

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o
texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir de
02/06/2023.

Oswaldo Ishizava

**ANÁLISE DA OXIGENAÇÃO E DA ACIDEMIA FETAL
RECONHECIDAS POR MEIO DA VARIABILIDADE DE CURTO
PRAZO DA FREQUÊNCIA CARDÍACA FETAL**

Ilha Solteira
2021

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Oswaldo Ishizava

**ANÁLISE DA OXIGENAÇÃO E DA ACIDEMIA FETAL
RECONHECIDAS POR MEIO DA VARIABILIDADE DE CURTO
PRAZO DA FREQUÊNCIA CARDÍACA FETAL**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP -
Campus de Ilha Solteira, para a obtenção do título de Doutor
em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação

Orientador: Prof. Dr. Jozué Vieira Filho

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- I79a Ishizava, Osvaldo.
Análise da oxigenação e da acidez fetal reconhecidas por meio da
variabilidade de curto prazo da frequência cardíaca fetal / Osvaldo Ishizava. --
Ilha Solteira: [s.n.], 2021
87 f. : il.
- Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia
de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação , 2021
- Orientador: Jozué Vieira Filho
Inclui bibliografia
1. Variabilidade de curto prazo. 2. Acidemia fetal. 3. Monitoramento da
frequência cardíaca fetal. 4. Análise de características. 5. Engenharia
paraconsistente de características.


Raiane da Silva Santos

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ANÁLISE DA OXIGENAÇÃO E ACIDEMIA FETAL RECONHECIDAS POR MEIO DA VARIABILIDADE DE CURTO PRAZO DA FREQUÊNCIA CARDÍACA FETAL

AUTOR: OSVALDO ISHIZAVA

ORIENTADOR: JOZUE VIEIRA FILHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JOZUE VIEIRA FILHO (Participação Virtual)
Coordenadoria Executiva / Câmpus Experimental de São João da Boa Vista - UNESP

Prof. Dr. APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Profa. Dra. SUELY CUNHA AMARO MANTOVANI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. MARCO APARECIDO QUEIROZ DUARTE (Participação Virtual)
Departamento de Matemática / Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul - UEMS

Prof. Dr. EVERTHON SILVA FONSECA (Participação Virtual)
Setor Indústria / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP

Ilha Solteira, 02 de junho de 2021



DEDICATÓRIA

Agradeço à Deus, minha esposa Cristiane, meus filhos, netas e todos que direta ou indiretamente participaram desta jornada, apoiando, confiando, incentivando e inspirando a cada instante deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a Deus, todos os familiares, amigos, professores, colaboradores, funcionários da FEIS-UNESP, IBILCE-UNESP, CAMF e Santa Casa de São José do Rio Preto, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste estudo. Em especial, dedico meus agradecimentos:

- A Deus, por ter me dado força e saúde para chegar até aqui;
- À minha esposa Cristiane pelo amor, apoio, confiança, fonte da inspiração deste estudo e incentivo em todos os momentos mais difíceis;
- Aos meus filhos Daniel, Alexandre, Amanda, Leonardo, Felipe e Matheus e minhas netas Cecília e Alice pelo amor, carinho, apoio, inspiração e incentivo que tenho recebido;
- Ao Prof. Dr. Jozué Vieira Filho, por todo ensinamento, incentivo, confiança, orientação e persistência ao longo destes anos de convivência;
- Ao Prof. Dr. Rodrigo Capobianco Guido, por todo ensinamento, incentivo, confiança, orientação, sobriedade e acima de tudo paciência;
- Ao Prof. Dr. Guaraci Silveira Garcia, responsável pela motivação e inspiração deste estudo devido sua dedicação e conhecimento na especialidade, pelo acompanhamento nas pesquisas, sugestões e incentivo;
- Aos meus amigos e colegas dos laboratórios que de forma direta ou indiretamente contribuíram para a execução deste estudo;
- Às funcionárias do Centro de Avaliação Materno Fetal - CAMF, em especial à Gislaine Fátima Cicone, pela colaboração nas coletas dos sinais cardiotocográficos;
- Ao Dr. Marcos Antônio Lelis Moreira Filho - Médico Ginecologista, chefe do Departamento de Ginecologia e Obstetrícia da Santa Casa de São José do Rio Preto, pela colaboração e incentivo nas coletas dos sinais cardiotocográficos;
- Às funcionárias do Centro Obstétrico da Santa Casa de São José do Rio Preto, em especial à Daniele, Maiara, Gilmara, Neusa e demais colaboradores(as), pelo auxílio nas coletas dos sinais cardiotocográficos e sangue do cordão umbilical, que foram fundamentais para este estudo.
- *"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001"*

