Alaan Ubaiara Brito Cris Evelin da Costa Dalmácio Helena Cristina Guimarães Queiroz Simões (Organizadores)

TEXTOS DE:

Andrey da Costa Lopes Deidson Vilhena Santos Francimário dos Passos Silva Jessica Mieko Dias Onaka José Walter Cárdenas Sotil Helyelson Paredes Moura Henrique Duarte da Fonseca Filho Marcus Vinicius da Costa Frazão Valéria Castelo Branco de Sousa CIÊNCIAS EXATAS: RESULTADOS DOS PROJETOS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ (2012-2016)



Alaan Ubaiara Brito

Tris Évelin da Tosta Dalmácio

Helena Cristina Guimarães Gueiroz Simões

(Organizadores)

CIÊNCIAS EXATAS: RESULTADOS DOS PROJETOS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ (2012-2016)



Copyright © 2017, Autores

Reitora: Prof.^a Dr.^a Eliane Superti

Vice-Reitora: Prof.^a Dr.^a Adelma das Neves Nunes Barros Mendes Pró-Reitora de Administração: Wilma Gomes Silva Monteiro Pró-Reitor de Planejamento: Prof. Msc. Allan Jasper Rocha Mendes Pró-Reitor de Gestão de Pessoas: Emanuelle Silva Barbosa Pró-Reitora de Ensino de Graduação: Prof.^a Dr.^a Margareth Guerra dos Santos Pró-Reitora de Pesquisa e Pós-Graduação: Prof.^a Dr.^a Helena Cristina Guimarães Queiroz Simões Pró-Reitor de Extensão e Ações Comunitárias: Prof. Dr. Rafael Pontes Lima Pró-Reitor de Relações Interinstitucionais: Prof. Dr. Paulo Gustavo Pellegrino Correa

> Diretor da Editora da Universidade Federal do Amapá Tiago Luedy Silva

Editor-chefe da Editora da Universidade Federal do Amapá Fernando Castro Amoras

Conselho Editorial

Ana Paula Cinta	Luís Henrique Rambo
Artemis Socorro do Nascimento Rodrigues	Marcus André de Souza Cardoso da Silva
César Augusto Mathias de Alencar	Maria de Fátima Garcia dos Santos
Claudia Maria do Socorro Cruz Fernandes Chelala	Patricia Helena Turola Takamatsu
Daize Fernanda Wagner Silva	Patrícia Rocha Chaves
Elinaldo da Conceição dos Santos	Robson Antônio Tavares Costa
Elizabeth Machado Barbosa	Rosilene de Oliveira Furtado
Elza Caroline Alves Muller	Simone de Almeida Delphim Leal
Jacks de Mello Andrade Junior	Tiago Luedy Silva
Iose Walter Cárdenas Sotil	

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B862c	Ciências Exatas : resultados dos projetos de iniciação científica da Universidade Federal do Amapá (2012-2016) / Organização de Alaan Ubaiara Brito, Cris Evelin da Costa Dalmácio e Helena Cris- tina Guimarães Queiroz Simões. – Macapá : UNIFAP, 2017. 96 p. : il.; 210x280mm.
	ISBN: 978-85-62359-67-5
	1. Ciências Exatas. 2. Engenharia. 3. Física. 4. Computação I. Brito, Alaan Ubaiara. II. Dalmácio, Cris Evelin da Costa. III. Simões, Helena Cristina Guimarães Queiroz. IV. Fundação Uni- versidade Federal do Amapá. V. Título. CDD 530

Capa, Editoração e Diagramação: Fernando Castro Amoras

Editora da Universidade Federal do Amapá Site: www2.unifap.br/editora | E-mail: editora@unifap.br | Telefone (96) 4009-2801 Endereço: Rodovia Juscelino Kubitschek, Km 2, s/n, bairro Universidade, Macapá-AP, CEP: 68.903-419

Todos os textos publicados neste livro foram reproduzidos de cópias fornecidas pelos autores. O conteúdo dos mesmos é de exclusiva responsabilidade de seus autores. Os organizadores não se responsabilizam por consequências decorrentes de uso de quaisquer dados, afirmações e opiniões inexatas (ou que conduzam a erros) publicados neste livro. É permitida a reprodução parcial ou total dos textos, desde que seja citada a fonte.

SUMÁRIO

Apresentação HELENA CRISTINA SIMÕES	05
Alocação ótima de banco de capacitores em sistemas elétricos de distribuição via otimização por enxame de partículas JESSICA MIEKO DIAS ONAKA & ANDREY DA COSTA LOPES	07
Análise cristalográfica em ceras epicuticulares de plantas através da técnica de Difração de Raios-X FRANCIMÁRIO DOS PASSOS SILVA & HENRIQUE DUARTE DA FONSECA FILHO	27
Aplicação do GPR ao redor das ruínas da igreja de pedra de Mazagão-Velho- AP MARCUS VINICIUS DA COSTA FRAZÃO & HELYELSON PAREDES MOURA	39
Conceitos matemáticos na computação quântica DEIDSON VILHENA SANTOS & JOSÉ WALTER CÁRDENAS SOTIL	51
Estudo morfológico de folhas de <i>Anacardium occidentale</i> L. da Amazônia na Região Norte do Brasil VALÉRIA CASTELO BRANCO DE SOUSA & HENRIQUE DUARTE DA FONSECA FILHO	71
Medidas de resistividade elétrica aparente ao redor das ruínas da igreja de pedra de Mazagão-Velho-AP MARCUS VINICIUS DA COSTA FRAZÃO & HELYELSON PAREDES MOURA	83

APRESENTAÇÃO

presentamos, nesta coletânea, trabalhos de Iniciação Científica (IC) da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), divididos em diferentes áreas do conhecimento, resultantes de projetos de pesquisa realizados entre os anos de 2012 a 2016.

A Iniciação Científica inaugura a inserção do jovem cientista no mundo da pesquisa. Ao percorrer, com o suporte de um(a) orientador(a), as experiências do processo investigativo, o ingressante na IC apreende/compreende novos conceitos e referências, metodologias específicas, formato próprio de escrita, atividades de campo e em laboratórios, participação em eventos científicos, dentre tantas outras atuações.

Na UNIFAP, os primeiros bolsistas de iniciação científica foram contemplados por meio de um edital divulgado em 2005, resultando em 17 ingressantes. No ano seguinte, em 2006, já regidos pelas normas do Programa de Iniciação Científica da UNI-FAP – PROBIC, foram oferecidas outras 15 bolsas, somadas a 10 cotas provenientes do Programa Institucional de Iniciação Científica (PIBIC) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Gradativamente a iniciação científica seguiu consolidando-se e, em 2010, fora aprovado o Programa de Iniciação Voluntária (PROVIC), que regulamentou a atuação de alunos que desenvolviam ou tinham interesse em desenvolver atividades de pesquisa, ainda que sem aporte de bolsas. Naquela oportunidade, foram selecionados 25 voluntários de IC.

No ano de 2012, apoiados pelo CNPq, ofertamos, pela primeira vez, bolsas de Iniciação Científica para o Ensino Médio (PIBIC/EM) e bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI). Em 2016, a UNIFAP comemorou 10 anos promovendo, ano a ano, eventos cujo objetivo era divulgar os resultados das pesquisas de Iniciação Científica que, apesar de diferentes denominações como Seminário, Congresso ou Jornada, as principais características destes momentos foram a aproximação das instituições de pesquisa no Amapá, com a participação da UEAP, IEPA, Embrapa e IFAP, além da crescente inserção dos alunos com um nível cada vez mais elevado de qualidade dos trabalhos.

Em 2017, os números demonstram que os Programas de Iniciação Científica da UNIFAP e do CNPq ampliaram-se, e, hoje, são responsáveis pela consolidação da cultura científica entre os jovens no Estado do Amapá. Atualmente, temos 41 bolsistas PROBIC/UNIFAP; 46 bolsistas PIBIC/CNPq; 02 bolsistas PIBITI/CNPq; 05 bolsistas PIBITI/UNIFAP e 17 bolsistas PIBIC/EM/CNPq.

Em comemoração aos 11 anos das atividades de Iniciação Científica na Universidade Federal do Amapá surgiu a ideia de publicar este livro, que reúne resultados dos projetos de IC desenvolvidos entre 2012-2016. Os livros apresentam pesquisas em diferentes áreas, a saber: Ciências da Saúde, com 17 capítulos; Ciências Biológicas, com 14 capítulos: Educação e Linguística, com 10 capítulos; Ciências Humanas, com 07 capítulos; e Ciências Exatas, com 06 capítulos.

A ciência nasce da inquietação e da coragem. Estes ingredientes vêm mudando o mundo, global e localmente, cujo fim maior é o desenvolvimento da humanidade, com respeito ao meio ambiente e equilíbrio intergeracional. Os trabalhos que ora apresentamos propõem-se alcançar este objetivo e estimular outros jovens a produzir novos conhecimentos.

Macapá-AP, março de 2017.

Helena Cristina Simões

ALOCAÇÃO ÓTIMA DE BANCO DE CAPACITORES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO VIA OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

Jessica Mieko Dias Onaka¹

Andrey da Costa Lopes²

RESUMO: O problema de alocação ótima de banco de capacitores tem sido utilizado como estratégia de melhoria do perfil de tensão nos barramentos próximos a consumidores finais, em uma rede de distribuição. Ademais, técnicas de otimização bioinspiradas têm levado destaque nas pesquisas aplicadas a tais problemas. O presente trabalho apresenta um conjunto de análises a serem desenvolvidas com o auxílio de ferramentas computacionais voltadas para alocação ótima de banco de capacitores de um sistema de distribuição, via Otimização por Enxame de Partículas (PSO- Particle Swarm Optimization), de forma a obter a melhor resposta, por meio de um estudo comparativo entre os principais métodos do PSO, aplicado para a resolução do problema proposto. Levou-se em conta o do custo financeiro da instalação do banco de capacitores na função objetivo a ser otimizada e seu impacto em tais estudos comparativos. Os estudos comparativos mostraram que o PSO com variação nos fatores cognitivo e social (TVAC - Time Varying Acceleration Coefficients), apresentou melhor desempenho em termos de otimização. Tais estudos mostraram uma maior economia quando considerado o custo da instalação de bancos de capacitores no problema a ser otimizado, assim como uma melhora significativa do perfil de tensão da rede de distribuição.

Palavras-chave: Banco de capacitores, alocação ótima, perfil de tensão, rede de distribuição

1 INTRODUÇÃO

Alocação de Banco de Capacitores tem sido utilizado como estratégia de melhoria do perfil de tensão nos barramentos próximos a consumidores finais, em uma rede de distribuição de energia. O problema de alocação e dimensionamento de banco de capacitores consiste em determinar o local ótimo de instalação de bancos de capacitores fixos ou chaveados, assim como, a potência ótima nominal, a fim de minimizar as violações de tensão e as perdas ativas totais nos alimentadores da rede.

O tratamento de problemas de otimização como esse pode ser feito de diversas maneiras, dentre as quais se destacam: o uso de ferramentas puramente matemáticas

¹ Foi participante do Programa de Iniciação Científica Voluntária (PROVIC/UNIFAP), vigência 2015-2016.

² Orientador de iniciação científica. Professor do Curso de Engenharia Elétrica da UNIFAP.

que envolvem o uso do cálculo do gradiente, como por exemplo, o Método de Newton-Raphson bem como suas modificações e o uso de multiplicadores de Lagrange, conforme utilizado em GASPERIN (2008) e STEILEIN (2012); o uso crescente de algoritmos bioinspirados, cujos modelos são independentes do cálculo da derivada o que os torna mais robustos diante de falsos ótimos (pontos de inflexão).

Dentre as diversas técnicas de otimização bioinspirada disponíveis na literatura, optou-se por trabalhar com o Método de Otimização por Enxame de Partículas – *Particle Swarm Optimization* (PSO) – e explorar algumas de suas inúmeras modificações, as quais surgiram nos anos subsequentes à proposição do algoritmo original com o intuito de lhe imprimir algumas melhorias. A escolha feita deve-se ao fato de que estudos feitos por Kennedy e Eberhart (1995) com o PSO, quando comparado com uma das técnicas mais tradicionais de otimização bioinspirada (Algoritmo Genético, por exemplo), demonstraram ter melhor desempenho que esta última, tendo como base comparativa a função F6 de Schaffer descritas em Davis (1991). Além disso, nos mesmos estudos feitos por Kennedy e Eberhart (1995), os autores afirmam se tratar de um algoritmo simples e robusto, que pode ser escrito com poucas linhas de código e que requer somente a especificação do problema e ajuste de poucos parâmetros para sua implementação e solução do problema.

A técnica PSO ou otimização com enxame de partículas foi originalmente desenvolvido por (KENNEDY; EBERHART, 1995, pg.1942-1948). Pode-se entender o funcionamento do algoritmo PSO por meio de uma analogia de um bando de pássaros em voo na busca por alimento ou abrigo, em que é possível notar que há um pássaro que se sobressai na frente dos demais. Esse pássaro possui a melhor posição do grupo e os outros pássaros o seguem. Como eles estão em movimento, há sempre a atualização das posições de cada um. Analogamente, no PSO, esse pássaro que se sobressai seria a partícula de melhor posição (*Gbest*); as melhores posições dos demais pássaros até momento seriam as melhores posições das partículas (*Pbest*) e, o alimento ou abrigo, é a função objetivo do algoritmo.

2 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

2.1 PSO CLÁSSICO

Num espaço vetorial real, cada solução individual possível pode ser modelada como uma partícula que se move através do hiperespaço \Re^M do problema. A posição de cada partícula é determinada pelo vetor Xi(t) $\in \Re^M$ e estas se movem com uma velocidade Vi(t) $\in \Re^M$. Num instante t, o vetor posição e o vetor velocidade da i-ésima partícula no espaço de busca D-dimensional podem ser representados como:

$$X_{i}(t) = \{x_{i,1}(t); x_{i,2}(t); \dots; x_{i,d}(t); \dots; x_{i,D}(t)\}$$
(1.1)

$$V_{i}(t) = \{v_{i,1}(t); v_{i,2}(t); \dots; v_{i,d}(t); \dots; v_{i,D}(t)\}$$
(1.2)

No desenvolvimento do algoritmo, os autores procuraram não somente descrever a convergência do algoritmo a partir da referência da partícula com o melhor desempenho dentre aquelas que compõem a população inicial como também o desempenho individual de cada partícula em durante a execução do algoritmo. De acordo com função objetivo formulada pelo problema, define-se a melhor posição (Pbest) de cada partícula *i* como:

$$Pbest_{i}(t) = \{pbest_{i,1}(t); ...; pbest_{i,d}(t); ...; pbest_{i,D}(t)\}$$
(1.3)

A posição da partícula mais apta, ou seja, da partícula com o melhor desempenho segundo a função objetivo (Gbest) encontrada até então no instante *t* é dada por:

$$Gbest(t) = \{gbest_1(t); \dots; gbest_d(t); \dots; gbest_D(t)\}$$

$$(1.4)$$

A partir dos valores de *Gbest* e *Pbest* é possível determinar o valor da velocidade de cada partícula através da equação (1.5) e, em seguida, as novas posições das partículas, obtidas a partir da equação (1.6).

$$V_{i}(t+1) = V_{i}(t) + c_{1} \cdot r_{1} \left[Pbest_{i} - X_{i}(t) \right] + c_{2} \cdot r_{2} \left[Gbest_{i} - X_{i}(t) \right]$$
(1.5)

$$X_{i}(t+1) = X_{i}(t) + V_{i}(t+1)$$
(1.6)

Na equação (1.5), $V_i(t+1)$ representa a atualização da velocidade da partícula a partir de um tempo inicial, $V_i(t)$. As incógnitas c₁ e c₂ são as constantes de aceleração, denominadas coeficiente cognitivo e social, respectivamente. Os termos r_1 e r_2 são valores randômicos cujas saídas contínuas variam entre 0 e 1 e multiplicam as constantes c₁ e c₂, respectivamente, diminuindo a possibilidade de estagnação em um ótimo local.

2.2 PRINCIPAIS VARIAÇÕES DO PSO

Assim como outras técnicas de otimização amplamente usadas na resolução de problemas de engenharia, o PSO também apresenta algumas variações propostas ao longo dos anos, visando a adaptação para cada tipo de problema.

Dentre as principais variações do PSO, destacam-se: fator de Inércia variando ao longo das iterações (*Time Varying Inertia Weight* – TVIW), com variação nos fatores cognitivo e social (*Time Varying Acceleration Coefficients* – TVAC), e com fator de constrição (Constriction factor -CF).

2.2.1 Método com o peso de inércia (ω) – TVIW

Shi e Eberhart (1998) introduziram o peso de inércia (ω), também conhecido por fator de inércia, na versão original da equação da velocidade da partícula - equação (1.5) - a fim de ponderar a velocidade inicial da partícula, ou seja, limitar a dependência da partícula em relação a sua velocidade inicial, conforme pode ser visualizado na equação (1.7). Os referidos autores sugeriram que ω , seja um valor fixo compreendido entre 0,9 e 1,2, com o objetivo de melhorar a desempenho do algoritmo.

$$V_{i}(t+1) = \omega \cdot V_{i}(t) + c_{1} \cdot r_{1} \left[Pbest_{i} - X_{i}(t) \right] + c_{2} \cdot r_{2} \left[Gbest_{i} - X_{i}(t) \right]$$
(1.7)

2.2.2 Método com o fator de constrição (k)

Outra proposta para melhorar o algoritmo original foi a inserção do fator de contrição, também conhecido na literatura como fator de aceleração. (SUN; FENG; XU, 2004). O fator de constrição foi proposto a fim de assegurar a convergência do algoritmo sem que seja necessário impor qualquer restrição de velocidade na fórmula de atualização de velocidade, conforme a equação (1.8):

$$V_{i}(t+1) = k \left\{ V_{i}(t) + c_{1} \cdot r_{1} \left[Pbest_{i} - X_{i}(t) \right] + c_{2} \cdot r_{2} \left[Gbest_{i} - X_{i}(t) \right] \right\}$$
(1.8)

Em que a constante k é o fator de constrição, o qual é descrito pela equação (1.9).

$$k = \frac{2}{\left|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}\right|}, \quad \varphi = c_1 + c_2 \tag{1.9}$$

Em vários testes, o enxame tem convergência estável sempre que $\varphi \ge 4$. Recomenda-se um valor de 4,1 para a soma de c₁ e c₂, o que leva a k = 0,7298 e c₁ = c₂ = 2,05.

