

**Elis Tápia Vargas**

**UMA PROPOSTA DE RELÉ DIGITAL DE FREQUÊNCIA  
BASEADO EM ALGORITMOS GENÉTICOS**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Tit. Denis Vinicius Coury

São Carlos

2005

*Aos meus pais, Willian e Eliete,  
por tudo o que fizeram e fazem  
por mim, aos meus irmãos,  
Willian e Ellen, por todo apoio e  
afeto dedicados, a minha  
queridíssima avó, Briceida, por  
seu imenso carinho.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a DEUS, sem o qual nada seria possível de se realizar.

À minha família, meus pais Willian e Eliete, e irmãos, Willian e Ellen, e avó Briceida, grandes responsáveis por essa conquista, pelo amor, pela educação, por sempre acreditarem em mim e pelo constante incentivo e constante colaboração.

Em especial ao Prof. Titular Denis Vinicius Coury, pelo apoio, confiança, amizade e por sua sábia e segura orientação tornando possível o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Doutor Mário Oleskovicz, pela amizade e importante auxílio na realização desta pesquisa.

Ao meu querido Beto, que com muito amor, compreensão, companheirismo sempre esteve presente auxiliando, confortando e distraindo para tornar momentos difíceis, amenos e prazerosos.

Aos grandes amigos, Fábria, Renata, Andressa, Paulo pela constante presença, imensa amizade, afeto e constante preocupação dedicados, sempre mostrando incentivo e apoio nas dificuldades decorrentes.

Aos amigos Murilo e Silvio que além de sanar dúvidas, propuseram e estenderam palavras de conforto e ajuda em situações adversas.

A querida amiga “Kbc”, que de uma maneira cautelosa me cativou e se tornou uma pessoa importante nessa etapa de minha vida.

Aos amigos da Pós-graduação que conheci durante o período deste trabalho, em especial aos integrantes do LSEE – “O LAB”, pela ajuda nos momentos de trabalho sério, assim como pelos momentos de descontração e alegria.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, por colocar a minha disposição sua estrutura.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica (EESC-USP) que de alguma forma contribuíram para o andamento deste trabalho.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

## RESUMO

VARGAS, E. T., Uma Proposta de Relé Digital de Freqüência Baseado em Algoritmos Genéticos. São Carlos, 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho apresenta um método baseado em Algoritmos Genéticos – AGs, o qual consiste na estimação dos parâmetros associados as formas de ondas, tais como amplitude, freqüência e ângulo de fase das mesmas, referentes a uma proposição de relé de freqüência. O método proposto é baseado em Algoritmos Genéticos com representação real, tendo em vista a não necessidade de codificação dos valores logo na entrada do processo. O objetivo do trabalho é apresentar um estudo de uma das várias técnicas da computação evolutiva, conhecida como AG, cuja aplicação é inspirada nos mecanismos da evolução natural das espécies identificado pelo naturalista Inglês Charles Darwin. A idéia principal do método é fazer com que os indivíduos da população evoluam ao longo das iterações, chamadas gerações, produzindo soluções cada vez melhores até convergir a uma solução ótima ou aproximadamente ótima. O algoritmo proposto foi testado com dados simulados no *software* Matlab. Pelos resultados observados têm-se caracterizado a potencialidade desta ferramenta computacional na estimação dos parâmetros desejados.

**Palavras – chave** — Computação Evolutiva; Algoritmos Genéticos; Sistema Elétrico de Potência; Relé de Freqüência; Proteção Digital.

## **ABSTRACT**

VARGAS, E. T., A Proposal of a Digital Frequency Relay Based on Genetic Algorithms. São Carlos, 2005. Dissertation (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This work presents a method based on Genetic Algorithm – GAs, which consists on estimation of parameters in waveforms, such as their amplitude, frequency and phase angles, related to the application of a frequency relay. The proposed study is based on the Genetic Algorithms with real representation, once there is no need to codify the values on the input of the process. The objective of this work is to present one of the several techniques of artificial intelligence, known as Genetic Algorithm, in which the main application is inspired in mechanisms of natural evolution of the species identified by Charles Darwin. The main idea of this method is to make the individuals from one population, called generation, to evolve, producing better solutions until they converge to an optimal or approximately optimal solution. The proposed algorithm was tested with simulated data from Matlab software. The results observed have characterized the efficiency of this computational tool for the estimation of the desired parameters.

**Keywords** — Evolutionary Computation; Genetic Algorithm; Electric Power System; Frequency Relay; Digital Protection.

## Lista de Figuras

<i>Figura 1 – Panorama da Computação Evolutiva .....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2 - Estrutura da lógica de um AG.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3 – Representação de um cromossomo ou individuo qualquer.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 4 - Representação do Método da Roleta.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5 –Relé de Freqüência.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 6 – Rele Digital de Freqüência , Fabricante SEL - 547 .....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 7 – Relé Digital SPAF 140 C, fabricado por ABB Power T&amp;D Company Inc.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 8 - Estrutura geral do GOOAL.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 9 - Forma de Onda 10V – 60 Hz – 0°.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 10 - Arquivo de entrada de dados para o GOOAL.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 11 – Impressão de arquivo de dados.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 12 – Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 10000 gerações e 48 indivíduos por população. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 13 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 7500 gerações e 48 indivíduos por população .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 14 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 5000 gerações e 48 indivíduos por população .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 15 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 2500 gerações e 48 indivíduos por população .....</i>	<i>53</i>

<i>Figura 16 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 1000 gerações e 48 indivíduos por população .....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 17 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 10000 gerações e 48 indivíduos por população. ....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 18 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 7500 gerações e 48 indivíduos por população .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 19 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 5000 gerações e 48 indivíduos por população .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 20 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 2500 gerações e 48 indivíduos por população .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 21 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 1000 gerações e 48 indivíduos por população .....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 22 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 2400 Hz.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 23 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 2400 Hz .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 24 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 2400 Hz .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 25 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 2400 Hz .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 26 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 2400 Hz .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 27 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz.....</i>	<i>60</i>

<i>Figura 28 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 29 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 30 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 31 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 32 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 33 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 800Hz.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 34 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 35 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 800Hz.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 36 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 37 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 400 Hz.....</i>	<i>66</i>

<i>Figura 38 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 400 Hz.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 39 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 400 Hz.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 40 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 400 Hz.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 41 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 400 Hz.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 42 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 43 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 44 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 45 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 46 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 47 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz.....</i>	<i>71</i>

<i>Figura 48 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 49 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 50 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 51 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 52 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 800 Hz.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 53 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 800 Hz.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 54 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800 Hz.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 55 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 800 Hz.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 56 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 800 Hz.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 57 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz.....</i>	<i>77</i>

<i>Figura 58 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 400Hz.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 59 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 60 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 400Hz.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 61 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 400 Hz.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 62 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 800 Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 63 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Torneio.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 64 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 65 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Toneio.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 66 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 67 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Toneio.....</i>	<i>82</i>

<i>Figura 68 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 69 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Toneio.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 70 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 71 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Torneio .....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 72 – Onda 58 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800 Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 73 - Onda 58,5 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 74 - Onda 59 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 75 - Onda 59,5 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 76 - Onda 60 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 77 - Onda 60,5 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>91</i>

<i>Figura 78 - Onda 61Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 79 - Onda 61,5 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 80 - Onda 62 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 81 - Onda 58Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 82 - Onda 58,5 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 83 - Onda 59 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 84 - Onda 59,5 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 85 - Onda 60 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 86 - Onda 60,5 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 87 - Onda 61 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 88 - Onda 61,5 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 89 - Onda 62 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 90 - Onda 58Hz, defasagem angular 0°. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 91 - Onda 60 Hz, defasagem angular 0°. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>99</i>

<i>Figura 92- Onda 62 Hz, defasagem angular 0°. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 93 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 94 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Torneio.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 95 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 96 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Torneio .....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 97 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 98 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Torneio .....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 99 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 100 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Torneio .....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 101 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 102 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Torneio.....</i>	<i>114</i>

<i>Figura 103 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 104 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Toneio .....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 105 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 106 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Toneio.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 107 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 108 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Toneio.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 109 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 110 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Toneio.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 111 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 112 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Toneio.....</i>	<i>119</i>

<i>Figura 113 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Roleta.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 114 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Torneio.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 115 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 116 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Torneio .....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 117 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 118 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Torneio .....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 119 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 120 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Torneio .....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 121 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Roleta .....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 122 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Torneio .....</i>	<i>124</i>

## Lista de Tabelas

<i>TABELA 1 - Banco de dados da Universidade de Vaasa .....</i>	<i>12</i>
<i>TABELA 2 - Grau de aptidão para o método de seleção por torneio .....</i>	<i>26</i>
<i>TABELA 3 – Especificações técnicas do relé digital da ABB.....</i>	<i>37</i>
<i>TABELA 4 – Parâmetros que caracterizam o algoritmo genético.....</i>	<i>43</i>
<i>TABELA 5 – Relatório final de Saída do GOOAL .....</i>	<i>45</i>
<i>TABELA 6 – Parâmetros utilizados para testar o algoritmo proposto .....</i>	<i>49</i>
<i>TABELA 7 – Sinal caracterizado por 58 Hz,freqüência de amostragem de 800 Hz, janela de dados de ½ ciclo.AG configurado com seleção Torneio, 5.000 gerações e 30 indivíduos na população, função avaliação opção um.....</i>	<i>85</i>
<i>TABELA 8 - Sinal caracterizado por 58Hz,freqüência de amostragem de 800Hz, janela de dados de ½ ciclo.AG configurado com seleção Torneio, 5.000 gerações e 30 indivíduos na população, função avaliação opção três.....</i>	<i>86</i>
<i>TABELA 9 - Sinal caracterizado por 58Hz,freqüência de amostragem de 800Hz, janela de dados de ½ ciclo.AG configurado com, 5.000 gerações e 30 indivíduos na população, função avaliação opção dois.....</i>	<i>86</i>
<i>TABELA 10 - Sinal caracterizado por 58Hz,freqüência de amostragem de 800Hz, janela de dados de ½ ciclo.AG configurado com seleção Roleta, 5.000 gerações e 30 indivíduos na população, função avaliação opção um.....</i>	<i>87</i>

<i>TABELA 11 - Sinal caracterizado por 58Hz, frequência de amostragem de 800Hz, janela de dados de 1/2 ciclo. AG configurado com seleção Roleta, 5.000 gerações e 30 indivíduos na população, função avaliação opção três.....</i>	<i>87</i>
<i>TABELA 12 – Configuração Otimizada do Algoritmo Genético .....</i>	<i>87</i>
<i>TABELA 13 - Variações dos casos para análise.....</i>	<i>88</i>

## SUMARIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xvii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<i>1.1 Objetivo do Trabalho .....</i>	<i>6</i>
<i>1.2 Organização do Trabalho .....</i>	<i>6</i>
<b>2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO .....</b>	<b>8</b>
<b>3. ALGORITMOS GENÉTICOS.....</b>	<b>15</b>
<i>3.1 Evolução Histórica .....</i>	<i>15</i>
<i>3.2 Princípio de funcionamento .....</i>	<i>17</i>
<i>3.3 Terminologia dos Algoritmos Genéticos.....</i>	<i>19</i>
<i>3.4 Representação dos AGs.....</i>	<i>21</i>
<i>3.4.1 Representação Binária .....</i>	<i>21</i>
<i>3.4.2 Representação Real .....</i>	<i>22</i>
<i>3.4.3 Representação Inteira.....</i>	<i>22</i>
<i>3.5 Avaliação dos Indivíduos .....</i>	<i>22</i>
<i>3.6 Operação de Seleção .....</i>	<i>23</i>
<i>3.6.1 Método da Roleta .....</i>	<i>24</i>
<i>3.6.2 Elitismo .....</i>	<i>25</i>
<i>3.6.3 Método Torneio .....</i>	<i>25</i>
<i>3.7 Escalonamento Linear .....</i>	<i>26</i>
<i>3.8 Operadores dos AG's.....</i>	<i>27</i>
<i>3.8.1 Cruzamento ("Crossover").....</i>	<i>27</i>
<i>3.8.2 Mutação .....</i>	<i>28</i>

3.9 Critério de Parada.....	29
<b>4. RELES DIGITAIS MICROPROCESSADOS .....</b>	<b>30</b>
4.1 A Evolução dos Relés.....	31
4.2 Relés Digitais de Frequência.....	34
A) Aplicação .....	34
B) Características comuns de alguns modelos comerciais .....	35
C) Modelos Comerciais .....	35
<b>5. ALGORITMO GENÉTICO E SUA APLICAÇÃO NA ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA UM RELÉ DE FREQUÊNCIA .....</b>	<b>38</b>
5.1 Formulação Matemática.....	40
5.2 Configuração do GOOAL .....	42
5.3 Caracterização do Problema .....	46
<b>6. RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO.....</b>	<b>49</b>
6.1 Resultados Alcançados pela Análise de Sensibilidade .....	50
6.1.1 Sensibilidade quanto à taxa de amostragem.....	50
A) Sinal com janela de dados de um ciclo.....	50
B) Sinal com janela de dados de meio ciclo .....	53
6.1.2 Sensibilidade quanto ao número de indivíduos por população, sinal com janela de dados de um ciclo .....	56
A) Taxa de amostragem de 2400 Hz.....	57
B) Taxa amostral de 1200 Hz .....	60
C) Taxa de amostragem de 800 Hz .....	63
D) Taxa de amostragem de 400 Hz.....	65
6.1.3 Sensibilidade quanto ao número de indivíduos por população, sinal com janela de dados de meio ciclo.....	68
A) Taxa de amostragem de 2400 Hz.....	68
B) Taxa de amostragem de 1200 Hz .....	71
C) Taxa de amostragem de 800 Hz .....	74
D) Taxa de amostragem de 400 Hz.....	77
6.1.4 Sensibilidade quanto ao método de seleção .....	79
A) Taxa de amostragem de 800 Hz .....	80
6.1.5 Sensibilidade quanto à função de avaliação.....	85

6.2	<i>Resultados alcançados pelo algoritmo com a configuração ótima</i> .....	88
A)	Variação da frequência e ângulo de fase em um sinal sem ruído .....	88
B)	Variação da frequência e ângulo de fase em um sinal com ruído .....	93
B)	Variação da amplitude .....	98
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>101</b>
7.1	<i>Propostas futuras para continuação da pesquisa</i> .....	103
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>104</b>
	<b>APENDICE A – Sensibilidade quanto ao método de seleção</b> .....	<b>109</b>

---

## 1. INTRODUÇÃO

Historicamente, o Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem apresentado um rápido e constante crescimento, sob o ponto de vista mundial. Tal sistema abrange um conjunto de geração, transmissão e distribuição de energia, projetado para satisfazer o contínuo crescimento da demanda de energia elétrica dos consumidores, atendendo a certos critérios mínimos, como padrões de qualidade, confiabilidade e continuidade da energia elétrica.

Tendo-se em mente que é comum a ocorrência de situações transitórias no sistema de potência, juntamente com os prejuízos que as mesmas acarretam na prática, a exposição do SEP faz com que a sua proteção tenha uma importante função a cumprir, tendo papel relevante no seu desenvolvimento e progresso, atualmente vitais para uma eficiente operação e continuidade do suprimento do sistema de potência como um todo.

Detalhando as inúmeras interferências indesejáveis provocadas pelos transitórios tem-se como exemplo, o acionamento indevido de relés, mau funcionamento de equipamentos sensíveis e distorções em equipamentos de medição entre outros, podendo chegar até mesmo à interrupção do fornecimento de energia. Tal quadro resultaria em um efeito econômico não desprezível, acarretando em prejuízos às concessionárias e consumidores finais. Este é um fator agravante, visto que, atualmente, com a proliferação de equipamentos eletrônicos sofisticados, tem-se a exigência, cada vez mais, de melhoria na qualidade no sinal entregue pela concessionária.

Segundo EMANUEL *et al.* [1], os equipamentos e maquinários são sensíveis às variações da energia fornecida pelas concessionárias, uma vez que os aparelhos modernos possuem controle microprocessados. Tal característica os torna mais sensíveis a certos tipos de distúrbios, resultando em falhas de operação, controle e

proteção do mesmo. Principalmente justificados pelos seguintes motivos, como exposto em Dugan [2]:

1. Os equipamentos atualmente utilizados são mais sensíveis às variações nas formas de onda de energia fornecidas. Muitos deles possuem controles baseados em microprocessadores e dispositivos eletrônicos sensíveis a muitos tipos de distúrbios, como mencionado;
2. O crescente interesse pela racionalização e conservação da energia elétrica, com vistas a otimizar a sua utilização, tem aumentado o uso de equipamentos que, em muitos casos, aumentam os níveis de distorções harmônicas e podem levar o sistema a condições de ressonância;
3. A crescente integração dos processos, significando que a falha de qualquer componente traz conseqüências ainda mais importantes para o sistema elétrico;
4. As conseqüências resultantes de variações nas formas de onda sobre a vida útil dos componentes elétricos.

Neste contexto, os valores associados aos parâmetros que caracterizam um sinal de tensão ou corrente em uma instalação elétrica podem ser alterados em função de muitos fatores, tais como: partida de motores, utilização de equipamentos eletrônicos, fornos a arco, etc.

Genericamente, podem ser produzidos quatro tipos de perturbações elétricas básicas em um sinal de tensão ou corrente em uma instalação elétrica, Procobre [3]:

1. Perturbações na amplitude do sinal;
2. Perturbações na frequência do sinal;
3. Desequilíbrios de tensão ou corrente em sistemas trifásicos;
4. Perturbações na forma de onda do sinal.

Dessa forma, para avaliar o quanto um sistema está operando fora de suas condições normais, duas grandezas elétricas básicas, tensão e frequência, podem ser empregadas. Por outro lado, com relação à tensão, três características principais devem ser observadas:

1. A forma de onda deve ser a mais próxima possível da forma senoidal;
2. A simetria do sistema elétrico;
3. As magnitudes das tensões dentro de limites aceitáveis por normas.

Dentro desse contexto, admite-se que qualquer variação na magnitude, frequência ou forma de onda do sinal é um problema a ser solucionado.

A frequência do sistema de potência está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o mesmo. Vale ressaltar que, variações na frequência de um sistema elétrico, são definidas como sendo desvios no valor da frequência fundamental deste sistema (50 ou 60 Hz).

Pequenas variações de frequência (faixa de  $60 \pm 0,5\text{Hz}$ ), podem ser observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração no caso de alguma alteração. A amplitude da variação e sua duração dependem das características da carga e da resposta dos reguladores de velocidade instalados no sistema de geração.

Variações de frequência que ultrapassam os limites para operação normal em regime permanente podem ser causadas por faltas em sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou pela saída de operação de uma grande fonte de geração.

Em sistemas isolados, entretanto, como é o caso da geração independente nas indústrias, na eventualidade de um distúrbio, a magnitude e o tempo de permanência das máquinas operando fora da velocidade, resultam em desvios da frequência em proporções mais significativas.

A diminuição ou aumento da frequência do sistema pode prejudicar a eficácia dos equipamentos nele agregados, como bancos de capacitores, geradores, motores, bem como aumentar ou diminuir substancialmente as indutâncias nas linhas de transmissão comprometendo o equilíbrio do SEP como um todo. Assim sendo, a frequência do sistema deve ser mantida bem próxima do seu valor nominal.

Em geral, os transientes do sistema elétrico que provocam variações de frequência são distúrbios originados por condições de desequilíbrio entre geração e carga. Quando a variação é pouco significativa, a condição de desequilíbrio será corrigida pelos reguladores dos geradores. Por outro lado, no caso de uma grande

variação da frequência, os reguladores não atuam e o valor da frequência decresce, com o risco de perda da capacidade de geração, devido à sub-frequência manifestada. Se esta condição de decréscimo de frequência não for corrigida em tempo, uma situação extrema, como um blecaute geral pode ocorrer.

Para a supervisão do valor da frequência apresentado pelo sistema sob determinada condição de operação, utilizam-se relés digitais de frequência, que acionam seus disjuntores de proteção quando detectadas condições de oscilações da rede dentro de patamares inaceitáveis sob o ponto de vista de operação normal do sistema.

Devido a importância de acompanhar a variação desse parâmetro, técnicas para monitoramento da frequência da rede elétrica são propostas por diferentes autores na literatura. Tradicionalmente, a estimação da amplitude, frequência e ângulo de fase da onda senoidal pode ser baseada nas teorias de estimação estática ou dinâmica. A Transformada Discreta de Fourier (TDF) [4] e técnica do mínimo erro quadrado [5], são exemplos de estimação estática. A utilização do filtro de Kalman [6], exemplo de estimação dinâmica, dentre outras implementações práticas apresentadas em KEZUNOVIC *et al.*[7].

Contudo, o planejamento, operação, controle e proteção do atual e moderno sistema elétrico tem encontrado dificuldades por sua complexidade quanto implementação *online*, quando se utilizam os métodos convencionais. Neste sentido, recorrer às técnicas inteligentes tornou-se proveitoso para o desenvolvimento e aplicação nessa categoria de problemas.

A Computação Evolutiva (CE) é uma ramificação da ciência da computação que, juntamente com o estudo de Sistemas Fuzzy e Redes Neurais, forma a área denominada Inteligência Computacional (IC). A CE é constituída em princípio, por cinco diferentes linhas: Algoritmos Genéticos (AG), Programação Evolutiva (PE), Estratégias de Evolução (EE), Sistemas Classificadores (SC) e Programação Genética (PG). A Figura 1 esquematiza essa classificação.

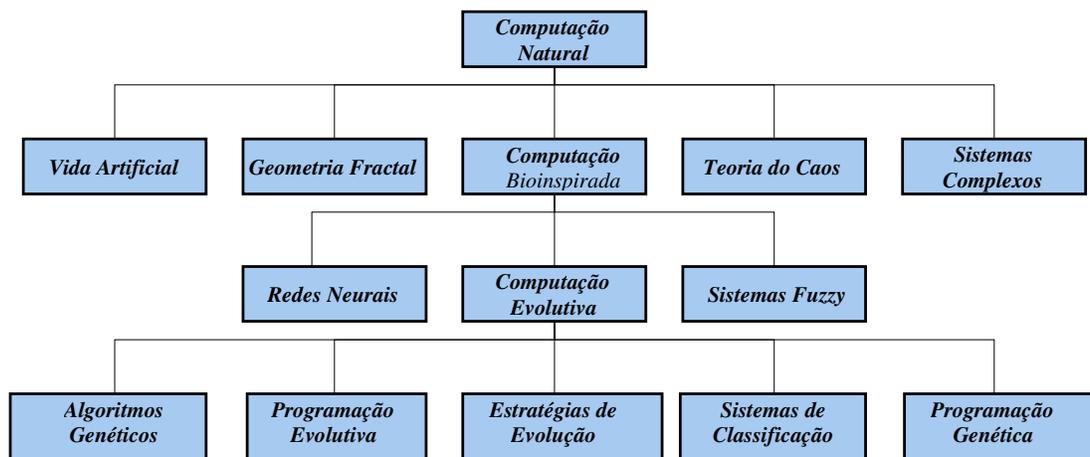


Figura 1 – Panorama da Computação Evolutiva

Os algoritmos desenvolvidos na área da CE denominam-se Algoritmos Evolutivos (AE), os quais são modelos computacionais que empregam processos evolutivos como elementos básicos de projeto e implementação. O princípio desses algoritmos é operar sobre uma população de estruturas que evoluem de acordo com leis de seleção. A proposta do presente estudo, os Algoritmos Genéticos seguem além desse princípio o uso de operadores denominados operadores genéticos, tais como: reprodução, recombinação e mutação, para alcançar a convergência do problema. Ainda que muito simplificado do ponto de vista biológico, os AEs são suficientemente complexos para permitir a construção de poderosos mecanismos evolutivos.

Dentro desse panorama, os algoritmos evolutivos, juntamente com os métodos de otimização e busca estocástica baseados nos princípios e modelos da evolução biológica natural estão sendo usados extensamente em aplicações do sistema de potência, como apresentado por Rajkumar *et al.* [8], devido a sua versatilidade para a resolução de problemas complexos, nas áreas de otimização e aprendizado de máquinas.

### ***1.1 Objetivo do Trabalho***

Este trabalho apresenta um método baseado em Algoritmos Genéticos – AGs que consiste na estimação dos parâmetros associados as formas de ondas, tais como amplitude, frequência e ângulo de fase de ondas de tensão e corrente, referentes a uma proposição de relé de frequência, a qual é feita através de um processo *on-line*.

O método proposto é baseado em Algoritmos Genéticos com representação real, tendo em vista a não necessidade de codificação dos valores logo na entrada do processo. O objetivo do trabalho é apresentar um estudo dentre as técnicas da computação evolutiva, conhecida como AG, cuja aplicação é inspirada nos mecanismos da evolução natural das espécies identificado pelo naturalista Inglês Charles Darwin. A idéia principal do método é fazer que os indivíduos da população evoluam ao longo das iterações, chamadas gerações, produzindo soluções cada vez melhores até convergir a uma solução ótima ou aproximadamente ótima.

A facilidade da proposta ressalta que para a aplicação da ferramenta, não se faz necessário um profundo conhecimento do problema, devendo, no entanto, caracterizar de maneira adequada os parâmetros que se deseja investigar, para que fique adequadamente representado o cromossomo a ser iterativamente trabalhado.

O algoritmo proposto foi testado com dados simulados no *software* Matlab a fim de afirmar sua potencialidade, comprovando a eficiência dos AGs na estimação dos parâmetros desejados e apontando para soluções alternativas de problemas relevantes ao sistema de potência.

### ***1.2 Organização do Trabalho***

O trabalho está estruturado de forma que no primeiro capítulo foi descrita brevemente a importância em se manter a confiabilidade do fornecimento de energia, atentando para eventuais anormalidades no sistema as quais podem resultar em variações na frequência e outros parâmetros da onda senoidal, podendo afetar o funcionamento apropriado dos equipamentos conectados à rede.

Um levantamento bibliográfico sobre técnicas para estimar os valores associados aos parâmetros do sinal é apresentado no segundo capítulo. O terceiro capítulo apresenta a teoria dos algoritmos genéticos.

O capítulo 4 compreende várias simulações de situações de operação sobre o sistema em estudo, servindo para teste da ferramenta em análise.

Resultados da aplicação da técnica para estimação dos parâmetros são apresentados no capítulo 6. Por fim, o capítulo 7 destaca as principais contribuições deste trabalho e as conclusões sobre o mesmo. Ainda neste capítulo, há a apresentação de sugestões para a continuidade do trabalho.

---

---

## 2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

O progresso na área da proteção de sistemas de potência é vital para uma eficiente operação e contínuo desenvolvimento desses como um todo. Para uma adequada proteção, relés são instalados em diferentes partes do sistema elétrico para detectar condições anormais e iniciar ações corretivas na tentativa de retornar rapidamente o sistema ao seu estado normal de operação.

Desenvolver novas técnicas e métodos para estimar a frequência da rede elétrica, utilizando dispositivos baseados em microprocessadores, tem sido interesse de pesquisadores e engenheiros da área de potência nos últimos anos. O aperfeiçoamento das técnicas existentes e as novas metodologias visam melhorar, cada vez mais, a precisão e a eficiência desses dispositivos.

O levantamento bibliográfico mostrado a seguir busca sintetizar os diversos estudos voltados para a estimação de parâmetros inerentes aos relés de frequência, na tentativa do aprimoramento dos sistemas de proteção aplicados.

Phadke [9] – apresenta melhorias no monitoramento de subestações, proteção e controle, as quais podem apresentar impacto significativo no sistema de potência como um todo. O mesmo enfatiza características e vantagens de um relé digital, apontando-o como um sofisticado elemento de controle. O autor ressalta o impacto e aprimoramento nas tarefas de controle e de operação que o relé digital proporciona ao sistema de potência, dando maior confiança e economia, permitindo a inclusão de novas funções modulares e de fácil integração com os subsistemas desejados.

Devido a presença de ruídos indesejáveis, harmônicos de alta ordem, componente CC e ruídos aleatórios no sistema de potência, há dificuldade de precisão na medição da frequência. Em virtude disso, Salcic e Mikhael [10] desenvolveram um algoritmo que determina pontos de referência em um sinal senoidal corrompido por ruídos indesejados para medir de forma precisa a frequência

instantânea. Os pontos de referência são determinados usando características simétricas do sinal. Estes são usados para medir o tempo entre cada dois ciclos consecutivos, determinando a frequência do sinal. Neste algoritmo duas principais características importantes na precisão de medidas da frequência são empregadas: a de “correlação” entre o sinal original e o corrompido, permitindo remover o efeito dos ruídos aleatórios, e a característica de “detecção simétrica”, para gerar um ponto de referência único e uma única localização (instante de tempo) em cada ciclo. O método é direcionado para a aplicação de relés de frequência para análise de perda de carga.

Girgas e Ham [11] propuseram uma técnica que utiliza a Transformada Rápida de Fourier (TRF), do inglês *Fast Fourier Transform* (FFT), como um detector de cruzamento de zero para estimar a frequência da rede elétrica. Em um prévio estado da FFT, com um termo chamado de vazamento, pode-se segundo os autores, detectar a flutuação da frequência na rede elétrica. Assim, toda vez que a onda senoidal excursionar por zero ou próximo a este, devido à taxa de amostragem empregada, tem-se a indicação do valor da frequência ou a sua flutuação. Mas tal desempenho não chegou a ser testado devido aos elevados custos dos microprocessadores na época.

O método proposto neste trabalho se destaca da proposta da FFT já que, para o último conseguir resultados satisfatórios no domínio da frequência, deve-se trabalhar com o sinal amostrado com taxas de amostragem elevadas. Se utilizarmos níveis de 800 Hz para amostragem do sinal, como quando se emprega os algoritmos genéticos (nas simulações do presente estudo), uma deteriorização do método seria verificada.

Phadke *et al.* [12] por sua vez, propuseram uma técnica dispondo dos fasores de tensão para indicar a frequência do sistema. Este método consiste em se utilizar os componentes da seqüência positiva dos fasores de tensão. Com a aquisição de todos os fasores da seqüência positiva, os dados são passados para análise de estados e cálculo de fluxo de carga. Desta maneira, quando as formas de onda resultantes interceptam o eixo das abscissas, ou seja, passam por zero, o valor da frequência é

estimado. Assim, utilizando tal instante de tempo como referência, calculava-se a frequência do sistema em questão. O resultado de tal procedimento é satisfatório, porém lento para a aplicação em um relé digital, visto que, a época, não tinha o suporte de tecnologia suficiente avançada para a sua implementação prática.

Sachdev e Giray [13] utilizaram em seus estudos, o método de mínimos quadrados para estimar a frequência e a amplitude de tensão. O algoritmo proposto pelos autores parte de uma onda senoidal descrita:

$$v(t) = V_m \text{sen}(wt + \varphi) \quad (2.1)$$

onde:  $V_m$  é máxima amplitude;  
 $W$  é a frequência em radianos;  
 $\varphi$  é um ângulo arbitrário;  
 $t$  é o tempo em segundos.

Desta formulação, tem-se a expansão da equação da onda senoidal em identidades trigonométricas quadráticas para chegar às equações infinitas da série de Taylor. Os pontos amostrados seguem uma variação fixa, com isso é possível limitar a série em um determinado ponto, sexto termo no presente estudo. Admitindo-se intervalos de tempo fixo das amostras pode-se omitir o fator tempo das equações e formular o equacionamento do erro quadrático do método. Os autores obtiveram resultados satisfatórios para uma janela de dados compreendendo até 3 ciclos de onda também resultados toleráveis para janelas de até 1 ciclo. Considerados ótimos para a época, visto que os erros variavam entre 0,017 a 1,7Hz em relação ao valor real.

Tem-se na proposta deste trabalho, um equacionamento semelhante do estudo acima, observando que devido a característica de adaptação dos algoritmos genéticos, consegue-se trabalhar com janela de dados de até  $\frac{1}{2}$  ciclo, garantindo ainda erros da ordem de 1% do valor real, incentivando o estudo do método em questão.

Em Moore *et al.* [14], é apresentado a implementação de um algoritmo direcionado a um relé de frequência capaz de medir sobre e sub-frequências instantâneas e também medidas da mudança da taxa dessa grandeza. Buscou-se pelos autores um algoritmo para a prevenção da operação indesejada dos relés, devido as mudanças dos impulsos do sinal. O principal benefício do método de medição instantânea da frequência inclui a habilidade de medir a frequência em qualquer fase do sinal de entrada. Dessa forma, permite-se obter valores atuais da frequência corrente. Além disso, devido ao curto período de observação requerido, este método demonstra respostas satisfatórias sob condições dinâmicas, importantes em aplicações de medição de frequência. O sinal de entrada para o algoritmo é preferencialmente uma amostra de corrente devido a regularidade de amplitude. Trabalha-se com um ciclo da forma de onda seno e cosseno da resposta de um filtro FIR ( filtro de Resposta de Impulso Finito), derivado da Transformada Discreta de *Fourier*. Com o uso do filtro é possível caracterizar uma estabilidade nas respostas do algoritmo, sem, no entanto, testá-los frente a situações práticas e ou com dados reais.

Soliman *et al.* [15] – apresentam uma técnica de avaliação de frequência e harmônicos no sistema elétrico de potência. Esta técnica é baseada na regressão linear *fuzzy* e usa amostras digitalizadas da tensão para estimar a frequência e conteúdo harmônico do sinal. Nesta técnica, formula-se um problema de otimização linear, com o objetivo de minimizar a propagação do sinal de tensão até a localização do relé para satisfazer duas restrições de desigualdades em cada tensão amostrada.

Lobos e Rezmer [16] – apresentam um método de medição de frequência do sistema de potência baseado na filtragem digital e no método de estimação de Prony. Primeiramente, a forma de onda da tensão, conseguida do transformador de tensão, é filtrada usando algoritmos baseados na Transformada Discreta de Fourier. Os coeficientes do filtro são calculados assumindo uma frequência constante (50 ou 60 Hz). Devido ao desvio da frequência do sistema de potência, a resposta do filtro não é suficientemente exata. Para melhorar o efeito do filtro, funções de janelamento de Hamming ou Blackman são aplicadas Haykin [17]. Para calcular a frequência, o sinal

de saída do filtro é processado usando um algoritmo baseado no método da estimação de Prony, cuja idéia principal é transformar um problema não linear em um problema de ajuste linear para minimizar um erro particular ao problema.

Manzoul [18] traz uma aplicação de FPGA (*Field Programmable Gate Array*) em relés de proteção. As aplicações direcionadas ao FPGA são inúmeras, visto que um dos maiores atrativos desta tecnologia é o seu preço e a versatilidade em funções, podendo vir a substituir os microcontroladores usados na proteção, como também na indústria. Os relés implementados foram de: sobretensão, subtensão, sob e subfrequência. Em geral, múltiplos relés são implementados dispondo de um único CI (Circuito Integrado), os quais podem compartilhar recursos entre si. Pelos resultados apresentados pelo autor, observa-se êxito na implementação, caracterizando a possibilidade de se obter sistemas de proteção a baixo custo.

Rajkumar *et al.* [8] – apresentam um *review* acerca das aplicações de algoritmos genéticos em sistemas elétricos de potência. Os autores apontam a ampla faixa de aplicação e desenvolvimento da ferramenta, bem como as vantagens desta técnica direcionada à problemas de otimização. Na Tabela 1, encontram-se algumas das aplicações de AG em sistemas de potência no ano de 1995 ALANDER [20].