RESUMO

Neste trabalho, são apresentados o desenvolvimento a implementação de um algoritmo dedicado a investigar a correlação entre a variabilidade de curto prazo (VCP) da frequência cardíaca fetal (FCF) e os níveis de oxigenação e de acidemia fetal coletados no sangue da artéria umbilical. Os sinais dos batimentos cardíacos fetais foram coletados utilizando um cardiotocógrafo computadorizado, para a obtenção dos vetores de características (VCs) baseados nos conceitos de energia, taxa de cruzamentos por zero (ZCR), entropia e suas respectivas massas. Posteriormente, para a análise dos VCs foi utilizado os recursos da engenharia paraconsistente de características (EPC) para definir o grupo de VCs ideais, apontando para a melhor separação existente entre duas classes, isto é, VCs de gestações anormais e normais, caracterizando assim a correlação procurada para predição da oxigenação e da acidemia fetal. Foram utilizados os dados brutos selecionados sinais do batimento cardíaco fetal, considerando-se sinais de gestações consideradas anormais com pH inferior a 7,20 e sinais de gestações consideradas normais com pH superior a 7,20. Com o processamento destes sinais considerados anormais e normais, obteve-se a matriz de confusão com 81,67% de acurácia, com a aplicação de procedimento de validação cruzada em que 50% dos FVs para cada classe foi usado para treinamento e o restante 50% foi usado para teste, apresentando um significativo resultado a partir desta análise, podendo ser considerado um excelente avanço de nascimento com sucesso.

Palavras-chave: Variabilidade de curto prazo. Acidemia fetal. Monitoramento da frequência cardíaca fetal. Análise de características. Engenharia paraconsistente de características.

ABSTRACT

In this work, the development and implementation of an algorithm dedicated to investigating the correlation between short-term variability (SVC) of fetal heart rate (FHR) and levels of oxygenation and fetal acidemia collected in umbilical artery blood are presented. The fetal heart rate signals were collected using a computerized cardiotocograph to obtain characteristic vectors (FVs) based on the concepts of energy, zero crossing rate (ZCR), entropy and their respective masses. Subsequently, for the analysis of the FVs, the resources of paraconsistent engineering of characteristics (PEC) were used to define the group of ideal FVs, pointing to the best existing separation between two classes, that is, VCs of abnormal and normal pregnancies, thus characterizing the correlation sought for prediction of fetal oxygenation and acidemia. Raw data selected for fetal heartbeat signals were used, considering signs of pregnancies considered abnormal with a pH lower than 7.20 and signs of pregnancies considered normal with a pH higher than 7.20. With the processing of these signals considered abnormal and normal, the confusion matrix was obtained with 81.67% accuracy, with the application of a cross validation procedure in which 50% of the FVs for each class was used for training and the remaining 50% was used for testing, showing a significant result from this analysis, and can be considered an excellent successful birth advance.

Keywords: Short term variability. Fetal acidemia. Fetal heart rate monitoring. Features analysis. Paraconsistent engineering of characteristics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo unidimensional para A_3 , com janela $w_i[\cdot]$ de comprimento L_{wi} , para $i = 0, 1, 2, 3, \dots, T - 1$	30
Figura 2 – Cossenóide e seus cruzamentos por zero	30
Figura 3 – Onda composta: onda quadrada e suas harmônicas.	32
Figura 4 – Exemplo 1D para B3, da janela $w_i[\cdot]$, para $i = 0, 1, 2, 3, \dots, T - 1$, com comprimento L_{wi} , atingindo $TC\%$ dos ZCRs de $s[\cdot]$	33
Figura 5 – Duas ondas quadradas: limpa e com ruído, respectivamente desenhadas em vermelho e azul.	35
Figura 6 – Estrutura para obtenção da entropia (H)	38
Figura 7 – Combinando recursos baseados em H com um classificador baseado em conhecimento.	39
Figura 8 – Método C_1 da entropia aplicado a um sinal de entrada 1D $s[\cdot]$. Como A_1 , descrito por Guido (2016b), inspira C_1 , esse diagrama é herdado desse artigo, no qual as únicas diferenças são os componentes do vetor de característica $f[\cdot]$	39
Figura 9 – Esquema de classificação usual para abordagens modernas de padrões, baseadas no conhecimento e combinadas	41
Figura 10 – Abordagem proposta foi baseada na EPC: análise intraclasse (superior esquerda), análise interclasse (direita) e análise paraconsistente (inferior esquerda).	44
Figura 11 – O plano paraconsistente representa os graus de confiança (α) e contradições (β), podemos considerar para $\alpha = 1$ totalmente confiável, $\alpha = 0$ não confiável, $\beta = 1$ contraditório, $\beta = 0$ totalmente contraditório	45
Figura 12 – Os vetores de características das classes C_1 para os casos normais, e C_2 para os casos anormais localizados no espaço.	46
Figura 13 – O ponto P é representado como ponto no plano paraconsistente para o exemplo numérico.	46
Figura 14 – Sistema de Monitoramento Fetal - CMS800H da Contec Medical SYstems Co. Ltd.	50
Figura 15 – Tela do Sistema de Monitoramento Fetal CMS800H	52
Figura 16 – Tela do exame cardiotocográfico de uma gestante no trabalho de parto do sistema de Monitoramento Fetal CMS800H, onde são mostradas a faixa da frequência cardíaca fetal basal, traçado da FCF, traçado das contrações uterinas e indicação das movimentações fetais	53