2.2.3 Variação das constantes de aceleração - TVAC

A técnica de variação das constantes de aceleração (TVAC – *Time Varying Acceleration Coefficients*), consiste em variar linearmente as constantes c_1 e c_2 com o número de iterações do algoritmo, tal como àquela proposta para o fator de inércia. (CHA-TURVEDI; PANDIT, SRIVASTAVA, 2009).

Buscando o equilíbrio entre a convergência e a diversidade, a TVAC surge como boa alternativa para problemas multimodais, tais como o explorado neste trabalho. As equações (1.11) e (1.12) mostram as variações das constantes c_1 e c_2 , respectivamente, da forma como foram usadas neste trabalho. Os termos c_{1i} e c_{2i} são os valores iniciais para as constantes de aceleração enquanto c_{1f} e c_{2f} são os valores finais definidos para as mesmas constantes. Já os termos *iter* e *iter_{max}*, referem-se, respectivamente, ao número atual de iteração e ao número máximo de iterações do algoritmo.

$$c_{1} = (c_{1f} - c_{1i}) = \frac{iter}{iter_{\max}} + c_{1i}$$
(1.10)

$$c_{2} = (c_{2f} - c_{2i}) = \frac{iter}{iter_{\max}} + c_{2i} \Box \Box$$
(1.11)

2.3 FLUXO DE CARGA PARA REDE DE DISTRIBUIÇÃO – MÉTODO DA INJEÇÃO DE CORRENTE

Utiliza-se o fluxo de carga para calcular os parâmetros necessários para a resolução do problema de alocação de banco de capacitores no sistema de energia. Dentre os parâmetros em análise, destacam-se as perdas do sistema. Ressalta-se que a presente proposta de trabalho tem como finalidade minimizar tais perdas.

Sabe-se que um sistema de distribuição opera em forma radial, ou seja, só há um caminho para corrente: da fonte para a carga. Geralmente, os sistemas apresentam uma razão entre a resistência e a reatância (R/X) muito elevada quando comparados com valores típicos de sistemas de transmissão ou subtransmissão. Isso faz com que o sistema seja considerado mal condicionado.

Um sistema mal condicionado apresenta problemas de convergência na utilização de algoritmos baseados nos métodos tradicionais, como método de Newton e suas versões desacopladas - muito utilizados em Sistemas Elétricos de Potência. Diante do exposto, optou-se por utilizar, neste trabalho, o método da injeção de corrente.

No método da injeção de corrente, diferentemente dos métodos clássicos de fluxo de carga, o algoritmo é orientado pelas linhas (localizadas entre as barras) no sistema de energia radial e apresenta excelente convergência e robustez; além de poder ser utilizado para aplicações em tempo real.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a resolução do problema de alocação e dimensionamento ótimo de bancos capacitores realizou-se um estudo comparativo entre o PSO Clássico e as suas princi-

pais variações, quais sejam:

- 1. com fator de Inércia variando ao longo das iterações (PSO-TVIW) ;
- 2. com variação nos fatores cognitivo e social (PSO-TVAC);
- 3. com fator de constrição (PSO-CF).

Os algoritmos de otimização para solução do problema de alocação e dimensionamento ótimo de bancos capacitores foram desenvolvidos no software MATLAB. Além disso, para encontrar o estado de operação da rede, assim como as perdas ativas, ou seja, para calcular o fluxo de carga a cada iteração, implementou-se um algoritmo auxiliar, baseado no método injeção de corrente, também no MATLAB, o qual independe do algoritmo de otimização proposto neste trabalho.

Utilizou-se uma rede de distribuição trifásica radial de 15 barras de 100MVA e 11 KV do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE).

Foram feitos gráficos e tabelas para comparar os resultados obtidos para cada variação de PSO. Foi realizada, ainda, análise do perfil de tensão para se verificar se houve violação do nível de tensão nas barras, visto que as tensões nas barras devem estar dentro dos valores estabelecidos pela ANEEL (0,95pu< tensão <1,05pu). Para que se possa mensurar o quão melhor foi um método em relação ao outro, utilizou-se métricas de desempenho, comumente utilizadas em estatísticas, tais como média e desvio padrão³ das perdas ativas, visando avaliar os resultados. Outra métrica utilizada foi o tempo de processamento de cada método.

3.1 REDE IEEE 15 BARRAS

Para o estudo proposto, adotou-se como estudo de caso uma rede radial de distribuição de 15 barras. Nas condições iniciais para o caso base a ser simulado, tal rede é composta por 14 ramos, uma barra de geração (subestação) e 14 barras de carga somando a demanda total de 1.226,40 kW e 1.251,18 kVAr. Na Figura 3.1, tem-se o diagrama unifilar da rede teste.

³ Desvio padrão mostra o quanto de variação, dispersão, existe em relação à média.



Fonte: Adaptado de DAS; KOTHARI; KALAM, 1994

Os parâmetros de linha, bem como os parâmetros de barra estão representados em pu, nas bases 100 kVA e 11 kV, mostrados nas Tabelas 0.1 e 0.2. Os referidos dados foram extraídos de (DAS; KOTHARI; KALAM, 1994) e serão utilizados para simulação do fluxo de carga.

Ramo(j)	Barra saída IS(j)	Barra entrada IR (j)	Resistência (R) pu	Reatância (X) pu
1	1	2	0,001118	0,001094
2	2	3	0,000967	0,000946
3	3	4	0,000695	0,000680
4	4	5	0,001259	0,000849
5	2	9	0,001664	0,001122
6	9	10	0,001394	0,000940
7	2	6	0,002113	0,001426
8	6	7	0,000899	0,000607
9	6	8	0,001034	0,000698
10	3	11	0,001484	0,001001
11	11	12	0,002024	0,001365
12	12	13	0,001664	0,001122
13	4	14	0,001844	0,001244
14	4	15	0,000989	0,000667

Tabela 0.1 – Dados de linha Sistema IEEE 15 barras

Fonte: Adaptado de DAS; KOTHARI; KALAM, 1994, p.336

Barras	Potência Ativa Demandada PD (pu)	Potência Reativa Demandada QD(pu)
1	0,000000	0,000000
2	0,441000	0,449910
3	0,700000	0,714143
4	1,400000	1,428286
5	0,441000	0,449910
6	1,400000	1,428286
7	1,400000	1,428286
8	0,700000	0,714143
9	0,700000	0,714143
10	0,441000	0,449910
11	1,400000	1,428286
12	0,700000	0,714143
13	0,441000	0,449910
14	0,700000	0,714143
15	1,400000	1,428286

Tabela 0.2 - Dado	s de barra	Sistema	IEEE 15	barras
-------------------	------------	---------	----------------	--------

Fonte: Adaptado de DAS; KOTHARI; KALAM, 1994, p.336

3.2 PARÂMETROS DO ALGORITMO

Foram comparados por meio de simulação na plataforma MATLAB os quatro métodos de variação do PSO citados anteriormente – método clássico, com fator de inércia, com fator de constrição e com variação das constantes de aceleração. Para uma população de 100 partículas, fez-se as simulações para 200 iterações, executadas 50 vezes, nas mesmas condições para os quatros métodos de PSO propostos, conforme tabela abaixo:

Tabela 0.3 - Condições da simulação						
Nº de iterações	Nº de partículas	Execuções				
200	100	50				
Fonte: do próprio autor						

Para o método com fator de constrição (k), foi considerado o disposto na subseção 2.2.2, sendo k=0,7298. Já para o PSO com variação das constantes de aceleração, considerou-se os parâmetros especificados na subseção 2.2.3.

Os parâmetros considerados para todas os métodos de PSO simulados, estão resumidos na seguinte tabela:

Tabela 0.4 - Parâmetros, por método de PSO, considerados nas simulações no MATLAB							
PSO	Constante de inércia ω	Coeficiente cognitivo C ₁	Coeficiente social C ₂	Fator K			
Clássico	1	2	2	-			
	$\omega_{\text{variáve}}$ l, eq.(1.7)						
Fator de inércia (ω)	ω _{máx} =0,9	2	2	-			
	ω _{mín} =0,4						
Fator de constrição (k)	-	2,05	2,05	0,7298			
	$\omega_{\text{variável}}$, eq.(1.7)	C_1 variável, eq. (1.10)	C ₂ variável, eq. (1.11)				
TVAC	ω _{máx} =0,9	C1máx=2,5	C2máx=0,5	-			
	ω _{mín} =0,4	C1mín=0,5	C ₂ mín=2,5				
Fonte: do próprio autor							

3.3 FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo (FO), a ser minimizada pelo algoritmo proposto, é composta pelo custo anual gerado pelas perdas de potência ativa e pelo custo anual dos bancos de capacitores instalados. Além disso, a função objetivo sofrerá penalidades caso seja violado os níveis de tensão nas barras ou caso a potência reativa capacitiva de todos os bancos capacitores seja maior que o total de reativos das cargas do sistema, de a-cordo com a equação:

$$FO = k^{p} \times P_{perdas} + \sum_{j=1}^{J} K_{j}^{c} \times Q_{j}^{c} + penalidades$$
(3.1)

Em que,

k^p: custo anual por unidade de perdas ativas (168\$/KW);

P_{perdas}: total de perdas ativas em KVA;

 K_i^c : custo anual do capacitor (\$/KVAR), conforme tabela 3.5;

 Q_i^c : tamanho total do banco de capacitores localizado na barra j;

J: número de barras candidatas para alocação de bancos de capacitores.

No presente trabalho, considerou-se todos os bancos de capacitores fixos. A seguinte tabela, que relaciona o valor nominal do banco de capacitores com seu respectivo custo anual, é a base para a simulações, em que considera-se o custo na instalação do banco de capacitores.

Tabela 0.5 – Valores nominais do Banco de Capacitores e respectivos custos									
Valor Nominal (KVAR) 150 300 450 600 750 900 1050 1200									
Custo (\$/ano)	0,5	0,35	0,253	0,22	0,276	0,183	0,228	0,17	
Easter A dagte de la ELCHEIKH et al 2014									

Fonte: Adaptado de ELSHEIKH et al, 2014

Nesse trabalho serão considerados dois critérios de penalidades (ou restrições). Sendo que o primeiro critério é utilizado para atender aos níveis de tensões exigidos pela resolução vigente. Já o segundo critério é para limitar a potência reativa, visto que, o uso excessivo de banco de capacitores para compensação de potência reativa torna o sistema sujeito a instabilidade com relação ao nível de tensão nas barras. Os referidos critérios são:

i) Níveis de tensão nas barras (fp1)

Os níveis de tensão devem estar dentro do limite: $v^{\min} \ge v \ge v^{\max}$

Em que, V_i^{min} e V_i^{mix} correspondem, respectivamente, a 0,95 e 1,05 pu, conforme Resolução nº 505/2001 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

ii) Limite de potência reativa capacitiva (fp2)

O somatório de potência reativa capacitiva $(\sum_{j=1}^{J} Q_{j}^{c})$ não deve ultrapassar a quantidade de reativos das cargas (Q_{cargas}), o que limita a potência de reativos que pode ser instalada nas barras. Ressalta-se que, os valores nominais dos bancos de capacitores são considerados variáveis continuas, no algoritmo, sendo assim, os valores dos capacitores serão aproximados, se necessário, para atender aos valores discretos disponíveis no mercado (tabela 3.5).

A parcela "penalidades" da equação (3.1) será definida pela seguinte expressão:

$$Penalidads = fp_1 \times \sum_{i=1}^{Nbarras} (v_i - v_i^{lim})^2 + fp_2 \times \left(\sum_{j=1}^J Q_j^C - Q_{max}^C\right)^2$$
(3.2)

Na qual,

fp1 e fp2: são fatores de penalidades, ambos de valor unitário. Caso nenhuma

restrição seja violada, os fatores serão zeros;

v_i: módulo da tensão na barra i;

 v_i^{\lim} : tensão limite é definida pela expressão:

$$v^{\lim} = \begin{cases} v^{\max}; & v > v^{\max} \\ v^{\min}; & v < v^{\min} \end{cases}$$
(3.3)

 $\sum_{j=1}^{J} Q_{j}^{C}$: é o somátorio de reativos alocados de todas as barras do sistema;

 Q^{C}_{max} : máxima potência reativa à ser alocada na rede ($Q^{C}_{max} < Q_{cargas}$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Reiterada a importância da presente aplicação, sobretudo no cenário atual do setor elétrico que está sendo submetido à constante expansão, torna-se oportuna a apresentação dos resultados obtidos para o uso do PSO: considerando o custo dos bancos instalados, o que acarretaria na inserção de um *trade off*⁴, ou seja, uma condição inicial adversa, uma vez que, quanto mais bancos instalados, mais onerosa é respectiva solução.

4.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade é utilizada antes da otimização e indicará as melhores barras para alocar os capacitores, reduzindo o tempo de processamento do algoritmo. Após utilizar o critério do fator de sensibilidade no algoritmo do sistema de 15 barras, tem-se a seguinte tabela, na qual as barras estão ordenadas em ordem decrescente, de acordo com o valor sensibilidade de perdas, que determinará a sequência de prioridade para a alocação de banco de capacitores. As barras cujo valor $norm[i] = \frac{V[i]}{0.95}$ seja inferior a 1,01, serão consideradas como barras candidatas a alocação de bancos de capacitores para compensação de reativos, sendo que as barras com

⁴ Trade off refere-se a situações de escolha entre soluções de objetivos conflitantes

a maior relação da variação das perdas totais do sistema (∂ PL) em relação à variação da potência reativa injetada (∂ Q) em uma barra, $\frac{\partial Perdas}{\partial Q}$, são as inicialmente selecio-

nadas para receberem os bancos de capacitores.

	Tabela 0.6 – Fator de sensibilidade em ordem de prioridade para alocação							
N. Linha	Fator Sensib	Barra DE(p)	Barra PARA(q)	Tensão Vp	Tensão Vq	Norm[i]=		
				-		Vq(i)/0.95		
1	0.0293	1	2	1.0000	0.9713	1.0224		
7	0.0162	2	6	0.9713	0.9582	1.0087		
2	0.0153	2	3	0.9713	0.9567	1.0070		
10	0.0085	3	11	0.9567	0.9499	0.9999		
3	0.0062	3	4	0.9567	0.9509	1.0010		
11	0.0052	11	12	0.9499	0.9458	0.9956		
5	0.0041	2	9	0.9713	0.9680	1.0189		
14	0.0031	4	15	0.9509	0.9484	0.9984		
13	0.0029	4	14	0.9509	0.9486	0.9985		
8	0.0028	6	7	0.9582	0.9560	1.0063		
12	0.0017	12	13	0.9458	0.9445	0.9942		
9	0.0016	6	8	0.9582	0.9569	1.0073		
6	0.0013	9	10	0.9680	0.9669	1.0178		
4	0.0013	4	5	0.9509	0.9499	0.9999		
		T (A 1		ZTT (1 0014				

Fonte: Adaptado de ELSHEIKH et al, 2014

Posto isso, das 15 barras do sistema, 11 serão barras candidatas. Conforme critério exposto e de acordo com a tabela acima, as barras candidatas, destacadas e dispostas na ordem de prioridade para alocação de bancos de capacitores, são: 6, 3, 11, 4, 12, 15, 14, 7, 13, 8 e 5.

4.2 CASO BASE

Como etapa preliminar do estudo, executou-se um fluxo de potência inicial para o caso base, desprezando-se qualquer compensação por banco de capacitores. Dos resultados desta simulação, obteve-se as perdas totais de potência ativa dadas por 61,79 KW e a função custo anual das perdas de potência ativa dado por \$10.381,46, considerando o custo por perdas igual a \$168/KW. Obteve-se também o perfil de tensão nas barras, para o caso base, conforme mostra a Figura 4.1.



Fonte: do próprio autor

De acordo com a figura 4.1, pode-se observar que somente as barras 12, 13, 14 e 15 violaram o limite mínimo de tensão (0,95 pu). Provavelmente, as essas barras serão barras candidatas a alocação de banco de capacitores.

4.3 CONSIDERANDO O CUSTO DO BANCO DE CAPACITORES

Realizou-se simulações considerando o custo anual para instalação de Bancos de Capacitores. Os resultados expressos nas tabelas 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 mostraram a superioridade do PSO-TVAC na busca de ótimos para o problema proposto.

Tabela 4.2 – Comparação das perdas ativas ótimas para os quatro métodos						
Tipo de PSO:	Clássico	TVIW	CF	TVAC		
Média das Perdas Ativas	36,052781	30,146009	30,168862	29,986943		
Desvio Padrão das Perdas Ativas	7,244559	0,176848	0,261427	0,106326		
Maior valor para Perdas Ativas	55,277343	30,614149	31,153053	30,309314		
Menor valor para Perdas Ativas	29,771024	29,771024	29,725653	29,792215		
	E (D (

Fonte: Do próprio autor

Na tabela 4.2 tem-se um resumo dos resultados das perdas ativas simulados para os quatro tipos de PSO. Primeiramente, pode ser observado que o PSO clássico, dentre todos os métodos simulados, foi aquele que apresentou a maior média das perdas ativas. Além disso, houve grande dispersão dos resultados quando comparado aos demais métodos, fato que pode ser observado pela disparidade entre os valores

máximo e mínimo das perdas ativas alcançados durante a execução total da simulação. Os algoritmos modificados PSO-TVIW e PSO-CF apresentaram resultados bastante semelhantes em todas as medidas observadas. O algoritmo PSO-TVAC, no entanto, se destacou, apresentando a menor média das perdas ativas com a menor dispersão (desvio padrão) nos resultados das 50 execuções. Apesar de não ter apresentado o menor valor verificado das perdas ativas (visto que foi o PSO-CF com o valor de 29,725653), sendo, inclusive, o PSO- TVAC o pior nesse quesito, tal resultado não foi tão dispare se comparados aos outros métodos testados.

Na tabela 4.3 tem-se um resumo dos resultados dos custos anuais totais das instalações de bancos de capacitores simulados para os quatro tipos de PSO.

l abela 4.0	Tabela 4.5 – Comparação do custo totar para os quatro metodos em dotar (#)						
Tipo de PSO:	Clássico	TVIW	CF	TVAC			
Média do Custo Total	6.064,967289	5.075,629534	5.089,368865	5.040,806487			
Desvio Padrão do Custo	1.216,729624	40,841507	37,800909	21,646213			
Total							
Maior valor para do	9.286,593687	5.212,709104	5.233,712953	5.122,351031			
Custo Total							
Menor valor para do	5.025,979688	5.025,979688	5.029,527381	5.025,979688			
Custo Total							
Fonto: do national outor							

Tabela 4.3 - Comparação do custo total para os quatro métodos em délar (\$)

Fonte: do próprio autor

Os resultados apresentados na tabela 4.3 são importantes pois expressam a superioridade do PSO-TVAC em relação aos demais algoritmos de uma forma mais didática, uma vez que se tratam de valores monetários.

