

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

Gestão de Potência Reactiva de Parques Eólicos de Grande Dimensão

Ricardo Filipe da Silva Gonçalves

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Professor Doutor Carlos Coelho Leal Monteiro Moreira
Co-orientador: Mestre Bernardo Silva

Janeiro de 2011

© Ricardo Filipe da Silva Gonçalves, 2011

Resumo

Actualmente, a importância de se reduzir os impactos ambientais produzidos pelos sistemas convencionais de produção de energia têm motivado um crescimento considerável na integração de produção de energia eólica nas redes eléctricas. Desta forma, o operador de sistema tem vindo a necessitar de definir claramente as condições de acesso, destes novos produtores, às redes eléctricas como forma de garantir os padrões de segurança de exploração que caracterizam o funcionamento do sistema eléctrico de energia.

Como forma de responder aos novos requisitos de segurança e qualidade na produção de energia eléctrica impostos pelos operadores de rede, os fabricantes de aerogeradores têm vindo a melhorar as capacidades técnicas dos seus aerogeradores com a utilização de interfaces electrónicas, o que tem permitido explorar potencialidades não usuais em aerogeradores convencionais.

Tendo em conta todos estes aspectos, este trabalho teve como objectivo criar uma ferramenta para gestão da potência reactiva num cluster de parques eólicos, de modo a poder contribuir com a injeção de potência reactiva para a rede a montante, conforme requisito do operador de sistema, ao mesmo tempo que garantia que as perdas na rede interna do cluster eram minimizadas e era mantido um perfil de tensão adequado nos barramentos do cluster. Esta ferramenta baseou-se na metodologia de optimização EPSO em parceria com o software para resolução de trânsitos de potência MATPOWER, sendo testada num cluster de parques eólicos constituído por geradores síncronos de velocidade variável.

Abstract

Currently, the importance of reducing the environmental impacts produced by conventional energy production has motivated a considerable growth in the integration of wind energy in electricity grids. Thus, the system operator has need to clearly define connection conditions, from these new producers, to the electricity grids in order to guarantee the safety standards of exploitation that characterize the functioning of electrical energy.

As a way to meet new safety requirements and quality in the production of electricity imposed by network operators, manufacturers of wind turbines have improved the technical capabilities of its wind turbines with the use of electronic interfaces, which has allowed to explore the potential not usual in conventional wind turbines.

Taking into account all these aspects, this work aimed at creating a tool for managing reactive power on a cluster of wind farms, in order to contribute to the injection of reactive power to the upstream network, as required by the operator of the system, while ensuring that the losses on the internal network of the cluster were minimized and was kept a proper voltage profile in all the cluster's buses. This tool was based on the EPSO optimization methodology in partnership with the software for solving power flows, MATPOWER, being tested on a cluster of wind farms consisting of variable-speed synchronous generators.

Agradecimentos

Teria sido impossível realizar o presente trabalho sem a ajuda e contributo de um vasto conjunto de pessoas.

Uma primeira palavra é dirigida ao meu orientador, Professor Doutor Carlos Moreira, bem como ao meu co-orientador, Mestre Bernardo Silva. Todos os conhecimentos técnicos e científicos, apoio constante e incansável, sugestões relevantes, paciência e disponibilidade que me deram, foram um contributo muito importante para o desenrolar desta dissertação. Aos dois dirijo os meus sinceros agradecimentos.

Em seguida, gostaria de agradecer aos meus Pais, por todo o amor, confiança e apoio incondicional. Não basta um muito obrigado para agradecer a educação que me proporcionaram e todo o esforço que realizaram para esse processo. Agradeço também à minha irmã pela compreensão que teve comigo durante estes meses.

À minha namorada Cristiana, por todo o incentivo, apoio psicológico, compreensão e companhia que sempre me proporcionou.

A todos os Professores, que me ajudaram e motivaram a melhorar as minhas capacidades, influenciando em muito as minhas decisões académicas.

A todos os colegas e amigos, desejo agradecer todo o companheirismo, amizade e motivação que durante todo este período me permitiram ultrapassar um pouco melhor, todas as dificuldades encontradas.

Muito Obrigado.

Índice

| | |
|---|-----------|
| Resumo | iii |
| Abstract..... | v |
| Agradecimentos | vii |
| Índice | ix |
| Lista de figuras..... | xi |
| Lista de tabelas | xv |
| Abreviaturas e Símbolos..... | xvii |
| Capítulo 1 | 1 |
| Introdução | 1 |
| 1.1 - Enquadramento..... | 1 |
| 1.2 - Motivação..... | 2 |
| 1.3 - Estrutura da Dissertação..... | 3 |
| Capítulo 2 | 5 |
| Sistemas de Produção de Energia Eólica | 5 |
| 2.1 - Introdução | 5 |
| 2.2 - Principais Tecnologias de Aerogeradores | 6 |
| 2.3 - Parques Eólicos e Clusters de Parques Eólicos | 12 |
| 2.4 - Requisitos de Ligação à Rede | 13 |
| 2.5 - Metodologias de Gestão de Potência Reactiva em Clusters | 16 |
| Capítulo 3 | 25 |
| Gestão de Potência Reactiva em Clusters de Parques Eólicos | 25 |
| 3.1 - Descrição do problema | 25 |
| 3.2 - Formulação do problema | 27 |
| 3.3 - Metodologia de resolução do problema | 28 |
| Capítulo 4 | 39 |
| Aplicação da metodologia de gestão de potência reactiva em clusters de parques eólicos..... | 39 |
| 4.1 - Caso de estudo..... | 39 |
| 4.2 - Formulação detalhada do problema | 43 |
| 4.3 - Cenários..... | 48 |
| 4.4 - Resultados | 50 |

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| Capítulo 5 | 58 |
| Conclusões e trabalhos futuros | 58 |
| Trabalhos futuros: | 59 |
| Referências | 60 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo [4] | 6 |
| Figura 2 - Gerador de Indução Duplamente Alimentado [4] | 7 |
| Figura 3 - Gerador Síncrono de Velocidade Variável [4] | 7 |
| Figura 4 - Configurações de conversores utilizados para interligar o PMSG à rede eléctrica[5] | 10 |
| Figura 5 - . Esquema simplificado dos modelos de aerogeradores usados actualmente [5] | 11 |
| Figura 6 - Topologias de Clusters. (a) Horizontal.[6] (b) Vertical-do tipo diagonal. [6](c) Vertical - do tipo “coluna”.[6] (d) Configuração mista[6] | 13 |
| Figura 7 - Curva tensão -tempo da capacidade exigida às instalações de produção eólicas para suportarem cavas de tensão [9] | 15 |
| Figura 8 - Curva característica da corrente reactiva entregue pelo parque eólico durante/depois do defeito. (1) Região da ocorrência de defeito e pós-defeito. (2) Região normal de operação [7] | 15 |
| Figura 9 - Configuração de um condensador com comutação por t́ristor [10]..... | 17 |
| Figura 10 - Configuração de uma bobina com comutação por t́ristor [10] | 18 |
| Figura 11 - Esquema adaptado de uma topologia de compensação de potência reactiva usando conversor fonte de corrente [10] | 18 |
| Figura 12 - Topologia de compensação de potência reactiva usando conversor fonte de tensão. [10]..... | 19 |
| Figura 13 - Característica de operação de Q(P) de um gerador de indução duplamente alimentado [12] | 20 |
| Figura 14 - Gama de operação de um gerador síncrono de velocidade variável parametrizada em função da tensão nominal, U_t . [3] | 21 |
| Figura 15 - Parque eólico offshore ligado à rede [12] | 22 |
| Figura 16 - Representação de um indivíduo X com n variáveis reais. A variável σ define a amplitude (variância) do processo aleatório de mutação que originará os λ descendentes. [14] | 31 |

| | |
|--|----|
| Figura 17 - Ilustração do movimento de uma partícula i , influenciada pelos termos de inércia, memória e cooperação..... | 33 |
| Figura 18 - Funções de penalidade comuns para o EPSO [19]..... | 37 |
| Figura 19 - Esquema unifilar do cluster de parques eólicos para caso de estudo | 40 |
| Figura 20 - Curva P-Q de gerador síncrono de velocidade variável utilizado[21]..... | 41 |
| Figura 21 - Estrutura da partícula para o caso de estudo..... | 45 |
| Figura 22 - Potência activa gerada no cenário 1 de exploração | 48 |
| Figura 23 - Potência activa gerada no cenário 2 de exploração | 49 |
| Figura 24 - Potência activa gerada no cenário 3 de exploração | 49 |
| Figura 25 - Potência activa gerada no cenário 4 de exploração | 49 |
| Figura 26 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 1 (30 partículas e 500 iterações) | 51 |
| Figura 27 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 2 (30 partículas e 500 iterações) | 52 |
| Figura 28 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 3 (30 partículas e 500 iterações) | 53 |
| Figura 29 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 4 (30 partículas e 500 iterações) | 54 |
| Figura 30 - Evolução da fitness das partículas para cenário 1 com 50 partículas e 1000 iterações | 55 |
| Figura 31 - Evolução da fitness das partículas para cenário 2 com 30 partículas e 1000 iterações | 56 |
| Figura 32 - Potência reactiva gerada para cenário 1 com 30 partículas e 500 iterações | 63 |
| Figura 33 - Evolução da fitness das partículas para cenário 1 com 30 partículas e 500 iterações | 64 |
| Figura 34 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 1 com 30 partículas e 500 iterações | 64 |
| Figura 35 - Potência reactiva gerada para cenário 1 com 30 partículas e 1000 iterações | 65 |
| Figura 36 - Evolução da fitness das partículas para cenário 1 com 30 partículas e 1000 iterações | 65 |
| Figura 37 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 1 com 30 partículas e 1000 iterações | 65 |
| Figura 41 - Potência reactiva gerada para cenário 1 com 50 partículas e 500 iterações | 66 |
| Figura 42 - Evolução da fitness das partículas para cenário 1 com 50 partículas e 500 iterações | 66 |

| | |
|--|----|
| Figura 43 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 1 com 50 partículas e 500 iterações..... | 67 |
| Figura 44 - Potência reactiva gerada para cenário 1 com 50 partículas e 1000 iterações | 67 |
| Figura 45 - Evolução da fitness das partículas para cenário 1 com 50 partículas e 1000 iterações | 68 |
| Figura 46 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 1 com 50 partículas e 1000 iterações | 68 |
| Figura 50 - Potência reactiva gerada para cenário 2 com 30 partículas e 500 iterações..... | 69 |
| Figura 51 - Evolução da fitness das partículas para cenário 2 com 30 partículas e 500 iterações | 69 |
| Figura 52 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 2 com 50 partículas e 500 iterações..... | 70 |
| Figura 53 - Potência reactiva gerada para cenário 2 com 30 partículas e 1000 iterações | 70 |
| Figura 54 - Evolução da fitness das partículas para cenário 2 com 30 partículas e 1000 iterações | 71 |
| Figura 55 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 2 com 30 partículas e 1000 iterações | 71 |
| Figura 59 - Potência reactiva gerada para cenário 2 com 50 partículas e 500 iterações..... | 72 |
| Figura 60 - Evolução da fitness das partículas para cenário 2 com 50 partículas e 500 iterações | 72 |
| Figura 61 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 2 com 50 partículas e 500 iterações..... | 73 |
| Figura 62 - Potência reactiva gerada para cenário 2 com 50 partículas e 1000 iterações | 73 |
| Figura 63 - Evolução da fitness das partículas para cenário 2 com 50 partículas e 1000 iterações | 74 |
| Figura 64 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 2 com 50 partículas e 1000 iterações | 74 |
| Figura 68 - Potência reactiva gerada para cenário 3 com 30 partículas e 500 iterações..... | 75 |
| Figura 69 - Evolução da fitness das partículas para cenário 3 com 30 partículas e 500 iterações | 75 |
| Figura 70 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 3 com 30 partículas e 500 iterações..... | 76 |
| Figura 71 - Potência reactiva gerada para cenário 3 com 30 partículas e 1000 iterações | 76 |
| Figura 72 - Evolução da fitness das partículas para cenário 3 com 30 partículas e 1000 iterações | 77 |
| Figura 73 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 3 com 30 partículas e 1000 iterações | 77 |

| | |
|---|----|
| Figura 77 - Potência reactiva gerada para cenário 3 com 50 partículas e 500 iterações | 78 |
| Figura 78 - Evolução da fitness das partículas para cenário 3 com 50 partículas e 500 iterações | 78 |
| Figura 79 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 3 com 50 partículas e 500 iterações | 79 |
| Figura 80 - Potência reactiva gerada para cenário 3 com 50 partículas e 1000 iterações | 79 |
| Figura 81 - Evolução da fitness das partículas para cenário 3 com 50 partículas e 1000 iterações | 80 |
| Figura 82 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 3 com 50 partículas e 1000 iterações | 80 |
| Figura 86 - Potência reactiva gerada para cenário 4 com 30 partículas e 500 iterações | 81 |
| Figura 87 - Evolução da fitness das partículas para cenário 4 com 30 partículas e 500 iterações | 81 |
| Figura 88 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 4 com 30 partículas e 500 iterações | 82 |
| Figura 89 - Potência reactiva gerada para cenário 4 com 30 partículas e 1000 iterações | 82 |
| Figura 90 - Evolução da fitness das partículas para cenário 4 com 30 partículas e 1000 iterações | 83 |
| Figura 91 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 4 com 30 partículas e 1000 iterações | 83 |
| Figura 95 - Potência reactiva gerada para cenário 4 com 50 partículas e 500 iterações | 84 |
| Figura 96 - Evolução da fitness das partículas para cenário 4 com 50 partículas e 500 iterações | 84 |
| Figura 97 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 4 com 50 partículas e 500 iterações | 85 |
| Figura 98 - Potência reactiva gerada para cenário 4 com 50 partículas e 1000 iterações | 85 |
| Figura 99 - Evolução da fitness das partículas para cenário 4 com 50 partículas e 1000 iterações | 86 |
| Figura 100 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 4 com 50 partículas e 1000 iterações | 86 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Potência instalada de energia eólica na União Europeia [2] | 2 |
| Tabela 2 - tg phi a ser assegurada pelos parques eólicos no ponto de interligação..... | 16 |
| Tabela 3 - Gama de tensões estipulada para barramentos da rede interna do cluster..... | 42 |
| Tabela 4 - Razões de transformação dos transformadores da rede interna..... | 44 |
| Tabela 5 - Informação dos barramentos [22]..... | 46 |
| Tabela 6 - Informação dos geradores [22] | 46 |
| Tabela 7 - Informação das linhas de transmissão [22]..... | 47 |
| Tabela 10 - Comparação resultados para o cenário 2 de produção | 52 |
| Tabela 12 - Comparação resultados para o cenário 3 de produção | 53 |
| Tabela 13 - Comparação resultados para o cenário 4 de produção (variáveis de decisão) | 54 |
| Tabela 14 - Comparação resultados para o cenário 4 de produção | 54 |
| Tabela 16 - Análise da robustez do algoritmo..... | 57 |
| Tabela 17 - Partícula óptima para cenário 1 com 30 partículas e 500 iterações | 63 |
| Tabela 18 - Partícula óptima para cenário 1 com 30 partículas e 1000 iterações..... | 64 |
| Tabela 20 - Partícula óptima para cenário 1 com 50 partículas e 500 iterações | 66 |
| Tabela 21 - Partícula óptima para cenário 1 com 50 partículas e 1000 iterações..... | 67 |
| Tabela 23 - Partícula óptima para cenário 2 com 30 partículas e 500 iterações | 69 |
| Tabela 24 - Partícula óptima para cenário 2 com 30 partículas e 1000 iterações..... | 70 |
| Tabela 26 - Partícula óptima para cenário 2 com 50 partículas e 500 iterações | 72 |
| Tabela 27 - Partícula óptima para cenário 2 com 50 partículas e 1000 iterações..... | 73 |
| Tabela 29 - Partícula óptima para cenário 3 com 30 partículas e 500 iterações | 75 |

| | |
|---|----|
| Tabela 30 - Partícula óptima para cenário 3 com 30 partículas e 1000 iterações..... | 76 |
| Tabela 32 - Partícula óptima para cenário 3 com 50 partículas e 500 iterações | 78 |
| Tabela 33 - Partícula óptima para cenário 3 com 50 partículas e 1000 iterações..... | 79 |
| Tabela 35 - Partícula óptima para cenário 4 com 30 partículas e 500 iterações | 81 |
| Tabela 36 - Partícula óptima para cenário 4 com 30 partículas e 1000 iterações..... | 82 |
| Tabela 38 - Partícula óptima para cenário 4 com 50 partículas e 500 iterações | 84 |
| Tabela 39 - Partícula óptima para cenário 4 com 50 partículas e 1000 iterações..... | 85 |

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

| | |
|---------|--|
| APSO | <i>Adaptive Particle Swarm Optimization</i> |
| DDPMSG | <i>Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Generator</i> |
| DFIG | <i>Doubly Fed Induction Generator</i> |
| EPSO | <i>Evolutionary Particle Swarm Optimization</i> |
| GC | <i>Grid Codes</i> |
| PE | Parque Eólico |
| PSO | <i>Particle Swarm Optimization</i> |
| RNT | Rede Nacional de Transporte |
| SEE | Sistema Eléctrico de Energia |
| STATCOM | <i>Static Synchronous Compensator</i> |

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo será feita uma pequena introdução à energia eólica, assim como também será apresentada a motivação inicial para a realização deste trabalho. Ainda neste capítulo é apresentada a estrutura desta tese.

1.1 - Enquadramento

A energia eléctrica tem cada vez mais uma maior importância na sociedade actual, verificando-se elevados consumos nos países desenvolvidos, e um aumento dos consumos, nos países em vias de desenvolvimento.

No presente vive-se um momento de mudança devido à necessidade de responder aos desafios criados pelas alterações climáticas e de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, para produção de energia eléctrica. Com a crise petrolífera da década de 70 e a necessidade de assegurar uma diversidade e segurança no abastecimento energético, o interesse pelas energias renováveis aumentou. A crise ambiental e a necessidade de reduzir as emissões de CO₂ (Protocolo de Quioto) incitaram de forma decisiva o recurso a estas energias renováveis.

Presentemente, a energia eólica é uma das mais promissoras formas de energia renovável, devido à sua tecnologia já consistente e madura. [1] Os grandes centros de exploração eólica encontram-se maioritariamente na Europa e nos E.U.A. . Na tabela 1 encontra-se representada a potência total instalada em parques eólicos na União Europeia, ao longo da última década, que tem sido uma das regiões mais fortes no desenvolvimento deste tipo de energia .[2]

Tabela 1 - Potência instalada de energia eólica na União Europeia [2]

| Total Installed Capacity | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Year | 2001** | 2002** | 2003** | 2004* | 2005* | 2006* | 2007 | 2008 | 2009 |
| MW | 17,315 | 23,159 | 28,598 | 34,371 | 40,511 | 48,029 | 56,531 | 64,719 | 74,767 |
| **EU 15 | | | | | | | | | |
| *EU 25 | | | | | | | | | |

A nível nacional a situação é idêntica à vivida no resto da Europa, tendo a agravante de Portugal não ter recursos energéticos fósseis, tendo por isso uma necessidade superior de recorrer às fontes de energia alternativas, com vista a evitar uma dependência energética acentuada.

A nível ambiental sabe-se que, por cada MWh de energia eléctrica de origem eólica são reduzidas entre 0,8 a 0,9 toneladas de emissões de gases com efeito de estufa que seriam produzidas pela utilização dos combustíveis fósseis na produção de energia eléctrica. A produção eólica deverá ser acompanhada de medidas eficazes de redução do consumo de energia através do aumento da eficiência energética e da utilização racional da energia. [1]

Esta forma de energia tem vindo a ser alvo de uma elevada penetração no sistema de energia eléctrica. Desta forma, tem vindo a ser exigido dos parques eólicos uma capacidade de controlo da sua potência activa e reactiva produzidas, sobretudo se este tipo de energia entra directamente em mercado, ou quando existem restrições por parte da rede que exigem um controlo rigoroso sobre as potências produzidas.

1.2 - Motivação

A introdução de fontes de energia renovável no sistema eléctrico, em particular fontes de energia do tipo eólica, foi alvo de suspeita por parte dos operadores de rede, uma vez que estes receavam os impactos que estas pudessem ter no sistema eléctrico, principalmente pela intermitência do vento. No entanto com os elevados desenvolvimentos tecnológicos, os aerogeradores possuem hoje em dia capacidades técnicas que permitem uma maior fiabilidade, o que promove a confiança na energia eólica.

Com esta confiança, é aumentada a aposta em cada vez mais potência instalada, o que passa pela construção de novos parques eólicos. Com a concentração de parques eólicos numa reduzida área geográfica, surge por vezes a exploração do conjunto de parques por um cluster de parques eólicos. Este cluster de parques eólicos, deverá responder aos requisitos do operador de sistema, tal como uma central convencional, sendo um dos principais requisitos a manutenção do factor de potência no ponto de interligação com a rede. Pretende-se desta forma criar métodos de gestão de potência reactiva, de modo a cumprir com as exigências do operador de sistema ao mesmo tempo, que do ponto de vista dos promotores dos parques eólicos, os lucros são aumentados com a redução de perdas activas e a garantia de manutenção de um perfil de tensão adequado à exploração.

1.3 - Estrutura da Dissertação

A apresentação do trabalho desenvolvido distribui-se por cinco capítulos e um anexo.

No primeiro capítulo, encontra-se a introdução, onde se procede também à justificação pelo interesse do tema, o seu enquadramento, e a organização do documento.

No capítulo 2 encontram-se caracterizados os sistemas de conversão de energia eólica, fazendo-se também referência à definição de parques eólicos e clusters de parques eólicos, os requisitos de ligação à rede e algumas metodologias de gestão de potência reactiva em clusters.

No capítulo 3 é exposto o problema de gestão de potência reactiva em clusters de parques eólicos, bem como a formulação do problema e a metodologia de resolução do mesmo.

No quarto capítulo é apresentado o caso de estudo, descrita a formulação detalhada do problema, os vários cenários de teste e feita uma discussão dos resultados.

O quinto capítulo é reservado para as conclusões e trabalhos futuros que podem vir a ser desenvolvidos.

Capítulo 2

Sistemas de Produção de Energia Eólica

2.1 - Introdução

Um sistema de produção de energia eólica tem como finalidade a produção de energia eléctrica através da transformação da energia cinética existente no vento. Quando a energia cinética do vento entra em contacto com as pás de um aerogerador, leva a que a turbina mecânica associada, produza a energia necessária para accionar o gerador acoplado, e assim este a produzir a energia eléctrica.

No passado, um sistema de conversão de energia eólica em electricidade era considerado como uma fonte de potência não controlada. No entanto, com o desenvolvimento tecnológico tem vindo a ser aumentada a capacidade de controlo dos aerogeradores, o que tem permitido por sua vez estabelecer uma capacidade de controlo aos parques eólicos, imprescindível actualmente, devido à grande potência instalada que alguns parques possuem, e ao facto de estes terem vindo a substituir os sistemas de produção convencionais.

Neste capítulo é feita uma pequena introdução ao conceito de sistema de produção de energia eólica, assim como também são apresentadas as principais tecnologias de produção de energia eólica. São também introduzidos os requisitos de ligação à Rede eléctrica, e ainda é feita uma abordagem às metodologias de gestão de potência reactiva em clusters de parques eólicos.

2.2 - Principais Tecnologias de Aerogeradores

Relativamente às tecnologias de aerogeradores, estes podem ser agrupados em duas classes distintas, que diferem entre si no que respeita à sua velocidade de operação:

- Aerogeradores de velocidade fixa
- Aerogeradores de velocidade variável

Dentro das duas categorias mencionadas acima, descreve um pouco mais em pormenor, as principais tecnologias presentes nos parques eólicos.

Existem três tipos de aerogeradores usados actualmente[3] :

- Aerogerador de velocidade fixa com Gerador de Indução com Rotor em Gaiola de Esquilo. (Fig.1)
- Aerogerador de velocidade variável com Gerador de Indução Duplamente Alimentado. (Fig.2)
- Aerogerador de velocidade variável com Gerador Síncrono com Conversor Integral. (Fig.3)

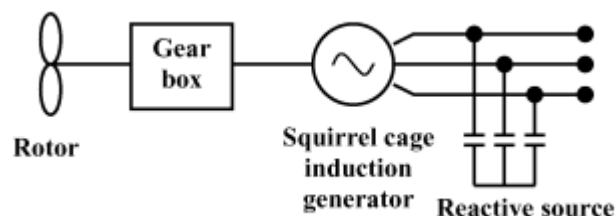


Figura 1 - Gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo [4]

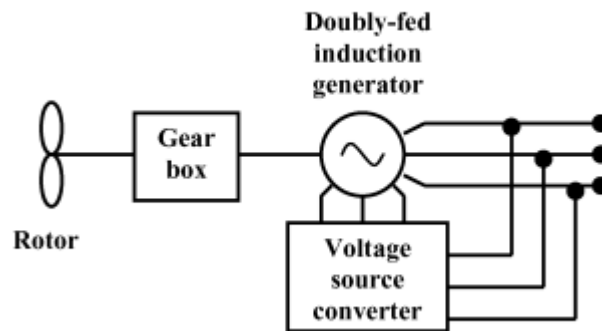


Figura 2 - Gerador de Indução Duplamente Alimentado [4]

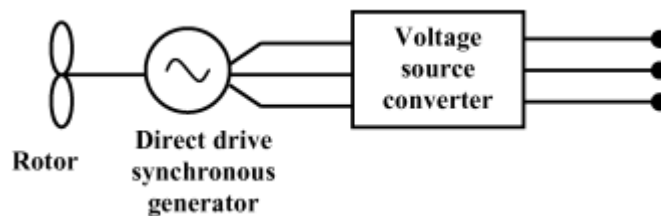


Figura 3 - Gerador Síncrono de Velocidade Variável [4]

2.2.1 - Aerogerador de velocidade fixa com gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo[5]

Os aerogeradores de velocidade fixa com gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo são simples e robustos, apresentando um baixo custo de investimento, mas no entanto possibilitam uma reduzida controlabilidade. As estratégias de controlo que, em geral, são adoptadas neste tipo de tecnologia, consistem apenas em estratégias aerodinâmicas que exploram:

- Os perfis das pás da turbina eólica através do controlo por *stall*-passivo visando proteger o aerogerador durante velocidades extremas de vento. Este controlo, basicamente, é aplicado a aerogeradores convencionais com potências nominais inferiores a 1MW.[5]
- A orientação das pás da turbina através do controlo por *stall*-activo ou controlo de *pitch* de forma a compensar variações da velocidade do rotor, bem como de proteger a integridade física do sistema eólico em elevadas velocidades de vento. Em comum, ambos os controlos são utilizado em aerogeradores com potências nominais iguais ou superiores a 1MW. [5]

Esta tecnologia tem uma velocidade de operação que assenta numa estreita margem de velocidade angular (ligeiramente acima da velocidade angular síncrona, $\omega_s = 2\pi fs$) que é definida consoante o deslizamento do gerador assíncrono que, em geral, varia de 1 a 2% em relação ao deslizamento nominal de operação. Por esta razão, são denominados como aerogeradores de velocidade fixa.