Figura 17 – Cardiotocografia com o traçado da frequência cardíaca fetal e contrações uterinas utilizado para análise do perfil biofísico realizado visualmente por especialista sobre o estado materno-fetal	54
Figura 18 – Plotagem do sinal padrão do batimento cardíaco fetal obtido no Matlab . .	55
Figura 19 – Resultado da FFT do sinal padrão da FCF	56
Figura 20 – Energia - Método A_3 - Resultados das características dos processamentos dos sinais de batimentos cardíacos fetais anormais utilizando o Algoritmo 2.	57
Figura 21 – Energia - Método A_3 - Resultados das características dos processamentos dos sinais de batimentos cardíacos fetais normais utilizando o Algoritmo 2. .	57
Figura 22 – Energia - Método A_3 - Resultados dos valores médios das características de energia dos processamentos dos sinais de batimentos cardíacos fetais normais e anormais utilizando o Algoritmo 2.	58
Figura 23 – ZCR - Método B_3 - Resultados dos processamentos dos 130 sinais extraídos das gravações de gestações anormais.	59
Figura 24 – ZCR - Método B_3 - Resultados dos processamentos dos 290 sinais extraídos das gravações de gestações normais.	59
Figura 25 – ZCR - Método B_3 - Resultados dos valores médios das características das ZCRs dos processamentos dos sinais de batimentos cardíacos fetais normais e anormais	60
Figura 26 – Entropia - Método C_1 - Utilizando um intervalo de 60 segundos do sinal da FCF coletados de cada sinal de gestação anormais para variados tipos de valores de $D = pow(2,i)$ onde $i = 14$	60
Figura 27 – Entropia - Método C_1 - Utilizando um intervalo de 60 segundos do sinal da FCF coletados de cada sinal de gestação normal para variados tipos de valores de $D = pow(2,i)$ onde $i = 14$	61
Figura 28 – Entropia - Método C_1 - Resultados dos valores médios das características das entropias dos processamentos dos sinais de batimentos cardíacos fetais normais e anormais. Utilizando um intervalo de 60 segundos do sinal da FCF coletados de cada sinal de gestação normal para variados tipos de valores de $D = pow(2,i)$ onde $i = 14$	61
Figura 29 – Massa da Energia - Método A_3 - Gestações anormais	62
Figura 30 – Massa da Energia - Método A_3 - Gestações normais	63
Figura 31 – Massa da Energia - Método A_3 - Valores médios das massas de energias de gestações normais e anormais	63
Figura 32 – Massa da ZCR - Método B_3 - Gestações anormais	64
Figura 33 – Massa da ZCR - Método B_3 - Gestações normais	64
Figura 34 – Massa da ZCR - Método B_3 - Valores médios das massas das ZCRs de gestações normais e anormais	65
Figura 35 – Massa da Entropia - Método C_1 - Gestações anormais	65

Figura 36 – Massa da Entropia - Método C_1 - Gestações normais	66
Figura 37 – Massa da Entropia - Método C_1 - Valores médios das massas das entropias de gestações normais e anormais	66
Figura 38 – Distâncias entre os pontos P de cada combinação ao vértice $P = (1,0)$, apresentando a menor distância euclidiana o grupo $H + HM$ com a menor distância Euclidiana obtida pela aplicação da EPC.	67
Figura 39 – Plotagem dos pontos (G_1 e G_2) dos grupos testados apresentando os grupos $H + HM$ com a menor distância Euclidiana para o vértice $P = (1,0)$ obtida pela EPC.	68
Figura 40 – Energia	77
Figura 41 – ZCR	78
Figura 42 – Entropia	79
Figura 43 – Vetor característica da Energia, ZCR e Entropia	80
Figura 44 – Massa da energia dos sinais	81
Figura 45 – Massa da ZCR dos sinais	82
Figura 46 – Massa da entropia dos sinais	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Base de dados utilizada na validação do sistema Fuzzy.	21
Tabela 2 – Avaliação do sistema utilizando a base de dado da Tabela 1.	21

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Amplitude
AG	Algoritmo genético
ACOG	Faculdade Americana de Obstetrícia e Ginecologia (<i>American College of Obstetricians and Gynecologists</i>)
AM	Modulação em amplitude
ATP	Reserva de energia celular
ANFIS	Sistema de inferência Neuro-Fuzzy adaptativo
CAMF	Centro de Avaliação e Medicina Fetal
CE	Cesariana de emergência
CTG	Cardiotocografia
CTU-UHB	<i>Czech Technical University in Prague and the University Hospital in Brno</i>
DESA	Algoritmo de separação de energia discreta
DNN	Rede Neural Profunda
DSP	Processamento digital de sinais - " <i>Digital Signal Processing</i> "
DUS	Ultrassonografia com Doppler fetal
ECG	Eletrocardiograma
EPC	Engenharia paraconsistente de características
FCF	Frequência cardíaca fetal
FCM	Frequência cardíaca materna
FM	Modulação em frequência
FSI	Índice de <i>stress</i> fetal
H	Entropia
IA	Inteligência artificial
IFR	Índice de reserva fetal

mvFEG	Entropia difusa multivariada global
mvFEL	Entropia difusa multivariada loca
mvFME	Entropia de medida fuzzy multivariada
mvSE	Entropia amostral multivariada comumente utilizada
NICHD	Instituto Nacional de Saúde Infantil e Desenvolvimento Humano (<i>National Institute of Child Health and Human Development</i>)
OCU	Oclusão do cordão umbilical
PA	Máxima possível
PC	Paralisia cerebral
PL	Lógica paraconsistente
PR	Reconhecimento de padrões
RPSbC	Reconhecimento de padrões e sistemas baseados no conhecimento
PSO	Otimização de enxame de partículas (<i>Particle swarm optimization</i>)
SEDI	Laboratório de Sistemas Eletrônicos Digital e Imagem
STV	Short-term variation
SVM	Máquina de suporte de vetores
TA	Quantidade total
T	Operador de energia <i>Teager</i>
UC	Contrações uterinas
VC	Vetor de características
VCs	Vetores de características
VCP	Variabilidade de curto prazo
ZCR	Taxa de cruzamentos por zeros - " <i>Zero crossing rates</i> "