A Tabela 4.4 apresenta as configurações dos bancos de capacitores a serem instalados nas barras candidatas, para o melhor método de otimização (PSO-TVAC), bem como seus respectivos valores nominais. Vale ressaltar que essas configurações representam as melhores partículas dos 4 algoritmos estudados.

l'abela 4.4 – Variaveis de controle para o melhor caso e valores de bancos de capacitores							
Tipo de PSO:	Clássico	TVIW	CF	TVAC			
Variável de controle Q ₆	300	300	300	300			
Variável de controle Q ₃	0	0	0	0			
Variável de controle Q ₁₁	150	150	150	150			
Variável de controle Q4	450	450	300	450			
Variável de controle Q ₁₂	150	150	150	150			
Variável de controle Q ₁₅	0	0	0	0			
Variável de controle Q ₁₄	0	0	150	0			
Variável de controle Q7	150	150	150	150			
Variável de controle Q ₁₃	0	0	0	0			
Variável de controle Q ₈	0	0	0	0			
Variável de controle Q ₅	0	0	0	0			
TOTAL DE RETIVOS [MVAr]	1200	1200	1200	1200			

Tabela 4.4 – V	Variáveis de controle	para o melhor caso e y	valores de bancos d	e capacitores
I ubelu I.I	value clo ac controle	pulu o memor cubo e	value outcoo a	e cupacitores

Fonte: do próprio autor

Nota-se, na tabela acima, que o total de potência reativa injetada (Q) pelos bancos de capacitores, para todos os casos simulados, resulta em 1200 MVAr, não excedendo o limite de reativos demandado pelo total de cargas no sistema, conforme critério pré-estabelecido. Ressalta-se que os bancos de capacitores estão numerados de acordo com o fator de sensibilidade das barras. Observou-se que todos os métodos atenderam ao critério de limite de potência reativa a ser instalado no sistema (1200MVAr).

A tabela 4.5 mostra uma comparação entre os quatro métodos com o objetivo de verificar qual deles apresentou uma maior economia com a alocação e dimensionamento de bancos de capacitores instalados.

Tabela 4.5 - Comparação entre os resultados obtidos quanto a análise de custos							
Tipo de PSO:	Clássico	TVIW	CF	TVAC			
Total KVAr instalado	1200	1200	1200	1200			
Perdas Potência Ativa [kW]	31,89	29,94	29,94	29,92			
Custo das Perdas Ativas	5.356,73	5.029,53	5.029,53	5.025,98			
[\$/ano]							
Economia devido à redução das	5.024,73	5.351,93	5.351,93	5.355,48			
perdas ativas [\$/ano]							
Custo dos Capacitores [\$/ano]	443,85	443,85	510	443,85			
Economia líquida [\$/ano]	4.580,88	4.908,08	4.841,93	4.911,63			
Fonte: do próprio autor							

Analisando-se a tabela acima, verificou-se que o PSO-TVAC apresentou maior economia se comparado com os demais métodos. O PSO clássico, por sua vez, apresentou pior resultado nesse quesito. Na tabela 4.4, observou-se que o PSO clássico,

TVIW e o TVAC alocaram os bancos de capacitores nas mesmas barras candidatas e com os mesmos valores nominais, o que acarretou no mesmo custo anual (\$/ano) de instalação de bancos de capacitores para os três métodos. No entanto, o maior impacto na economia líquida anual ocorreu devido à redução das perdas ativas. Logo, o melhor método de otimização foi o PSO-TVAC com uma economia líquida de \$4.911,63. A figura 4.2 apresenta, graficamente, o perfil de tensão da rede de 15 barras para o caso base comparando-o com o caso otimizado para o melhor método, isto é, o PSO TVAC.



Na figura 4.2, observa-se que o algoritmo PSO tipo TVAC alcançou o objetivo de melhorar o perfil de tensão em relação ao caso base (sem compensação de reativos), uma vez que estão todas dentro dos limites máximos e mínimos de ±5% dos valores nominais, imposto pelo fator de penalidade de tensão (0,95pu≤tensão≤1,05pu). Isso comprova a efetividade do algoritmo PSO tipo TVAC, que apresentou melhor desempenho em termos de otimização, quando comparado com os outros três métodos.

5 CONCLUSÃO

Levando-se em conta o que foi observado na realização deste trabalho, nota-se que há uma margem de erro muito baixa ao se comparar o resultado final para todos casos – PSO Clássico, TVIW, com fator de constrição e o TVAC. As pequenas divergências entre os resultados obtidos dentre todos os métodos para o controle de reativo da rede de Distribuição de Energia mostram o quanto o PSO é adequado para trabalhar com problemas como os de planejamento do setor elétrico, cujas variáveis de controle são determinantes para garantir confiabilidade e segurança ao sistema.

Tendo em vista os aspectos observados, entende-se que, houve uma melhora do perfil de tensão da rede de Distribuição em estudo, comprovando a eficácia da utilização de métodos de otimização para alocação e dimensionamento de bancos de capacitores. Sendo que as restrições acrescentadas aos algoritmos são de suma importância para garantir que níveis de tensão estabelecidos pela ANEEL sejam atendidos, visando sempre a Qualidade de Energia Elétrica.

Percebe-se que o PSO tipo TVAC, apresentou melhor desempenho em termos de otimização. Isso ocorre devido a função objetivo aplicada considerar a parcela de custo em virtude dos bancos de capacitores instalados, o que limita a quantidade de capacitores que podem ser alocados, visto que o valor do nominal do banco é inversamente proporcional ao seu custo anual.

O PSO e suas variações apresentam a robustez e confiabilidade desejada para serem aplicados nos problemas de planejamento do setor elétrico. Sabe-se, no entanto, que não existe um método de otimização que se sobressaia em todos os problemas existentes, sendo necessária a devida cautela no momento da escolha do algoritmo. Existem outros métodos de otimização baseados em inteligência de enxames, como colônia de formigas e de cupins, por exemplo, que poderiam ser testados para buscar melhores resultados.

24

REFERÊNCIAS

- BRASIL. ANEEL. **Resolução nº505 de 26 de novembro de 2001**. Estabelece de forma atualizada e consolidada, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente. Available: http://www.aneel.gov.br [25 ago. 2016]
- CARVALHO, E. Solução de problemas de otimização com restrições usando estratégias de penalização adaptativa e um algoritmo do tipo PSO. Juiz de Fora: UFJF, 2014.
- CHATURVEDI, K. T.; PANDIT, M.; SRIVASTAVA, L. Particle swarm optimization with time varying acceleration coefficients for non-convex economic power dispatch. *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 31, 2009, p.249-257.
- DAS, D; KOTHARI, D. P.; KALAM, A. Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks. *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 17, n^o 5, p. 335-346, 1995.
- DAVIS, L. *Handbook of Genetic Algorithms* .Van Nostrand Reinhold, New York, NY, 1991.
- EBERHART, R. C.; SHI, Y. Comparing inertia weigths and constriction factors in particle swarm optimization. *IEEE Press. Evolutionary Computation*, vol. 1, p. 84-88, 2000.
- ELSHEIKH *et al.* **Optimal capacitor placement and sizing in radial electric power systems.** Alexandria *Engineering Journal*, 2014, 53, p. 809–816.
- GASPERIN, L. V. Alocação Ótima de Bancos de Capacitores em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Modelos Simplificados. Dissertação de mestrado. PUCRS. Porto Alegre, 2008.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. *Particle Swarm Optimization*, *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, pp. 1942–1948.1995
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. C.; SHI, Y.. Swarm Intelligence, Morgan Kaufman Publishers, 2001..
- EBERHART, R. C.; SHI, Y. **Parameter selection in particle swarm optimization.** In Evolutionary Programming VIZ: Proc. EP98, New York: Springer Verlag pp. 591-600, 1998.
- STEILEIN, G. Análise de Metodologias para Operação de Capacitores Automáticos Instalados em Redes de Distribuição de Energia Elétrica. Dissertação de mestrado. UFPR. Curitiba, 2012.

SUN, J.; FENG, B.; XU, W. Particle swarm optimisation with particles having quantum behavior. *IEEE Congress on Evolutionary Computation, Piscataway*, NJ, p. 325-331, 2004.

ANÁLISE CRISTALOGRÁFICA EM CERAS EPICUTICULARES DE PLANTAS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Francimário dos Passos Silva¹

Henrique Duarte da Fonseca Filho²

RESUMO: As superfícies das folhas de plantas apresentam uma membrana capaz de protege-las de ações do ambiente, como exposição à radiação solar, retenção de líquidos, contaminação, ataques de insetos, ação de patógenos, temperaturas elevadas e baixos fluxos de ar. Muitas destas funções são desempenhas por ceras epicuticulares que estão distribuídas na superfície da folha e suas composições químicas e tipos morfológicos estruturais implicam nas propriedades que atuam nas folhas. Este trabalho tem por objetivo demostrar a importância da difração de raios-x para a caracterização da morfologia e composição química de ceras epicuticulares em espécies da região amazônica, visto que a pesquisa bibliográfica deu indícios que a técnica de caracterização é pouco utilizada nacionalmente, resultando no desconhecimento das composições químicas e morfologias de ceras dessas plantas.

Palavras-chave: ceras epicuticulares, difração de raios-x, folhas, morfológia, composição química.

1 INTRODUÇÃO

entre as inúmeras técnicas utilizadas para a caracterização de materiais, a difratometria de raios-x (DRX) é considerada uma das mais abrangentes quando se deseja obter um modelo de configuração estrutural das moléculas de um material (CASADO; HEREDIA, 1999). Sendo capaz de analisar compostos de diversas naturezas tais como inorgânicos, polímeros, proteínas, produtos farmacêuticos e fibras (CHAUHAN, 2014), essa técnica se destaca dentre as demais utilizadas para determinação estrutural molecular, por sua rapidez e precisão das informações obtidas (STEPHENSON, 2005).

A variabilidade de amostras que podem ser verificadas pela difratometria de raios-x coopera para que essa técnica seja o mecanismo primário de pesquisa nas áreas da física, química, físico-química e bioquímica, quando o objetivo é definir as características estruturais de materiais na escala atômica (NAPOLITANO et al., 2007;

¹ Foi bolsista de iniciação científica PIBIC/CNPq/UNIFAP, vigência 2014-2015.

² Orientador de iniciação científica. Professor do Curso de Física da UNIFAP.

GLUSKER; TRUEBLOOD, 2010). A obtenção das informações estruturais nesta escala é possível quando os materiais são cristalinos, isto é, existe uma padronização em suas ligações atômicas e essa formação atua como grade de difração dos feixes de raios-x (GUINEBRETIÈRE, 2007; GITIPOUR et al., 2015).

As informações preliminares obtidas pela difratometria de raios-x são no âmbito da disposição tridimensional dos átomos de um composto, que para uma melhor apuração de dados, necessariamente deve apresentar-se no estado cristalino, ou seja, o material deve possuir átomos organizados de forma periódica a grandes distâncias atômicas (CUNHA, 2008). Uma vez determinada a disposição dos átomos é possível calcular fatores denominados como parâmetros cristalográficos, dentre os quais, os mais comuns são os espaçamentos basais, parâmetros de rede, tensão da rede cristalina, índices da fase cristalina, ângulos de ligação e conformacionais (DESCHAMPS, 2010).

Existem propriedades físico-químicas que estão estritamente relacionadas aos parâmetros cristalográficos do composto como a adsorção de moléculas (GITIPOUR, 2006), estresse estrutural e residual, que são medidos através da tensão de rede das partículas (MESKE; SCHNACK, 2003) e a influência da umidade sobre as propriedades físicas, pois em alguns sistemas com estruturas hidratadas a quantidade de líquido está relacionada com um aumento em um dos parâmetros de rede da estrutura (VOGT; WILLIAMS, 2010; BUNACIU et al., 2015). Além disso, a difratometria de raios-x é uma ferramenta capaz de identificar substâncias químicas de compostos desconhecidos (SKAKLE, 2005), mas pelo fato da existência de outras técnicas mais específicas para identificação, tais como Espectometria de Massa, Cromatografia Gasosa e Resonância Magnética Nuclear, a difratometria é posta em segundo plano (STE-PHENSON, 2005; KOCH et al., 2006).

A difração de raios-x foi uma das técnicas que contribuíram para a construção do conhecimento atual sobre a arquitetura molecular (GLUSKER; TRUEBLOOD, 2010). Na biologia, o estudo da difratometria de raios-x foi introduzido quando pesquisadores analisaram a pepsina, uma proteína no estado cristalino. Isso incentivou a aplicação da cristalografia em outros materiais biológicos (DRENTH, 1994).

Nos últimos anos, os estudos cristalográficos em materiais biológicos se ramificaram para a caracterização estrutural de compostos isolados das folhas de plantas como extratos etanólicos e ceras epicuticulares. Essas, por sua vez, provocaram o interesse de muitos biólogos por mais de um século, devido aos benefícios macroscópicos proporcionados as plantas e suas possíveis aplicações como vernizes impermeabilizantes (MEUSEL et al., 2000).

2 CERAS EPICUTICULARES DAS FOLHAS DE PLANTAS

A superfície de frutos e folhas das plantas geralmente apresenta uma membrana responsável pela proteção contra radiação eletromagnética, perda de líquidos, molhabilidade, contaminação, ataques de insetos, ação de patógenos, temperaturas elevadas e baixos fluxos de ar (KOCH et al., 2009). Esta membrana é conhecida como cutícula, que é um composto extracelular de matriz polimérica, responsável por cobrir a epiderme do órgão da planta (JETTER et al., 2000; BARGEL, 2006). Análises microscópicas de folhas de plantas revelaram que a cutícula é composta por uma camada primária localizada na região mais interna que possui ceras intracuticulares e outra secundária mais externa, onde encontram-se as ceras epicuticulares (MONQUERO et al., 2004).

A constatação de que os constituintes principais da cutícula são as ceras e a cutina, motivou investigações iniciais através de estudos biólogos que procuravam identificar quais elementos possuíam propriedades para desempenhar as funções de proteção da planta, e verificou-se que a cutina é um composto poliéster de biopolímero com hidroxila e ácidos graxos, constituído por cadeias de polietileno ou o polímero lignina (JEFFREE et al., 2006; KOCH et al., 2009). E as ceras são compostas, em geral, por hidrocarbonetos, alcoóis, cetonas, aldeídos e ácidos graxos, compostos cíclicos e aromáticos como os terpenóides e flavonoides (BIANCHI, 1995). As ceras apresentam a seleção de compostos químicos que possuem um considerável grau de cristalinidade, proporcionando a existência de propriedades como ponto de fusão entre 60 a 95°C e solubilidade em solventes orgânicos (ENSIKAT et al., 2006). Além disto, a deposição da cera sobre a superfície cuticular cria uma membrana que protege a célula vegetal das ações agressivas do meio ambiente. Dessa forma, as ceras atuam como agentes de defesa de possíveis causadores de danos à planta como perda de água por transpiração excessiva, radiações solares, absorção de produtos químicos e contaminantes (HEREDIA et al., 1998).

Nos últimos anos, investiu-se na elucidação dos componentes químicos e tipos morfológicos de ceras cuticulares das folhas de mais 80 espécies de plantas (MON-QUERO et al., 2004). Entretanto, muitas espécies da região amazônica não foram submetidas a estas analises, devido ao fato de que esta região abrange vários estados Figura 1, que abrigam diversas espécies de plantas. Além disso, poucos pesquisadores conhecem a aplicação de determinadas técnicas de identificação de ceras cuticulares, para compreender funções que são atuantes nas plantas.



Figura 1. Abrangência da região amazônica.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo demonstrar a importância da difração de raios-x para a caracterização da morfologia e composição química de ceras epicuticulares, para compreender as propriedades e funções desempenhadas nas folhas das plantas. Assim como incentivar a aplicação da técnica de caracterização em ceras de plantas da região amazônica, devido sua diversidade na flora.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O levantamento de dados bibliográficos que fundamentam os estudos cristalográficos em ceras epicuticulares de plantas, através da difratometria de raios-x, foi executado em portais de pesquisa como Web of Science e Portal de Periódicos da Capes.

Nesses portais, na região destinada a busca foram introduzidas palavras chave como X-ray diffraction, Epicuticular wax crystals e wax of leaves. Os artigos encontrados que utilizam a difratometria de raios-x para a determinação estrutural de ceras epicuticulares são em sua grande maioria internacionais, isso implica que muitas espécies de plantas da região amazônica não foram submetidas a esta técnica. Logo deseja-se assimilar a classificação feita em espécies de plantas internacionais e aplica-las em espécies conhecidas da flora Brasileira.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As relações entre as propriedades, composição química e morfologia das ceras cuticulares de plantas, são objetos de pesquisa de muitos biólogos a mais de um século. Sendo que os primeiros estudos sobre as funções das ceras de folhas das plantas foram motivados pelas observações dos efeitos macroscópicos como reflexão da luz, comportamento de autolimpeza e impermeabilidade. Após isto, os avanços tecnológicos permitiram que os estudos fossem desenvolvidos na escala microscópica (MEU-SEL et al., 2000; KOCH et al., 2008). E para compreender as propriedades que as ceras desempenhavam nas plantas, desenvolveram-se técnicas por meio de análises químicas, que eram executadas através da extração com solventes (JETTER; *SCHÄFFER*, 2001).

Um dos primeiros estudos para a determinação da composição química das ceras cuticulares foi desenvolvido por Kolattukudy (1976), cujo trabalho citava a ocorrência de compostos alifáticos de cadeia longa na composição química. A presença desses compostos nas ceras determina solidificação em temperatura ambiente e solubilidade em solventes orgânicos (ENSIKAT et al., 2006). Além disso, como esses compostos possuem estrutura morfológica definida, ao determinar a composição química deles, é possível determinar a estrutura das ceras cuticulares (MEUSEL et al., 2000).

Nas ceras cuticulares a disposição dos compostos alifáticos de cadeia longa, que são periodicamente ordenados, formam regiões cristalinas acompanhados de compostos alifáticos de cadeia curta e compostos cíclicos, que constituem regiões amorfas (RIEDERER; SCHREIBER, 1995). Esses fatores definem estreitas relações com as propriedades desempenhadas pela cutícula, como resistência contra fungos, controle da transpiração cuticular e absorção foliar (CASADO; HEREDIA, 1999).

