

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

PAULO HENRIQUE DE SOUSA

**ALOCAÇÃO ÓTIMA DE COMPENSADORES ESTÁTICOS DE
REATIVOS PARA SUPORTE À OPERAÇÃO DE GERAÇÃO
EÓLICA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Juiz de Fora, MG - Brasil

Março de 2016

PAULO HENRIQUE DE SOUSA

**ALOCAÇÃO ÓTIMA DE COMPENSADORES ESTÁTICOS DE
REATIVOS PARA SUPORTE À OPERAÇÃO DE GERAÇÃO
EÓLICA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal De Juiz De Fora, como parte das exigências para a obtenção do título de engenheiro electricista.

Orientador: Leonardo Willer de Oliveira.

Juiz de Fora, MG - Brasil

Março de 2016

Sousa, Paulo Henrique de.

Alocação de Compensadores Estáticos de Reativos para Suporte à Operação de Geração Eólica em Sistemas de Distribuição/

Paulo Henrique de Sousa. – 2016.

51 f. : il.

Orientador: Leonardo Willer de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2016.

1. Compensador estático de reativos. 2. Sistemas de distribuição de energia. 3. Geração Distribuída 4. I. Sousa, Paulo Henrique de. II. Alocação de Compensadores Estáticos de Reativos para Suporte as Usinas Eólicas Inseridas nos Sistemas de Distribuição de Energia.

PAULO HENRIQUE DE SOUSA

**ALOCAÇÃO ÓTIMA DE COMPENSADORES ESTÁTICOS DE
REATIVOS PARA SUPORTE À OPERAÇÃO DE GERAÇÃO
EÓLICA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal De Juiz De Fora, como parte das exigências para a obtenção do título de engenheiro eletricitista.

Orientador: Leonardo Willer de Oliveira

Aprovada em 01 de abril de 2016

Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc (Orientador)

Prof. Edimar José de Oliveira, D.Sc.

Prof. Ângelo Rocha de Oliveira, M.Sc.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, alicerce de todos os projetos de minha vida, pela saúde e força para superar os obstáculos durante essa caminhada.

Aos meus pais e irmãos que, com toda a paciência do mundo, me incentivaram e foram o combustível essencial para chegar ao final de mais uma etapa.

Ao meu orientador, Leonardo Willer de Oliveira, que com toda sua vontade de ensinar me ajudou em todos os momentos que precisei. Professores como o senhor nos fazem acreditar no ensino e pesquisa de qualidade.

Aos meus amigos, da faculdade e da vida, que estiveram ao meu lado em todos os momentos marcantes desta etapa inesquecível.

*“Não há maior crime que matar um sonho,
nem maior virtude que realizá-lo.”
(Jorge Angel Livraga)*

RESUMO

Resumo da Monografia apresentada à UFJF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Alocação Ótima de Compensadores Estáticos de Reativos para Suporte à Operação de Geração Eólica em Sistemas de Distribuição

Paulo Henrique de Sousa

Março, 2016

Orientador: Leonardo Willer de Oliveira.

Este trabalho apresenta uma metodologia para alocação ótima de compensadores estáticos de reativos em sistemas de distribuição de energia com a inserção de geração distribuída baseada em geração eólica e termoeletrica a diesel. A técnica meta-heurística denominada sistemas imunológicos artificiais é proposta para determinação da localização ótima destes equipamentos na rede de distribuição, ou seja, o modelo de otimização utilizado determina em quais barras do sistema deverá ocorrer a alocação destes dispositivos. Um modelo de fluxo de potência ótimo não linear é proposto para otimizar a operação do sistema para cada opção de localização candidata.

O presente trabalho tem como objetivo minimizar os custos operacionais do sistema e de investimento em compensação estática de reativos. Para obtenção dos valores de operação dos compensadores estáticos alocados é utilizado um modelo de compensador baseado em injeção fixa de potência reativa e para determinar o ponto de operação para controle de tensão nodal, o modelo de susceptância variável é utilizado. Desta forma, o presente trabalho obtém as faixas de operação de cada dispositivo alocado no sistema. Para análise da metodologia proposta, são realizadas simulações em um sistema conhecido da literatura.

ABSTRACT

Abstract of Thesis presented to UFJF as a partial fulfilment of the requirements for the title of Electrical Engineer.

Optimal Allocation of Static Var Compensators to Support Wind Power Generation Operation in Distribution Systems

Paulo Henrique de Sousa

March, 2016

Supervisor: Leonardo Willer de Oliveira.

This work presents a methodology for optimal allocation of Static Var Compensators in energy distribution systems with distributed generation based on wind power and thermoelectric diesel. The meta-heuristic technique also known as Artificial Immune System is proposed to determine the optimal location of these devices in the distribution network, which means that the optimization model used determines in which system's buses should occur the allocation of these devices. A nonlinear optimal power flow model is proposed to optimize system operation for each option of location.

Furthermore, the aims of this work is to minimize operating costs of the system and investment in Static Var Compensation. In order to obtain the operating costs allocated to static compensators was used a compensating model based on fixed injection of reactive power to determine the operating point for bus voltage control, in order to do that the variable, susceptance model is used. Thus, this paper obtains the operating ranges of each one of the device allocated to the system. Hence, to review the proposed methodology, simulations are performed on a system known from the literature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Crescimento da demanda e disponibilidade de energia[2].	15
Figura 2: Capacidade instalada [27]	23
Figura 3: Acréscimo na capacidade instalada por fonte de geração [27].	24
Figura 4: Potência eólica mundial instalada [21]	25
Figura 5: Potência eólica mundial acumulada instalada [21]	26
Figura 6: Maiores capacidades acumuladas instaladas [21]	26
Figura 7: Capacidade instalada no Brasil [21]	27
Figura 8: Diagrama RCT-CF [23]	28
Figura 9: Diagrama RCT-CCT [23]	28
Figura 10: Diagrama de blocos do sistema de controle [23]	29
Figura 11: Curva característica do CER.	30
Figura 12: Representação de espaço de soluções	36
Figura 13: Fluxograma do algoritmo utilizado[28].	37
Figura 14: Metodologia proposta.	39
Figura 15: Topologia original sistema IEEE 33 barras [18].	41
Figura 16: Sistema IEEE modificado [18].	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Cenários de ventos via simulação de Monte Carlo [18]	42
Tabela 2 Alocação de CER no sistema	43
Tabela 3 Tensão de referência.....	44
Tabela 4 Valor de operação dos CER para etapa 2	45
Tabela 5 Custos operacionais	46
Tabela 6 Resumo do problema de alocação.....	46

LISTA DE SÍMBOLOS

k	: Custo unitário associado à perda de energia (\$/kWh);
NC	: Número de cenários de vento considerados para a geração eólica;
T_u	: Tempo de operação do sistema no cenário u (h);
P_u	: Perda técnica do sistema no cenário u (kW);
NB	: Número de barras da rede de distribuição;
e_i	: Variável de decisão sobre a alocação de CER na barra i (1: alocação; 0: sem alocação);
r	: Custo marginal do CER (\$/ kVAr);
QC_i	: Tamanho da faixa operativa do CER na barra i (kVAr);
cf	: Custo fixo de instalação do CER (\$);
a_i, b_i, c_i	: Coeficientes da função custo de produção das unidades distribuídas termoeletricas;
$P_{t_{i,u}}, Q_{t_{i,u}}$: Potência ativa e reativa de saída do gerador distribuído termoeletrico na barra i e cenário u (kVAr);
$P_{e_{i,u}}$: Potência ativa de saída do gerador distribuído eólico na barra i , se existente, no cenário u (kW);
PL_i	: Demanda de potência ativa na barra i (kW);
Ω_i	: Número de barras conectadas através de trechos de distribuição à barra i ;
$p_{ij,u}, q_{ij,u}$: Fluxo de potência ativa e reativa no trecho ij (kW);
$Q_{e_{i,u}}$: Potência reativa de saída do gerador distribuído eólico na barra i , se existente, no cenário u (kVAr);
$QC_{i,u}$: Potência reativa desenvolvida pelo CER na barra i , no cenário u (kVAr);
QL_i	: Demanda de potência reativa na barra i (kVAr);
$V_{i,u}$: Módulo de tensão nodal na barra i , no cenário u (pu-V);
V^{\min}, V^{\max}	: Limites de tensão nodal do sistema (pu-V);
$P_{t_i}^{\max}, Q_{t_i}^{\max}$: Limite de potência ativa e reativa da GD termoeletrica na barra i (kW);

- $V_{i,u}$: Tensão da barra terminal ou controlada pelo CER, barra i , no cenário u (pu-V);
- V_{i0} : Tensão de referência do CER da barra i (pu-V);
- $bc_{i,u}$: Susceptância variável do CER (pu-S);
- bc^{\min}, bc^{\max} : Limites da susceptância variável do CER, associados aos limites de compensação indutiva e capacitiva, respectivamente (pu-S).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
CAPÍTULO 1	15
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Considerações Iniciais	15
1.2 Características do Problema de Alocação de CER	17
1.3 Revisão Bibliográfica	18
1.4 Motivação do Trabalho	21
1.5 Estrutura do Trabalho	21
CAPÍTULO 2	23
2. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	23
2.1 Considerações Iniciais	23
2.2 Geração Eólica	25
2.3 O Compensador Estático de Reativos	27
2.3.1 Configuração	28
2.3.2 Curva Característica	29
2.4 Conclusões Parciais	30
CAPÍTULO 3	32
3. METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO DE CER	32
3.1 Considerações Iniciais	32
3.2 Formulação do Problema	32

3.3	Técnica de Resolução	35
3.3.1	O Sistema Imunológico artificial	35
3.3.2	O Algoritmo Proposto	37
3.4	Conclusões Parciais	40
CAPÍTULO 4		41
4.	ESTUDOS DE CASO	41
4.1	Considerações Iniciais	41
4.2	Resultados	43
4.2.1	Etapa 1	43
4.2.2	Etapa 2	44
4.2.3	Análise dos Custos	45
4.3	Conclusões Parciais	47
CAPÍTULO 5		48
5.	CONCLUSÕES	48
5.1	Considerações Finais	48
6.	REFERÊNCIAS	49

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Neste Capítulo será realizada uma síntese geral do trabalho, evidenciando as principais características motivadoras, ou seja, serão apresentadas as motivações para o estudo de alocação ótima de Compensadores Estáticos de Reativos (CER) em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDE).