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Nível de crédito nas características
β	Nível de descrédito nas características
η	Massa
ω	Frequência instantânea

LISTA DE ALGORITMOS

- Algoritmo 1 – Fragmento do código C++ para o método A_3 utilizado para a extração das características dos batimentos cardíacos fetais 85
- Algoritmo 2 – Fragmento do código C++ para o método B_3 , utilizado para a extração das características dos batimentos cardíacos fetais 86
- Algoritmo 3 – Código-fonte C++ para o método C_1 em 1D, utilizado para a extração das características dos batimentos cardíacos fetais 87

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos Específicos	19
1.2 Estrutura do Trabalho	19
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3 – TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SINAIS BIOMÉDICOS	28
3.1 Variabilidade de curto prazo e a correlação com a acidemia fetal	28
3.2 Energia	29
3.2.1 Método A_3	29
3.3 Taxa de cruzamento por zero - ZCR	30
3.3.1 Método B_3	32
3.4 Entropia	33
3.4.1 As abordagens propostas	35
3.4.2 Método C_1	37
3.5 Massa do sinal	39
3.6 Vetores de características	40
3.7 Engenharia paraconsistente de características - EPC	41
3.8 Máquina de suporte de vetores - SVM	45
4 – METODOLOGIA E RESULTADOS	48
4.1 Critérios de exclusão	48
4.2 Riscos	48
4.3 Benefícios	49
4.4 Estratégia de análise de dados	49
4.5 Sistema de monitoramento fetal – CMS800H	50
4.6 Coleta de dados	51
4.7 Implementação	53
4.8 Caracterização dos sinais	54
4.8.1 Energia do sinal	55
4.8.2 Taxa de Cruzamentos por Zero - ZCR	56
4.8.3 Entropia	58
4.8.4 Massa do Sinal	62
4.8.5 Vetores de características	64
4.9 Aplicação da engenharia paraconsistente de caractrísticas - EPC	65
4.10 Análise e discussão dos resultados	69

Referências	71
 Apêndices	 76
APÊNDICE A–Vetor característica da energia do sinal	77
APÊNDICE B–Vetor característica do ZCR do sinal	78
APÊNDICE C–Vetor característica da entropia do sinal	79
APÊNDICE D–Vetor característica da energia, ZCR e entropia do sinal . .	80
APÊNDICE E–Vetor característica da massa da energia	81
APÊNDICE F–Vetor característica da massa da ZCR	82
APÊNDICE G–Vetor característica da massa da entropia	83
 Anexos	 84
ANEXO A–Algoritmo 1	85
ANEXO B–Algoritmo 2	86
ANEXO C–Algoritmo 3	87

1 INTRODUÇÃO

A má oxigenação do sangue fetal pode deixar sequelas importantes na vida de um indivíduo, ou mesmo levar ao [obito] ainda na fase intrauterina. Entender, identificar e atuar preventivamente nesse processo, traduz-se clinicamente na redução do sofrimento fetal e sucesso no nascimento.

São várias as condições para alterar o equilíbrio da oxigenação fetal. A queda acentuada da perfusão placentária impede a chegada de oxigênio para as células fetais, assim como a retirada de gás carbônico e toxinas provenientes do metabolismo, resultando na perda de reservas de energia celular (ATP) somando-se à redução progressiva do pH intracelular, e como consequência, à disfunção celular. Isso conduzirá a um processo isquêmico grave e prolongado, ou seja, a autólise e morte celular (GARCIA, 2006).

A frequência cardíaca fetal (FCF) tem sido um dos parâmetros biofísicos pioneiros utilizados dentro do arsenal propedêutico para análise da vitalidade fetal. Quando a FCF é registrada eletronicamente, em concomitância com a dinâmica uterina e a movimentação fetal, fica estabelecido um método propedêutico chamado cardiotocografia (CTG).

Um parâmetro muito importante na avaliação da vitalidade fetal é a variabilidade de curto prazo (VCP) ou *short-term variation (STV)* da frequência cardíaca fetal, cujo valor é mensurado pela diferença das médias de intervalos de pulso. O valor obtido no cálculo da VCP correlaciona-se com a acidose metabólica fetal e morte intrauterina (HENSON; DAWES; REDMAN, 1984; STREET et al., 1991; DAWES; MOULDEN; REDMAN, 1992).

A coleta da amostra do sangue fetal tem como objetivo fundamental a identificação do grau de oferta da oxigenação e a acidemia fetal (SALING, 1962; GARCIA, 2006). A queda do pH do sangue fetal proporciona a mensuração do grau de hipóxia em função das mudanças ocorridas pelo metabolismo anaeróbico na diminuição da oferta de oxigênio ao feto. Portanto, a análise do sangue da artéria umbilical é considerada o padrão ouro na avaliação da condição bioquímica fetal (GARCIA, 2006; MAEDA, 2013).