Em meados do século XIX, defendia-se a hipótese de que a composição química das ceras cuticulares, além de influenciar nas propriedades desenvolvidas na planta, estava estritamente relacionada com a morfologia da cera. Atualmente, a consideração de que a micromorfologia das ceras cuticulares depende especialmente da composição química, é comprovada experimentalmente, através de técnicas de como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raios-X e Difração de Elétrons (DE), que apresentam informações tridimensionais e da composição química das ceras (DE BARY, 1871; MEUSEL et al., 2000; KOCH et al., 2008).

Os resultados experimentais da relação entre a morfologia e a composição química, possibilitou a classificação de 23 tipos morfológicos de ceras (BARTHLOTT et al., 1998; MEUSEL et al., 2000). Os principais campos que abrangem essas classificações morfológicas, estão de acordo com observações na espécie e órgão da planta, pois em alguns casos ocorre a existência de uma leve película de cera e em outros se obser-

32

va cristaloides, que são partículas tridimensionais de ceras distribuídas em uma base pelicular de cera (ENSIKAT et al., 2006). Entre os cristalóides, os principais tipos morfológicos são grânulos, placas, filamentos, hastes, túbulos ocos, crostas e plaquetas (KOCH et al., 2008). É valido destacar a existência de uma semelhança na composição química entre dois tipos morfológicos de ceras, que são as plaquetas, pois possuem em sua composição alcoóis primários e os túbulos, que são compostos por alcoóis secundários (ENSIKAT et al., 2006; KOCH et al., 2006).

O grau de cristalinidade é um fator utilizado para a classificação morfológica das ceras. De acordo com o grau de cristalinidade existem as estruturas que podem ser classificadas como cristalinas, as quais apresentam um elevado índice de ordenamento dos átomos, que é o caso das plaquetas que indicam uma cristalinidade regular em sua estrutura (KOCH et al., 2008), estruturas parcialmente amorfas, essas possuem uma distribuição menos ordenada de átomos e as estruturas amorfas as quais a distribuição dos átomos é desordena. Portanto, a existência de ligações químicas que geram estruturas complexas e aleatórias, resulta na formação de fases amorfas (LIMA et al., 2006). Neste contexto, as análises de dados da difração de raios-x, demonstram um seguimento paralelo entre a morfologia e a composição química das ceras cuticulares (ENSIKAT et al., 2006; KOCH et al., 2008).

Para submeter as ceras epicuticulares a análise de difratometria de raios-x, é possível aplicar até dois métodos de extração nas folhas - um é através de isolamento mecânico e outro é através da extração por solventes, sendo que a evaporação deste solvente determina a recristalização. Esse último é mais comum em estudos cristalográficos de ceras (CORDEIRO et al., 2011; MADAENI et al., 2011). Análises realizadas por Ensikat et al. (2006) compararam a eficácia entre os dois métodos de extração de ceras epicuticulares para a análises de difração de raios-x, e os resultados revelaram que os dados obtidos, para a maioria dos casos, são semelhantes. Entretanto, vale a pena ressaltar que a extração por solvente, dependendo das condições, pode causar a proliferação de triterpenóides (JETTER et al., 2000). O fato de que cada espécie de planta apresenta em suas folhas ceras cuticulares, que são constituídas de diferentes morfologias e composições químicas, gera a possibilidade de novas descobertas em espécies da região amazônica, ainda não submetidas a difratometria de raios-x. A importância da aplicação da técnica é relatada por Ensikat et al. (2006), ao considerar que a identificação da estrutura cristalina contribui para a compreensão das propriedades desempenhadas na planta, como barreira de transpiração e hidrofobia. Contudo, a utilização da difratometria de raios-x para identificação estrutural de ceras epicuticulares é desconhecida por muitos pesquisadores locais, por não tomarem conta da importância da técnica, para compreender as funções e propriedades desempenhadas na planta.

5 CONCLUSÕES

A determinação da estrutura cristalográfica das ceras epicuticulares de folhas de plantas possibilita conhecer sua composição química e com isto, classifica-las morfologicamente. Com o objetivo de compreender as funções das ceras epicuticulares na epiderme da folha, deve-se investir em técnicas de caracterização em nível macro e microscópico. A difração de raios-x é uma técnica bastante difundida para analises de compostos inorgânicos. No entanto, a aplicação da técnica é pouco conhecida em compostos orgânicos, foi visto neste artigo a importância da técnica para compreender propriedades desempenhadas pelas ceras nas plantas, considerando que a utilização da técnica deve ser estimulada, pois a diversidade de espécies da Amazônia possibilita conhecer novas combinações entres morfologias e composições químicas.

REFERÊNCIAS

- BARGEL, H.; KOCH, K.; CERMAN, Z.; NEINHUIS, C. Structure-function relationships of the plant cuticle and cuticular waxes – a smart material. *Functional Plant Biology*, v. 3, p. 893–910, 2006.
- BARTHLOTT, W.; NEINHUIS, C.; CUTLER, D.; DITSCH, F.; MEUSEL, I.; THEISEN, I.; WILHELMI, H.Classification and terminology of plant epicuticular waxes. **Bota-**
nicalJournal of the Linnean Society, v. 126, p. 237-260,1998.

- BIANCHI, G.; HAMILTON, R.J. **Waxes: chemistry, molecular biology and function.** The oil Press, Dundee, 1995.
- BUNACIU, A. A.; UDRISTIOIU, E. G.; ABOUL-ENEIN, H. Y. X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. **Critical Reviews in Analytical Chemistry**, v. 45, p. 289-299, 2015.
- CASADO, C.G.; HEREDIA A. Structure and dynamics of reconstituted cuticular waxes of grape berry cuticle (*VitisviniferaL*.). **JournalofExperimentalBotany**, v. 50, n. 331, p. 175–182, 1999.
- CHAUHAN, A.; CHAUHAN, P. Powder XRD technique and its applications in science and technology. **Journal of Analytical Bioanalytical Techniques**, v. 5, p. 1-5, 2014.
- CORDEIRO, S. Z. SIMAS, N. K. OLIVEIRA ARRUDA, R. C. SATO, A. Composition of epicuticular wax layer of two species of Mandevilla (Apocynoideae, Apocynaceae) from Rio de Janeiro, Brazil. **Biochemical Systematics and Ecology**, v. 39, p. 198–202, 2011.
- CUNHA, S. Métodos simples de formação de monocristal de substância orgânica para estudo estrutural por difração de raios x.**QuímicaNova**, Vol. 31, No. 4, p. 906-909, 2008.
- DE BARY, A. Ueber die Wachsiiberziige der Epidermis, **BotanischeZeitschrift**, v. 29, p.128-139, 1871.
- DESCHAMPS, J. R. X-ray crystallography of chemical compounds. Life Sciences, v. 86, p. 585–589, 2010.
- DRENTH, J. Principles of Protein X-ray Crystallography. Springer, 1994.
- ENSIKAT, H. J.; BOESE, M.; MADER, W.; BARTHLOTT, W.; KOCH, K. Crystallinity of plant epicuticular waxes: electron and X-ray diffraction studies. **Chemistry and Physics of Lipids**, v. 144, p. 45–59, 2006.
- GITIPOUR, S.; HOSSEINPOUR, M. A.; HEIDARZADEH, N.; YOUSEFI, P.; FATHOL-LAHI. A. Application of Modified Clays in Geosynthetic Clay Liners for Containment of Petroleum Contaminated Sites. *International Journal of Environmental Research, v. 9, p. 317-322, 2015.*
- GITIPOUR, S.; BAGHVAND, A.; GIVEHCHI, S. Adsorption and permeability of contaminated clay soils to hydrocarbons. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 9 (3), p. 336-340, 2006.
- GLUSKER, J. P.; TRUEBLOOD, K. N. Crystal structure analysis a primer. Oxford U-

niversity Press, 2010.

- GUINEBRETIÈRE, R. X-ray Diffraction by Polycrystalline Materials. International Society for Technology in Education, 2007.
- HEREDIA, A. Biophysical and biochemical characteristics of cutin plant barrier biopolymer. **Biochimical et biophysical acta**, v. 1620, p. 1-7, 2003.
- JEFFREE, C. E. **The fine structure of the plant cuticle**. In: Riederer M, Müller C, editors. Biology of the plant cuticle. Oxford: Blackwell, 2006.
- JETTER, R.; SCHÄFFER, S. Chemical Composition of the Prunus laurocerasus Leaf Surface. Dynamic Changes of the Epicuticular Wax Film during Leaf Development. **Plant Physio***logy*, v. 126, p. 1725–1737, 2001.
- JETTER, R.; SCHÄFFER, S.; RIEDERER, M. Leaf cuticular waxes are arranged in chemically and mechanically distinct layers: evidence from Prunus laurocerasus L. **Plant, Cell and Environment,** v. 23, 619–628, 2000.
- KOCH, K.; BHUSHAN, B.; BARTHLOTT, W. Multifunctional surface structures of plants: An inspiration for biomimetics. **Progress in Materials Science**, v. 54, p. 137–178, 2009.
- KOCH, K.; BHUSHAN, B.; BARTHLOTT, W. Diversity of structure, morphology and wettin of plant surfaces. The Royal Society of Chemistry, v. 4, p. 1943-1963, 2008.
- KOCH, K.; BARTHLOTT, W.; KOCH, S.; HOMMES, A.; WANDELT, K.;MAMDOUH, W.; DE-FEYTER, S.; BROEKMANN, P. Structural analysis of wheat wax (Triticum aestivum, c.v. 'Naturastar' L.): from the molecular level to three-dimensional crystals. **Planta**, v. 223, p. 258-270, 2006.
- KOLATTUKUDY, P. Chemistry and biochemistry of natural waxes. Elsevier Amsterdam, 1976.
- LIMA, R. J. C.; MORENO, A. J.; CASTRO, S. F. L.; GONÇALVES, R. B. S.; OLIVERA, A. B.; SASAKI, J. M.; FREIRE, P. T. C. Taninos hidrolisáveis em Bixa orellanaL. Quimica Nova, v. 29, p. 507-509, 2006.
- MADAENI, S.S.; FALSAFI, M.; GHAEMI, N. A novel method for preparation of lowfouling membranes: Surface coating byextracted wax from leafy cabbage. **Desalination**, v. 283, p. 148–155, 2011.
- MESKE, R.; SCHNACK, E. Particular adaptation of X-ray diffraction to fiber-reinforced composites. **Mechanics of Materials**, v. 35, p. 19–34, 2003.
- MEUSEL, I.; WILHELM, B.; KUTZKE, H.; BARBIER, B. Crystallographic studies of plant waxes. **Powder Diffraction**, v. 15 (2), p. 123-129, 2000.
- MONQUERO, P. A.; CHRISTOFFOLETI, P.J.; MATAS, J.A.; HEREDIA, A. Caracteri-

zação da superfície foliar e das ceras epicuticulares em Commelinabenghalensis, Ipomoeagrandifolia e Amaranthushybridus. **Planta Daninha**, v.22, p.203-210, 2004.

- NAPOLITANO, H.; CAMARGO, A.; MASCARENHAS, Y.; VENCATO, I.; LARIUC-CI, C. Análise da difraçãodos Raios X. **Revista Processos Químicos**, V. 1, p. 35-45, 2007.
- RIEDERER, M.;SCHREIBER, L. **Waxes: the transport barriers of plant cuticles.** In: Hamilton RJ, ed. Waxes: chemistry, molecular biology and functions. Dundee: The Oily Press, p. 131–156, 1995.
- SKAKLE, J. Applications of X-ray Powder Diffraction in Materials Chemistry. **The Chemical Record**, v. 5, p. 252–262, 2005.
- STEPHENSON, G. A. Applications of x-ray powder diffraction in the Pharmaceutical industry. **The Rigaku Journal**, V. 22, p. 2-15, 2005.
- VOGT, F. G.; WILLIAMS, G. R. Advanced Approaches to Effective Solid-State Analysis: X-ray Diffraction, Vibrational Spectroscopy, and Solid-State NMR. American Pharmaceutical Review. v. 13, p. 58–65, 2010.

APLICAÇÃO DO GPR AO REDOR DAS RUÍNAS DA IGREJA DE PEDRA DE MAZAGÃO-VELHO-AP

Marcus Vinicius da Costa Frazão¹

Helyelson Paredes Moura²

RESUMO: As ruínas da igreja de pedra de Mazagão-Velho, construída no século XVIII por colonizadores portugueses e escravos africanos que vieram de embarcações de madeira de Mazagão-Marrocos-África, constitui nos poucos vestígios de construções históricas da ocupação da Nova Mazagão, hoje Mazagão Velho. Vários pesquisadores concordam que o local das ruínas da igreja é muito próximo a um dos lados da praça prevista no plano da Nova Mazagão desenhado por Domingos Sambucetti em 1769, onde se encontravam prédios públicos (casa de Câmara e Cadeia) e o Pelourinho. A investigação geofísica com o radar de penetração no solo foi executada com o objetivo de mapear anomalias de propriedades eletromagnéticas associadas a artefatos e/ou feições arqueológicas presentes em subsuperficie ao redor das ruínas da igreja de pedra. Nos ensaios de campo para obtenção de 5 radargramas, utilizou-se uma antena antena monoestática de 400 MHz no modo tempo contínuo. Os radargramas, após um processamento básico para melhoria das imagens, apresentaram pequenos refletores hiperbólicos, caóticos e descontínuos, relacionados possivelmente a concreções lateríticas, fragmentos de rochas e/ou blocos de tijoleiras. Assim, recomenda-se trabalho de escavação arqueológica nas posições dos perfis 2, 3 e 4, até a profundidade de 2,3 m, para aferição dos refletores hiperbólicos e descontínuos, que podem estar associados ao piso de uma praça.

Palavras-chave: Mazagão Velho. Igreja de pedra. Radar de penetração no solo.

1 INTRODUÇÃO

o século XVIII, por volta de 1769, colonizadores portugueses e escravos africanos vieram de embarcações de madeira de Mazagão-Marrocos, situada ao norte da África, até a região sul do estado do estado do Amapá. Em 1770 o rei de Portugal, Dom José I, fundou nesse local a vila de Nova Mazagão hoje vila de Mazagão Velho. A imigração foi provocada pela guerra entre mouros e cristãos, durante a implantação do cristianismo português no continente africano (PENHA, 2013; COSTA, 2011).

Trabalho de prospecção arqueológica realizada pela equipe do Laboratório de Arqueologia da Universidade Federal de Pernambuco, no entorno do Povoado de

¹ Foi bolsista de iniciação científica PIBIC/CNPq/UNIFAP, vigência 2015-2016.

² Orientador de iniciação científica. Professor do Curso de Engenharia Elétrica da UNIFAP.

Mazagão Velho, redescobriu a presença de ruínas de uma igreja construída em pedras (ALBUQUERQUE, 2006; COSTA, 2011). A descoberta destas ruínas constitui nos únicos vestígios de construções históricas da ocupação de Nova Mazagão. Contudo, Costa (2011) destaca que vários pesquisadores concordam que o local das ruínas da igreja é muito próximo a um dos lados da praça prevista no Plano da Nova Mazagão desenhado por Domingos Sambucetti, em 1769, onde se encontravam prédios públicos (casa de Câmara e Cadeia) e o Pelourinho. Costa (op. cit.) cita que essa antiga praça do pelourinho é hoje um 'vasto campo vazio, que serve de antecâmara à povoação habitada".

Os métodos geofísicos de prospecção, cujo objetivo é a investigação de feições de dimensões relativamente pequenas e/ou rasas, de escala local dentro da Terra, a-tendem à necessidade da arqueologia, pois satisfaz a necessidade de se ter maior exa-tidão dos locais para escavações (LEUCCI et al., 2007; ALVES, 1979). Dentre os méto-dos, o radar de penetração do solo (GPR) tem se mostrado eficaz em uma ampla variedade de aplicações, como procurar sepulturas, artefatos, mapear fundações enterradas, alicerces de paredes, pisos e recuperação de vilas ou aldeias antigas enterradas por erupções vulcânicas (CONYERS, 2004; BASILE et al, 2000).

Dentro desse contexto, a pesquisa consistiu do empregado do método radar de penetração no solo com o objetivo foi mapear anomalias GPR, possivelmente relacionados a artefatos e/ou feições arqueológicas históricas.

2 METODOLOGIA

Para a execução da pesquisa foi empregado o método radar de penetração no solo no campo de futebol de Mazagão Velho, próximo a igreja de pedra.

O GPR se baseia na propagação de ondas eletromagnéticas de alta frequência (normalmente entre 10MHz e 2,5 GHz) gerando uma imagem de alta resolução da subsuperfície investigada, que depende geralmente dos contrastes das propriedades eletromagnéticas (condutividade elétrica, permissividade elétrica, permeabilidade magnética) do alvo arqueológico investigado com respeito ao meio circundante.

O fundamento físico do método encontra-se na teoria da propagação de ondas eletromagnéticas que têm como principais fatores determinantes a atenuação e a velocidade de propagação, sendo estes controlados pelas propriedades elétricas do meio, como condutividade e constante dielétrica. Destaca-se que na faixa de frequência de operação dos sistemas GPR, as propriedades de deslocamento (polarização) são dominantes sobre as propriedades condutivas para a maioria dos materiais geológicos (REYNOLDS, 2011).

A equação (1) permite determinar o valor da velocidade (v) de propagação da onda eletromagnética em um meio com permissividade dielétrica relativa (ϵ_r), permeabilidade magnética relativa (μ_r) e condutividade elétrica (o) (REYNOLDS, 2011; NE-AL, 2004).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r \frac{1+\sqrt{1+(\sigma/\omega\varepsilon)^2}}{2}}}$$
(1)

onde *c* é a velocidade da onda eletromagnética no vácuo (3 x 10⁸ m/s), $\sigma/\omega\epsilon$ é o fator de perda, $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular (rad/s) e *f* sua frequência em Hz.

Para materiais geológicos de baixa perda, tais como areias e cascalhos, a influência de σ na faixa de frequência do GPR é mínima, e o fator de perda $\sigma/\omega\epsilon \approx 0$ (DA-VIS & ANNAN. 1989). Na presença de materiais não magnéticos ($\mu_r \approx 1$), a equação (1) é simplificada para:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2}$$

Como as ondas eletromagnéticas propagam através de um meio, sua amplitude (*A*) mostra um decaimento exponencial a partir de seu valor inicial (A_0) em uma distância *z*, como a seguir:

$$A = A_0 e^{-\alpha z} \tag{3}$$

onde α é a constante de atenuação. Para materiais de baixa perda, esta constante é independente da frequência, tais que:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$
(4)

Como pode ser visto na equação (4), a condutividade elétrica exerce a maior influência sobre a constante de atenuação (REYNOLDS, 2011).