Um dos principais problemas dos parques eólicos convencionais consiste no significativo consumo de potência reactiva por parte dos aerogeradores de indução, nomeadamente, na fase de recuperação que se segue a um curto-circuito. Apesar da presença de baterias de condensadores utilizadas para compensar parte da potência reactiva solicitada pelo circuito magnético da máquina, estes componentes contribuem muito pouco para atenuar o elevado consumo dessa potência, após a eliminação do defeito, devido à redução da tensão aos terminais do gerador. Neste caso, a potência reactiva requerida pelos aerogeradores torna-se exclusivamente procedente da rede eléctrica. [3] [5]

Este facto afigura-se como uma das principais causas da saída de serviço dos parques eólicos convencionais após um curto-circuito devido, principalmente, à actuação da protecção de máximo de velocidade do aerogerador. Quando o defeito é eliminado, o gerador continua a absorver potência reactiva da rede eléctrica para alimentar o seu circuito magnético de forma a tentar recuperar a corrente reactiva injectada pelo mesmo, e por conseguinte, voltar, à condição normal de operação.

Quanto mais aerogeradores de indução estiverem ligados à rede mais energia reactiva absorverão da mesma. Numa rede forte, grande parte dos sistemas eólicos com geradores de indução consegue permanecer ligada à rede, e recupera rapidamente a entrega de potência activa à rede eléctrica, após a eliminação do defeito. No entanto, numa rede mais pequena a quantidade de potência reactiva solicitada pelos parques eólicos pode não ser suficiente comprometendo desta forma a recuperação da tensão em caso de permanecerem em serviço.[5]

2.2.2 - Aerogerador de velocidade variável com gerador de indução duplamente alimentado[5]

O aerogerador de velocidade variável com gerador de indução duplamente alimentado (“Doubly Fed Induction Wind Generator” (DFIWG) , na literatura anglo-saxónica) opera com velocidade variável recorrendo a conversores electrónicos com capacidades nominais bastante reduzidas, de aproximadamente 10-25% da capacidade nominal do conjunto turbina/gerador. Apesar de uma melhor relação custo benefício, relativamente às demais tecnologias de mesma capacidade nominal, o DFIWG utiliza caixa de velocidades implicando assim custos adicionais.

Nesta tecnologia a configuração CA-CC-CA de conversores é ligada entre o rotor da máquina e a rede eléctrica. O conversor ligado à rede opera com a frequência do sistema eléctrico (50 Hz) impondo, assim, a frequência de saída do DFIWG. O conversor ligado ao rotor opera com diferentes frequências de acordo com a velocidade do gerador. É este dispositivo quem controla o DFIWG injectando tensões ou correntes controladas no rotor da máquina eléctrica a partir de estratégias de controlo pré-definidas.

A principal desvantagem deste modelo aponta para o parcial desacoplamento entre o aerogerador e a rede eléctrica. Devido ao facto de estar ligado directamente à rede eléctrica através do estator, o aerogerador é mais sensível às perturbações de rede. No entanto, técnicas de controlo adequadas têm vindo a tornar o DFIWG cada vez mais robusto o que tem contribuído para o significativo aumento da utilização deste tipo de tecnologia nos últimos anos. [5]

2.2.3 - Aerogerador de velocidade variável com gerador síncrono com conversor integral [3] [5]

O aerogerador de velocidade variável com gerador síncrono com conversor integral, opera em velocidade variável, com o uso de controlo de pitch ou stall-activo para o ajuste dos ângulos das pás da turbina de forma a captar máxima energia do vento. A potência máxima extraída é então transferida para o sistema eléctrico a partir de uma configuração em cascata CA-CC-CA de conversores electrónicos que interliga o estator do aerogerador à rede eléctrica. O conversor ligado ao sistema eléctrico além de fixar a frequência eléctrica de saída do aerogerador consoante a frequência da rede (50 Hz) fornece também capacidade de potência reactiva e de tensão.

Nesta concepção, o aerogerador não possui caixa de velocidades, pelo que implica ter um gerador eléctrico com um elevado número de pólos para compensar a baixa velocidade com que opera devido a estar directamente conectado à turbina eólica, cujas pás, tipicamente, giram a velocidades de 30 a 50 rot./min. A eliminação da caixa de velocidades permite obter uma variedade

de benefícios, como o melhoramento da eficiência, a redução do peso do aerogerador e a redução de níveis de ruído e de custos associada à manutenção regular deste componente. [5]

Esta tecnologia contempla a utilização possui o gerador excitado electricamente (gerador síncrono com rotor bobinado) ou com ímanes permanentes (gerador síncrono de ímanes permanentes)[3]. No caso deste último, para realizar a ligação do aerogerador à rede eléctrica pode ser usada uma vasta gama de conversores electrónicos de potência. Em baixo mostra-se dois tipos de configurações têm vindo a ser utilizadas pelos fabricantes de aerogeradores, como ilustra a figura 4.

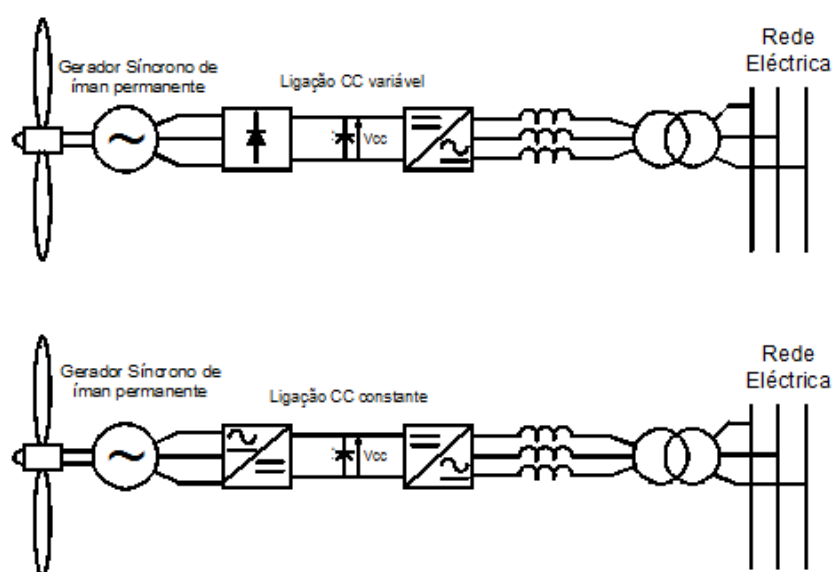


Figura 4 - Configurações de conversores utilizados para interligar o PMSG à rede eléctrica[5]

Este sistema tem como principal vantagem, o total desacoplamento entre o aerogerador e a rede eléctrica devido à presença dos conversores electrónicos. Quando, por exemplo, uma rajada de vento atinge a turbina, os conversores continuam, praticamente, a entregar uma potência constante à rede apesar da súbita variação de velocidade do turbina eólica. No entanto, parte dessa variação de velocidade é atenuada pela própria inércia do sistema mecânico, bem como, compensada pela actuação dos controlos aerodinâmicos.

Por outro lado, devido aos conversores estarem presentes na saída do aerogerador, é necessário dimensionar este conjunto de conversores de acordo com a potência nominal do conjunto turbina/gerador o que aumenta os custos desta tecnologia.

Com o resultado de recentes avanços tecnológicos feitos por um dos maiores fabricantes deste tipo de tecnologia - ENERCON - a maior parte dos problemas relacionados com o custo elevado destes aerogeradores tende agora a desaparecer, permitindo assim uma maior disseminação desta tecnologia. [5]

2.2.4 - Outras tecnologias eólicas

Além dos três tipos de geradores normalmente presentes nos parques eólicos, salienta-se a existência de outros tipos de aerogeradores que também são explorados, embora em pequena escala. Faz-se assim referência ao aerogerador síncrono convencional que necessita de controlo adicional para a tensão de campo e ao gerador de relutância (tipo particular de gerador de indução). Estas tecnologias realizam a sua ligação à rede através, também de diversas configurações de dispositivos de electrónica de potência. Na figura 5 abaixo, é apresentado um esquema que resume as diversas tecnologias utilizadas nos parques eólicos. [5]

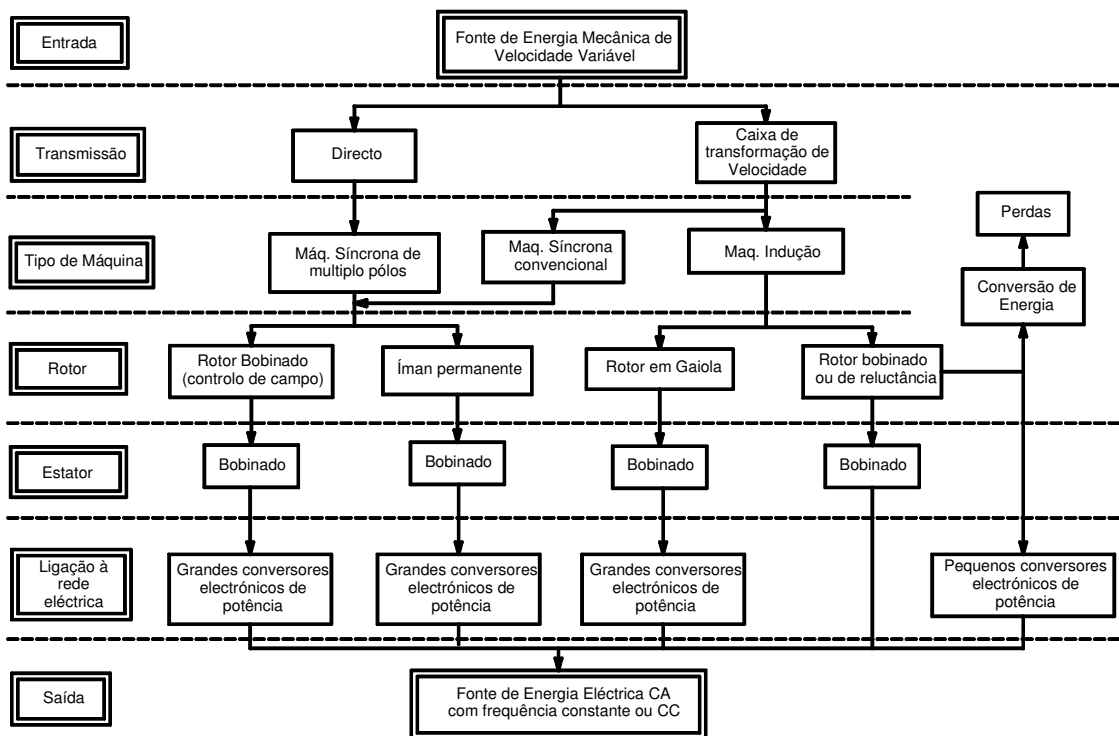


Figura 5 - . Esquema simplificado dos modelos de aerogeradores usados actualmente [5]

2.3 - Parques Eólicos e Clusters de Parques Eólicos

Devido à aposta que tem sido efectuada na produção de energia eléctrica a partir de energia eólica o número de parques eólicos tem aumentado. Desta forma, pode acontecer que exista uma grande concentração de aproveitamentos eólicos numa determinada área geográfica, de modo a beneficiarem de possíveis condições técnicas favoráveis relativas à exploração do recurso eólico, presentes nessa mesma área. Surgem desta forma, os clusters de parques eólicos, correspondendo aos agrupamentos de pequenos parques de menor dimensão, interligados através de uma rede de uso privado. [6]

Na altura de concessão da exploração de parques eólicos aos promotores, feita através de concurso, as seguintes características técnicas são valorizadas, caso estejam disponíveis [7]:

- Gestão de parques eólicos por clusters
- Capacidade adicional de controlo de potência reactiva
- Interrupção/redução da produção eólica
- Soluções de armazenamento (uso de centrais hídricas com bombagem e armazenamento)
- Participação no controlo primário de frequência.

Relativamente à configuração de clusters de parques eólicos, é usual a sua organização de acordo com as seguintes topologias (fig. 6): [6]

- Horizontal - quando os parques eólicos estão dispostos em linha de frente para a direcção do vento dominante, actuando em conjunto a uma frente de vento. Especialmente utilizada em zonas costeiras de modo a captar a regular a brisa marítima.
- Vertical - esta topologia toma duas variantes : em “diagonal “ e em “coluna”. Desta os vários parques eólicos reagem sucessivamente a uma frente de vento. É a topologia ideal para adoptar em vales que façam a ligação entre áreas geográficas distantes e com bons regimes de vento.
- Mista- é um híbrido entre as duas topologias anteriores, tendo assim o cluster, uma disposição irregular.

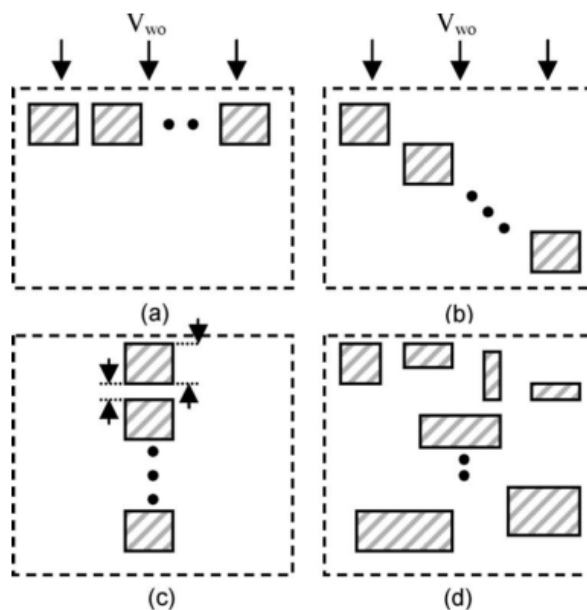


Figura 6 - Topologias de Clusters. (a) Horizontal.[6] (b) Vertical-do tipo diagonal. [6](c) Vertical - do tipo "coluna".[6] (d) Configuração mista[6]

2.4 -Requisitos de Ligação à Rede

A progressiva integração nas redes eléctricas de fontes de produção independentes e não sujeitas a despacho, explorando energias renováveis com carácter de intermitência e utilizando sistemas de conversão de energia não convencionais, tem vindo a exigir que se definam com clareza as condições de acesso destes produtores às redes eléctricas e a forma de garantir os elevados padrões de segurança de exploração que caracterizam o funcionamento do sistema eléctrico de energia.

Neste contexto, grande número de operadores de sistema têm vindo a realizar/actualizar os Grid Codes (GC) (Códigos de Rede) já existentes e a definir requisitos adicionais para as novas unidades de produção, tendo em conta a especificidade dos novos sistemas de conversão de energia, nomeadamente no caso dos aerogeradores.

A actualização dos GC em face desta nova realidade visa assegurar que os novos produtores forneçam a informação necessária para caracterizar o funcionamento dos seus equipamentos de produção, permitindo também ao operador de sistema efectuar estudos de planeamento de exploração. A definição das condições de ligação às redes, tendo em conta a necessidade de

assegurar a robustez de operação do sistema é também um aspecto considerado. O estabelecimento dos requisitos técnicos que as unidades de produção devem satisfazer quando ligadas sobre o sistema, quer em condições normais de exploração quer em condições de perturbação é também objecto de tratamento.

As condições de funcionamento da rede no ponto de interligação referem-se ao Factor de Potência, ao Controlo da Frequência, ao Comportamento durante um Curto-circuito e à Gama de Frequências de operação. Com o aumento da utilização de geradores assíncronos, essencialmente em pequenos aproveitamentos eólicos, a realidade do sistema eléctrico foi sendo alterada. Mais recentemente, e devido ao desenvolvimento tecnológico no domínio da energia eólica, os geradores utilizados passaram a explorar sistemas de conversão baseados em electrónica de potência, quer associando-se a máquinas de indução quer em conjunto com geradores síncronos de velocidade variável. Estes sistemas apresentam algumas debilidades, nomeadamente em face de perturbações no sistema, que resultam em parte de características intrínsecas dos dispositivos de electrónica de potência, exigindo uma atenção especial no tratamento dos correspondentes GC. [8]

Em seguida introduzem-se alguns pontos essenciais no que respeita aos requisitos necessários, relativamente à potência reactiva, para um parque eólico se poder ligar à RNT (Rede Nacional de Transporte).

De acordo com o Decreto-Lei n.º 172/2006, de 23 de Agosto, que desenvolveu as bases da organização e funcionamento do sistema eléctrico nacional, os parques eólicos têm que cumprir os seguintes requisitos técnicos:

- Assegurar que os sistemas eólicos a serem instalados têm a capacidade de se manterem em operação no acontecimento de cavas de tensão que possam resultar de curto-circuitos trifásicos, bifásicos ou monofásicos, ou outras ocorrências. O sistema eólico não deve ser desligado da rede se o valor efectivo da tensão no enrolamento do lado da rede do transformador de interligação, da instalação de produção eólica, permanecer acima da curva representada na figura 7 a, durante a perturbação ocorrida na rede que provocou a cava de tensão ou mesmo depois da sua eliminação, para o intervalo de tempo também definido na mesma curva, não podendo também consumir potência activa ou reactiva durante o defeito e na fase de recuperação de tensão. [9]
- [7]

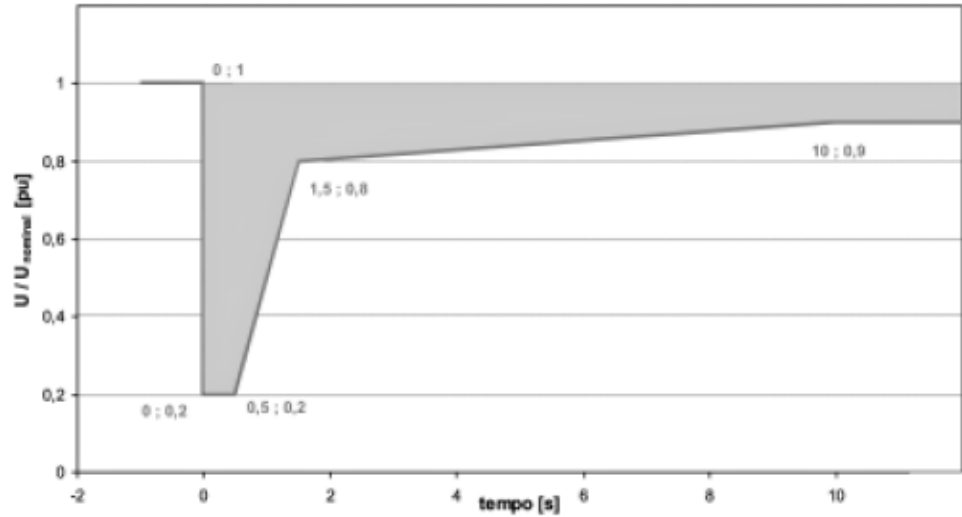


Figura 7 - Curva tensão -tempo da capacidade exigida às instalações de produção eólicas para suportarem cavas de tensão [9]

- Assegurar a capacidade de fornecer potência reactiva, durante a ocorrência de cavas de tensão, para assim auxiliar a manutenção dos níveis de tensão na rede. O valor de potência reactiva pedida é indexado ao valor da corrente reactiva que transita no ponto de interligação no período pré-defeito. Os parques eólicos são obrigados a manter o seu ponto de operação na parte branca da curva representada na figura 8. [9]

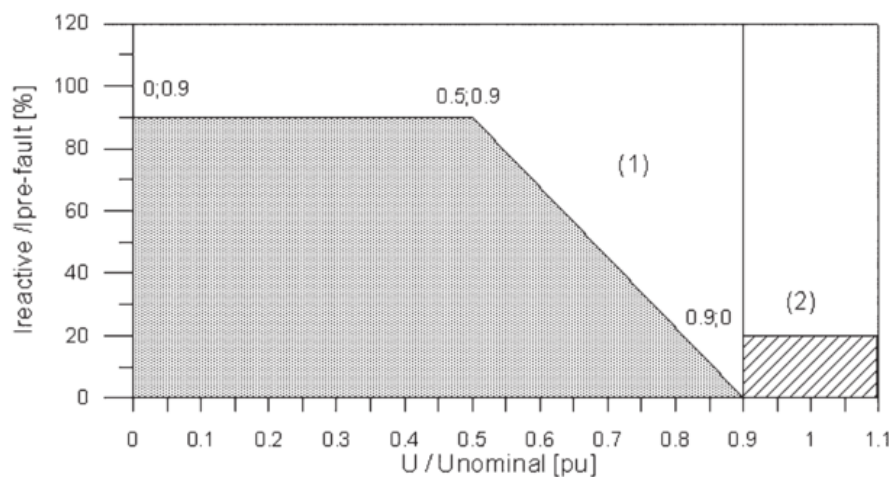


Figura 8 - Curva característica da corrente reactiva entregue pelo parque eólico durante/depois do defeito. (1) Região da ocorrência de defeito e pós-defeito. (2) Região normal de operação [7]

Todos os produtores em regime especial ligados à RNT devem, nas horas de cheia e ponta, fazer acompanhar, em regime normal de funcionamento, o fornecimento de energia activa, injectada no ponto de ligação, de uma quantidade de energia reactiva de acordo com a seguinte tabela 2:

Tabela 2 - tg phi a ser assegurada pelos parques eólicos no ponto de interligação

| Tensão nominal no ponto de ligação | tg Φ | |
|------------------------------------|-----------|----------|
| | Horas CP | Horas VS |
| MAT | 0,2 | 0 |
| AT | 0,2 | 0 |

onde CP representa as horas de cheia e ponta e VS representa as horas de vazio e super vazio.

Relativamente aos valores fixados, no quadro anterior, para as quantidades de energia reactiva, admite -se uma tolerância de $\pm 5\%$ da energia activa no mesmo período. O fornecimento de energia reactiva é controlado pelo operador da rede de transporte, podendo, desde que acordado com o mesmo, serem estabelecidos outros limites de funcionamento, devendo o produtor ter a capacidade de modular o fornecimento de energia reactiva no intervalo correspondente a uma tg Φ de 0 a 0,2. Os produtores terão ainda de pagar ao operador da rede de transporte, por uma única vez no acto da primeira ligação, os custos de instalação pelo operador, em subestações da RNT de meios para produzir energia reactiva, para além do que resulta das condições estabelecidas no ponto anterior. A potência reactiva a pagar é igual a 10 % da potência de ligação. [9]

2.5 - Metodologias de Gestão de Potência Reactiva em Clusters de Parques Eólicos

Actualmente a energia eólica possui um papel de grande importância no SEE, devido não só à reduzida quantidade de emissões de CO₂, face a outros tipos de produção de energia, mas também como uma alternativa económica interessante em áreas com velocidades de vento adequadas.

No entanto, o SEE tem maiores necessidades de controlo e gestão, e os parques eólicos têm que ir ao encontro destas necessidades, nomeadamente controlo de frequência e controlo de tensão ou potência reactiva.

Salientando a gestão de potência reactiva, sabe-se que esta tem uma importante relevância nos sistemas de transmissão, contribuindo para uma maior estabilidade e eficiência do sistema, permitindo maximizar a quantidade de potência reactiva entregue, e equilibrar o perfil de tensões.

2.5.1 - Produção de energia reactiva

As primeiras técnicas utilizadas para realizar a gestão de potência reactiva, mais concretamente para realizar a compensação da potência reactiva, eram a utilização de baterias de condensadores instaladas ao nível de cada aerogerador dos parques (solução por vezes utilizada em parques eólicos antigos equipados com máquinas de indução), complementadas com baterias de condensadores instaladas ao nível do ponto de interligação dos parques eólicos às redes. Tratam-se soluções tecnológicas tecnicamente simples e robustas que têm permitido cumprir os requisitos de ligação à rede de diversos parques eólicos.

Mais tarde, com o intuito de se obter um controlo mais rápido, rigoroso e completo surgiram os compensadores tiristorizados, associados a elementos passivos do tipo condensador e bobina, destinados a serem ligados aos pontos de interligação dos parques eólicos com a rede eléctrica. Este tipo de tecnologia vem desta forma fornecer um controlo variável mais rápido da potência reactiva. Existindo duas grandes categorias designadamente Thyristor-Switched Capacitors e Thyristor-Controlled Reactors, apresentando-se nas figuras seguintes (fig.9 e fig.10) uma representação esquemática dos mesmos.[10]

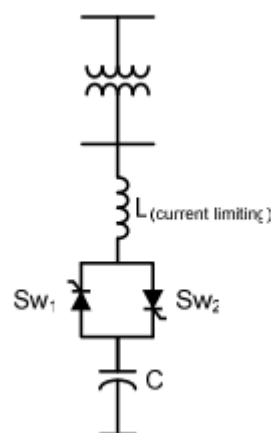


Figura 9 - Configuração de um condensador com comutação por tiristor [10]

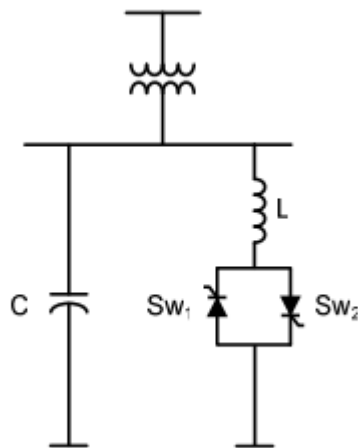


Figura 10 - Configuração de uma bobina com comutação por tioristor [10]

Com o avanço tecnológico dos dispositivos semicondutores, os conversores de potência reactiva auto-comutados provaram ser uma solução eficaz e eficiente na medida que estes mecanismos são capazes de gerar ou absorver potência reactiva sem necessitarem de grandes bancos de condensadores ou bobinas. Têm assim como vantagens o facto de serem mecanismos mais pequenos e permitirem uma redução de custos, devido à eliminação da maior parte dos componentes passivos.