Assim, neste trabalho, são apresentados o desenvolvimento e implementação de algoritmos dedicados a investigar a correlação entre a VCP da FCF, níveis da oxigenação e acidemia fetal, tornando possível a análise e validação dos resultados dos processamentos obtidos pelos algoritmos, comparando com os resultados dos laudos obtidos por meio dos exames laboratoriais do sangue da artéria umbilical coletados no momento do nascimento.

Os sinais dos batimentos cardíacos fetais foram coletados com o auxílio de um cardiotógrafo computadorizado, equipado com sensor de efeito Doppler. Os sinais dos batimentos cardíacos fetais possibilitaram a geração de vetores de características (VCs) baseados nos conceitos de energia, taxa de cruzamentos por zero, entropia e massa dos sinais, e avaliados por meio da engenharia de recursos paraconsistente. Com isso foi possível determinar qual VC possuía as melhores características do problema alvo.

Posteriormente, a análise dos VCs foi utilizada para mostrar a separação existente entre duas classes, isto é, VCPs de gestações normais com pH do sangue umbilical maior que 7,20 e de gestações anormais com pH do sangue do cordão umbilical menor que 7,20, caracterizando assim a correlação procurada. Este estudo foi realizado em parceria com a unidade hospitalar CAMF de São José do Rio Preto - SP que auxiliou na análise dos sinais cardiotocográficos e com a Santa Casa de São José do Rio Preto, possibilitando a coleta dos sinais cardiotocográficos de 75 gestantes em trabalho de parto ou intraparto entre 35 a 41 semanas de gestação, resultando em aproximadamente 1500 minutos de gravação da FCF para análise.

1.1 Objetivos Específicos

- sistema para determinação de acidemia e oxigenação fetal por meio dos sinais dos batimentos cardíacos fetais;
- algoritmos para a realização das propostas;
- técnicas para determinação da acidemia e oxigenação fetal;
- comparar os resultados do processamento da FCF com os exames laboratoriais que comprovam os níveis da acidemia e oxigenação fetal.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho possui 5 (cinco) capítulos e está organizado da forma como segue:

No Capítulo 2, é apresentado o estudo sobre a FCF e VCP e a correlação com a acidemia fetal responsável pela avaliação da vitalidade fetal, capaz de prever a existência de acidemia no sangue enviado ao feto.

No Capítulo 3, são estudadas técnicas de análises de sinais biométricos, onde são apresentadas as ferramentas e seus métodos para obtenção das características da FCF, como Energia, ZCR, Entropia e suas respectivas massas. Estudou-se também a aplicação dos recursos da engenharia para consistência de características, responsável por transformar dados brutos em informações relevantes, configurando classificadores de processamento digital de sinais - (DSP - *Digital Signal Processing*) e reconhecimento de padrões (PR). Adicionalmente, são estudados trabalhos correlatos que foram importantes para direcionar os objetivos deste trabalho em busca do aperfeiçoamento das técnicas de caracterização e classificação dos sinais do batimento cardíaco fetal, importante para a análise e diagnóstico da acidose e oxigenação fetal para vigilância do bem estar fetal.

No Capítulo 4, apresentam-se os algoritmos propostos e os resultados obtidos durante a análise dos sinais da FCF para obtenção da VCP, acompanhado das discussões pertinentes.

No Capítulo 5, são apresentadas as análises, discussões de resultados e conclusões, apresentando uma nova ferramenta para classificação da FCF para a análise da acidose e oxigenação fetal.

Finalmente, são apresentadas as referências, apêndices e anexos, algoritmos, resultados dos algoritmos e resultados dos processamentos e respectivos laudos dos exames realizados.

Referências

- ABE, J. M. **Paraconsistent intelligent-based systems: new trends in the applications of paraconsistency**. New York, Springer-Verlag, 2015.
- ACOG TECHNICAL BULLETIN. **Umbilical artery blood acid-base analysis: n.207**. Washington, 1996. 305-310 p.
- ALNUAIMI, S. A.; JIMAA, S.; KHANDOKER, A. H. Fetal cardiac doppler signal processing techniques: challenges and future research directions. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, Switzerland, v. 5, p. 82, 2017. ISSN 2296-4185. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fbioe.2017.00082>. Acesso em: 28 nov. 1998.
- ARORA, S.; BARAK, B. **Computational complexity: a modern approach**. Cambridge, Cambridge University Press, 2009. ISBN 9780521424264.
- BRUCE, P.; BRUCE, A. **Practical statistics for data scientists: 50 essential concepts**. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc., 2017.
- BUTRUILLE, L.; JONCKHEERE, J. D.; FLOCTEIL, M.; GARABEDIAN, C.; HOUFFLIN-DEBARGE, V.; STORME, L.; DERUELLE, P.; LOGIER, R. Parasympathetic tone variations according to umbilical cord ph at birth: a computerized fetal heart rate variability analysis. **Journal of Clinical Monitoring and Computing**, Dordrecht, v. 31, n. 6, p. 1197–1202, Dec 2017. ISSN 1573-2614. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10877-016-9957-y>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- CARNIELLI, W.; CONIGLIO, M. E. **Paraconsistent logic: consistency, contradiction and negation**. Berlin, Springer-Verlag, 2016.
- CARVALHO, F. R.; ABE, J. M. **A paraconsistent decision-making method**. Berlin, Springer-Verlag, 2018.
- CASTRO, D.; PATIL, S.; KEENAGHAN, M. **Arterial blood gas**. Bethesda MD, 2021. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK536919/>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- CRISTIANINI, N.; SHAW-TAYLOR, J. **An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods**. Cambridge, Cambridge University Press, 2000.
- DAWES, G. S.; M., M.; REDMAN, C. W. Improvements in computerized fetal heart rate analysis antepartum. **J Perinat Med**, Berlin, v.24, p.25–36, 1996.
- DAWES, G. S.; MOULDEN, M.; REDMAN, C. W. The advantages of computerized fetal heart rate analysis. **J Perinat Med**, Berlin, v.19, n.1-2, p.39–45, 1991.
- DAWES, G. S.; MOULDEN, M.; REDMAN, C. W. Short-term fetal heart rate variation, decelerations, and umbilical flow velocity waveforms before labor. **Obstet Gynecol**, Washington, p. 80: 673–8, 1992.
- DAWES, G. S.; REDMAN, C. W. Sonicaid system 8002: objective ctg analysis system user guide. **Oxford Instruments Medical System Division**, Oxford, v. 19, p. 39–45, 1995.

