

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

**OTIMIZAÇÃO DA RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E
HÍBRIDOS RECARREGÁVEIS EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO**

DENISSON QUEIROZ OLIVEIRA

ITAJUBÁ, Março de 2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

DENISSON QUEIROZ OLIVEIRA

**OTIMIZAÇÃO DA RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E
HÍBRIDOS RECARREGÁVEIS EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Antônio Carlos Zambroni de Souza

Co-orientador: Luiz Fernando Naporano Delboni

**Março de 2012
ITAJUBÁ - MG**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Cristiane N. C. Carpinteiro- CRB_6/1702

O482o

Oliveira, Denisson Queiroz

Otimização da recarga de veículos elétricos e híbridos recarregáveis em sistemas de distribuição. / por Denisson Queiroz Oliveira. -- Itajubá (MG) : [s.n.], 2012.

85 p.: il.

Orientador : Prof. Dr. Antônio Carlos Zambroni de Souza.

Coorientador : Prof. Dr. Luiz Fernando Naporano Delboni.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Recarga de veículos elétricos. 2. Sistemas imunológicos artificiais. 3. Sistemas de distribuição. I. Souza, Antônio Carlos Zambroni de, orient. II. Delboni, Luiz Fernando Naporano, coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

OTIMIZAÇÃO DA RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS RECARREGÁVEIS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

DENISSON QUEIROZ OLIVEIRA

Esta Dissertação foi julgada para obtenção do título de
Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica,
Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência,
e aprovada pela Banca Examinadora abaixo assinada:

Prof. Glauco Nery Taranto, PhD
Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ

Prof. Benedito Isaías de Lima Lopes, Dr.
Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI

Prof. Pedro Paulo Balestrassi, PhD
Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI

Prof. Antônio Zambroni de Souza, PhD
Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI

AGRADECIMENTOS

A DEUS, eterno criador e fonte de todo o conhecimento, sabedoria e ciência. Sem a força que vem d'Ele nada disso teria acontecido e não haveria sucesso em nenhuma empreitada da minha vida. Fortaleza, Refúgio, Amigo de muitas horas. Aquele que firmou meus passos e me ensinou que nem todos os títulos humanos me tornariam maior que a poeira dos seus pés ou melhor que algum dos meus semelhantes. Obrigado SENHOR!

Aos meus pais, Francisco Rufino de Oliveira Filho e Maria de Jesus Queiroz Oliveira, fiéis companheiros de jornada e incentivadores de todo este processo. Sem a vossa intercessão, ajuda, apoio incondicional, incentivos diários e amor nada disso teria sido possível. Vosso nome não aparece na capa deste trabalho, mas cada página deve a vocês dois. Essa vitória é de vocês, meus pais!!!

A Natália Soares Ferreira, por sua companhia e incentivo. Obrigado.

Ao meu orientador, professor Antônio Carlos Zambroni de Souza, que nunca entendeu porque eu sorria sem motivos durante nossas diversas conversas. Seu entusiasmo e ânimo inabaláveis sempre me animaram e me fizeram sorrir. Sua alegria demonstrada no trabalho diário e sua fé inabalável no sucesso desta empreitada sempre me animaram. Parabéns e Obrigado.

Ao meu co-orientador, Luiz Delboni, pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos de muitas jornadas, Tiago Vasconcelos, Livia Rudakoff, Lucas Nascimento, Gabriel Nascimento, Luciano Borges e Pedro Neto. Cada um de vocês tem uma participação importante no desenvolvimento deste trabalho e na minha vida pessoal durante este tempo. Obrigado.

Aos meus colegas e companheiros de trabalho, Adriano Almeida, Aurélio Coelho, Marcus Sollyvan, Diogo Marujo e Marcos Santos. Este trabalho também tem uma ponta do ânimo de cada um de vocês. Obrigado.

Ao prof. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez e ao prof. Vicente Leonardo Paucar Casas, professores da Universidade Federal do Maranhão, cujas referências ajudaram a abrir as portas da Universidade Federal de Itajubá.

A todos aqueles que de alguma forma se lembraram de mim em suas intercessões. Deus ouviu nossas orações. Agora só temos muito a agradecer.

A família de Elias e Rosânia Ferreira, por me receberem em sua própria família.

A CAPES, pelo auxílio financeiro durante a execução deste trabalho.

RESUMO

O desenvolvimento de novas tecnologias mais limpas e sustentáveis tem sido o alvo de diversos setores da indústria. Dentre estes, o automobilístico tem buscado o desenvolvimento de novos produtos que atinjam as metas de diminuição de emissões de poluentes e tornem o setor mais independente do petróleo e seus derivados. Os veículos elétricos e híbridos são alternativas menos poluentes e mais eficientes, no entanto, ainda mais caros que os modelos convencionais.