*TABELA 1 - Banco de dados da Universidade de Vaasa*

Área de concentração	Número de publicações
Controle	67
Otimização do despacho	51
Despacho econômico	47
Energia Nuclear	25
Sistemas de distribuição	19
Turbinas	15
Transformadores	14
Planejamento	14

Diagnósticos	14
Potencia Reativa	10
Implementação	9
Processamento de sinal	8
Rede de distribuição	8
Reabilitação	7
Despacho de potencia	7
Planejamento de potencia reativa	6
Geração	6

Os autores finalizam o trabalho, enfatizando que novas técnicas baseadas em algoritmos genéticos devem emergir como aproximações eficientes para a solução de complexos problemas do sistema de potência.

Osman *et al.* [19] – desenvolveram um Algoritmo Genético (AG) aplicável a um relé de distância com estimação direcional. Para este problema, a função objetivo escolhida é baseada na avaliação do erro quadrado para determinar a distância entre a falta e a localização do relé, considerando a resistência de falta. O processo de estimação do AG começa uma vez que a falta é detectada, permitindo um janelamento adaptativo e baseado na coleta de amostras de entrada e saída no instante da detecção. A técnica proposta pelos autores demonstrou-se capaz de prover uma estimação precisa para a distância e direção da falta dentro de um ciclo da frequência fundamental após a da detecção da falta.

El-Naggar e Youssef [20] apresentam uma aplicação de AG para medir desvios na frequência, bem como na magnitude da tensão e ângulo de fase de um dado sinal, utilizando a representação binária dos genes genéticos. Os autores objetivam minimizar o erro estimado, aplicando diferentes funções de avaliação. A primeira função de avaliação testada foi minimizar o erro máximo individual definido pela equação abaixo:

$$FF1 = \frac{1}{e_{\max} + \Delta} \quad (2.2)$$

onde  $\Delta = 0,00001$  (para evitar *overflow*)

$e_{\max}$  = erro máximo individual em cada geração

Outra função avaliação testada é baseada na soma dos erros quadrados, definida por:

$$F_{sum} = \sum_{i=1}^m e_i^2 \quad (2.3)$$

Assumindo que o objetivo do AG seja maximizar a função, é necessário mapear a função dos erros quadrados dentro de uma função de minimização, ficando:

$$FF2 = \frac{1}{F_{sum} + \Delta} \quad (2.4)$$

Para testar o AG, variaram-se diversos parâmetros não só da onda como da aplicação como um todo (amplitude, frequência, taxa de amostragem e tamanho da janela de dados). Embora os autores concluam que os resultados obtidos mostram que a técnica estima os parâmetros da forma de onda, fica claro que os testes não incluíram dados reais ou simulados provenientes, por exemplo, do ATP ou EMTP/PSCAD, os quais serviriam para validar a metodologia proposta.

---

## 3. ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos (AGs) utilizam princípios da genética propostos por Mendel, na qual a aplicação é inspirada nos mecanismos da evolução natural das espécies identificado pelo naturalista Inglês Charles Darwin. Robustos e facilmente adaptáveis, consistem em uma técnica amplamente estudada e utilizada em diversas áreas.

Vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos com aplicação de técnicas de Algoritmos Genéticos, as quais são extremamente interessantes como ferramentas de busca e otimização na solução dos mais diferentes tipos de problemas [21], [22], [23] e [24].

O capítulo introduzirá os Algoritmos Genéticos (AGs), realizando uma evolução histórica e em seguida explorará seus parâmetros, operadores, métodos e características.

### *3.1 Evolução Histórica*

A história da aplicação desses algoritmos remonta ao início da segunda metade do século XX e nos mostra que as pesquisas eram feitas independentemente e produziam muitas das vezes resultados semelhantes e até redundantes.

Muitos autores criaram procedimentos ligeiramente diferentes uns dos outros e lhes deram nomes específicos como Estratégias Evolutivas [25], Programação Evolutiva [26], [27], e Algoritmos Genéticos [28], [29]. Em seguida, técnicas mais especializadas foram desenvolvidas em associação com determinadas estruturas de dados, como por exemplo, Programação Genética [30].

Entretanto, trabalhos de Michalewicz [31], evidencia teorias empíricas de que nenhuma das abordagens “canônicas” originais desses procedimentos pode chegar a algum resultado que não possa ser obtido com outros procedimentos não-evolutivos.

Com o crescente interesse por esses algoritmos, idéias têm sido aproveitadas, trocadas e modificadas em todas essas abordagens. Não há base científica para discriminação entre procedimentos evolutivos, e o termo “Algoritmos Evolutivos” tem sido usado para descrever quaisquer procedimentos iterativos baseados em seleção e variação de populações.

Contudo, os AGs apresentam-se como os mais populares e amplamente usados dentre os algoritmos evolutivos, caracterizando o seu surgimento da mistura entre sistemas naturais e artificiais e da observação dos sistemas biológicos.

Cronologicamente alguns eventos marcaram o desenvolvimento nesta área, como descritos a seguir:

1833 - a teoria da evolução e a computação nasceram praticamente na mesma época. Charles Babbage, um dos fundadores da computação moderna e amigo pessoal de Darwin, desenvolveu sua máquina analítica;

1858 - Charles Darwin apresentou sua teoria da evolução através de seleção natural, na mesma época em que o naturalista inglês Alfred Russel Wallace;

1859 - Darwin publica “On the Origin of Species Means of natural Selection” com a sua teoria completa. Este trabalho influenciou muito o futuro não apenas da Biologia, Botânica e Zoologia, mas de todo o pensamento relacionado à vida;

1900 - o trabalho de Gregor Mendel, desenvolvido em 1865, sobre os princípios básicos de herança genética, foi redescoberto pelos cientistas e teve grande influência sobre trabalhos futuros relacionados à evolução;

Entre 1930 e 1940 a moderna teoria da evolução combina a genética e as idéias de Darwin e Wallace sobre a seleção natural, criando o princípio básico de Genética Populacional: “a variabilidade entre indivíduos em uma população de organismos que se reproduzem sexualmente é produzida pela mutação e pela recombinação genética”.

No período de 1950 e 1960 muitos biólogos começaram a desenvolver simulações computacionais de sistemas genéticos.

Entretanto, foi John Holland quem começou seriamente a desenvolver as primeiras pesquisas no tema. Em 1975 John Holland publicou o seu livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, hoje considerado a Bíblia de Algoritmos Genéticos. Nos anos 80 David Goldberg, aluno de Holland, consegue primeiro sucesso em aplicação industrial de Algoritmos Genéticos.

Desde então, os Algoritmos Genéticos vêm sendo aplicados com sucesso nos mais diversos problemas de otimização e aprendizado de máquinas [32].

### ***3.2 Princípio de funcionamento***

Como um algoritmo evolutivo, o AG processa estruturas que são representações de soluções de um problema. Essas estruturas são formadas por seqüências de símbolos de um determinado alfabeto. As soluções são consideradas indivíduos, e as estruturas são representações de seus cromossomos.

Uma função associa as estruturas a valores numéricos que medem a qualidade das soluções. A formulação dessa função reflete os objetivos de otimização do problema. A qualidade das soluções é considerada como adaptação dos indivíduos.

Iterativamente, o AG transforma um conjunto com um número fixo de estruturas, também chamado de população de indivíduos, em um novo conjunto, ou nova população, usando três operações genéticas definidas com base nos princípios fundamentais da evolução natural: *seleção, reprodução e mutação*.

O processo de seleção pode ser feito de várias maneiras, mas normalmente as estruturas são selecionadas para a formação de uma nova população de modo proporcional à sua adaptação. Estruturas mais adaptadas são selecionadas com mais freqüência do que as menos adaptadas.

As estruturas selecionadas podem ser então reproduzidas de várias maneiras: a reprodução pode ser feita com simples cópias individuais (clonagem), isto é, estruturas selecionadas são copiadas na nova população (elitismo); ou com associações a outras estruturas (cruzamento). Nessas associações, duas estruturas selecionadas são combinadas para geração de novos indivíduos.

Um processo de mutação sobre os novos indivíduos altera a formação de suas estruturas. O objetivo da mutação é manter variedade na nova população. Este processo, chamado de reprodução, é repetido até que um conjunto de soluções satisfatórias seja encontrado.

A lógica de um algoritmo evolutivo está ilustrada na Figura 2 que segue.

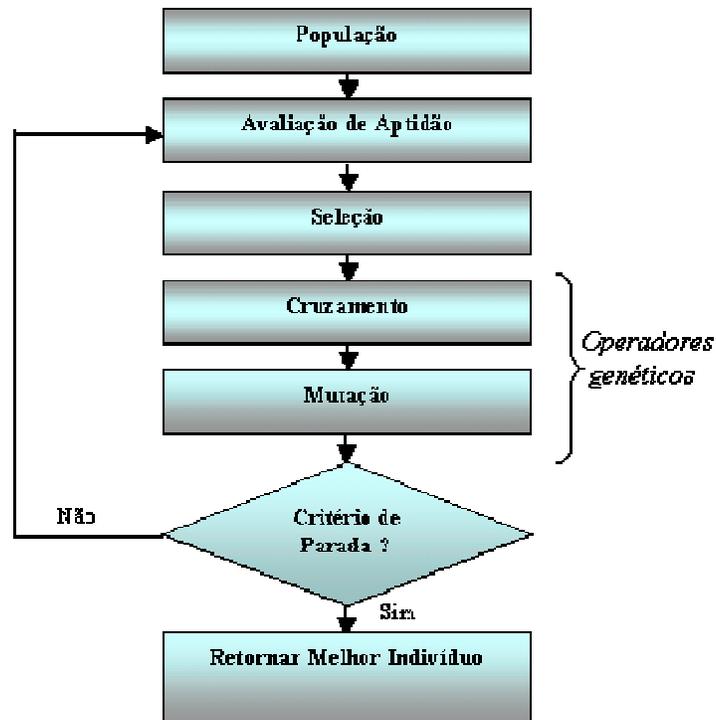


Figura 2 - Estrutura da lógica de um AG

Embora possam parecer simplistas do ponto de vista biológico, esses algoritmos são suficientemente complexos para fornecer mecanismos poderosos e robustos de busca adaptativa [33] e [29].

Algumas considerações sobre a rotina que caracteriza os AGs:

- A população inicial pode ser gerada tanto aleatoriamente quanto através de um outro método específico para tentar gerar indivíduos com alguma qualidade;
- O processo termina de acordo com um critério de parada que pode ser: atingir um limite de gerações previamente estipulado; encontrar uma

solução de qualidade satisfatória; ou estagnação da população; ou ser atingido uma geração pré-definida;

- O número de indivíduos da população é mantido fixo em todas as gerações;

O tamanho da população afeta o desempenho global e a eficiência dos AGs. Com uma população pequena, o desempenho pode cair, pois deste modo a população fornece uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Uma grande população geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais ao invés de globais. Contudo, para se trabalhar com grandes populações, são necessários maiores recursos computacionais, ou que o algoritmo trabalhe por um período de tempo muito maior.

As principais características que diferenciam os AGs de outros métodos tradicionais, conforme apresentado por Goldberg [29], estão as seguintes:

1. **Parâmetros:** os AGs trabalham com a codificação dos parâmetros e não com os parâmetros propriamente ditos;
2. **Número de soluções:** os AGs trabalham com uma população de indivíduos (representando um conjunto de soluções) e não com um único ponto (representando uma única solução);
3. **Avaliação das soluções:** os AGs utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
4. **Regras:** os AGs utilizam regras probabilísticas e não determinísticas.

Os AGs inovam em relação aos demais métodos de busca, por uma implementação de um mecanismo de seleção de soluções no qual, em curto prazo, os melhores têm maior probabilidade de sobreviver e, conseqüentemente, a longo prazo, maior probabilidade de ter descendência.

### ***3.3 Terminologia dos Algoritmos Genéticos***

Um Algoritmo Genético sofre grande influência da biologia, em suas definições, isso explica muitos termos semelhantes, utilizados por este método.

Assim a terminologia biológica é muito importante para a compreensão desse método. Eis os principais termos, segundo Mitchell [34]:

- **Cromossomo:** segmento do filamento cromático que se destaca por ocasião da divisão celular indireta, constituindo unidades definidas na formação do novo ser. Nos AGs este representa a estrutura de dados que codifica uma solução para um problema, ou seja, um indivíduo no espaço de busca.
- **Gene:** partícula do cromossomo em que se encerram os caracteres hereditários. Nos AGs, é um parâmetro codificado no cromossomo, ou seja, um elemento do vetor que representa o indivíduo.
- **Genótipo:** constituição hereditária de um indivíduo. Nos AGs, representa a informação contida no indivíduo.
- **Fenótipo:** diz-se dos indivíduos de um grupo que apresentam caracteres exteriores iguais, mas que diferem pelo seu genótipo. Nos AGs, representa o objeto, estrutura ou organismo construído a partir das informações do genótipo, ou seja, a decodificação do indivíduo.
- **Fitness:** significa aptidão, o quanto o indivíduo é apto para determinado ambiente.

Uma melhor compreensão dos termos apresentados é alcançada quando se relaciona a linguagem natural e artificial.

Na linguagem natural, todo organismo possui um número constante de cromossomos, os quais são divididos em genes que codificam uma determinada proteína. Ocorrendo na reprodução o cruzamento de informações genéticas.

A linguagem artificial diz que, o cromossomo se refere a uma possível solução, onde os genes são representados por bits que representam um parâmetro da solução. Aqui, o cruzamento consiste na troca de informações entre soluções no espaço de busca.

Para ilustrar, temos na Figura 3 abaixo, a representação de um cromossomo qualquer, denotando através de um bit, o gene assinalado.

Exemplificando:

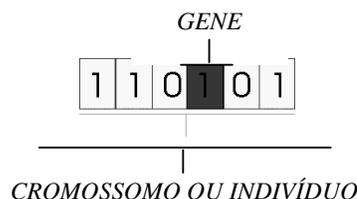


Figura 3 – Representação de um cromossomo ou indivíduo qualquer

### **3.4 Representação dos AGs**

Quando se trabalha com Algoritmos Genéticos para resolução de problemas, o grande desafio está exatamente na codificação, ou qual a melhor maneira de representar o problema, que deve ter uma estrutura de dados, geralmente vetores ou cadeias de valores binários (estruturas mais tradicionais, porém nem sempre as mais indicadas), reais ou inteiros.

A maneira como as soluções são representadas é de fundamental importância para o sucesso dos algoritmos evolutivos, sendo um dos fatores mais importantes no seu desenvolvimento e posterior desempenho. A forma de representação pode variar de muitas maneiras e basicamente depende da natureza do problema tratado.

Ao optar por uma representação é necessário avaliar características como as apresentadas por Koza [30]:

1. completude: determina se é possível representar todos os fenótipos possíveis, ou seja, verificar se todas as soluções podem ser decodificadas;
2. coerência: indica se a partir do esquema de representação é possível gerar um genótipo que codifique um fenótipo não pertencente ao espectro de soluções do problema;
3. simplicidade: representa o grau de complexidade dos atos de codificação e decodificação das soluções;
4. localidade: pequenas alterações no genótipo acarretam pequenas alterações em seu fenótipo correspondente.

#### **3.4.1 Representação Binária**

A representação binária ou representação tradicional é de fácil utilização e manipulação, como também é simples a sua análise teórica. Contudo, vale esclarecer que se um problema apresenta parâmetros contínuos e há a necessidade de se trabalhar com uma alta precisão numérica, será necessário armazenar cromossomos longos na memória.

Tradicionalmente, os indivíduos são representados genotipicamente por vetores binários, onde cada elemento de um vetor denota a presença (1) ou ausência (0) de uma determinada característica: o seu genótipo. Entretanto, esta representação

não é universalmente aceita na literatura. Alguns pesquisadores indicam que a representação de pontos flutuantes (representação real) apresenta melhor desempenho em relação à representação binária para aplicações que necessitam de tratamento de valores reais, pois apresenta maior compatibilidade, precisão e rapidez de execução.

### ***3.4.2 Representação Real***

Na representação real o cromossomo é um vetor de números com representação de ponto flutuante. Como característica temos que a representação real gera cromossomos menores e é compreendida naturalmente pelo ser humano quando comparada a uma cadeia de bits. Várias pesquisas argumentam sobre qual a melhor representação dentre binária ou real, sendo que muitas destas, apresentam resultados favoráveis a representação real [31]. Assim, tal representação terá maior enfoque, pois será a base de estudo do presente trabalho.

### ***3.4.3 Representação Inteira***

Existem várias formas possíveis de representação inteira para a utilização de algoritmos genéticos. Na representação inteira forma-se uma seqüência de inteiros para a representação do cromossomo. Representações detalhadas dos operadores e como tratar soluções neste tipo de representação podem ser encontrados em [35] e [36], apud [37].

## ***3.5 Avaliação dos Indivíduos***

A formulação de uma função que associe as estruturas da população a valores numéricos que são usados para avaliar sua adaptação é feita de acordo com as características de cada problema abordado.

Nesta etapa cada indivíduo da população sofre um processo de avaliação, visando retornar seu grau de aptidão, ou seja, o quanto cada indivíduo é apto para determinadas condições.

A função de avaliação também é chamada de função objetivo ou função de adaptação em um grande número de trabalhos. A formulação das funções é totalmente dependente do problema abordado.

Três equacionamentos para a função de avaliação, foram analisados neste estudo, até chegar àquele que se mostra mais adequado à solucionar o problema de estimação das variáveis desejadas. As equações estarão apresentadas no capítulo que descreve a implementação do algoritmo, juntamente com a formulação de todo problema a ser resolvido.

### ***3.6 Operação de Seleção***

Na etapa de seleção, os indivíduos são escolhidos para posterior processo de reprodução. Neste ponto, fazendo uso do grau de aptidão de cada um, efetua-se um processo onde os mais aptos possuirão uma maior probabilidade de se reproduzirem, embora não exclusivamente, a fim de manter diversidade da população. O grau de aptidão é calculado a partir da aplicação da função de avaliação em cada indivíduo, determinando o quão apto ele está para a reprodução em relação à população a que pertence. Este é o passo mais importante de um AG, pois uma má escolha dos reprodutores pode acarretar resultados indesejáveis.

O critério de seleção faz com que, a cada geração, o conjunto inicial de indivíduos gere indivíduos mais aptos.

Nos trabalhos iniciais com AEs a seleção dos indivíduos para geração da nova população era feita com base na evolução natural, isto é, indivíduos mais bem adaptados possuem maior probabilidade de serem selecionados para se reproduzir. Uma técnica baseada neste princípio é denominada *seleção por roleta* [25], cuja probabilidade de um indivíduo ser selecionado é proporcional ao valor da sua adaptação dividido pela soma da adaptação de todos os indivíduos da população.

Com o passar do tempo, novos mecanismos foram propostos. Na chamada *seleção por torneio* [38], duas ou mais estruturas são escolhidas aleatoriamente na população e, de acordo com certa probabilidade, ou o indivíduo mais adaptado ou o menos adaptado, apenas um deles, será selecionado para reprodução, e ambos podem, eventualmente, ser novamente selecionados.

A idéia principal do operador de seleção em um algoritmo genético é oferecer aos melhores indivíduos da população corrente, preferência para o processo de

reprodução, permitindo que estes indivíduos possam passar suas características às próximas gerações. Esse processo funciona como na natureza, onde os indivíduos altamente adaptados ao seu ambiente possuem naturalmente mais oportunidades para reproduzir do que aqueles indivíduos considerados mais fracos.

Serão comentados de maneira sucinta, os métodos que o presente trabalho faz uso.

### 3.6.1 Método da Roleta

Neste método, indivíduos de uma geração são escolhidos para fazer parte da próxima geração, através de um sorteio de roleta.

Também conhecido como método da *amostragem universal estocástica*, cada indivíduo da população é representado na roleta proporcionalmente ao seu índice de aptidão. Assim, aos indivíduos com alta aptidão é dada uma porção maior da roleta, enquanto aos de aptidão mais baixa é dada uma porção relativamente menor da roleta. Finalmente, a roleta é girada um determinado número de vezes, dependendo do tamanho da população, e são escolhidos, como indivíduos que participarão da próxima geração, aqueles sorteados na roleta. Este método pode ser visualizado na Figura 4.

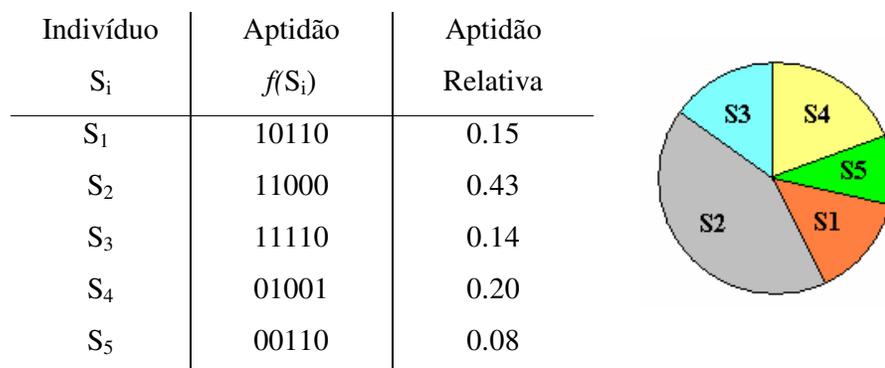


Figura 4 - Representação do Método da Roleta

Evidentemente, os indivíduos cujas regiões possuem maior área terão maior probabilidade de serem selecionados várias vezes. Como consequência, a seleção de indivíduos pode conter várias cópias de um mesmo indivíduo, enquanto outros podem desaparecer.

Como os AGs são estocásticos por excelência, adequadas soluções que, tenham altas aptidões, podem deixar de ser escolhidas para gerar descendência. Uma maneira de reduzir esse efeito é adicionar aos métodos de seleção a idéia de *elitismo*, a qual força os AGs a reter um certo número de “melhores” indivíduos em cada geração. Por esta técnica, as  $n$  melhores soluções de uma geração passarão automaticamente para a próxima, tal idéia será detalhada a seguir.

### 3.6.2 *Elitismo*

O Elitismo previne que os melhores indivíduos não desapareçam da população pela manipulação dos operadores genéticos, sendo automaticamente colocados na próxima geração. Foi primeiramente introduzido por Dejong [39], considerando que, determinados indivíduos podem ser perdidos se não forem selecionados para reprodução ou se forem destruídos por cruzamento ou mutação. Muitos pesquisadores têm encontrado, no elitismo, vantagens significativas para a desempenho da convergência dos AGs.

### 3.6.3 *Método Torneio*

Este método foi proposto por Wetzel [40], e funciona de maneira semelhante a um torneio tradicional. Basicamente ocorre um sorteio de dois indivíduos pertencentes a população e vence o torneio aquele que tiver o maior grau de aptidão. Dessa forma, todos os indivíduos que venceram seus torneios serão selecionados pelo método.

Esse método possui a grande vantagem da não geração de superindivíduos. Em uma outra versão, a seleção por torneio utiliza probabilidades diferenciadas. Se o torneio envolve dois cromossomos, o primeiro ganha o torneio com probabilidade  $q$  (onde  $0,5 < q < 1$ ); e o segundo, com probabilidade  $(1-q)$ . Para um torneio entre  $n$  cromossomos, o primeiro cromossomo ganha o torneio com probabilidade  $q$ , o segundo com probabilidade  $q \cdot (1-q)$ , o terceiro com  $q \cdot (1-q)^2$ , e assim por diante (vale notar que se  $n = N$ , tal seleção é equivalente à seleção com ordenação exponencial).

Baseado na Tabela 2 suponha que os indivíduos sorteados foram 1 e 2. Nesse caso, quem vence o torneio é o indivíduo 2, pois seu grau de aptidão é o maior. Devido a esse fato, este indivíduo é selecionado para cruzamento. No exemplo

ilustrado na Tabela 2, a chance do indivíduo 2 ser selecionado é 1/4, pois se for sorteado, independentemente de quem seja seu rival, ele vencerá o torneio. Se o grau de aptidão fosse 3000 ao invés de 576, as chances de seleção continuariam as mesmas neste método. Já no método da roleta, o intervalo de seleção iria aumentar muito e por isso a chance do indivíduo ser selecionado também iria ser bem maior.

TABELA 2 - Grau de aptidão para o método de seleção por torneio

Indivíduo	F(x)
1	169
2	576
3	64
4	361

Em geral a população inicial contém indivíduos de baixo desempenho e, se por acaso entre estes surgir um superindivíduo, ele obterá várias cópias para a próxima geração. Isto é indesejável, pois pode conduzir o algoritmo a uma convergência prematura. Então, é necessário fazer uso de métodos de escalonamento.

O algoritmo desta pesquisa trabalha com o escalonamento linear da função de avaliação. Está comentado em seguida.

### 3.7 Escalonamento Linear

Existe uma relação linear entre os valores de desempenho real e o escalonado, como é mostrado na equação:

$$f' = a \cdot f + b \quad f : \text{valor do desempenho}$$

$$f' : \text{valor escalonado}$$

$$a, b : \text{constantes}$$

As constantes a e b são escolhidas de modo que a reta passe pelos pontos

$$(f'_{med} \cdot f_{med}) \text{ e } (f'_{max} \cdot f_{max}).$$

Os parâmetros  $f_{med}$  e  $f_{max}$  são respectivamente os valores de desempenho médio e máximo da população e os pares correspondentes, são seus valores escalonados.

Para garantir que os indivíduos com desempenho próximo da média consigam manter uma cópia para a próxima geração faz-se  $f'_{med} = f_{med}$ .

Para controlar o número de cópias esperada do indivíduo de melhor performance, faz-se  $f'_{max} = C_{max} \cdot f'_{med}$ , onde  $C_{max}$  é o número máximo de cópias esperada do melhor indivíduo [43].

### **3.8 Operadores dos AG's**

Os operadores genéticos são os responsáveis pela evolução da qualidade das soluções durante a execução do AG [29] e [30]. São necessários para que a população se diversifique e mantenha a característica da adaptação adquirida pelas gerações anteriores, estendendo a busca até chegar a um resultado satisfatório. Os operadores serão detalhados nas sessões que seguem.

#### **3.8.1 Cruzamento ("Crossover")**

O *crossover* é a operação que realiza a troca genética entre os cromossomos, ou seja, aquela que irá combinar os genes dos indivíduos selecionados na etapa anterior (seleção) para gerar dois novos indivíduos, permitindo que as próximas gerações gerem essas características. O operador de cruzamento é o principal operador dos AGs. Este é considerado o operador genético predominante, por isso é aplicado com certa probabilidade dada por uma taxa de cruzamento ( $0.6 \leq P_c \leq 0.99$ ), sendo maior que a taxa de mutação. Quanto maior for essa taxa, rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Sendo muito alta, estruturas com boas aptidões poderão ser retiradas mais rapidamente que a capacidade da seleção em criar melhores estruturas. Se a taxa for muito baixa, a busca pode estagnar.

Existem vários tipos de operadores de cruzamento, o qual determina a forma como se procederá a troca de segmentos de informação entre os “casais” de cromossomos selecionados para a reprodução.

Dentre os tipos de operadores foi utilizado o operador média aritmética real, um operador que realiza um tipo de combinação linear entre os cromossomos pais.

Dado dois cromossomos  $pai_1$  e  $pai_2$ , é produzido um cromossomo  $c = \frac{(pai_1 + pai_2)}{2}$ .

### 3.8.2 Mutação

O operador de mutação é responsável pela introdução e manutenção da diversidade genética da população, não ficando restrito aos indivíduos gerados pelo cruzamento genético. Trabalha alterando arbitrariamente um ou mais componentes de uma estrutura escolhida entre a descendência, logo após o cruzamento, fornecendo dessa forma meios para a introdução de novos elementos na população. Assim, a mutação assegura que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca será zero. Este operador é introduzido para prevenir a convergência prematura para ótimos locais, através da amostragem de novos pontos no espaço de busca sendo aplicado segundo uma taxa de mutação.

Os procedimentos de mutação dependem da forma de representação escolhida, explorando as características dos problemas. A mutação opera sobre os indivíduos resultantes do processo de cruzamento com uma probabilidade pré-determinada efetuando algum tipo de alteração em sua estrutura. Geralmente a probabilidade é bem pequena para não fazer do processo uma busca cega. O principal operador de mutação utilizado neste estudo foi mutação uniforme real, onde é sorteado  $n$  pares de genes, e os elementos do par trocam os valores desses genes entre si.

O operador de mutação é aplicado aos indivíduos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação ( $0.001 < P_m < 0.1$ ), geralmente se utiliza uma taxa de mutação pequena, pois é um operador genético secundário. Uma baixa taxa de mutação previne que uma dada posição fique estagnada em sub-regiões do espaço de busca. Com uma taxa muito alta, a busca se torna essencialmente aleatória além, de aumentar muito a possibilidade de que uma boa solução seja destruída.

### ***3.9 Critério de Parada***

São as condições que determinam o fim do processo iterativo. Existem algumas maneiras de terminar o processamento de um AG. Ribeiro [37] cita:

- a) Tempo;
- b) Número de Gerações;
- c) Convergência (95 % dos genes iguais entre os indivíduos).

Adotar o critério de convergência pode ser arriscado em alguns casos. Podem ocorrer situações em que os indivíduos demorem um tempo relativamente grande para convergirem. O tempo pode ser abstrato, pois em um mesmo intervalo de tempo, máquinas diferentes podem realizar diferentes processamentos. O número de gerações, na maioria dos casos é a melhor escolha para terminar o processamento de um AG, pois independe da máquina e torna o critério de término mais realístico.

---

## 4. RELES DIGITAIS MICROPROCESSADOS

Para um melhor entendimento do sistema de proteção, é necessário que se conheçam as características e o princípio de funcionamento dos relés.

O relé é a parte lógica do sistema de proteção, um dispositivo, analógico ou digital, que conectado ao sistema elétrico é responsável pela detecção de condições intoleráveis ou indesejáveis ao sistema elétrico e pela tomada de decisão de abertura ou não dos disjuntores adequados a ele associados, a fim de iniciar o processo de retirada de operação do elemento defeituoso, mantendo com isso a continuidade do fornecimento de energia elétrica e limitando os danos aos equipamentos.

Tecnicamente, o sistema de proteção é composto por um conjunto de relés de diferentes tipos ou não. O presente trabalho atém-se ao conjunto dos relés digitais de frequência para a proposta de implementação do algoritmo genético, o qual baseia-se na supervisão da frequência, através de amostras do sinal advindo do sistema elétrico.

Para a supervisão do valor da frequência apresentado pelo sistema sob determinada condição de operação, utilizam-se relés digitais de frequência, que acionam seus disjuntores de proteção quando detectadas condições de oscilações da rede dentro de patamares inaceitáveis sob o ponto de vista de operação normal do sistema, a Figura 5 demonstra um esquema de ligação de um relé de frequência em uma linha de transmissão, demonstrando sua sensibilidade quanto a variação da frequência do sistema elétrico.

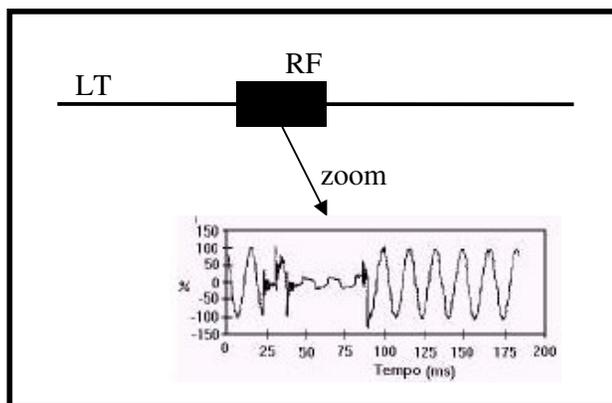


Figura 5 –Relé de Frequência

O relé deve ser capaz de estabelecer monitorar a frequência do sinal que esta sendo transmitido a fim de atuar caso perceba alguma oscilação de frequência que seja prejudicial ao bom funcionamento dos equipamentos agregados a rede elétrica. O Relé de Frequência (RF) atua por meio de rejeição de carga

Dentro destes aspectos, existem algumas características básicas para a aplicação da proteção. Quando uma falta ou qualquer distorção agravante nos parâmetros do sinal é detectada pelo relé, o sistema de proteção envia um sinal de *trip* para os disjuntores, os quais isolarão a menor porção possível do sistema sob falta. Para isto, os relés possuem uma área de operação abrangendo uma parte do sistema definida como zona de proteção do relé.

#### **4.1 A Evolução dos Relés**

Os primeiros relés projetados eram dispositivos eletromecânicos, mais conhecidos como relés convencionais. Este tipo de relé é projetado e construído com predominância dos movimentos mecânicos provenientes dos acoplamentos elétricos e magnéticos do seu núcleo. Seu princípio de operação pode ser resumido como sendo uma relação entre sua entrada, que geralmente são sinais de tensão e corrente, e sua saída, que consiste em estados de *on-off* dos contatos do relé.

Estes relés utilizam forças de atração que são produzidas por acoplamentos eletromagnéticos entre a corrente e o fluxo de sua bobina em seu interior. Alguns

relés têm seu princípio de operação baseado nas forças criadas pela expansão do metal de seus contatos causada pelo aumento de temperatura durante a passagem da corrente. Nos relés eletromecânicos, as forças atuantes são criadas pela combinação dos sinais de entrada e a energia armazenada nas bobinas dos enrolamentos internos do relé. Com a expansão dos sistemas de potência, surgiu a necessidade de sistemas de proteção mais confiáveis e com altos índices de desempenho. Isso foi alcançado com o desenvolvimento de relés utilizando-se dispositivos semicondutores, geralmente referidos como relés de estado sólido ou estático. O termo estático foi originado por oposição aos relés eletromecânicos, já que o relé estático é caracterizado essencialmente pela ausência de movimentos mecânicos, pois são construídos com dispositivos eletrônicos. Os primeiros relés estáticos colocados em operação no sistema elétrico causaram muitos problemas, produzindo operações indevidas. Esses problemas ocorreram principalmente porque eles, sendo eletrônicos, ficaram com sensibilidade muito apurada, e quaisquer transitórios ou pequenos harmônicos comuns ao sistema elétrico de potência já eram suficientes para sua operação.

Todas as características e funções avaliadas nos relés convencionais estão presentes nos relés de estado sólido. Esses dois tipos são constituídos por componentes que necessitam de baixa potência para operarem, porém possuem capacidade limitada na tolerância de temperaturas extremas e umidade. Com o desenvolvimento da tecnologia digital, deu-se início ao desenvolvimento dos relés computadorizados ou digitais. Tal tipo de dispositivo é um relé gerenciado por um microprocessador específico, controlado por um *software*, onde os dados de entrada são digitais. Os princípios de funcionamento dos relés convencionais são uma referência para o seu desenvolvimento, desde que a entrada do relé consista em sinais de tensão, corrente e frequência provenientes do sistema elétrico. Portanto é necessário obter uma representação digital para esses sinais e, usando-se um algoritmo apropriado, a abertura dos disjuntores é conseguida.

Os relés digitais podem efetuar várias funções, tais como:

- proteção;
- supervisão de rede;
- transmissão de sinais;

- conexão com outros computadores;
- auto-supervisão;
- religamento dos disjuntores;
- obtenção de dados para relatórios.