1.1 Considerações Iniciais

O crescimento da população mundial tem como consequência básica a elevação das demandas por energia elétrica. Deste modo, as fontes tradicionais de suprimento de energia elétrica tendem a atingir seus limites de produção e, portanto, passa-se a necessitar de novas fontes de geração [1]. Neste cenário é possível perceber os avanços das tecnologias referentes à utilização de Geração Distribuída (GD).

A Figura 1 apresenta um resumo referente à porção de energia que deverá ser atendida por fontes de energia renovável.

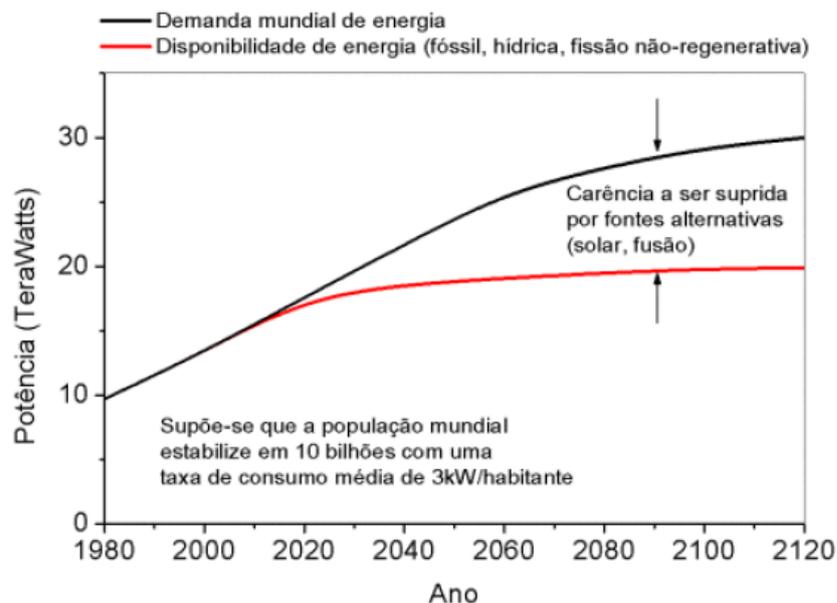


Figura 1: Crescimento da demanda e disponibilidade de energia[2].

De acordo com a figura 1 pode-se perceber que ao atingir o limite de geração convencional, ou seja, geração centralizada, a demanda de energia a ser suprida por fontes de geração alternativas tende a crescer de maneira considerável.

Consideram-se geração distribuída as unidades de geração de pequeno porte inseridas próximas dos centros consumidores. Estas unidades podem apresentar potencial de geração em faixas típicas de 3.000 kW a 30.000 kW [2].

Baseada em fontes renováveis de energia as GD's a serem alocadas em SDE podem possuir como fonte primária de energia o sol (usinas solares e fotovoltaicas), os ventos (usinas eólicas), biocombustíveis (termoelétricas a biomassa) e ainda a água (Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCH's)).

De acordo com [3], a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis de energia é atualmente, uma forte tendência em inúmeros países e é, portanto, um forte incentivo a inserção de GD nos sistemas de geração convencionais. Como já citado, tal tendência justifica-se mediante a crescente taxa demográfica e ainda o avanço econômico que aumentam cada dia mais, o consumo de energia elétrica e, como consequência, a busca por novas formas de suprir este crescimento.

Apesar dos inúmeros benefícios inerentes a inserção de GD em SDE, faz-se necessário destacar que existem grandes desafios referentes à implantação desta forma de geração de energia elétrica. Considerada a solução para a redução das perdas em sistemas de potência, uma vez que se encontram próximas ao centro consumidor estas usinas diminuem consideravelmente as perdas em sistemas de transmissão, a inserção de GD's pode ocasionar sobrecarga e sobretensão na subtransmissão e distribuição, diminuição da qualidade da energia e variação da potência gerada. Tais desafios ocorrem devido à natureza e características de tais centrais geradoras.

Centrais de GD baseadas em fontes renováveis de energia tendem a ser altamente dependentes de características que não são passíveis de controle como, por exemplo, células fotovoltaicas que não recebem irradiação durante a noite, usinas eólicas que dependem do regime dos ventos e termoelétricas a

biocombustíveis que dependem do período de safra da matéria prima utilizada. Desta forma, pode-se perceber que grandes oportunidades e desafios surgem com a inserção GD em SDE.

Usinas eólicas com geradores de indução convencionais (tipo gaiola de esquilo) possuem perfil de potência reativa indutivo para a rede elétrica e, portanto, a inserção de tais usinas em SDE requer um adequado planejamento de suporte de potência reativa.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise referente à inserção de usinas eólicas em SDE e, portanto, o planejamento de potência reativa para realizar o suporte as usinas alocadas. Para realizar tal planejamento, uma metodologia de alocação ótima de CER é proposta.

1.2 Características do Problema de Alocação de CER

O objetivo do presente trabalho envolve determinação do local ótimo de alocação dos CER, ou seja, as barras ótimas para alocar cada CER que realizará o suporte de reativos para usinas eólicas no sistema.

O problema proposto pode ser modelado como um problema de otimização com características de programação não linear combinatória inteira mista.

O problema possui região de solução não convexa, ou seja, pode apresentar inúmeros ótimos locais e, desta forma, não obter como resultado a solução ótima global esperada. Devido tais características, métodos convencionais de otimização podem convergir de forma prematura resultando em soluções locais. A natureza combinatória da modelagem pode resultar, também, em elevados esforços computacionais, aumentando significativamente o tempo de simulação do projeto.

Como solução para tal característica, um método de otimização bioinspirada na meta-heurística Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA) é utilizada para obtenção dos resultados. Métodos de otimização bioinspirada conseguem de forma eficiente, detectar as soluções com maior potencial e de forma iterativa, tendem a obter

resultados melhores que os resultados obtidos pelos métodos de otimização convencionais.

1.3 Revisão Bibliográfica

O estudo da alocação de geração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica vem sendo discutida e abordada em inúmeras metodologias na literatura.

Em [2] é apresentado um estudo referente à crescente inserção de GD baseada em fontes renováveis de energia. O trabalho apresenta as principais fontes de geração renováveis e realiza um estudo do comportamento das tensões nas barras do sistema e perdas nas linhas quando há a presença de GD na rede. Realiza ainda um estudo referente à melhor forma para operação de um sistema de distribuição e uma análise da distorção harmônica na tensão e corrente do sistema com inserção de GD.

O planejamento da expansão de SDE utilizando energia renovável distribuída é realizado em [4]. Para tanto, os limites de capacidade reativa das usinas renováveis a serem utilizadas são incluídos na modelagem proposta. O problema tem como objetivo realizar a minimização do custo total levando em conta as incertezas presente no sistema, ou seja, é apresentado também uma modelagem para a variação da demanda de carga, radiação solar e velocidade dos ventos por meio de modelos probabilísticos.

Em [5] é proposta uma modelagem para a alocação ótima de GD em SDE utilizando os modelos de otimização bioinspirada em Algoritmos Genéticos (AG) e Enxames de Partículas (PSO). A metodologia proposta apresenta como objetivo reduzir as perdas de energia do sistema e ainda melhorar a regulação de tensão do sistema. O modelo de otimização baseado em PSO também é utilizado em [6] para realizar a determinação do dimensionamento ótimo de GD inserida em distribuição primária com o objetivo de reduzir as perdas do sistema. Ambos os modelos são analisados em sistemas 33 e 69 barras, conhecidos da literatura.

O modelo de otimização bioinspirada em enxame de partículas é utilizado também para a determinação do local ótimo de inserção de geradores eólicos no sistema, ou seja, para obtenção de qual barra candidata do sistema de distribuição deverá ser inserido o gerador eólico para redução das perdas de potência ativa da rede e obtenção de um perfil de tensão mais adequado [7] [8].

Usinas eólicas com geradores de indução do tipo gaiola de esquilo são analisadas em [9] e [10]. Em [9] verificam-se, também, os impactos na modelagem do sistema quando há utilização destas usinas.

Deste modo, pode-se perceber a importância da inserção de GD em SDE. Quando a alocação de GD do tipo é escolhida para ser inserida no sistema, faz-se necessário um estudo do suporte de potência reativo para as mesmas. Encontra-se na literatura diversos estudos referentes ao planejamento de potência reativa para realizar o suporte a usinas eólicas.

Em [11], um algoritmo baseado em PSO é proposto para aperfeiçoar a modelagem apresentada para o suporte de potência reativa à rede. Este suporte tem como objetivo controlar e melhorar os níveis de tensão do sistema de distribuição. O controle da tensão do SDE é realizado por meio da inserção e operação de usinas eólicas com geradores de indução duplamente alimentados. A utilização de EP tem como função objetivo minimizar as perdas do sistema, melhorar o perfil de tensão da rede e determinar os valores de potência reativa de cada gerador eólico inserido no sistema. O trabalho verifica ainda o despacho de cada usina de acordo com cenários propostos para o regime dos ventos. Em [12] o controle de potência reativa de usinas eólicas com geradores de indução duplamente alimentados também é proposto com o objetivo de minimizar as perdas da rede e melhorar seus níveis de tensão.

Usinas eólicas com geradores de indução convencionais (gaiola de esquilo) necessitam de suporte de potência reativa, suporte este que pode ser realizado com a inserção de CER em barras do sistema. A utilização de compensadores estáticos de reativos em SDE pode resultar em diversas melhorias, como aumento de confiabilidade, diminuição de custo operacional e melhoria de estabilidade. Estes

equipamentos são utilizados para controle rápido do módulo de tensão e para suporte de potência reativa [13]. Para que ocorra a compensação estática de reativos de maneira eficiente, faz-se necessário a utilização de modelos e técnicas que possibilite a obtenção do ponto ótimo de alocação e o valor de operação destes dispositivos.