Com base nas premissas que levam as equações (2) e (4), algumas afirmações podem ser feitas com respeito ao comportamento dos materiais geológicos. Água doce por ter uma alta permissividade dielétrica quando comparado com o ar e aos minerais formadores de rochas, o conteúdo de água doce exerce um controle fundamental sobre as propriedades dielétricas de materiais geológicos comuns (DAVIS & ANNAN, 1989).

Quando uma onda eletromagnética propaga-se na subsuperficie e encontra uma descontinuidade significativa com respeito as propriedades eletromagnéticas (μ_r , $\varepsilon_r e \sigma$), uma parcela de energia será refletida. A quantidade de energia refletida, com respeito a amplitude do sinal, é dado pelo coeficiente de reflexão (*R*), que expressa o poder de reflexão entre duas camadas distintas ou entre um alvo arqueológico e o meio. Matematicamente para uma incidência normal, *R* é dada pela equação abaixo, assumindo que os contrastes μ_r e σ são negligenciados (REYNOLDS, 2011; NEAL, 2004):

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r_2}} - \sqrt{\varepsilon_{r_1}}}{\sqrt{\varepsilon_{r_2}} + \sqrt{\varepsilon_{r_1}}} \tag{5}$$

onde ε_{r1} e ε_{r2} são as permissividades dielétricas relativas das camadas adjacentes 1 e 2 ou entre o alvo arqueológico e o meio.

O coeficiente de reflexão em função das velocidades nas camadas é:

$$R = \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2} \tag{6}$$

A magnitude de *R* varia entre ± 1, enquanto a proporção de energia transmitida é igual a 1 – R.

Assim, pelos contrastes das propriedades físicas presente no meio investigado, viabiliza-se a utilização do método na investigação arqueológica (CONYERS, 2004; CARROZZO et al., 2003; DAVIS & ANNAN, 1989).

2.1 AQUISIÇÃO DE DADOS DE CAMPO

O equipamento utilizado no registro das ondas eletromagnéticas refletidas ou difratadas em subsuperficie foi o radar fabricado pela IDS (Ingegneria Dei Sistemi), utilizando uma antena monoestática de 400 MHz, por possibilitar a investigação de refletores, teoricamente localizados até 4 m de profundidade (REYNOLDS, 2011). As medidas foram realizadas no modo tempo contínuo em 5 perfis, dispostos em posições na superfície do terreno, sem estruturas de edificações, árvores e entulhos. O controle da distância entre os perfis e o posicionamento horizontal foi feito com auxílio de trenas, inserindo marcas no radargrama a cada 10 m. A Figura 1 ilustra a localização dos ensaios de campo.



Figura 1 - Localização dos perfis GPR ensaiados no campo de futebol,

As Figuras 2 e 3 ilustram momentos dos trabalhos de aquisição dos dados.

Figura 2 – Procedimento de ajustar a trena para os ensaios.



Figura 3 – Aquisição dos perfis durante os ensaios.



2.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Antes da interpretação dos dados de GPR processa-se uma sequência de operações de maneira sistemática, podendo-se remover ou realçar feições indesejáveis ou de interesse, respectivamente.

Na pesquisa empregou-se um processamento básico visando melhorar as imagens dos radargramas. Todas as etapas de processamento foram realizadas com o programa computacional GRED. Os seguintes procedimentos foram usados: (a) estabelecimento do tempo zero em todos os traços de registro, para obtenção do nível zero de profundidade; (b) aplicação do filtro passa banda vertical; (c) ajuste de ganhos exponencial para realçar os fracos refletores; (d) determinação da velocidade de propagação da onda eletromagnética, usando método de ajuste hiperbólico de alguns pontos difratores encontrados na área investigada; e (e) conversão da escala vertical de tempo (ns) em profundidade (m).

2.3 INTERPRETAÇÃO DOS RADARGRAMAS

A interpretação é baseada na configuração da amplitude e da continuidade das reflexões dos dados. A análise consistiu em identificar hipérboles de difração e refletores sub horizontais e/ou horizontais ou descontínuos nos radargramas, que possivelmente podem estar relacionados a artefatos e/ou feições arqueológicas.

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

As medidas com radar de penetração no solo dos perfis de 1 a 5 foram representadas na forma de radargrama (figuras 4 a 8).

Em todos os radargramas a escala vertical de tempo foi convertida em profundidade usando a velocidade de 98 m/ μ s para a propagação da onda, permitindo investigar uma profundidade de até 2,5 m.

Ao longo do campo de futebol foram verificados alguns padrões distintos de reflexão nos radargramas, relacionados à mudança nas propriedades dielétricas do meio, os quais podem ser associados a diferentes tipos de materiais, seja geológico ou antrópico. Os refletores mais evidentes foram: pequenas hipérboles, caóticos e descontínuos.

Os refletores hiperbólicos são encontrados em todas as profundidades nos radargramas e são relacionados a concreções lateríticas, fragmentos de rochas e/ou de tijoleiras, estruturas de animais e pequenos vazios na subsuperfície. Os encontrados entre as profundidades de 1,5 m e 2,3 m são associados possivelmente a crosta laterítica e/ou fragmentos de blocos de rochas e/ou tijoleiras. Com exceção da crosta laterítica, os fragmentos dispostos no local podem ser devidos ao ato de aterramento ou construção de uma estrutura arqueológica histórica.

Os refletores caóticos, como vistos por toda a extensão dos radargramos nas profundidades, predominantemente, acima de 1,5 m, devem-se a complexidade das disposições dos sedimentos (areia, silte e argila) ou concreções ou fragmentos de tijoleiras, de ampla variedade de tamanho das partículas e concentrações volumétricas.

Os dois refletores descontínuos, aproximadamente sub-paralelos, presentes por toda extensão dos radargramas, entre as profundidades de 1,5 m e 2,3 m, podem estar relacionados a uma estrutura arqueológica do tipo piso de uma praça, conforme sugerida por Alburquerque (2006), onde existia o pelourinho, ou a crosta laterítica, presente em regiões trópicas, como as encontradas na região Amazônica.



Figura 4 – Radargrama do perfil 1.

Figura 5 – Radargrama do perfil 2.





Figura 6 – Radargrama do perfil 3.







Figura 8 - Radargrama do perfil 5.

4 CONCLUSÃO

Ao longo do campo de futebol de Mazagão Velho, os radargramas mostraram padrões distintos de reflexão, como pequenas hipérboles, refletores caóticos e descontínuos, os quais são relacionados a raízes de vegetação, variação na relação de concentração de argila e areia depositadas, concreções lateríticas e fragmentos de tijoleiras. Os refletores hiperbólicos e descontínuos, encontrados entre as profundidades aproximadamente entre 1,5 m e 2,3 m, são associados possivelmente a crosta lateritica ou blocos de rochas e/ou tijoleiras, dispostos no local, seja no ato de aterramento ou construção da estrutura arqueológica histórica, do tipo piso de uma praça.

A profundidade atingida na investigação, em torno de 2,5 m, deu-se pela frequência da antena de 400 MHz e pela elevada condutividade elétrica dos sedimentos argilosos.

Assim, recomenda-se trabalho de escavação arqueológica nas posições dos perfis 2, 3 e 4, para aferição desses refletores, situados aproximadamente na profundidade média de 2 m.

REFERÊNCIAS

- ALBURQUERQUE, M. A. G de M. Remanescente materiais do período pombalino no Amapá. In: III Simpósio de Técnicas Avançadas em Conservação de Bens Culturais, 2006, Olinda. **Revista Brasileira de Arqueometria Restauração Conservação**. Olinda: AERPA, 2006.
- ALVES, J. J. A; Métodos geofísicos aplicados à arqueologia no estado do Pará. 1979.
 55 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica) Curso de Pós-Graduação em Ciências Geofísicas e Geológicas, Universidade Federal do Pará, Belém, 1979.
- BASILE et al. A ground-penetrating radar survey for archaeological investigations in an urbanarea (Lecce, Italy). **Journal of Applied Geophysics**, v. 44, p.15-32, 2000.
- CARROZZO, M. T.; LEUCCI, G.; NEGRI, S.; NUZZO, L. GPR survey to understand the stratigraphy at the Roman ships archaeological site (Pisa, Italy). **Archaeological Prospection**, v. 10, n. 1, p.57-72, 2003.
- CONYERS, L. B. Ground-penetrating radar for archaeology. UK: Altamira-press, 2004.
- COSTA, A. G. Os documentos cartográficos e outras iconografias: importância na pesquisa e preservação do patrimônio cultural do Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEI-RO DE CARTOGRAFIA HISTÓRICA, 2011, Parati. **Anais...**Parati, 2011.
- DAVIS, J. L. & ANNAN, A. P. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v.37,:p. 531-551, 1989.
- LEUCCI, G.; GRECO, F.; GIORGI, L; MAUCERI, R. Three-dimensional image of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography survey in the castle of Occhiolà (Sicily, Italy). **Journal Archaeological Science**. v.34, p.233-242, 2007.
- PENHA, G. **Escavações revelam parte da história da colonização de Mazagão**. 2013. Disponivel em: http://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2013/07/escavacoesrevelam-parte-da-historia-da-colonizacao-de-mazagao.html. Acesso em: 23 mai. 2014.
- REYNOLDS, J. M. **Un introduction to applied and environmental geophysics**. 2^a ed. UK: Wiley-Blackwell, 2011.

CONCEITOS MATEMÁTICOS NA COMPUTAÇÃO QUÁNTICA

Deidson Vilhena Santos¹ José Walter Cárdenas Sotil²

RESUMO: A Computação Quântica abre um leque de expectativas para o futuro, pois, o limite da computação clássica pede uma nova forma de executar a informação. Descrevemos um somador básico na base binária, onde os somandos são unidades de primeira ordem. Para este somador usamos 4 qubits e 4 portas quânticas na seguinte ordem: Toffoli, CNot, Cnot e Cnot e implementamos no simulador quântico Zeno e no Quantum Computing Playground atraves da linguagem de programação quântica Q-Script. A soma de quaisquer dois números binários é calculada somando as unidades da mesma ordem com o somador básico, a soma geral é implementada no Zeno e no Q-sript. Algoritmos mais complexos, como o Algoritmo quântico de Grover podem ser implementados usando o Zeno e Q-Script. A metodologia de usar o simulador quântico Zeno para a construção visual das portas quanticas e o uso da linguagem Q-Script permitem uma maior comprensão dos algoritmos da computação quântica.

Palavras-chave: Computação Quântica, Portas Quânticas, Zeno, Q-Script.

1 INTRODUÇÃO

odas as complexas operações de um computador acabam sendo combinações de simples operações aritméticas e lógicas básicas: somar bits, complementar bits (para fazer subtrações), comparar bits, mover bits. Estas operações são fisicamente realizadas por circuitos eletrônicos, chamados circuitos digitais, utilizados na ALU (*Arithmetic Logic Unit*) dos microprocessadores. Na **computação clássica**, os circuitos digitais baseiam seu funcionamento na lógica binária, ou seja, na unidade de informação clássica, conhecida como **bit** (*binary digit*), que pode ter dois valores lógicos, "0" ou "1", os sistemas lógicos são estudados pela álgebra de chaveamentos, um ramo da álgebra moderna ou álgebra de Boole, conceituada pelo matemático inglês George Boole (1815 -1864), veja [01]. Assim, pensemos no computador como um dispositivo que calcula uma função $f : \{0,...,N-1\} \rightarrow \{0,...,N-1\}$ onde $N = 2^n$ (n é o número de bits usado na memória do computador).

Na aritmética decimal padrão, o número 25 é lido como "vinte e cinco", e a so-

¹ Foi bolsista de iniciação científica PROBIC/ UNIFAP, vigência 2015-2016.

² Orientador de iniciação científica. Professor do Curso de Ciências da Computação da UNIFAP.

ma duas dezenas mais cinco unidades, sua notação posicional na base decimal é representada por: $2 \cdot 10^1 + 5 \cdot 10^0$. Em aritmética binária, os únicos dígitos utilizados são 0 e 1, assim, o mesmo 25 representado acima, em números binários será 11001, lido como "um, um, zero, zero, um", e sua notação posicional na base binária é representada por: $1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0$

A adição de números binários e decimais é efetuada de modo semelhante. Porém, nos decimais, quando a soma dos dígitos da coluna alcança 10 ou ultrapassa, ocorre o transporte do 1 para a coluna seguinte, esse transporte é conhecido como "vai um" (*carry-out*), que se torna um "vem um" (*carry-in*) para esta coluna seguinte e será somado aos outros dois dígitos dela. Nos números binários o *carry-out* ocorre quando a soma dos dígitos é 2, se tornando o *carry-in* para a coluna seguinte, como observamos na Figura 1.





Fonte: [02] Pg. 74.

Nos computadores, os bits são fisicamente representados por estados de baixo potencial elétrico (0) ou alto potencial elétrico (1). Em geral, os circuitos são descritos por blocos elementares que podem ser implementados fisicamente por transistores, esses blocos são as **portas clássicas** universais AND, OR e NOT, de quais derivam todas as outras portas clássicas: Nand, Nor, Xor, entre outras, (veja [01], pg. 06). As entradas são produzidas através de diferenças de potencial elétrico que geram corrente elétrica. Por sua vez, a corrente se propaga através dos fios, da esquerda para a direita, ativando as portas lógicas. Um exemplo de circuito meio-somador (*half-adder*) e somador completo (*full-adder*), que realiza a soma de dois números binários, é apresentado na Figura 2. Os símbolos de medida à direita, representam que medidas de corrente são realizadas, indicando o valor de cada bit na soma e no *carry-out*: 0 ou 1.





Fonte: [04] Pg. 10.

Há dois tipos de circuitos para realizar a soma de números binários, o meio somador (*half-adder*), e o somador completo (*full-adder*), já ilustrados na Figura 2. O *half-adder* pega dois bits únicos, soma-os e tem como resultado a soma e um *carry-out*, chamado "*carry*". Para a próxima coluna temos os dois bits desta, mais o *carry* que veio da anterior, o *carry-in* para esta, dando como resultado a soma e um *carry-out*, logo, o *half-adder* não será suficiente aqui por ter 2 entradas, então, para esse circuito com três entradas e duas saídas, implementamos o *full-adder*. Desta forma, a soma pode ser efetuada para um número binário de *n* bits, onde cada próxima coluna receberá um *carry-in* da anterior, e mandará um *carry-out* para a próxima.

Os circuitos da Figura 2 são irreversíveis, pois as portas AND e OR são irreversíveis, ou seja, dependendo da saída não saberemos quais os valores dos bits de entrada, sendo assim, não podem ser representadas por portas quânticas, pois elas são reversíveis. E também, observe que há uma bifurcação de fios e não há problema nenhum em fazê-lo classicamente. Entretanto, isso não é possível em **circuitos quânticos**, devido ao teorema da "não clonagem" (veja [03]).

No estudo de computação quântica é imprescindível entender como ocorrem as propriedades dos fenômenos quânticos, quais são os que têm influência direta na computação quântica e as diferenças entre um computador quântico e o computador clássico. Para que um eventual computador quântico venha a funcionar, todos os cálculos realizados em um computador clássico também devem ser efetuados nele. Para isso, devemos substituir as portas irreversíveis clássicas pelas homólogas reversíveis quânticas, visando implementar os circuitos aritméticos da ALU, que são a base dos algoritmos, nos **circuitos quânticos**, mostrando com isso, uma possibilidade real da implementação de **algoritmos quânticos**, e consequentemente, uma expectativa maior do advento da computação quântica na informática.

2 METODOLOGIA

A notação $|\psi\rangle$ é denominado **ket**, e representa o estado físico do sistema, que tem a ele associado um espaço vetorial complexo, munido de produto interno chamado de espaço de Hilbert.

A evolução temporal de um sistema quântico isolado é descrita matematicamente por um operador unitário e o processo de medida altera o estado de um qubit, fazendo-o assumir o estado $|0\rangle$, com probabilidade $|\alpha|^2$, ou o estado $|1\rangle$ com probabilidade $|\beta|^2$ (isso significa que os valores $\alpha \in \beta$ não podem ser conhecidos através de apenas uma medida).

A unidade de informação quântica é o bit quântico, conhecido como **qubit** (*quantum bit*). Um qubit pode assumir os valores lógicos "0", "1"

$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1\\ 0 \end{bmatrix}$$
 e $|1\rangle = \begin{bmatrix} 0\\ 1 \end{bmatrix}$.

ou qualquer superposição desses valores. Os valores 0 e 1 de um bit são substituídos pelos vetores $|0\rangle$ e $|1\rangle$, representados por:

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$
 $\alpha, \beta \in C.$

onde, $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$.

A interpretação física do qubit é que ele está simultaneamente nos estados $|0\rangle$ e $|1\rangle$, isso faz com que a quantidade de informação que pode ser armazenada no estado

 $|\psi\rangle$ seja infinita. Entretanto, essa informação está no nível quântico. Para torná-la acessível, no nível clássico, precisamos fazer uma medida.

Os qubits são vetores unitários, e de acordo com a álgebra linear, os operadores que atuam sobre eles devem ser operadores unitários, assim, temos que as **portas quânticas** são representadas por esses operadores. Isto mostra que há uma possibilidade infinita de implementações de portas quânticas, pois, temos infinitas possibilidades de operadores unitários. Mesmo levando os erros em conta, ainda assim o grau de liberdade é muito maior que no caso clássico.

Apresentaremos, a seguir, algumas portas quânticas:

Porta Not Quântica - X

No caso clássico, a porta Not troca 1 por 0 e vice-versa. A generalização para o caso quântico é dada por um operador *x* que satisfaz

$$X|0\rangle = |1\rangle$$
 e $X|1\rangle = |0\rangle$

Com isso, verifica-se que a representação matricial do operador X é dada por

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Com a porta Not quântica, temos situações sem contrapartida no caso clássico, pois, se a entrada for uma superposição dos estados $|0\rangle \in |1\rangle$,

$$|\varphi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$

A saída será,

$$X|\varphi\rangle = \beta|0\rangle + \alpha|1\rangle$$

Porta CNot Quântica

A porta CNot quântica, ou Not-controlada atua em dois qubits simultaneamente, o que possibilita a obtenção de estados emaranhados,. Esta porta é a contrapartida quântica da CNot clássica. Ela tem 2 qubits de entrada, sendo o qubit de controle e o alvo (Figura 3), logo, é uma porta controlada, ou seja, age de acordo com o valor do qubit de controle. Se o qubit de controle estiver no estado $|1\rangle$ ela é ativada, aplicando o operador *x* no qubit alvo, e nada faz caso esteja no estado $|0\rangle$.

O que distingue a porta CNot quântica da clássica é que, na porta CNot quântica os qubits alvo e de controle podem ser estados superpostos.