DUDA, R. O.; HART, P. E.; STORK, D. G. **Pattern classification**. Hoboken, NJ: Wiley-InterScience, 2000.

EDEN, R. D.; EVANS, M. I.; EVANS, S. M.; SCHIFRIN, B. S. Reengineering electronic fetal monitoring interpretation: using the fetal reserve index to anticipate the need for emergent operative delivery. **Reproductive Sciences**, Switzerland, v. 25, n. 4, p. 487–497, 2018. PMID: 29137550. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1933719117737849>. Acesso em: 28 jun. 2021.

FERGUS, P.; SELVARAJ, M.; CHALMERS, C. Machine learning ensemble modelling to classify caesarean section and vaginal delivery types using cardiotocography traces. **Computers in Biology and Medicine**, S.I., v. 93, p. 7 – 16, 2018. I SSN 0010-4825. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010482517303918>. Acesso em: 28 jun. 2021.

FERNANDES, J. N. O.; CORTEZ, P. C.; MARQUES, J. A. L.; FEITOSA, F. E. L. A fuzzy intelligent agent for analysis and classification of fetuses' cardiac signals. **IEEE Latin America Transactions**, S.I., v. 14, n. 5, p. 2052–2058, 2016. ISSN 1548-0992.

GARCIA, G. S. **Prediction of fetal acidemia by Short-term Variation measured by Computerized Cardiotocography in pregnancies with Hypertensive Syndrome**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de São Paulo, Escola Paulista de Medicina, Programa de Pós-Graduação em Obstetrícia, São Paulo, 2006.

GIBSON, A.; PATTERSON, J. **Deep Learning: A Practitioner's Approach**. Sebastopol CA, O'Reilly Media, 2017.

GONÇALVES, H.; PINTO, P.; SILVA, M.; CAMPOS, D. Ayres-de; BERNARDES, J. Toward the improvement in fetal monitoring during labor with the inclusion of maternal heart rate analysis. **Medical & Biological Engineering & Computing**, Switzerland, v. 54, n. 4, p. 691–699, Apr 2016. I SSN 1741-0444. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11517-015-1359-7>. Acesso em: 28 jun. 2021.

GUIDO, R. C. Zcr - aided neurocomputing. **Know.-Based Syst.**, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, v. 105, n. C, p. 248–269, ago. 2016a. I SSN 0950-7051. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.knosys.2016.05.011>. Acesso em: 28 jun. 2021.

GUIDO, R. C. Atutorial on signal energy and its applications. **Neurocomputing**, S.I, v. 179, p. 264 – 282, 2016b. I SSN 0925-2312. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231215019281>> Acesso em: 28 jun. 2021.

GUIDO, R. C. A tutorial review on entropy-based handcrafted feature extraction for information fusion. **Information Fusion**, S.I, v. 41, p. 161 – 175, 2018. I SSN 1566-2535. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253517303846>. Acesso em: 28 jun. 2021.

GUIDO, R. C. Enhancing teager energy operator based on a novel and appealing concept: Signal mass. **Journal of the Franklin Institute**, S.I, v. 356, n. 4, p. 2346 – 2352, 2019a. I SSN 0016-0032. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003218307348>. Acesso em: 28 jun. 2021.

GUIDO, R. C. Paraconsistent feature engineering [lecture notes]. **IEEE Signal Processing Magazine**, S.I., v. 36, p. 154–158, 01 2019b.