Existem duas configurações principais, nomeadamente o conversor fonte de corrente (Fig. 11) e conversor fonte de tensão (Fig. 12). A configuração da figura 11 utiliza uma bobina alimentada por uma bobina por uma corrente regulada DC, enquanto que a configuração da figura 12 utiliza um condensador com tensão DC regulada. [10]

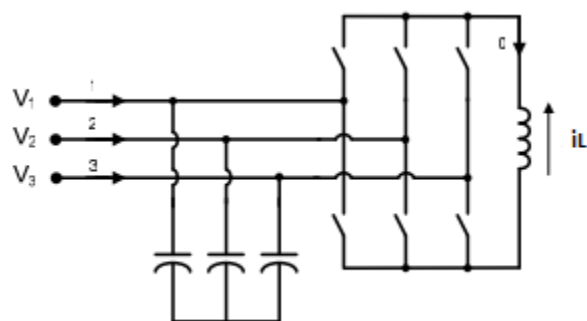


Figura 11 - Esquema adaptado de uma topologia de compensação de potência reactiva usando conversor fonte de corrente [10]

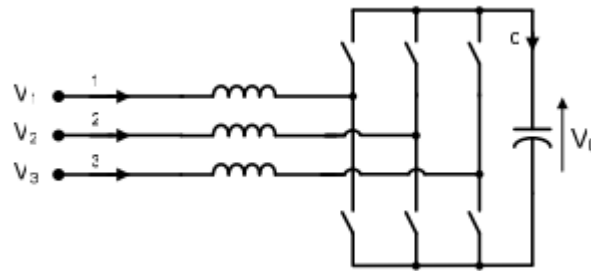


Figura 12 - Topologia de compensação de potência reactiva usando conversor fonte de tensão. [10]

Um exemplo de controlo de potência reactiva, utilizando um conversor auto-comutado, é a utilização de um compensador estático síncrono de potência reactiva ou STATCOM (Static Synchronous Compensator). Este tipo de tecnologia é baseado em conversores auto-comutados e ligada em paralelo ao sistema através de uma bobina de acoplamento. Desta forma produz três tensões sinusoidais equilibradas, à frequência fundamental e com amplitude controlável. [10]

Paralelamente à compensação de potência reactiva o controlo de tensão é por vezes feito com recurso a transformadores com regulação de tensão em carga, com o auxílio de um comutador de tomadas instalado no enrolamento de tensão mais elevada - ao qual corresponde menor intensidade de corrente. Estes permitem assim variar de forma descontínua a relação de transformação. Os transformadores com tomadas são utilizados em todos os níveis de tensão e constituem desta forma um importante meio de regulação de tensão. A variação da relação de transformação, proporcionada pelo comutador de tomadas, leva a que exista uma mudança no perfil de tensão permitindo assim alterar o fluxo de potência reactiva entre os subsistemas ligados pelo transformador. [11]

No entanto, levando o enfoque ao âmbito desta tese, de seguida ir-se-á falar da gestão da potência reactiva com base em geradores.

As características operacionais de aerogeradores equipados com máquina de indução duplamente alimentada ou de aerogeradores equipados com máquina síncrona de velocidade variável e sistema de conversão integral já descritos na secção 2.2 permitem um determinado grau de controlo da potência reactiva gerada.

A geração de potência reactiva num gerador de indução duplamente alimentado pode ser controlada pela corrente injectada no rotor pelo conversor ligado a este. Neste tipo de gerador não existe uma relação directa entre a quantidade de potência reactiva gerada e a velocidade do rotor ou a quantidade de potência activa gerada. Desta forma o gerador de

indução duplamente alimentado, tem a capacidade de, a uma determinada velocidade do rotor e à sua correspondente geração de potência activa, gerar ou consumir potência reactiva numa vasta gama de valores. Isto porque a quantidade de potência reactiva gerada (assim como o binário) depende directamente do valor da corrente injectada no rotor pelo mecanismo de electrónica de potência associado. Na figura 13 encontra-se um exemplo da curva PQ de um gerador de indução duplamente alimentado.

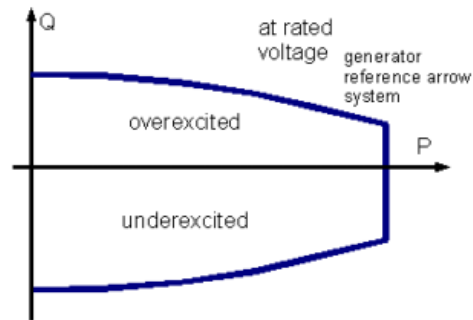


Figura 13 - Característica de operação de Q(P) de um gerador de indução duplamente alimentado [12]

No caso de uma turbina que utilize um gerador síncrono de velocidade variável a troca de potência reactiva existente entre o gerador e a rede não é dependente dos parâmetros do gerador, mas sim das funcionalidades de controlo do conversor de electrónica de potência ligado do lado da rede. O gerador encontra-se assim desacoplado da rede. Desta maneira o factor de potência do gerador e o factor de potência do lado da rede podem ser controlados independentemente. Na figura 14, encontra-se representada a gama de operação de um gerador síncrono de velocidade variável. Desta forma-se conclui-se que esta máquina permite uma gestão da potência reactiva, pois para um valor de potência activa no eixo das ordenadas, correspondem inúmeros valores de potência reactiva no eixo das abcissas, pois as curvas representadas na figura 14 delimitam um área circunscrita pelas mesmas. [3]

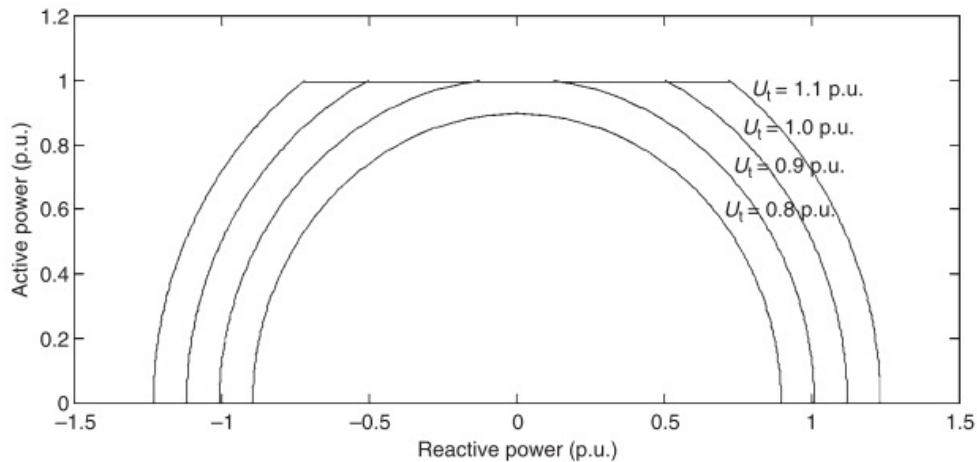


Figura 14 - Gama de operação de um gerador síncrono de velocidade variável parametrizada em função da tensão nominal, U_t . [3]

A utilização destas tecnologias de aerogeradores permite obter uma capacidade adicional de produção de potência reactiva que pode ser utilizada para permitir que os parques eólicos cumpram requisitos específicos de ligação à rede. A utilização desta capacidade adicional de produção de potência reactiva ao nível dos aerogeradores permite limitar ou até mesmo eliminar a instalação de elementos adicionais de compensação de potência reactiva.

2.5.2 Gestão de potência reactiva em parques eólicos

Como já foi anteriormente referido os parques eólicos a serem integrados nas redes eléctricas devem cumprir determinados requisitos técnicos, nomeadamente no que se refere à injeção de potência reactiva no respectivo ponto de interligação. A definição desses requisitos pode ser feita dinamicamente pelos operadores de rede, exigindo dos parques eólicos uma resposta imediata à modificação do seu ponto de operação. Para tal torna-se necessário ter mecanismos eficientes que permitam fazer uma gestão adequada dos meios de produção de potência reactiva disponíveis. Os principais objectivos dessa gestão de potência reactiva num parque eólico passam pelo cumprimento dos requisitos do operador de rede à qual se encontram ligados, garantindo níveis de eficiência adequados que se traduzem na redução das perdas activas internas do parque e consequentemente na maximização da potência activa que é injectada na rede. Dito de outra de outra forma, a gestão de potência reactiva num parque eólico pode ser vista como um problema de despacho óptimo de potência reactiva sujeito a diversas restrições técnicas e operacionais.

Em [13] é proposto um algoritmo de optimização com o objectivo de minimizar as perdas activas e contribuir para um perfil de tensões mais adequado para um parque com 10 máquinas equipados com geradores de indução duplamente alimentados e com potência nominal 660 kW, utilizando como variável de controlo a potência reactiva produzida ao nível de cada máquina. A função objectivo do problema em questão está descrita na equação 2.1 . Neste artigo utilizou-se como método de resolução do problema a Particle Swarm Optimization (PSO).

$$\min f_1(\bar{X}) = \lambda_1 \sum_{i=1}^{NI} R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} + \lambda_2 \max |V_i - V_{rat}| \quad (2.1)$$

onde a primeira parcela representa as perdas activas e a segunda parcela representa o desvio do módulo de tensão, de um valor pré-estabelecido.

Este problema tinha ainda como restrições os limites de produção de potência activa e reactiva do gerador de indução duplamente alimentado, manter a tensão nos barramentos dentro dos limites estipulados e respeitar as capacidades das linhas de distribuição do sistema.

Através do algoritmo de optimização proposto, chega-se a uma solução para o melhor valor de produção de potência reactiva tendo em conta a capacidade do gerador de indução duplamente alimentado para gerir a potência reactiva. Com os resultados obtidos pelas simulações, conclui-se que um parque constituído por DFIG, podem representar um importante contributo para o suporte de um perfil de tensão adequado para o sistema, na medida que representam uma fonte de produção contínua de potência reactiva.

Em [12] é apresentado um novo método para realizar um despacho óptimo de potência reactiva, de modo também a conseguir minimizar o valor das perdas activas, num parque eólico offshore representado na figura 15. O método em questão é o APSO, e é uma das variantes do PSO.

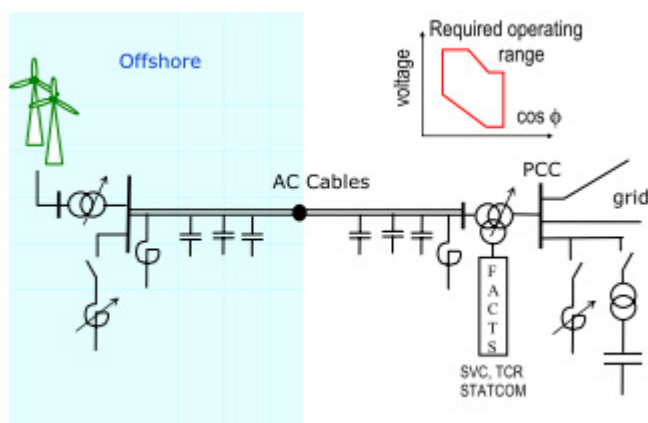


Figura 15 - Parque eólico offshore ligado à rede [12]

O parque eólico do utilizado como teste é composto por 80 máquinas do tipo DFIG com 5 MW de potência nominal , que funcionam à tensão 0,95 kV, ligados à rede (380 kV) por cabos com 144 km de comprimento parcialmente submersos. A ligação à rede é feita através dois transformadores elevadores 36 kV/150 kV e 150 kV/380 kV com regulação de tensão.

O objectivo proposto seria garantir uma operação do parque o mais eficiente possível, minimizando as perdas de potência activa, e também fornecer o set-point de potência reactiva para todas as máquinas do parque, cumprindo desta forma com todos os requisitos técnicos impostos. A formulação matemática do problema vem descrita a seguir.

$$\text{Min } F(X) = P_{\text{perdas_parque_offshore}} \quad (2.2)$$

Sujeito a:

$$b_{\min} \leq b(x) \leq b_{\max} \quad (2.3)$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (2.4)$$

onde b é o vector das variáveis dependentes , x é o vector das variáveis de controlo e b_{\min} , x_{\min} , b_{\max} e x_{\max} são os seus limites mínimos e máximos respectivamente.

As variáveis de controlo neste problema são[12]:

- A razão de transformação do transformador
- A potência reactiva dos geradores
- Ligação/ desligação de cabos AC offshore
- As definições dos bancos de condensadores ou bobinas
- As definições do *Static Var Compensator* existente

As variáveis dependentes são:

- A geração de reactiva de outros geradores que estão interligados com a rede em questão.

- O módulo de tensão dos barramentos
- Módulo da corrente nos cabos, linhas e transformadores

Desta forma adaptou-se o problema de optimização de modo a ser integrado no algoritmo APSO. De modo a demonstrar a performance do algoritmo foram realizados ensaios para diferentes percentagens da capacidade total de produção do parque, nomeadamente 400 MW.

Os resultados obtidos confirmam a robustez do algoritmo em termos de chegar a uma solução óptima para a geração de potência reactiva e mostram que esta proposta é uma boa ferramenta para os operadores de sistema de modo a promover a eficiência do sistema eléctrico.

Capítulo 3

Gestão de Potência Reactiva em Clusters de Parques Eólicos

3.1 -Descrição do problema

Com a crescente introdução de cada vez mais energia do tipo eólica, no sistema eléctrico de energia, este é obrigado a maior flexibilidade de controlo, o que origina que sejam cumpridos determinados requisitos, nomeadamente no que se refere à definição do factor de potência no ponto de interligação de um parque eólico com a rede a montante, de acordo com as solicitações do operador de sistema. Estas solicitações passam por assegurar que os parques eólicos têm a capacidade de se manterem em operação no acontecimento de cavas de tensão que possam resultar de curto-circuitos e ainda por assegurar a capacidade de fornecer potência reactiva, durante a ocorrência de cavas de tensão, para assim auxiliar a manutenção dos níveis de tensão na rede.

Desta forma, considerando também o ponto de vista do promotor, torna-se necessário definir estratégias de exploração de potência reactiva de modo a cumprir com as exigências do operador de sistema ao nível do ponto de interligação com a rede. Simultaneamente, estas estratégias devem ser viáveis no que toca à não violação de perfis de tensão nas suas redes internas, tendo em vista também a redução de perdas nas mesmas redes, maximizando assim a energia activa fornecida à rede. Os requisitos técnicos impostos pelo operador de sistema implicam que os promotores dos parques eólicos tenham necessidade de realizar algum tipo de metodologia de gestão, principalmente controlo de frequência e controlo de potência reactiva.

O controlo da potência reactiva tem que ser feito pelos promotores dos parques eólicos de maneira a cumprir com os requisitos impostos pelo operador de sistema e a maximizar os seus próprios lucros.

A disponibilidade destas capacidades de gestão nos aerogeradores resulta do uso de electrónica de potência avançada, que juntamente com estratégias de gestão adequadas, permitem o cumprimento dos requisitos solicitados.

Sendo assim o problema de gestão de potência reactiva em parques eólicos, pode ser formulado como um problema de optimização, sujeito a restrições. Consiste em minimizar as perdas de potência activa dentro das instalações dos parques envolvidos, garantindo também uma produção de potência reactiva adequada, de modo a cumprir com $\text{tg } \varphi = [0 ; 0,2]$ no ponto de interligação, de acordo com a legislação vigente . Isto significa que o parque deverá fornecer 20% de toda a potência activa gerada, na forma de potência reactiva, de modo a cumprir com os requisitos do operador de sistema. Para isso, pode contar com todos os mecanismos com capacidade de injeção de potência reactiva que encontrem disponíveis nas suas instalações de produção, nomeadamente aerogeradores com essa capacidade. Com uma adequada gestão da potência reactiva consegue assim maximizar a produção de potência reactiva que vende à rede e desta forma aumentar os seus ganhos.

3.2 -Formulação do problema

A formulação do problema de optimização para efeitos de gestão de potência reactiva em clusters de parques eólicos pode ser estabelecida como :

$$\min F(x) = P_{perdas Cluster PE} \quad (3.1)$$

sujeito a :

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (3.2)$$

$$Q_i^{min} \leq Q_i \leq Q_i^{max} \quad (3.3)$$

$$t_i^{min} \leq t_i \leq t_i^{max} \quad (3.4)$$

$$|S_{ik}| \leq S_{ik}^{max} \quad (3.5)$$

$$Q_{inj} = Q_{inj}^{ref} \quad (3.6)$$

$$\begin{cases} P^{Gi} - V_i \sum_k^n V_k (G_{ik} * \cos \theta_{ik} + B_{ik} * \sin \theta_{ik}) = 0 \\ Q^{Gi} - V_i \sum_k^n (G_{ik} * \sin \theta_{ik} - B_{ik} * \cos \theta_{ik}) = 0 \end{cases}$$

(3.7)

A expressão 3.1 representa a função objectivo do problema. Esta tem como missão minimizar as perdas de potência activa no cluster, de forma a maximizar a potência activa total entregue no ponto de interligação do cluster. Assim a formulação do problema a adoptar assemelha-se a um problema de despacho de potência reactiva para determinadas condições de operação do cluster de parque eólicos (definidas em termos de potência activa produzida). Nas restantes condições, estão identificadas as restrições do problema. Na condição 3.2 está representada a necessidade de garantir que o módulo de tensão V dos barramentos do cluster se encontra dentro dos limites mínimo e máximo. A condição 3.3 significa que a produção de potência reactiva Q por parte dos geradores tem que ser feita de acordo com a sua

característica de produção $P(Q)$. Adicionalmente representa ainda os limites de operação de baterias de condensadores ou outros elementos de compensação de potência reactiva. Prosseguindo na descrição das restrições, de seguida na condição 3.4, definem-se os limites para as tomadas t dos transformadores (variáveis discretas). Na condição 3.5 estão definidos os limites térmicos dos ramos representados por S (linhas ou transformadores). Em seguida, presente na condição 3.6 tem-se a especificação da potência reactiva Q a fornecer no ponto de interligação do cluster de parques eólicos com a rede a montante. Finalmente em 3.7 estão representadas as equações do trânsito de potências nos barramentos PQ. A formulação assume que o cluster de parques eólicos apenas possui um ponto de interligação com a rede de transporte, sendo esse barramento o barramento de compensação e referência, com todos os restantes barramentos a serem do tipo PQ. O sistema de equações 3.7 representa as equações de fecho em cada barramento PQ do cluster de parques eólicos.

3.3 -Metodologia de resolução do problema

O problema de optimização anteriormente formulado e que irá ser detalhado com mais pormenor no capítulo 4 é de natureza não linear e pode apresentar um número significativo de variáveis de decisão. Desta forma a utilização de estratégias evolucionárias para a resolução deste tipo de problemas representa-se como uma possibilidade a ser utilizada (como já foi anteriormente referenciado no que diz respeito a parques eólicos de menor dimensão). No presente trabalho explora-se uma metodologia do tipo EPSO - Optimização por Enxames Evolucionários de Partículas, que surge como um híbrido entre as Estratégias Evolutivas e a Optimização por Enxames de Partículas, para a resolução do problema de gestão de potência reactiva.

Algoritmos Evolucionários

Os algoritmos evolucionários inspiram-se nos paradigmas da evolução biológica actualmente aceites, embora não se deixem limitar pelas realizações biológicas. Na natureza, existe um processo de selecção dos seres vivos, onde os indivíduos mais preparados para a competição dominam os mais fracos e sobrevivem. Isto acontece porque esses seres possuem alguma característica que os distingue dos restantes elementos da sua espécie - indivíduos mutados. Por herança, essa característica provavelmente passará para os seus descendentes, e, assim, estes

terão também hipóteses de se saírem vencedores acabando a característica por se impor na população.[14]

Um algoritmo evolucionário tem como objectivo encontrar a solução óptima de um problema independentemente da natureza das suas variáveis. Desta forma parte-se de um conjunto inicial de soluções para o problema (tendo o nome de indivíduos), criando assim uma população. Cada uma destas soluções é avaliada segundo uma função de optimização, de forma a estabelecer quais, de toda a população, têm um melhor desempenho. Depois de seleccionados os melhores, segue-se uma fase de reprodução onde é gerada uma nova população, a partir dos melhores indivíduos da geração anterior. Este processo repete-se inúmeras vezes, conforme critérios de paragem definidos à partida. Desta forma, espera-se que com a reprodução entre as melhores soluções de cada geração, o novo conjunto de soluções tenha um melhor desempenho do que o do conjunto anterior, ou seja, com uma melhor avaliação. O melhor indivíduo encontrado em todo este processo, é aceite como a solução do problema de optimização em causa.[15]

A partir da teoria de evolução sugerida por Darwin, surgem no início dos anos 60, a Programação Evolucionária (Lawrence J. Fogel), as Estratégias de Evolução (I. Rechenberg e H. P. Schwefel) e os Algoritmos Genéticos (John Holland).

Por conseguinte, estas diferentes concepções distinguem-se umas das outras, fundamentalmente, no seguinte: [15]

- na forma de representação (cromossoma) de uma solução ou indivíduo
- na forma de descodificação dos cromossomas
- na forma de efectuar a selecção
- na forma de efectuar a reprodução (ou geração de novos indivíduos).

Nas Estratégias de Evolução, uma nova geração de indivíduos é produzida pela aplicação de um operador de reprodução que combina operadores de recombinação e mutação. Estas operações têm como missão criar novas soluções, de modo a percorrer o espaço das alternativas. Porém, estas operações são neutras, isto é, só por si não resultam em nenhum processo de busca orientado e conduzem apenas a um processo de pesquisa aleatória. O êxito das Estratégias de Evolução reside na acção do operador de selecção sobre os novos indivíduos criados, tendo como efeito que a adaptação média em cada geração vai melhorando.

Estratégias de Evolução (ES, de Evolution Strategies) e Programação Evolucionária (EP, de Evolutionary Programming) designam-se como métodos de fenótipo, em que a representação das soluções de um problema se baseia unicamente nas próprias variáveis do problema, sem passar por qualquer algoritmo intermédio de codificação/descodificação.

Os métodos de fenótipo distinguem-se dos métodos de genótipo na medida em que estes últimos tem a solução de um problema codificada numa sequência, designada por cromossoma cuja interpretação exige a execução de um algoritmo que explicita as variáveis naturais do problema. Os métodos de genótipo são normalmente chamados de Algoritmos Genéticos (GA, de Genetic Algorithms).[15]

De seguida , ir-se-á fazer uma pequena descrição do modelo auto-adaptativo σ SA -ES (self-adaptive Evolution Strategies) referente às Estratégias de Evolução, uma vez que serviu como base para construção do EPSO, utilizado para execução deste trabalho.

Modelo σ SA(1, λ) - ES

Nas Estratégias de Evolução, um indivíduo é composto por parâmetros estratégicos e parâmetros objecto.

Os parâmetros objecto correspondem às variáveis de controlo do problema (variáveis que compõem o fenótipo). Os parâmetros estratégicos correspondem habitualmente aos desvios padrão σ , para as distribuições que descrevem as probabilidades de mutação e que normalmente determinam o comportamento do algoritmo de optimização. Estes parâmetros estão também sujeitos a evolução.

A estratégia do modelo σ SA(1, λ)-ES, entenda-se 1 indivíduo dá origem a λ descendentes, resume-se ao facto que se um indivíduo é seleccionado para uma geração seguinte, os seus parâmetros estratégicos sobrevivem com ele. Estes parâmetros estratégicos, se foram óptimos, devem conduzir o processo num regime de taxa de progressão óptima, ou seja, com o máximo valor esperado de progressão por geração.[15]

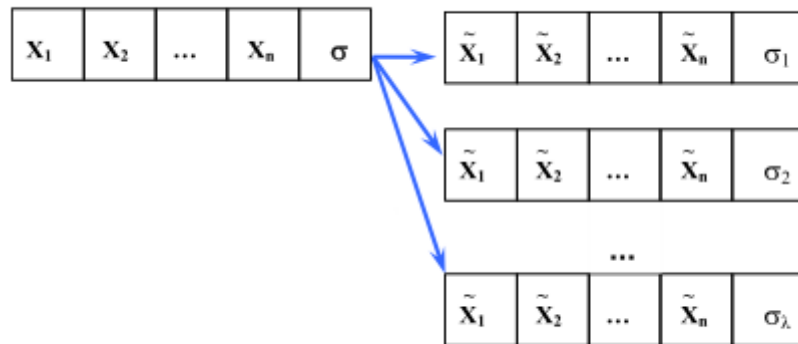


Figura 16 - Representação de um indivíduo X com n variáveis reais. A variável σ define a amplitude (variância) do processo aleatório de mutação que originará os λ descendentes. [14]

O mecanismo de selecção pode ser controlado por duas técnicas principais, nomeadamente:

Elitismo - onde o melhor de cada geração é conservado para a geração seguinte. [16]

Torneio estocástico - na sua forma mais simples corresponde à escolha aleatória de pares de indivíduos, à posterior comparação dos seus valores de adaptação e de seguida selecciona-se para sobreviver para a geração seguinte, o melhor indivíduo, com uma probabilidade elevada, mas diferente do valor 1. [15]

O método utilizado na execução deste trabalho foi o torneio estocástico.

Optimização por Enxames de Partículas (PSO)

A optimização por enxames de partículas (PSO - Particle Swarm Optimization) deriva da observação do comportamento de enxames de insectos, bandos de pássaros, cardumes de peixes ou outros grupos, em que o comportamento de cada indivíduo é, em simultâneo, influenciado por factores próprios e por factores (ditos sociais) que resultam do comportamento dos restantes.