Em [14] utiliza-se a técnica de otimização bioinspirada em enxames de partículas para obtenção do local ótimo de GD's no sistema. Essa alocação visa a inserção de energia eólica com segurança nos SDE considerando o comportamento referente ao regime dos ventos. Com este intuito, a modelagem proposta prevê, também, a alocação ótima de CER no sistema.

A alocação ótima de CER é realizada também em [15] utilizando o modelo de otimização baseado em AG. O problema é modelado a partir de uma função objetivo que visa a minimização dos custos totais envolvidos, ou seja, os custos referentes as perdas de energia do sistema e implantação dos CER a serem alocados. De modo semelhante, sistemas imunológicos artificiais são utilizados em [16] para a alocação destes dispositivos. Em [17] utiliza-se um algoritmo de busca harmônica para obter a localização ótima de cada CER a ser alocado no sistema.

O planejamento de potência reativa para a realização de suporte a usinas eólicas é realizado em [18]. O suporte de potência reativa é realizado por meio da alocação ótima de CER nas barras do sistema. Para tanto, o modelo de otimização bioinspirada em AG é utilizada. A modelagem proposta em [18] tem por objetivo a redução dos custos referentes à perda de energia da rede, redução dos custos de investimento em CER e ainda a redução dos custos de produção das unidades termoelétricas presentes no sistema.

O modelo de CER apresentado em [18] é baseado em uma modelagem com injeção fixa de potência reativa na barra alocada. Esta característica não permite acomodar a variação de tensão nodal na potência desenvolvida pelo equipamento para controle de tensão.

Com intuito de se obter resultados mais realistas, o trabalho proposto em [18] utiliza a técnica de simulação Monte-Carlo para gerar cenários para a variação do regime de ventos e, deste modo, variação da potência de saída dos aerogeradores. A modelagem proposta retorna os locais ótimos de alocação de CER e seus valores de operação.

Com intuito de validar a modelagem do presente trabalho, realiza-se a comparação da modelagem realizada e a modelagem apresentada na referência [18].

1.4 Motivação do Trabalho

A forte tendência de implantação de GD em SDE induz o desenvolvimento de estudos e avanços referentes as tecnologias de geração, englobadas no contexto. Neste contexto, o aumento de implantação de parques eólicos no sistema proporciona o crescimento dos estudos para obtenção de modelos ótimos para implantação dos mesmos.

O desafio inerente ao planejamento da expansão de sistemas de distribuição com inserção de eólicas gera inúmeros estudos. A investigação acerca do problema de suporte de potência reativa a usinas eólicas no sistema mostra-se de grande importância, trazendo inúmeros benefícios à rede.

O uso de técnicas de otimização meta-heurística mostra-se de grande relevância para o problema proposto, pois a característica não linear e natureza combinatorial tornam o problema complexo e que podem requerer grande esforço computacional. A meta-heurística bioinspirada apresentada no presente trabalho fornece uma opção para obtenção da solução ótima de forma eficiente mediante a característica de região de solução não convexa.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é composto por 5 capítulos. O capítulo 1 apresenta as considerações iniciais e os aspectos motivadores para o presente estudo e ainda uma revisão bibliográfica sobre o tema em análise.

O capítulo 2 apresenta as configurações atuais referente à inserção de geração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica.

No capítulo 3 é proposta a formulação para o problema de alocação de CER em SDE para realizar o suporte de reativos à usinas eólicas convencionais (gaiola de esquilo) inseridas no sistema no estudo do problema apresentado no capítulo 2.

O capítulo 4 apresenta o estudo de caso para o problema de alocação de compensadores estáticos de reativos. São obtidos os resultados para a alocação de CER com intuito de realizar o suporte de potência reativa às usinas eólicas convencionais alocadas. Obtém-se também, os valores de operação dos compensadores para que a rede mantenha os níveis de tensão pré-determinados da rede, ou seja, para que a inserção de usinas eólicas no sistema não interfira nos níveis de tensão nodal da rede.

As conclusões, considerações finais e ainda algumas propostas de trabalhos futuros são apresentados no capítulo 5.

Capítulo 2

GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Neste capítulo, serão apresentadas as configurações básicas acerca da geração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica. O capítulo encontra-se dividido em 3 seções que apresentam a contextualização do tema em análise e ainda um panorama da geração eólica no Brasil e no mundo. Por fim, são apresentadas, também, as principais características e configurações dos compensadores estáticos de reativos.

2.1 Considerações Iniciais

Os sistemas de geração distribuída são, normalmente, instalados próximos aos centros de cargas e podem ser caracterizados por geração de energia elétrica baseada em fontes renováveis ou não renováveis de energia [19]. Pode-se destacar, portanto, a geração de energia elétrica baseada em energia eólica, solar e termoelétricas a diesel e biomassa.

A Figura 2 apresenta a capacidade instalada por fonte de geração em dezembro de 2014 no Sistema Interligado Nacional.

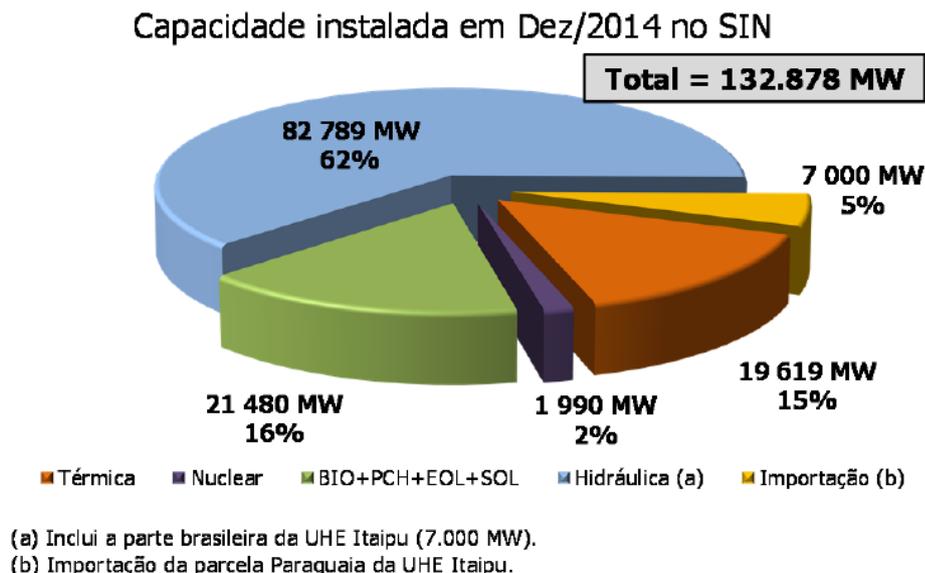


Figura 2: Capacidade instalada [27]

Analisando o gráfico apresentado na Figura 2, pode-se perceber que a parcela correspondente a novas fontes de energia já corresponde a uma considerável parcela de potência gerada no Brasil. O valor estimado de crescimento por fonte de geração é apresentado na figura abaixo.

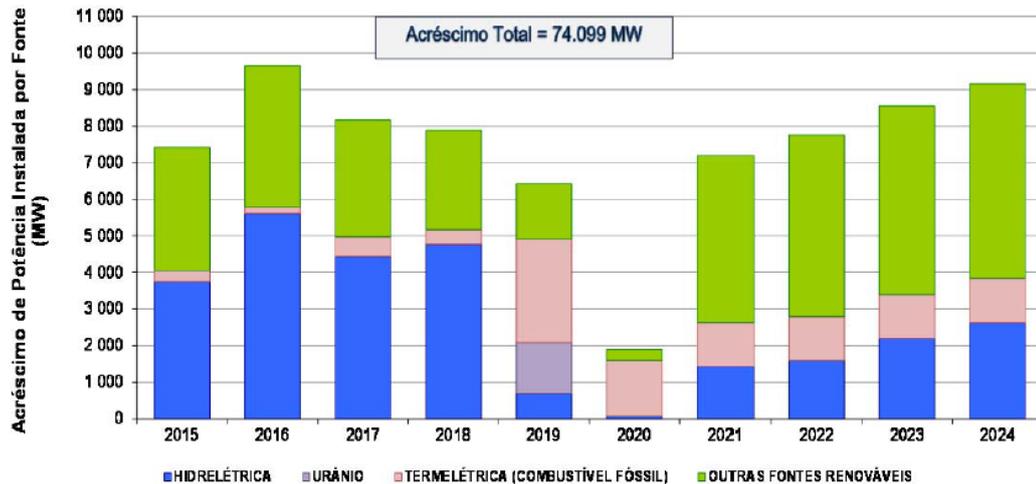


Figura 3: Acréscimo na capacidade instalada por fonte de geração [27]

A Figura 3 apresenta o valor esperado de acréscimo na capacidade instalada do SIN até 2024. Pode-se perceber que, de forma bastante expressiva, a geração de energia elétrica por fontes renováveis de energia vem ganhando espaço e apresenta forte tendência de implantação uma vez que, espera-se um acréscimo expressivo na capacidade instalada de fontes renováveis de energia.

O correto planejamento da alocação de geração distribuída ocasionará significativas melhorias para o sistema, mas a inserção de uma GD em uma barra inapropriada do sistema pode proporcionar aumento dos custos de implantação e elevação das perdas do sistema [20].

Como já citado anteriormente, as fontes renováveis de energia possuem um perfil de geração de energia elétrica dependente de características climáticas, entre outros. Como exemplo, o perfil de ventos e a radiação solar interferem diretamente na potência ativa gerada por tais usinas.

Este capítulo apresenta as unidades de geração distribuídas a serem inseridas no presente trabalho: as usinas eólicas e termoelétricas a diesel.

2.2 Geração Eólica

Inicialmente utilizada para finalidades mecânicas, como moinhos, a energia dos ventos vem sendo utilizada a milhares de anos. Com os avanços das tecnologias, essa energia cinética contida nos ventos passou a ser utilizada a partir da década de 70 e desde então vem se tornando uma fonte crescente de estudos [20].

Atualmente, com os avanços tecnológicos e os incentivos para a utilização de energia renovável, os sistemas de geração eólica vêm obtendo valores competitivos que tornam o investimento em geração eólica uma opção real de investimento. A Figura 4 apresenta os valores de potência instalada anual no mundo entre os anos 1997 a 2014.