A sua ação pode ser definida pelas transformações operadas nos estados da base computacional associada, ou seja,

$$CNot |00\rangle = |00\rangle,$$
$$CNot |01\rangle = |01\rangle,$$
$$CNot |10\rangle = |11\rangle,$$
$$CNot |11\rangle = |10\rangle.$$

Figura 3: Representação da Porta CNot Quântica.



Fonte: [04] Pg. 18.

Uma maneira conveniente de representar essa ação na base computacional de forma mais esquemática é,

$$CNot|i,j\rangle = |i,i \oplus j\rangle$$

onde, $i \oplus j$ denota o resto da soma modulo 2 entre i e j.

Porta Toffoli Quântica

A porta *Toffol*, correspondente quântica da porta Toffoli clássica, que também é uma porta controlada, só que nesse caso, com 3 qubits de entrada, sendo dois qubits de controle e o qubit alvo (Figura 4).



Fonte: [04] Pg. 20.

Da mesma forma que na CNot, o que distingue a Toffoli quântica da clássica, é que os qubits de controle e alvo podem ser estados superpostos. A sua ação pode ser definida pela operação da porta na base computacional associada, ou seja,

$Toffoli 000\rangle = 000\rangle$,	$Toffoli 100\rangle = 100\rangle$,
$Toffoli 001\rangle = 001\rangle$,	$Toffoli 101\rangle = 101\rangle$,
$Toffoli 010\rangle = 010\rangle$,	$Toffoli 110\rangle = 111\rangle$,
$Toffoli 011\rangle = 011\rangle$,	$Toffoli 111\rangle = 110\rangle$.

Uma maneira conveniente de representar essa ação na base computacional de forma mais esquemática é,

$$Toffoli|i, j, k\rangle = |i, j, k \oplus (i \cdot j)\rangle$$

Também podemos simplificar circuitos mais complexos, e de um modo geral, representar circuitos quânticos com a porta Toffoli generalizada (Figura 5).

Figura 5: Porta Toffoli Generalizada.



Fonte: [04] Pg. 21.

Notação e Convenções

Com o que já vimos até aqui, podemos dar uma representação para um computador quântico, onde para apresentar as convenções usadas em circuitos quânticos, vamos utilizar um circuito (Porta *u* - Controlada) em que a entrada e a saída são um estado de dois qubits como exemplo (Figura 6).

Figura 6: Porta Quântica U-controlada



Entrada: Pode ser um produto tensorial ([06] Pg. 153) entre os qubits de entrada (de acordo com o 4º postulado da mecânica quântica) ou um estado emaranhado.

Linhas Horizontais: Não são fios, elas representam a evolução de um qubit, podendo ser apenas a passagem do tempo ou, por exemplo, o deslocamento de um fóton ou de um elétron.

Sentido: O circuito descreve a evolução do sistema quântico no tempo, da esquerda para a direita. Com isso a retroalimentação do circuito clássico não tem sentido em aparecer aqui.

Linhas Verticais: Indicam que o circuito atua simultaneamente nos dois qubits. Representam o sincronismo, e não o envio de informação, pois, pelo teorema da "não clonagem", não são permitidas bifurcações de qubits, como ocorre nos circuitos clássicos.

Controle: O símbolo • indica que o qubit representado nessa linha é um qubit de controle, ou seja, caso esteja e no estado $|1\rangle$ a porta v realiza a operação; caso esteja no estado $|0\rangle$, a porta v não realiza operação alguma; se for um estado superposto a ação do operador deve ser levada em conta.

Saída: Os qubits que compõe a saída do circuito podem ou não ser medidos. Como o qubit inferior está sendo medido a saída será 0 ou 1.

Simulador Zeno

Para a implementação das portas quânticas nos circuitos, utilizaremos um simulador de circuitos quânticos, o software *zeno* (a Figura 7 mostra a interface), que além da visualização do circuito, nos dá o estado que resultará da implementação, explicitando assim, como o computador quântico funciona na prática;



Figura 7: Interface do Software de Simulação de Circuitos Quânticos Zeno.

Fonte: http://www.dsc.ufcg.edu.br/~iquanta/zeno/

Quantum Computing Playground

Para usar uma linguagem de programação do computador quântico usamos a plataforma on-lne construído por engenheiros da google, o *Quantum Computing Playground*, que utiliza sua própria linguagem de programação denominada *Q-Script* (*Quantum Script*). Assim, poderemos programar os circuitos com a devida sintaxe das portas quânticas, e ao final teremos o resultado já convertido de binário para decimal. A interface do Quantum Computing Playfround é mostrada na Figura 8.



Figura 8: Interface da Plataforma Quantum Computing Playground.

Fonte: http://www.quantumplayground.net/#/playground/5080491044634624

3 RESULTADOS

A seguir desenvolvemos a soma de números na base binária, denominado somador básico, onde cada somando é uma unidade de primeira ordem. Implementamos este somador básico no simulador Zeno e descrevemos a sintaxe no Q-Script do Quantum Computing Playground,

3.1 SOMADOR BÁSICO

Na soma dos números 0+0, 0+1, 1+0 e 1+1 na base binária usamos um qubit para representar cada somando 0 ou 1 e dois qubits para representar a soma destes números. Usamos a seguinte estrutura para as posições dos somandos e da soma:

$$(qubit 1) + (qubit 2) + (qubit 3)(qubit 4)$$

onde, o qubit 1 representa o primeiro somando, o qubit 2 representa o segundo somando, os qubits 3 e 4 representam respectivamente as unidades de segunda e primeira ordem da soma. Diferente a soma manual, não vamos a acrescentar mais uma posição para considerar as unidade de maior ordem no método do leva um. Por exemplo ao somar 1+1 o resultado é 10, e no processo da soma se coloca o 0 e se leva o um. Para não acrescentar mais uma posição no processo de levar um, segue-se o seguinte algoritmo:

i. Consideramos os qubits 1, 2 e 3 e aplicamos a seguinte operação:

 $|(1), (2), (3)\rangle = |(1), (2), (3) \oplus ((1)(2))\rangle$

No qual os qubits 1 e 2 não se modificam, mas o qubit 3 é o resto da soma entre o qubit 3 e o produto dos qubits 1 e 2. A porta quântica Toffoli realiza exatamente esta operação, a qual calcula a unidade de segunda ordem na soma.

ii. Consideramos os qubits 1, 2 e aplicamos a seguinte operação:

$$|(1), (2)\rangle = |(1), (1) \oplus (2)\rangle$$

No qual o qubit 1 não se modifica, mas o qubit 2 é o resto da soma entre o qubit 1 e 2. A porta quântica CNOT realiza exatamente esta operação, a qual muda o mantem o valor do segundo somando para ser usado no próximo passo.

iii. Consideramos os qubits 2 e 4 e aplicamos a seguinte operação:

$$|(2), (4)\rangle = |(2), (2) \oplus (4)\rangle$$

No qual o qubit 2 não se modifica, mas o qubit 4 é o resto da soma entre o qubit 1 e 2. A porta quântica CNOT realiza exatamente esta operação, a qual calcula a unidade de primeira ordem na soma.

iv. Consideramos os qubits 1, 2 e aplicamos a seguinte operação:

$$|(1), (2)\rangle = |(1), (1) \oplus (2)\rangle$$

No qual o qubit 1 não se modifica, mas o qubit 2 é o resto da soma entre o qubit 1 e 2. A porta quântica CNOT realiza exatamente esta operação, a qual retorna ao valor original do segundo soando caso este tenha mudado no passo ii.

3.2 IMPLEMENTAÇÃO DO SOMADOR BÁSICO NO ZENO

A implementação no ZENO do somador básico de 1 qubit é realizado usando as portas Toffoli e CNOT. Na Figura 2 esta configurado todos os passos do Algoritmo descrito na seção 3.1. Os passos são gerais, mas no exemplo descrevemos o caso da soma 1+1, para outros valores só precisamos modificar os valores dos qubits que representam os somandos.

Em (a) os qubits são inicializados como |1100), o que significa que os somandos são iguais a 1 e a soma é inicializada como 00.

Em (b) se aplica a porta Toffoli aos qubits (1), (2) e (3):

$$|(1), (2), (3)\rangle = |1, 1, 0 \oplus (1 \cdot 1) \rangle = |1, 1, 1\rangle$$

como resultado a unidade de segunda ordem da soma é igual a 1.

Em (c) aplicamos a porta CNOT aos qubits (1) e (2):

 $|(1),(2)\rangle = |1,1\oplus 1\rangle = |1,0\rangle$

o segundo somando muda de valor para 0.

Em (d) aplicamos a porta CNOT aos qubits (2) e (4):

 $|(2), (4)\rangle = |0, 0 \oplus 0\rangle = |0, 0\rangle$

o qual define a unidade de primeira ordem como sendo igual a 0.

Em (e) aplicamos a porta CNOT aos qubits (1) e (2):

$$|(1), (2)\rangle = |1, 1 \oplus 0 \rangle = |1, 1\rangle$$

Retornando o segundo somando a seu valor original igual a 1.

Figura 9: Somador Básico implementado no Simulador Quântico Zeno.



Fonte: Simulador Zeno (Acervo Pessoal).

Para outros valores dos somandos (0+0, 0+1 e 1+0) só é necessário, mudar, em (a) da Figura 9, os valores dos qubits (1) e (2).

3.3 SOMADOR BÁSICO IMPLEMENTADO NO Q-SCRIPT

No Quantum Playground usamos a linguagem Q-Script, onde os qubits são numerados de modo diferente ao ZENO, o qubit k no ZENO corresponde ao qubit 4-k no Quantum Playground. Inicialmente o Q-Script inicializa todos os qubits com o valor nulo O somador de 1 qubit apresentado na Figura 2 é implementado no Quantum Playground seguindo o seguinte código:

i) VectorSIze 8

(como 8=2³, temos um vetor inicializado com zeros 0000)

ii) SigmaX 3

(SigmaX é a porta quântica NOT, mudando o valor da primeira parcela representada pelo qubit 3 temos o vetor 1000)

iii) SigmaX 2

(mudando o valor da segunda parcela representada pelo qubit 2 temos o vetor 1100)

- *iv*) Toffoli 3,2,1
 ((3)⊕(2)(1)=1⊕(1*0)=1⊕0=1, resultando no vetor 1110)
- *v*) *CNOT 3,2* ((3)⊕(2)=1⊕1=0, resultando no vetor 1010)
- *vi*) *CNOT 2,0* ((2)⊕(0)=0⊕0=0, resultando no vetor 1010)
- *vii*) *CNOT 3,2*
- viii) ((3) \oplus (2)=1 \oplus 0=1, resultando no vetor 1110)
- ix) SigmaX 3

(volta a zero a primeira parcela, resultando no vetor 0110)

x) SigmaX 2

- xi) (volta a zero a segunda parcela, resultando no vetor 0010)
- *xii) Measure* (faz a medição quântica do VectorSize 0010)
- *xiii) Print masured_value*

(imprime o valor na tela na base decimal, isto é: 1+1=2).

Usando comandos de repetição no Q-Script as somas podem-se estender para parcelas com maiores valores, tomando como base o algoritmo descrito acima.

4 DISCUSSÃO

Usando comandos de repetição, o somador básico serve para obter somas com parcelas maiores aplicando o método da seção 3 para as unidades da mesma ordem, tanto no ZENO como no Q-Script.

4.1 SOMADOR GERAL NO ZENO

Consideremos que cada termo da soma tenha n qubits e a soma é representada por n+1 qubits. No ZENO abrimos um novo circuito com 3n+1 qubits e 4n colunas (repetimos n vezes o somador básico que consta de 4 colunas). Reservamos os qubits (1) ao (n) para o primeiro somando, do (n+1) ao (2n) para o segundo somando e do (2n+1) ao (3n+1) para a soma. O posicionamento no ZENO dos qubits em relação as unidades da k-ésima ordem ($k = 1, \dots, n$), é dada por

- i. Qubit (n-k+1) para o primeiro somando.
- ii. Qubit (2n-k+1) para o segundo somando.
- iii. Qubit (3n-k+2) para a soma.



Figura 10. Simulação no ZENO da soma com fatores de 4 qubits

Fonte: Simulador Zeno (Acervo Pessoal)

Somamos as unidades da mesma ordem, iniciando nas unidades de primeira ordem, logo as de segunda ordem e assim sucessivamente até as unidades de ordem n. Para as unidades da mesma ordem aplicamos o somador básico da seção 3.

O somador básico para a unidade da k-ésima ordem segue os passos:

i. Aplicamos a porta Toffoli aos qubits (n-k+1), (2n-k+1) e (3n-k+1):

$$|(n-k+1), (2n-k+1), (3n-k+1)\rangle = (n-k+1), (2n-k+1), (3n-k+1) \oplus ((n-k+1) \cdot (2n-k+1))\rangle$$

ii. Aplicamos a porta CNOT aos qubits (n-k+1) e (2n-k+1):

 $|(n-k+1), (2n-k+1)\rangle = |(n-k+1), (n-k+1) \oplus (2n-k+1)\rangle$

iii. Aplicamos a porta CNOT aos qubits (2n-k+1) e (3n-k+2):

 $|(2n - k + 1), (3n - k + 1)\rangle = |(2n - k + 1), (2n - k + 1) \oplus (3n - k + 1)\rangle$ iv. Aplicamos a porta CNOT aos qubits (n-k+1) e (2n-k+1):

 $|(n-k+1), (2n-k+1)\rangle = |(n-k+1), (n-k+1) \oplus (2n-k+1)\rangle.$

Na Figura 10 somamos termos com 4 qubits cada um, neste caso geramos um circuito com 13 qubits (4 para o primeiro termo, 4 para o segundo termo e 5 para a soma) e 12 colunas (4 somadores básicos com 4 colunas cada um). Os termos são inicializados todos com um, portanto desejamos realizar a soma de 1111+1111, o resultado ao aplicar o simulador ZENO é |11111111110 >,significando que

1111 + 1111 = 11110

4.2 SOMADOR GERAL NO Q-SCRIPT

Para implementar o código da soma com termos de n qubits, usamos estrutura de repetição para o somador básico o qual se usará n vezes no cálculo da soma das unidades da mesma ordem dos termos da soma. Descrevemos o código para a soma geral no Q-Script:

 O procedimento MyMax recebe dois números inteiros na base decimal e retorna o maior deles. Isto para definir quantos qubits precisamos alocar para realizar a soma.

> proc MyMax a, b max = a if max < b max = b endif _return_value = max endproc

> > _____

 ii. Definimos os termos da soma n1a e n2a e calculamos o máximo n3a entre estes dois números usando o procedimento MyMax. Usando a função QMathgetWidth calculamos quantas casa tem n3. O número de Qubits a usar é n4=3*n3+1. n1a = 15 n2a = 15 MyMax n1a, n2a n3a = _return_value n3 = QMath.getWidth(n3a) if QMath.ipow(2, n3) == n3a n3 = n3 + 1 endif n4 = 3 * n3 + 1 VectorSize 2**n3 Print n3

 iii. Escrevemos na base binária os fatores n1a e n2a. Usando a porta SigmaX trocamos o valor do Qubit, o quais inicialmente são todos zeros.

> SigmaX 3*n3 SigmaX 3*n3-1 SigmaX 3*n3-2 SigmaX 3*n3-3 SigmaX 3*n3-4 SigmaX 3*n3-5 SigmaX 3*n3-6 SigmaX 3*n3-7

iv. Aplicamos o somador básico para as unidades de primeira ordem.

Toffoli 2*n3+1, n3+1, 1

CNot 2*n3+1, n3+1 CNot n3+1, 0 CNot 2*n3+1, n3+1

v. Usando a estrutura de repetição FOR somamos as unidades da mesma ordem usando o somador básico, desde a segunda até a n-ésima unidade.

> for i = 0; i < n3-1; i++ Toffoli 2*n3+2+i, n3+2+i, 2+i CNot 2*n3+2+i, n3+2+i Toffoli n3+2+i, 1+i, 2+i CNot n3+2+i, 1+i CNot 2*n3+2+i, n3+2+i Endfor

vi. Zeramos novamente a representação binária dos números n1a e n2a para obter o valor binário da soma.

> SigmaX 3*n3 SigmaX 3*n3-1 SigmaX 3*n3-2 SigmaX 3*n3-3 SigmaX 3*n3-4 SigmaX 3*n3-5 SigmaX 3*n3-6 SigmaX 3*n3-7

vii. Fazemos a medida com o comando Measure e imprimimos a soma.

Measure

Print measured_value

O resultado do Q-Script para a soma 15+15 é 30 como esperado. Pode-se somar quaisquer valores usando computação quântica com o procedimento apresentado nesta subseção.

5 CONCLUSÕES

Implementamos a soma na base binária com somandos de primeira ordem com o somador básico, usando as portas quânticas: Toffoli, CNot, CNot e CNOT e 4 qubits. Esta soma básica foi implementada no simulador Zeno usando sua arquitetura das portas quânticas, após o qual ficou simples usar os comandos do Q-Script para programar esta soma. Foi feita a extensão para soma binária entre quaisquer números naturais, somando as unidades da mesma ordem usando o somador básico para unidades de primeira ordem. Os resultados obtidos no Zeno e no QScript para a soma de quaisquer números foi satisfatória, sendo que esta metodologia de usar a arquitetura das portas quânticas para implementar o algoritmo quântico e logo escrever o código no QSript pode servir para algoritmos quânticos mais complexos como o Algoritmo de Grover

REFERÊNCIAS

- [01] TATEOKI, G. T.; Eletrônica Digital I Lógica Digital, 2011. Disponível em: http://www.getulio.eng.br/meusalunos/EDI/logicadigital.pdf. Available: 04 jun. 2016.
- [02] DIAGO, R.; AMARAL, V. M.. Eletrônica: Eletrônica Digital. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011.(Coleção Técnica Interativa. Série Eletrônica, v. 4)
- [03] Cohen-Tannoudji; Quantum Mechanics. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [04] PORTUGAL, Renato. **Uma Introdução à Computação Quântica**. São Carlos, SP: SBMAC, 2004. (Notas em Matemática Aplicada; 8)
ESTUDO MORFOLÓGICO DE FOLHAS DE ANACARDIUM OCCIDENTALE L. DA AMAZÔNIA NA REGIÃO NORTE DO BRASIL

Valéria Castelo Branco de Sousa¹ Henrique Duarte da Fonseca Filho²

RESUMO: A superfície das folhas apresentam diversas estruturas com funções especificas que colaboram para a relação com o meio ambiente. Parâmetros, que vão desde a escala macro passando pela escala micro até a escala nanometrica são analisados nos estudos de morfologia, contribuindo para o estudo de taxonomia, farmacognosia, e ecologia, dentre outros. As estruturas funcionais presentes nas folhas são responsáveis pela grande diversidade de superfícies e alguns comportamentos são dados em termos de adequação celular e a presença ou ausência de cera. O presente estudo relata a caracterização da superfície foliar da espécie Anacardium occidentale L. e as técnicas nela empregadas. As imagens realizadas com o microscópio óptico e a microscopia de força atômica (AFM) nas folhas frescas permitiu a observação de perfis heterogêneos de textura em ambas as faces. **Palavras-chave:** Anacardium occidentale L., ESEM, AFM, superfície foliar, estômatos, adaxial, abaxial.