Deve-se à iniciativa de James Kennedy e Russel Eberhart e veio a mostrar-se competitiva relativamente a outras meta-heurísticas. A PSO trabalha com um conjunto de

soluções de um problema a otimizar, que designa como partículas e que evoluem no espaço de alternativas.

O principal conceito deste algoritmo é a partilha de informação e colaboração entre partículas, através de simulação do seu comportamento social. Estas partículas sofrem a influência de três vectores que estimulam o seu movimento pelo espaço de soluções.

- Inércia
- Memória
- Cooperação

O primeiro vector impele a partícula numa direcção idêntica à que ela vinha seguindo. O segundo vector atrai a partícula na direcção da melhor posição até ao momento ocupada pela partícula durante a sua vida. O terceiro vector atrai a partícula na direcção do melhor ponto do espaço até ao momento descoberto pelo enxame. [15]

O modelo simples

A Optimização por Enxames de Partículas é uma técnica de optimização representada por um conjunto de partículas, cada uma com uma dimensão conforme o número de variáveis do problema, que explora o espaço de soluções.

Cada uma destas partículas i representa uma solução para o problema e pode ser descrita por:

- Um vector de posição \mathbf{X}_i
- Um vector de velocidade \mathbf{V}_i
- Um vector de memória \mathbf{b}_i da melhor posição encontrada durante a sua vida
- Um valor de função objectivo relativo à posição actual \mathbf{X}_i
- Um valor de função objectivo relativo à melhor posição \mathbf{b}_i , encontrada pela partícula.

Num dado instante de tempo t (correspondendo a uma dada iteração), uma partícula i muda de posição \mathbf{X}_i para $\mathbf{X}_i^{\text{nov}}o$, de acordo com a seguinte regra :

$$\mathbf{X}_i^{\text{nov}}o = \mathbf{X}_i + \mathbf{V}_i^{\text{nov}}o$$

em que $\mathbf{V}_i^{\text{nov}}o$ é a nova velocidade da partícula i , ou seja, o vector representando a mudança de posição da partícula i , e é dada por :

$$\mathbf{V}_i^{\text{nov}}o = \mathbf{V}_i + \text{Rnd}() \cdot \mathbf{W}m_i (\mathbf{b}_i - \mathbf{X}_i) + \text{Rnd}() \cdot \mathbf{W}c_i (\mathbf{b}_G - \mathbf{X}_i)$$

onde

Wm_i - matriz diagonal de pesos do termo de memória da partícula i , em que o elemento

Wm_{kk}^i é o peso para o termo de memória de ordem k .

Wc_i - matriz diagonal de pesos do termo de cooperação da partícula i , em que o elemento

Wc_{kk}^i é o peso para o termo de cooperação de ordem k .

b_i - melhor solução (posição no espaço) encontrada na história de vida da partícula i .

b_G - melhor solução (posição no espaço) encontrada pelo enxame até ao momento.

$Rnd()$ - números aleatórios sorteados de uma distribuição uniforme em $[0,1]$.

A ilustração do movimento de uma partícula encontra-se representada na figura 17.

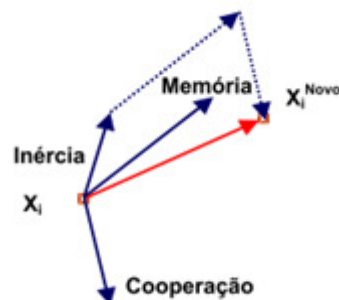


Figura 17 - Ilustração do movimento de uma partícula i , influenciada pelos termos de inércia, memória e cooperação

Os pesos que afectam os vários termos são influenciados por sua vez, em cada iteração pelo produto por números aleatórios, o que provoca uma perturbação na trajectória de cada partícula que se demonstrou ser benéfica para a exploração do espaço e o conhecimento da solução óptima. [15]

Os pesos no modelo apresentado, são primariamente definidos, de uma forma externa. Necesita-se então, de sintonizar o valor destes pesos para que a convergência seja conseguida. De referir ainda que existem 4 modelos de PSO, que podem ser obtidos com variação dos pesos

- Modelo completo - com $Wm, Wc > 0$
- Modelo cognitivo - com $Wm > 0$ e $Wc = 0$
- Modelo Social - com $Wm = 0$ e $Wc > 0$
- Modelo não egoísta - com $Wm = 0$, $Wc > 0$ e $G \neq i$

Para uma definição de uma PSO é necessário ter em conta alguns aspectos, nomeadamente

- Controlo das velocidades - definir o melhor valor para V^{Max}

- O tamanho do enxame - definir o número n de partículas adequado
- O valor dos pesos - definir um conjunto de pesos adequado
- Actualização síncrona ou assíncrona - definir se cada partícula é atraída pelo mais recente óptimo global ou se a actualização do óptimo corrente se faz apenas no final de um movimento de todas as partículas (uma iteração). [15]

Ao contrário dos Algoritmos Evolucionários, o algoritmo PSO não efectua a operação de selecção [17], e todas as partículas são mantidas como membros da população ao longo do processo [14].

Contudo utiliza o conceito de fitness como todos os paradigmas evolucionários. O ajustamento das velocidades que possibilita o movimento das partículas de um ponto do espaço para outro ponto do espaço é análogo com a criação de novos indivíduos de geração para geração, nos métodos evolucionários. Este ajustamento de velocidades é realizado através de informação de outras posições, e é possivelmente comparável com a operação de recombinação existente nos Algoritmos Genéticos. Ocorre também ainda no algoritmo PSO, apesar de uma forma implícita, a operação de mutação, uma vez que os factores de memória e cooperação são ajustados aleatoriamente em cada iteração.

Optimização por Enxames Evolucionários de Partículas (EPSO)

Analisando o EPSO, é possível olhar para o método com a perspectiva dos algoritmos evolucionários. Neste sentido, podemos continuar a falar de função de adaptação, de uma população (em vez de enxame), de indivíduos (em vez de partículas), e em vez de movimento de partículas de iteração para iteração podemos falar de criação de novos indivíduos de geração para geração.

Nos modelos σ SA-ES, não são só os indivíduos que evoluem para a solução óptima mas também os seus parâmetros estratégicos responsáveis pela operação de mutação, resultando num processo de auto aprendizagem do melhor modo de progressão para o óptimo.

Já na PSO não existe competição entre as partículas ou auto-adaptação das suas características (pesos). De facto, se não existisse o factor de cooperação, cada partícula evoluiria independentemente das restantes. É a equação de movimento, e este factor de cooperação em particular, que garante as propriedades de convergência e o funcionamento do algoritmo. [18]

Olhando para a PSO, observamos que cada indivíduo (partícula) pode ser representado por parâmetros objecto (as variáveis do problema) e parâmetros estratégicos (os pesos, definindo a estratégia reprodutiva de cada partícula).

No processo de produzir descendência de uma população de partículas, num dado momento, a solução clássica da PSO introduz variações nos parâmetros estratégicos,

- por aplicar uma função decrescente no tempo ao peso da inércia, e aplicar mutações, reguladas por números aleatórios de distribuição uniforme, aos pesos dos termos de memória e cooperação
- ou por aplicar um factor de constrição que afecta os pesos em cada iteração.

Isto significa que a PSO depende fortemente de esquemas de controlo que são impostos do exterior, que têm que ser definidos heurísticamente através de metodologias baseadas em tentativa e erro. O problema de qualquer esquema externo de controlo de um algoritmo, todavia, é que dificilmente é flexível e igualmente eficiente em todas as situações e em todas as classes de problemas.[15]

O EPSO junta o melhor destes dois paradigmas. É um algoritmo de Optimização por Enxames de Partículas, pois existe troca de informação entre as partículas, enquanto estas se movimentam no espaço de pesquisa; e é um método de Computação Evolucionária, pois os pesos associados às soluções são mutados e passados para as gerações seguintes, através do mecanismo de selecção.[14]

Descrição do algoritmo EPSO

Numa dada iteração k , tomemos um conjunto de indivíduos, ou partículas, constituídos por um conjunto de parâmetros objecto e parâmetros estratégicos $[X, w]$. Estes indivíduos irão evoluir ao longo de um dado número de iterações, de acordo com o seguinte esquema :

Replicação - cada partícula i é replicada r vezes (geralmente $r=1$) , resultando num total de $r + 1$ partículas no espaço de pesquisa.

Mutação - cada réplica sofre mutação nos seus parâmetros estratégicos w , do seguinte modo:

$$w_{i,j}^{k,novo} = w_{i,j}^k + \tau \cdot N(0,1) \quad (3.12)$$

onde τ é o parâmetro de aprendizagem, fixado externamente, e $N(0,1)$ é um número aleatório com distribuição Gaussiana de média 0 e variância 1. O índice j ($j = 1, \dots, 4$) refere-se ao peso de inércia, memória, cooperação, e desvio do óptimo. Estes pesos w tomam valores aleatórios entre 0 e 1 na inicialização do algoritmo.

Reprodução - cada descendente de uma partícula é gerada de acordo com a equação de movimento

$$b_G^{novo} = b_G + w_{i,desvOptimo}^{novo} \cdot N(0,1) \quad (3.13)$$

$$V_i^{k,novo} = w_{i,inercia}^k \cdot V_i^k + w_{i,mem}^k \cdot (b_i - X_i^k) + w_{i,coop}^k \cdot (b_G^{novo} - X_i^k) \quad (3.14)$$

$$X_i^{k,novo} = X_i^k + V_i^{k,novo} \quad (3.15)$$

À semelhança da PSO, no algoritmo EPSO, existe também um vector que contém a melhor posição de cada partícula b_i , e ainda outro que possui informação sobre a melhor posição encontrada até ao momento, por todo o enxame, b_G . Contudo neste algoritmo, este último vector, recebe um tratamento diferente, uma vez que lhe é aplicada uma mutação, com o objectivo de controlar a “dimensão” de uma zona difusa em volta do óptimo corrente encontrado pelo enxame, resultando no vector b_G^{novo} . Desta forma, é permitido ao processo auto-adaptativo focar a orientação de um enxame e possibilitando que este continue a ser “agitado” mesmo quando as partículas já convergiram todas para a mesma região do espaço e se encontram muito próximas.

Avaliação - cada descendente tem o seu grau de adaptação avaliado, de acordo com a posição que ocupa no espaço.

Seleção - no algoritmo utilizado foi efectuada a selecção por Torneio Estocástico, onde a melhor partícula em cada grupo de $r + 1$ partículas é seleccionada com probabilidade (1- sorte), para formar uma nova geração. Ou seja, a partícula original e os seus descendentes entram em competição, sendo seleccionada a partícula mais adaptada, com uma elevada probabilidade. [14] [15]

Relativamente às restrições que um problema possa apresentar, estas podem ser tratadas da mesma maneira que nas Estratégias de Evolução, ou seja, acrescentando penalidades à função objectivo. Existem vários tipos de penalidades (fig.18) que podem ser utilizadas tais como penalidades lineares, quadráticas ou exponenciais. Penalidades do tipo quadráticas e exponenciais tendem a penalizar de uma forma mais drástica, desvios maiores,

sendo assim mais utilizadas. No entanto, no caso em estudo, uma penalidade do tipo linear foi suficiente para atingir resultados satisfatórios.

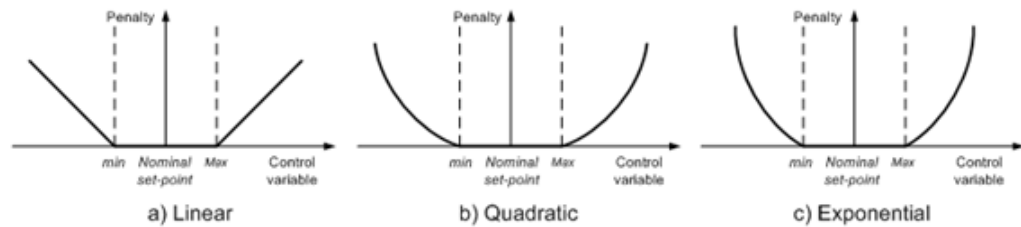


Figura 18 - Funções de penalidade comuns para o EPSO [19]

EPSO vs outras meta-heurísticas¹

Devido à forma como o EPSO combina os mecanismos de mutação/recombinação, que traduzem a equação de movimento das partículas, e a operação de selecção, torna-se mais competitivo e com melhor desempenho que outras abordagens como as ES e o algoritmo PSO, onde apenas um dos operadores contribui para a progressão em direcção ao óptimo. Comparativamente ao PSO, o EPSO possui características auto-adaptativas, tornando assim este último relativamente independente de definições externas para os pesos. [20]

Mostra-se em [20] que o algoritmo EPSO é mais robusto que o método Simulated Annealing e ainda mais rápido a convergir do que o método PSO. A robustez do algoritmo neste tipo de problemas é definida como a garantia, que independentemente da inicialização, o algoritmo irá convergir para uma vizinhança do óptimo.

Desta forma para se ver quão robusto é o método, pode-se para o efeito realizar um conjunto de corridas do algoritmo com inicializações aleatórias e determinar a variância dos resultados obtidos. Sendo assim espera-se obter pequenos um baixo valor para a variância dos resultados, de modo que o algoritmo possa ter uma aplicação real e viável, uma vez que para a resolução do problema se possa confiar no resultado da simulação efectuada, com apenas uma corrida do algoritmo.

¹ Métodos computacionais que optimizam um problema tentando melhorar uma solução candidata iterativamente, baseando-se numa medida de qualidade

Capítulo 4

Aplicação da metodologia de gestão de potência reactiva em clusters de parques eólicos

4.1 -Caso de estudo

De forma a ilustrar a aplicação de metodologia de gestão de potência reactiva em clusters de parques eólicos apresentada no capítulo anterior, apresenta-se agora um caso de estudo constituído por um cluster de parques eólicos (composto por sete sub-parques) como se mostra na figura 19. Cada um destes sub-parques possui um transformador 63/20 kV com capacidade de regulação de tensão em carga, fazendo a ligação com a rede interna do cluster de 63 kV. O cluster, por sua vez, possui dois transformadores 220/63 kV em paralelo (igualmente equipados com tomadas de regulação de tensão em carga), para interligação com a rede de transporte (barramento 300 na figura 19), sendo este o ponto onde devem ser verificadas as condições de ligação, nomeadamente em termos de requisitos de injeção de potência reactiva em função das solicitações do operador da rede de transporte. Como se pode verificar ainda na figura 19, assume-se que todos os sub-parques do cluster estão equipados com aerogeradores de velocidade variável com sistema de conversão integral do tipo E82-FT da ENERCON [20], cada um com uma potência activa nominal de 2 MW (número de aerogeradores por sub-parque indicado igualmente sobre a figura 19). Cada um dos aerogeradores apresenta uma tensão nominal de 400 V, possuindo um transformador 0.4/20 kV para interligação com a rede interna de cada sub-parque (por razões de simplicidade da representação esquemática, não é apresentada a rede interna de cada parque na figura 19, embora tenha sido considerada no estudo efectuado).

É pretendido criar uma ferramenta de gestão de potência reactiva no parque de modo a cumprir com os requisitos do operador de sistema, ao mesmo tempo que se visa os interesses do promotor do cluster, nomeadamente minimizar as perdas na rede interna do cluster, mantendo os limites de tensão nos limites previamente estipulados.

Como meios produção de potência reactiva, cuja gestão é requerida, o cluster conta apenas com a capacidade de produção de potência reactiva dos geradores existentes nos sub-parques. Juntamente com estes, pode ainda explorar-se a capacidade de regulação de tensão em carga dos transformadores à saída de cada parque e dos transformadores 220/63 kV de interligação com a rede de transporte, de maneira a controlar o perfil de tensão para a rede interna do cluster. Desta forma, dispositivos do tipo baterias de condensadores, bancos de reactâncias, ou compensadores estáticos são inexistentes neste cluster, o que torna em certo ponto a gestão de reactiva, mais simples e prática, evitando a aquisição e controlo de equipamentos adicionais.

Como anteriormente referido, os aerogeradores existentes nos sub-parques são geradores síncronos de velocidade variável com sistema de conversão integral (ENERCON E-82 FT), com a curva P-Q que se encontra apresentada na figura 20 [21]. Como se pode verificar, este tipo de aerogeradores apresenta uma característica operacional que lhes permite produzir/consumir potência reactiva no intervalo [-1.0, 1.2] Mvar.

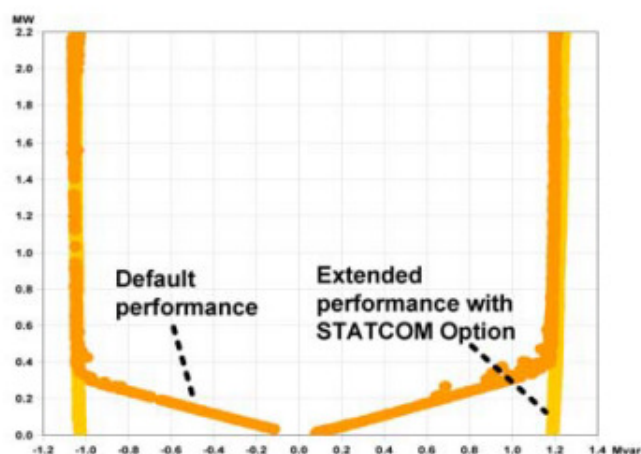


Figura 20 - Curva P-Q de gerador síncrono de velocidade variável utilizado[21]

Apesar deste tipo de aerogeradores poder apresentar outros modos de funcionamento, neste trabalho foi apenas considerada a curva de operação normal (referenciada com “*Default performance*” na figura 20). Além disso, e de acordo com os requisitos de ligação à rede actualmente em vigor, apenas interessa para o estudo a capacidade injeção de potência reactiva deste tipo de aerogeradores, compreendida entre 0 e 1.2 Mvar.

A gama de tensões admitida para o funcionamento do cluster do parque eólicos (limitada à rede de 63 kV, bem como ao barramento de 20 kV de cada sub-parque) é apresentada na tabela 3. No entanto, importa referir que no estudo efectuado foi considerada a totalidade da rede do cluster, representada até ao ponto de ligação de cada aerogerador.

Tabela 3 - Gama de tensões estipulada para barramentos da rede interna do cluster

| Barramento | Vmax_adm (p.u.) | Vmin_adm(p.u.) |
|------------|-----------------|----------------|
| 300 | 1,05 | 0,95 |
| 301 | 1,1 | 0,95 |
| 302 | 1,1 | 0,95 |
| 303 | 1,1 | 0,95 |
| 304 | 1,1 | 0,98 |
| 305 | 1,1 | 0,95 |
| 306 | 1,1 | 0,95 |
| 307 | 1,1 | 0,98 |
| 308 | 1,1 | 0,95 |
| 309 | 1,1 | 0,98 |
| 310 | 1,1 | 0,95 |
| 311 | 1,1 | 0,98 |
| 312 | 1,1 | 0,95 |
| 313 | 1,1 | 0,98 |
| 314 | 1,1 | 0,95 |
| 315 | 1,1 | 0,98 |
| 316 | 1,1 | 0,98 |

Como foi referido no capítulo anterior, é pretendido que a metodologia permita efectuar uma gestão adequada dos meios de produção de potência reactiva no cluster de parque eólicos, cumprir integralmente com o requisito de injeção de potência reactiva no ponto de interligação, conforme requisitado pelo operador de sistema, e em simultâneo se verifica o cumprimento dos demais requisitos técnicos relativos à operação do sistema.

4.2 -Formulação detalhada do problema

Tendo em vista a criação de uma ferramenta para a realizar a gestão de potência reactiva do cluster do caso de estudo, faz-se uso da formulação especificada no capítulo anterior, enquadrando-a no conjunto de meios computacionais necessários à sua realização.

Considerando novamente a formulação do problema de gestão de potência reactiva:

$$\min F(x) = P_{perdas Cluster PE} \quad (4.1)$$

sujeito a :

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (4.2)$$

$$Q_i^{min} \leq Q_i \leq Q_i^{max} \quad (4.3)$$

$$t_i^{min} \leq t_i \leq t_i^{max} \quad (4.4)$$

$$|S_{ik}| \leq S_{ik}^{max} \quad (4.5)$$

$$Q_{inj} = Q_{inj}^{ref} \quad (4.6)$$

$$\begin{cases} P^{Gi} - V_i \sum_k^n V_k (G_{ik} * \cos \theta_{ik} + B_{ik} * \sin \theta_{ik}) = 0 \\ Q^{Gi} - V_i \sum_k^n (G_{ik} * \sin \theta_{ik} - B_{ik} * \cos \theta_{ik}) = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

Onde :

$P_{perdas Cluster PE}$ representa as perdas de potência activa nas redes do cluster de parques eólicos

Q_i representa a potência reactiva produzida por cada um dos geradores e que deve respeitar a característica Q(P) exemplificada na figura 20 .

t_i representa a razão de transformação de todos os transformadores representados na figura 19, e com gamas de operação de acordo com o estabelecido na tabela 4. Tratando-se de variáveis discretas, e no sentido de poder ser aplicada a meta-heurística que é descrita no capítulo 3 (EPSO), assume-se que as tomadas dos transformadores podem ser representadas por uma variável contínua, assumindo igualmente os limites estabelecidos na tabela 7.

S_{ik} representa a potência nominal de todos os ramos do cluster de parques eólicos. Para os cenários considerados, verificou-se mediante um estudo prévio que esta restrição não é limitadora das soluções, uma vez que nesses cenários a capacidade dos ramos nunca é excedida. Desta forma, não se considerou esta restrição no estudo efectuado. Outros cenários poderão exigir que seja considerada.

V_i representa o módulo de tensão de cada barramento do sistema. A gama de tensões admissível para a rede interna do cluster encontra-se na tabela 3. Os restantes barramentos (barramentos da rede interna de cada sub-parque - rede de 20 kV, bem como o ponto de ligação de cada aerogerador, com tensão nominal de 400 V) tem uma gama admissível tensões de 0,96-1,1 p.u. .

Q_{inj} representa a quantidade de potência reactiva gerada a ser injectada no ponto de interligação de modo a conseguir-se uma tg φ entre [0 ;0,2].

Tabela 4 - Razões de transformação dos tranformadores da rede interna

| Transformador | | | |
|---------------|-----|---------|---------|
| Barramentos | | Tap_min | Tap_max |
| 300 | 301 | 0,95 | 1,1 |
| 303 | 304 | 0,95 | 1,13 |
| 306 | 307 | 0,95 | 1,13 |
| 308 | 309 | 0,95 | 1,13 |
| 310 | 311 | 0,95 | 1,13 |
| 312 | 313 | 0,95 | 1,13 |
| 314 | 315 | 0,95 | 1,13 |

De acordo com os meios de gestão de potência reactiva disponíveis no cluster de parques eólicos, as variáveis de decisão do problema são:

- Potência reactiva a ser produzida em cada sub-parque
- Posição das tomadas dos transformadores existentes

Da definição das variáveis de decisão do problema, resulta a estrutura da particula a ser considerada na meta-heurística EPSO a utilizar, e que se encontra apresentada na figura 21.

As primeiras sete posições da partícula dizem respeito à produção de potência reactiva em cada um dos sub-parques, sendo que as restantes 7 posições correspondem à posição da tomada de cada um dos transformadores.

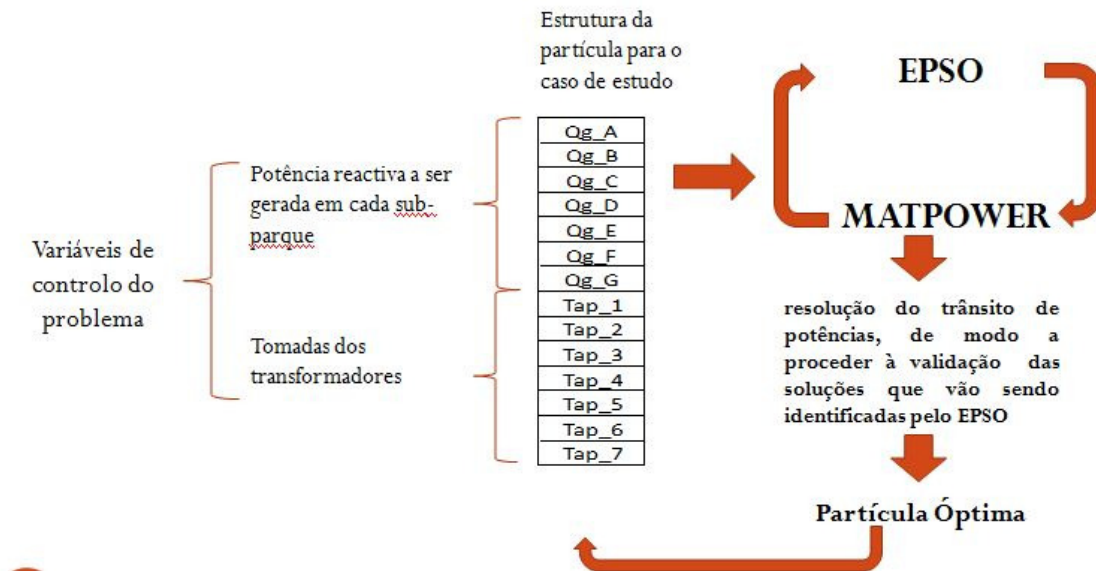


Figura 21 - Fluxograma representativo da metodologia utilizada para resolução do problema

Tratando-se de um problema que exige a avaliação de perdas eléctricas numa rede (função objectivo do problema, e que se pretende minimizar), bem como a validação do problema do trânsito de potências para o conjunto de variáveis de decisão a ter em conta, utilizou-se um módulo de rotinas (MATPOWER 4.0b2® [22]) que foi integrado na rotina EPSO. Este módulo de rotinas permite a resolução do problema do trânsito de potências, permitindo obter todas as variáveis de estado necessárias à validação das soluções que vão sendo identificadas pela meta heurística em uso.

