	0,3280199	-0,67198	0,16401	-0,83599	-0,67198	0,691706	-0,30829	0,345853
24/6/20 23:08	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6831498	-0,0860786	0,3283346	-0,67167	0,164167	-0,83583	-0,67167	0,691437	-0,30856	0,345719
24/6/20 23:09	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6828442	-0,0861531	0,3286490	-0,67135	0,164325	-0,83568	-0,67135	0,691169	-0,30883	0,345585
24/6/20 23:10	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6825383	-0,0862275	0,3289637	-0,67104	0,164482	-0,83552	-0,67104	0,690901	-0,3091	0,34545
24/6/20 23:11	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6822327	-0,0863020	0,3292781	-0,67072	0,164639	-0,83536	-0,67072	0,690633	-0,30937	0,345316
24/6/20 23:12	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6819268	-0,0863764	0,3295928	-0,67041	0,164796	-0,8352	-0,67041	0,690365	-0,30964	0,345182
24/6/20 23:13	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6816212	-0,0864509	0,3299072	-0,67009	0,164954	-0,83505	-0,67009	0,690097	-0,3099	0,345049
24/6/20 23:14	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6813154	-0,0865253	0,3302219	-0,66978	0,165111	-0,83489	-0,66978	0,689829	-0,31017	0,344915
24/6/20 23:15	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6810098	-0,0865998	0,3305364	-0,66946	0,165268	-0,83473	-0,66946	0,689562	-0,31044	0,344781
24/6/20 23:16	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6807042	-0,0866742	0,3308508	-0,66915	0,165425	-0,83457	-0,66915	0,689294	-0,31071	0,344647
24/6/20 23:17	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6803983	-0,0867487	0,3311655	-0,66883	0,165583	-0,83442	-0,66883	0,689026	-0,31097	0,344513
24/6/20 23:18	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6800927	-0,0868231	0,3314799	-0,66852	0,16574	-0,83426	-0,66852	0,688759	-0,31124	0,344379
24/6/20 23:19	-0,9898374	0,0101626	0,014372	-0,98563	0,007186	-0,6797868	-0,0725255	0,3283236	-0,67168	0,164162	-0,82865	-0,67168	0,693188	-0,30681	0,346594
24/6/20 23:20	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6794812	-0,0869720	0,3321090	-0,66789	0,166055	-0,83395	-0,66789	0,688224	-0,31178	0,344112
24/6/20 23:21	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6791754	-0,0870465	0,3324237	-0,66758	0,166212	-0,83379	-0,66758	0,687957	-0,31204	0,343978
24/6/20 23:22	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6788698	-0,0871209	0,3327381	-0,66726	0,166369	-0,83363	-0,66726	0,68769	-0,31231	0,343845
24/6/20 23:23	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6785642	-0,0871954	0,3330526	-0,66695	0,166526	-0,83347	-0,66695	0,687423	-0,31258	0,343711
24/6/20 23:24	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6782583	-0,0872698	0,3333673	-0,66663	0,166684	-0,83332	-0,66663	0,687155	-0,31284	0,343578
24/6/20 23:25	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6779527	-0,0873443	0,3336817	-0,66632	0,166841	-0,83316	-0,66632	0,686889	-0,31311	0,343444
24/6/20 23:26	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6776468	-0,0874187	0,3339964	-0,666	0,166998	-0,833	-0,666	0,686622	-0,31338	0,343311
24/6/20 23:27	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6773412	-0,0874932	0,3343108	-0,66569	0,167155	-0,83284	-0,66569	0,686355	-0,31365	0,343177
24/6/20 23:28	-0,9973670	0,0026330	0,003724	-0,99628	0,001862	-0,6770354	-0,0883439	0,3336704	-0,66633	0,166835	-0,83313	-0,66633	0,687353	-0,31265	0,343676
24/6/20 23:29	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6767298	-0,0876421	0,3349399	-0,66506	0,16747	-0,83253	-0,66506	0,685821	-0,31418	0,342911
24/6/20 23:30	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6764242	-0,0877162	0,3352543	-0,66475	0,167627	-0,83237	-0,66475	0,685555	-0,31444	0,342778
24/6/20 23:31	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6761186	-0,0877906	0,3355687	-0,66443	0,167784	-0,83222	-0,66443	0,685289	-0,31471	0,342644
24/6/20 23:32	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6758130	-0,0878651	0,3358831	-0,66412	0,167942	-0,83206	-0,66412	0,685022	-0,31498	0,342511
24/6/20 23:33	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6755072	-0,0879395	0,3361978	-0,6638	0,168099	-0,8319	-0,6638	0,684756	-0,31524	0,342378
24/6/20 23:34	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6752016	-0,0880140	0,3365122	-0,66349	0,168256	-0,83174	-0,66349	0,68449	-0,31551	0,342245
24/6/20 23:35	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6748957	-0,0880884	0,3368269	-0,66317	0,168413	-0,83159	-0,66317	0,684223	-0,31578	0,342112
24/6/20 23:36	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6745901	-0,0881629	0,3371414	-0,66286	0,168571	-0,83143	-0,66286	0,683957	-0,31604	0,341979
24/6/20 23:37	-0,9884187	0,0115813	0,016378	-0,98362	0,008189	-0,6742842	-0,0718588	0,3335483	-0,66645	0,166774	-0,82504	-0,66645	0,689036	-0,31096	0,344518
24/6/20 23:38	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6739786	-0,0883118	0,3377705	-0,66223	0,168885	-0,83111	-0,66223	0,683425	-0,31657	0,341713
24/6/20 23:39	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6736730	-0,0883862	0,3380849	-0,66192	0,169042	-0,83096	-0,66192	0,68316	-0,31684	0,341558
24/6/20 23:40	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6733672	-0,0884607	0,3383996	-0,6616	0,1692	-0,8308	-0,6616	0,682894	-0,31711	0,341447
24/6/20 23:41	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6730616	-0,0885351	0,3387141	-0,66129	0,169357	-0,83064	-0,66129	0,682628	-0,31737	0,341314
24/6/20 23:42	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6727557	-0,0886096	0,3390287	-0,66097	0,169514	-0,83049	-0,66097	0,682362	-0,31764	0,341181
24/6/20 23:43	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6724501	-0,0886840	0,3393432	-0,66066	0,169672	-0,83033	-0,66066	0,682097	-0,3179	0,341048
24/6/20 23:44	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6721442	-0,0887585	0,3396579	-0,66034	0,169829	-0,83017	-0,66034	0,681831	-0,31817	0,340916
24/6/20 23:45	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6718386	-0,0888329	0,3399723	-0,66003	0,169986	-0,83001	-0,66003	0,681566	-0,31843	0,340783
24/6/20 23:46	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6715328	-0,0889074	0,3402870	-0,65971	0,170144	-0,82986	-0,65971	0,6813	-0,3187	0,34065
24/6/20 23:47	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6712272	-0,0889818	0,3406014	-0,6594	0,170301	-0,8297	-0,6594	0,681035	-0,31896	0,340518
24/6/20 23:48	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6709216	-0,0890563	0,3409159	-0,65908	0,170458	-0,82954	-0,65908	0,68077	-0,31923	0,340385
24/6/20 23:49	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6706157	-0,0891307	0,3412306	-0,65877	0,170615	-0,82938	-0,65877	0,680505	-0,3195	0,340252
24/6/20 23:50	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6703101	-0,0892052	0,3415450	-0,65845	0,170773	-0,82923	-0,65845	0,68024	-0,31976	0,34012
24/6/20 23:51	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6700042	-0,0892796	0,3418597	-0,65814	0,17093	-0,82907	-0,65814	0,679975	-0,32003	0,339987
24/6/20 23:52	-0,9774068	0,0225932	0,031952	-0,96805	0,015976	-0,6696986	-0,0574024	0,3352522	-0,66475	0,167626	-0,8164	-0,66475	0,689637	-0,31036	0,344819
24/6/20 23:53	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6693928	-0,0894285	0,3424888	-0,65751	0,171244	-0,82876	-0,65751	0,679445	-0,32055	0,339723
24/6/20 23:54	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6690872	-0,0895029	0,3428033	-0,6572	0,171402	-0,8286	-0,6572	0,67918	-0,32082	0,33959
24/6/20 23:55	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6687813	-0,0895774	0,3431180	-0,65688	0,171559	-0,82844	-0,65688	0,678916	-0,32108	0,339458
24/6/20 23:56	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6684757	-0,0896518	0,3434324	-0,65657	0,171716	-0,82828	-0,65657	0,678651	-0,32135	0,339326
24/6/20 23:57	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6681701	-0,0897263	0,3437468	-0,65625	0,171873	-0,82813	-0,65625	0,678387	-0,32161	0,339193
24/6/20 23:58	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6678642	-0,0898007	0,3440615	-0,65594	0,172031	-0,82797	-0,65594	0,678122	-0,32188	0,339061
24/6/20 23:59	-1,0000000	0,0000000	0	-1	0	-0,6675586	-0,0898752	0,3443760	-0,65562	0,172188	-0,82781	-0,65562	0,67		