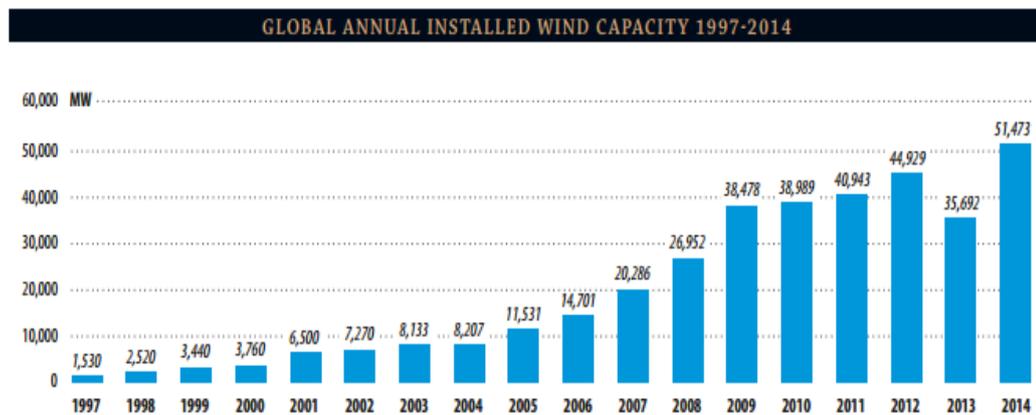


Figura 4: Potência eólica mundial instalada [21]

De acordo com o gráfico apresentado na Figura 4, pode-se perceber o crescimento exponencial da potência mundial instalada. A Figura 5 apresenta o crescimento exponencial para a potência anual acumulada instalada.

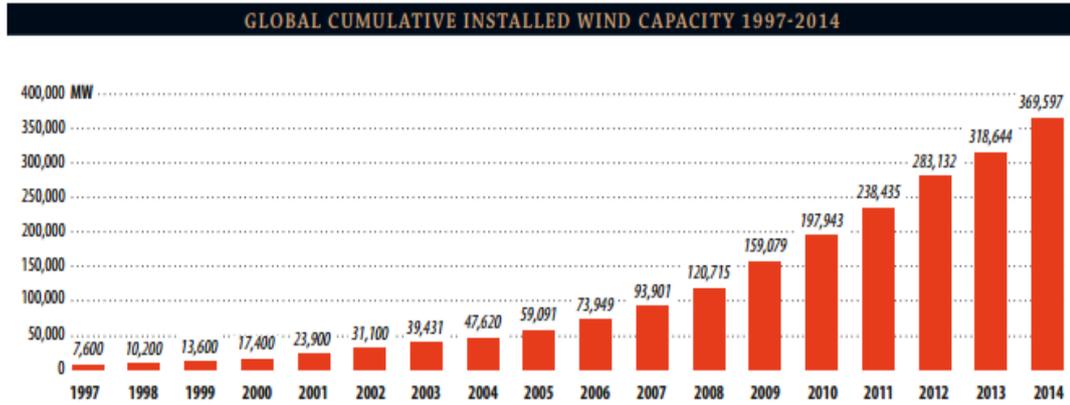


Figura 5: Potência eólica mundial acumulada instalada [21]

Liderando o ranking mundial de capacidade instalada acumulada encontram-se China (114.609 MW), Estados Unidos (65.979 MW) e Alemanha (39.165 MW). No Brasil, a capacidade instalada acumulada em 2014 correspondia a 5.939 MW [21]. A Figura 6 apresenta os países com maiores capacidades de geração instalada e maior capacidade acumulada, respectivamente.

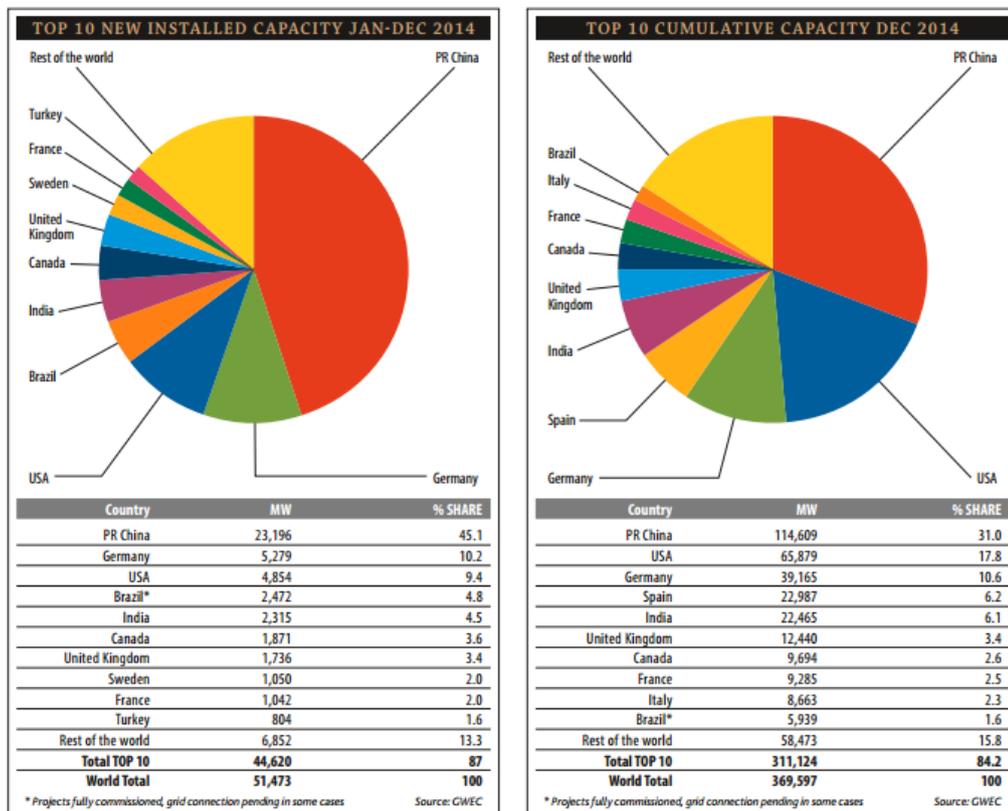


Figura 6: Maiores cappacidades acumuladas instaladas [21]

No Brasil, assim como no mundo, a capacidade de geração eólica se expandiu de forma considerável. O gráfico indicado na Figura 7 apresenta o crescimento da capacidade instalada de geração eólica no Brasil para o período entre 2005 e 2014. Segundo relatório divulgado pelo Conselho Global de Energia Eólica (GWEC), estima-se que o Brasil deverá apresentar um crescimento na capacidade instalada de geração eólica, liderando a performance da América Latina no mercado de geração eólica. Estima-se também que, muito em breve o Brasil passará a integrar o ranking dos dez maiores geradores de energia eólica.

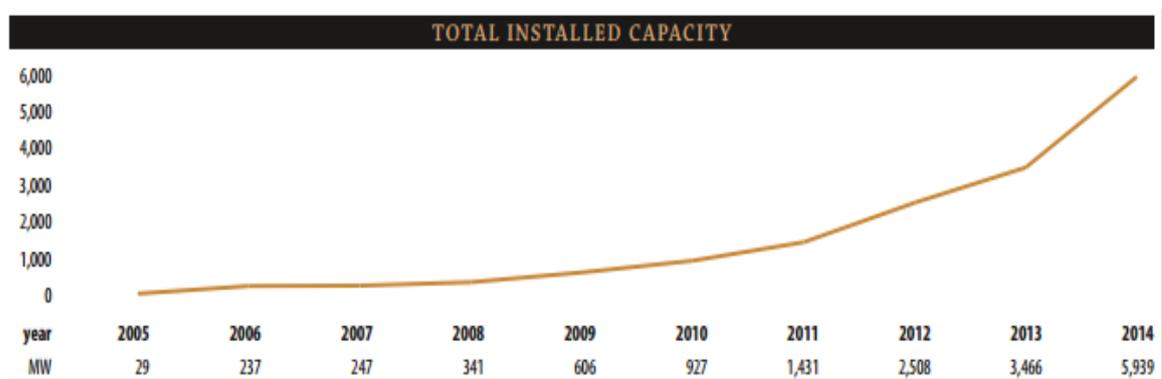


Figura 7: Capacidade instalada no Brasil [21]

Deste modo, pode-se perceber que os investimentos em geração eólica se apresentam de forma crescente em escala mundial. Portanto, fazem-se necessários estudos detalhados referente à instalação destas usinas nos sistemas de potência bem como os impactos positivos e negativos desta inserção.

2.3 O Compensador Estático de Reativos

O compensador estático de reativos (CER), também conhecido como *Static Var Compensator* (SVC), é um importante componente para controle da tensão nodal, podendo ser considerado uma reatância *shunt* variável que gera ou absorve potência reativa de forma automática variando de acordo com a resposta de operação do sistema [22]. Os CER's foram desenvolvidos a partir dos avanços alcançados pela eletrônica de potência contendo em sua composição elementos da mesma. No presente trabalho, estes dispositivos são utilizados para realizar o suporte de potência reativa as usinas eólicas inseridas no sistema.

Esta reatância *shunt* é composta por reatores e capacitores conectados em derivação que ao realizar chaveamentos podem formar um esquema de compensação reativa, controlando um sistema em uma faixa de atuação dentro de seus limites, ou seja, de acordo com o ponto de operação do sistema, o chaveamento do dispositivo permitirá que a compensação estática de reativo ocorra [23].

2.3.1 Configuração

O CER é composto por um reator controlado a tiristores em paralelo a um banco de capacitores [23]. A partir desta configuração, é possível obter uma reatância equivalente sintetizada nos terminais dos dispositivos. A Figura 8 e a Figura 9 apresentam a estrutura de duas formas de composição de CER's.