Estes relés são extremamente rápidos em comparação com os seus antecessores, porém são muito susceptíveis a interferências eletromagnéticas, necessitando de filtros. São normalmente modulares e necessitam de fonte de alimentação. A utilização dos relés digitais em substituição aos convencionais (eletromecânicos, estado sólido) oferece algumas vantagens importantes citadas a seguir:

- **Custo:** o custo do relé é a sua principal consideração de aceitação; os primeiros relés computadorizados custavam de 10 a 20 vezes mais que os relés convencionais. Com a evolução dos processadores, esse custo diminuiu e ao mesmo tempo houve um aumento na sua capacidade de processamento. Estima-se hoje que o custo do relé computadorizado, incluindo o custo do *software*, seja equivalente ao custo de um relé convencional.
- **Auto-checagem e confiabilidade:** um relé digital pode ser programado para monitorar seu *software* e *hardware* continuamente aumentando sua confiabilidade, pois ele pode detectar qualquer mau funcionamento e retirar-se de operação, diminuindo, assim as chances de falha de operação. Essa característica do relé digital é o argumento mais forte em favor da digitalização das subestações.
- **Flexibilidade:** os relés conseguem efetuar uma revisão ou modificação em suas características já que estes podem ser programados. Com isso são capazes de executar várias funções como: medição e monitoramento de carga, tomada das tensões em transformadores de linhas de transmissões, controle de abertura e fechamento de disjuntores e chaves. Podem ainda prover proteção de retaguarda para outros dispositivos que venham a falhar. A função do relé só é requerida na ocorrência da detecção de uma condição anormal no sistema, ficando ele, na maior parte do tempo ocioso, podendo executar outras funções praticamente sem um custo adicional.

- **Interação do sistema:** computadores digitais fornecem uma maior interligação entre os componentes do sistema numa subestação. Como medição, comunicação, telemetria e controle, que são funções executadas em ambiente digital.
- **Velocidade de operação:** a redução do tempo de eliminação da falta é resultado da redução do tempo de operação dos relés digitais, reduzindo com isto danos aos equipamentos e aumentando a continuidade do sistema.

#### ***4.2 Relés Digitais de Frequência***

Os relés digitais de frequência são equipamentos providos de detecção apurada de condições anormais de frequência. São planejados com sensores para condições sensíveis a sub-frequência (ou sobre-frequência), caracterizando uma idéia de coordenação de seleção de cargas e sempre preservando a continuidade do serviço do sistema como um todo.

Comercialmente, um relé é definido por um módulo incluindo diferentes estágios de frequência. Cada estágio caracteriza-se por um conjunto para operar tanto sobrefrequência ou subfrequência no sinal. ABB [41].

Um relé digital de frequência normalmente incorpora um sofisticado sistema de supervisão com auto-diagnóstico, buscando o aumento da segurança para a proteção do sistema. O sistema de auto-supervisão, monitora continuamente o seu *hardware* e *software*, juntamente com a supervisão da operação do módulo de provimento auxiliar e tensões geradas do relé.

##### **A) Aplicação**

Estes relés digitais são usados para proteção contra a variação da frequência de geradores de potência e outros equipamentos de corrente alternada. A operação destes relés pode ser baseada no princípio definido pelo tempo, na variação da frequência ou na combinação desses dois parâmetros para definir a atuação do relé. Podem ser usados também para a proteção de motores síncronos onde é usada restauração automática da rede. Os relés isolam os motores do sistema em um evento externo, evitando o não sincronismo da conexão em questão.

### **B) Características comuns de alguns modelos comerciais**

- Relés de sobre e sub frequências com estágios limitados para as frequências;
- Ajustes de blocos de níveis para a tensão;
- Configuração flexível de módulos de entradas para estágios de proteção;
- Alto sistema de confiabilidade devido a continua auto-supervisão;
- Monitoramento de alta precisão;
- Fácil operação (interface homem/máquina);
- Imune a transientes;

### **C) Modelos Comerciais**

Um modelo de relé de frequência está representado na Figura 6, comercializado pela empresa *Schweitzer* [42], com as seguintes funções de proteção:

- 27 - Subtensão;
- 58, 59V1, 59Q e 59N – Sobretensão de fase, seqüência positiva, negativa e de neutro;
- 81 – Sub / sobrefrequência (6 níveis);
- 47 – Fase Reserva;
- 32 – Elemento direcional de potência;
- 25 – Verificação de sincronismo.

O mesmo possui as funções de medição de tensões de fase (VA,VB,VC), de linha (VAB, VBC, VCA) e tensões de seqüência (V1, V2, 3V0), medição de corrente de fase, frequência do sistema, potencia trifásica ativa (kW), reativa (kVA), fator de potencia e indicação se adiantado ou atrasado. Além de funções de controle para 3 entradas e 5 saídas digitais, comando de abrir e fechar disjuntor remotamente, chaves de controle remoto programáveis, o mesmo possui programação através de equações lógicas, dentre outras .



Figura 6 – Relé Digital de Frequência , Fabricante SEL - 547

Um outro modelo é apresentado pela ABB [41], ilustrado na Figura 7. O princípio de operação é comum a qualquer relé de frequência, tendo suas especificações técnicas detalhadas na TABELA 3.



Figura 7 – Relé Digital SPAF 140 C, fabricado por ABB Power T&D Company Inc.

TABELA 3 – Especificações técnicas do relé digital da ABB

Taxa de frequência		30.....65Hz
Quantidade de estágios de frequência		4
Princípios de operação	Definição do tempo de sobrefrequência $f>$	$f>$
	Definição do tempo de sobrefrequência $f<$	$f<$
	Variação de frequência	$\frac{df}{dt}$
Operação dos princípios de $f>$ ou $f<$	Frequência de início	25.....70 Hz
	Alcance de medição	20.....75 Hz
	Tempo de medição da frequência, programável	3.....20 ciclos
	Precisão da operação	$\pm 10m$ Hz
	Tempo de operação (depende da frequência)	0,1.....120 s
	Precisão no tempo de operação	$\pm 1\%$ ou $\pm 30ms$
	Medida de tensão mínima	$0,25 \times V_n$

O presente estudo introduz uma ferramenta alternativa no campo atualmente existente dos relés de frequência, sendo base para futura possibilidade de implementação *online* do método.

---

---

## 5. ALGORITMO GENÉTICO E SUA APLICAÇÃO NA ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA UM RELÉ DE FREQUÊNCIA

Os algoritmos genéticos, por serem uma técnica de heurística bastante nova, diversos e diferentes operadores ainda estão sendo propostos. Para organizar o código do AG proposto, utilizou-se no presente trabalho, de um algoritmo computacional cuidadosamente projetado segundo o paradigma de Programação Orientada por Objetos, permitindo que seu código seja eficiente, altamente estruturado, flexível e de fácil manutenção [43], desenvolvido e implementado pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica, denominado por *GOOAL – Genetic Object Oriented ALgorithm* [44].

O GOOAL é um programa computacional cujo principal objetivo é resolver problemas de otimização utilizando Algoritmos Genéticos. Possui característica modular, o que o torna aplicável a qualquer tipo de problema. Esta modularidade permite desenvolver e agregar ao mesmo distintas e específicas rotinas direcionadas aos mais variados problemas. O usuário deve definir a função principal a ser considerada, a qual deverá conter as principais características do problema a ser solucionado.

A estrutura geral do GOOAL, representada por diagrama de blocos, é mostrada na Figura 8. A classe principal, responsável em colocar as diferentes partes do AG para trabalharem juntas, é a classe TGOOAL. Esta classe faz o encapsulamento dos dados de outras classes, tais como, Tcrossover, Tmutação, Tpopulação, Tescalamento, Tseleção, Testrutura, Tparada, Telitismo, etc.

O nome das classes pretende sugerir suas próprias funções. A classe Tcrossover implementa o operador crossover. Desde que existe várias diferentes

possibilidades deste operador, a classe Tcrossover estabelece qual método do operador crossover pode ser usado: Cross( ) e Nson( ) [44].

A classe que realmente combina os indivíduos são aquelas implementadas como diferente tipo de Tcrossover, usando os mecanismos de herança. Estas classes são TCUniform, TCOnePoint, TCTwoPoint, etc. TCUniform desenvolve o cruzamento uniforme entre dois indivíduos quando o método Cross( ) é executado, TCOnePoint desenvolve o cruzamento de um ponto, na mesma filosofia.

As classes Tchromosome e Testrutura também estabelecem um padrão, mas neste caso eles são focados na estrutura do algoritmo. Testrutura define como os dados serão alocados na memória. Por exemplo, o número de genes de uma representação binária que codifica três variáveis reais dependem da precisão requerida por elas, enquanto que para a representação real, o número de genes é justamente igual ao número de variáveis que se deseja solucionar no problema. Conseqüentemente, diferentes métodos NGene( ) são implementados pelas classes TSBinary, TSReal e TSInteira. Similarmente, a classe Tchromosome tem diferente comportamento dependendo do tipo de representação: binária, real ou inteira.

Outras classes somente desenvolvem funções próprias sem a necessidade de mecanismos especializados. Estas classes são: TPrinter, a qual imprime informações acerca do processo de busca, TElitismo, o qual somente copia o melhor indivíduo de uma geração para a próxima, e TStop, que decide quando a busca termina.

Todas as classes brevemente descritas são iguais qualquer que seja o problema a ser resolvido. O que faz uma aplicação do GOOAL diferir de uma outra é a função avaliação que determina a aptidão de cada cromossomo.



O modelo matemático de uma forma de onda a ser estimada no relé de frequência estudado é descrito conforme a Eq. (5.1):

$$v(t) = V_m \cdot \text{sen}(2 \cdot \Pi \cdot f \cdot t + \Theta) \quad (5.1)$$

Onde:

$V_m$  é o valor máximo de tensão da forma de onda,

$f$  é a frequência do sinal,

$t$  o instante amostrado, e,

$\Theta$  o ângulo de fase.

A Figura 9 ilustra uma forma de onda gerada no *software* Matlab, com frequência de 60 Hz, amplitude de 10 Volts, ângulo de fase  $0^\circ$  e uma frequência de amostragem de 800 Hz. O objetivo inicial do trabalho é, através da variação dos parâmetros que caracterizam a forma de onda, verificar a potencialidade da ferramenta na estimação dos mesmos.

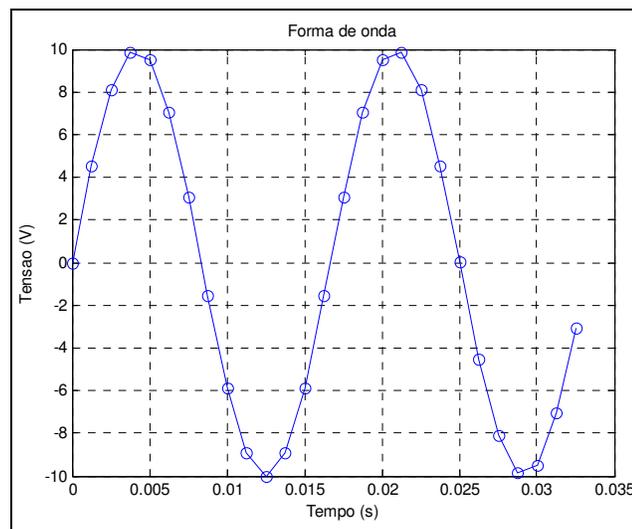


Figura 9 - Forma de Onda 10V – 60 Hz –  $0^\circ$

## 5.2 Configuração do GOOAL

Os dados para a configuração do Algoritmo Genético são passados para o mesmo através de um arquivo texto. Estes contêm informações de como os dados aleatórios serão gerados, indicando que a maneira da seqüência de números é iniciada por meio de uma semente aleatória. Se o número fornecido for positivo +1, o valor indicado será utilizado como semente, indicando que o número inicial da seqüência de números aleatórios será sempre o mesmo. Se o número fornecido for -1, o início da seqüência de números aleatórios dependerá do tempo do computador.

O tipo de algoritmo presta-se a designar a representação dos indivíduos, podendo ser binário, real ou inteiro. Uma vez definido o tipo de indivíduo, definem-se quantos indivíduos vão compor cada geração: o tamanho da população. É também necessário definir quantas variáveis cada indivíduo vai codificar. Com a definição destes dados, a estrutura da população está definida.

Deve-se agora especificar como o processo de evolução será realizado. O primeiro parâmetro é o método de escalonamento, cuja função é aplicar um fator de escala à função objetivo [46].

O método de seleção determina como os indivíduos serão selecionados para gerarem descendentes na próxima geração. O operador de elitismo determina quantos dos melhores indivíduos da geração atual serão diretamente transferidos para a próxima geração, garantindo que as melhores soluções do problema não serão perdidas. Ainda é necessário definir as operações de cruzamento e mutação, conforme teoria apresentada no capítulo 3.

Depois de finalizar a definição do processo de evolução, deve-se especificar o critério de parada. Há quatro critérios que podem ser escolhidos: parada pelo número máximo de gerações, pelo número máximo de gerações sem melhoria, parada porque a função objetivo alcançou um valor preestabelecido, ou parada por tempo de execução. Quaisquer destes critérios podem ser ativados de forma independente, e o programa cessará sua execução quando pelo menos um deles for satisfeito.

Finalmente, o usuário pode definir como os resultados serão relatados. Pode escolher pela impressão das populações inicial e final, com todos os seus indivíduos e com todas as suas informações (valor da função objetivo, valor das variáveis, número de vezes que sofreu mutação e cruzamento, etc). Também podem ser definidas frequências para impressão das populações, para impressão do melhor indivíduo e para impressão do desempenho. Neste caso, entende-se por desempenho os valores mínimos, médios e máximos dos indivíduos de uma geração. E ainda ao final de uma execução, o programa gera um relatório final, resumindo a execução dos testes.

Para o problema específico, a melhor configuração alcançada foi estabelecida segundo intenso estudo de sensibilidade (capítulo 6) do AG e detalhada na TABELA 4 abaixo:

*TABELA 4 – Parâmetros que caracterizam o algoritmo genético*

Representação cromossômica	real
Tamanho da população inicial	30
Número de variáveis	3
Limites mínimo e máximo das variáveis (normalização)	0 e 1
Método de escalonamento	escalonamento linear
Método de seleção	roleta
Operador de elitismo	1
Operador de cruzamento	média aritmética real
Probabilidade de cruzamento	0.9
Operador de mutação	mutação uniforme real
Probabilidade de mutação	0.1

O Algoritmo recebe um arquivo caracterizando o problema a ser solucionado. Para a estimação desejada na pesquisa, são passados ao AG dados de tempo e tensão da forma de onda, também especificações da faixa que limita o espaço de busca para

as variáveis, e a quantidade de amostras do sinal. O arquivo está exemplificado na Figura 10.

A quantidade de pontos a ser amostrado é dependente do valor da taxa amostral que é utilizada na geração da forma de onda, juntamente com a janela de dados a ser utilizada para obtenção dos dados. A Equação (5.2) abaixo mostra como se obtém a quantidade das amostras.

$$N_{\text{pontos}} = \frac{F_{\text{amostragem}}}{F_{\text{rede}}} \times \text{tamanho janela dados} \quad (5.2)$$

*Figura 10 - Arquivo de entrada de dados para o GOOAL*

```
# Nome:
Onda.fou
Primeiro teste para analise de freqüência com o GOOAL
# Constante positiva para evitar overflow:
0.00001
# Valores máximo e mínimo da amplitude:
0.    15.
# Valores máximo e mínimo da freqüência [Hz]:
58.   62.
# Valores máximo e mínimo da angulo de fase [Radiano]
0.0   6.28318530718
# Numero de pontos da onde padrão:
7
# Tempo e respectivo valor da onda:
0.00000    8.66025
0.00125    9.98630
0.00250    9.13545
0.00375    6.29320
0.00500    2.07912
0.00625   -2.58819
0.00750   -6.69131
```

A execução do AG gera um arquivo de saída, um relatório com as impressões desejadas definido pelo usuário no arquivo de configuração do algoritmo é impresso, podendo ser escolhido diante das opções apresentadas na TABELA 6. O programa cria ainda um relatório final e é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Impressão de arquivo de dados

Desempenho.out	contém os valores de aptidão mínima, média e máxima de cada população.
MelhorIndividuo.out	contém o melhor indivíduo de cada geração.
População.out	contém a população de cada geração
PopulacaoInicialFinal.out	contém as populações inicial e final.

TABELA 5 – Relatório final de Saída do GOOAL

```

# Semente aleatória da primeira execução: 1107277702
# Melhor indivíduo da execução 0 encontrado na geração 8967(1 seg.):
# VFO: 27.5483 # Aptidão: 27.5548 (NC=2954;NM=148;Pai=0;Mae=18)
| 0.6652 0.4390 0.0028|
# Melhor indivíduo da execução 1 encontrado na geração 9596(1 seg.):
# VFO: 49.1004 # Aptidão: 122.1698 (NC=5706;NM=324;Pai=12;Mae=12)
| 0.6652 0.4643 0.0014|
# Melhor indivíduo da execução 2 encontrado na geração 9731(1 seg.):
# VFO: 34.2371 # Aptidão: 85.5767 (NC=8657;NM=502;Pai=15;Mae=6)
| 0.6655 0.4495 0.0022|
# Melhor indivíduo da execução 3 encontrado na geração 8663(2 seg.):
# VFO: 26.0042 # Aptidão: 26.0125 (NC=1963;NM=99;Pai=18;Mae=0)
| 0.6639 0.4364 0.0027|
# Melhor indivíduo da execução 4 encontrado na geração 7633(2 seg.):
# VFO: 42.3740 # Aptidão: 105.9192 (NC=2258;NM=138;Pai=2;Mae=17)
| 0.6651 0.4608 0.0017|
# Melhor indivíduo da execução 7 encontrado na geração 9995(2 seg.):
# VFO: 41.3158 # Aptidão: 102.7366 (NC=4297;NM=217;Pai=11;Mae=0)
| 0.6656 0.4582 0.0018|
# Estatística das variáveis:
Variável Minimo Média Máximo Desvio Padrão
0 0.663873 0.665126 0.665647 0.000540
1 0.436425 0.453101 0.464418 0.010089
2 0.001432 0.002047 0.002779 0.000458
# Estatística do valor da VFO:
- Mínimo: 26.004187
- Média: 37.643408
- Máximo: 49.100448
- Desvio Padrão: 7.894650

```

Esse relatório final contém informações sobre o melhor indivíduo encontrado em cada execução, os valores mínimo, médio e máximo de cada gene e da função objetivo, bem como os seus respectivos desvios padrões. Esse arquivo resume todo o processo de otimização e permite que os resultados sejam analisados com relativa facilidade.

Ficou então especificado como se trabalha e obtém a estimação dos parâmetros para qualquer forma de onda utilizando-se do *software* GOOAL. O equacionamento do problema será detalhado na sessão 5.2 que segue.

### **5.3 Caracterização do Problema**

A formulação matemática foi sucintamente apresentada na seção 5.1. Agora descreveremos como o algoritmo genético trabalhara com o problema elétrico a ser resolvido. Como previamente comentado, tem-se um conjunto de (n) amostras cujos valores referem-se à forma de onda do sinal, no caso tensão continua no tempo, dada pela Eq. (5.3):

$$v(t_n) = V_m \sin(2\Pi f t_n + \varphi) + e_n \quad (5.3)$$

Essa formulação em forma de matriz é melhor apresentada pela Eq. (5.4) como:

$$[v] = [f(x)] + [e] \quad (5.4)$$

onde:  $[v]$  é o vetor de tensão  $n \times 1$ ;  $[f(x)]$  é o vetor de informação senoidal  $n \times 1$ ;  $x$  são os parâmetros a serem calculados, que são:  $v$ ,  $f$  e  $\varphi$ ; e  $[e]$  é  $n \times 1$  vetor de erro das medidas desconhecidas.

O presente estudo se propõe a estimar os parâmetros  $x$  ( $v$ ,  $f$  e  $\varphi$ ) e minimizar o vetor de erro  $e$  pela otimização da função de aptidão, utilizando algoritmos genéticos.

Essencialmente, um AG tenta minimizar ou maximizar o valor retornado pela função de aptidão. Neste trabalho a função aptidão é a função da soma dos erros quadráticos.

As equações (5.3) e (5.4) podem ser escritas na seguinte forma, a fim de representar a função aptidão que melhor representa o problema, sendo a função da soma dos erros quadráticos:

$$V_i - F_i(x) = e_i \quad i=1,2,\dots,m \quad (5.5)$$

onde  $i = 1,2,3,\dots,m_{amostras}$ . A variável  $i$  caracteriza os pontos amostrados do sinal a ser estimado. Este varia conforme a taxa amostral utilizada para geração do sinal.

O erro é contabilizado individualmente por amostra do sinal. Cada amostra representa um indivíduo no espaço de busca do algoritmo. Definindo-se então qual é o indivíduo que melhor representa a forma de onda desejada, tem-se a formulação do erro quadrático da função aptidão que melhor caracteriza o problema, sendo esta calculada de acordo com a Eq. (6):

$$F_{soma} = \sum_{i=1}^m e_i^2 \quad (5.6)$$

Seu objetivo é minimizar o erro máximo de estimação ( $e$ ), da equação (5.5), de cada indivíduo. Desta forma cada indivíduo recebe uma nota em relação a sua proximidade com a resposta desejada, sendo selecionados os mais aptos para contribuição nas próximas gerações, através dos processos de reprodução.

Essencialmente, o AG tenta minimizar ou maximizar o valor retornado pela função de aptidão. Desde que o objetivo do AG é maximizar a função objetivo, faz-se necessário mapear a função de erro quadrático ( $F_{soma}$ ) em uma função de minimização (FA) como expressa na Eq. (5.7):

$$FA = \frac{1}{F_{soma} + \Delta} \quad (5.7)$$

onde  $\Delta$  recebe um valor pequeno, igual a 0.00001 nesta aplicação, para evitar o problema de *overflow* que ocorre na situação de  $F_{soma}$  acusar o valor zero.

Nesta pesquisa, os parâmetros  $V_m$ ,  $f$  e  $\varphi$  foram codificados para valores reais situados entre 0 e 1. Além desta representação, cada parâmetro deve respeitar uma determinada faixa de variação. Para o presente estudo foram realizadas simulações com magnitudes caracterizadas por valores entre 2,5 e 12,5 V. Já os limites para a frequência foram de 58 e 62 Hz e, para o ângulo de fase de 0 e 360°. Para se ter o valor estimado pelo algoritmo é necessário decodificar os valores apresentados segundo a Eq. (5.8).

$$\text{ValorEst} = \text{AG\_valorn} * (\text{Max\_Valorn} - \text{Min\_Valorn}) + \text{Min\_valorn} \quad (5.8)$$

nesta,  $n$  representa o parâmetro a ser estimado;  $\text{AG\_valorn}$  é o valor estimado pelo algoritmo genético;  $\text{Max\_valor}$  e  $\text{Min\_valor}$  são os limites de máximo e mínimo respectivamente, respeitando a faixa de valores previamente determinada.

Com esses dados a estrutura da população está definida, visto que, no estudo,  $n$  é igual a três, sendo o seu valor inicial gerado aleatoriamente para a formação da população inicial.

---



---

## 6. RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos da aplicação da técnica de AG, no intuito de testar o algoritmo implementado para estimar os valores de amplitude, frequência e ângulo de fase de uma forma de onda.

Para definir uma característica otimizada do AG é organizado um teste de sensibilidade, onde importantes parâmetros são analisados a fim de garantir a melhor configuração para a convergência da proposta apresentada. A TABELA 8 ilustra os parâmetros analisados, são eles, métodos de seleção, número de indivíduos considerados na população inicial, função de avaliação dos indivíduos. Juntamente com esse estudo na configuração do algoritmo genético, a pesquisa se preocupa em fixar uma taxa amostral e janela de dados adequados ao problema, levando-se em conta a precisão dos resultados e o tempo computacional alcançado.

*TABELA 6 – Parâmetros utilizados para testar o algoritmo proposto*

<b>Parâmetros</b>	<b>Características</b>
População inicial	48,30,24,12 e 6 indivíduos
Método de seleção	Seleção da Roleta Seleção por Torneio, com 2 repetições
Critério de parada (por número de gerações)	10000, 7500, 5000 e 1000

---

---

Função objetivo	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m e_i^2}{m}}$ (opção 1)
	$\sum  e_i $ (opção 2)
	$\sum_{i=1}^m e_i^2$ (opção 3)

---

Tal teste de sensibilidade explora um amplo grupo de dados para obter uma conclusão referente à melhor configuração do problema proposto, onde uma análise foi feita com o intuito de organizar, analisar e interpretar os resultados.

### ***6.1 Resultados Alcançados pela Análise de Sensibilidade***

Os testes são apresentados para diferentes execuções do algoritmo genético, uma vez que foram realizados testes entre 10.000 e 1000 gerações. Esse parâmetro faz com que o algoritmo execute suas funções mais ou menos número de vezes buscando o processo de convergência, a fim de perceber em que faixa se é possível configurar o AG mantendo precisão nas estimativas desejadas.

Os erros estão graficamente indicados de conforme a equação 6.1 abaixo, sendo uma relação entre o sinal real e o sinal estimado pelo algoritmo proposto.

$$erro = \frac{Valor Real - Valor Estimado}{Valor Real} \quad (6.1)$$

#### ***6.1.1 Sensibilidade quanto à taxa de amostragem***

##### **A) Sinal com janela de dados de um ciclo**

Os gráficos ilustrados nas Figuras de 12 a 16 referem-se a um estudo quanto à taxa amostral da forma de onda. Trabalhando com altas taxas de amostragem, tem-se maior quantidade de pontos por ciclo na representação do sinal e o sinal fica melhor

representado digitalmente, visto que o equacionamento do número de pontos da influência dessa taxa fora apresentado na equação 5.2 do capítulo anterior.

Um conversor A/D converte um nível de sinal analógico para uma representação digital. A principal característica desse equipamento é o tamanho do sinal expresso em bits. Quanto maior for o sinal, melhor será a representação digital, comparada com a representação analógica, ou seja, maior é a riqueza de detalhes que o sinal terá para ser representado. Porém o processo torna relativamente mais lento quando se trabalha com altas taxas, além da necessidade de conversores Analógico/Digitais (A/D) mais caros, já que quanto maior a taxa amostral mais caro é o circuito. As Figuras a seguir utilizaram a janela de um ciclo e apresenta a variação da taxa amostral, decrescendo-a de 2400 a 400 Hz.

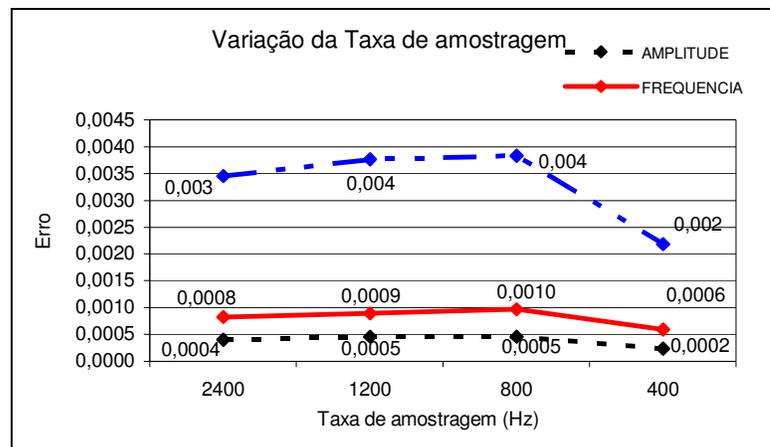


Figura 12 – Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 10000 gerações e 48 indivíduos por população.

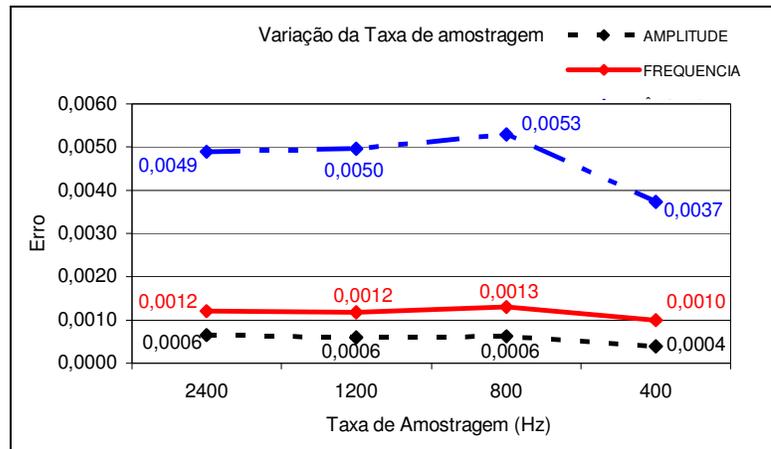


Figura 13 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 7500 gerações e 48 indivíduos por população

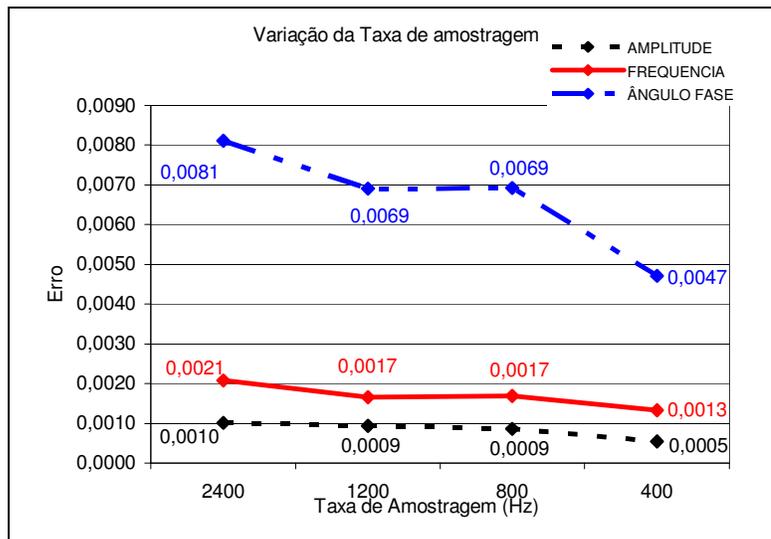


Figura 14 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 5000 gerações e 48 indivíduos por população

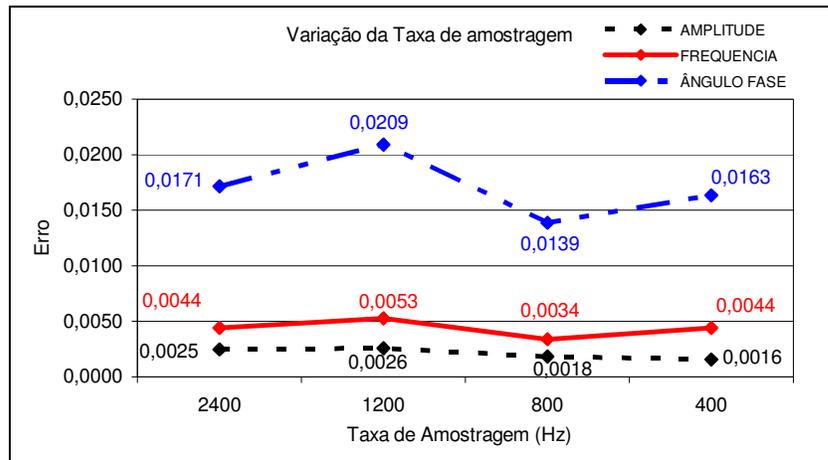


Figura 15 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 2500 gerações e 48 indivíduos por população

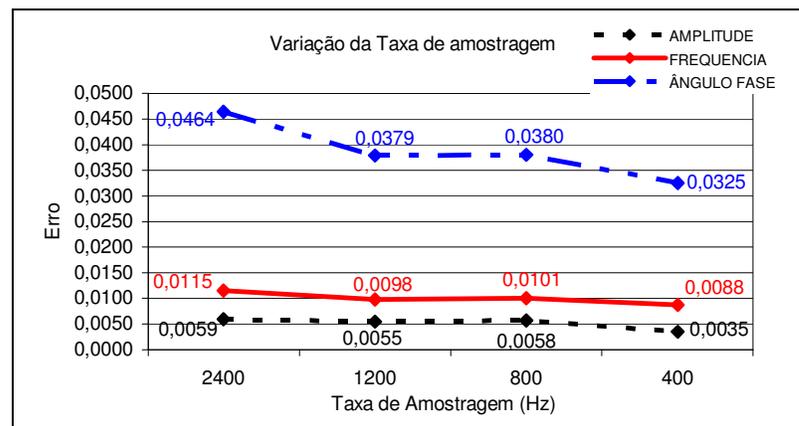


Figura 16 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 1000 gerações e 48 indivíduos por população

## B) Sinal com janela de dados de meio ciclo

Os gráficos ilustrados nas Figuras de 17 a 21 continuam o estudo da variação quanto à taxa amostral agora para uma forma de onda com janela de dados de meio ciclo.

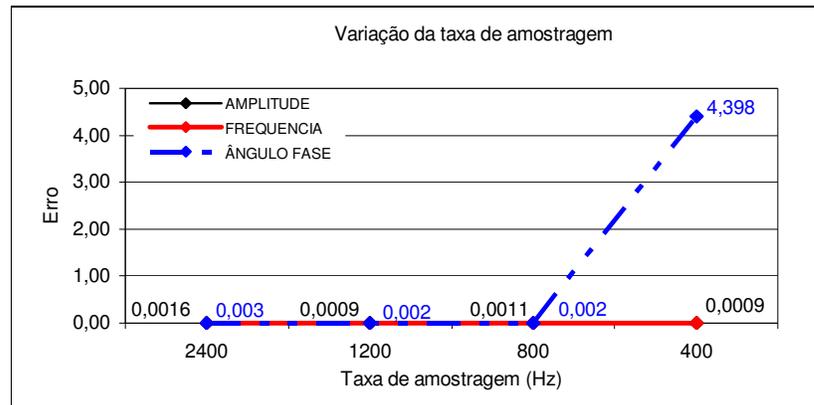


Figura 17 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 10000 gerações e 48 indivíduos por população.

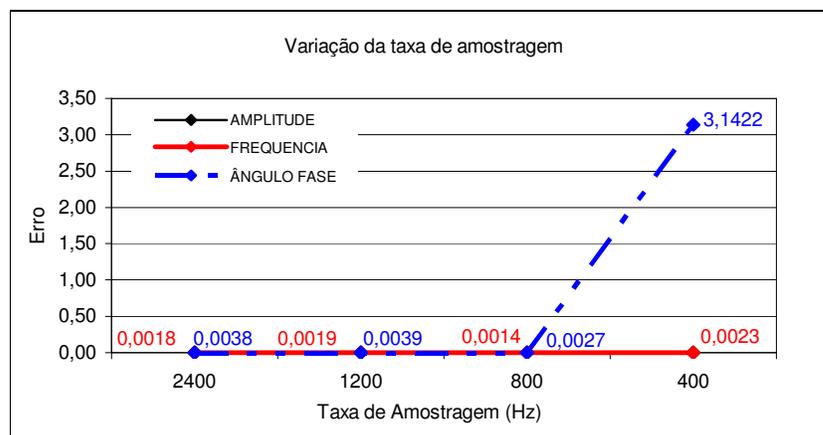


Figura 18 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 7500 gerações e 48 indivíduos por população.