- HAYKIN, S. **Communication Systems**. 5th. ed. New York, Wiley Publishing, 2009. ISBN 0471697907.
- HAYKIN, S. S. **Neural networks and learning machines**. Third. Upper Saddle River, NJ, Pearson Education, 2009.
- HAYKIN, S. S.; VEEN, B. V. **Signals and Systems**. New York, Wiley, 2002. ISBN 9780471164746.
- HENSON, G.; DAWES, G. S.; REDMAN, C. W. Characterization of the reduced heart rate variation in growth-retarded fetuses. **Br J Obstet Gynaecol**, New York, v. 91, p. 751–5, 1984.
- HIRSCHMAN, I. I. **Infinite Series**. New York, Dover Publications Inc., 2014. ISBN 0486789756.
- HOLAMBE, R. S.; DESHPANDE, M. S. **Advances in Non-Linear Modeling for Speech Processing: Speech Technology**. 1st. ed. New York, Springer Publishing Company, Incorporated, 2012. ISBN 1461415047.
- JEZEWSKI, M.; CZABANSKI, R.; HOROBA, K.; LESKI, J. Clustering with pairs of prototypes to support automated assessment of the fetal state. **Applied Artificial Intelligence**, S.I., v. 30, n. 6, p. 572–589, 2016.
- JOSEPH, E. **Sorting Algorithm: Analysis and Comparison Performance**. Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. ISBN 3659185477, 9783659185472.
- KAISER, J. F. On a simple algorithm to calculate the 'energy' of a signal. In: **International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing**. Albuquerque, 1990. v. 1, p. 381–384.
- MACONES, G. A.; HANKINS, G. D. V.; SPONG C. Y., H. J.; MOORE, T. The 2008 national institute of child health and human development workshop report on electronic fetal monitoring: Update on definitions, interpretation, and research guidelines. **Journal of Obstetric, Gynecologic, Neonatal Nursing**, S.I., v.37, .510–515, 2008.
- MAEDA, M. de F. Y. **Cardiotocografia computadorizada e dopplervelocimetria em gestações com insuficiência placentária: associação com a lesão miocárdia e acidemia no nascimento**. 2013. 134 p. Dissertação (Mestrado no Programa de Obstetrícia e Ginecologia) — Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- MANICKAM, P.; PRABHA, H. Extraction of fetal ecg from the composite abdomen signal by anfis with different learning algorithm. **Advances in Natural and Applied Sciences**, S.I., v. 10, p. 207, 2016.
- MAVROFORAKIS, M.; THEODORIDIS, S. A geometric approach to support vector machine (svm) classification. **IEEE Transactions on Neural Networks**, S.I., v. 17, n. 3, p. 671–682, May 2006. ISSN 1941-0093.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-time Signal Processing**. London, Pearson, 2013.
- PACHORI, R; SHARMA, R **Automatic sleep stages classification based on iterative filtering of electroencephalogram signals**. S.I., Neural Computing and Applications, p. 2959–2978, 2017.

PACHORI, R. B.; SIRCAR, P. Speech analysis using fourier-bessel expansion and discrete energy separation algorithm. In: **2006 IEEE 12th Digital Signal Processing Workshop 4th IEEE Signal Processing Education Workshop**. Piscataway N.J., p. 423–428, 2016.

PACHORI, R. B.; SIRCAR, P. Analysis of multicomponent am-fm signals using fb-desa method. **Digital Signal Processing**, S.l., v. 20, n. 1, p. 42 – 62, 2010. ISSN 1051-2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S105120040900075X>. Acesso em: 28 jun. 2021.

PISHRO-NIK, H. **Introduction to Probability, Statistics and Random Processes**. S.l.: Kappa Research LLC, 2014. Disponível em: <https://www.probabilitycourse.com>.

RAY, C.; RAY, A. Intrapartum cardiotocography and its correlation with umbilical cord blood ph in term pregnancies: a prospective study. **International Journal of Reproduction, Contraception, Obstetrics and Gynecology**, S.l., v. 6, n. 7, p. 2745–2752, 2017. ISSN 2320-1789. Disponível em: <https://www.ijrcog.org/index.php/ijrcog/article/view/2929>.

ROMANO, M.; BIFULCO, P.; RUFFO, M.; IMPROTA, G.; CLEMENTE, F.; CESARELLI, M. Software for computerised analysis of cardiotocographic traces. **Computer Methods and Programs in Biomedicine**, S.l., v. 124, p. 121 – 137, 2016. ISSN 0169-2607. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169260715002680>.

SALING, E. A new method for examination of the child during labor. introduction, technic and principles. **Arch Gynakol**, S.l., v.197, p.108–22, 1962.

SCALASSARA, P. R.; DAJER, M. E.; MACIEL, C. D.; GUIDO, R. C.; PEREIRA, J. C. Relative entropy measures applied to healthy and pathological voice characterization. **Applied Mathematics and Computation**, S.l., v. 207, n. 1, p. 95 – 108, 2009. ISSN 0096-3003. Includes Special issue on Emergent Applications of Fractals and Wavelets in Biology and Biomedicine. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0096300308000234>. Acesso em: 28 jun. 2021.

SEJDIĆ, E.; DJUROVIC, I.; JIANG, J. Time-frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances. **Digital Signal Processing**, S.l., v. 19, p. 153–183, 2009.

SHANNON, C. A mathematical theory of communication. **The Bell System Technical Journal**, S.l., v. 27, n. 3, p. 379–423, July 1948. ISSN 0005-8580.

SMULLYAN, R. M. **A Beginner's Guide to Mathematical Logic**. New York: Dover Publications Inc., 2014. ISBN 0486492370.

STREET, P.; DAWES, G.; MOUDELEN, M.; REDMAN, C. Short term variation in abnormal antenatal fetal heart rate records. **Am J Obstet Gynecol**, Washington, v. 165, p. 515–23, 1991.

STROUSTRUP, B. **The C++ Programming Language (Hardcover)**. 4th. ed. S.l., Addison-Wesley Professional, 2013. ISBN 0321958322.