Utilizando as rotinas do MATPOWER 4.0b2®, modelizou-se toda a rede presente na figura 19 e ainda o conjunto dos 7 sub-parques do cluster, formando no total uma rede com 225 barramentos e 102 aerogeradores. De modo a fazer-se a modelização da rede do cluster, é necessário ter a cada um dos campos presentes no ficheiro de modelização sob a forma de colunas. A informação da rede é inserida de forma tripartida, conforme as tabelas 4, 5 e 6 na página seguinte.

Tabela 5 - Informação dos barramentos [22]

| name | column | description |
|----------------------|--------|--|
| BUS_I | 1 | bus number (positive integer) |
| BUS_TYPE | 2 | bus type (1 = PQ, 2 = PV, 3 = ref, 4 = isolated) |
| PD | 3 | real power demand (MW) |
| QD | 4 | reactive power demand (MVA _r) |
| GS | 5 | shunt conductance (MW demanded at $V = 1.0$ p.u.) |
| BS | 6 | shunt susceptance (MVA _r injected at $V = 1.0$ p.u.) |
| BUS_AREA | 7 | area number (positive integer) |
| VM | 8 | voltage magnitude (p.u.) |
| VA | 9 | voltage angle (degrees) |
| BASE_KV | 10 | base voltage (kV) |
| ZONE | 11 | loss zone (positive integer) |
| VMAX | 12 | maximum voltage magnitude (p.u.) |
| VMIN | 13 | minimum voltage magnitude (p.u.) |
| LAM_P [†] | 14 | Lagrange multiplier on real power mismatch (u /MW) |
| LAM_Q [†] | 15 | Lagrange multiplier on reactive power mismatch (u /MVA _r) |
| MU_VMAX [†] | 16 | Kuhn-Tucker multiplier on upper voltage limit (u /p.u.) |
| MU_VMIN [†] | 17 | Kuhn-Tucker multiplier on lower voltage limit (u /p.u.) |

[†] Included in OPF output, typically not included (or ignored) in input matrix. Here we assume the objective function has units u .

Tabela 6 - Informação dos geradores [22]

| name | column | description |
|-----------------------|--------|---|
| GEN_BUS | 1 | bus number |
| PG | 2 | real power output (MW) |
| QG | 3 | reactive power output (MVA _r) |
| QMAX | 4 | maximum reactive power output (MVA _r) |
| QMIN | 5 | minimum reactive power output (MVA _r) |
| VG | 6 | voltage magnitude setpoint (p.u.) |
| MBASE | 7 | total MVA base of machine, defaults to <code>baseMVA</code> |
| GEN_STATUS | 8 | machine status, > 0 = machine in-service ≤ 0 = machine out-of-service |
| PMAX | 9 | maximum real power output (MW) |
| PMIN | 10 | minimum real power output (MW) |
| PC1 [*] | 11 | lower real power output of PQ capability curve (MW) |
| PC2 [*] | 12 | upper real power output of PQ capability curve (MW) |
| QC1MIN [*] | 13 | minimum reactive power output at PC1 (MVA _r) |
| QC1MAX [*] | 14 | maximum reactive power output at PC1 (MVA _r) |
| QC2MIN [*] | 15 | minimum reactive power output at PC2 (MVA _r) |
| QC2MAX [*] | 16 | maximum reactive power output at PC2 (MVA _r) |
| RAMP_AGC [*] | 17 | ramp rate for load following/AGC (MW/min) |
| RAMP_10 [*] | 18 | ramp rate for 10 minute reserves (MW) |
| RAMP_30 [*] | 19 | ramp rate for 30 minute reserves (MW) |
| RAMP_Q [*] | 20 | ramp rate for reactive power (2 sec timescale) (MVA _r /min) |
| APF [*] | 21 | area participation factor |
| MU_PMAX [†] | 22 | Kuhn-Tucker multiplier on upper P_g limit (u /MW) |
| MU_PMIN [†] | 23 | Kuhn-Tucker multiplier on lower P_g limit (u /MW) |
| MU_QMAX [†] | 24 | Kuhn-Tucker multiplier on upper Q_g limit (u /MVA _r) |
| MU_QMIN [†] | 25 | Kuhn-Tucker multiplier on lower Q_g limit (u /MVA _r) |

^{*} Not included in version 1 case format.

[†] Included in OPF output, typically not included (or ignored) in input matrix. Here we assume the objective function has units u .

Tabela 7 - Informação das linhas de transmissão [22]

| name | column | description |
|------------|--------|--|
| F_BUS | 1 | “from” bus number |
| T_BUS | 2 | “to” bus number |
| BR_R | 3 | resistance (p.u.) |
| BR_X | 4 | reactance (p.u.) |
| BR_B | 5 | total line charging susceptance (p.u.) |
| RATE_A | 6 | MVA rating A (long term rating) |
| RATE_B | 7 | MVA rating B (short term rating) |
| RATE_C | 8 | MVA rating C (emergency rating) |
| TAP | 9 | transformer off nominal turns ratio, (taps at “from” bus, impedance at “to” bus, i.e. if $r = x = 0$, $tap = \frac{ V_f }{ V_t }$) |
| SHIFT | 10 | transformer phase shift angle (degrees), positive \Rightarrow delay |
| BR_STATUS | 11 | initial branch status, 1 = in-service, 0 = out-of-service |
| ANGMIN* | 12 | minimum angle difference, $\theta_f - \theta_t$ (degrees) |
| ANGMAX* | 13 | maximum angle difference, $\theta_f - \theta_t$ (degrees) |
| PF† | 14 | real power injected at “from” bus end (MW) |
| QF† | 15 | reactive power injected at “from” bus end (MVar) |
| PT† | 16 | real power injected at “to” bus end (MW) |
| QT† | 17 | reactive power injected at “to” bus end (MVar) |
| MU_SF‡ | 18 | Kuhn-Tucker multiplier on MVA limit at “from” bus (u/MVA) |
| MU_ST‡ | 19 | Kuhn-Tucker multiplier on MVA limit at “to” bus (u/MVA) |
| MU_ANGMIN‡ | 20 | Kuhn-Tucker multiplier lower angle difference limit ($u/degree$) |
| MU_ANGMAX‡ | 21 | Kuhn-Tucker multiplier upper angle difference limit ($u/degree$) |

* Not included in version 1 case format.

† Included in power flow and OPF output, ignored on input.

‡ Included in OPF output, typically not included (or ignored) in input matrix. Here we assume the objective function has units u .

Depois de se ter toda a rede modelizada no MATPOWER, necessita-se de fazer a interacção entre este último e a metodologia utilizada para resolução do problema de optimização. O algoritmo EPSO já se encontrava definido, sendo necessário construir uma rotina de avaliação das soluções (função de avaliação) enquadrada com o caso de estudo em questão. Na definição da função objectivo, é utilizado o MATPOWER 4.0b2® para permitir avaliar as soluções encontradas em termos de perdas, sendo as restantes restrições consideradas em termos da função objectivo mediante a aplicação de um modelo de penalidades. As penalidades ocorrem sempre que cada uma das restrições é violada. Mediante a atribuição de um peso a cada uma das restrições, estas são consideradas na função objectivo mediante uma degradação do valor da mesma.

4.3 -Cenários

De forma a avaliar a performance da metodologia que é proposta, foram criados diversos cenários de produção de potência activa em cada um dos sub-parques do cluster de parques eólicos, correspondendo a diferentes condições de disponibilidade de vento. Considera-se ainda que todos os aerogeradores em cada sub-parque estão a produzir o mesmo valor de potência activa. Os diferentes cenários encontram-se expostos nas figuras abaixo. Em todos os casos, o valor percentual diz respeito ao valor produzindo em cada aerogerador de cada sub-parque. Cada uma das figuras mostra o valor da potência activa por aerogerador em cada sub-parque.

O cenário 1 contempla uma produção de potência activa de 50% da sua capacidade nominal para o parque A , 40% para o parque B , 30% para o parque C, 30% para o parque D, 40% para o parque E, 50% para o parque F e 50% para o parque G.

No cenário 2 tem-se uma produção de potência activa de 50% da potência nominal em todos os parques.

O cenário 3 possui uma geração de potência activa de 80% em A, 40% em B , 20% para C, 20 % também para o parque D, 40% para o parque E , 80% para os parques F e G.

Para o cenário 4, tem-se uma potência activa definida como 30% para o parque A, 40% para o parque B, 50 % para o parque C e D, 40% para o parque E, e 30% para os parques F e G.

| Cenário 1 | |
|-----------|-------|
| Parque | Pg/Pn |
| A | 50% |
| B | 40% |
| C | 30% |
| D | 30% |
| E | 40% |
| F | 50% |
| G | 50% |

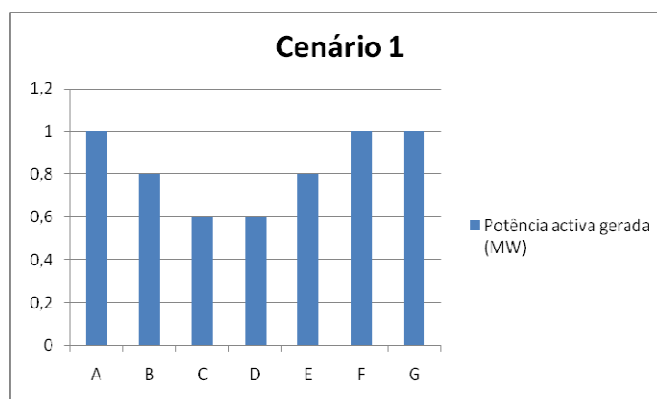


Figura 22 - Potência activa gerada no cenário 1 de exploração

| Cenário 2 | |
|-----------|-------|
| Parque | Pg/Pn |
| A | 50% |
| B | 50% |
| C | 50% |
| D | 50% |
| E | 50% |
| F | 50% |
| G | 50% |

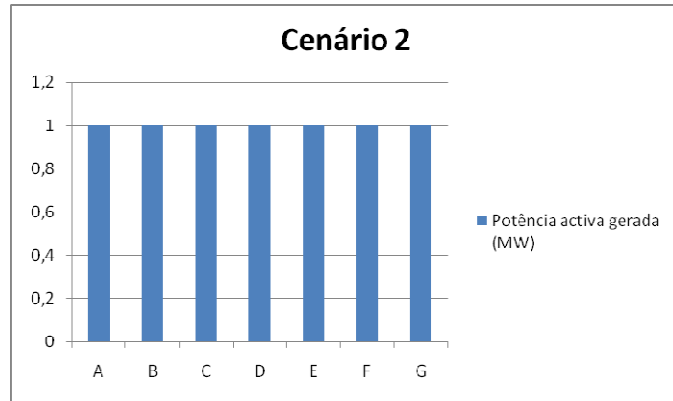


Figura 23 - Potência activa gerada no cenário 2 de exploração

| Cenário 3 | |
|-----------|-------|
| Parque | Pg/Pn |
| A | 80% |
| B | 40% |
| C | 20% |
| D | 20% |
| E | 40% |
| F | 80% |
| G | 80% |

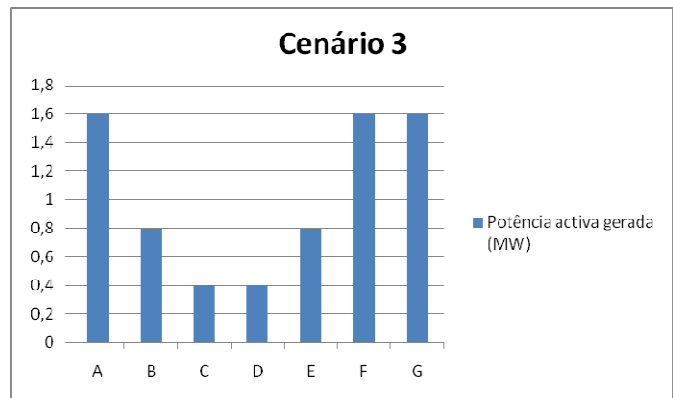


Figura 24 - Potência activa gerada no cenário 3 de exploração

| Cenário 4 | |
|-----------|-------|
| Parque | Pg/Pn |
| A | 30% |
| B | 40% |
| C | 50% |
| D | 50% |
| E | 40% |
| F | 30% |
| G | 30% |

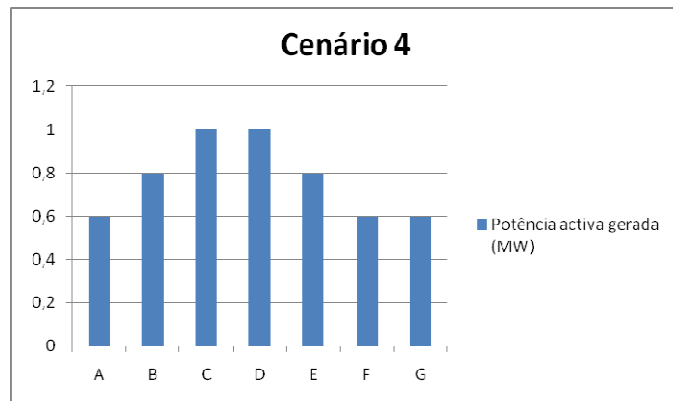


Figura 25 - Potência activa gerada no cenário 4 de exploração

4.4 - Resultados

A partir dos cenários expostos em cima foram realizadas simulações de modo a determinar as soluções óptimas para a geração de potência reactiva nas máquinas dos sete sub-parques e para as razões de transformação dos transformadores que fazem a ligação de cada sub-parque com a rede interna do cluster. Para cada um dos cenários anteriormente descritos foi considerado o requisito de ser necessário injectar 20% de potência reactiva face à potência activa no ponto de interligação do cluster de parques eólicos com a rede de transporte (barramento 300 da figura 19). De forma a testar a robustez do algoritmo em diversas situações, foram realizadas simulações considerando populações com 30 e 50 partículas, bem como 500 e 1000 iterações.

Relativamente aos cenários considerados, apresentam-se nas tabelas seguintes alguns aspectos comparativos dos resultados obtidos, quer em termos das variáveis de decisão, quer em termos da função objectivo utilizada, traduzida pelo valor das perdas obtido em cada um dos casos que é avaliado.

Tabela 8 - Comparação resultados para o cenário 1 de produção (variáveis de decisão)

| | | | | | | | | |
|------------------------------------|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 30 Partículas 500 Iterações | Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,0003 | 0,2759 | 0,2398 | 0,2655 | 0,3702 | 0,0374 | 0,2047 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 0,9716 | 1,0025 | 1,0152 | 1,0054 | 1,0046 | 1,0134 | 1,0070 |
| 30 Partículas 1000 Iterações | Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,0893 | 0,2833 | 0,3103 | 0,3317 | 0,0403 | 0,1032 | 0,4628 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 0,9755 | 1,0023 | 1,0132 | 1,0086 | 1,0025 | 0,9940 | 1,0091 |
| 50 Partículas 500 Iterações | Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,2736 | 0,0001 | 0,2731 | 0,0002 | 0,4191 | 0,4040 | 0,0019 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 0,9765 | 0,9993 | 0,9964 | 1,0180 | 0,9889 | 1,0111 | 1,0106 |
| 50 Partículas 1000 Iterações | Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,1482 | 0,1734 | 0,0727 | 0,4084 | 0,1918 | 0,3475 | 0,0001 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 0,9740 | 0,9930 | 1,0078 | 1,0125 | 1,0082 | 1,0035 | 1,0106 |

Tabela 9 - Comparação resultados para o cenário 1 de produção (perdas e tg ϕ)

| | iter | Perdas (MW) | Tg ϕ | Tempo aproximado(min) |
|------------------|------|-------------|-----------|-----------------------|
| 30 partículas | 500 | 1,2400 | 0,2000 | 81 |
| | 1000 | 1,2480 | 0,2000 | 159 |
| 50 partículas | 500 | 1,2597 | 0,2000 | 152 |
| | 1000 | 1,2444 | 0,2000 | 301 |

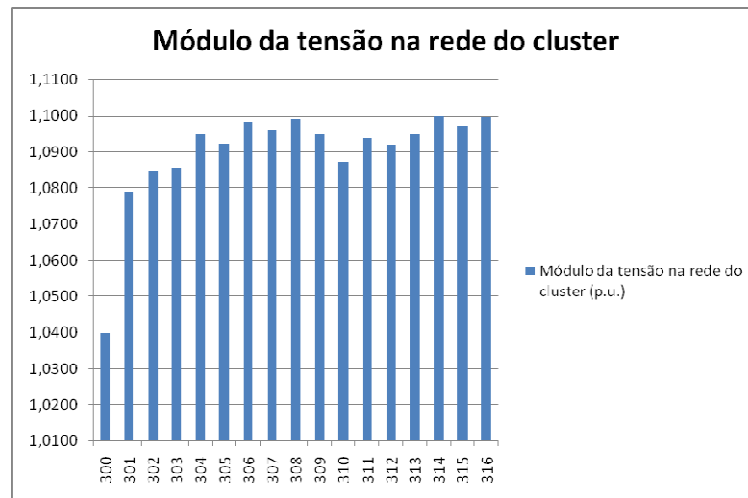


Figura 26 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 1 (30 partículas e 500 iterações)

Tabela 9 - Comparação resultados para o cenário 2 de produção (variáveis de decisão)

| | | | | | | | | |
|---------------------------------|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 30 Partículas 500 Iterações | Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,0000 | 0,2851 | 0,5682 | 0,5435 | 0,3930 | 0,0232 | 0,0088 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 0,9747 | 1,0186 | 1,0172 | 1,0061 | 1,0184 | 1,0155 | 1,0030 |
| 30 Partículas 1000 Iterações | Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,0000 | 0,2851 | 0,5682 | 0,5434 | 0,3930 | 0,0234 | 0,0091 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 0,9747 | 1,0186 | 1,0172 | 1,0061 | 1,0184 | 1,0155 | 1,0030 |
| 50 Partículas 500 Iterações | Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,1037 | 0,2536 | 0,5270 | 0,5800 | 0,0480 | 0,4962 | 0,0649 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 0,9776 | 1,0143 | 1,0136 | 1,0106 | 1,0167 | 0,9975 | 1,0164 |
| 50 Partículas 1000 Iterações | Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,2400 | 0,1655 | 0,4823 | 0,3110 | 0,2145 | 0,4185 | 0,2978 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 0,9808 | 1,0094 | 1,0065 | 1,0165 | 1,0024 | 1,0019 | 1,0161 |

Tabela 8 - Comparação resultados para o cenário 2 de produção

| | iter | Perdas (MW) | Tg φ | Tempo aproximado(min) |
|------------------|------|-------------|--------------|-----------------------|
| 30 partículas | 500 | 1,7067 | 0,1992 | 79 |
| | 1000 | 1,7067 | 0,1993 | 180 |
| | | | | |
| 50 partículas | 500 | 1,7142 | 0,2000 | 160 |
| | 1000 | 1,7147 | 0,2000 | 271 |

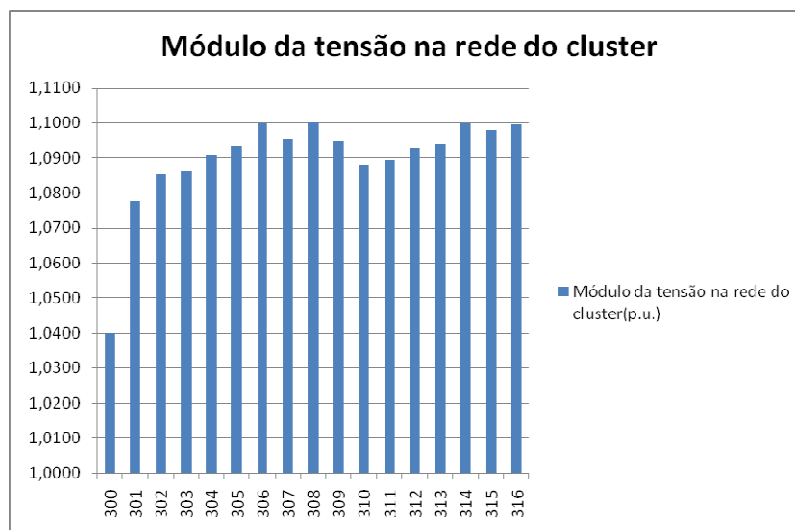


Figura 27 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 2 (30 partículas e 500 iterações)

Tabela 11 - Comparação resultados para o cenário 3 de produção (variáveis de decisão)

| | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 30 Partículas 500 Iterações | Partícula ótima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,1439 | 0,4124 | 0,4691 | 0,3185 | 0,1746 | 0,2995 | 0,4062 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 0,9822 | 1,0041 | 1,0185 | 1,0131 | 0,9970 | 0,9970 | 1,0139 |
| 30 Partículas 1000 Iterações | Partícula ótima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,1439 | 0,4124 | 0,4691 | 0,3185 | 0,1746 | 0,2995 | 0,4062 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 0,9822 | 1,0041 | 1,0185 | 1,0131 | 0,9970 | 0,9970 | 1,0139 |
| 50 Partículas 500 Iterações | Partícula ótima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,2299 | 0,0006 | 0,6610 | 0,4111 | 0,4280 | 0,2498 | 0,0009 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 0,9807 | 1,0128 | 0,9953 | 1,0169 | 1,0031 | 1,0105 | 1,0065 |
| 50 Partículas 1000 Iterações | Partícula ótima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,1668 | 0,2623 | 0,4162 | 0,6187 | 0,0383 | 0,3564 | 0,4548 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 0,9811 | 1,0024 | 1,0101 | 1,0141 | 1,0109 | 0,9928 | 1,0183 |

Tabela 9 - Comparação resultados para o cenário 3 de produção

| | iter | Perdas (MW) | Tg φ | Tempo aproximado(min) |
|------------------|------|-------------|--------------|-----------------------|
| 30 partículas | 500 | 2,1688 | 0,2000 | 144 |
| | 1000 | 2,1688 | 0,2000 | 158 |
| | | | | |
| 50 partículas | 500 | 2,1715 | 0,2000 | 179 |
| | 1000 | 2,1722 | 0,2000 | 325 |

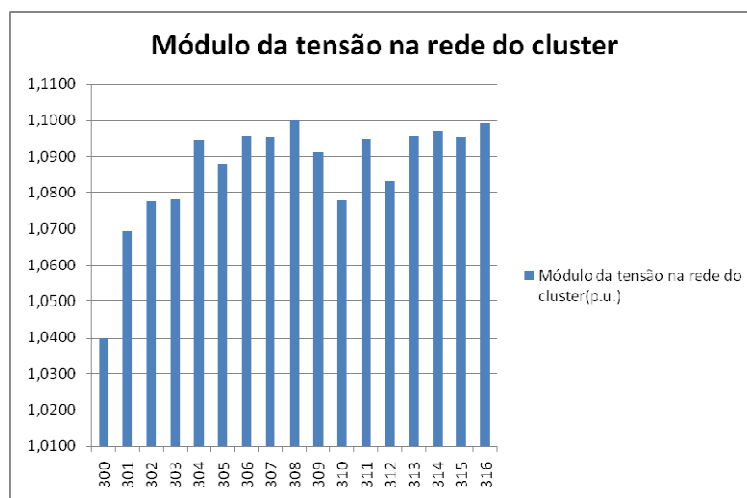


Figura 28 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 3 (30 partículas e 500 iterações)

Tabela 10 - Comparação resultados para o cenário 4 de produção (variáveis de decisão)

| | | | | | | | | |
|---------------------------------|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 30 Partículas 500 Iterações | Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,0125 | 0,0007 | 0,3622 | 0,3348 | 0,4161 | 0,1248 | 0,0021 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 0,9694 | 1,0107 | 0,9993 | 1,0017 | 1,0119 | 1,0178 | 1,0054 |
| 30 Partículas 1000 Iterações | Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,1686 | 0,0001 | 0,4205 | 0,4703 | 0,0003 | 0,2525 | 0,0000 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 0,9708 | 1,0127 | 1,0000 | 1,0120 | 1,0148 | 0,9962 | 1,0057 |
| 50 Partículas 500 Iterações | Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,0830 | 0,0836 | 0,4298 | 0,2245 | 0,1689 | 0,4242 | 0,0117 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 1,0289 | 0,9575 | 0,9501 | 0,9526 | 0,9500 | 0,9500 | 0,9588 |
| 50 Partículas 1000 Iterações | Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
| | | 0,1139 | 0,1775 | 0,3963 | 0,1261 | 0,2517 | 0,0000 | 0,3716 |
| | | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | | 1,0238 | 0,9613 | 0,9608 | 0,9604 | 0,9502 | 0,9571 | 0,9562 |

Tabela 11 - Comparação resultados para o cenário 4 de produção

| | iter | Perdas (MW) | Tg φ | Tempo aproximado(min) |
|------------------|------|-------------|--------------|-----------------------|
| 30 partículas | 500 | 0,9838 | 0,2000 | 68 |
| | 1000 | 0,9869 | 0,2000 | 134 |
| | | | | |
| 50 partículas | 500 | 1,0637 | 0,2000 | 111 |
| | 1000 | 1,0537 | 0,2000 | 220 |

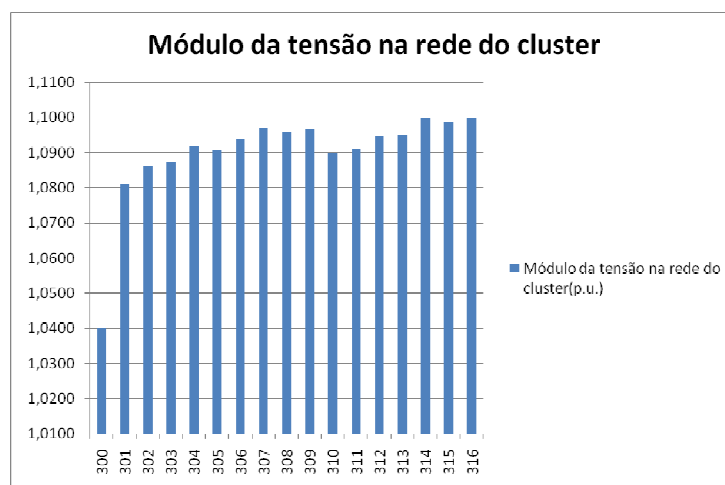


Figura 29 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 4 (30 partículas e 500 iterações)

fazendo uma análise crítica dos resultados, verifica-se que para todos os cenários considerados, o requisito relativo à injeção de potência reactiva no ponto de interligação do cluster de parques eólicos com a rede de transporte (traduzido pelo valor de $\text{tg } \varphi = 0.2$) é cumprido. Adicionalmente, verifica-se ainda que o módulo de tensão nos barramentos da rede interna do cluster se encontra dentro da gama de valores admissíveis que foi estabelecido.