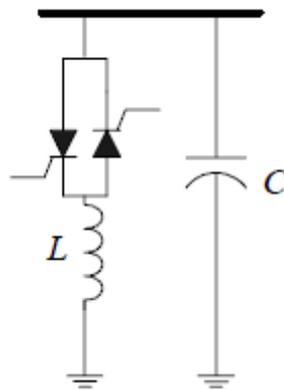


Figura 8: Diagrama RCT-CF [23]

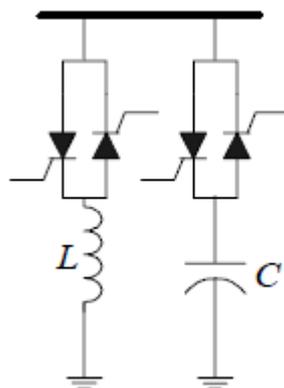


Figura 9: Diagrama RCT-CCT [23]

O esquema apresentado na Figura 8 apresenta um CER que possui um reator controlado por tiristores (RCT) em paralelo com um banco de capacitores do tipo fixo (CF). Já a Figura 9 apresenta em sua composição o reator controlado por tiristores (RCT) em paralelo a um banco de capacitores chaveados (CCT).

O dispositivo em estudo possui como função básica, o objetivo de controlar a tensão do sistema por meio da absorção ou geração de potência reativa. A partir de sua flexibilidade, o CER pode atender a uma variada faixa de requisitos da rede isto é, quando a solução encontra-se dentro de seus limites de operação [23].

A Figura 10 apresenta um diagrama de blocos referente às principais etapas realizadas para o controle da tensão por meio do dispositivo.

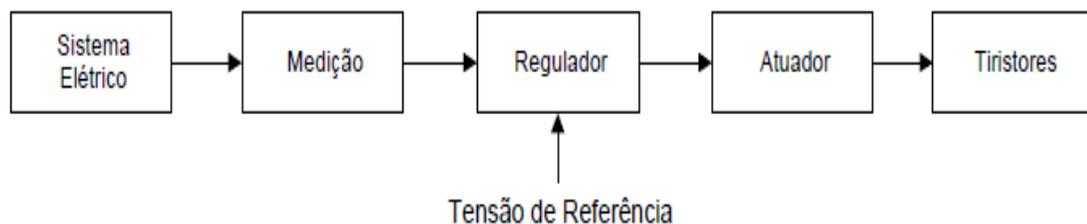


Figura 10: Diagrama de blocos do sistema de controle [23]

Em acordo com os demais tipos de controle, o controle da tensão nodal do sistema apresenta uma mesma forma básica para realizar o controle. Inicialmente é realizada a medição dos parâmetros de operação do sistema que irá, em seguida, para uma etapa de comparação aos valores de referência. De acordo com as medições obtidas um sinal é enviado ao atuador que realizará as modificações necessárias para que o controle da tensão do sistema seja realizado adequadamente.

2.3.2 Curva Característica

O CER apresenta como uma de suas principais características as regiões de operação. De forma bem definida, o dispositivo poderá atuar na região capacitiva, linear ou indutiva, possuindo suas características de controle quando o mesmo se encontra na região linear do dispositivo [22].

As regiões de atuação podem ser definidas a partir da tensão terminal, onde:

- *Região capacitiva:* $V < V^{\min}$
- *Região Linear:* $V^{\max} \geq V \geq V^{\min}$
- *Região indutiva:* $V > V^{\max}$

A Figura 11 apresenta a curva característica de um compensador estático de reativos.

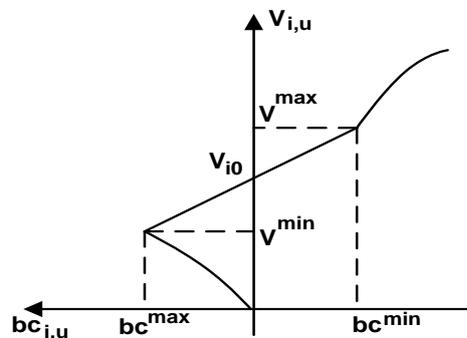


Figura 11: Curva característica do CER.

Considerando o modelo de susceptância variável do CER apresentado na Figura 11, que permite acomodar as variações de tensão terminal nas potências desenvolvidas pelo equipamento, podemos formular sua curva característica como:

$$-V_{i,u} + V_{i0} + r_{ce} \cdot bc_{i,u} \cdot V_{i,u}^2 = 0 \quad (1)$$

$$Q_{c_{i,u}} = bc_{i,u} \cdot V_{i,u}^2 \quad (2)$$

2.4 Conclusões Parciais

Neste capítulo foram apresentadas as principais características referentes aos conceitos de geração distribuída. Um panorama atual da geração eólica foi sintetizado, evidenciando a grande importância dos estudos realizados para inserção de usinas eólicas nos sistemas de distribuição de energia.

Por fim, foram apresentados os principais conceitos dos compensadores estáticos de reativos e ainda a formulação matemática para o compensador estático utilizado no presente trabalho.

Capítulo 3

METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO DE CER

Neste capítulo, será apresentado um estudo sintetizado das características do projeto. O capítulo encontra-se dividido em 4 seções que, de forma sucinta, apresentam as principais características, uma modelagem matemática e ainda o método de busca da solução ótima para o problema proposto.

3.1 Considerações Iniciais

A inserção de usinas eólicas em SDE pode requerer suporte de potência reativa. Este suporte é necessário quando ocorre a utilização de geradores de indução convencionais (gaiola de esquilo) na usina alocada.

Com intuito de realizar este suporte de reativos, o projeto propõe a alocação de dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) denominados Compensadores Estático de Reativos. Para a obtenção do local ótimo de alocação destes dispositivos, o método de otimização SIA, já mencionado anteriormente, foi utilizado.

3.2 Formulação do Problema

O projeto apresentado pode ser definido como um modelo de otimização cuja função objetivo é minimizar o custo total envolvido, ou seja, minimizar as parcelas de perdas de energia no sistema, os custos de investimento em dispositivos e ainda a parcela dos custos operacionais dos mesmos. Desta forma, a função objetivo do problema proposto pode ser formulada como:

$$f = \min(C_a + C_b + C_c) \quad (3)$$

Onde:

$$C_a = k \cdot \sum_{u=1}^{NC} T_u \cdot P_u \quad (4)$$

$$C_b = \sum_{i=1}^{NB} e_i \cdot (r \cdot Qc_i + cf) \quad (5)$$

$$C_c = \sum_{u=1}^{NC} \sum_{i=1}^{NB} (a_i + b_i \cdot Qt_{i,u} + c_i \cdot Qt_{i,u}^2) \quad (6)$$

Como todo problema de otimização, a função objetivo descrita está sujeita a restrições de igualdade e desigualdade. Estas restrições ocorrem devido a existência de padrões técnicos, limitações dos equipamentos, etc. As restrições do problema de alocação de CER são listadas a seguir.

$$Pt_{i,u} + Pe_{i,u} + PL_i - \sum_{j \in \Omega} (p_{ij,u}) = 0 \quad (7)$$

$$Qt_{i,u} + Qe_{i,u} + e_i \cdot Qc_{i,u} - QL_i - \sum_{j \in \Omega} (q_{ij,u}) = 0 \quad (8)$$

As equações (7) e (8) são restrições de igualdade referentes ao balanço de potência ativa e reativa do sistema. A modelagem do equipamento a ser alocado (CER) indica que a potência reativa desenvolvida pelo mesmo é positiva na faixa capacitiva do dispositivo e possui valor negativo na faixa indutiva de atuação do compensador.

$$V^{\min} \leq V_{i,u} \leq V^{\max} \quad (9)$$

A equação (9) indica os limites de tensão da rede, ou seja, nenhuma barra do sistema poderá ultrapassar os valores limites determinados. Esta limitação de tensão tem como consequência uma melhor regulação de tensão e melhoras na qualidade de energia.

$$0 \leq Pt_{i,u} \leq Pt_i^{\max} \quad (10)$$

$$0 \leq Qt_{i,u} \leq Qt_i^{\max} \quad (11)$$

As equações (10) e (11) introduzem ao sistema os limites de geração de potência ativa e reativa das termoelétricas à diesel inseridas no sistema, respectivamente.

$$e_i = 0 \text{ ou } 1 \quad (12)$$

Em (12) estabelece-se a natureza binária de decisão da alocação de CER em uma barra do sistema. Ou seja, se uma posição encontra-se com 0, não haverá alocação de CER na sua respectiva barra e se encontra-se com 1, um dispositivo será alocado na barra correspondente.

O problema de alocação considera previamente o modelo de CER como injeção fixa de potência reativa ($Q_{ci,u}$), com o propósito de se determinar os pontos mais atrativos para suporte de potência reativa considerando-se a presença de aerogeradores. Deste modo, a faixa de compensação na barra i é previamente determinada como:

$$Q_{c_i}^* = \begin{cases} 0 \text{ a } \max(Q_{c_{i,u}}) & , \text{ se } \min(Q_{c_{i,u}}) \geq 0 \\ \min(Q_{c_{i,u}}) \text{ a } \max(Q_{c_{i,u}}) & , \text{ se } \min(Q_{c_{i,u}}) < 0 \end{cases}$$

Em que $\min(Q_{ci,u})$ e $\max(Q_{ci,u})$ são os valores mínimo e máximo de potência reativa (Q_{ci}) obtidos entre todos os cenários u , respectivamente. Ou seja, para diferentes cenários simulados obtém-se os valores críticos e, deste modo, se algum cenário necessitar de compensação indutiva, esta faixa é incluída, caso contrário, apenas a faixa capacitiva fará parte da faixa de operação do dispositivo. Destaca-se que sob o ponto de vista de suporte de potência reativa, a presença de aerogeradores de indução requer compensação capacitiva, ou seja, a tendência é que $\min(Q_{ci,u})$ seja positivo.

Após a determinação dos pontos de alocação, a faixa $Q_{c_i}^*$ é ajustada otimizando-se o controle da tensão nodal pelos compensadores alocados. Para tanto, considera-se o modelo de susceptância variável do CER [24] apresentado anteriormente e definido pelas equações (1) e (2).

Deste modo, com as equações (1) a (12), listadas anteriormente, é possível simular a inserção dos CER's no sistema. Para obter o resultado ótimo, um método de otimização baseada em programação não linear inteira mista devem ser utilizado.