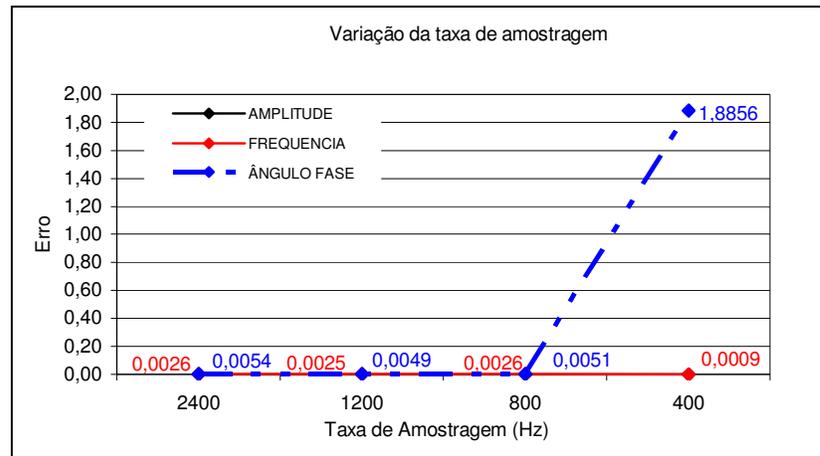


Figura 19 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 5000 gerações e 48 indivíduos por população

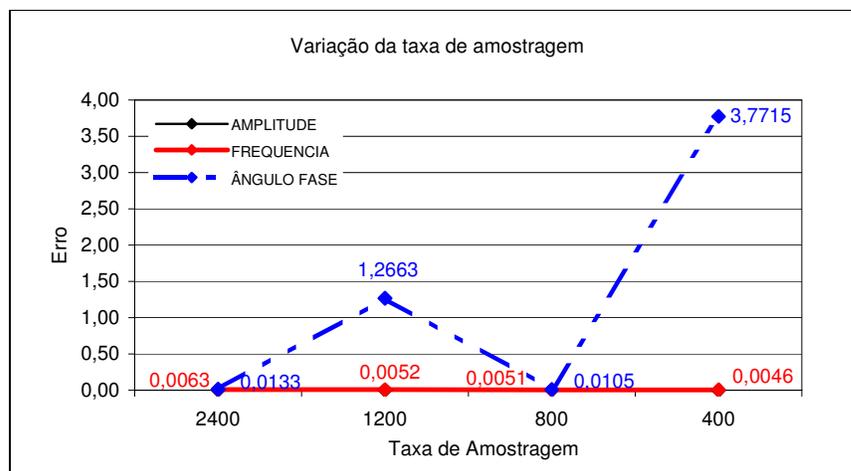


Figura 20 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 2500 gerações e 48 indivíduos por população

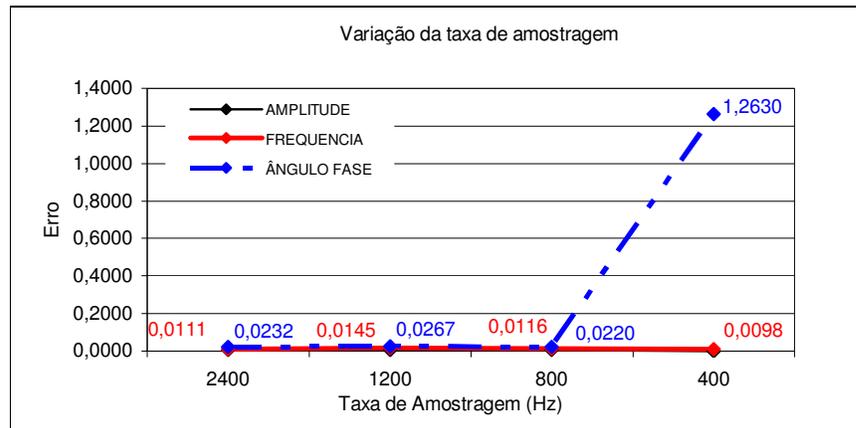


Figura 21 - Gráfico indicativo da variação da taxa amostral. AG configurado com 1000 gerações e 48 indivíduos por população

Dentre os valores obtidos para os erros, os mesmos são mais acentuados quando se decresce a taxa amostral, resultado este esperado, já que para uma taxa de 400 Hz o algoritmo está trabalhando com apenas 6 pontos para uma janela de dados de um ciclo e 3 pontos num janelamento de meio ciclo do sinal. Já para amostragem a 2400 Hz tem-se 40 pontos amostrados no janelamento de um ciclo e são 20 amostras para janela de dados de meio ciclo.

Ainda assim, conclui-se que, mesmo utilizando uma baixa taxa amostral (400 Hz), e janela de dados de  $\frac{1}{2}$  ciclo, o algoritmo apresenta boa precisão nos resultados, com erros percentuais menores que a ordem de 1% para a estimação da frequência, e mantendo estimação adequada para os demais parâmetros.

### 6.1.2 Sensibilidade quanto ao número de indivíduos por população, sinal com janela de dados de um ciclo

Aqui os testes mostram estimação de um sinal 58 Hz com defasagem a  $0^\circ$  e janela de um ciclo. Ainda se leva em consideração a variação da amostragem do sinal para estudar se é possível alcançar boa estimação em caso de manter baixa a amostragem do sinal quando se utiliza de populações com mais indivíduos, a fim de relacionar esses parâmetros.

### A) Taxa de amostragem de 2400 Hz

Os gráficos indicados nas Figuras de 22 a 26 indicam o estudo com taxa amostral de 2400 Hz, variando entre 48 a 6 o número de indivíduos da população genética, bem como o número de gerações.

Como o método é totalmente probabilístico, não se mantém linearidade dos resultados, embora no geral pode se observar um maior erro para populações de menor número de indivíduos, ainda se trabalhando com alta taxa amostral.

Semelhante análise é mostrada para as taxas de 1200, 800 e 400 Hz nos subitens B, C e D seqüentes.

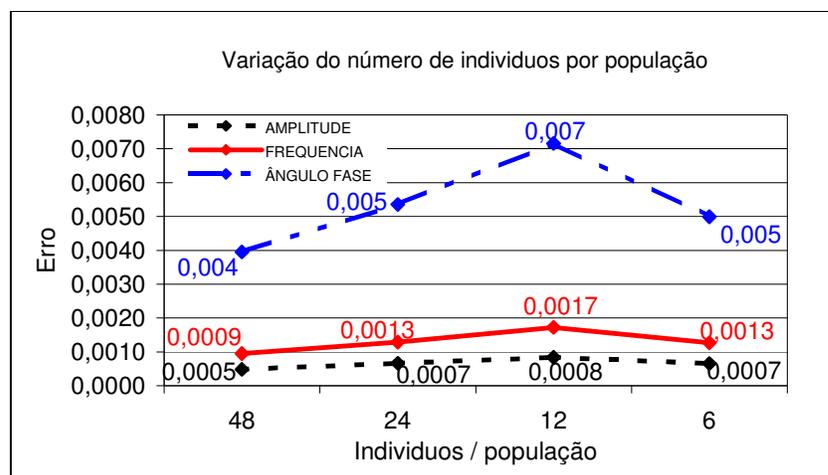


Figura 22 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 2400 Hz

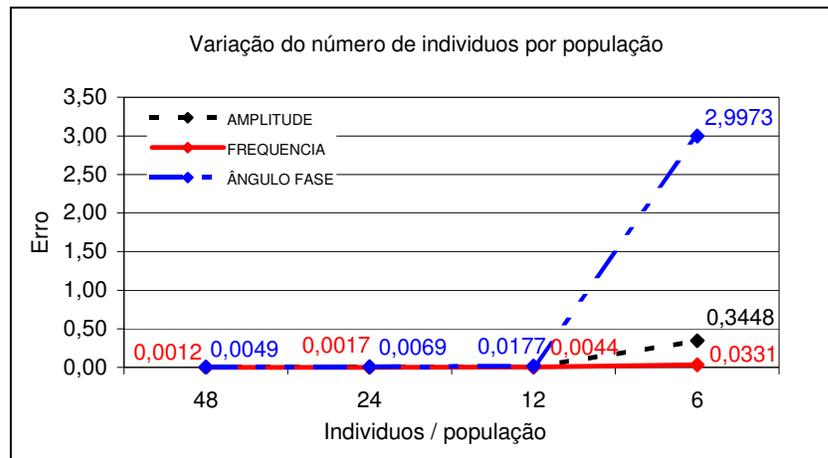


Figura 23 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 2400 Hz

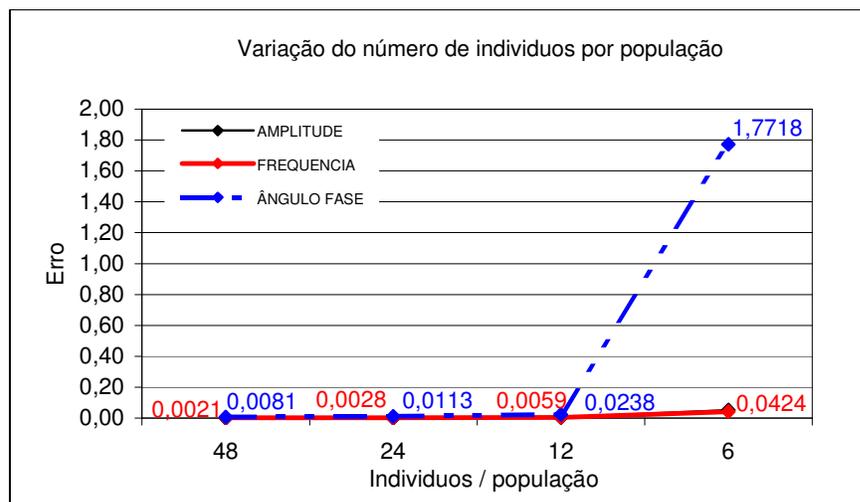


Figura 24 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 2400 Hz

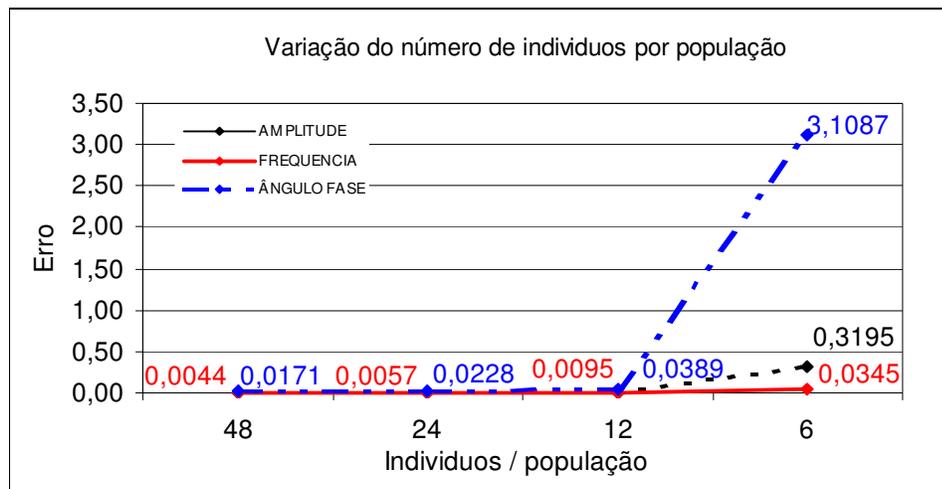


Figura 25 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 2400 Hz

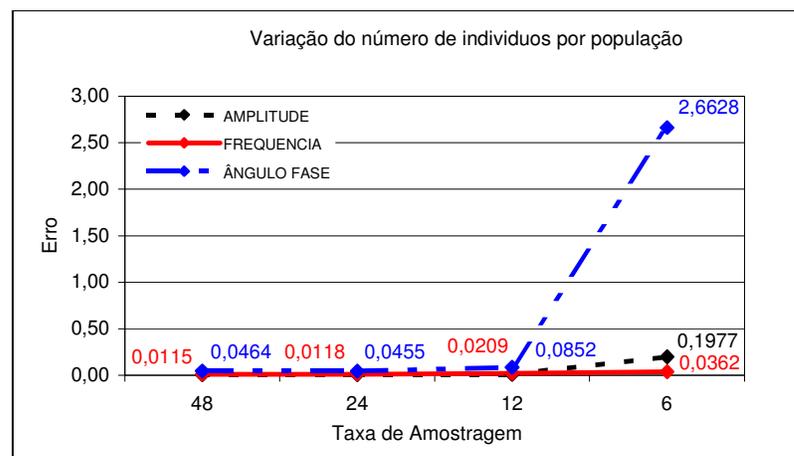


Figura 26 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 2400 Hz

### B) Taxa amostral de 1200 Hz

Com essa taxa amostral, tem-se 20 pontos amostrados por ciclo. Os testes foram realizados representando-se de 48 a 6 indivíduos por população conforme estudo de sensibilidade proposto, indicados nos gráficos das Figuras de 27 a 31.

A estimação dos parâmetros mantém erro semelhante verificados com a taxa de 2400 Hz, sendo mais acentuados para população com 6 indivíduos.

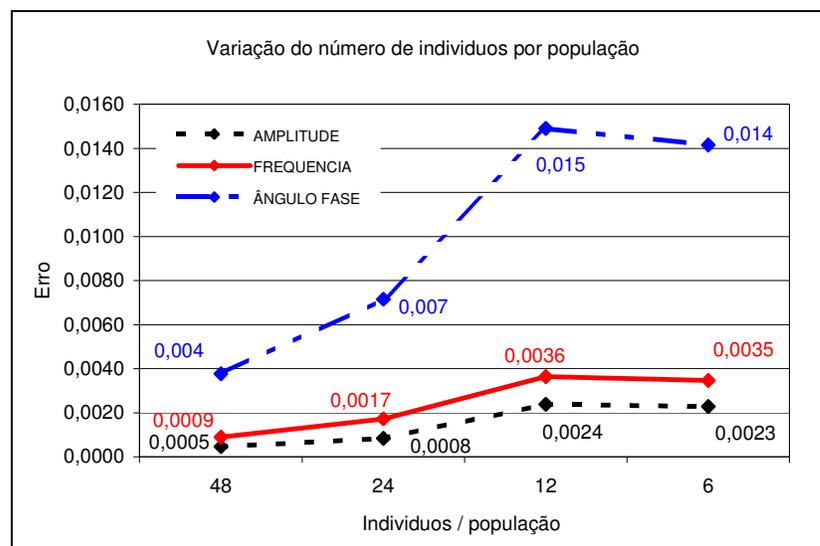


Figura 27 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz

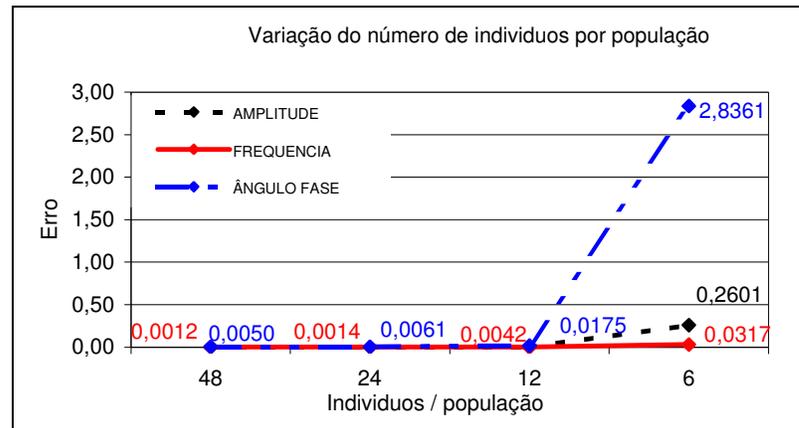


Figura 28 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz

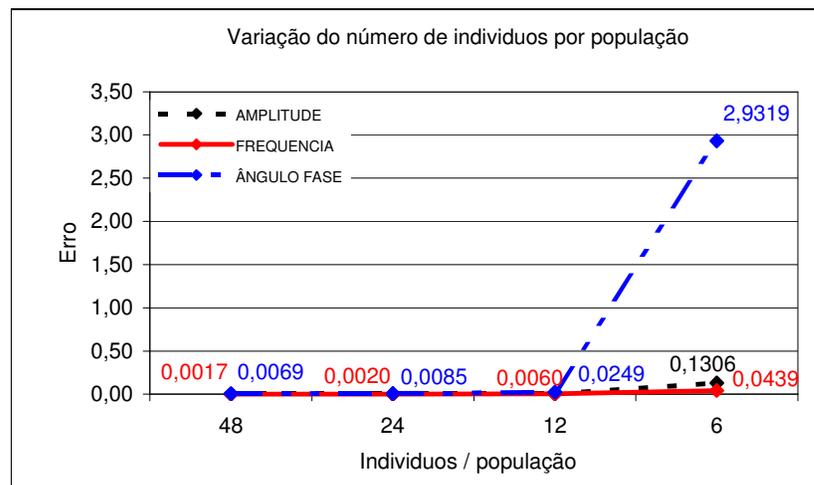


Figura 29 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz

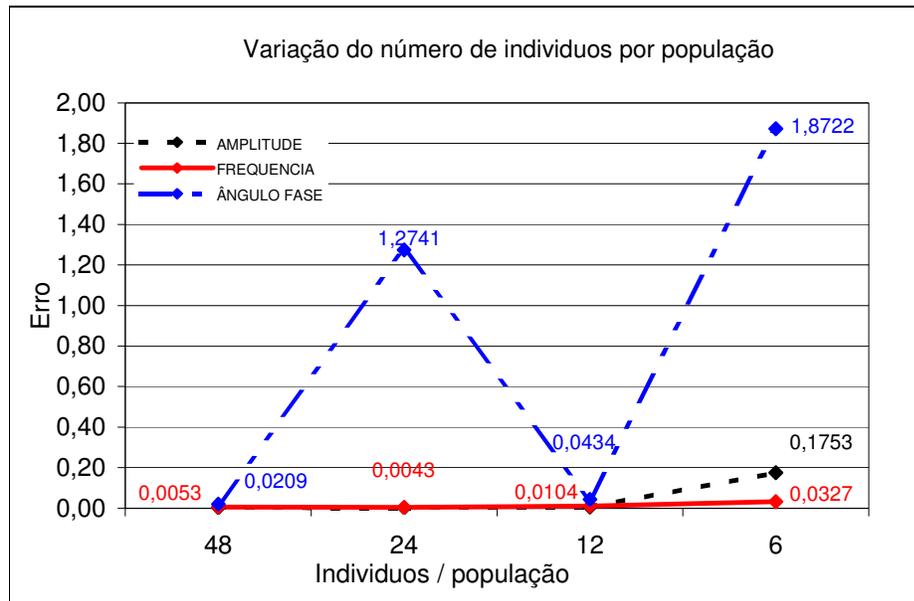


Figura 30 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz

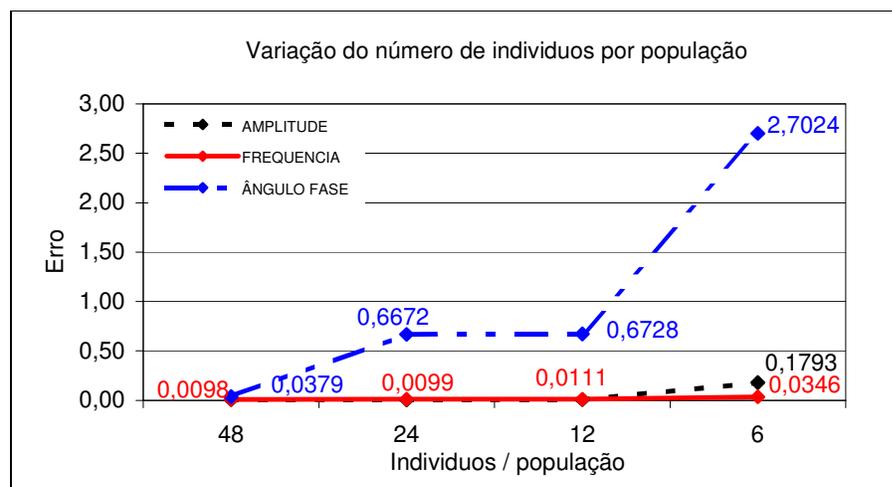


Figura 31 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz

### C) Taxa de amostragem de 800 Hz

O mesmo estudo foi igualmente realizado com a taxa amostral a 800 Hz, agora com 14 pontos amostrados por ciclo. Da mesma forma, foram representados de 48 a 6 indivíduos por população conforme gráficos ilustrados nas Figuras de 32 a 36.

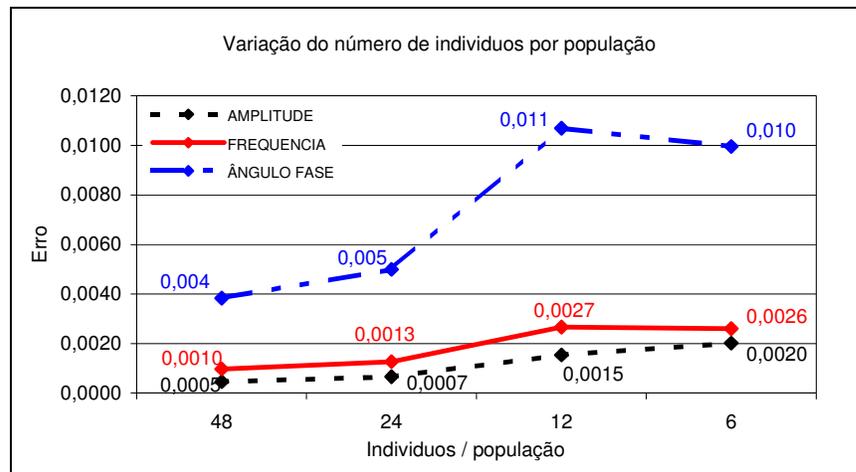


Figura 32 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz.

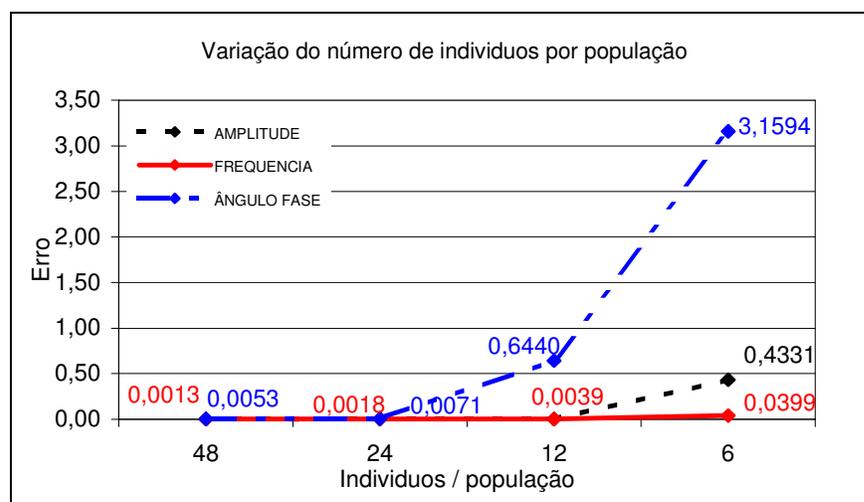


Figura 33 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 800Hz.

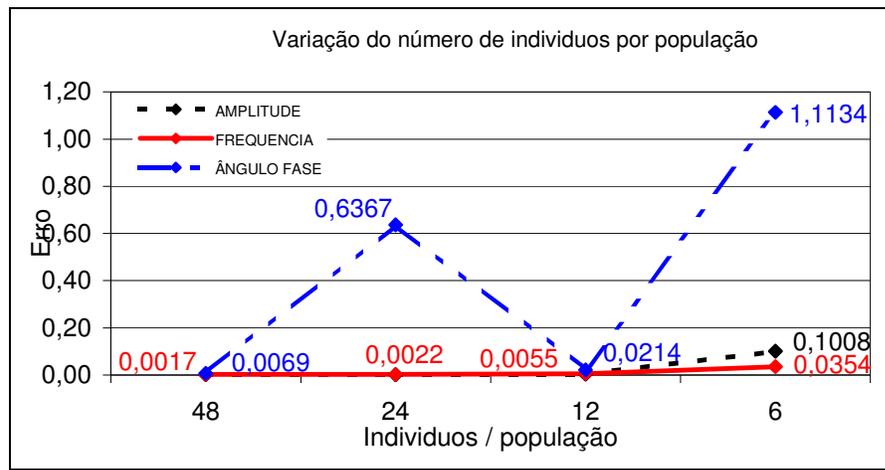


Figura 34 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz

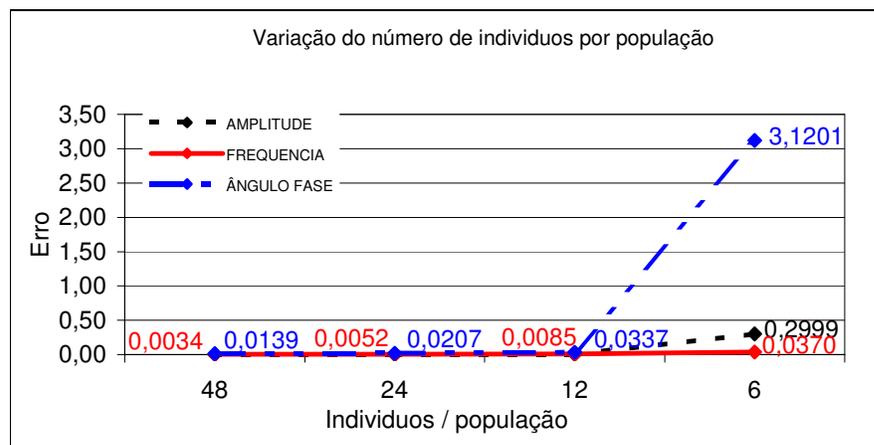


Figura 35 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 800Hz

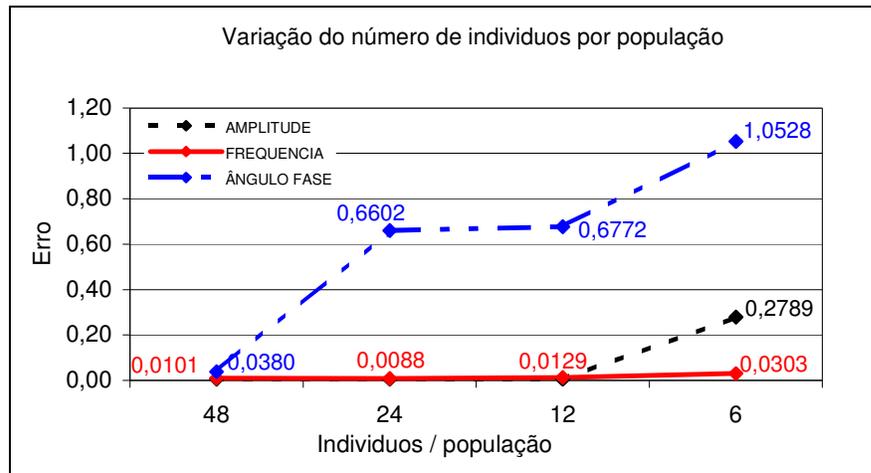


Figura 36 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz

#### D) Taxa de amostragem de 400 Hz

A mesma análise foi igualmente realizada com baixa taxa amostral (400 Hz) agora com 6 pontos amostrados por ciclo. Novamente foram representados de 48 a 6 indivíduos por população conforme gráficos ilustrados nas Figuras de 37 a 41.

A baixa taxa amostral não mostra agravamento na estimação desejada, sendo perfeitamente aceitos os resultados trabalhando-se com o maior número de indivíduos propostos nos estudos.

Apesar de 400 Hz ter apresentado resultados satisfatórios, é desejado se trabalhar com taxas amostrais acima desse nível podendo se ter a diminuição do tamanho da população a ser trabalhada pelo AG, melhorando o desempenho computacional da ferramenta.

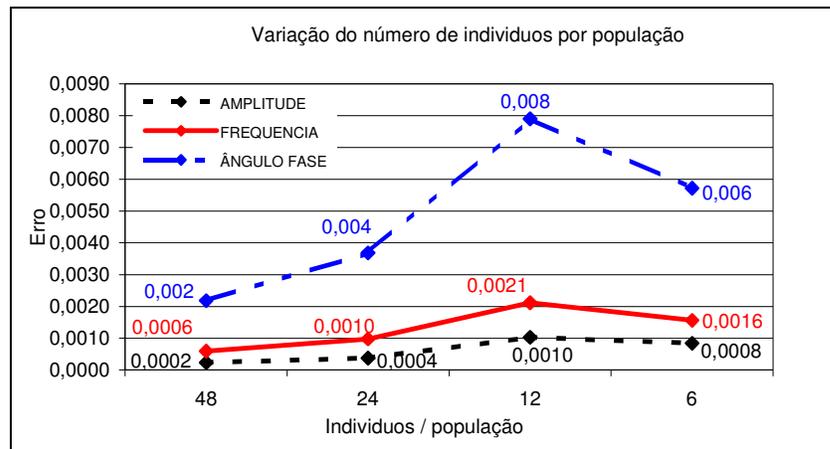


Figura 37 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 400 Hz

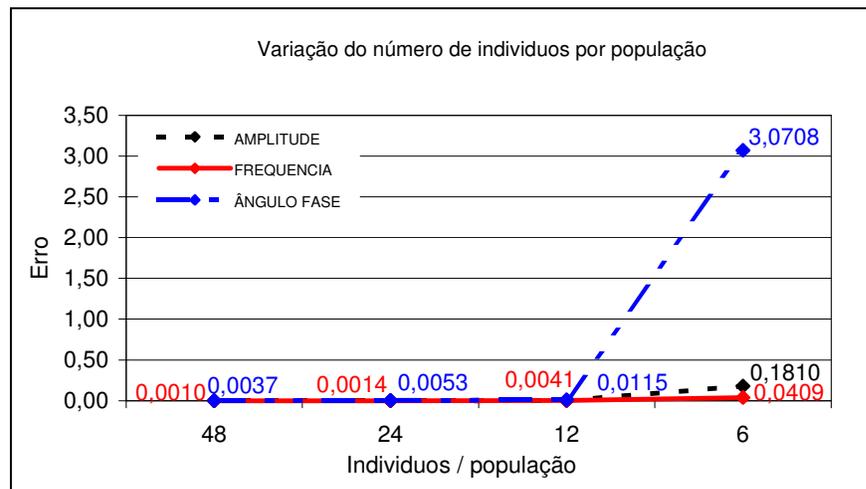


Figura 38 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 400 Hz

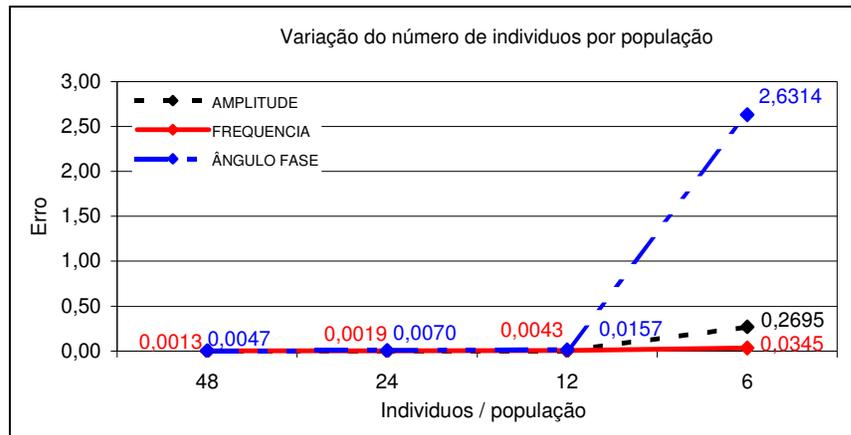


Figura 39 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 400 Hz

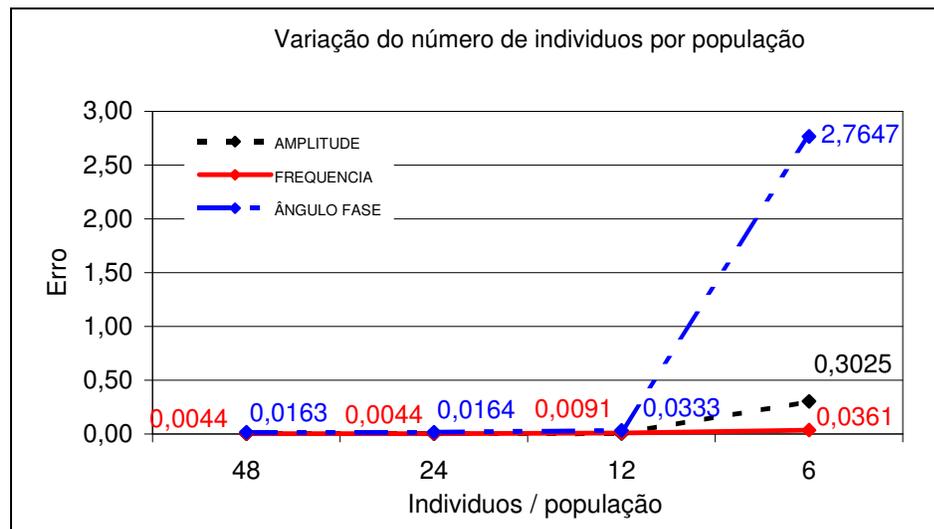


Figura 40 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 400 Hz

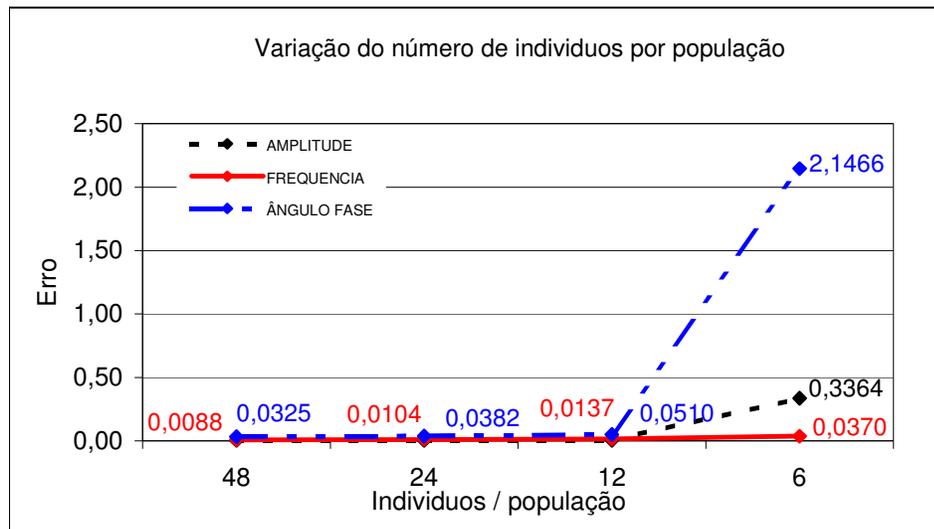


Figura 41 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 400 Hz

### 6.1.3 Sensibilidade quanto ao número de indivíduos por população, sinal com janela de dados de meio ciclo

Os gráficos de 40 a 59 indicam testes realizados com um sinal caracterizado por: 58 Hz, defasagem angular  $0^\circ$  e janela de dados  $\frac{1}{2}$  ciclo, para análise do erro obtido na estimação dos parâmetros pelo algoritmo proposto. Da mesma forma que para os dados mostrados anteriormente para a janela de um ciclo, esta seção leva em consideração a variação da amostragem do sinal.

Os resultados estão agrupados mediante a taxa amostral utilizada, sendo de 2400, 1200 800 e 400Hz.

#### A) Taxa de amostragem de 2400 Hz

Os gráficos indicados nas Figuras de 42 a 46 apontam para o estudo com a taxa amostral de 2400 Hz, variando de 48 a 6 o número de indivíduos da população genética, semelhante à seção apresentada anteriormente.