APÊNDICE C – Exemplo de valores dos graus de evidência da saída da rede
NAP

	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	μEr	Classificação Operacional
10'	0,34679264	0,355731079	0,354309795	0,346389533	0,346255309	0,346121015	0,345986866	0,345852754	0,345718572	0,345584535	0,345752547	BAIXO-NORMAL
20'	0,345450428	0,345316465	0,345182433	0,345048545	0,344914588	0,344780775	0,344647	0,344513156	0,344379456	0,346593862	0,344546622	BAIXO-NORMAL
30'	0,344112063	0,34397837	0,343844822	0,343711311	0,343577732	0,343444298	0,343310795	0,343177436	0,343676373	0,342910728	0,343210805	BAIXO-NORMAL
40'	0,342777537	0,342644332	0,342511165	0,34237793	0,342244839	0,342111681	0,341978668	0,344517806	0,34171265	0,341579753	0,341779174	BAIXO-NORMAL
50'	0,341446788	0,341313967	0,34118108	0,341048338	0,340915528	0,340782863	0,340650132	0,340517545	0,340384997	0,340252383	0,34041815	BAIXO-NORMAL
60'	0,340119913	0,339987377	0,344818546	0,339722529	0,339590216	0,339457838	0,339325604	0,33919341	0,33906115	0,338929035	0,33909422	BAIXO-NORMAL

mierR	0,33909422
	0,33909422

Mt>value	Lbda>value	Dc	Dct	Mie	D	Dcr	Mier
0.339	0.655	-0.316	-0.006	0.342	0.684	-0.316	0.342
0.339	0.658	-0.319	-0.003	0.340	0.681	-0.319	0.340
0.339	0.660	-0.320	-0.001	0.340	0.680	-0.320	0.340
0.339	0.660	-0.321	-0.001	0.339	0.679	-0.321	0.339
0.339	0.660	-0.321	-0.001	0.339	0.679	-0.321	0.339
0.339	0.661	-0.321	0.000	0.339	0.679	-0.321	0.339
0.339	0.661	-0.322	0.000	0.339	0.678	-0.322	0.339
0.339	0.661	-0.322	0.000	0.339	0.678	-0.322	0.339
0.339	0.661	-0.322	0.000	0.339	0.678	-0.322	0.339