3.3 Técnica de Resolução

A metodologia proposta, no presente trabalho, para a obtenção dos locais ótimos de inserção dos compensadores estáticos de reativos nos SDE baseia-se na meta-heurística denominada Sistema Imunológico Artificial (SIA). Algumas das propriedades destes sistemas que os tornam de grande importância na solução de problemas de engenharia são:

- Unicidade: cada indivíduo possui um sistema imunológico único;
- Aprendizado: o sistema imunológico pode entender e aprender a estrutura dos agentes patogênicos;
- Memória: após o aprendizado, o sistema guarda tais informações para obter respostas mais rápidas no futuro;
- Detecção de anomalias: o sistema imunológico consegue detectar a presença de agentes patogênicos e reagir a estes agentes;

Inicialmente são apresentados os conceitos básicos referentes à metodologia aplicada e, em seguida, os passos do algoritmo utilizado.

3.3.1 O Sistema Imunológico artificial

Baseado em sistemas imunológicos naturais, o SIA é implementado com intuito de preservar as características do sistema imune adaptativo [26].

O sistema imunológico natural utiliza mecanismos avançados para realizar o combate a agentes patógenos que apresentam estrutura molecular específica (antígenos). Quando o sistema imunológico natural identifica tais antígenos no organismo tendem a realizar a resposta imunológica que pode ser classificada como [25]:

- Resposta imunológica do sistema nato: realiza uma resposta rápida e efetiva contra os patógenos invasores;
- Resposta imunológica adaptativa: igualmente eficaz se comparado ao sistema nato, porém é caracterizado por sua forma lenta e duradoura.

O SIA utiliza as características de funcionamento correspondente ao sistema imunológico adaptativo [26]. Alguns mecanismos do sistema imunológico natural são de extrema importância para obtenção do SAI. Estes mecanismos são descritos a seguir.

Inicialmente, necessita-se da produção de células B na medula óssea que é realizada de forma aleatória. No sistema imunológico natural as células geradas, ou seja, o material genético é armazenado em bibliotecas. Por meio da recombinação genética, segmentos de diferentes bibliotecas podem ser selecionados para obtenção de novas moléculas. Em seguida, ocorre também o princípio da seleção clonal que irá obter as células com maior afinidade aos estímulos antigênicos. Estas células serão desta forma, reproduzidas gerando novas células.

Após a reprodução das células com maior afinidade, ocorrerá também o processo de hipermutação somática que, em conjunto com a seleção clonal, gera variações genéticas que irão garantir maiores afinidades entre antígeno e anticorpo, ou seja, obterão melhores resultados. Em seguida, o processo de edição de receptores é realizado. Nesta etapa a modificação ou geração de novas células ocorre, permitindo assim que a resposta imunológica possa sair de mínimos locais explorando novas regiões de solução. A Figura 12 apresenta uma configuração para a representação de um espaço de soluções para as regiões de ligação ao antígeno.

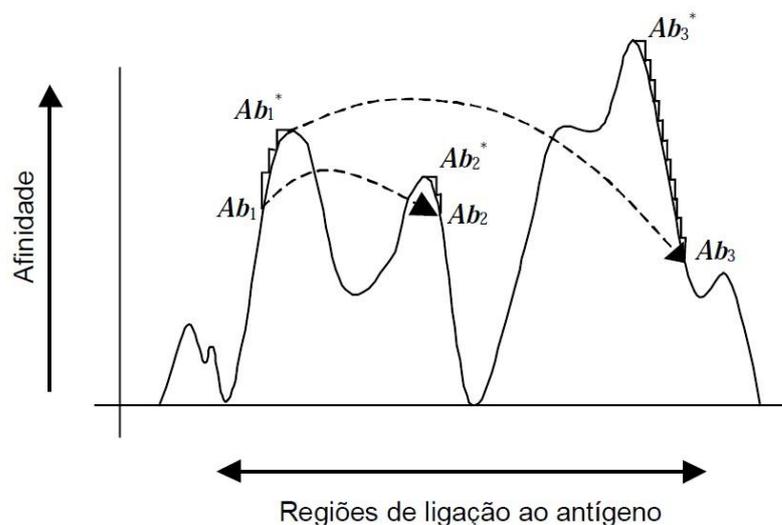


Figura 12: Representação de espaço de soluções

De acordo com a Figura 12, pode-se verificar que o princípio de seleção clonal juntamente com o processo de hipermutação somática permitem que o processo de otimização evolua aumentando a afinidade entre antígeno e anticorpo (A_{b1} e A_{b1^*}). Pode-se perceber ainda que o processo de edição de receptores permite a exploração de novas regiões de solução (A_{b2} e A_{b3}).

A etapa de seleção negativa elimina as células geradas na etapa de geração de células B ou na etapa de hipermutação somática que possam representar um ataque ao próprio organismo, ou seja, elimina as células B com capacidade de reconhecer os padrões das próprias moléculas do organismo.

3.3.2 O Algoritmo Proposto

Utilizando os processos descritos anteriormente, é possível a obtenção de um modelo de otimização bioinspirada baseado em SIA. A Figura 13 apresenta o fluxograma referente ao algoritmo utilizado para a solução do problema em estudo.

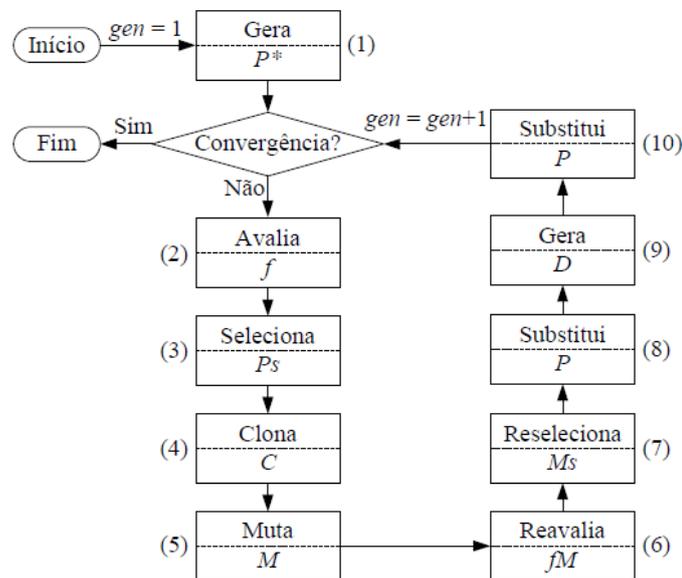


Figura 13: Fluxograma do algoritmo utilizado[28].

O algoritmo pode ser dividido em 10 etapas, como apresentado na figura acima.

- *Etapa 1:* Nesta etapa a população P^* é gerada obedecendo os limites de possíveis GD's a serem alocadas no sistema (restrições modeladas pelas equações 15 e 16);
- *Etapa 2:* Ocorre a avaliação dos indivíduos da população através do cálculo da função objetivo do problema;
- *Etapa 3:* Após a verificação da função objetivo, ocorre a seleção dos melhores anticorpos para clonagem na etapa 4 (criação do indivíduo P_s);
- *Etapa 4:* Nesta etapa ocorre a clonagem dos indivíduos selecionados de acordo com a função de afinidade gerando uma população de anticorpos clonados (população C);
- *Etapa 5:* Pequenas alterações são realizadas na população de anticorpos clonados C. Estas modificações podem alterar o tipo de geração distribuída a ser alocada, a capacidade da instalação ou ainda o fator de potência da GD baseada em termoelétrica a biomassa a ser instalada. Esse processo de modificações, definido com hipermutação somática, gera uma população de anticorpos M que será avaliada na etapa seguinte;
- *Etapa 6:* Ocorre a avaliação dos anticorpos de M obtidos por meio do processo de hipermutação somática;
- *Etapa 7:* De maneira semelhante ao passo 3, a etapa 7 seleciona os melhores indivíduos após a avaliação da função objetivo na etapa 6;
- *Etapa 8:* Nesta etapa ocorre a modificação da população de anticorpos P. Para tanto, os melhores anticorpos selecionados da população M substituem os piores anticorpos da população P;

- *Etapa 9:* A etapa 9, gera de maneira pseudo-aleatória “d” novos anticorpos, como indicado na etapa 1, esta etapa é denominada processo de edição de receptores;
- *Etapa 10:* Ocorre a substituição dos “d” piores indivíduos de P pelo novos indivíduos gerados na etapa 9.

Após a etapa 10, o algoritmo criado para atender a modelagem proposta nas equações 1 a 16, verifica a convergência da solução. Se o problema convergiu o processo é finalizado, caso contrário, inicia-se novamente o processo iterativo a partir da etapa 2 com a nova população de anticorpos P atualizada.

A Figura 14 apresenta o algoritmo referente a estrutura do problema de alocação de CER.

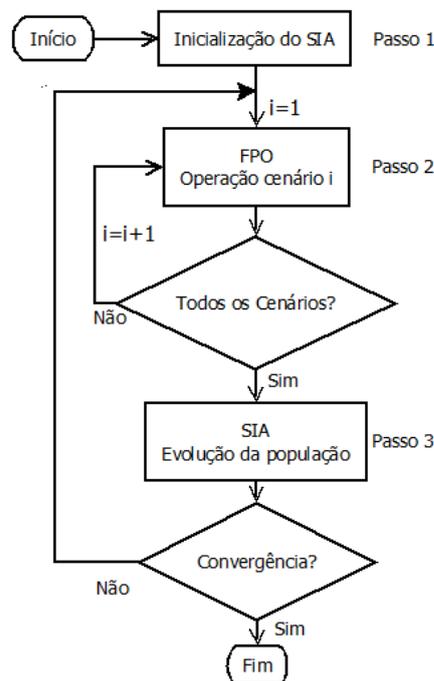


Figura 14: Metodologia proposta.

O passo 1 consiste na inicialização da população inicial do SIA (P). Cada indivíduo desta população corresponde a uma solução para o problema de alocação do CER no que se refere à definição das barras terminais ou controladas. Em seguida, o fluxo de potência ótimo não linear formulado em Eq. 1 a 10 é solucionado

no passo 2 para cada indivíduo da população P e para cada cenário de geração eólica, considerando-se as variáveis discretas fixadas conforme determinado na solução correspondente ao indivíduo.

O passo 3 envolve a aplicação dos mecanismos de evolução do método de otimização utilizado, SIA, à população de soluções candidatas corrente, objetivando a busca por soluções de melhor qualidade para o problema de otimização. A convergência é dada pelo número máximo de iterações, ou gerações do modelo de otimização proposto, ou pelo número de gerações consecutivas sem melhoria da melhor solução encontrada. Quando uma destas condições é alcançada, o algoritmo converge, caso contrário, retorna ao Passo 2 para a otimização dos compensadores localizados de acordo com a população atualizada do SIA.