Da mesma forma, a linearidade dos resultados não é mantida, com uma janela de dados agora menor. Ainda assim, de uma forma geral o maior erro é alcançado

para populações de menor número de indivíduos, mesmo se trabalhando com alta taxa amostral. É na estimação do ângulo de fase que essa característica é melhor observada.

Semelhante análise é mostrada para as taxas de 1200, 800 e 400 Hz nos subitens B, C e D subsequentes.

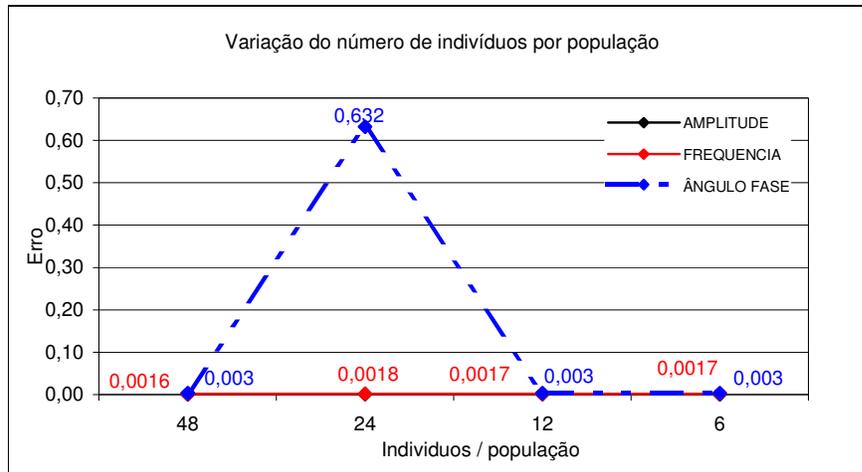


Figura 42 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz

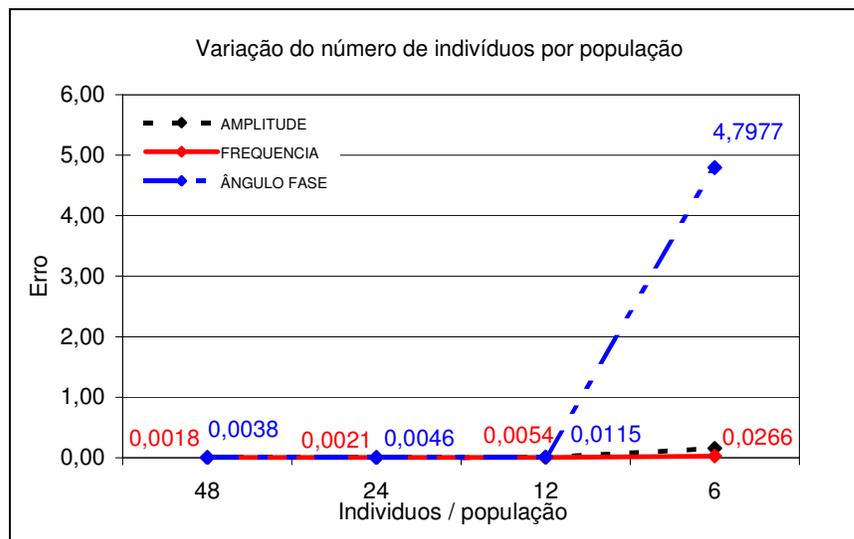


Figura 43 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz

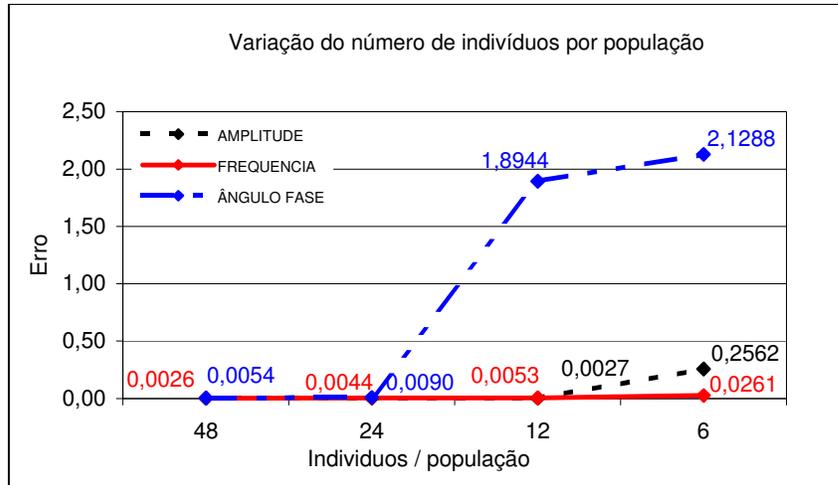


Figura 44 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz

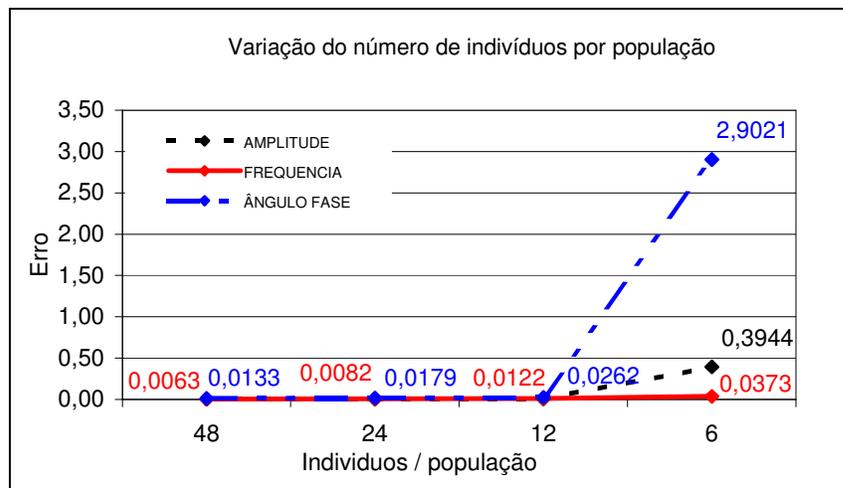


Figura 45 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz

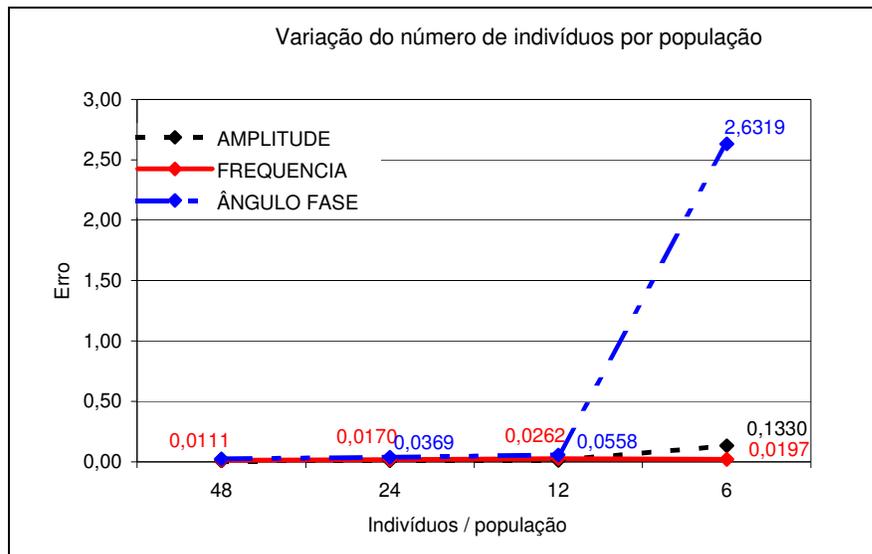


Figura 46 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz

### B) Taxa de amostragem de 1200 Hz

Com essa taxa amostral, tem-se 10 pontos amostrados por ciclo. São representados de 48 a 6 indivíduos por população conforme estudo de sensibilidade proposto, indicados nos gráficos das Figuras de 47 a 51.

A estimação dos parâmetros mantém erro semelhante verificados com a taxa de 2400 Hz, sendo máximos para população com 6 indivíduos.

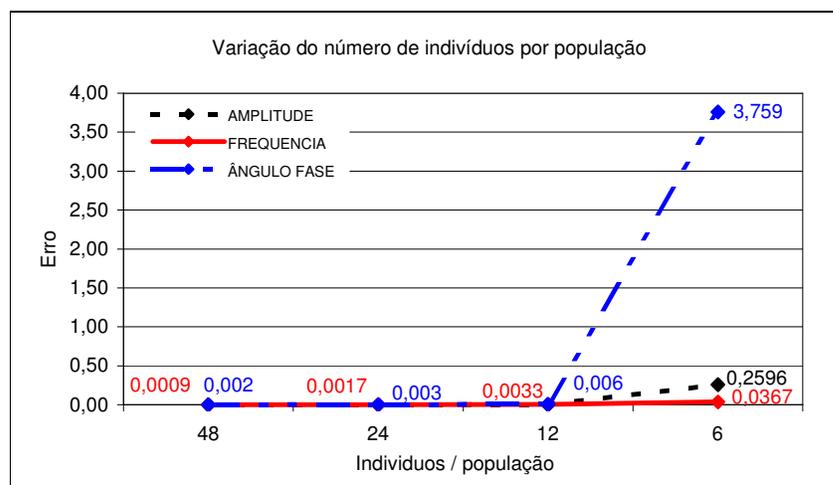


Figura 47 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz

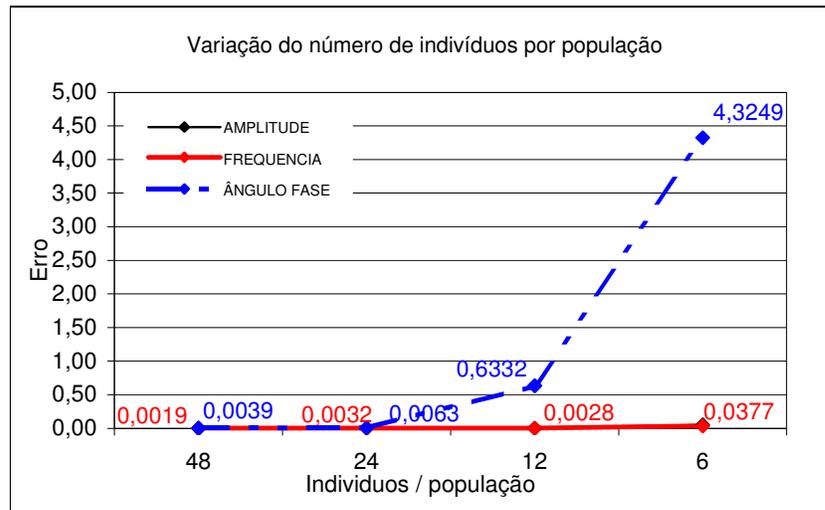


Figura 48 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz

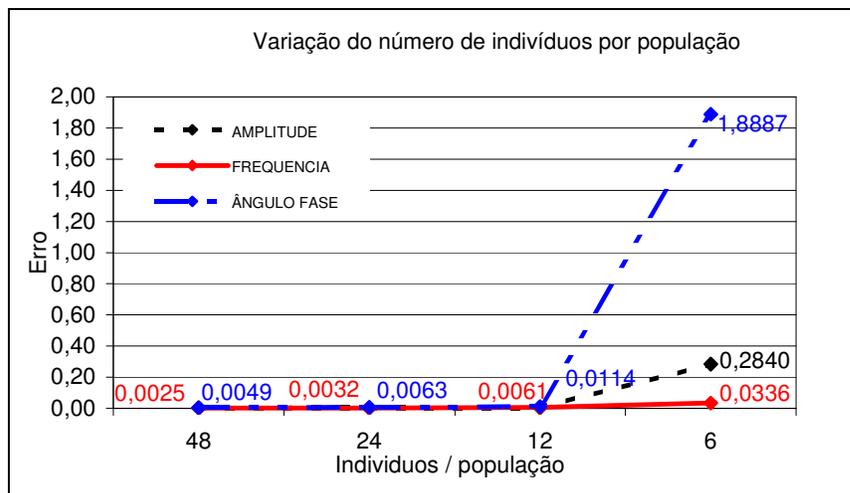


Figura 49 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz

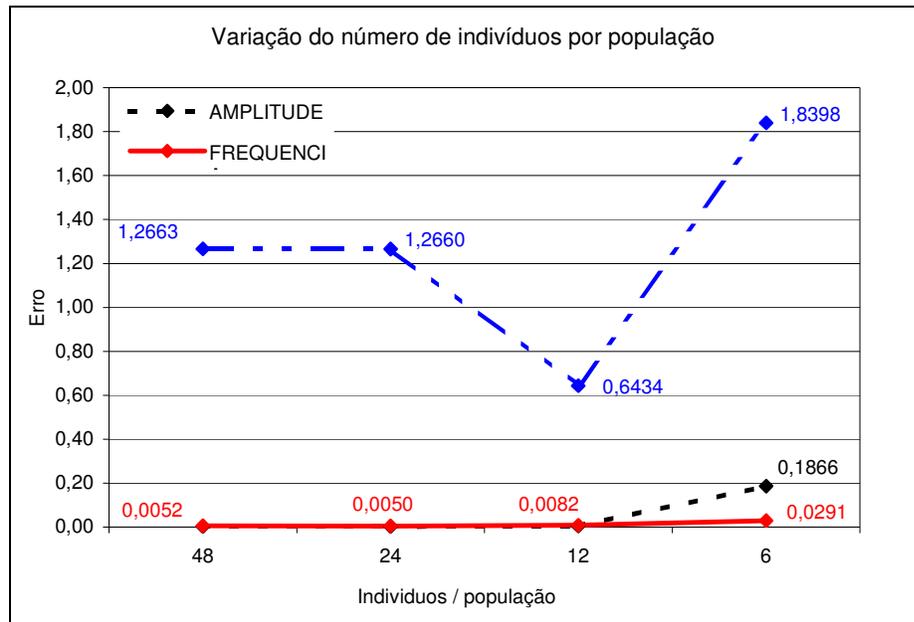


Figura 50 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz

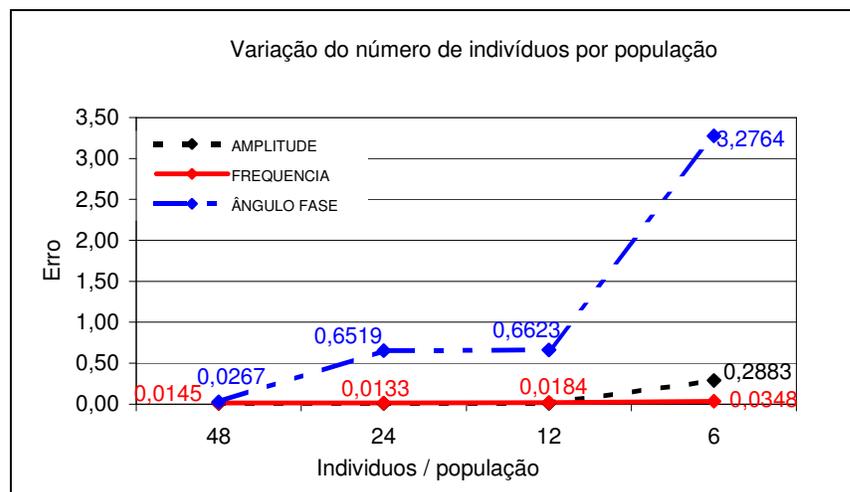


Figura 51 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 1200 Hz

### C) Taxa de amostragem de 800 Hz

Estudo similar foi realizado com a taxa amostral a 800 Hz, agora com 7 pontos amostrados por ciclo. Da mesma forma, são representados de 48 a 6 indivíduos por população conforme gráficos ilustrados nas Figuras de 50 a 54.

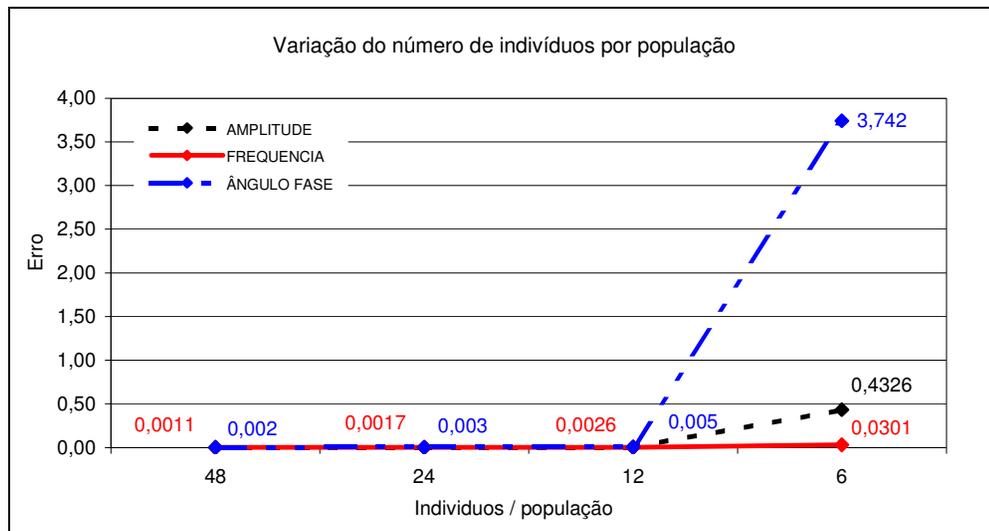


Figura 52 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 800 Hz

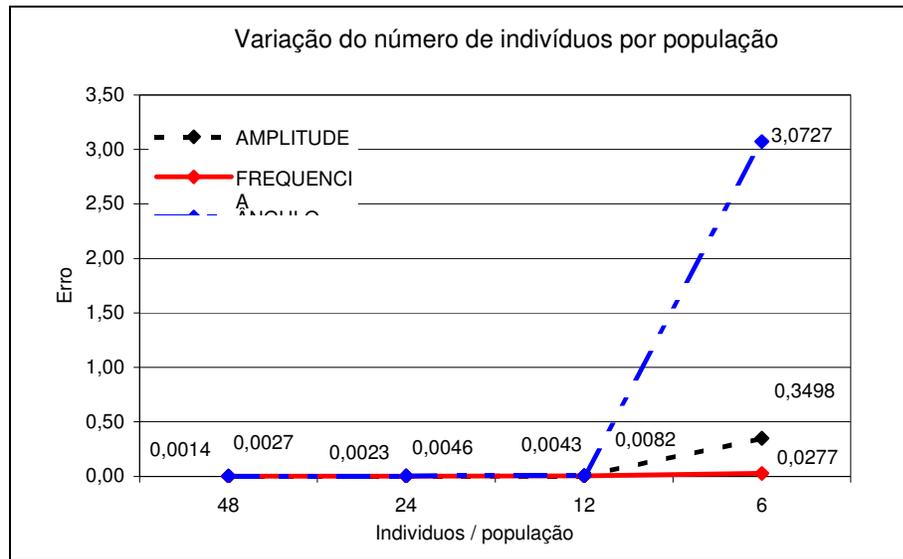


Figura 53 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 800 Hz

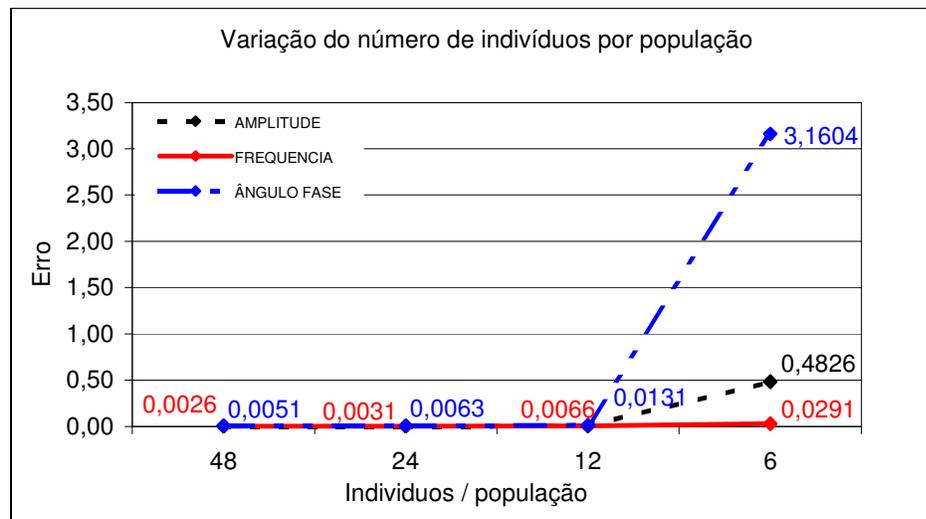


Figura 54 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800 Hz

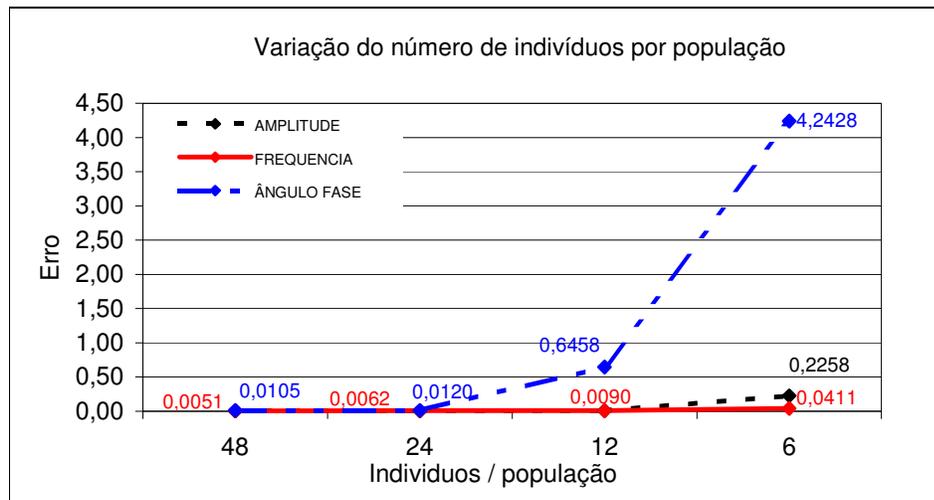


Figura 55 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 800 Hz

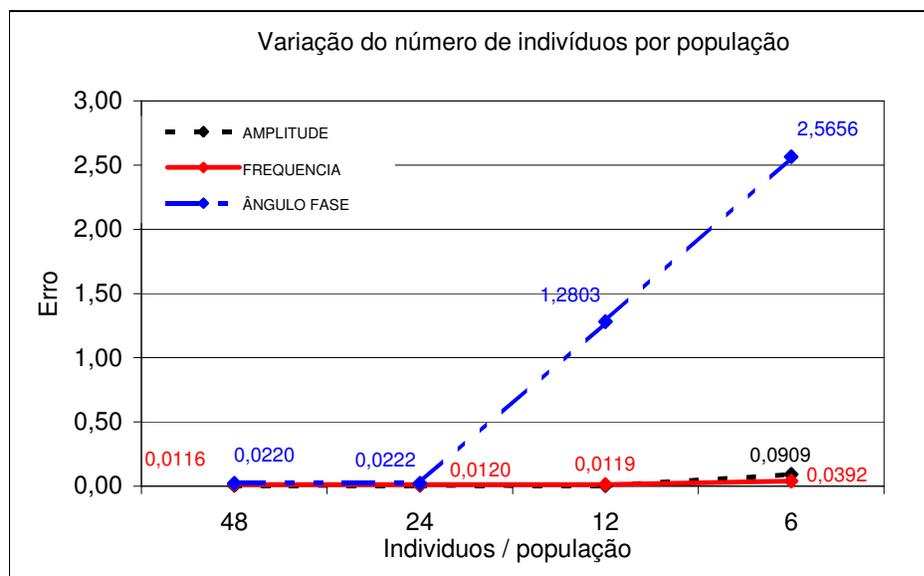


Figura 56 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 800 Hz

#### D) Taxa de amostragem de 400 Hz

Da mesma maneira, é apresentado pelos gráficos ilustrados nas Figuras 55 a 59, os estudos com a taxa amostral a 400 Hz para o janelamento de meio ciclo.

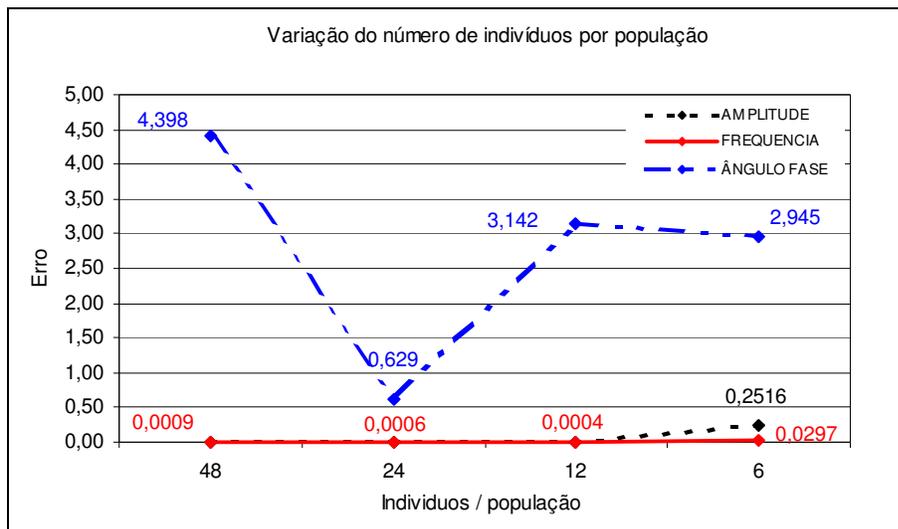


Figura 57 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz.

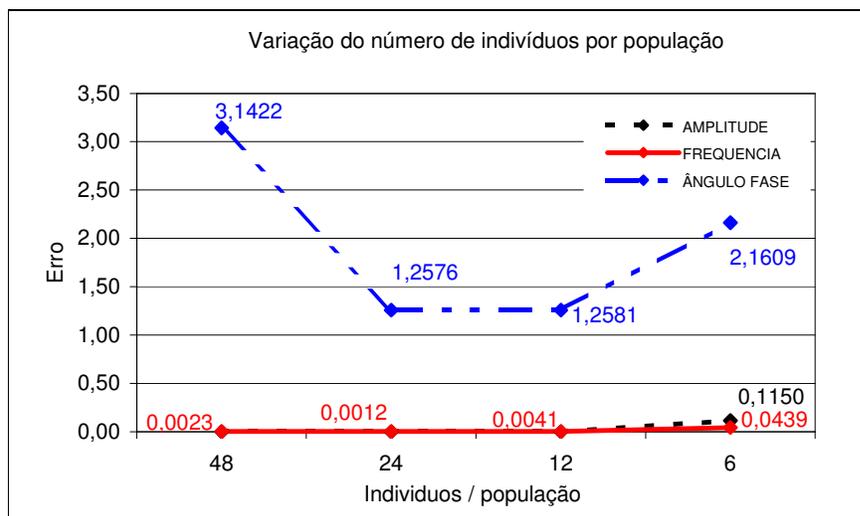


Figura 58 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 400Hz.

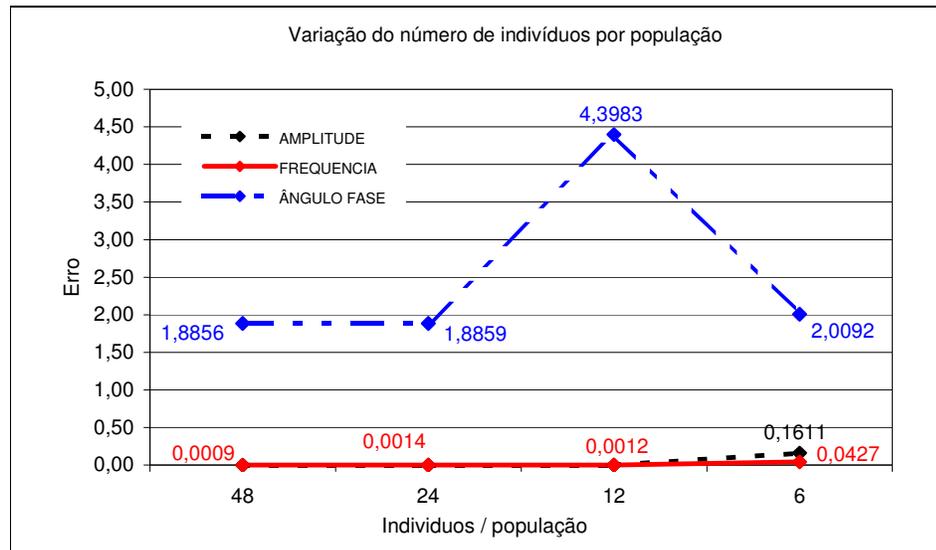


Figura 59 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz

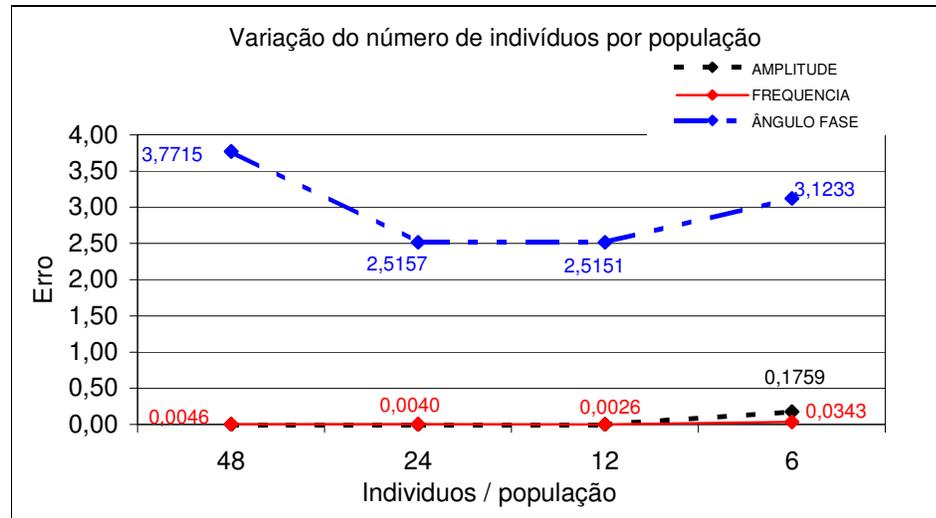


Figura 60 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 400Hz

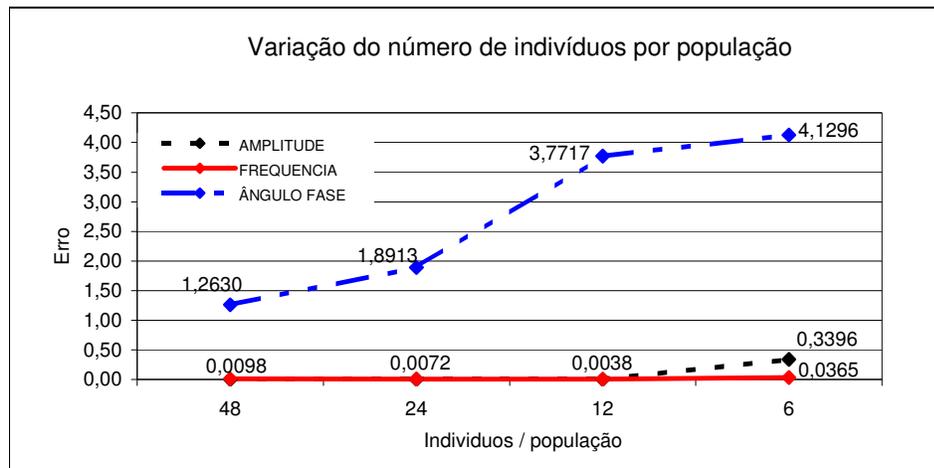


Figura 61 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 400 Hz

Dos resultados anteriores observa-se que a estimação adequada é alcançada com uma taxa amostral de 800 Hz, janela de dados de  $\frac{1}{2}$  ciclo e com população situada na faixa de 48 a 24 indivíduos. A partir desses parâmetros devidamente analisados, outros testes são realizados para a sensibilidade do método de seleção.

Tem-se neste ponto um levantamento inicial dos parâmetros para o algoritmo genético executar com resultados positivos a estimação dos parâmetros desejados, dentro do limite de erro de 1% para as variáveis. Variáveis como taxa amostral e tamanho da população inicial é fator fundamental para se fixar as demais alternativas, como será detalhado na seqüência.

#### 6.1.4 Sensibilidade quanto ao método de seleção

Para refinamento dos resultados, é feita uma comparação entre os métodos Roleta e Torneio. Os testes foram agrupados segundo cada grupamento da taxa amostral do método da roleta realizado anteriormente. Considerando que para cada frequência amostral são realizados testes com 10.000, 7.500, 5.000, 2.500 e 1.000 gerações do AG, o método Torneio é aplicado para os casos em que o algoritmo resulta em erro que ultrapassem 1% do valor real dos parâmetro estimados.

Para os testes, foi usado um sinal com defasagem de  $240^\circ$ , janela de  $\frac{1}{2}$  ciclo e taxa amostral 800 Hz. Outros testes que verificam o método de seleção para as demais taxas de amostragem, 2400, 1200 e 400 encontram-se no apêndice A.

### A) Taxa de amostragem de 800 Hz

Os testes demonstram que o método do Torneio (realizado para dois indivíduos), não apresenta menores erros para a estimação, podendo ser desconsiderado tal alteração, uma vez que o tempo de processamento é maior que para a utilização do método da Roleta.

Os gráficos das Figuras 62 a 71 indicam tais testes, quanto à análise do método de seleção a ser utilizado em todo o processo de reprodução dos algoritmos genéticos.