A título de exemplo, podem observar-se nas figuras seguintes os gráficos da função de avaliação para algum dos casos estudados, permitindo concluir que a utilização de 500 iterações produzem resultados já satisfatórios, sendo que o processo converge para um número de iterações inferior a 500, não havendo necessidade na maior parte dos cenários de evoluir para as 1000 iterações, com os números de partículas utilizados. Adicionalmente, fazendo uma análise comparativa dos resultados obtidos em casa um dos cenários avaliados, especialmente no que diz respeito ao valor das perdas obtidas quando é utilizado um maior número de indivíduos na população, verifica-se que a diversidade assim criada cria dificuldades acrescidas à convergência do algoritmo. Desta forma, conclui-se que é possível obter resultados satisfatórios com um numero mais reduzido de indivíduos (30), bem como de iterações (500).

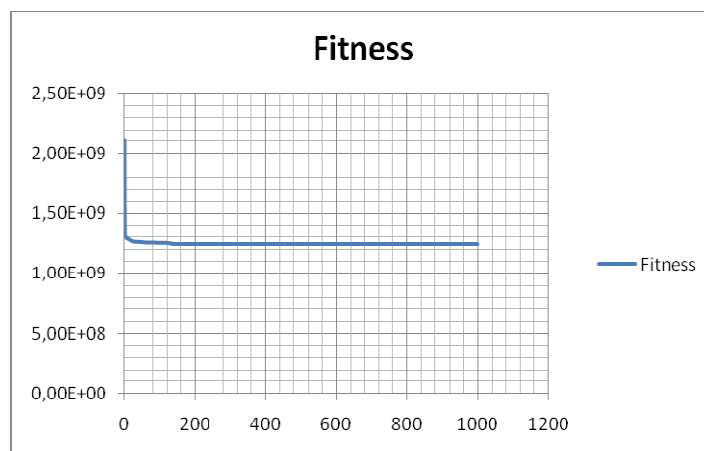


Figura 30 - Evolução da fitness das partículas para cenário 1 com 50 partículas e 1000 iterações

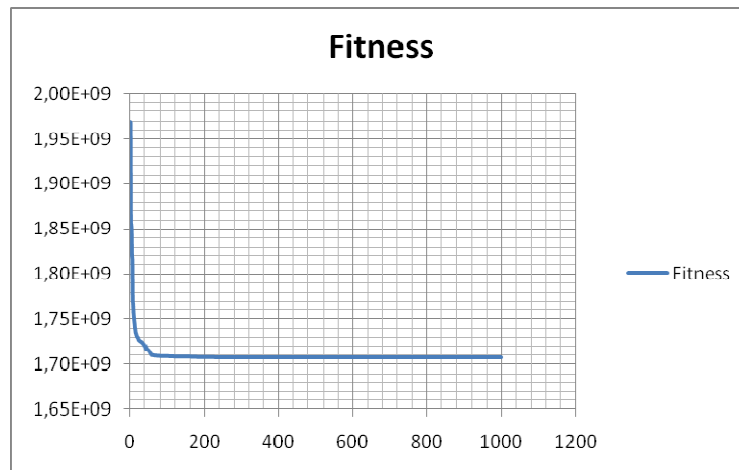


Figura 31 - Evolução da fitness das partículas para cenário 2 com 30 partículas e 1000 iterações

Analisando os resultados referentes aos valores de produção de reactiva por cada sub-parque (despacho de potência reactiva obtido pelo algoritmo), observa-se que em alguns casos existem maiores produções de potência reactiva em parques que se encontram geograficamente mais longe do ponto de interligação, do que propriamente os que se encontram mais perto. A ocorrência deste fenómeno, pode implicar a necessidade de injectar mais quantidade de potência reactiva nessas zonas, de modo a subir o módulo de tensão nos barramentos próximos e assim se conseguir um perfil de tensão enquadrado no previamente estabelecido. A alguma aleatoriedade que também possa existir na distribuição da produção de reactiva, pode ser explicada pela reduzida distância eléctrica entre os vários sub-parques, devido à baixa impedância do parque das linhas de alta tensão que compõem a rede interna do cluster. Isto faz com o algoritmo tenha dificuldades em fazer o despacho de reactiva óptimo de modo a correr um trânsito de potências e conseguir o menor valor de perdas possível. Adicionalmente, a consideração da rede interna de cada sub-parque do cluster (rede 20 kV, construída em cabo subterrâneo), influencia igualmente os resultados, dado que são redes mais resistivas do que a rede de alta tensão (aérea) do cluster: dependendo do comprimento eléctrico das canalizações de 20 kV de cada sub-parque, cuja influência é também contabilizada nas perdas, assim poderá ser mais eficiente produzir a potência reactiva de compensação em locais mais afastados do ponto de interligação com a rede de transporte.

De modo a verificar a robustez do algoritmo foram efectuadas 3 corridas do algoritmo para o cenário 4 com 50 partículas e 5000 iterações. Conclui-se que o algoritmo é considerado robusto, uma vez que o desvio padrão encontrado possui um valor razoavelmente baixo.

Tabela 12 - Análise da robustez do algoritmo

| | | |
|-----------------------------|-------------------|---------------------------|
| 50 partículas_5000iterações | média perdas (MW) | desvio padrão perdas (kW) |
| | 1,0274 | 0,1359 |

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho foram abordados os diferentes aspectos sobre a interligação de parques eólicos com redes eléctricas, nomeadamente o caso Português, segundo o disposto pelas regras impostas pelo concurso público para a atribuição de licenças para a construção de novos parques eólicos. Tais regras, culminaram na elaboração da portaria n.º 596/2010 de 30 Julho, constituindo o código de rede (para as redes de transporte e distribuição). De entre várias medidas vigentes no actual código de rede, salientou-se neste trabalho o requisito de injeção de potência reactiva para suporte de tensão. Deste modo, o trabalho desenvolvido pretendeu dotar os parques eólicos de grande dimensão (clusters eólicos) de uma ferramenta que os possibilite responder às exigências impostas pelo operador de rede no que concerne a injeção de potência reactiva e, simultaneamente, operarem num ponto de funcionamento que conduza às menores perdas activas possíveis. Devido à complexidade e não linearidade inerente ao problema em questão, investigou-se a possibilidade da utilização de uma meta-heurística que auxiliasse na resolução do problema em questão. De entre as diversas meta-heurísticas existentes, através de revisão bibliográfica optou-se pela utilização do algoritmo EPSO para a resolução do problema em causa. Conclui-se deste modo que o algoritmo é capaz de lidar com o problema dando origem a melhorias significativas ao nível de redução de perdas através de um re-despacho de potência reactiva no cluster eólico e alteração das posições das tomadas de regulação em carga dos transformadores de cada parque eólico. Tal facto possibilita o cumprimento do imposto pelo actual código de rede e simultaneamente maximização dos lucros do promotor através da redução do perfil de perdas.

Trabalhos futuros

Como complemento ao trabalho desenvolvido nesta tese, é necessário adoptar metodologias para a aplicação do método e dos resultados obtidos em parques eólicos reais. Conforme verificado no capítulo dos resultados, as simulações efectuadas necessitam dum esforço computacional elevado, despendendo de um tempo que torna impraticável a implementação do método de forma directa, no que concerne a resposta às solicitações por parte do operador de rede. Uma possível abordagem à implementação real do método consiste na criação de um amplo conjunto de teste, abrangendo uma vasta gama de operação dos parques eólicos assim como diversas tg phi. Após a obtenção de um conjunto de teste capaz de retratar cenários reais, torna-se necessário encontrar uma plataforma que relacione os setpoints do operador de rede com as potências disponíveis em cada parque. Para tal, sugere-se a adopção de uma rede neuronal, na literatura anglo-saxónica ANN (Artificial Neural Network). Tal infra-estrutura deverá ser capaz de enviar setpoints com os valores de potência reactiva que cada parque deverá produzir em função da potência activa existente e, o respectivo setpoint de potência reactiva enviado pelo operador de rede. Pretende-se que tal implementação, possibilite a resposta em tempo real por parte do cluster eólico às solicitações de tg phi imposta pelo operador do sistema.

Referências

1. DGEG. *Direcção Geral de Energia e Geologia*. 2010]; Available from: <http://www.dgge.pt/>.
2. GWEC. *Global Wind Energy Council*. 2011]; Available from: <http://www.gwec.net>.
3. Ackermann, T., ed. *Wind Power in Power Systems*. John Wiley and Sons, Ltd.
4. Shih-Min, H., *Discussion of "Reactive compensation techniques to improve the ride-through capability of wind turbine during disturbance"*. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2005. 41(6): p. 1483.
5. Almeida, R., *Contribuições para a Avaliação da Capacidade de Fornecimento de Serviços de sistema por parte de Aerogeradores de Indução Duplamente Alimentados*. 2006, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
6. Banakar, H. and O. Boon Teck, *Clustering of Wind Farms and its Sizing Impact*. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2009. 24(4): p. 935-942.
7. Lopes, J.P. (2008) *How to Prepare a Power System for 15% Wind Energy Penetration: the Portuguese Case Study*. DOI: 10.1002/we.253.
8. Marques, P.J.F., *Soluções para melhoria da segurança dinâmica de sistemas interligados com grande integração de produção eólica*, in FEUP. 2009, UP.
9. ERSE, *Regulamento de redes de transporte e distribuição RRT e RRD*. 2010.
10. Dixon, J. *Reactive Power Compensation Technologies, State-of-the-Art Review*
11. Paiva, J.P.S., *Redes de energia eléctrica: uma análise sistémica*: IST Press.
12. Pappala, V.S., et al. *Reactive Power Management in Offshore Wind Farms by Adaptive PSO*. in *Intelligent Systems Applications to Power Systems, 2007. ISAP 2007. International Conference on*. 2007.
13. Zhao, J.J., et al. *Wind farm reactive power output optimization for loss reduction and voltage profile improvements*. in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International*. 2009.
14. Cerqueira, C.A.A., *EPSO - Evolutionary Particle Swarm Optimization, a new meta-heuristic variant with application in Power Systems 2005*, INESCPORTO.
15. Miranda, V., *Computação Evolucionária: Uma introdução*. 2005.
16. Chang Wook, A. and R.S. Ramakrishna, *Elitism-based compact genetic algorithms*. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 2003. 7(4): p. 367-385.
17. Eberhart, R.C. *Comparison between Genetic Algorithms and Particle Swarm Optimization*
18. Miranda, V. and N. Fonseca. *EPSO - best-of-two-worlds meta-heuristic applied to power system problems*. in *Evolutionary Computation, 2002. CEC '02. Proceedings of the 2002 Congress on*. 2002.
19. Madureira, A.G., *COORDINATED AND OPTIMIZED VOLTAGE MANAGEMENT OF DISTRIBUTION NETWORKS WITH MULTI-MICROGRIDS*. 2010.
20. Miranda, V. and N. Fonseca. *EPSO-evolutionary particle swarm optimization, a new algorithm with applications in power systems*. in *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*. 2002.
21. ENERCON, *Technical and economical benefits of wind energy converters with FACTS Capabilities for power systems and the grid integration of wind power*. 2007.

22. Zimmerman, R.D., *MATPOWER 4.0b2 User's Manual*. 2010, Power Systems Engineering Research Center.

Anexo A

Resultados para os diferentes cenários

Cenário 1

30 partículas e 500 iterações

Tabela 13 - Partícula óptima para cenário 1 com 30 partículas e 500 iterações

| Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,0003 | 0,2759 | 0,2398 | 0,2655 | 0,3702 | 0,0374 | 0,2047 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | 0,9716 | 1,0025 | 1,0152 | 1,0054 | 1,0046 | 1,0134 | 1,0070 |

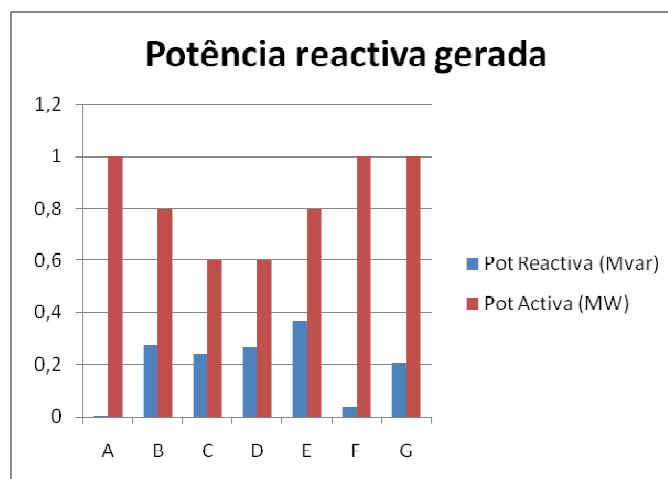


Figura 32 - Potência reactiva gerada para cenário 1 com 30 partículas e 500 iterações

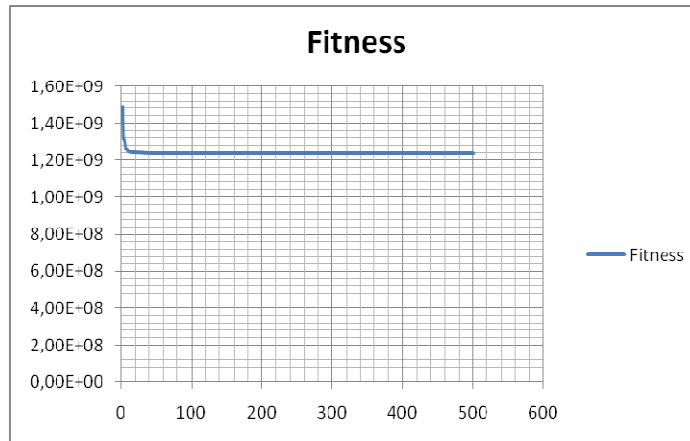


Figura 33 - Evolução da fitness das partículas para cenário 1 com 30 partículas e 500 iterações

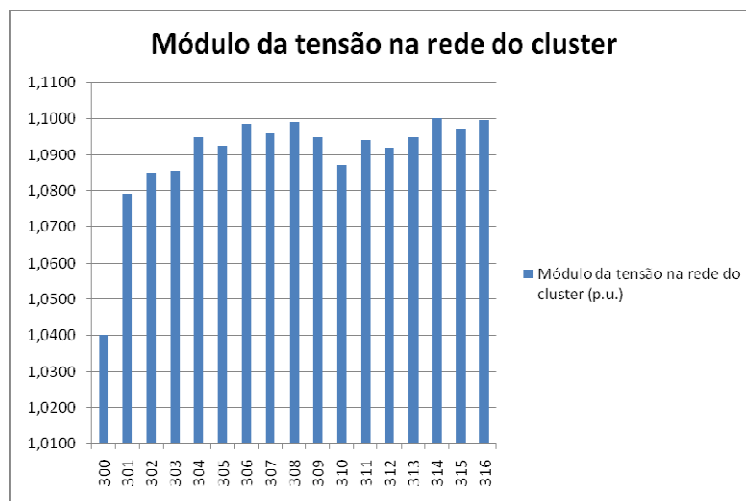


Figura 34 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 1 com 30 partículas e 500 iterações

30 partículas e 1000 iterações

Tabela 14 - Partícula ótima para cenário 1 com 30 partículas e 1000 iterações

| Partícula ótima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,0893 | 0,2833 | 0,3103 | 0,3317 | 0,0403 | 0,1032 | 0,4628 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | 0,9755 | 1,0023 | 1,0132 | 1,0086 | 1,0025 | 0,9940 | 1,0091 |

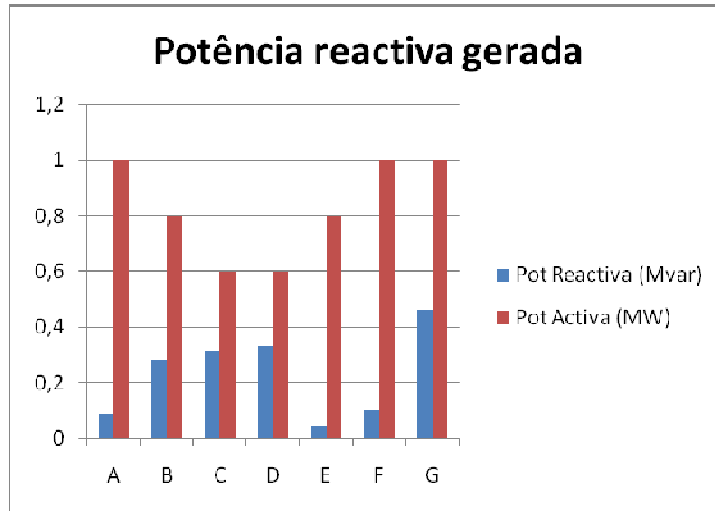


Figura 35 - Potência reactiva gerada para cenário 1 com 30 partículas e 1000 iterações

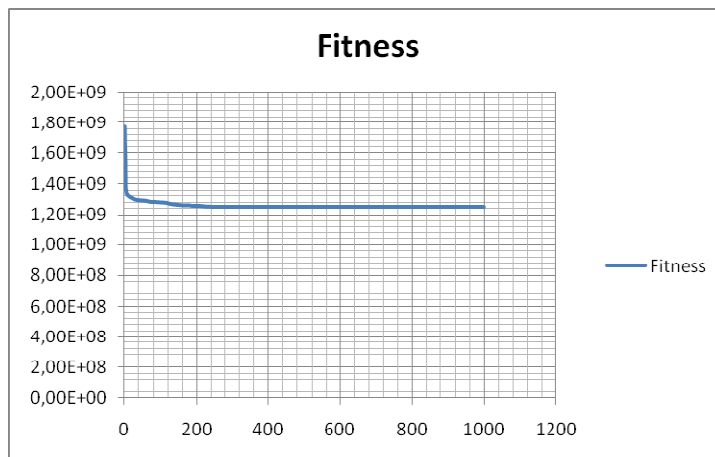


Figura 36 - Evolução da fitness das partículas para cenário 1 com 30 partículas e 1000 iterações

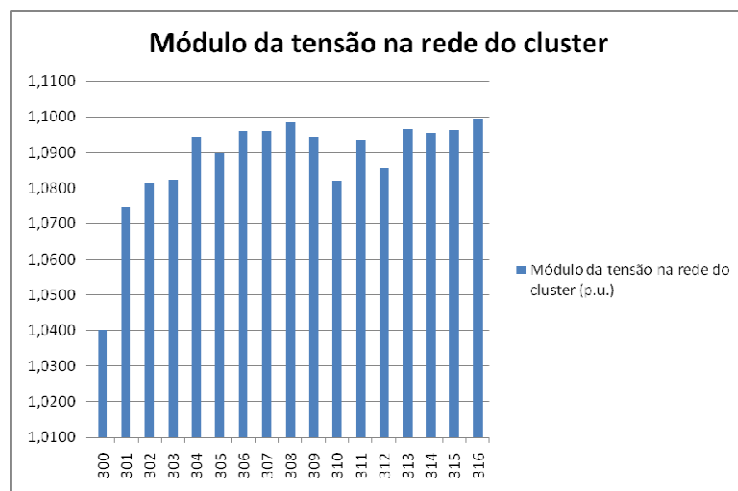


Figura 37 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 1 com 30 partículas e 1000 iterações

50 partículas e 500 iterações

Tabela 15 - Partícula óptima para cenário 1 com 50 partículas e 500 iterações

| Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,2736 | 0,0001 | 0,2731 | 0,0002 | 0,4191 | 0,4040 | 0,0019 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | 0,9765 | 0,9993 | 0,9964 | 1,0180 | 0,9889 | 1,0111 | 1,0106 |

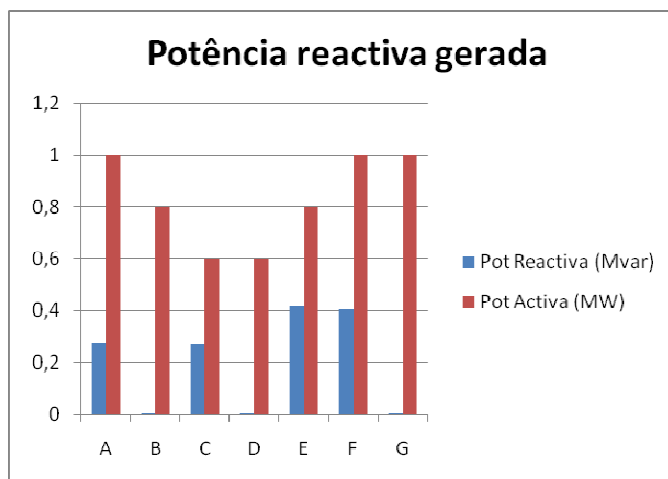


Figura 38 - Potência reactiva gerada para cenário 1 com 50 partículas e 500 iterações

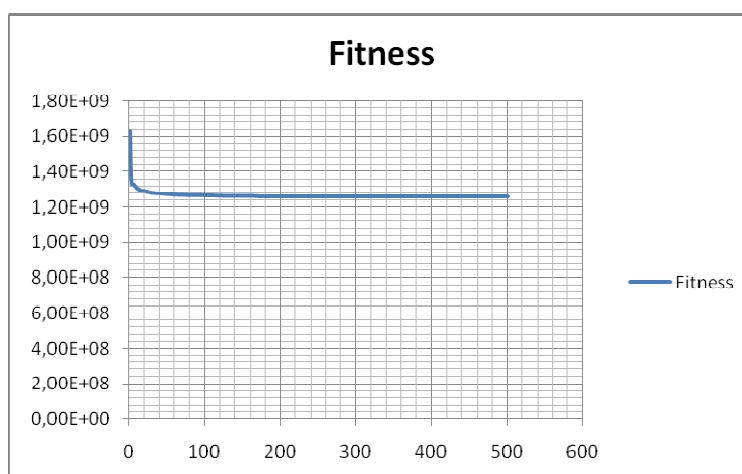


Figura 39 - Evolução da fitness das partículas para cenário 1 com 50 partículas e 500 iterações

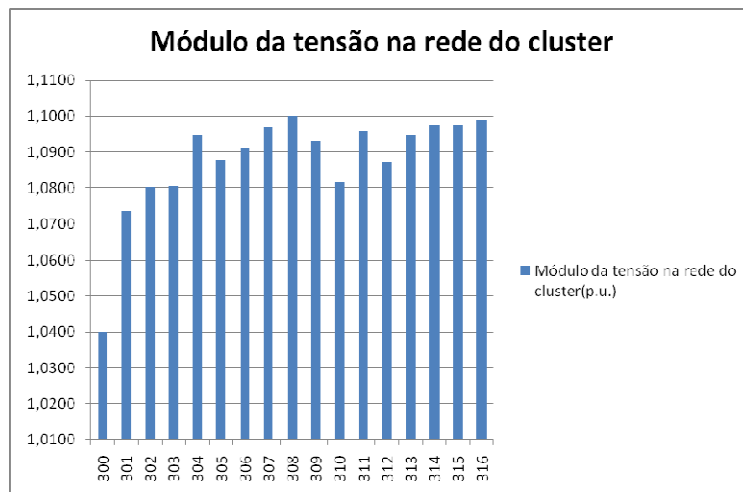


Figura 40 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 1 com 50 partículas e 500 iterações

50 partículas e 1000 iterações

Tabela 16 - Partícula óptima para cenário 1 com 50 partículas e 1000 iterações

| Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,1482 | 0,1734 | 0,0727 | 0,4084 | 0,1918 | 0,3475 | 0,0001 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | 0,9740 | 0,9930 | 1,0078 | 1,0125 | 1,0082 | 1,0035 | 1,0106 |

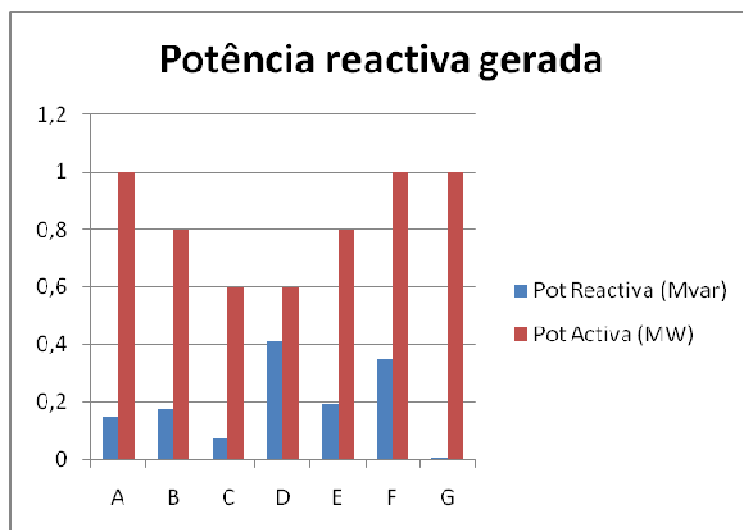


Figura 41 - Potência reactiva gerada para cenário 1 com 50 partículas e 1000 iterações

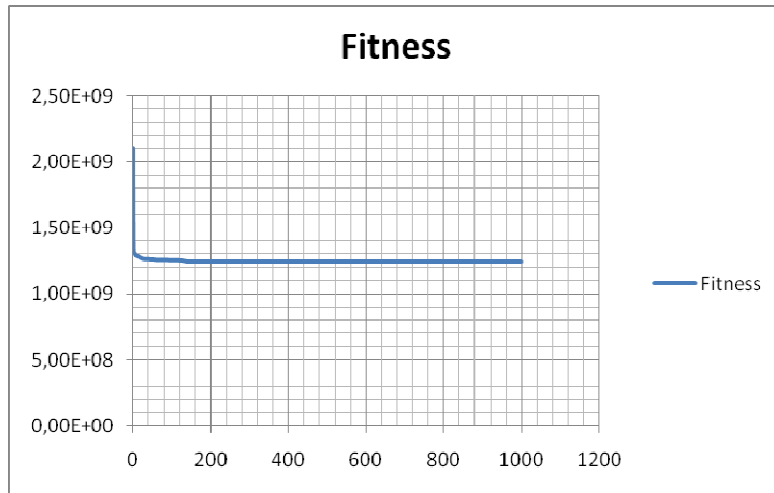


Figura 42 - Evolução da fitness das partículas para cenário 1 com 50 partículas e 1000 iterações