3.4 Conclusões Parciais

Este capítulo apresentou a formulação matemática da modelagem proposta. Foram definidas as equações referentes a função objetivo assim como as restrições do problema de otimização.

O modelo de otimização baseado em SIA foi descrito e analisado, apresentando também um fluxograma correspondente ao algoritmo utilizado. Por fim, foi apresentado um fluxograma correspondente a estrutura da modelagem proposta, ou seja, a partir a estrutura do algoritmo utilizado para a solução do problema foi elaborado um algoritmo que atendesse as especificidades do presente trabalho.

Capítulo 4

ESTUDOS DE CASO

Neste capítulo, serão apresentados os estudos referentes à metodologia formulada no capítulo 3. Para tanto, o capítulo encontra-se dividido em 3 subseções onde inicialmente realiza-se a caracterização do problema a ser estudado. Em seguida, são apresentados os resultados das análises propostas e, por fim, as conclusões parciais obtidas com o desenvolvimento apresentado.

4.1 Considerações Iniciais

Para validação da metodologia proposta, o presente trabalho realizou um estudo para um sistema de dados conhecido da literatura, o IEEE 33 barra. O sistema utilizado apresenta tensão nominal igual a 12,66 kV e uma demanda total de 3715 kW. A topologia do sistema utilizado é apresentada na Figura 15.

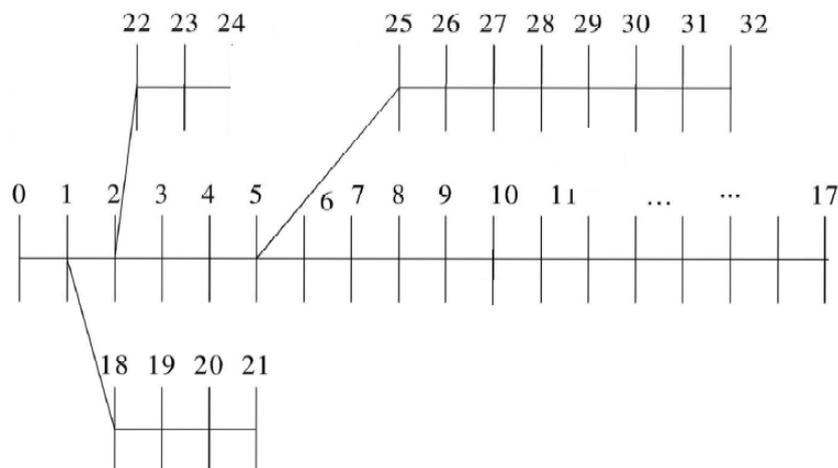


Figura 15: Topologia original sistema IEEE 33 barras [18]

Com o objetivo de validar a metodologia proposta para a alocação de CER, a simulação realizada utilizou como referência os dados de alocação de usinas eólicas e termoelétricas a diesel presente em [18], podendo assim realizar análises comparativas com os resultados obtidos na referência. Para tanto, modificações no sistema apresentado na Figura 15 foram realizadas, ou seja, foram inseridos 3 aerogeradores e 2 termoelétricas no sistema, como apresentado na figura 16,

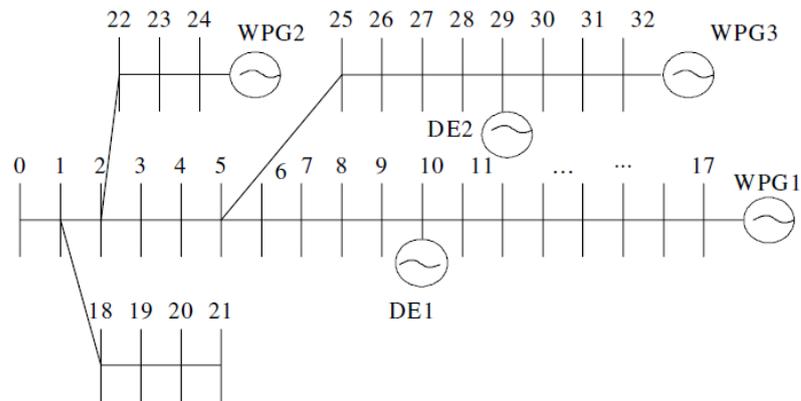


Figura 16: Sistema IEEE modificado [18].

Os geradores a diesel são introduzidos nas barras 10 e 29, com capacidades de 250 kW e 50 kW, respectivamente. Os coeficientes a_i , b_i e c_i , apresentados na equação (4), associados ao custo da potência reativa destas unidades, são de \$0,02, 0,02 \$/kvar e 0,01 \$/kvar², respectivamente.

O custo unitário associado às perdas é de 0,05 \$/kWh. Os limites de tensão nodal para este caso são 0,9 pu e 1,1 pu [18].

Os aerogeradores são inseridos nas barras 17, 24 e 32 e sua potência nominal é de 700 kW [18]. A potência de saída destas unidades pode variar em função da velocidade dos ventos sendo necessário, portanto, a criação de cenários referentes ao regime dos ventos. Para tanto, foram traçados cenários utilizando as técnicas de Simulação Monte Carlo, obtendo assim 6 cenários com velocidades médias. Os valores de velocidade obtidos em [18] e seus respectivos valores de potência ativa de saída encontram-se indicados na Tabela 1.

Tabela 1 Cenários de ventos via simulação de Monte Carlo [18]

Cenário	1	2	3	4	5	6
w (m/s)	5,8	8,1	8,9	9,73	11,1	11,7
Potência Ativa (kW)	100	300	400	500	600	700
Potência Reativa (kVAr)	-30	-60	-92	-125	-145	-200

O custo fixo de investimento em compensação estática de reativos é de \$1000 por equipamento e o custo variável é dado pelo valor unitário de 3 \$/kvar [18].

Uma vez determinados os valores necessários e as modificações referentes à inserção de GD no SDE, as simulações podem ser realizadas. Para o estudo de alocação ótima de compensadores estáticos de reativos, foram realizadas simulações em duas etapas, onde:

- Etapa 1: CER como injeção fixa de potência reativa;
- Etapa 2: CER variável com a tensão terminal.

Os resultados obtidos são apresentados nas próximas seções.

4.2 Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados das análises referentes às etapas descritas anteriormente, realizando também a comparação com os valores apresentados na referência [18].

4.2.1 Etapa 1

Como citado anteriormente, nesta etapa considera-se a modelagem dos CER's como uma injeção fixa de potência reativa na barra alocada. Neste trabalho, considera-se a barra controlada como sendo a barra terminal do dispositivo. Com esta modelagem, faz-se possível determinar a faixa de compensação necessária para realizar o suporte de potência reativo aos aerogeradores inseridos no sistema. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para a etapa em análise.

Tabela 2 Alocação de CER no sistema

Alocação – Barra (Q_{CER} kvar)		
<i>Cenário</i>	<i>Proposta</i>	<i>[18]</i>
1	14 (212,99); 22 (592,29)	9 (245,48); 13 (129,42)
	26 (451,40); 30 (678,59)	16 (102,56); 30(864,25)
2	14 (242,87); 22 (611,78)	9 (410,88); 13 (196,85)
	26 (437,72); 30 (707,42)	16 (99,92); 30(897,55)
3	14 (276,51); 22 (640,02)	9 (241,97); 13 (128,04)
	26 (432,62); 30 (739,77)	16 (166,47); 30(925,49)
4	14 (369,65); 22 (0,00)	9 (0,0); 13 (149,53)
	26 (601,81); 30 (771,95)	16 (201,16); 30(968,70)
5	14 (335,58); 22 (687,82)	9 (154,30); 13 (126,14)
	26 (425,58); 30 (795,08)	16 (225,41); 30(983,50)
6	14 (395,41); 22 (741,78)	9 (0,00); 13 (157,13)
	26 (423,47); 30 (852,17)	16 (280,93); 30(1053,33)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

De acordo com a Tabela 2, pode-se perceber que os resultados obtidos para a alocação ótima de compensadores estáticos de reativos no sistema foram diferentes daqueles apresentados na referência [18]. A definição de novas barras para alocação dos dispositivos pode portanto, propiciar a definição de dispositivos com valores diferentes de operação, o que pode impactar no custo final do problema.

4.2.2 Etapa 2

Com o objetivo de otimizar a tensão do sistema, considera-se, nesta etapa, um modelo mais realista do CER onde este dispositivo apresenta compensação variável com tensão terminal da barra alocado. A fim de comparação, a análise é realizada para os locais obtidos na etapa 1 da metodologia proposta e para os resultados apresentados em [18].

Os valores de tensão de referência para as barras que possuem alocação de CER são apresentados na tabela abaixo.

Barra	9	13	14	16	22	26	30
V_{k0}	0,95	0,94	0,94	0,93	0,98	0,95	0,93

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As tensões de referência do sistema foram definidas como as tensões do sistema quando este não possui aerogeradores alocados, ou seja, nesta etapa deseja-se obter a faixa de operação dos CER's para que o sistema mantenha suas tensões de referência com usinas eólicas no sistema. A Tabela 4 apresenta as faixas de operações obtidas para os compensadores alocados pela metodologia proposta e pela referência utilizada [18].

Tabela 4 Valor de operação dos CER para etapa 2

Alocação – Barra (Q_{CER} kvar)		
Cenário	Proposta	[18]
1	14 (-6,50); 22 (-1,28)	9 (-4,39); 13 (-5,85)
	26 (-3,23); 30 (-5,35)	16 (-7,15); 30(-5,28)
2	14 (-20,21); 22 (-3,99)	9 (-13,69); 13 (-18,19)
	26 (-10,06); 30 (-16,76)	16 (-22,38); 30(-16,55)
3	14 (-25,64); 22 (-5,16)	9 (-17,44); 13 (-23,10)
	26 (-12,89); 30 (-21,36)	16 (-28,30); 30(-21,10)
4	14 (-30,76); 22 (-6,29)	9 (-21,00); 13 (-27,75)
	26 (-15,60); 30 (-25,73)	16 (-33,87); 30(-25,42)
5	14 (-36,31); 22 (-7,50)	9 (-24,86); 13 (-32,79)
	26 (-18,51); 30 (-30,50)	16 (-39,99); 30(-30,14)
6	14 (-39,82); 22 (-8,40)	9 (-27,36); 13 (-35,99)
	26 (-20,51); 30 (-33,60)	16 (-43,68); 30 (-33,19)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

De modo semelhante aos resultados apresentados na Tabela 2, os resultados obtidos para o problema de alocação de CER, para acomodação das tensões nodais na presença de usinas eólicas no sistema, apresentaram uma significativa diferença quando comparado com os resultados apresentados em [18].