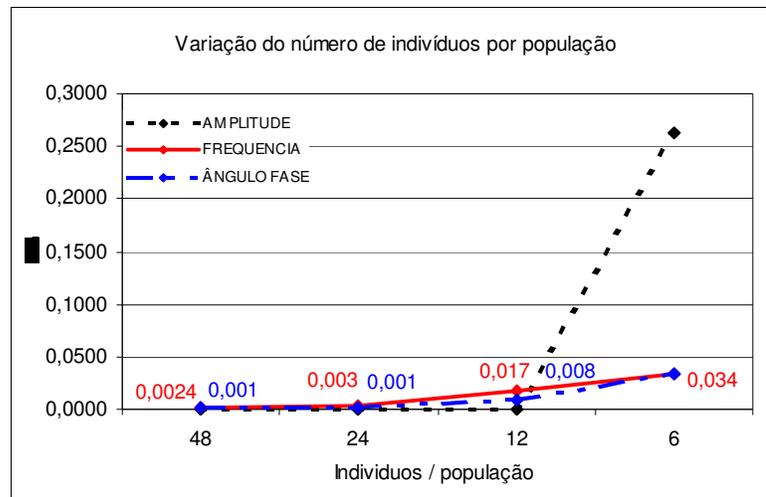


Figura 62 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 800 Hz. Método de seleção Roleta

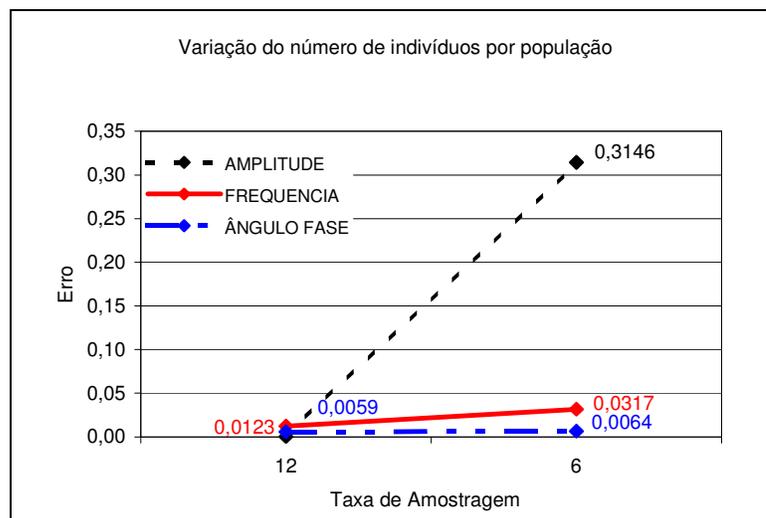


Figura 63 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Torneio

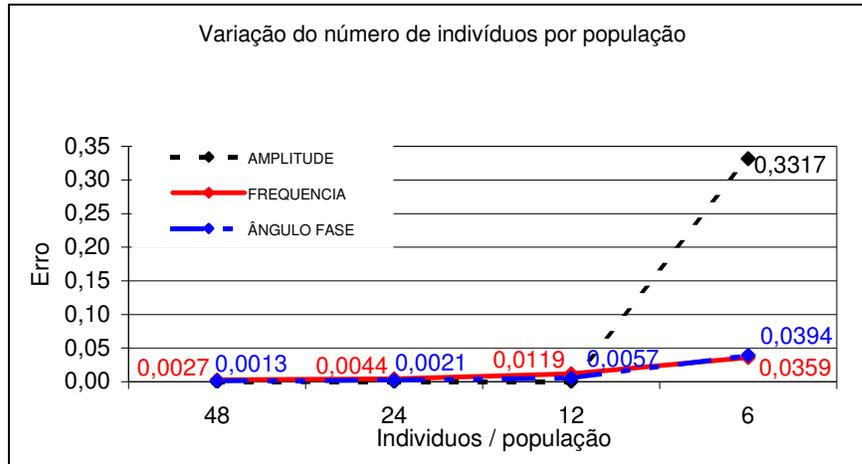


Figura 64 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

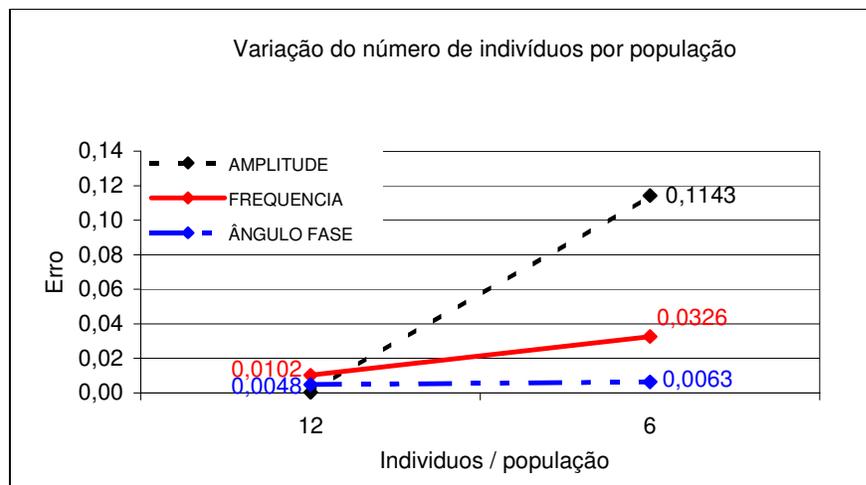


Figura 65 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Toneio

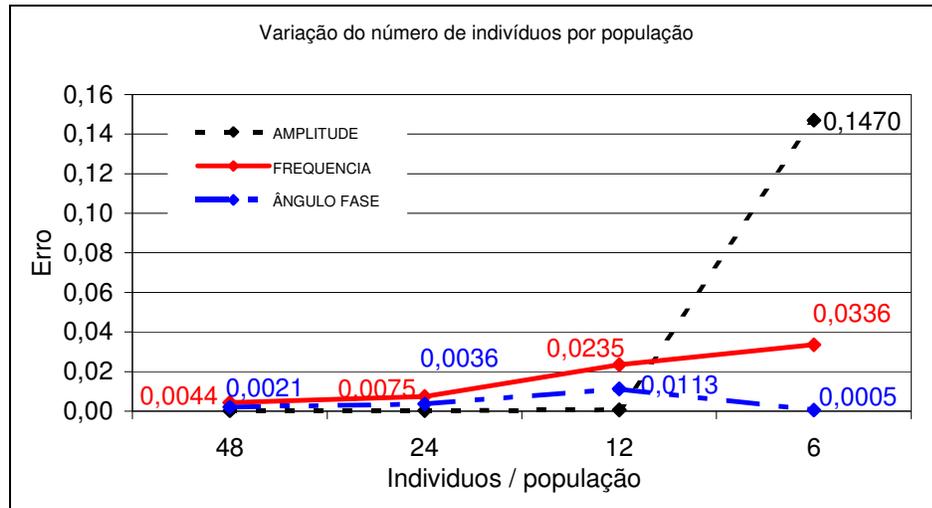


Figura 66 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

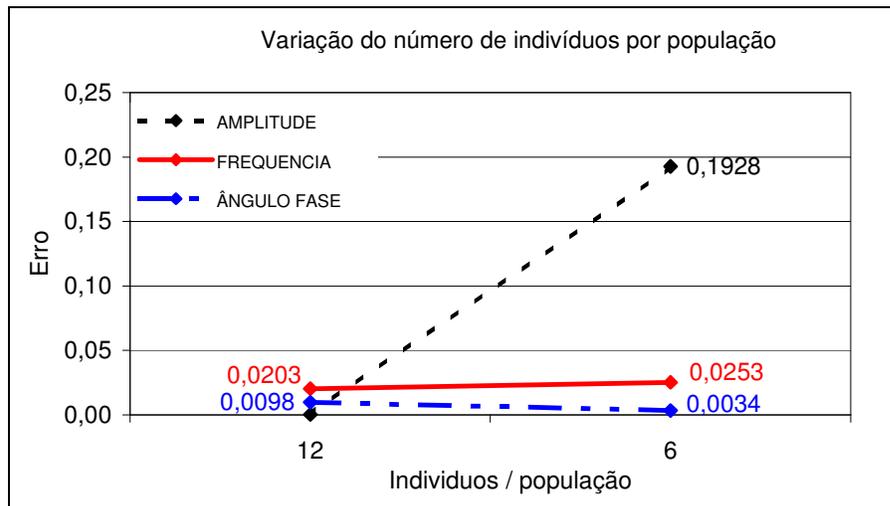


Figura 67 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Toneio

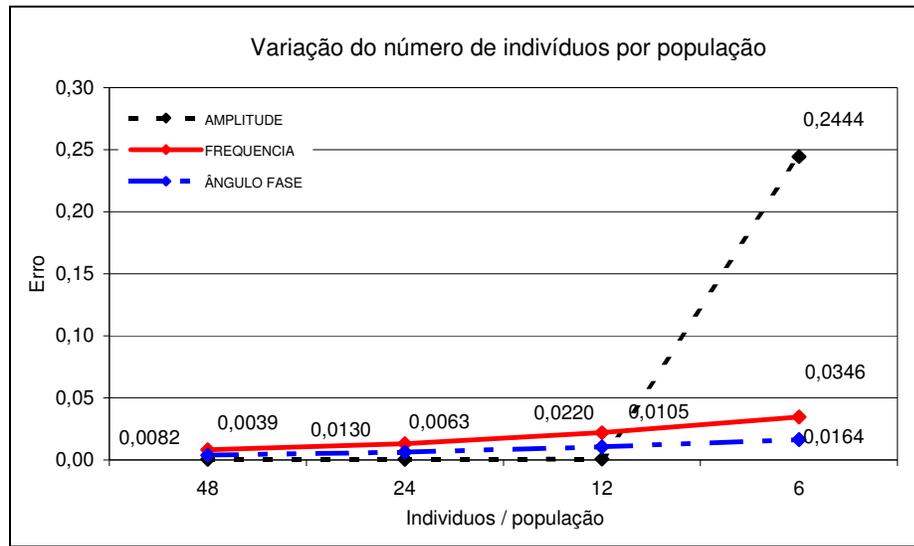


Figura 68 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

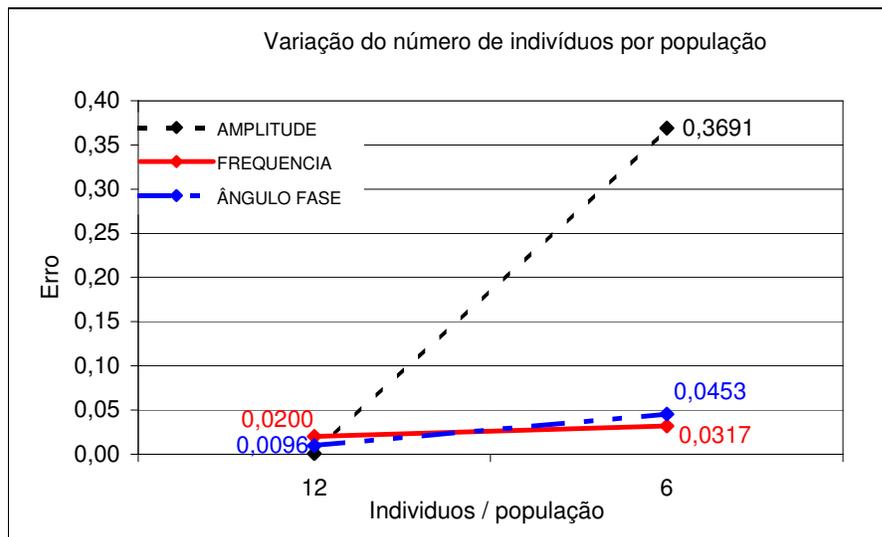


Figura 69 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Toneio

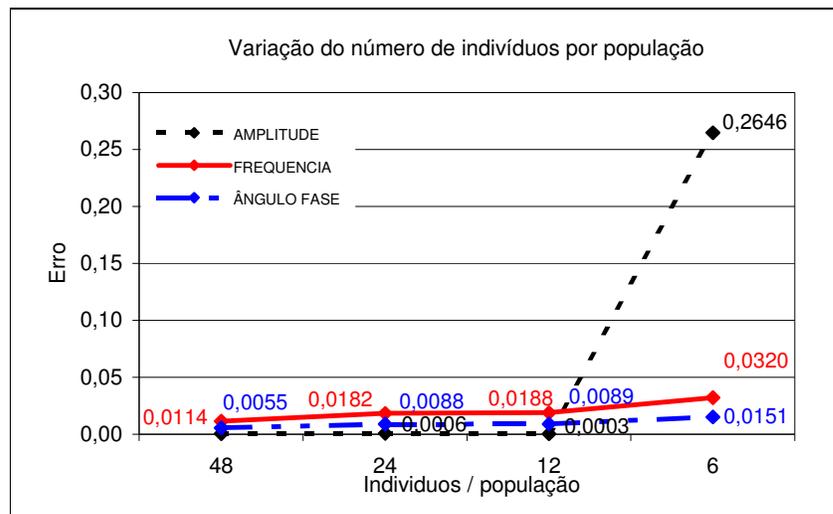


Figura 70 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

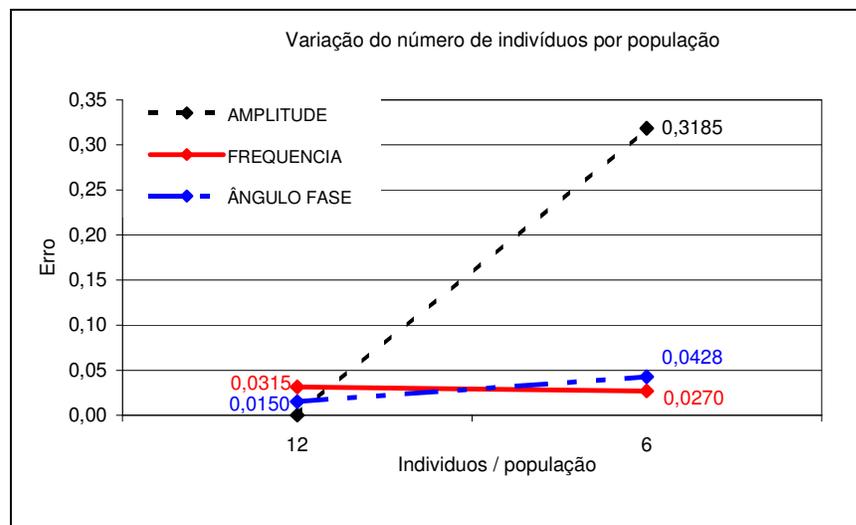


Figura 71 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Torneio

### 6.1.5 Sensibilidade quanto à função de avaliação

Com o intuito de diminuir o esforço computacional, são realizados testes para avaliar três opções para a função de avaliação dos indivíduos possíveis ao problema proposto. Os resultados quanto a sensibilidade dessa função pode ser verificado nas Tabelas 9 a 13.

Dentre os testes é observado que a melhor estimativa (erros menores), juntamente com o menor tempo de processamento é alcançada com a função de avaliação formulada como opção3 (Tabela 13). A tabela apresenta os erros obtidos na estimação dos parâmetros desejados. Assim, a função de avaliação que melhor caracteriza a proposta da pesquisa está definida por (6.1)

$$\text{Função de avaliação} = \sum_{i=1}^m e_i^2 \quad (6.1)$$

Embora o método Torneio apresenta considerável melhoria, deixa a desejar no quesito velocidade de processamento sendo, no entanto, a combinação satisfatória a ser escolhida é dada pela Tabela 13.

TABELA 7 – Sinal caracterizado por 58 Hz, frequência de amostragem de 800 Hz, janela de dados de ½ ciclo. AG configurado com seleção Torneio, 5.000 gerações e 30 indivíduos na população, função avaliação opção um.

		Variação do Ângulo de fase do sinal em estudo						
		0 (°)	60(°)	120(°)	180(°)	240(°)	300(°)	360(°)
Valores estimados	AMPLITUDE	0,0021	0,0007	0,0072	0,0014	0,0009	0,0007	0,0006
	FREQUENCIA	0,0031	0,0133	0,0172	0,0022	0,0153	0,0124	0,0114
	ÂNGULO FASE	0,0010	0,0284	0,0033	0,0007	0,0051	0,1709	0,3372
	TEMPO (s)	11,437	11,250	11,250	11,39	11,234	11,125	11,14

TABELA 8 - Sinal caracterizado por 58Hz, frequência de amostragem de 800Hz, janela de dados de 1/2 ciclo. AG configurado com seleção Torneio, 5.000 gerações e 30 indivíduos na população, função avaliação opção três.

		Variação do Ângulo de fase do sinal em estudo						
		0 (°)	60(°)	120(°)	180(°)	240(°)	300(°)	360(°)
Valores estimados	AMPLITUDE	0,0020	0,0008	0,0103	0,0018	0,0008	0,0081	0,0023
	FREQUENCIA	0,0035	0,0156	0,0234	0,0026	0,0164	0,0194	0,0032
	ÂNGULO FASE	0,0069	0,0334	0,0285	0,0050	0,0352	0,0038	0,0010
	TEMPO (s)	11,219	11,031	11,125	11,110	11,047	11,078	11,188

TABELA 9 - Sinal caracterizado por 58Hz, frequência de amostragem de 800Hz, janela de dados de 1/2 ciclo. AG configurado com, 5.000 gerações e 30 indivíduos na população, função avaliação opção dois.

		Variação do Ângulo de fase do sinal em estudo	
		0 (°) Roleta	0(°) Torneio
Valores estimados	AMPLITUDE	0,0019	0,0019
	FREQUENCIA	0,0297	0,0297
	ÂNGULO FASE	0,4044	2,6952
	TEMPO (s)	10,671	13,406

A função objetivo  $\sum |e_i|$  (opção dois, segundo Tabela6), cujos testes simulados são apresentados pela Tabela 9, demonstrou ser bem mais lenta que as demais, apresentando erros também mais elevados, sendo considerada inadequada para escolha, sendo realizado testes apenas com defasamento da onda em 0°.

TABELA 10 - Sinal caracterizado por 58Hz, frequência de amostragem de 800Hz, janela de dados de ½ ciclo. AG configurado com seleção Roleta, 5.000 gerações e 30 indivíduos na população, função avaliação opção um.

		Variação do Ângulo de fase do sinal em estudo						
		0 (°)	60(°)	120(°)	180(°)	240(°)	300(°)	360(°)
Valores estimados	AMPLITUDE	0,0013	0,0002	0,0038	0,0020	0,0003	0,0059	0,0014
	FREQUENCIA	0,0027	0,0041	0,0094	0,0034	0,0075	0,0141	0,0026
	ÂNGULO FASE	0,0055	0,0083	0,5001	0,9980	1,0000	0,6038	0,6685
	TEMPO (s)	9,125	8,875	8,875	11,141	8,875	8,969	9,031

TABELA 11 - Sinal caracterizado por 58Hz, frequência de amostragem de 800Hz, janela de dados de ½ ciclo. AG configurado com seleção Roleta, 5.000 gerações e 30 indivíduos na população, função avaliação opção três.

		Variação do Ângulo de fase do sinal em estudo						
		0 (°)	60(°)	120(°)	180(°)	240(°)	300(°)	360(°)
Valores estimados	AMPLITUDE	0,0017	0,0003	0,0044	0,0019	0,0004	0,0079	0,0016
	FREQUENCIA	0,0032	0,0065	0,0105	0,0032	0,0106	0,0196	0,0032
	ÂNGULO FASE	0,6345	0,0132	0,0059	0,0020	0,0053	0,0046	0,0010
	TEMPO (s)	9,016	8,797	8,797	10,875	8,718	8,813	8,922

Tendo em vista que o nível de erro aceitável para que um relé abra seu dispositivo de proteção, é da ordem de 1% do sinal em regime [49], os testes de sensibilidade demonstram que a configuração do AG pode ser definida segundo a Tabela 14.

TABELA 12 – Configuração Otimizada do Algoritmo Genético

Indivíduos da população inicial	30 indivíduos
Método de seleção	Roleta
Critério de parada	5.000 gerações
Função de avaliação	$\sum_{i=1}^m e_i^2$ (opção três)

Deve ser enfatizado que os sinais gerados com taxa amostral de 800 Hz e com uma janela de até  $\frac{1}{2}$  fazem com que o algoritmo obtenha sucesso na estimação proposta, já que os erros não ultrapassam o limite de 1% estipulado pelo relé.

De posse destes parâmetros, a Tabela 15 ilustra as variações de parâmetros a ser realizada com o intuito de observar o desempenho do AG frente ao problema de estimação. A próxima seção ilustra esta aplicação.

*TABELA 13 - Variações dos casos para análise*

Amplitude (V)	2,5 - 5 - 7,5 - 10 - 12,5
Frequência (Hz)	58 - 58,5 - 59 - 59,5 - 60 - 60,5 - 61 - 61,5 - 62
Ângulo (°)	0 - 30 - 60 - 90 - 120 - 150 - 180

## ***6.2 Resultados alcançados pelo algoritmo com a configuração ótima***

### **A) Variação da frequência e ângulo de fase em um sinal sem ruído**

Para variação do ângulo de fase para uma dada frequência, nota-se que o algoritmo encontra maior dificuldade na estimação do mesmo. No entanto, isso não implica em erros superiores a 0,01 em relação ao valor real, para a estimação dos outros parâmetros.

Os estudos com essa variação angular para cada frequência da Tabela 15 são demonstrados pelos gráficos das Figuras 72 a 80, podendo-se concluir a satisfatoriedade na estimação dos parâmetros desejados.

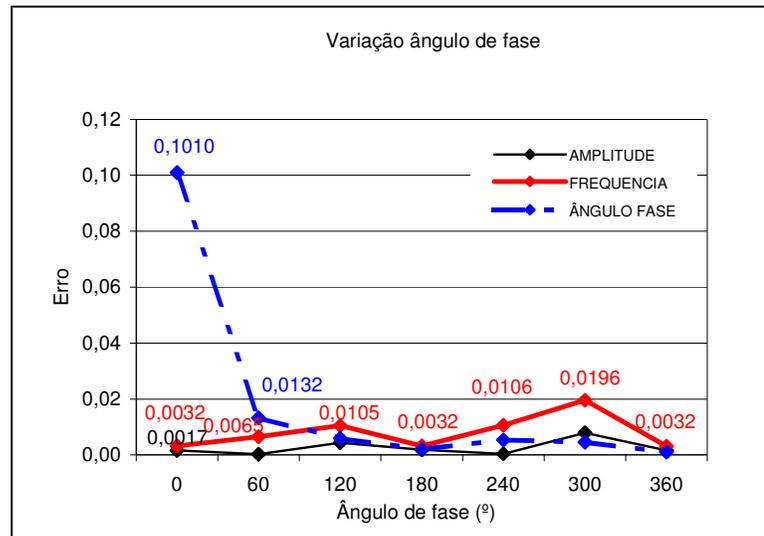


Figura 72 – Onda 58 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800 Hz. Método de seleção Roleta

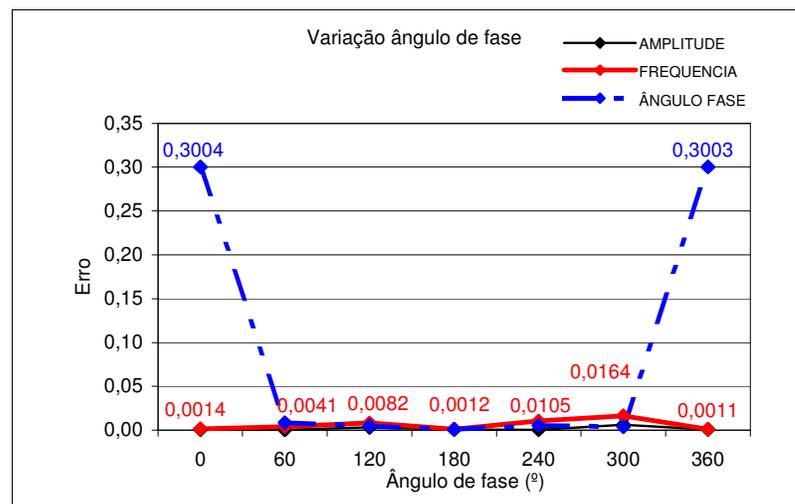


Figura 73 - Onda 58,5 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

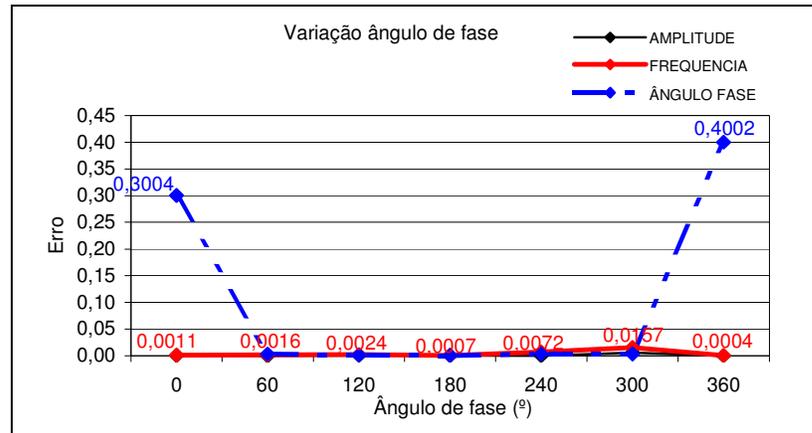


Figura 74 - Onda 59 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

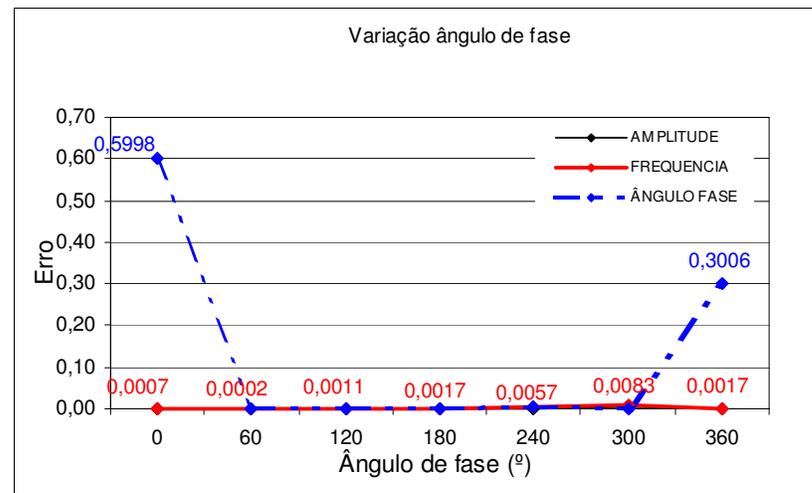


Figura 75 - Onda 59,5 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

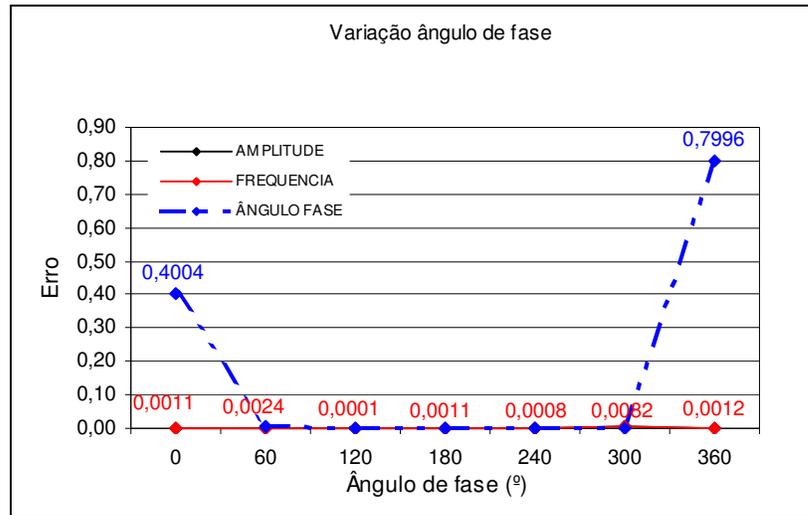


Figura 76 - Onda 60 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

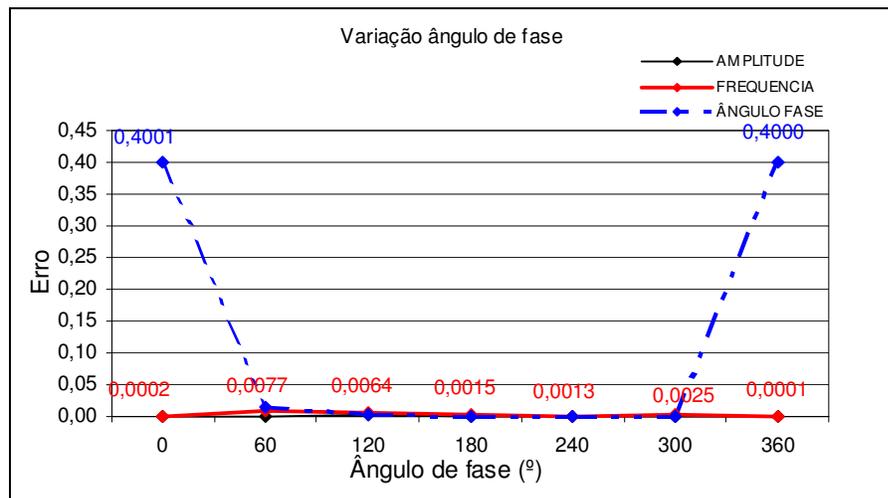


Figura 77 - Onda 60,5 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

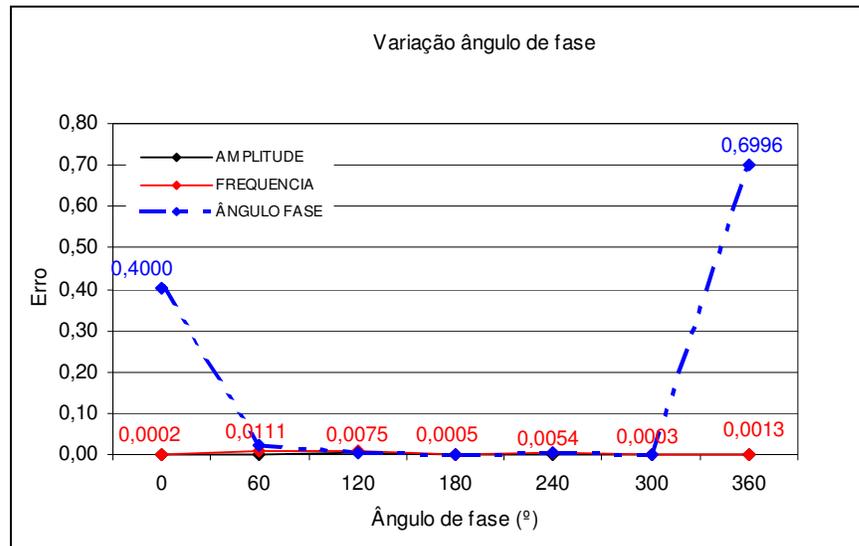


Figura 78 - Onda 61Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

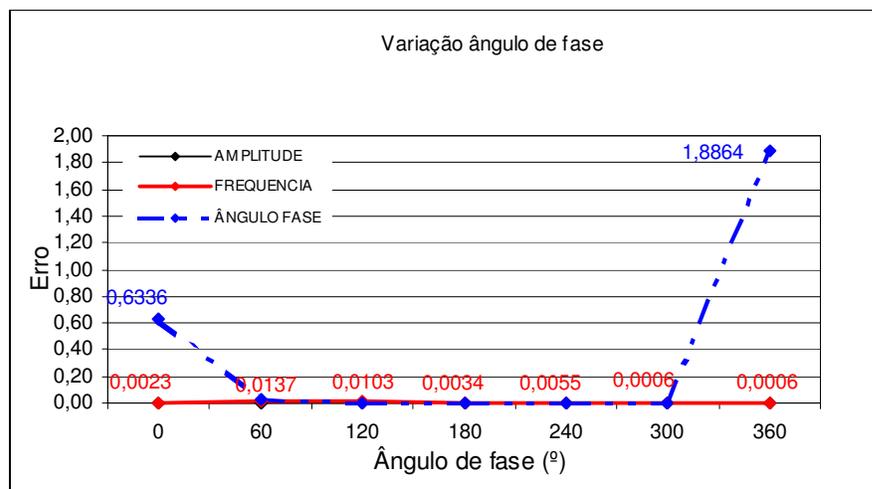


Figura 79 - Onda 61,5 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

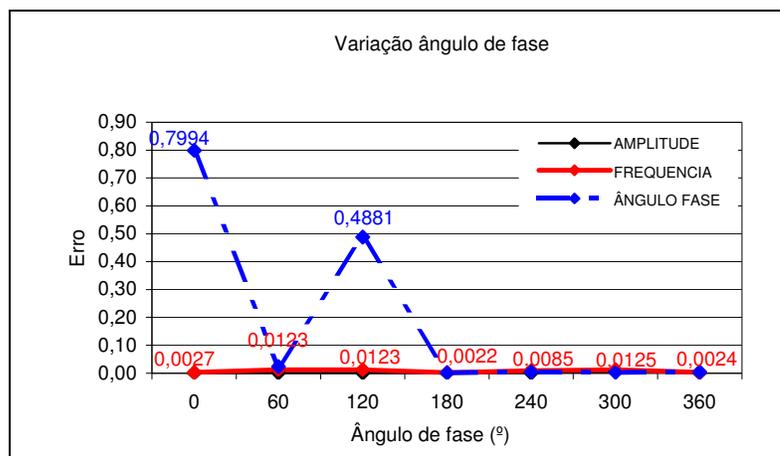


Figura 80 - Onda 62 Hz com variação do ângulo de fase. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

### B) Variação da frequência e ângulo de fase em um sinal com ruído

Levando-se em conta que na prática pode-se ter sinais com propriedades indesejáveis ao mesmo, denominado ruído. Foi considerado um determinado ruído branco para validar os testes à ferramenta proposta. O ruído branco tem a característica de se apresentar uniformemente distribuído em todas as frequências do espectro .

Testes com a configuração otimizada posteriormente à análise de sensibilidade dos parâmetros do AG, também foram realizados para formas de onda contendo ruído, e estão ilustrados nos gráficos das Figuras 81 a 89. Tais resultados confirmam que o algoritmo genético mantém bons resultados para o problema desejado mesmo quando faz estimação dos valores característicos de um sinal distorcido de sua representação analógica real, sendo relevante pois o algoritmo consegue mesmo com a distorção no sinal, distinguir e estimar devidamente os parâmetros desejados do sinal.