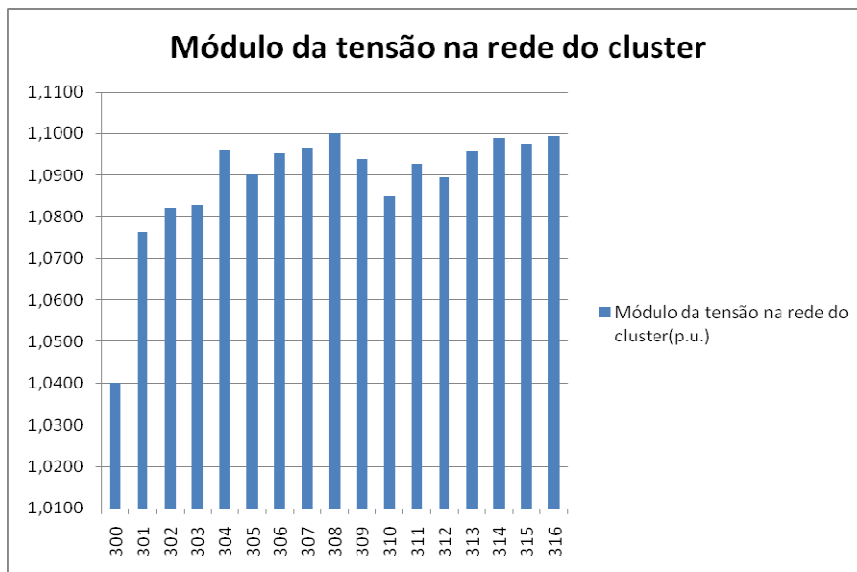


Figura 43 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 1 com 50 partículas e 1000 iterações

Cenário 2

30 partículas e 500 iterações

Tabela 17 - Partícula ótima para cenário 2 com 30 partículas e 500 iterações

| | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Partícula ótima | 0,0000 | 0,2851 | 0,5682 | 0,5435 | 0,3930 | 0,0232 | 0,0088 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | 0,9747 | 1,0186 | 1,0172 | 1,0061 | 1,0184 | 1,0155 | 1,0030 |

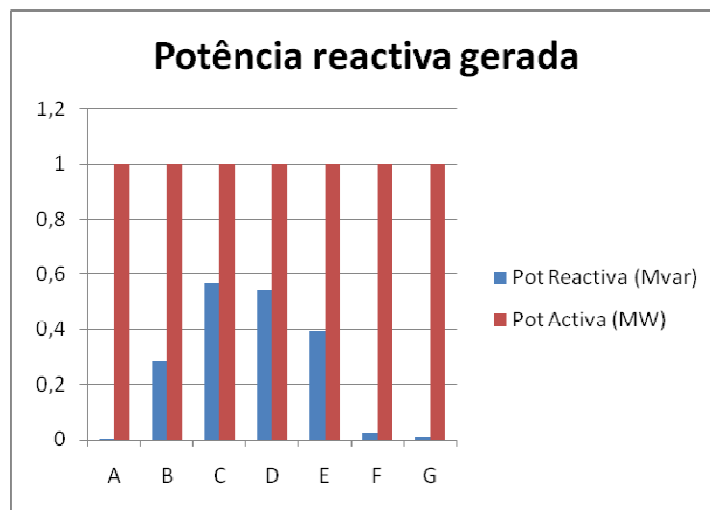


Figura 44 - Potência reactiva gerada para cenário 2 com 30 partículas e 500 iterações

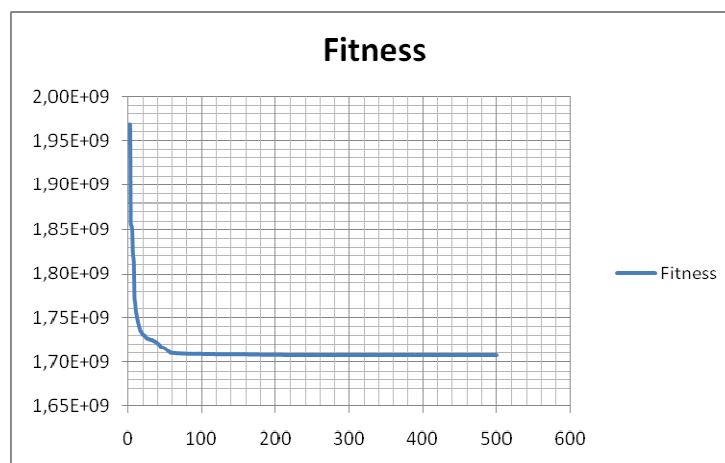


Figura 45 - Evolução da fitness das partículas para cenário 2 com 30 partículas e 500 iterações

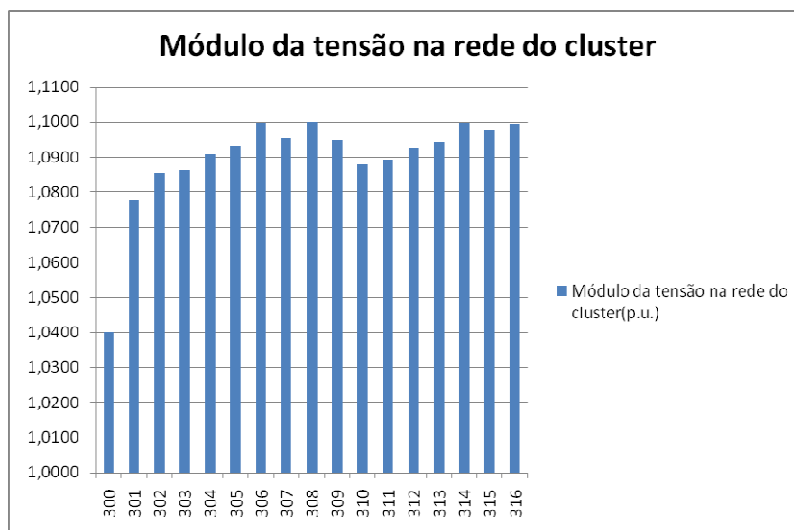


Figura 46 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 2 com 50 partículas e 500 iterações

30 partículas e 1000 iterações

Tabela 18 - Partícula óptima para cenário 2 com 30 partículas e 1000 iterações

| | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Partícula óptima | 0,0000 | 0,2851 | 0,5682 | 0,5434 | 0,3930 | 0,0234 | 0,0091 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | 0,9747 | 1,0186 | 1,0172 | 1,0061 | 1,0184 | 1,0155 | 1,0030 |

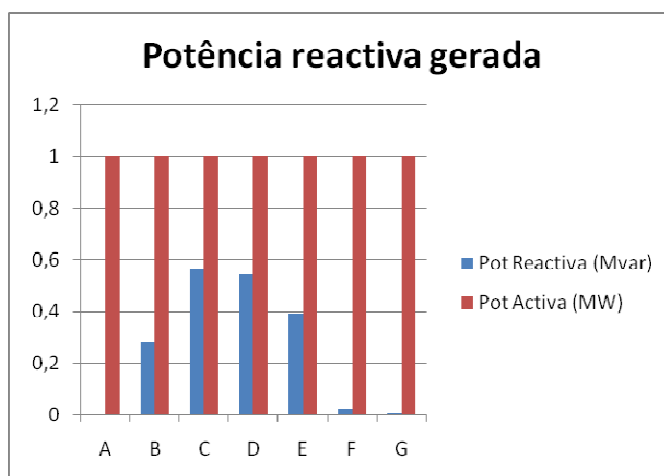


Figura 47 - Potência reactiva gerada para cenário 2 com 30 partículas e 1000 iterações

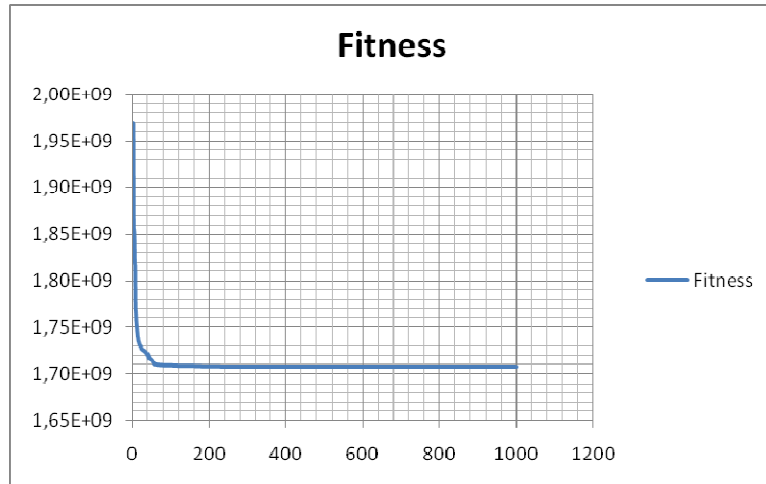


Figura 48 - Evolução da fitness das partículas para cenário 2 com 30 partículas e 1000 iterações

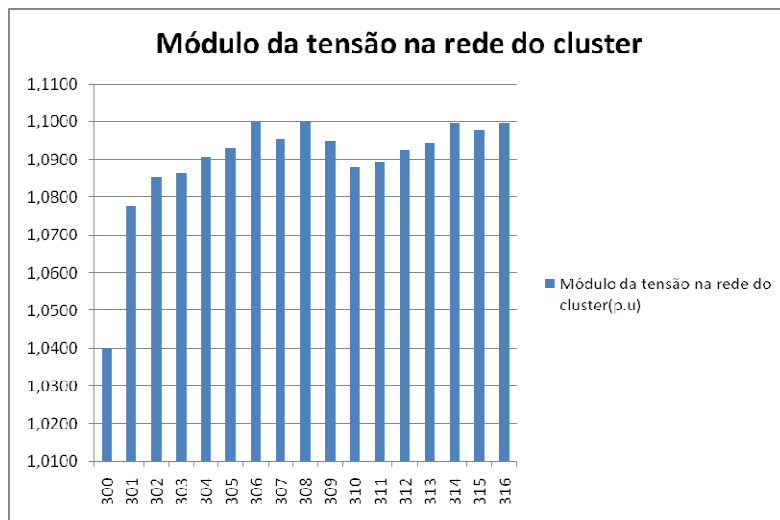


Figura 49 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 2 com 30 partículas e 1000 iterações

50 partículas e 500 iterações

Tabela 19 - Partícula óptima para cenário 2 com 50 partículas e 500 iterações

| Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,1037 | 0,2536 | 0,5270 | 0,5800 | 0,0480 | 0,4962 | 0,0649 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | 0,9776 | 1,0143 | 1,0136 | 1,0106 | 1,0167 | 0,9975 | 1,0164 |

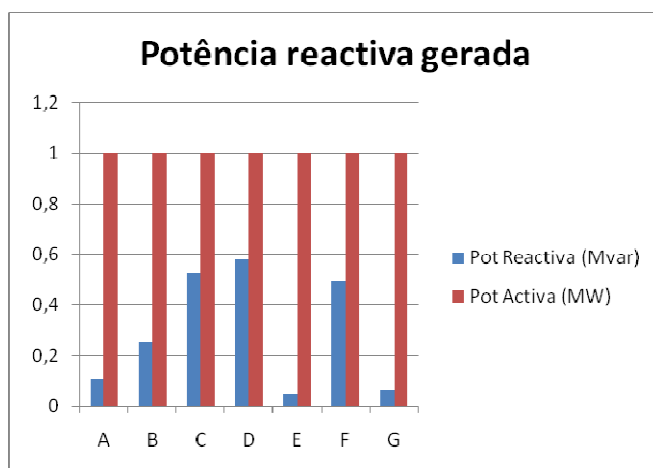


Figura 50 - Potência reactiva gerada para cenário 2 com 50 partículas e 500 iterações

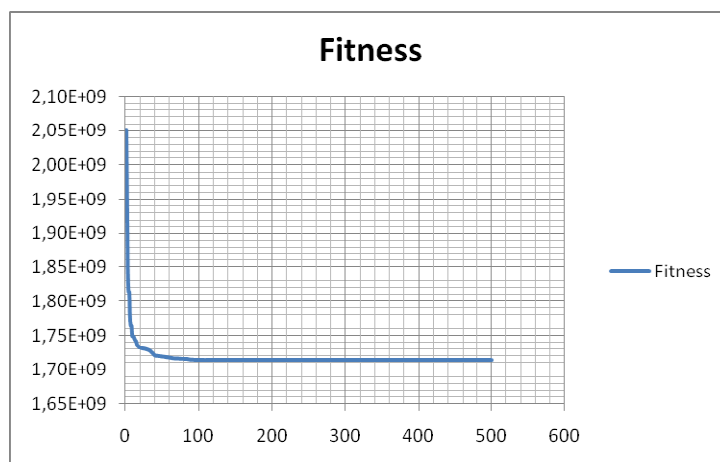


Figura 51 - Evolução da fitness das partículas para cenário 2 com 50 partículas e 500 iterações

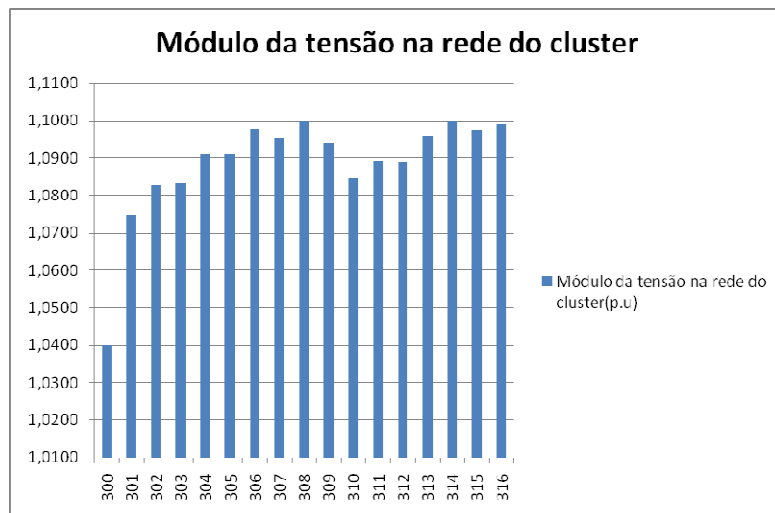


Figura 52 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 2 com 50 partículas e 500 iterações

50 partículas e 1000 iterações

Tabela 20 - Partícula ótima para cenário 2 com 50 partículas e 1000 iterações

| Partícula ótima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,2400 | 0,1655 | 0,4823 | 0,3110 | 0,2145 | 0,4185 | 0,2978 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | 0,9808 | 1,0094 | 1,0065 | 1,0165 | 1,0024 | 1,0019 | 1,0161 |

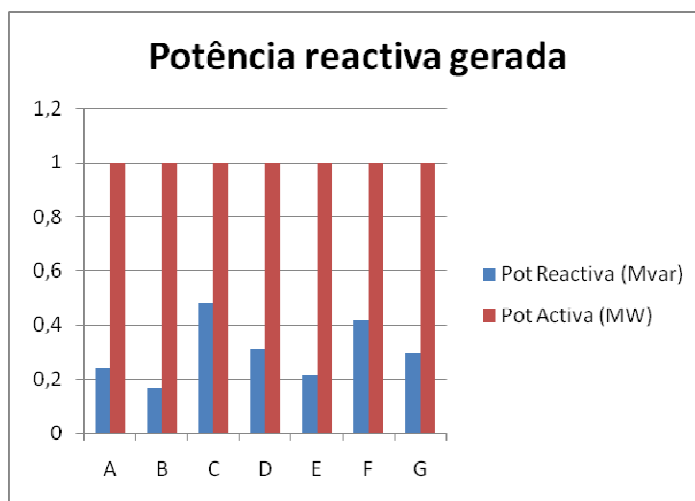


Figura 53 - Potência reactiva gerada para cenário 2 com 50 partículas e 1000 iterações

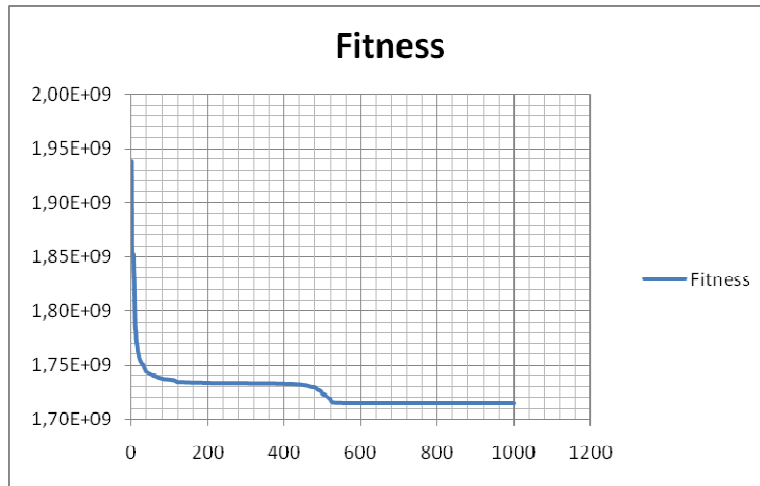


Figura 54 - Evolução da fitness das partículas para cenário 2 com 50 partículas e 1000 iterações

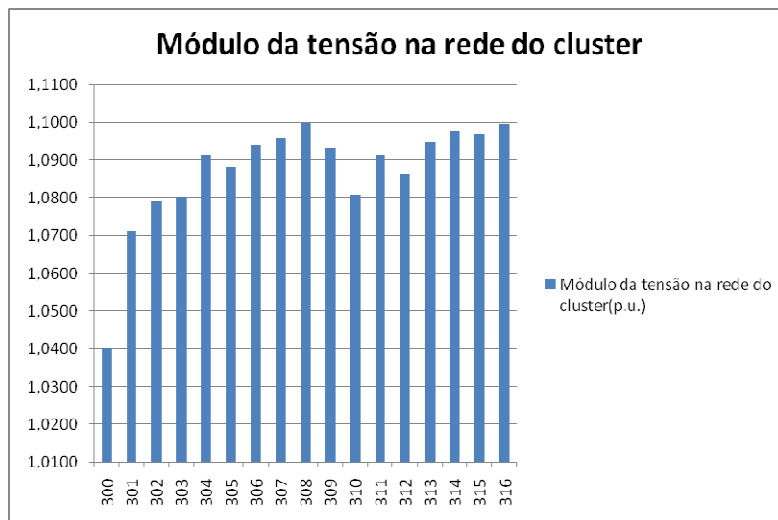


Figura 55 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 2 com 50 partículas e 1000 iterações

Cenário 3

30 partículas e 500 iterações

Tabela 21 - Partícula ótima para cenário 3 com 30 partículas e 500 iterações

| Partícula ótima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,1439 | 0,4124 | 0,4691 | 0,3185 | 0,1746 | 0,2995 | 0,4062 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |

| | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,9822 | 1,0041 | 1,0185 | 1,0131 | 0,9970 | 0,9970 | 1,0139 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|

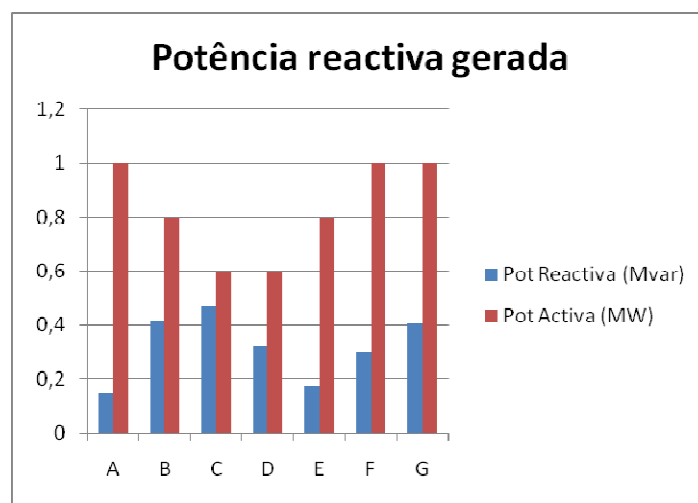


Figura 56 - Potência reactiva gerada para cenário 3 com 30 partículas e 500 iterações

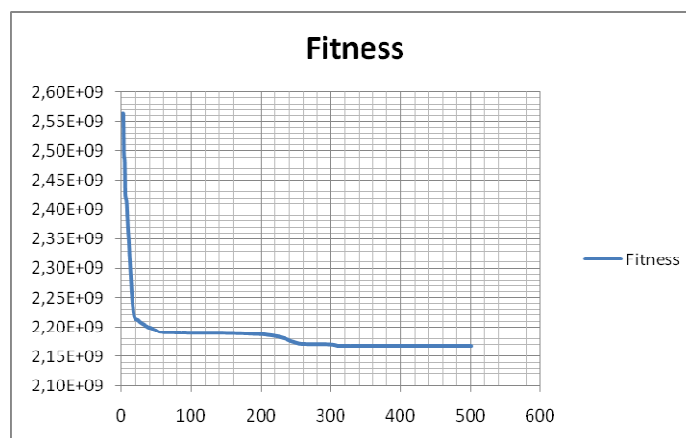


Figura 57 - Evolução da fitness das partículas para cenário 3 com 30 partículas e 500 iterações

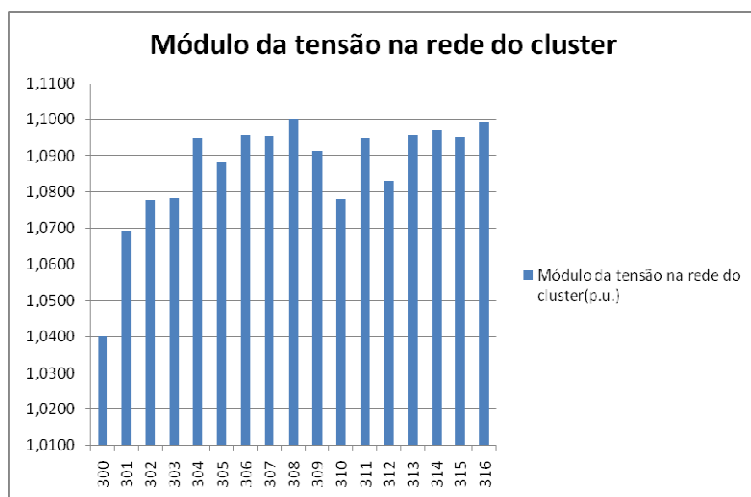


Figura 58 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 3 com 30 partículas e 500 iterações

30 partículas e 1000 iterações

Tabela 22 - Partícula óptima para cenário 3 com 30 partículas e 1000 iterações

| Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,1439 | 0,4124 | 0,4691 | 0,3185 | 0,1746 | 0,2995 | 0,4062 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | 0,9822 | 1,0041 | 1,0185 | 1,0131 | 0,9970 | 0,9970 | 1,0139 |

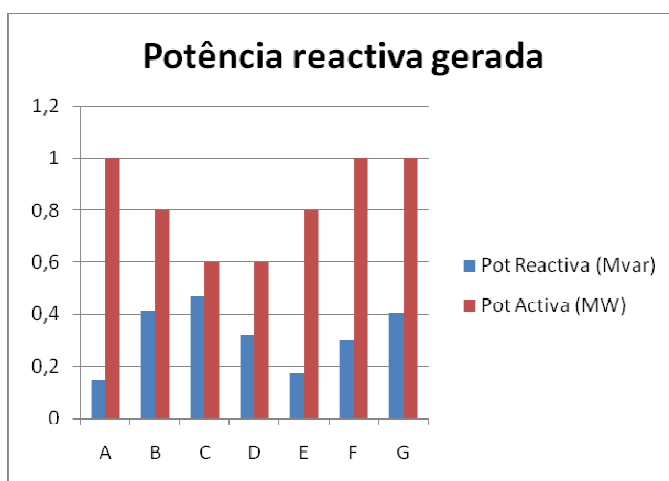


Figura 59 - Potência reactiva gerada para cenário 3 com 30 partículas e 1000 iterações

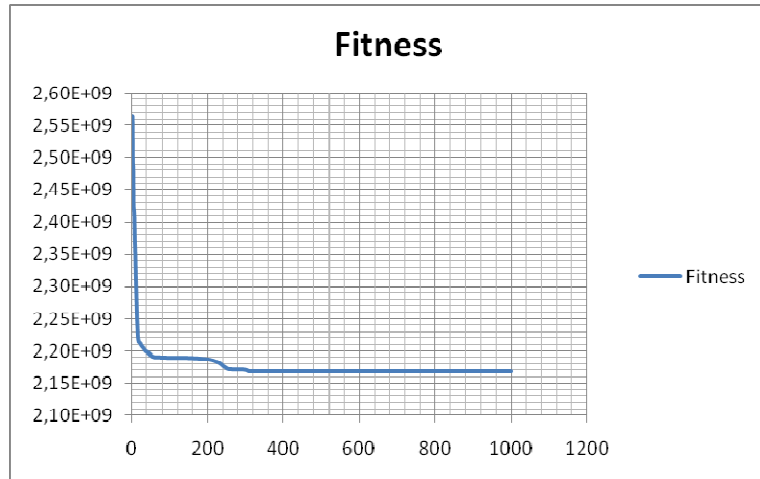


Figura 60 - Evolução da fitness das partículas para cenário 3 com 30 partículas e 1000 iterações