4.2.3 Análise dos Custos

Uma vez realizadas as análises das etapas 1 e 2 separadamente, pode-se obter a faixa de operação dos compensadores estáticos de reativos alocados no sistema. Ou seja, os valores mínimos e máximos de potência reativa que este deverá conseguir oferecer ao realizar o suporte de reativos ao sistema. Para obtenção desta faixa de operação de cada CER alocado, adotou-se como valor mínimo de operação o menor valor obtido dentre todos cenários apresentados nas tabelas 2 e 4. De modo semelhante, o valor máximo de operação do CER alocado refere-se ao maior valor obtido nestas tabelas.

A Tabela 5 apresenta os valores para os custos operacionais referente às soluções apresentadas anteriormente.

Tabela 5 Custos operacionais

C	Custo Perda (10 ⁵ \$)	Custo Ger. Térmica (\$)	Custo Perda (10 ⁵ \$)	Custo Ger. Térmica (\$)
1	1,77	377,72	1,86	124,05
2	1,01	363,17	1,11	146,17
3	0,77	359,80	0,86	124,85
4	0,67	118,01	0,70	932,04
5	0,51	359,82	0,61	387,14
6	0,52	362,77	0,62	932,04

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Por fim, a Tabela 6, indicada abaixo, apresenta um resumo com a solução final para o problema proposto, ou seja, as faixas de operação e custo total de alocação dos compensadores estáticos de reativos para a o problema proposto são apresentados.

Tabela 6 Resumo do problema de alocação

Solução	Proposta	[18]
Faixa de operação (kvar)	14 (-39,82 - 395,41)	9 (-27,36 - 410,88)
	22 (-8,40 - 741,78)	13 (-35,99 - 196,85)
	26 (-20,51 - 601,81)	16 (-43,68 - 280,93)
	30 (-33,60 - 852,17)	30 (-33,19 - 1053,33)
Custo Var. CER (10⁴\$)	14 (1,31); 22 (2,25)	9 (1,31); 13 (0,70)
	26 (1,87); 30 (2,66)	16 (0,97); 30 (3,26)
Custo Fixo CER (10³\$)	4	4
Custo Perda Total (10⁵\$)	5,25	5,76
Custo Ger. Ter. Total (10³\$)	1,94	2,65
Custo Total (\$)	611.840,00	645.050,00

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Percebe-se, portanto, a partir da Tabela 6 que a metodologia proposta pelo presente trabalho, mostrou-se eficaz resultando em um custo total inferior ao obtido pela literatura, ou seja, ao realizar a comparação dos resultados obtidos no presente trabalho com os resultados da referência percebe-se que a metodologia proposta apresentou uma solução para o problema reduzindo o custo total envolvido. Portanto, a alocação dos dispositivos em barras diferentes do sistema, quando comparado ao obtido na referência, mostra-se mais atrativa.

4.3 Conclusões Parciais

Ao realizar as análises propostas neste capítulo, pôde-se perceber a validação da metodologia aplicada na solução do problema em estudo. As soluções obtidas para alocação ótima de CER nos SDE com intuito de realizar suporte de potência reativa as usinas eólicas inseridas no sistema e ainda, para manter os níveis de tensão nodal em todas as barras do sistema se mostraram adequadas ao problema.

Realizando uma análise comparativa com os resultados apresentados na referência percebe-se a eficácia do modelo de otimização utilizado uma vez que o mesmo obteve uma solução viável para o problema com valores menores que os obtidos em [18].

Capítulo 5

CONCLUSÕES

Neste capítulo, serão apresentadas as principais conclusões referentes ao estudo de alocação ótima de CER em SDE.

5.1 Considerações Finais

O presente trabalho apresentou as atividades desenvolvidas no âmbito do projeto de alocação ótima de compensadores estáticos de reativos em sistemas de distribuição de energia.

O trabalho apresentou uma metodologia para alocação ótima de CER utilizando um modelo de otimização baseado na meta-heurística sistema imunológico artificial com o objetivo de realizar o suporte de potência reativa às usinas eólicas inseridas no sistema.

A partir da análise dos dados, foi possível determinar a faixa de operação dos equipamentos alocados. Os resultados obtidos foram, também, comparados com soluções apresentadas na literatura validando assim a metodologia apresentada.

Tanto a metodologia proposta quanto o modelo de otimização utilizados podem ser considerados efetivos uma vez que além de atingir os objetivos propostos foram obtidos resultados melhores que os encontrados na literatura.

REFERÊNCIAS

1. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Advantages_of_Fusion*. 2007. Disponível em: http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal. Acessado em: 5 de mar 2016.
2. ALMADA, J. B. “*Análise de impactos e soluções na integração da geração distribuída ao sistema elétrico*”, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2010, 55 p.
3. ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica- *Micro e Mini Geração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica.20014*. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>. Acessado em: 2 de março de 2016
4. ZOU, Kai et al. Distribution system planning with incorporating DG reactive capability and system uncertainties. *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, v. 3, n. 1, p. 112-123, 2012.
5. MORADI, Mohammad Hasan; ABEDINI, M. A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 34, n. 1, p. 66-74, 2012.
6. KRUEASUK, W.; ONGSAKUL, W. “*Optimal Placement of Distributed Generation Using Particle Swarm Optimization*”.
7. KRUEASUK, Wichit; ONGSAKUL, Weerakorn. Optimal placement of distributed generation using particle swarm optimization. In: *Proceedings of Power Engineering Conference in Australasian Universities, Australia*. 2006.
8. SIANO, Pierluigi; MOKRYANI, Geev. Assessing wind turbines placement in a distribution market environment by using particle swarm optimization. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 28, n. 4, p. 3852-3864, 2013.
9. LEE, Ching-Yin et al. The impact of SCIG wind farm connecting into a distribution system. In: *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific*. IEEE, 2009. p. 1-7.
10. REN-MU, He et al. Impacts of DFIG-based wind farm on load modeling. In: *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE*. IEEE, 2009. p. 1-6.
11. 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*. IEEE, 2009. p. 1099-1103.

12. ZHAO, Jingjing; LI, Zhengkun; LI, Dongdong. Reactive power optimization algorithm of considering wind farm voltage control capability in distribution system. In: Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on. IEEE, 2011. p. 1-4.
13. DE OLIVEIRA, L. W. et al. Proposta de ajuste da tensão de referência do compensador estático de reativos. In: Sixth Latin-American Congress: Electricity, Generation and Transmission. 2005.
14. SREEDHARAN, Sasidharan et al. PSO based tuning of FACTS controllers for maximizing the wind energy penetration in power systems. In: Innovative Smart Grid Technologies-India (ISGT India), 2011 IEEE PES. IEEE, 2011. p. 287-293.
15. DIXIT, Sudhaker; SRIVASTAVA, Laxmi; AGNIHOTRI, Ganga. Optimal placement of SVC for minimizing power loss and improving voltage profile using GA. In: Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT), 2014 International Conference on. IEEE, 2014. p. 123-129.
16. ISHAK, Sherif; ABIDIN, A. F.; RAHMAN, T. K. A. Static Var compensator planning using artificial immune system for loss minimisation and voltage improvement. In: Power and Energy Conference, 2004. PECon 2004. Proceedings. National. IEEE, 2004. p. 41-45.
17. SIRJANI, Reza; MOHAMED, Azah. Improved harmony search algorithm for optimal placement and sizing of static var compensators in power systems. In: Informatics and Computational Intelligence (ICI), 2011 First International Conference on. IEEE, 2011. p. 295-300.
18. CHEN, Lin; ZHONG, Jin; GAN, Deqiang. Reactive power planning and its cost allocation for distribution systems with distributed generation. In: Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE. IEEE, 2006. p. 6 pp.
19. EVANGELOPOULOS, Vasileios A.; GEORGILAKIS, Pavlos S. Optimal distributed generation placement under uncertainties based on point estimate method embedded genetic algorithm. *Generation, Transmission & Distribution, IET*, v. 8, n. 3, p. 389-400, 2014.

20. NEVES, P. S. Planejamento de Sistemas de Distribuição com Geração Distribuída Através de Algoritmos Genéticos . 2014. Monografia. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA.
21. GWEC- Global Wind Report. Annual Market Update. 2014. Disponível em: http://www.gwec.net/wpcontent/uploads/2015/03/GWEC_Global_Wind_2014_Report_LR.pdf. Acessado em: 15 de março de 2016.
22. PASSOS FILHO, João Alberto. Representação e avaliação do desempenho de dispositivos de controle no problema de fluxo de potência. 2005. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.
23. DE OLIVEIRA, LEONARDO WILLER. Ajuste Ótimo e Coordenado dos Parâmetros do Compensador Estático de Reativos. 2005. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA.
24. OLIVEIRA, E. J. et al. Modelagem do compensador estático de reativos na região não linear de operação,” XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, pp. 1-10. 2014
25. COELHO, G. P. “Redes Imunológicas Artificiais para Otimização em Espaços Contínuos: uma Proposta Baseada em Concentração de Anticorpos”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, Abril, 2011.
26. DE CASTRO, Leandro N.; VON ZUBEN, Fernando J. Learning and optimization using the clonal selection principle. *Evolutionary Computation*, IEEE Transactions on, v. 6, n. 3, p. 239-251, 2002.
27. EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Paginas/default.aspx>. Acessado em: 5 de mar de 2016.
28. DE OLIVEIRA, Leonardo W. et al. Artificial immune systems applied to the reconfiguration of electrical power distribution networks for energy loss minimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 56, p. 64-74, 2014.