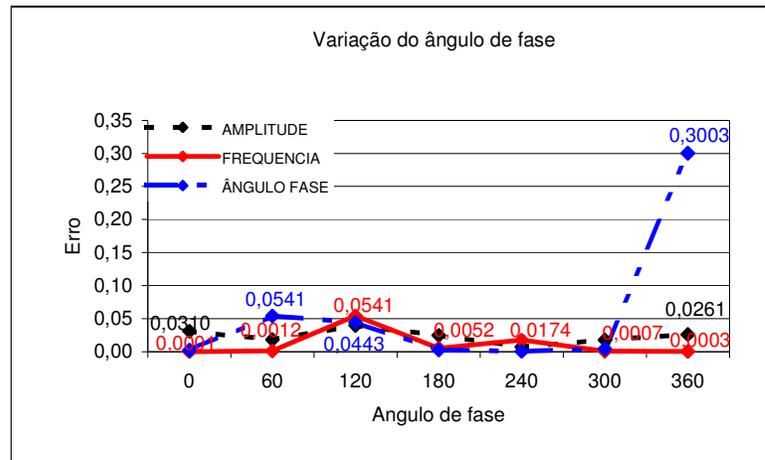


Figura 81 - Onda 58Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

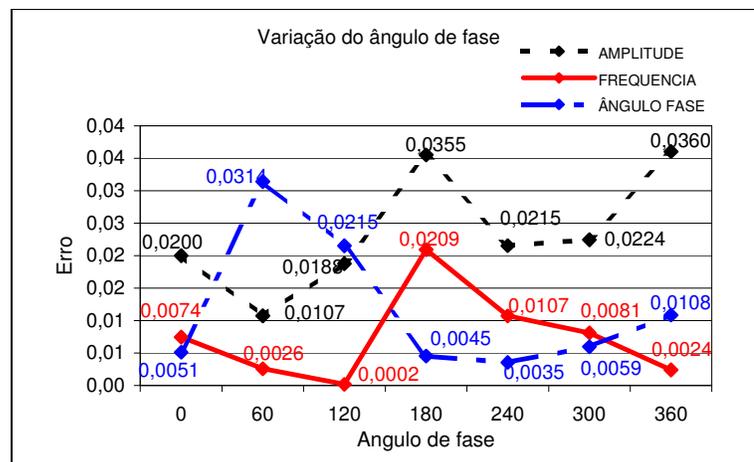


Figura 82 - Onda 58,5 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

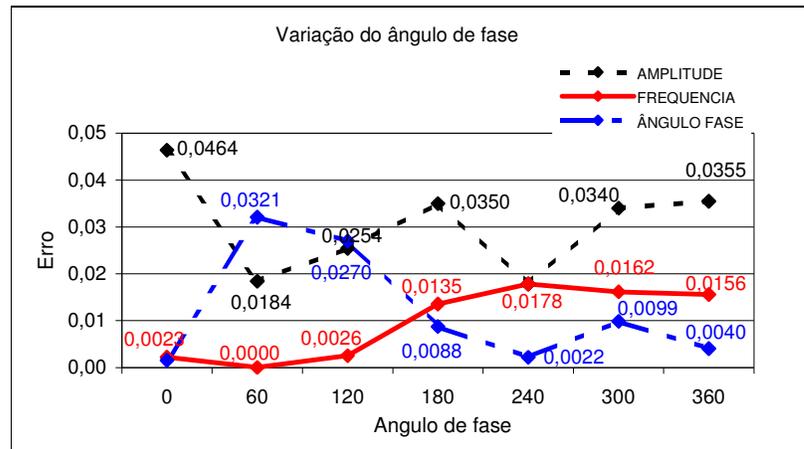


Figura 83 - Onda 59 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

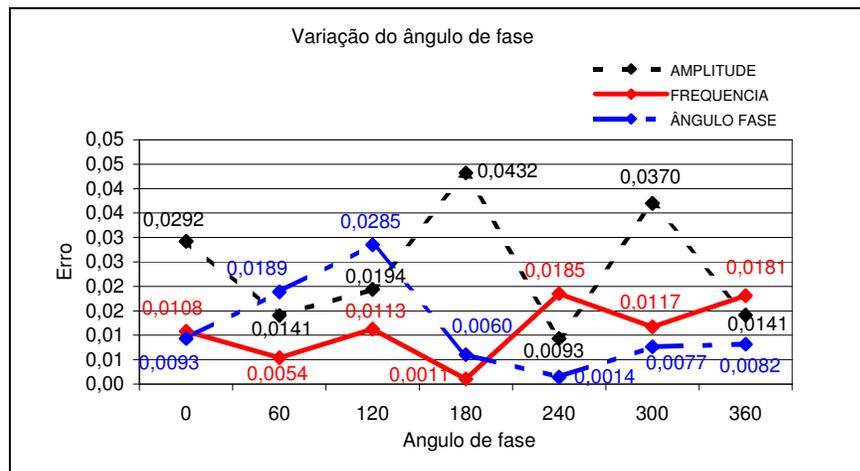


Figura 84 - Onda 59,5 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

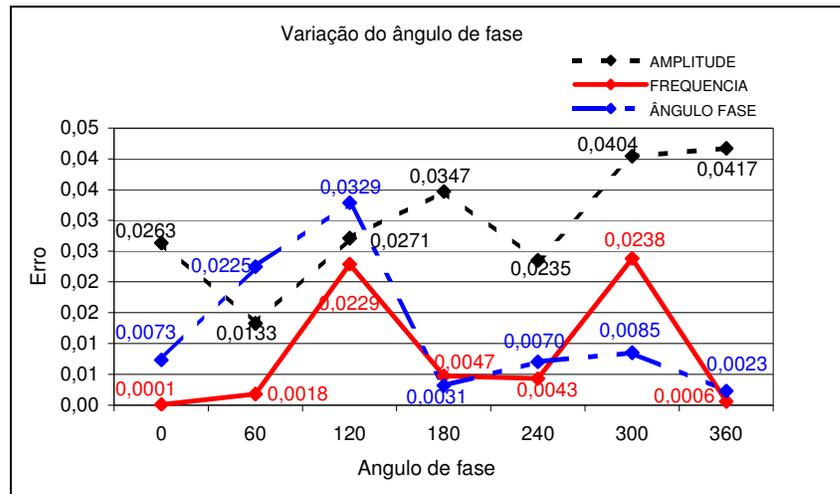


Figura 85 - Onda 60 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

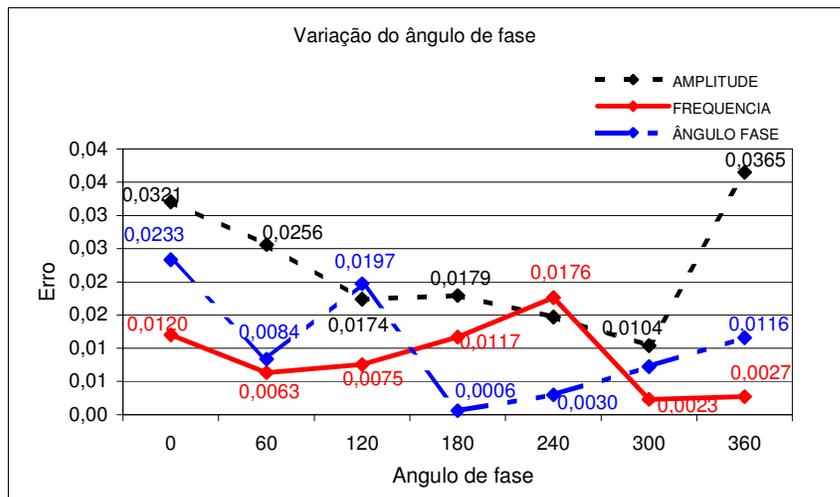


Figura 86 - Onda 60,5 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

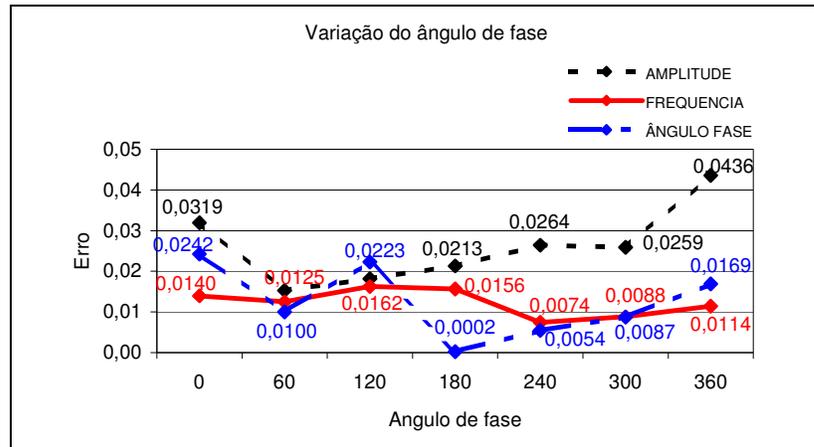


Figura 87 - Onda 61 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

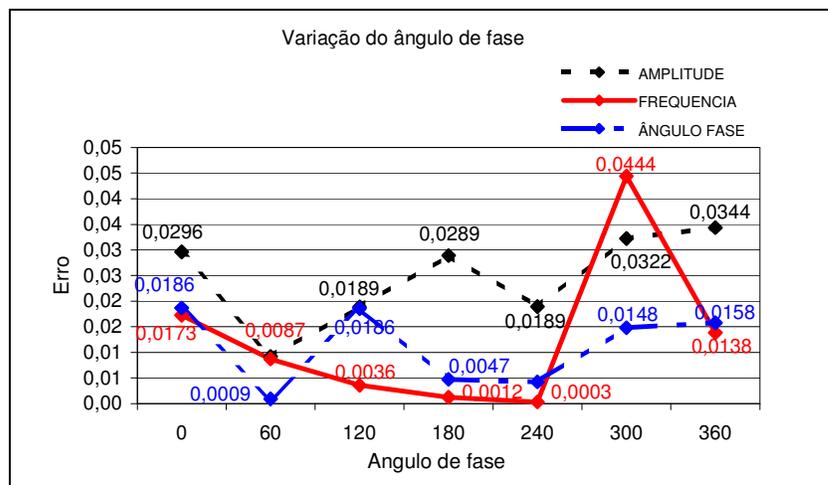


Figura 88 - Onda 61,5 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

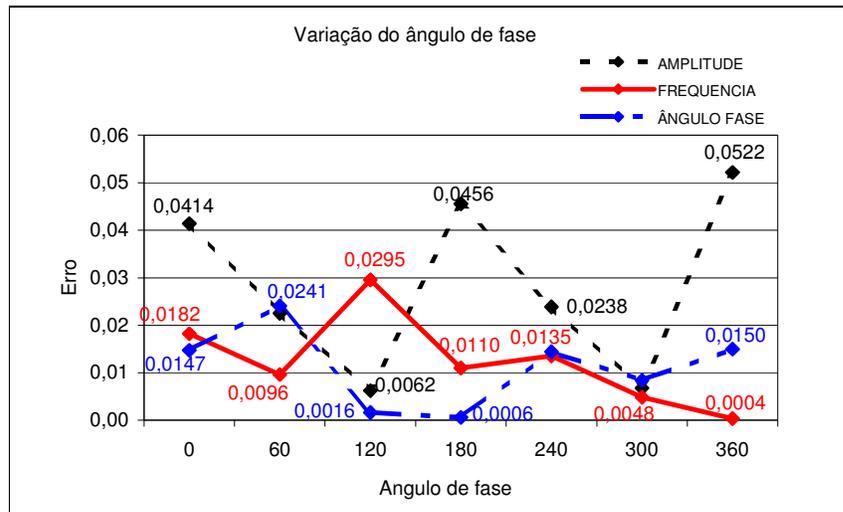


Figura 89 - Onda 62 Hz com ruído. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

### B) Variação da amplitude

Os gráficos 88 a 90 demonstram a variação da amplitude do sinal e obtenção dos parâmetros que caracterizam a forma de onda. Tais testes indicam diferentes magnitudes não influenciam a estimação dos parâmetros utilizando os métodos propostos, demonstrando que os erros permanecem praticamente constantes para as amplitudes alteradas do sinal, como esperado. As pequenas variações ou picos observados são devido a característica probabilística da ferramenta.

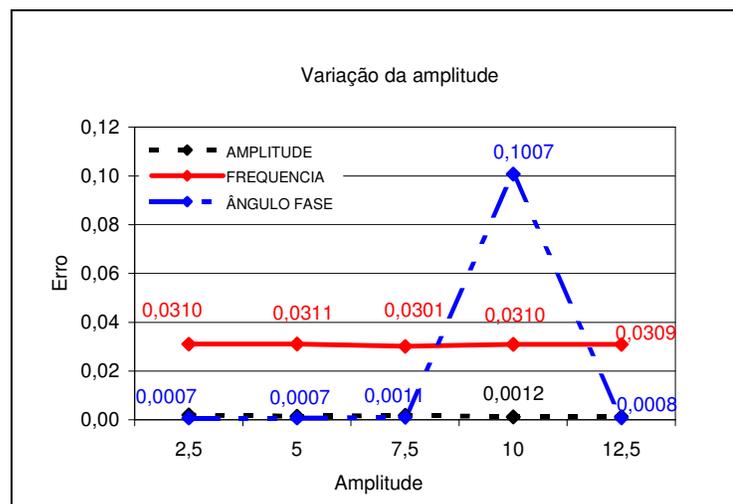


Figura 90 - Onda 58Hz, defasagem angular 0°. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

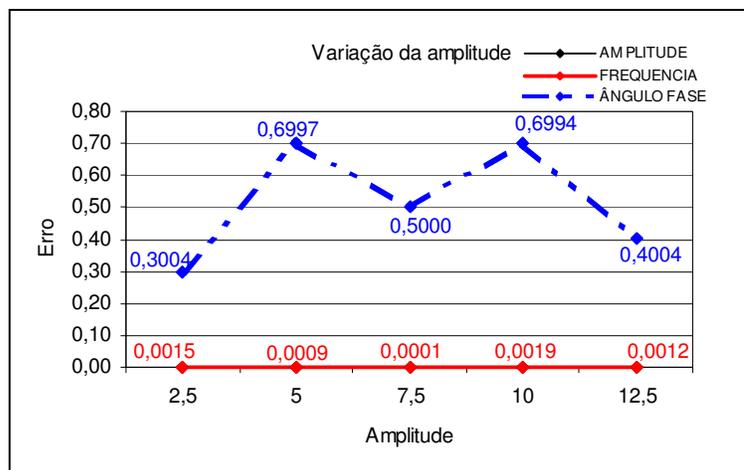


Figura 91 - Onda 60 Hz, defasagem angular 0°. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

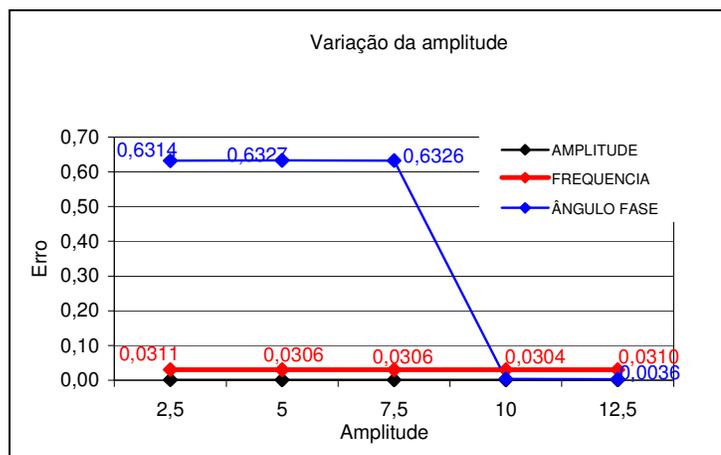


Figura 92- Onda 62 Hz, defasagem angular 0°. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 800Hz. Método de seleção Roleta

Deve ser atentado o fato que a maior preocupação nesta pesquisa se firma na estimação da frequência do sinal, já que se trata do parâmetro que sensibiliza o relé de frequência. Os resultados obtidos demonstram excelente estimação desse parâmetro, visto que no universo da proteção o erro de estimação permitido entre um

sinal distorcido e o sinal em regime pode ser de até 1%. Estando a linha da estimação da amplitude a visualização numérica do erro se confunde com o eixo x, por apresentar erros ainda mais baixos que da frequência.

Deve ser observado que nos testes com uma baixa taxa amostral (400 Hz) e com janelamento de  $\frac{1}{2}$  ciclo, o algoritmo foi capaz de apresentar resultados igualmente satisfatórios, com erros percentuais menores 1%, mantendo a boa estimação da frequência, sobressaindo-se perante as técnicas convencionais. Um forte exemplo a ser comentado, pode ser a tradicional técnica de Transformada de Fourier, que para conseguir resultados satisfatórios, no domínio da frequência, deveria trabalhar com o sinal amostrado a uma taxa amostral não inferior a 2400 Hz, e janelamento superior a um ciclo, o que encarece dispositivos conversores devido a quantidade de amostras a ser analisadas.

Resultados similares foram obtidos mediante as diversas análises de testes do conjunto gerado, e não apresentados por razões de brevidade, as quais representam as possíveis variações nos parâmetros a serem estimados e mostram a grande eficiência para a estimação dos valores associados do problema a ser resolvido, podendo comprovar a potencialidade dos Algoritmos Genéticos como proposta na estimação dos valores associados à forma de onda de um sinal.

---

## 7. CONCLUSÕES

O trabalho apresentou um método baseado em Algoritmos Genéticos – AGs que consiste na estimação dos parâmetros associados as formas de ondas, tais como amplitude, frequência e ângulo de fase de tensão e corrente, referentes a uma proposição de relé de frequência, a qual seria feita através de um processo *on-line*.

A facilidade da proposta ressalta que para a aplicação da ferramenta, não se faz necessário um profundo conhecimento do problema, devendo, no entanto, caracterizar os parâmetros que se deseja investigar, para que fique adequadamente representado o cromossomo a ser iterativamente trabalhado.

Devido a importância de se acompanhar a variação, principalmente da frequência, bem como da amplitude e ângulo de fase para um dado sinal em análise, surgiu o desenvolvimento de novas técnicas para tal finalidade, conforme pode ser observado na literatura especializada. Tradicionalmente, a estimação de tais parâmetros pode ser baseada nas teorias de estimação estática ou dinâmica. A Transformada Discreta de Fourier (TDF) e a técnica dos mínimos quadrados são exemplos de estimação estática. Para a estimação dinâmica tem-se como exemplo, a utilização do filtro de Kalman. No entanto, a estimação dos parâmetros citados para um determinado sistema elétrico, tem encontrado algumas dificuldades quando se utilizam os métodos convencionais para tal finalidade. Em virtude dessa afirmação, técnicas inteligentes começaram a ser desenvolvidas e aplicadas a fim de solucionar problemas de tal natureza.

Dentro desse panorama, os algoritmos evolutivos são uma classe entre as técnicas inteligentes que estão sendo usadas extensamente em aplicações em SEP. Os Algoritmos Genéticos – AGs – apresentam-se como os mais populares e amplamente usados dentre os algoritmos evolutivos. Os mesmos têm sido aplicados na engenharia

como práticas adaptativas na solução de problemas e como modelo computacional de sistemas naturais evolutivos.

O algoritmo proposto neste trabalho foi testado com dados simulados no *software* Matlab a fim de afirmar sua potencialidade, comprovando a eficiência dos AGs na estimação dos parâmetros desejados e apontando para soluções alternativas de problemas relevantes ao sistema de potência.

Os resultados apresentados nesta pesquisa alcançaram excelentes resultados, o que comprova a eficiência dos AGs na estimação dos parâmetros inerentes ao relé de frequência, frente as diversas situações simuladas. Destaca-se ainda, a precisão alcançada para baixos valores de taxa amostral (800 Hz) e o tamanho da janela de dados ( $\frac{1}{2}$  ciclo). Estes valores inviabilizariam a aplicação de outras técnicas. Os resultados mostraram que o tamanho da janela de dados não interfere significativamente na estimação final.

Com a análise de sensibilidade dos parâmetros do AG foi possível fazer ajustes que agilizassem a estimação dos valores requeridos no problema. Isso é um grande passo para pesquisas futuras de aplicação *online* do método. Trata-se de um controle com fundamental importância para uma convergência rápida. No entanto, não houve influência relevante diante da variação dos parâmetros individuais da forma de onda em si, estando o algoritmo apto a estimar os parâmetros de qualquer forma de onda, mesmo com um sinal com características distorcidas pela presença de ruído.

De uma forma geral, o AG apresentou maior dificuldade em estimar o valor do ângulo de fase, não sendo tão preciso quanto para os outros parâmetros da onda (frequência e amplitude). Ainda assim, é pequena a imprecisão, não interferindo na eficiência do método.

Uma vantagem relevante alcançada com a proposta foi atingir resultados satisfatórios com baixa taxa de amostral juntamente com análise de sinal com presença de ruído, diferencial este acerca de métodos tradicionais da literatura.

Resultados obtidos mediante análise de um conjunto significativo de situações simuladas, as quais representam as possíveis variações nos parâmetros a serem estimados, mostraram a grande eficiência da ferramenta proposta, despontando como uma abordagem bastante promissora para enfrentamento de problemas de estimação

de parâmetro, encorajando a continuação do estudo com essa ferramenta para trabalhos futuros, com a aplicação direcionada para a proteção do sistema elétrico.

### ***7.1 Propostas futuras para continuação da pesquisa***

Dos resultados já obtidos, tem-se a motivação para demais estimações no âmbito de tempo real. Acredita-se que das configurações alcançadas na pesquisa, será possível validar a precisão do método para situações próximas às reais, caracterizando uma possível aplicação *online* do método em práticas de proteção voltadas aos sistemas elétricos de potência.

Um dispositivo de processamento paralelo, conhecido como FPGA (*Field Programmable Gate Array*), vem sendo largamente aplicado para esta finalidade, consiste de blocos idênticos de pequenos circuitos basicamente condensado, compostos por algumas portas lógicas e *flip-flops*. Trata-se de um circuito integrado passível de ser configurado por *software* que serve para implementar circuitos digitais, como processadores, interfaces, controladores e decodificadores.

A importância da implementação prática desta pesquisa está principalmente nessa abordagem *online* de se trabalhar com o algoritmo genético. Neste sentido, um protótipo já está sendo executado com base em testes do presente estudo.

---

---

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EMANUEL et al.(1991), A Survey of Harmonic Voltage and Currents at Distribution Substation, IEEE Transaction on Power Delivery, 16 (4): 1883 – 1889.
- [2] DUGAN, R. C.; Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill, 1996.
- [3] PROCOBRE, Instituto Brasileiro do Cobre. Harmônicas nas instalações elétricas: causas, efeitos e soluções. São Paulo, Novembro, 2001.
- [4] PHADKE, A. G.; THORP, J. S. e ADAMIAK, M.. “A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency and rate of change of frequency,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-102, pp. 1025–1038, May 1983.
- [5] GIRAY, M. M.; e SACHDEV, M. S.. “Off-nominal frequency measurements in electric power systems,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 4, pp. 1573–1578, July 1989.
- [6] ROUTRAY, A. e PRADHAN, A. K.. “A novel kalman filter for frequency estimation of distorted signals in power systems,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 51, pp. 469–479, June 2002.
- [7] KEZUNOVIC, M.; P. SPASOJEVIC, P. e PERUNICIC, B.. “New digital signal processing algorithm for frequency deviation measurement,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 3, pp. 1563–1573, July 1992.
- [8] RAJKUMAR, N. et all (2003). A Review of Applications of Genetic Algorithms to Power Systems. Elsevier Science. Outubro 2003.

- [9] PHADKE, A. G. Computer Relaying: Its Impact on Improved Control and Operation of Power Systems. IEEE Computer Application in Power. October 1988.
- [10] SALCIC, Z. ,MIKHAEL, R. , A new method for instantaneous power frequency measurement using reference points detection. Eletric Power Research Vol. 55. Ano 2000, pp. 97-102.
- [11] GIRGAS, A.A.; HAM, F.M.(1982). A new FFT-base digital frequency relay for load shedding. IEEE Trans. Power Apparatus System PAS-101 pp.433–439.
- [12] PHADKE, A.G.; THORP, J.; ADAMIAK, M. (1983). A New Measurement Technique for Tracking Voltage Phasors, local system frequency and rate of change of frequency. IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol 102, N° 5, pp.1025-1038.
- [13] SACHDAEV, M.S.; GIRAY, M.M.(1985). A least error squares technique for determining power systems frequency, IEEE Trans. Power Apparatus and System PAS-104 pp.437–443.
- [14] MOORE, P. J. et all (1996). Frequency Relaying Based on Instantaneous Frequency Measurement. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, n°4, Outubro 1996, pp. 1737-1742
- [15] SOLIMAN, S.A et all (2003). Frequency and harmonics evaluation in power networks using fuzzy regression technique. Eletric Power Systems Research. Vol 66, pp 171-177.
- [16] LOBOS, T., REZNER, J.(1997). Real-Time Determination of Power System Frequency. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol 46, n° 4, August 1997.
- [17] HAYKIN, S., VEEN, B. V, Sinais e Sistemas. Porto Alegre, Ed. Bookman, 2005, Pg. 163-244.
- [18] MANZOUL, M. A., Multi-function protective relay on FPGA, Microeletronics Reliability, Vol 38, pp. 1963-1968.

- [19] OSMAN, A. H. et al (2004). Distance Relaying with Directional Estimation Using Genetic Algorithm Technique. IX Simposio de especialista em planejamento da operação e expansão elétrica. Rio de Janeiro 23 a 27 de maio de 2004.
- [20] EL-NAGGAR, K. M. e YOUSSEF, H. K. M. (2000). A genetic based algorithm for frequency-relaying applications. *Electric Power Systems Research*, vol 55, pp173-178.
- [21] BEASLEY et al. (1993). BEASLEY, D., BULL, D. R., & MARTIN, R. R. (1993). An Overview of Genetic Algorithm: Part 1, Fundamentals. Technical Report 15(2), University of Cardiff.
- [22] BEASLEY et al. (1993). BEASLEY, D., BULL, D. R., & MARTIN, R. R. (1993). An Overview of Genetic Algorithm: Part 2, Research Topics. Technical Report 15 (4), University of Cardiff.
- [23] WHITLEY (1993). WHITLEY, D. (1993). A Genetic Algorithm Tutorial. Technical Report CS-93-103, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523.
- [24] REZENDE (2003). REZENDE, S. O. (2003). *Sistemas Inteligentes – Fundamentos e Aplicações*, volume 1. Manole, Bariri – SP.
- [25] RECHENBERG, I. CYBERNETIC solution path of an experimental problem. Farnborough Hants, UK: Royal Aircraft Establishment, 1965.
- [26] FOGEL, D. B. *Evolutionary computation: the fossil record*. Piscataway: IEEE Press, 1998.
- [27] FOGEL, L.J.; OWENS, A.J.; WALSH, M.J. *Artificial intelligence through simulated evolution*. New York: Wiley, 1966.
- [28] HOLLAND, J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [29] GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, 1989.

- [30] KOZA, J. R. Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection. Cambridge: MIT Press, 1992. 819p.
- [31] MICHALEWICZ Z. Genetic algorithms + data structures = evolution programs. Berlin: Springer Verlag, 1996. 387p.
- [32] WINSTON (1992). WINSTON, P. H. (1992). Artificial Intelligence, volume1. Addison-Wsley Pub Co.
- [33] COELHO (2003). DOS SANTOS COELHO, L. (2003). Fundamentos, Potencialidades e Aplicações de Algoritmos Evolutivos. Notas em matemática aplicada, SBMAC – Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, São Carlos.
- [34] MITCHELL, M. An Introduction to Genetic Algorithms. Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [35] GOLDBARG, M.C. & LUNA, M. P. L. Otimização combinatória e programação linear, Editora Campus, Rio de Janeiro, RJ, 2000.
- [36] BÄCK, T. FOGEL, D.B. & MICHALEWICZ, Z. Handbook of evolutionary computation. Britol, Philadelphia: Institute of Physics Publishing. New York, Oxford: Oxford University Press, 1997.
- [37] RIBEIRO, GERALDO FILHO. Melhoramentos do Algoritmo Genético Construtivo e Novas Aplicações em Problemas de Agrupamento. PhD thesis, INPE, São José dos Campos-SP, Sep 2000.
- [38] GOLDBERG, D.E.; DEB, K. A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms. In: G. Rawlins, ed., Foundations of genetic algorithms. Silicon Valley: Morgan Kaufmann, 1991.
- [39] DEJONG, K. An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems. PhD Dissertation, University of Michigan, 1975.
- [40] WETZEL, A. Evaluation of the effectiveness of genetic algorithms in combinatorial optimization, 1983. University of Pittsburg.
- [41] ABB POWER T&D COMPANY INC, Relay Division, Coral Springs, FL, Allentown, PA, July 1998.

- [42] Schweitzer Laboratories Comercial LTDA, [www.selinc.com.br](http://www.selinc.com.br)
- [43] HORSTMANN, C.S. (1997) – Practical object-oriented development in C++ and Java. New York: Wiley Computer Pub. Xiii. p.562.
- [44] Filho, DONATO S. , Na Evolutionary Optimization Approach to Track Voltage and Current Harmonics in Electrical Power Systems, IEEE, 2003.
- [45] CHAPMAN, S. J. , Programação em Matlab para Engenheiros. São Paulo: Pioneira Thomson Learning. 2003.
- [46] VIEIRA, V. P. P. B., DINIZ, et al. (1999). Sistemas Inteligentes, Editora da Universidade - UFRS, Porto Alegre - RS, p. 46.

## APENDICE A – Sensibilidade quanto ao método de seleção

Basicamente, foram comparados os métodos, Roleta e Torneio, tentando diminuir o erro dos testes. Agrupando segundo a taxa amostral e considerando que para cada frequência amostral são realizados testes com 10.000, 7.500, 5.000, 2.500 e 1.000 gerações do AG, é realizado o método Torneio no caso que o erro do parâmetro estimado ultrapassa 1% do valor real.

Para estes, foi usado um sinal com defasagem a  $240^\circ$ , janela de  $\frac{1}{2}$  ciclo e taxa amostral 800 Hz, outros testes que verificam o método de seleção para as demais taxas de amostragem, 2400, 1200 e 400 encontram-se no apêndice A.