1 INTRODUÇÃO

ma poderosa ferramenta para estudos botânicos é a microscopia, que proporciona imagens de diversas formas tais como lentes no microscópio óptico, elétrons em microscópios de tunelamento, varredura ou de transmissão, ou ainda por meio da interação de forças atômicas (Kock et al. 2006). Eles fornecem uma visão detalhada de estruturas essenciais para identificação de plantas. Além da caracterização morfológica, permitem realizar a análise de determinados fatores que afetam a planta, tais como doenças e processos patogênicos (Ferreira, 2006).

Com o trabalho pioneiro de Binning et al. (1980) na IBM de Zurich, na década de 1980, a Microscopia de Ponta de Prova (SPM, em inglês) tornou-se uma das mais importantes ferramentas de estudo de superfícies em escala nanométrica, isto é, com dimensões de um bilionésimo de metro. O microscópio de força atômica (AFM), que pertence a família SPM, é uma importante ferramenta de estudo de superfícies em escala nanométrica. Esta técnica permite à obtenção de imagens topográficas, em duas

¹ Foi bolsista de iniciação científica PIBIC/CNPq/UNIFAP, vigência 2014-2015.

² Orientador de iniciação científica. Professor do Curso de Física da UNIFAP.

ou três dimensões, da superfície de uma amostra, com potencial para obter imagens em nível atômico, com aumento de até um bilhão de vezes, com a vantagem de ter esta mesma resolução nas três dimensões (Herrmann et al. 1997). Este tipo de microscopia é uma técnica não destrutiva e pode ser usada tanto em amostras condutoras, semicondutoras ou isolantes, podendo ser operado em ar, vácuo e em ambientes líquidos (Munar, 2011).

Devido a sua alta resolução na aquisição de imagens, a praticidade na preparação das amostras para análise e a disponibilidade de aparelhos comerciais de alta qualidade fazem da técnica de AFM uma poderosa ferramenta para o estudo de superfícies inorgânicas e orgânicas (Herrmann et al. 1997). Assim, por ser um equipamento versátil, robusto e por sua possibilidade de aplicação em uma enorme gama de materiais, o AFM mostrou-se também uma ferramenta de grande importância para o estudo de biomateriais, uma vez que as medidas podem ser realizadas em ambiente líquido, em alguns casos simulando o ambiente onde este material será utilizado. Esta técnica analisa essencialmente superfícies e sistemas vivos que apresentam uma enorme variedade de superfícies (Moreau, 2011). Ao trabalhar com amostras biológicas se faz necessário condições que garantam a sobrevivência do espécime analisado (Munar, 2011). O AFM possui a capacidade de adquirir imagens em condições ambientes ou em solução, para o estudo de espécimes biológicos sob condições fisiológicas ele foi considerado uma ferramenta ideal (Horber e Miles, 2003). Para alguns autores, o uso da microscopia de força atômica em materiais biológicos esta introduzindo uma nova área de pesquisa, a biologia de superfície (Moreau, 2011).

O *Anacardium occidentale* é conhecido popularmente como cajueiro. Pertence a família Anacardiaceae que reúne cerca de 70 gêneros, dentre eles o gênero Anacardium (Mabberley, 1997). O Cajueiro, cuja castanha possui grande valor no mercado internacional de alimento, possui inúmeros usos na indústria de plásticos e de resinas. É uma árvore que alcança até 15 m de altura e tem um tronco grosso e tortuoso; o fruto é do tipo aquênio reniforme pendente de um receptáculo carnoso e aromático, de grande valor na produção de sucos (Fernandes, 1993).

Estudos relatam o uso de várias partes do cajueiro na medicina tradicional. no caso das folhas, elas são usadas para o tratamento de problemas intestinais, inflamações na garganta, doenças respiratórias, diabetes, hemorragia, antiescorbútico, debilidade muscular e desordem urinária. Estudos farmacognósticos realizados com a espécie indicaram a presença de flavonoides, antocianinas, glicosídeos cardiotônicos, taninos, esteróis e triterpenos (Di Stasi, 2002; Guerrero, 2002; Corrêa, 1995; Lima, 1993).

Considerando a carência de estudos a respeito da morfologia e estrutura foliar do cajueiro, este trabalho apresenta a caracterização em escala micro e nanométrica das superfícies adaxial e abaxial de folhas de caju através de imagens obtidas por microscopia óptica e de força atômica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Coleta

As folhas de cajueiro foram coletadas no campus da Universidade Federal do Amapá, localizado na Região Amazônica, no Norte do Brasil. As amostras coletadas foram levadas ao Herbário Amapaense (HEMAB) no Instituto de Estudos e Pesquisas do Estado do Amapá, e registradas sob o número 018684. As folhas usadas neste trabalho foram lavadas com água corrente por alguns minutos para remoção de sujeiras e em seguida, lavadas com água destilada.

Microscopia Óptica

Para as análises por microscopia óptica foram realizadas lâminas com cortes a mão livre e paradérmicos. Foi utilizado hipoclorito de sódio para clarificar as amostras, que posteriormente foram coradas com azul de metileno. Os tecidos foliares foram observados no microscópio da marca Olympus XS-200, equipado com câmera digital para captura de imagens. Foi observada também, a superfície foliar no Microscópio Olympus Bx40. Neste último não houve preparo de lâminas histológicas das folhas após a coleta e lavagem, foram visualizadas diretamente no equipamento.

Microscopia de Força Atômica

As folhas de caju selecionadas foram cortadas em pedaços de 1 cm² e fixadas no porta-amostras usando uma fita adesiva dupla-face. Para a aquisição de imagens to-pográficas em escala nanométrica foi utilizado um AFM modelo EASYSCAN 2 da marca Nanosurf. Este equipamento foi montado sobre uma mesa estabilizadora TS-150 da marca Table Stable LDT® e protegido por um sistema de redução de ruído, para impedir qualquer influência de vibração durante as medições. O AFM foi usado no modo tapping e equipado com uma ponta de silício e cantilever revestido de alumínio (Tap190AL-G da BudgetSensorsTM, Sofia, Bulgária). Este tem comprimento de 225.0 μ m ± 12.00 μ m, espessura de 7.00 μ m ± 1.00 μ m e largura de 38.0 μ m ± 9.00 μ m. A constante da mola é de 48 N/m. O raio da ponta é cerca de 7nm, em média. As imagens foram realizadas com 256 × 256 pixels a uma velocidade de 0.7s/linha. Todas as medidas foram feitas à temperatura ambiente (296 K ± 1) e 65 ± 1% de humidade relativa. O sisitema de *feedback* foi adaptado para a superfície a fim de obter as melhores imagens possíveis, e estas foram analisadas utilizando o *software* WSxM (Horcas, 2007).

3 RESULTADOS

Analisando macroscopicamente a superfície das folhas, foi possível constatar a coloração verde escuro na parte superior e verde claro na parte inferior, com nervura do tipo peninérvea de cor amarelo e contorno foliar oboval, havendo base simétrica e ápice obtuso, com margem inteira e de superfície lisa, possuindo um pecíolo reto. As folhas em média, possuem um comprimento de 16 cm e largura de 8 cm (Figura 1).



Figura 2: Folha de A. occidentale L. (a) Face adaxial. (b) Face abaxial.

Imagens Microscopia Óptica

As superfícies das folhas analisadas por microscopia óptica apresentam uma epiderme com parede celular sinuosa em ambas as faces (Figura 2). Na face adaxial as células epidérmicas possuem formato poliédrico de tamanhos irregulares, não apresentando presença de estômatos e tricomas, como pode ser observado nas figuras 2a e 2b. É possível observar que na superfície da face adaxial há uma cutícula altamente estriada (Figura 2 b e d).



Figura 2 Microscópio óptico. a) epiderme adaxial; b) células epidérmicas com paredes irregulares (epiderme adaxial). c) superfície abaxial. d) cutícula estriada (superfície adaxial).

As figuras 3a e 3b apresentam imagens da face abaxial, com epiderme apresentando uma grande quantidade de estômatos. A folha é do tipo hipoestomática, com estômatos do tipo paracíticos, de forma elipsoidal e com distribuição randômica, e encontram-se inserida ao nível da epiderme. Os estômatos estão acompanhados de duas células subsidiárias estriadas na sua porção lateral, com orientação paralela as células guardas, como mostram as figuras 3c e 3d. Figura 3: Face Abaxial. a) Epiderme abaxial. b) Detalhe da epiderme abaxial. A seta indica os estômatos paracíticos e a sua disposição randômica. c) Superfície abaxial. d) Detalhe da superfície abaxial, onde são observadas as células estriadas circundando o estômato.



Imagens Microscopia de Força Atômica

As imagens tomadas com o AFM têm dimensões de 15 x 15 \Box m para a superfície adaxial e de 40 x 40 \Box m e 100 x 100 \Box m para a abaxial, que apresentaram um perfil irregular com regiões claras e escuras correspondendo a partes altas e baixas, respectivamente. Na epiderme superior, as imagens mostraram uma cutícula estriada com depressões e grânulos de cera ao redor delas, espalhados aleatoriamente. Estes grânulos são globulares, variando entre 1-4 \Box m em diâmetro e tendo pelo menos 180 nm em altura, como mostra a figura 4. Comparando ambos lados da folha, o perfil de altura na face adaxial é menor que na abaxial, devido a ausência de estômatos, como ilustram as imagens em 2 e 3 dimensões nas figuras 4 e 5. A figura 5a mostra 3 diferentes estômatos que exibem uma forma elipsoidal, e estão inseridos no mesmo nível da epiderme.

Figura 4: Imagens topográficas da epiderme superior. Imagens (a) 2D e (b) 3D que mostram os contornos de cera em torno de uma cutícula espessa altamente ondulava em diferentes ampliações.



Figura 5: Imagens topográficas da epiderme inferior. Imagens em (a) 2D e (b) 3D que mostram os estômatos, e (c) uma ampliação alta entre os estômatos.



4 DISCUSSÃO

Carpenter (2005) descreveu o estudo dos estômatos fundamentado na arquitetura anatômica, quantidade, configuração e disposição das células da epiderme unidas a células guardiães, pois fornecem informações para a taxonomia de plantas (Stace, 1965). Os estômatos são constituidos de um poro, o ostíolo e um par de célulasguardas, são cercados por células subsidiárias que se diferenciam dos outros em tamanho, forma e orientação (Esaú, 1953; Pant, 1964). A maneira como são dispostas as células subsidiárias é um fator importante para classificar o tipo de estômatos na epiderme da folha (Carpenter, 2005). Esta morfologia do complexo estomatal esta de acordo com Metcalfe e Chalk (1957) e Jaiswal (2012), que descreveram a presença de células estomas paracítico que estão unidos às células subsidiárias irregulares nas folhas de Anacardium occidentale. Esta irregularidade é devida à presença de uma cutícula estriada.

Tricomas são projeções unicelulares ou multicelulares em superfícies de plantas com origem nas células epidérmicas, os materiais secretados por eles desempenham um papel importante na proteção das folhas. Diversos estudos fazem menção aos tricomas, a sua estrutura e também a composição química da secreção feita pelo tricomas glandulares, bem como os seus próprios mecanismos de secreção (Bosabalidis, 1982; Werker, 1981). Eles são muito variáveis em tamanho e estrutura e possuem uma série de funções, incluindo a defesa química a partir de fungos, insetos e vertebrados patógenos e pragas, produção de aleloquímicos, dispersão de sementes, água e aquisição de nutrientes, insetos para a polinização sedutoras ou insetivoria, a secreção de enzimas, e excreção de sal nas halophytes (Werker, 2000).

A epiderme da folha de apresenta uma membrana fina extracelular, chamada cutícula, o qual é composto por cutina e cera epicuticular, sendo, em geral, um material hidrófobo, cuja principal função é a de criar uma barreira contra a perda de água. Kock at al. (2008) apresentou possiveis estruturas da superficie com base no procedimento de molhar as folhas das plantas. As esculturas das células, a presença de pêlos e da estrutura fina das superfícies, por exemplo, inclinação da cutícula ou ceras epicuticulares existentes, apresentaram forte influência sobre a molhabilidade da superfície. Além disso, modificações estruturais e químicas podem induzir variações da molhabilidade de superfície, que vão desde o super-hidrofílico para hidrofóbicas. A Figura 1 (a) e (b) indica a presença de cera epicuticular propagação ao longo de toda a superfície adaxial.

Desde seu surgimento em 1986 (Binnig et al.), o AFM tem comprovado ser uma poderosa ferramenta para investigar estruturas de diversas amostras biológicas distintas. Com capacidade de demonstrar imagens em condições ambientes, tornando todo o pré-tratamento e danos irrelevante. Ele pode trabalhar até mesmo em superfícies líquidas (Hanning et al., 2010). O AFM apresenta uma mesma resolução ao longo da varredura e perpendicular à superfície e pode fornecer imagens tridimensionais da topografia da superfície.

Nas folhas de caju, as analises com AFM mostraram grandes variações entre os detalhes das duas superficies da folha e as informações em 3D. As imagens da topografia (figuras 4 e 5) apresentam grânulos de ceras epicuticulares na superficie superior e estômatos na superficie inferior. Da mesma forma, Perkins et al. (2004) e Bensalem-Fnayou et al. (2009) mostraram que as imagens topograficas de Prunus laurocerasus e folhas de Vitis vinifera, respectivamente, apresentam uma superficie texturizada granular.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho consistiu em um estudo da micro e nanomorfologia das folhas de *Anacardium occidental*e L., nos lados adaxial e abaxial através de imagens de microscopia óptica e de força atômica, com o objetivo de aumentar o conhecimento sobre esta espécie principalmente devido às imagens de AFM que não foram reportadas ainda com esta planta. Este estudo ilustrou distintas diferenças na epiderme da folha de cajueiro.

REFERÊNCIAS

- Almeida ER (1993) Plantas Medicinais Brasileiras: Conhecimentos Populares e Científicos. São Paulo: Hemus Editora Ltda. p 341.
- Binning G, Rohrer H, Gerber CH, Weibel E (1982) Surfaces Studies by Scanning Tunneling Microscopy. *Physical Review Letters*, v.49, n.1, p.57-61.
- Binning G, Quate CF, Gerber CH (1986) Atomic force microscope. *Physical Review Letters*, v.56, n.9, p.930-933.
- Bosabalidis A, Tsekos I (1982) Glandular scale development and essential oil secretion in Origanum dictamnus L. Planta, v.156, p. 496-504.
- Carpenter KJ (2005) Stomatal architecture and evolution in basal angiosperms. American journal of botany, v 92, n.10, p. 1595-1615.
- Correa SMV, Conserva LM, Maia JGS (1995) Constituents of roots of Inga edulis var. parviflora. Fitoterapia, v.66, n.4, p.379.
- Di Stasi LC, Hiruma-Lima CA (2002) Plantas medicinais na Amazônia e na Mata Atlântica. 2. ed. rev. e ampl. - São Paulo: Editora UNESP. 604 p.
- Fernandes L, Mesquita AM (1993) *Anacardium occidentale* (cashew) pollen with allergic bronchial asthma. The Journal of allergic and clinical immunology, v. 95, n 2.
- Ferreira MGR, Nogueira AE, Damião Filho CF (2006) Estudo morfológico de folhas de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum.). 12 p.: il. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Rondônia.
- GUERRERO, M. F. J. Ethnopharmacol.v. 80, p. 3742, 2002.
- Herrmann PSP, Silva MAP, Filho RB, Job AE, Colnago LA, Frommer JE, Mattoso LHC (1997) Microscopia de varredura por força: uma ferramenta poderosa no estudo de polímeros. Polímeros: ciência e tecnologia, p 51-61.
- Horber JKH, Miles MJ (2003) Scanning probe evolution in biology. Science 302: 1002-1005.
- Horcas R, Fernandez JM, Gomez-Rodriguez J, Colchero J, Gomez-Herrero J, Baro AM (2007) WSXM: A software for scanning probe microscopy and a tool for nanotechnology. Rev. Sci. Instrum. 78, 013705.
- Jaiswal Y, Naik V, Tatke P, Gabhe S, Vaidya A (2012) Pharmacognostic and preliminary phytochemical investigations of anacardium occidentale (linn.) Leaves. International Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences, Vol. 4 n.3, p625

Mabberley DJ (1997) The plant book: A portable dictionary of the vascular plants. ed.

Cambridge: Cambridge University Press, p. 858.

- Moreau ALD (2011) Microscopia de força atômica em materiais biológicos: Biossensores e Nanoferramentas. Tese de doutorado apresentada no Instituto de Física Gleb Wataghin da Unicamp.
- Munar DMM (2011) Identificação de estruturas biológicas por microscopia de força atômica. Tese de mestrado apresentada no Instituto de Física Gleb Wataghin da Unicamp.
- Pant DD, Mehra B (1964) Development of stomata in leaves of three species of *Cycasand Ginkgobiloba* L. Journal of the linnean society (Botany) v.58, p. 491-497.
- Stace CA (1965) Cuticular studies as an aid to plant taxonomy. Bulletinof the british museum (natural history) botany, v.4, p.3-78.
- Koch K, Barthlott W, Koch S, Hommes A, Wandelt K, Mamdouh W, De-Feyter S, Broekmann P (2006) Structural analysis of wheat wax (triticum aestivum, c.v. 'Naturastar' L) : from the molecular level to three dimensional crystals. P, v.233, n.2, p.258-270.