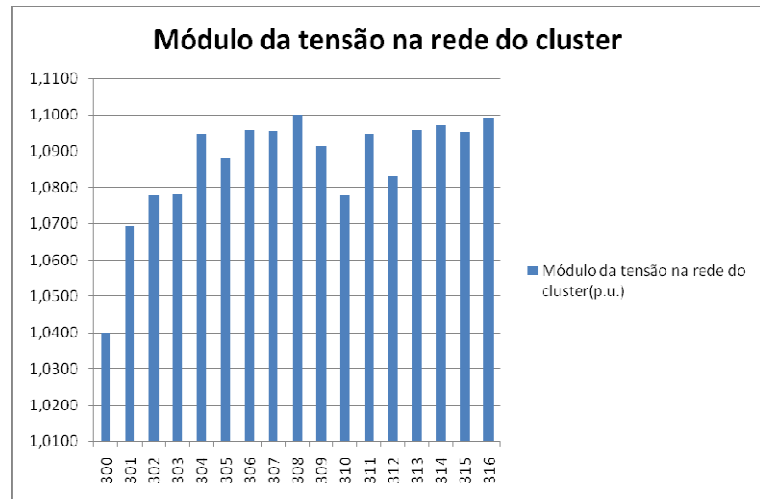


Figura 61 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 3 com 30 partículas e 1000 iterações

50 partículas e 500 iterações

Tabela 23 - Partícula óptima para cenário 3 com 50 partículas e 500 iterações

| Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,2299 | 0,0006 | 0,6610 | 0,4111 | 0,4280 | 0,2498 | 0,0009 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | 0,9807 | 1,0128 | 0,9953 | 1,0169 | 1,0031 | 1,0105 | 1,0065 |

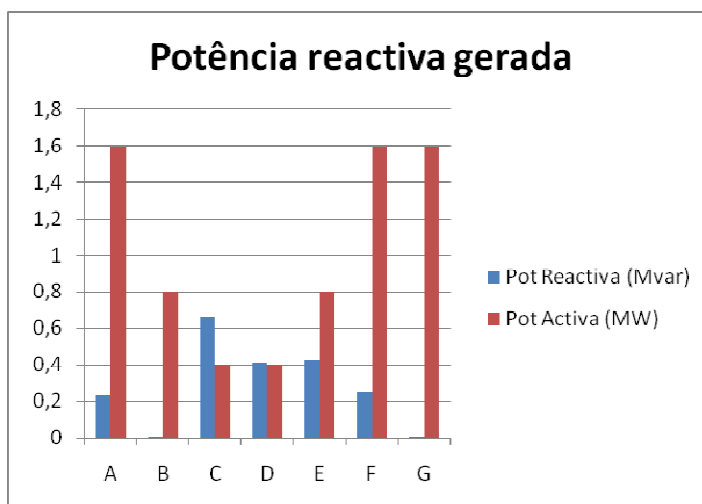


Figura 62 - Potência reactiva gerada para cenário 3 com 50 partículas e 500 iterações

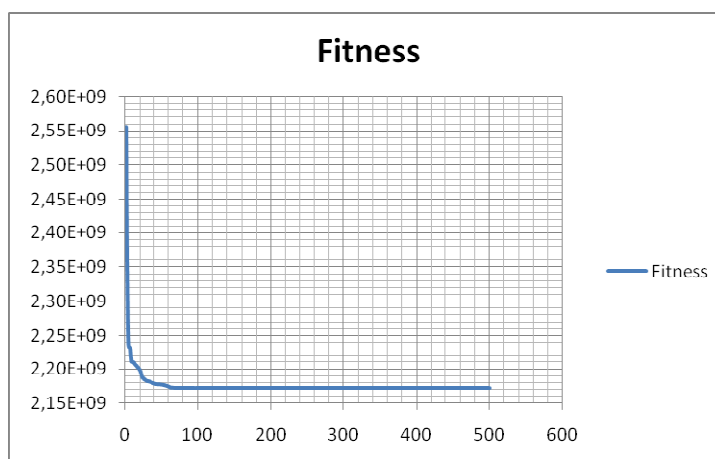


Figura 63 - Evolução da fitness das partículas para cenário 3 com 50 partículas e 500 iterações

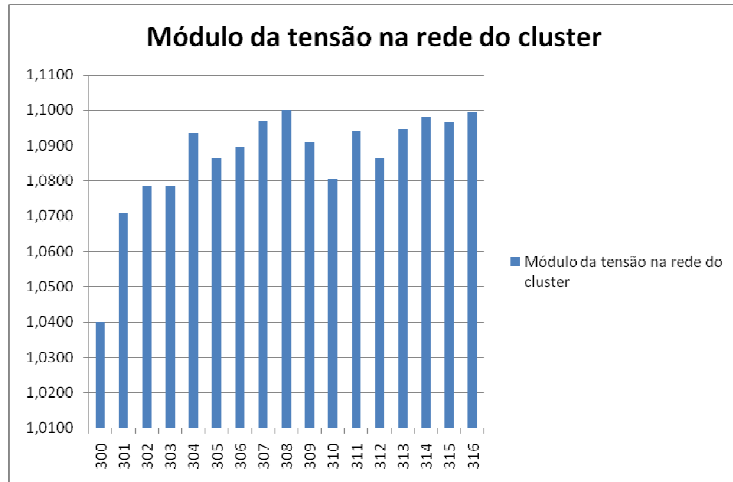


Figura 64 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 3 com 50 partículas e 500 iterações

50 partículas e 1000 iterações

Tabela 24 - Partícula óptima para cenário 3 com 50 partículas e 1000 iterações

| | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Partícula óptima | 0,1668 | 0,2623 | 0,4162 | 0,6187 | 0,0383 | 0,3564 | 0,4548 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | 0,9811 | 1,0024 | 1,0101 | 1,0141 | 1,0109 | 0,9928 | 1,0183 |

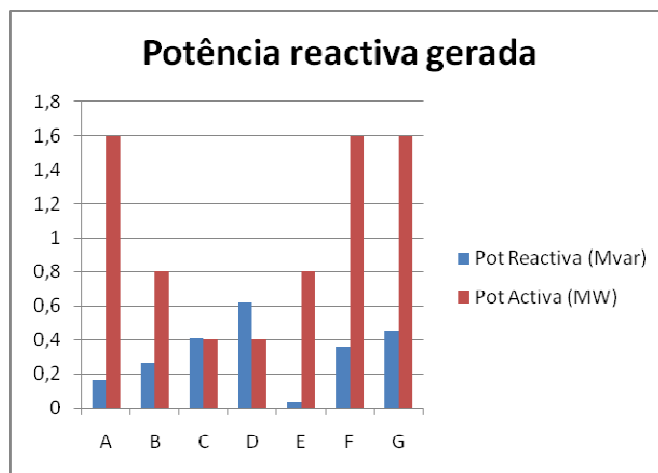


Figura 65 - Potência reactiva gerada para cenário 3 com 50 partículas e 1000 iterações

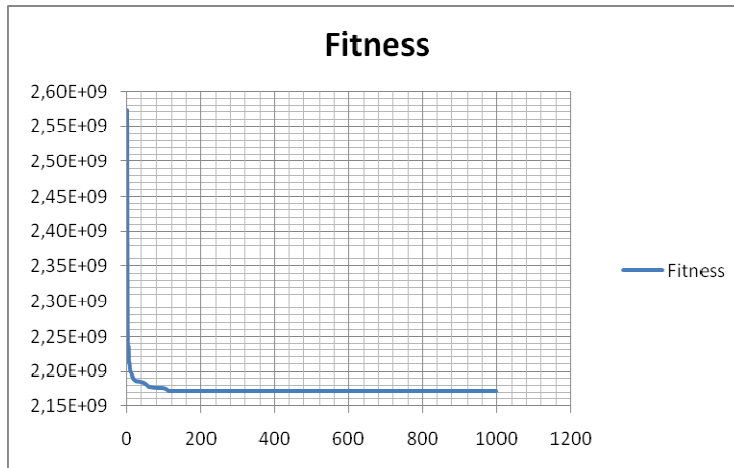


Figura 66 - Evolução da fitness das partículas para cenário 3 com 50 partículas e 1000 iterações

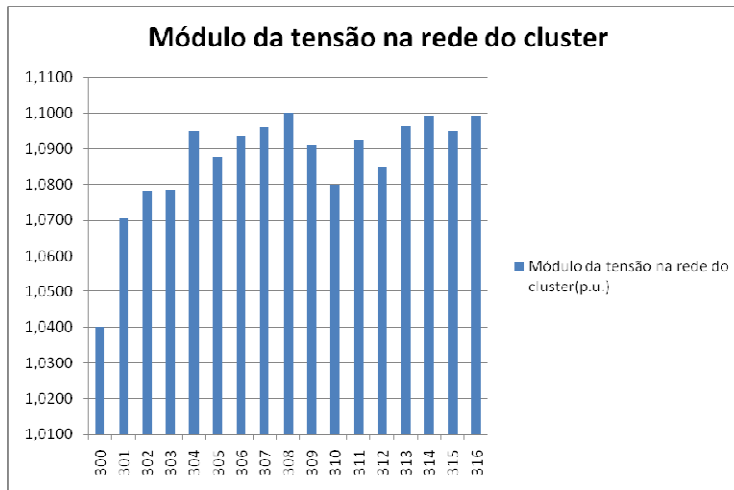


Figura 67 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 3 com 50 partículas e 1000 iterações

Cenário 4

30 partículas e 500 iterações

Tabela 25 - Partícula ótima para cenário 4 com 30 partículas e 500 iterações

| Partícula ótima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,0125 | 0,0007 | 0,3622 | 0,3348 | 0,4161 | 0,1248 | 0,0021 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | 0,9694 | 1,0107 | 0,9993 | 1,0017 | 1,0119 | 1,0178 | 1,0054 |

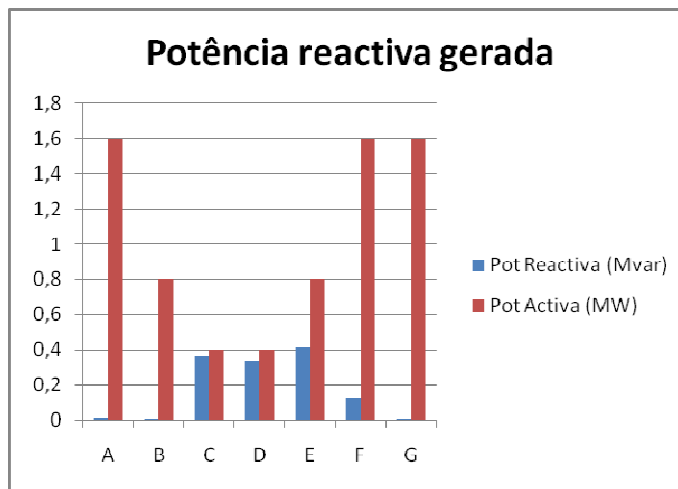


Figura 68 - Potência reactiva gerada para cenário 4 com 30 partículas e 500 iterações

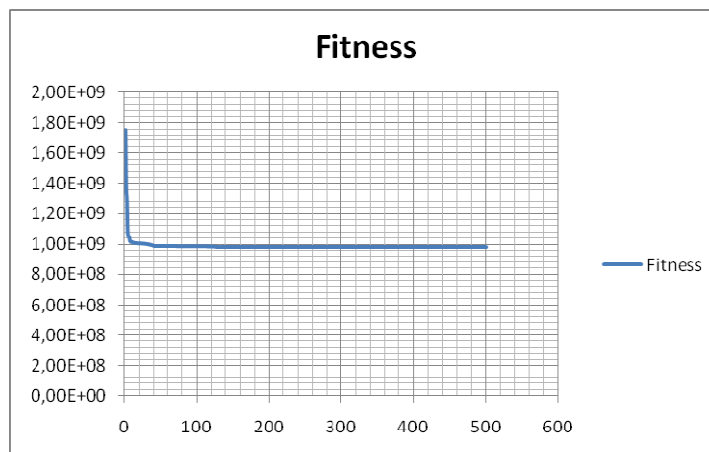


Figura 69 - Evolução da fitness das partículas para cenário 4 com 30 partículas e 500 iterações

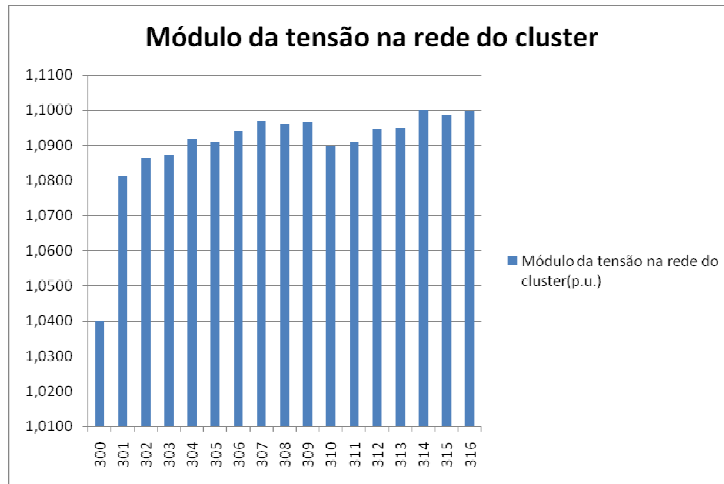


Figura 70 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 4 com 30 partículas e 500 iterações

30 partículas e 1000 iterações

Tabela 26 - Partícula ótima para cenário 4 com 30 partículas e 1000 iterações

| Partícula ótima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,1686 | 0,0001 | 0,4205 | 0,4703 | 0,0003 | 0,2525 | 0,0000 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | 0,9708 | 1,0127 | 1,0000 | 1,0120 | 1,0148 | 0,9962 | 1,0057 |

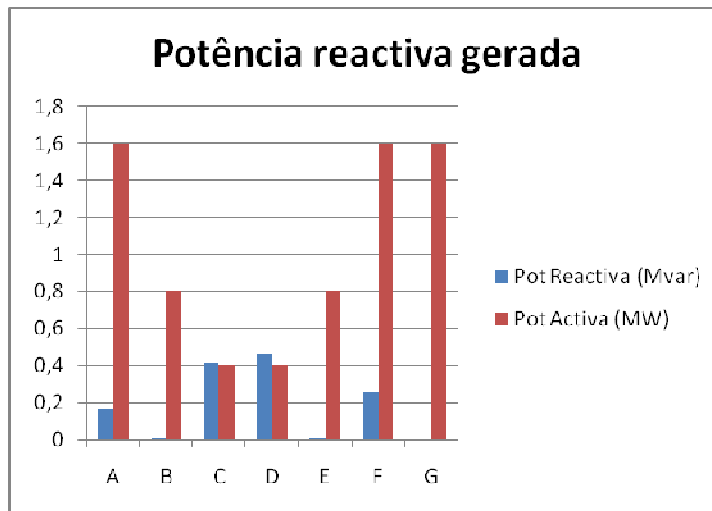


Figura 71 - Potência reactiva gerada para cenário 4 com 30 partículas e 1000 iterações

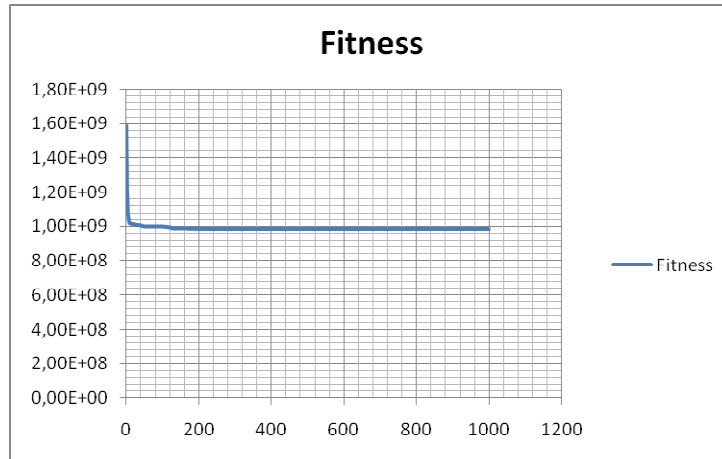


Figura 72 - Evolução da fitness das partículas para cenário 4 com 30 partículas e 1000 iterações

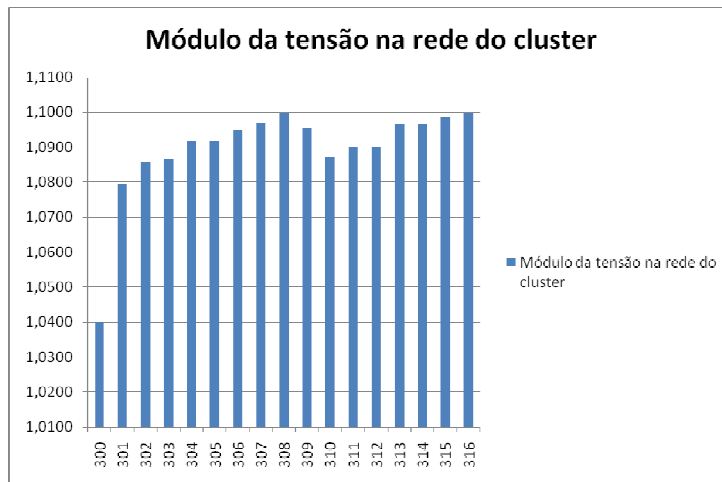


Figura 73 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 4 com 30 partículas e 1000 iterações

50 partículas e 500 iterações

Tabela 27 - Partícula óptima para cenário 4 com 50 partículas e 500 iterações

| Partícula óptima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,0830 | 0,0836 | 0,4298 | 0,2245 | 0,1689 | 0,4242 | 0,0117 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | 1,0289 | 0,9575 | 0,9501 | 0,9526 | 0,9500 | 0,9500 | 0,9588 |

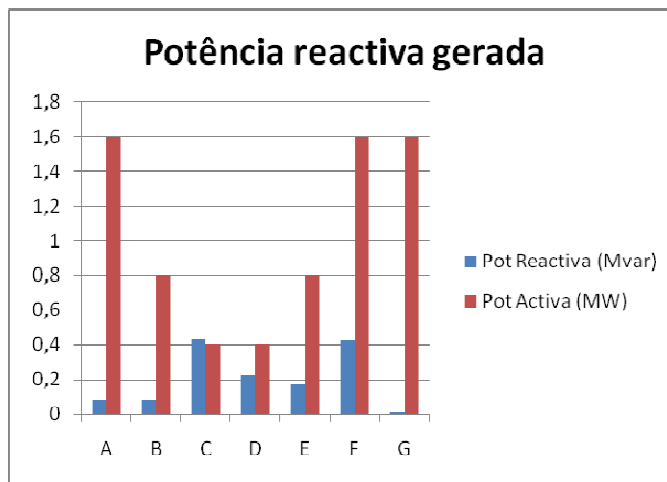


Figura 74 - Potência reactiva gerada para cenário 4 com 50 partículas e 500 iterações

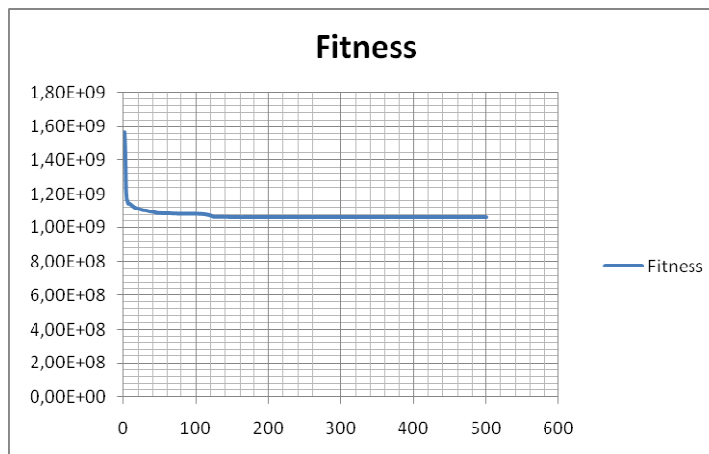


Figura 75 - Evolução da fitness das partículas para cenário 4 com 50 partículas e 500 iterações

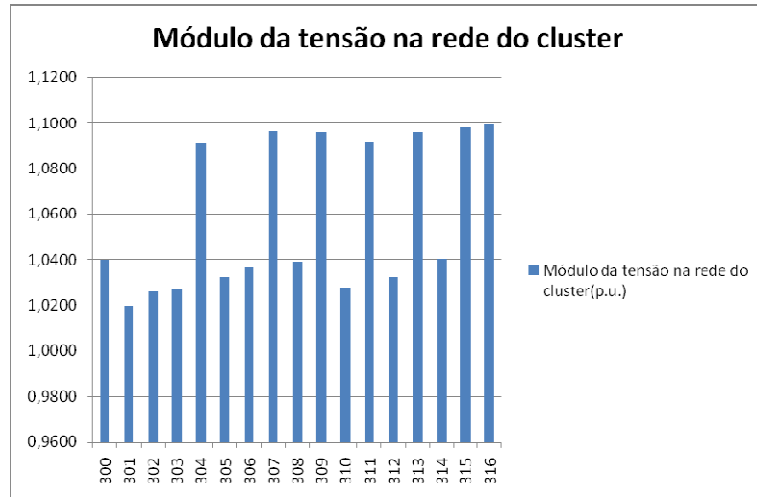


Figura 76 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 4 com 50 partículas e 500 iterações

50 partículas e 1000 iterações

Tabela 28 - Partícula ótima para cenário 4 com 50 partículas e 1000 iterações

| Partícula ótima | A (Mvar) | B (Mvar) | C (Mvar) | D (Mvar) | E (Mvar) | F (Mvar) | G (Mvar) |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,1139 | 0,1775 | 0,3963 | 0,1261 | 0,2517 | 0,0000 | 0,3716 |
| | Tap1 | Tap2 | Tap3 | Tap4 | Tap5 | Tap6 | Tap7 |
| | 1,0238 | 0,9613 | 0,9608 | 0,9604 | 0,9502 | 0,9571 | 0,9562 |

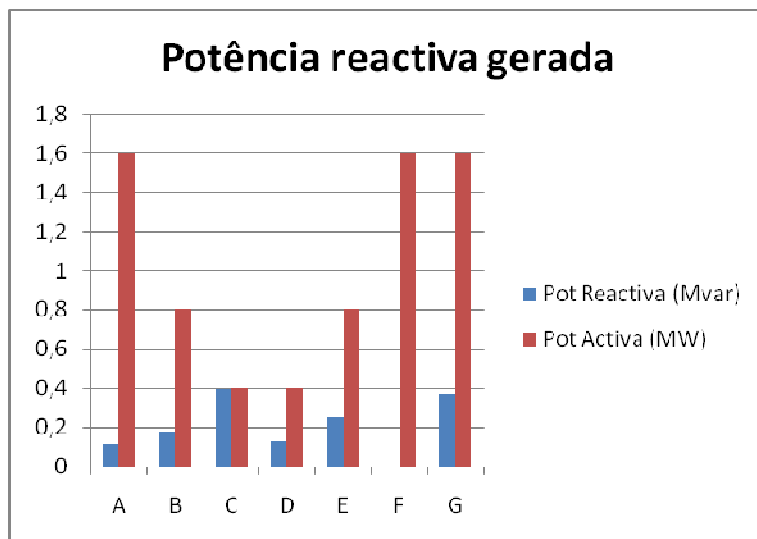


Figura 77 - Potência reactiva gerada para cenário 4 com 50 partículas e 1000 iterações

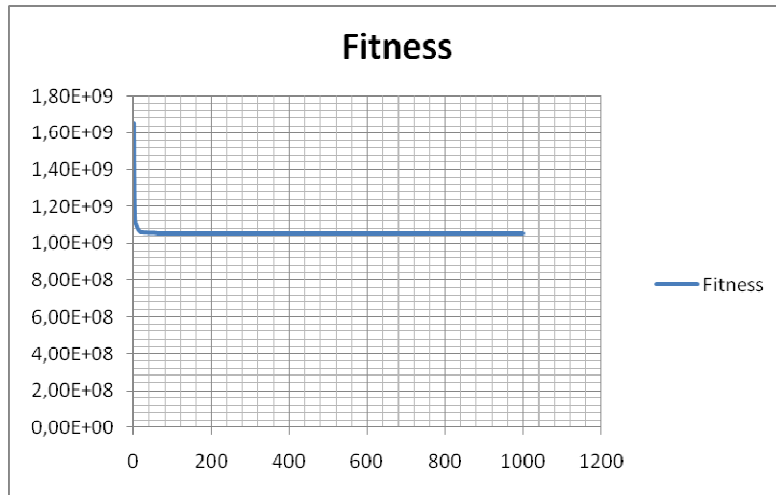


Figura 78 - Evolução da fitness das partículas para cenário 4 com 50 partículas e 1000 iterações

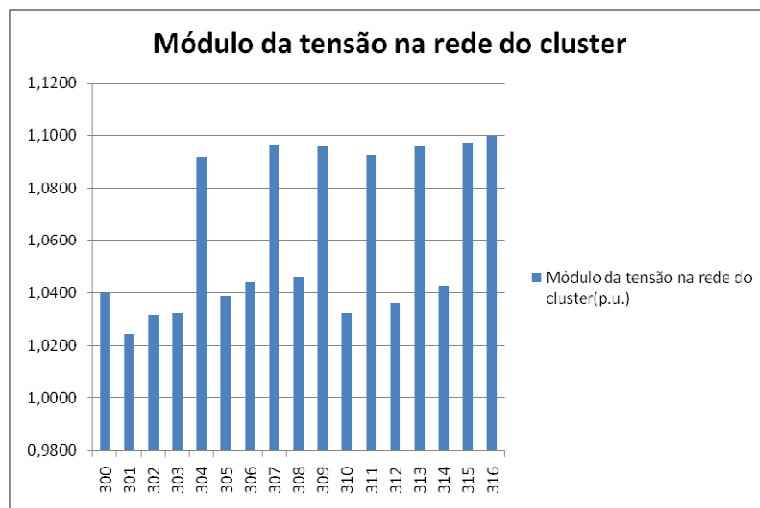


Figura 79 - Módulo de tensão nos barramentos da rede interna para cenário 4 com 50 partículas e 1000 iterações