### A) Resultados com frequência de amostragem 2400 Hz

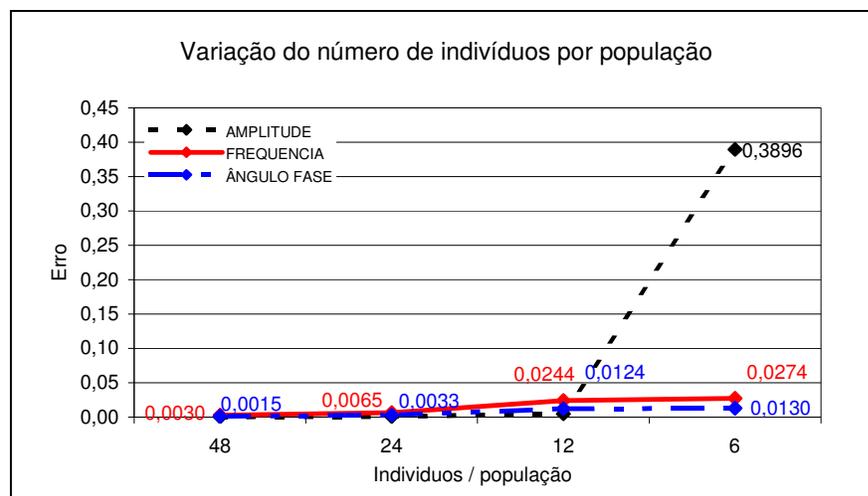


Figura 93 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Roleta

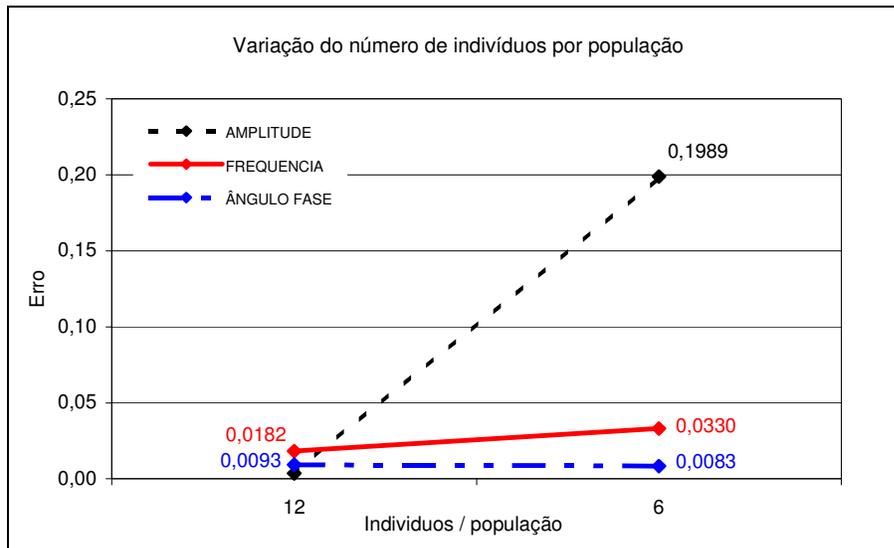


Figura 94 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Torneio

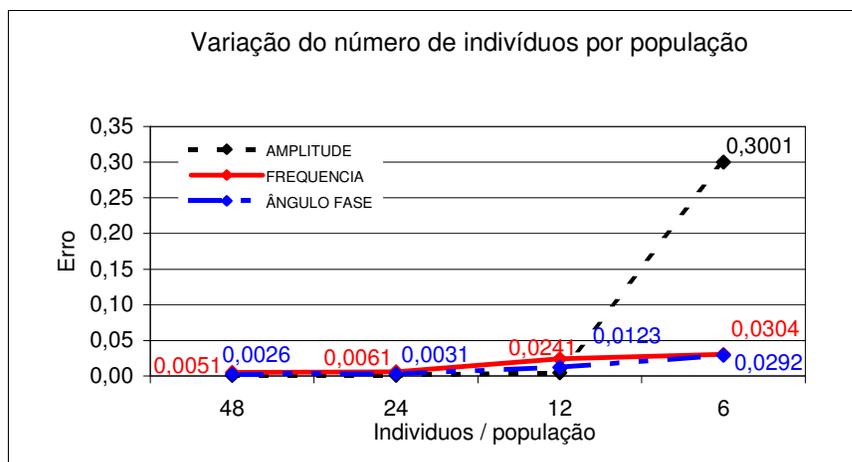


Figura 95 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Roleta

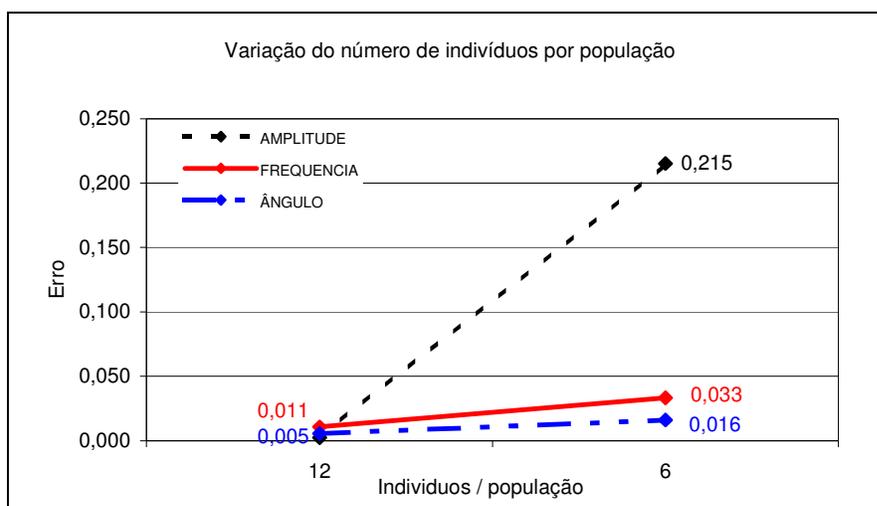


Figura 96 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Torneio

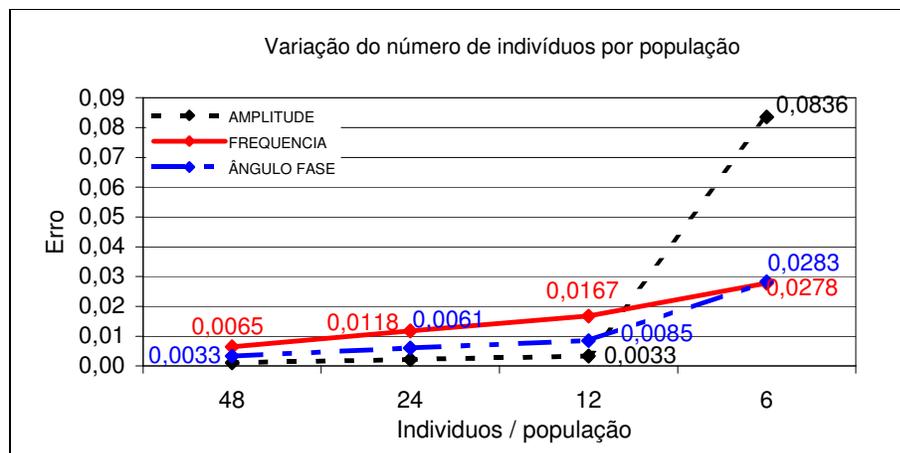


Figura 97 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Roleta

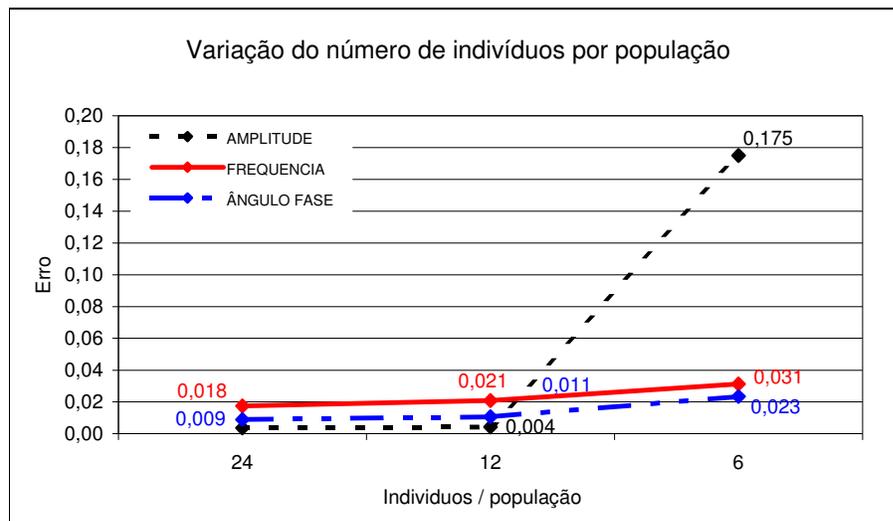


Figura 98 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Torneio

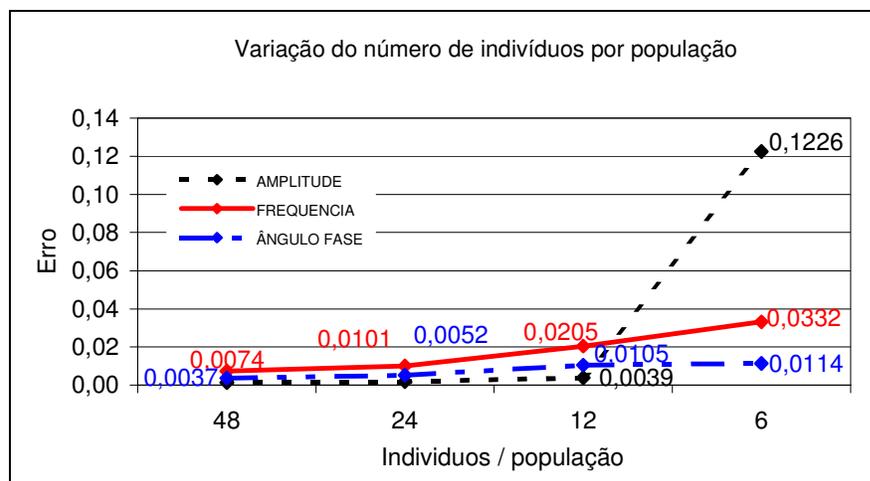


Figura 99 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Roleta

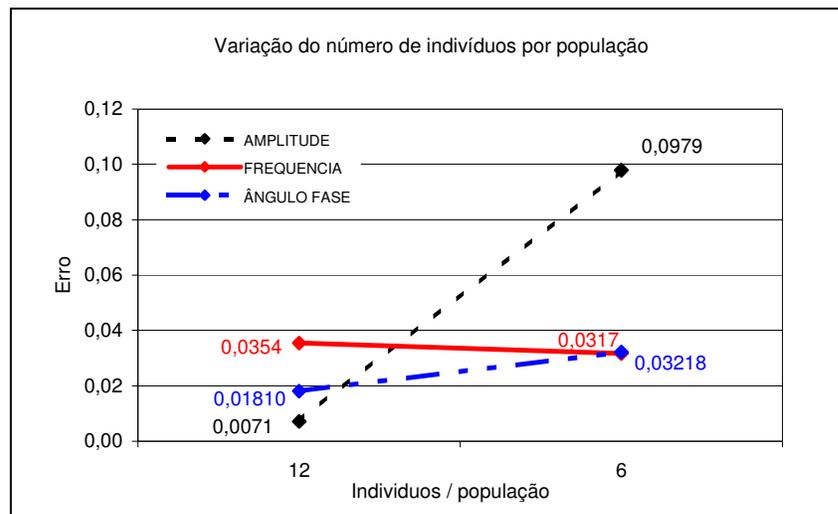


Figura 100 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Torneio

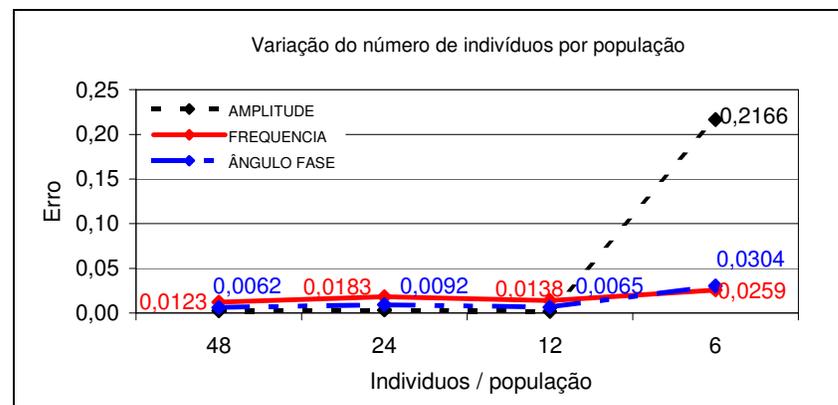


Figura 101 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Roleta

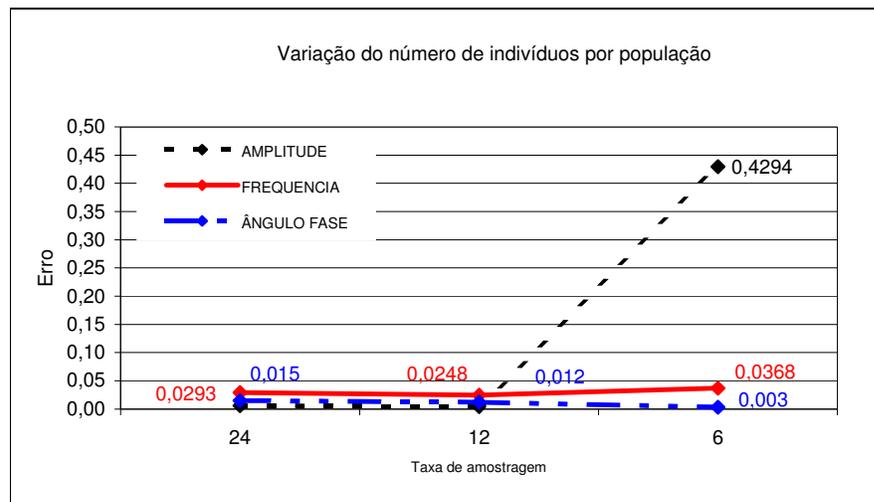


Figura 102 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 2400Hz. Método de seleção Toneio

## B) Resultados com freqüência de amostragem 1200 Hz

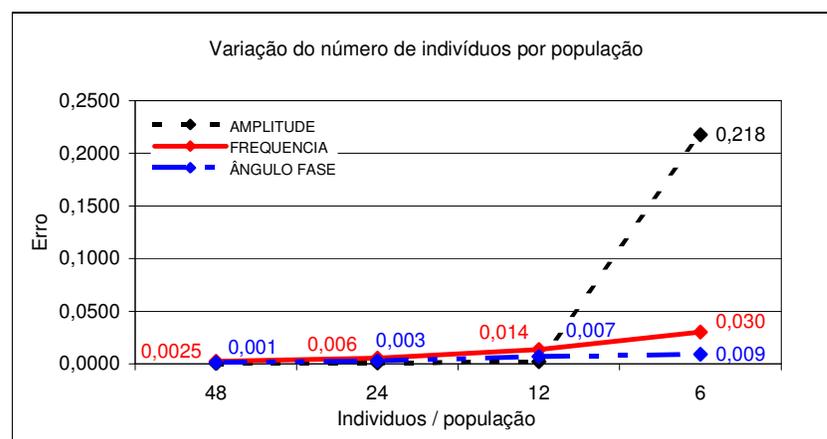


Figura 103 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Roleta

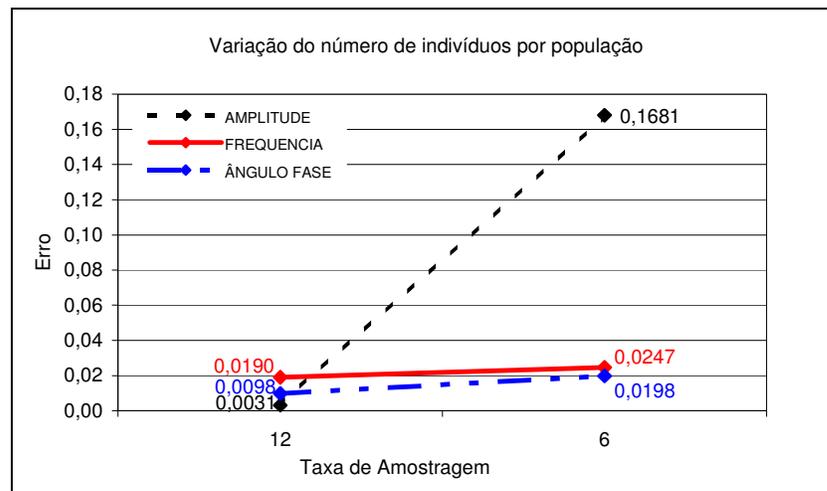


Figura 104 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção *Toneio*

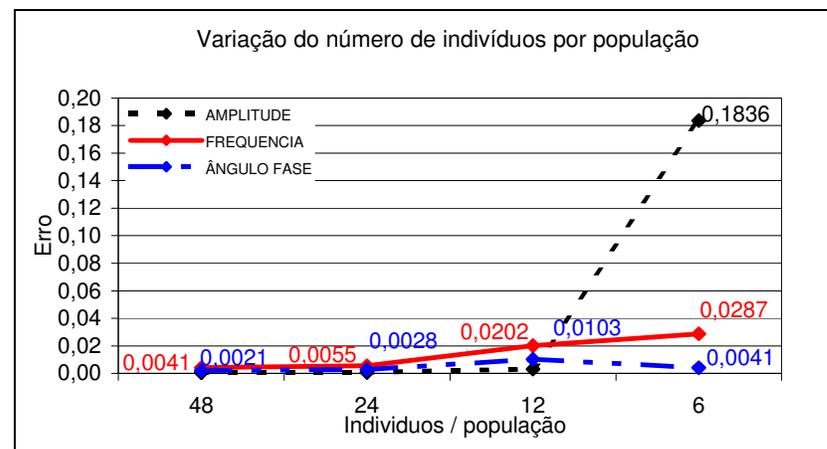


Figura 105 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção *Roleta*

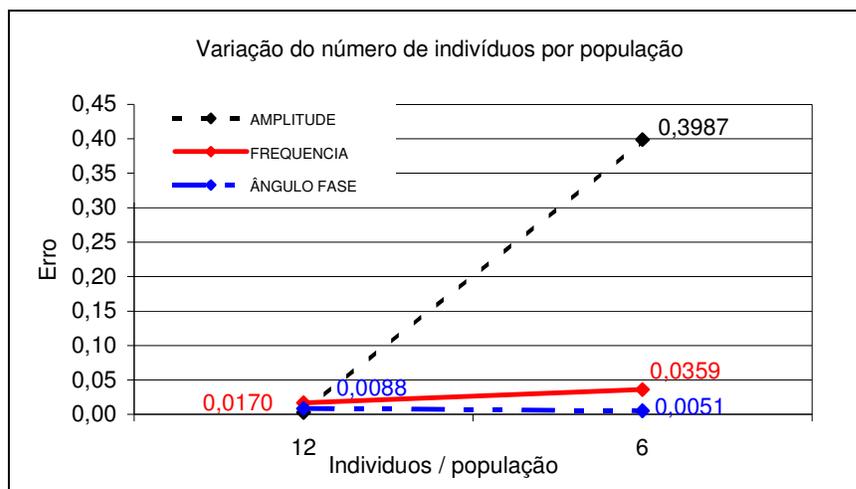


Figura 106 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Toneio

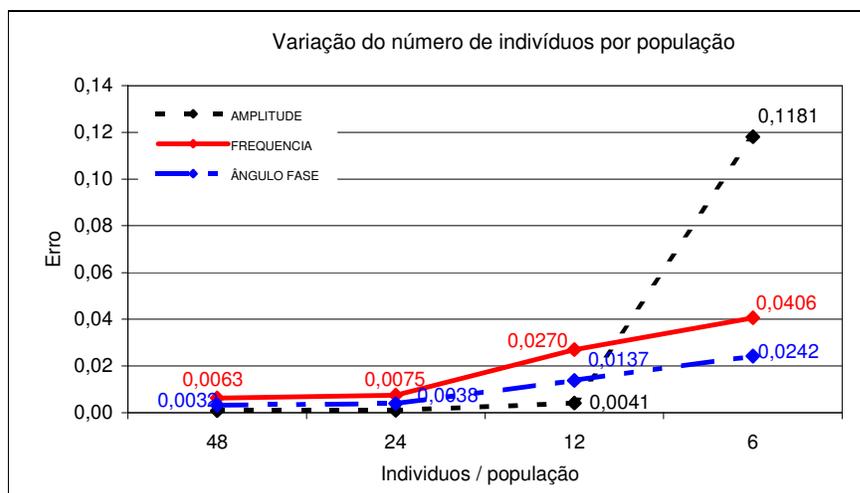


Figura 107 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Roleta

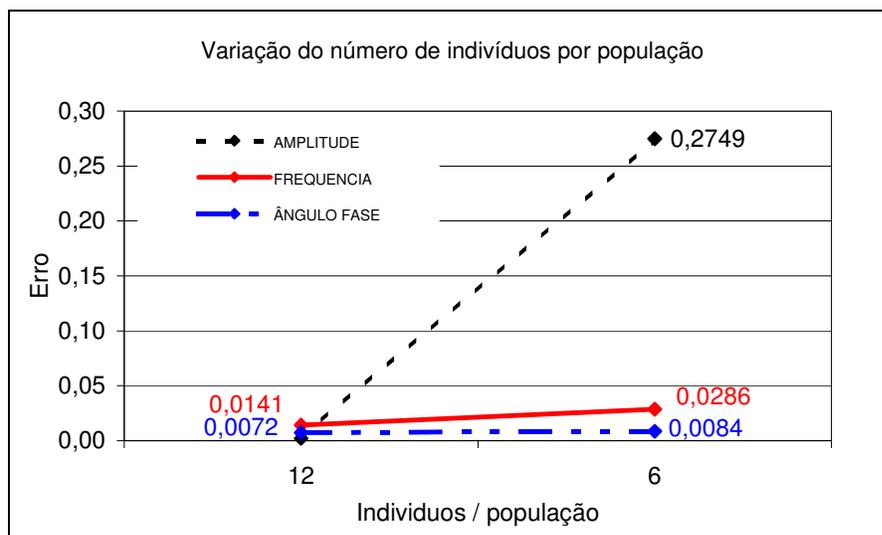


Figura 108 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Toneio

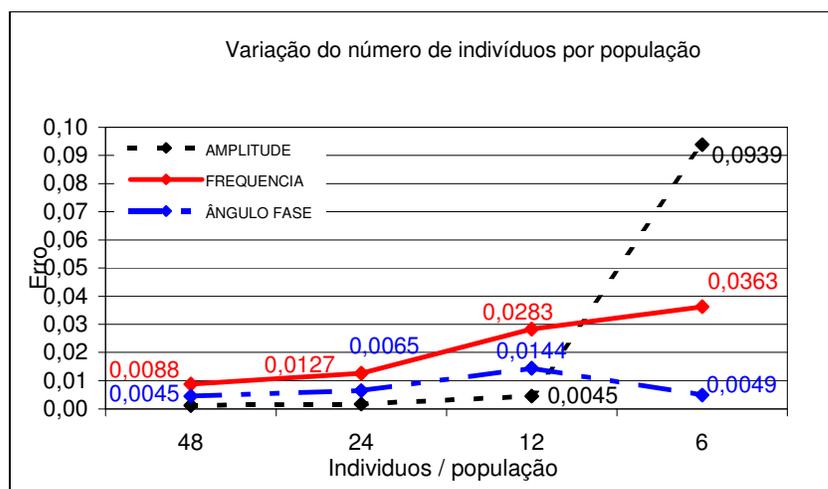


Figura 109 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Roleta

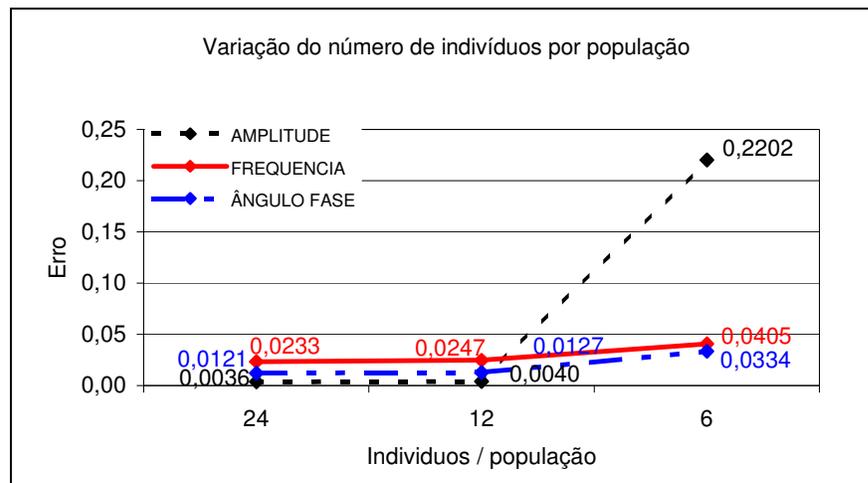


Figura 110 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Toneio

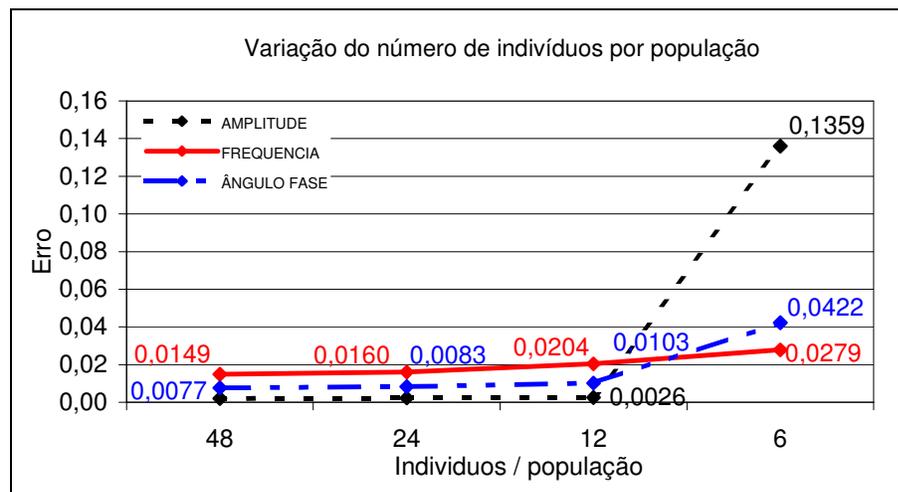


Figura 111 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Roleta

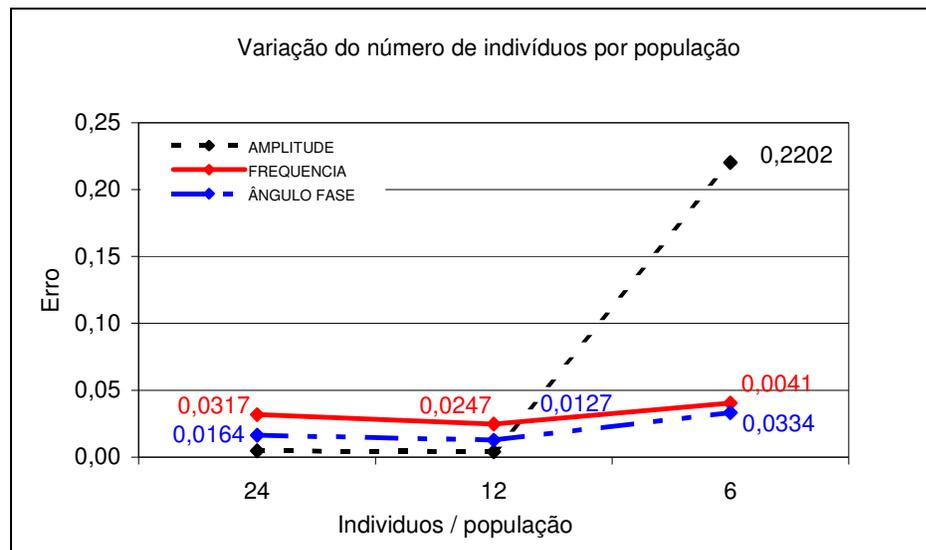


Figura 112 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 1200Hz. Método de seleção Toneio

### C) Resultados com frequência de amostragem 400 Hz

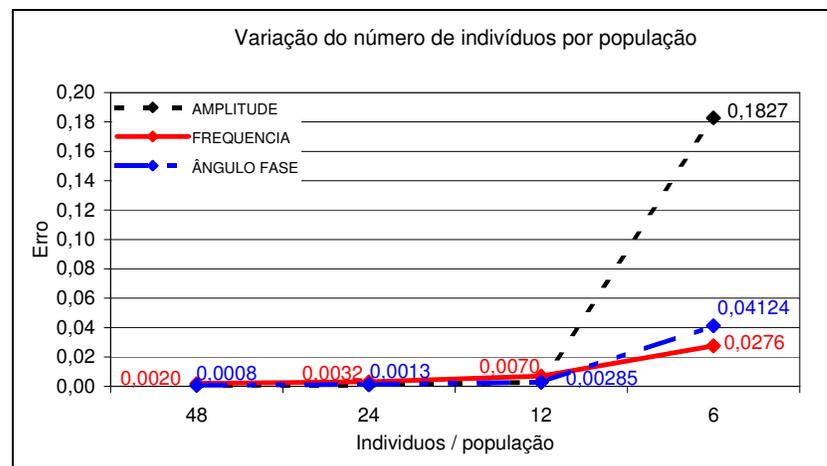


Figura 113 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Roleta

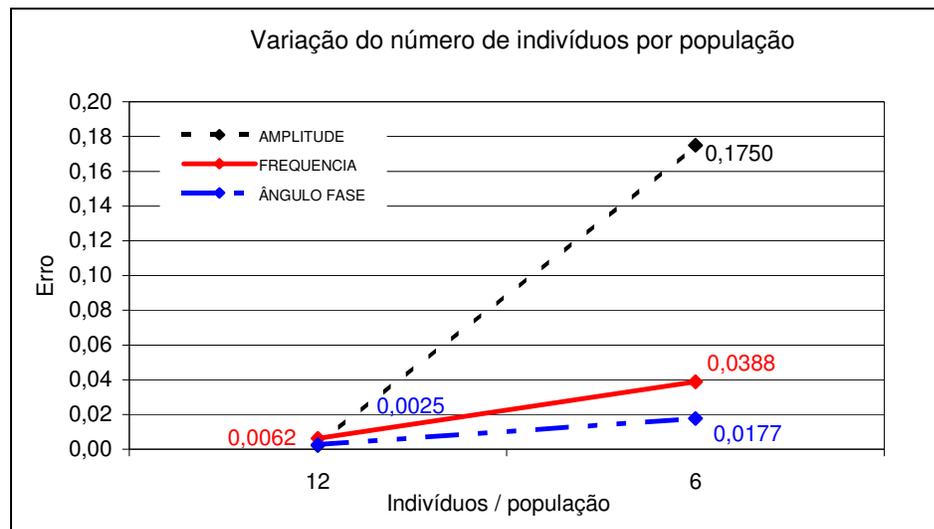


Figura 114 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 10000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Torneio

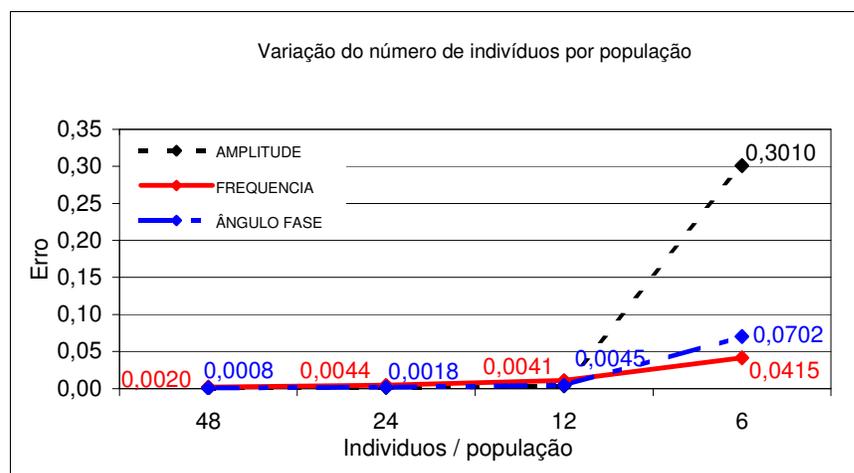


Figura 115 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Roleta

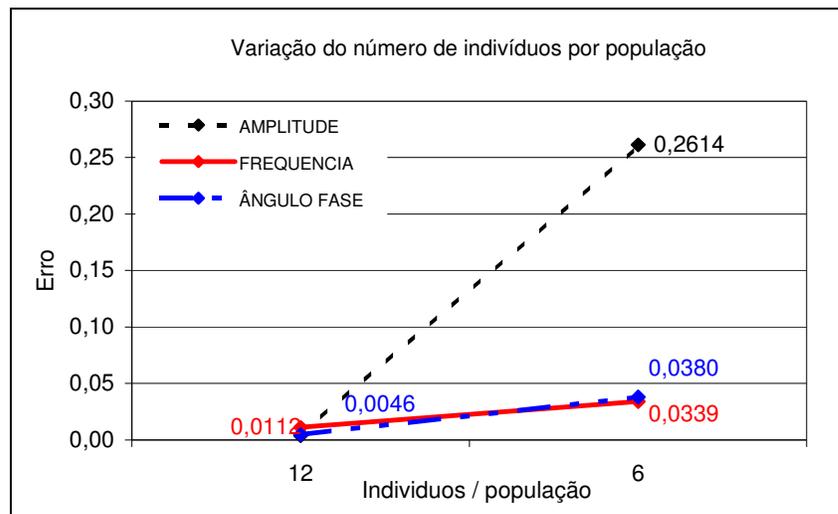


Figura 116 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 7500 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Torneio

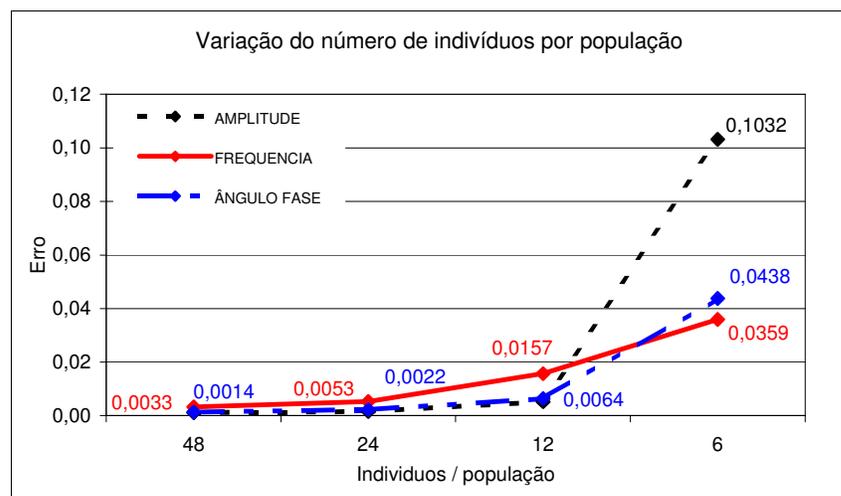


Figura 117 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Roleta

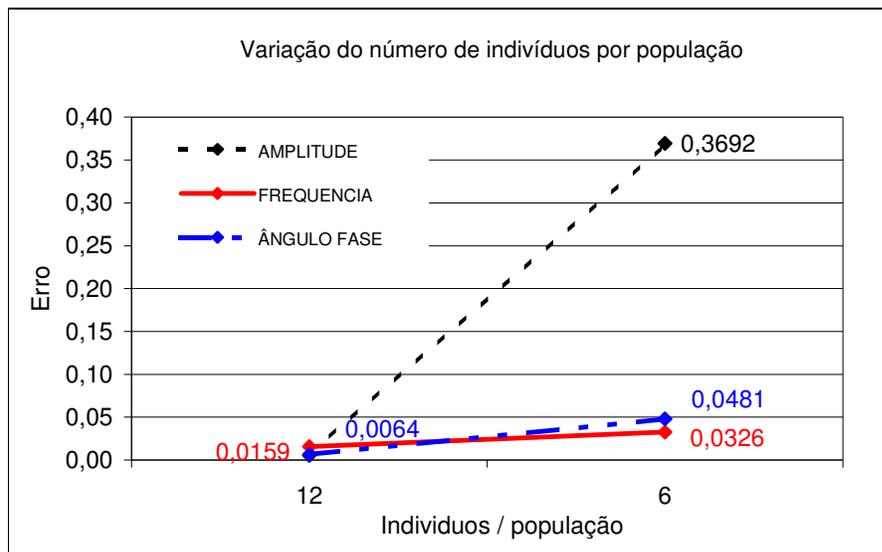


Figura 118 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 5000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Torneio

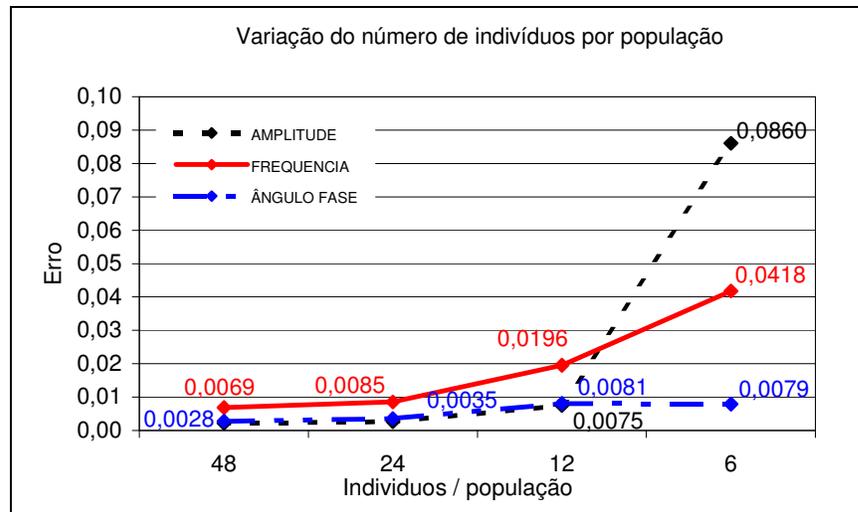


Figura 119 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Roleta

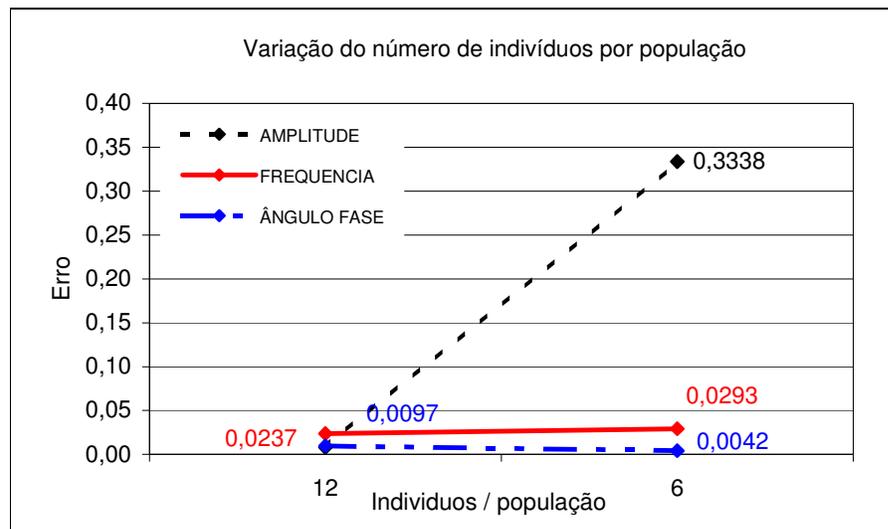


Figura 120 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 2500 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Torneio

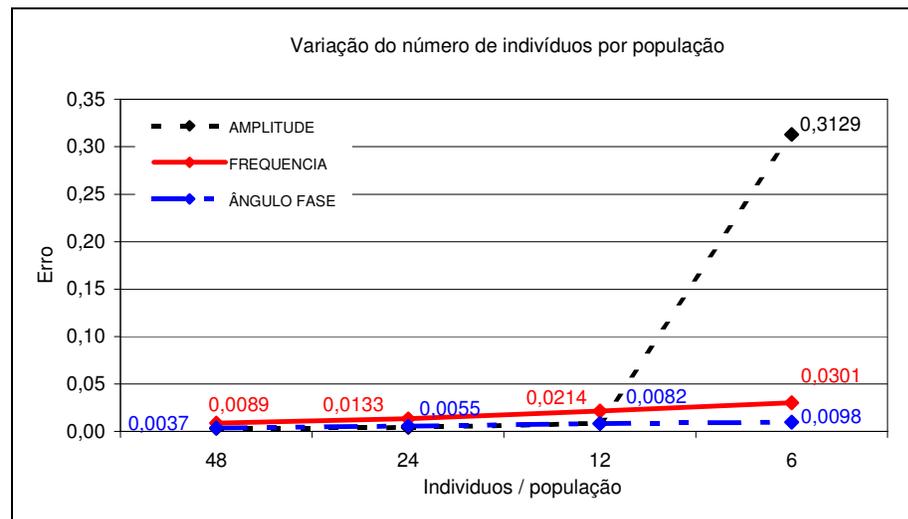


Figura 121 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Roleta

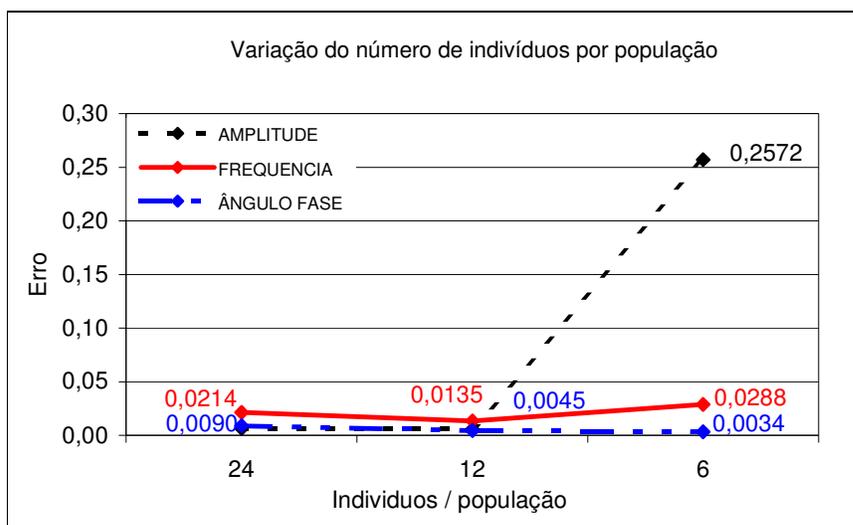


Figura 122 - Gráfico indicativo da variação do número de indivíduos por população. AG configurado com 1000 gerações a uma taxa amostral de 400Hz. Método de seleção Torneio