THEODORIDIS, S.; KOUTROUMBAS, K. **Pattern Recognition**. San Diego CA, Elsevier, 2008. ISBN 9781597492720.

VAPNIK, V. **The Nature of Statistical Learning Theory**. New York, Springer, 1995.

VAPNIK, V.; CORTES, C. **Support vector networks**. New York, Machine Learning, p. 273-297, 1995.

ZANATY, E.; AFIFI, A. Support vector machines (svms) with universal kernels. **Applied Artificial Intelligence**, S.l., v. 25, p. 575–589, 2011.

ZAYLAA, A.; CHARARA, J.; GIRAULT, J.-M. Reducing sojourn points from recurrence plots to improve transition detection: Application to fetal heart rate transitions. **Computers in Biology and Medicine**, S.l., v. 63, p. 251 – 260, 2015. ISSN 0010-4825. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010482514002583>. Acesso em: 28 jun. 2021.

ZAYLAA, A.; OUDJEMIA, S.; CHARARA, J.; GIRAULT, J. n-order and maximum fuzzy similarity entropy for discrimination of signals of different complexity: Application to fetal heart rate signals. **Computers in Biology and Medicine**, S.l., v. 64, p. 323 – 333, 2015. ISSN 0010-4825. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010482515000840>. Acesso em: 28 jun. 2021.

ZHAO, L.; WEI, S.; TANG, H.; LIU, C. Multivariable fuzzy measure entropy analysis for heart rate variability and heart sound amplitude variability. **Entropy**, S.l., v. 18, n. 12, 2016. ISSN 1099-4300. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1099-4300/18/12/430>. Acesso em: 28 jun. 2021.

ZHENG, A.; CASARI, A. **Feature Engineering for Machine Learning: Principles and Techniques for Data Scientists**. 1st. ed. Sebastopol CA, O'Reilly Media, Inc., 2018. ISBN 1491953241.

Apêndices

Anexos

ANEXO A – Algoritmo 1

Algoritmo 1: Fragmento do código C++ para o método A_3 utilizado para a extração das características dos batimentos cardíacos fetais

Dados: Dados bruto do sinal da FCF

Resultado: Energia

```

...
M* = 0.1
L = 0
C = 1
T = ((100/C) - ((int)(100/C)) == 0)?(100/C) - 1 : (int)(100/C)
f = newdouble[T]
z = energy(&s[0],M) * ((double)(C)/100)
k = 0
repita
|   Para k < T
|   while energy(&s[0],L) < ((k + 1) * z) do
|   |   L = L + 1
|   |   f[k] = (double)(L)/(double)(M)
|   end
até k => T;
Função energia
e = 0; i = 0
repita
|   e+ = pow(input_vector[i],2) i = i + 1
até i => length;
...

```

Fonte: Adaptado de Guido (2016b)

ANEXO B – Algoritmo 2

Algoritmo 2: Fragmento do código C++ para o método B_3 , utilizado para a extração das características dos batimentos cardíacos fetais

Dados: Dados bruto do sinal da FCF

Resultado: ZCR

```

...
e  $mean = 0$ ;  $k = 0$ 
repita
| Para  $k < M$ 
|    $mean+ = s[k]/(double)(M)$ 
|    $k = k + 1$ 
até  $k < M$ ;
 $k = 0$ 
repita
| Para  $k < M$ 
|    $s[k] - = mean$ 
|    $k = k + 1$ 
até  $k \Rightarrow M$ ;
 $L = 0$ 
 $C = 10$ 
 $T = (100/C) - ((int)(100/C)) == 0 ? (100/C) - 1 : (int)(100/C)$ 
 $*f = newdouble[T]$ 
 $z = zcr(\&s[0], M) * ((double)(C)/100)$ 
 $k = 0$ 
repita
| Para  $k < T$ 
|   while  $zcr(\&s[0], L) < ((k + 1) * z)$  do
|   |  $L++$ 
|   |  $f[k] = (double)(L)/(double)(M)$ 
|   end
|    $k = k + 1$ 
até  $k \Rightarrow T$ ;
Função ZCR
 $z = 0$ 
 $i = 0$ 
repita
|  $z+ = (input\_vector(i) * input\_vector(i + 1) < 0) ? 1 : 0$ 
|  $return(z)$   $i = i + 1$ 
até  $i \Rightarrow length - 1$ ;
...

```

Fonte: Adaptado de Guido (2016b)

ANEXO C – Algoritmo 3

Algoritmo 3: Código-fonte C++ para o método C_1 em 1D, utilizado para a extração das características dos batimentos cardíacos fetais

Dados: Dados bruto do sinal da FCF

Resultado: Entropia

```

...
L = (int)(M/10.0)
V = 25
T = (int)((100 * M - L * V)/((100 - V) * L))
highest_H = 0
*f = newdouble[T]
k = 0
repita
| Para k < T
|   f[k] = entropy_1D(&s[k * ((int)((100 - V)/100.0) * L)],L)
|   if f[k] > highest_H then
|     | highest_H = f[k]
|   end
|   k = k + 1
até k => T;
k = 0
repita
| Para k < T
|   f[k]/ = highest_H
|   k = k + 1
até k => T;
...

```

Fonte: Adaptado de Guido (2016b)