MEDIDAS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE AO REDOR DAS RUÍNAS DA IGREJA DE PEDRA DE MAZAGÃO-VELHO-AP

Marcus Vinicius da Costa Frazão¹ Helyelson Paredes Moura²

RESUMO: Por volta de 1769, colonizadores portugueses e escravos africanos vieram de Mazagão-Marrocos, situada ao Norte da África, até a região amazônica, instalando-se às margens do rio Mutuacá, região sul do estado do Amapá, fundando em 1770 a vila de Nova Mazagão - hoje vila de Mazagão Velho. Trabalho de prospecção arqueológica realizado pela equipe do Laboratório de Arqueologia da UFPE, redescobriu a presença de ruínas de uma igreja de pedras, no entorno do povoado de Mazagão Velho. A metodologia de prospecção geofísica executada em sítios arqueológicos, com o propósito de mapear anomalias de propriedades físicas associadas a artefatos ou feições arqueológicas, como vasilhas cerâmicas, alicerces de edificações e antigos fornos, tem contribuído para a arqueologia na definição de locais mais apropriados para realização dos trabalhos de escavação. Com o objetivo de mapear estruturas arqueológicas históricas em subsuperficie, empregou-se o método de resistividade elétrica nas proximidades da igreja. Nos ensaios de campo, utilizou-se a técnica de caminhamento elétrico, através do arranjo de eletrodos dipolo-dipolo, com espaçamento entre os eletrodos de 1,0 m. As medidas de resistividade elétrica, dispostas em seções e mapas, possibilitaram mapear uma zona anômala resistiva, caracterizada por altos valores de resistividade elétrica aparente acima de 1700 Ω .m, relacionada a concentrações de tijolos antigos rústicos, possivelmente localizando parcialmente uma estrutura arqueológica. Os resultados são promissores na indicação de área de escavação arqueológica para aferir a existência de feição de interesse arqueológico. Palavras-chave: Mazagão Velho. Arranjo dipolo-dipolo. Resistividade elétrica.

1 INTRODUÇÃO

or volta da metade do século XX, a escavação era a única ferramenta com que contavam os arqueólogos para localização de artefatos e estruturas arqueológicas enterradas. Atualmente, uma variedade de métodos geofísicos, como o magnético, radar de penetração no solo e a tomografia de resistividade elétrica (ERT), são amplamente utilizados nos trabalhos de prospecção em sítios arqueológicos para delimitar locais promissores para escavações em áreas não escavadas. Além de seus custos operacionais em campo serem mais baratos para obtenção de informações em grandes áreas, as técnicas de levantamento de dados preservam os vestígios antrópicos por serem não-invasivos.

¹ Foi bolsista de iniciação científica PIBIC/CNPq/UNIFAP, vigência 2014-2015.

² Orientador de iniciação científica. Professor do Curso de Engenharia Elétrica da UNIFAP.

A ERT é usualmente utilizada para mapear anomalias de resistividade elétrica, situadas em profundidades rasas, associadas aos artefatos e feições arqueológicas, tais como, peças cerâmicas, cavidades, paleo-fogueiras e estruturas de edificações (muralhas de cidades, alicerces de igreja e estradas romanas), que são relacionadas a atividades humanas pretéritas (REYNOLD, 2011; LEUCCI et al., 2007; ALVES, 1979). A ERT baseia-se no fato de que materiais e estruturas enterradas, em função de suas composições mineralógicas, texturas e conteúdo de eletrólito, apresentam a propriedade eletromagnética de resistividade elétrica. Assim, pelo contraste de resistividade elétrica presente no meio investigado, viabiliza-se a utilização do método na investigação arqueológica (CARROZZO et al., 2003).

No estado do Amapá, a primeira prospecção arqueogeofísica realizada em sítios arqueológicos no Estado que se tem registro foi realizada em 1986, no Sítio AP-MA-03: Pacoval, Macapá-AP, com o emprego do método magnético, que permitiu determinar anomalias magnéticas relacionadas a fragmentos cerâmicos, urnas e camada de ocupação (PEREIRA et al., 1997). Posteriormente, Moura et al. (2009a) utilizaram o método ERT no sítio arqueológicos AP-CA-18: Rego Grande 1, Calçoene-AP, onde mapearam-se anomalias resistivas associadas as feições arqueológicas do tipo lajedo granítico talhado, disposto sobre vasilhas cerâmicas. Moura et al. (2009b), mediante a aplicação da ERT no sítio arqueológico AP-MA-05: Campus Universitário da UNI-FAP, obtiveram resultados promissores na delimitação de duas áreas para os trabalhos de escavação arqueológica e na indicação de novas áreas para investigação. As anomalias de resistividade correlacionam-se com feições arqueológicas do tipo fragmentos de rochas lateríticas sobrepostos a vasilhas cerâmicas.

Este trabalho representa mais uma contribuição da prospecção arqueogeofísica para a Arqueologia no estado do Amapá, relatando os resultados obtidos com a aplicação da ERT no campo de futebol da vila de Mazagão-Velho. Essa vila, anteriormente conhecida como vila de Nova Mazagão, foi fundada em 1770 pelo rei de Portugal, Dom José I, logo depois, por volta de 1769, que colonizadores portugueses e escravos africanos chegaram de embarcações de madeira de Mazagão-Marrocos, situada ao norte da África, até às margens do rio Mutuacá. A imigração foi provocada pela guerra entre mouros e cristãos, durante a implantação do cristianismo português no continente africano (PENHA, 2013; COSTA, 2011).

Trabalho de prospecção arqueológica realizada pela equipe do Laboratório de Arqueologia da Universidade Federal de Pernambuco, no entorno do Povoado de Mazagão Velho, redescobriu a presença de ruínas de uma igreja construída em pedras. Durante a escavação da área das ruínas foram desinteiradas dos alicerces da igreja, que data da fundação da vila de Nova Mazagão, 52 ossadas pertencentes dos primeiros moradores e descendentes da vila, entre eles militares, já que foram encontrados botões de fardas e cruzes de malta, condecorações portuguesas da época (AL-BUQUERQUE, 2006; COSTA, 2011).

A redescoberta destas ruínas constitui nos únicos vestígios de construções históricas da ocupação de Nova Mazagão. Entretanto, Costa (2011) destaca que vários pesquisadores concordam que o local das ruínas da igreja é muito próximo a um dos lados da praça prevista no Plano da Nova Mazagão, desenhado por Domingos Sambucetti em 1769, onde se encontravam prédios públicos (casa de Câmara e Cadeia) e o Pelourinho. Costa (op. cit.) cita que essa antiga praça do pelourinho é hoje um vasto campo vazio, que serve de antecâmara à povoação habitada.

Dentro desse contexto, empregou-se o método ERT ao redor das ruínas da igreja de pedra, especificamente no campo de futebol, na busca de anomalias de resistividade elétrica associadas possivelmente a estruturas arqueológicas histórica do tipo alicerces de construções antigas.

2 METODOLOGIA

Na pesquisa foi empregado o método resistividade elétrica.

A aplicação do método teve como princípio a passagem pelo solo de uma corrente elétrica *I*, transmitida por um par de eletrodos denominados *A* e *B*, conectado a uma fonte de corrente. Medida da diferença de potencial (ΔV) entre dois eletrodos de recepção, denominados *M* e *N*, foram também medidos. Com as medidas *I* e ΔV , calculou-se a resistividade aparente ρ_a para cada posição de medida, dada pela equação:

$$\rho a = K \frac{\Delta V}{I} \qquad (\Omega.\mathrm{m}) \tag{1}$$

onde *K* é o fator geométrico do arranjo geral do quadripolo *AMNB* (MOURA, 2002) que depende somente das posições de injeção de corrente e de medida do potencial, dado por:

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} (m)$$
(2)

sendo AM, AN, BM e BN as distâncias entre os eletrodos.

No levantamento dos dados de campo foram ensaiados 6 perfis de resistividade, com 20 m de extensão no máximo, em um campo de futebol. A técnica utilizada foi o de caminhamento elétrico, com a utilização do arranjo dipolo-dipolo, escolhido por ser sensível a variação lateral de resistividade, portanto adequado para mapear feições arqueológicas (REYNOLDS, 2011). Cinco níveis de profundidades teóricas foram investigados, com espaçamentos entre os eletrodos de 1 m, obtendo as profundidades de investigação de 0,4 m, 0,7 m, 1,0 m, 1,2 m e 1,5 m. Duas trenas colocadas sobre o terreno foram usadas para controlar o intervalo entre os eletrodos e entre os perfis ensaiados. O intervalo entre os perfis foi de 1,5 m, de acordo com a lei geral de que o espaçamento entre os perfis não deve ser maior do que duas vezes o espaçamento entre os eletrodos ao longo da linha (LEUCCI et al., 2007). A Figura 1 ilustra a localização dos ensaios de campo e as posições dessas linhas. Figura 1 – Localização dos perfis de resistividade elétrica ensaiadas no centro do campo de futebol, próximo as ruínas da antiga igreja de pedra de Mazagão-Velho.



A figura 2 ilustra um momento das atividades de campo.



Figura 2 - Bolsista montando o arranjo de eletrodos dipolo-dipolo.

O equipamento utilizado foi o SARIS, fabricado pela empresa canadense Scintrex. O tempo de injeção de corrente utilizado foi de 2 s.

Após os ensaios de campo, digitalizou-se as resistividades elétricas aparentes no programa computacional Res2dinv (LOKE, 2002) para construção das seções de resistividade elétrica aparente.

As seções foram interpretadas de forma qualitativa. Na interpretação qualitativa, determinou-se relações de desigualdades entre certas características notadas nas medidas realizadas, tais como, delimitações de zonas resistivas ou condutivas de diferentes naturezas, como geológica ou arqueológica.

Como as seções medidas são paralelas e espaçadas de 1,5 m, combinou-se diretamente todas as seções 2D, produzindo mapas de resistividades elétricas aparentes para as diversas profundidades, assim como, o conjunto de dados de resistividade elétrica aparente 2D foram representados em bloco 3D para enfatizar a zona resistiva identificada parcialmente nas seções de resistividade 2D.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na área de estudo foram ensaiados cinco perfis no centro do campo, nomeados perfis 3, 4, 6, 7 e 9, e um perfil de resistividade fora do campo, identificado de perfil N. As seções de resistividades elétricas aparentes são vistas nas figuras de 3 a 8.

O perfil N foi ensaiado com o objetivo de avaliar o valor médio regional de resistividade elétrica aparente na área de estudo, motivo de sua localização encontra-se na interface entre a mata e o limite lateral do campo, conforme vista na figura 1.

De forma geral, a seção N (figura 3) mostra qualitativamente que os valores de resistividade aparente estão predominantemente situados entre 500 Ω .m e 1700 Ω .m, refletindo a princípio o *background*, faixa de resistividade elétrica aparente que caracteriza o meio natural, relacionada a zona não saturada, com baixo teor de água em seus interstícios.





Na posição de medida de 8,0 m, tem-se uma anomalia condutiva (valores de resistividade em torno de 600 Ω .m) correlacionada a uma cava com sedimentos repostos, que no momento do ensaio estavam saturados. Essa cava foi escavada no período em que os arqueólogos da UFPE trabalhavam nas ruínas da antiga igreja de pedra, localizada bem próximo ao local do ensaio, conforme informação dada por moradores que se encontravam no local. Os altos valores de resistividade elétrica aparente acima de 1700 Ω .m, situados entre as posições de medida de 3,0 m e 9,0 m, vistos abaixo da profundidade média teórica de 1,0 m aproximadamente, são devidos possivelmente aos blocos de rochas lateríticas ou tijoleiras ou raízes. Essa anomalia resistiva ainda não foi investigada por escavação.

As outras seções, relativas aos perfis 3, 4, 6, 7 e 9, respectivamente, figuras 4 a 8, foram ensaiadas com o objetivo de identificar zonas resistivas ou condutivas, possivelmente associadas a alvos arqueológicos.

Na análise qualitativa geral dessas seções, notam-se anomalias resistivas, caracterizadas por altos valores de resistividade elétrica aparente acima de 1700 Ω .m. Na seção 3, figura 4, essa anomalia se estende superficialmente entre as posições 4,0 m e 7,0 m, atingindo profundidade teórica de até 1,0 m; nas seções 4 e 6 (figuras 5 e 6), as anomalias se estendem entre as posições 1,5 m e 6,0 m, aproximadamente; na seção 7 (figura 7) entre as posições 1,5 m e 7,5 m, e na seção 9 (figura 8) a anomalia resistiva se estende por quase toda a seção, atingindo profundidades teóricas de 1,0 m.





Figura 5 – Seção de resistividade elétrica aparente do perfil 4.

Figura 6 - Seção de resistividade elétrica aparente do perfil 6.



Figura 7 - Seção de resistividade elétrica aparente do perfil 7.



Figura 8 – Seção de resistividade elétrica aparente do perfil 9.



Essas anomalias resistivas, vistas nas seções 3, 4, 6, 7 e 9 estão relacionadas a feição arqueológica do tipo concentrações de blocos de tijolos rústicos, tijoleiras, como constatado na superfície e subsuperfície, como vista nas figuras 9 a 11, possivelmente localizando parte de uma estrutura arqueológica histórica existente no centro do campo de futebol, conforme Costa (2011).

Figura 9 – Imagem da estrutura de tijolos presentes no centro do campo de futebol (posições de medidas entre 5,0 m e 6,0 m) dos ensaios dos perfis 3, 4 e 6.



Figura 10 – Imagem da estrutura de tijolos cruzando o perfil 4 na posição de medida de 5,5 m.





Figura 11- Imagem da estrutura de tijolos cruzando o perfil 3 na posição de medida de 6,0 m.

Na figura 12 têm-se as medidas de resistividade elétrica aparente distribuídas espacialmente, isto é, na forma de mapas de níveis investigados, relacionados as profundidades teóricas de 0,4 m, 0,7 m, 1,0 m, 1,2 m e 1,5 m.

Os mapas de resistividades aparentes apresentam peculiaridades que podem ser destacadas. Primeiro, é possível observar que a distribuição dos altos valores de resistividades aparentes (acima de 1700 Ω .m) diminuem consideravelmente com a profundidade. Segundo, os altos valores de resistividade estão concentrados basicamente em profundidades rasas, aproximadamente ate 1,0 m.

Dentre a área com altos valores de resistividades é observado um lineamento resistivo paralelo ao eixo-X, na posição de 6,0 m no eixo-Y, cruzando os perfis 3, 4 e 6, visto na profundidade de 0,4 m, assim como, uma zona resistiva centrada na posição 4,0 m do perfil 6, que se estende até a profundidade de 1,0 m.

A análise dos mapas de resistividade aparente permite identificar a zona de altos valores de resistividades relacionada a feição de tijoleira, identificada parcialmente nas seções 2D de resistividade elétrica aparente.



Figura 12 – Mapas de resistividades aparentes relacionadas aos ensaios dipolo-dipolo. Zona de altos valores de resistividades acima de 1700 Ω .m é destacada.

Na figura 13 observa-se o bloco 3D de resistividade aparente permitindo identificar a zona anômala de alta resistividade acima de 1700 Ω . presente no centro do campo de futebol.



Aqui se recomenda escavação arqueológica na zona delimitada pelos altos valores de resistividade elétrica acima de 1700 Ω .m, área delimitada por coloração vermelha visualizada na figura 13, para maior aferição da possível estrutura arqueológica histórica, como ressaltado por Costa (2011).

4 CONCLUSÃO

As medidas de resistividade elétrica aparente, realizadas no centro do campo de futebol, nas proximidades da antiga igreja de pedra de Mazagão Velho-AP, evidenciaram uma zona anômala de resistividade elétrica, caracterizada por altos valores acima de 1700 Ω .m presentes predominantemente até a profundidade de 0,7 m, rela-

cionada a concentrações de tijolos antigos rústicos, tijoleira, possivelmente localizando parcialmente uma estrutura arqueológica histórica.

Assim, recomenda-se para aferição uma escavação arqueológica na zona delimitada pelos altos valores de resistividade elétrica.

Conclui-se que a correlação da zona anômala de resistividade elétrica aparente com a feição de concentrações de blocos de tijolos antigos rústicos, presente em subsuperfície, evidencia a utilização do parâmetro físico de resistividade elétrica no auxílio da prospecção arqueológica.

REFERÊNCIAS

- ALBURQUERQUE, M. A. G de M; **Remanescente materiais do período pombalino no Amapá**. In: III Simpósio de Técnicas Avançadas em Conservação de Bens Culturais, 2006, Olinda. Revista Brasileira de Arqueometria Restauração Conservação. Olinda: AERPA, 2006.
- ALVES, J. J. A; **Métodos Geofísicos Aplicados à Arqueologia no Estado do Pará**. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geofísicas e Geológicas, Universidade Federal do Pará, Belém, 1979. 55 p.
- CARROZZO, M. T.; LEUCCI, G.; NEGRI, S.; NUZZO, L. GPR survey to understand the stratigraphy at the Roman ships archaeological site (Pisa, Italy). **Archaeological Prospection**, v. 10, n. 1, p.57-72, 2003.
- COSTA, A. G. Os documentos cartográficos e outras iconografias: importância na pesquisa e preservação do patrimônio cultural do Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEI-RO DE CARTOGRAFIA HISTÓRICA, 2011, Parati. Anais...Parati, 2011.
- LEUCCI, G.; GRECO, F.; GIORGI, L; MAUCERI, R; Three-dimensional image of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography survey in the castle of Occhiolà (Sicily, Italy). Journal Archaeological Science, 34:233-242, 2007.
- LOKE, M. H. **RES2DMOD ver. 3.01 for Windows 95/98/Me/2000 and NT Rapid 2D** resistivity forward modelling using the finite-difference and finite-element methods. M. H. Loke Software User's Manual, 2002.
- MOURA, H. P.; OLIVEIRA, M. J.; CABRAL, M. P.; SALDANHA, J. D. M. Medidas de Resistividade Elétrica no Sítio Arqueológico AP-CA-18: Rego Grande 1, Calçoene-AP. **Anais do 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**, 2009a, 5 p.

- MOURA, H. P.; SALDANHA, J. D. M; CABRAL, M. P.; OLIVEIRA, M. J.; KAMARÃO, K. F; NERY, J. R. C. Eletrorresistividade aplicada no sítio arqueológico AP-MA-05: Macapá. Anais do 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 2009b, 5 p.
- PENHA, G. Escavações revelam parte da história da colonização de Mazagão. 2013. Disponivel em: http://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2013/07/escavacoesrevelam-parte-da-historia-da-colonizacao-de-mazagao.html. Acesso em: 23 mai. 2014.
- PEREIRA, S. Levantamento Plani-altimétrico e fisiográfico para operação de Salvamento do Sítio Arqueológico do Campus Universitário da UNIFAP-Amapá. **Relatório nº 01/07**, 1997, 11 p.
- REYNOLDS, J. M. **Un introduction to applied and environmental geophysics**. 2^a ed. UK: Wiley-Blackwell, 2011.

CIÊNCIAS EXATAS: RESULTADOS DOS PROJETOS DE PROJETOS DE UNICIAÇÃO CIENTÍFICA DA FEDERAL DO AMAPÁ (2012-2016)