O aumento da quantidade destes veículos afetará a demanda por eletricidade em sistemas de distribuição devido à recarga dos mesmos, originando diversos problemas, como por exemplo: violações nos níveis mínimos de tensão; sobrecargas em circuitos primários, transformadores e condutores; violações em limites térmicos de condutores e transformadores; aumento de harmônicos e correntes de falta. Estas ocorrências devem ser solucionadas a fim de que a integração dos veículos ao sistema elétrico aconteça sem maiores problemas.

Para tal, são necessários esquemas inteligentes de carregamento da frota de veículos elétricos, de forma que nenhum destes problemas supracitados cause transtornos à operação segura e confiável do sistema elétrico. Partindo deste ponto, este trabalho propõe um esquema controlado de recarga de veículos elétricos em sistemas de distribuição com o objetivo de executar o processo de recarga obedecendo a critérios restritivos que garantam condições mínimas de operação do sistema sem prejudicar o carregamento completo dos sistemas de armazenamento dos veículos.

O processo é realizado com restrições de carregamento do sistema, de forma a distribuir a demanda do sistema uniformemente durante o período considerado, permitindo assim que os limites operativos sejam obedecidos. Além disso, um processo de minimização de perdas elétricas é realizado com a aplicação de Sistemas Imunológicos Artificiais para melhoria das condições de operação do sistema, considerando a instalação de capacitores quando necessário.

Palavras-chave: Recarga de veículos elétricos; Sistemas Imunológicos Artificiais; Sistemas de distribuição.

ABSTRACT

The development of new cleaner and more sustainable technologies has been the target of several industry sectors. Among them, the automotive sector has sought to develop new products that meet the efforts to decrease greenhouse gases emissions and help to overcome oil dependence. The electric and plug-in hybrid electric cars are less pollutant and more efficient alternatives to conventional cars, however, they are still more expensive.

The demand increase due to electric vehicles may cause many problems, like minimum voltage levels violation; primary circuits and distribution transformers overload; thermal limits violation on conductors and distribution transformers; harmonics and fault currents increase. These occurrences must be solved in order to integrate the vehicles to the power system.

So, it's necessary some intelligent schedule to recharge the electric vehicle fleet in such a way that any of those problems decrease the reliability and safety of power systems operation. This research proposes a controlled recharging schedule to electric vehicles in distribution systems aiming to perform recharging process meeting some constraints, which guarantee minimum operational conditions without harming full vehicles' storage system recharging.

The recharging process considers some system's loadability constraints in order to distribute the load demand uniformly over the considered period, by shifting it from high to low demand periods. Besides, a power losses minimization process is performed applying Immune Artificial Systems to improve system's operational conditions considering capacitor installation when necessary.

Keywords: Electric Vehicles Recharging; Artificial Immune Systems; Distribution systems.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Revisão Literária	5
1.2 Motivação e Objetivo	13
1.3 Organização da Dissertação	14
2. VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS RECARREGÁVEIS	16
2.1 Componentes	17
2.1.1 Sistema de armazenamento de energia.....	17
2.1.2 Motores elétricos e motores de combustão.....	22
2.1.3 Conversores de frequência.....	27
2.2 Vehicle-to-grid	29
3. FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	35
4. SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS.....	41
4.1 Histórico	42
4.2 O Sistema Imunológico	43
4.3 Sistemas Imunológicos Artificiais	47
5. RECARGA OTIMIZADA DE VEÍCULOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	50
5.1 Considerações iniciais	51

5.2	Recarga não controlada	53
5.3	O processo de recarga controlada	54
5.4	Resultados do esquema de recarga controlada	59
5.5	Resultados do Sistema Imunológico Artificial	60
5.5.1	Anticorpos com 4 capacitores.....	61
5.5.2	Anticorpos com 7 capacitores.....	64
5.5.3	Outros resultados	66
6.	CONCLUSÕES	73
6.1	Temas para trabalhos futuros	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
	APÊNDICES	80
A.	Traduzindo o problema dos sistemas imunológicos artificiais	80
B.	Sistemas Imunológicos Artificiais: passo-a-passo	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Acoplamento entre motores em veículos híbridos, (a) acoplamento série; (b) acoplamento paralelo (KRAMER et. al., 2008)	26
Figura 2.2 - Topologias de conversores de frequência para veículos híbridos recarregáveis (KHALIGH et. al., 2010)	29
Figura 2.3 - Arquiteturas de comunicação entre operador do sistema de distribuição e veículos elétricos (QUINN et. al., 2010)	34
Figura 4.1- Estrutura multi-camadas do sistema imunológico (CASTRO et. al., 1999).....	45
Figura 4.2 - Processo imunológico (CASTRO et. al., 1999).....	47
Figura 5.1 - Sistema de distribuição IEEE 34	52
Figura 5.2 - Tensões no sistema durante a recarga não controlada	54
Figura 5.3 - Fluxograma do processo de recarga no sistema de distribuição	56
Figura 5.4 - Fluxograma do processo de otimização utilizando sistemas imunológicos artificiais	58
Figura 5.5 - Tensões mínimas nas fases durante o processo de recarga.....	60
Figura 5.6 - Tensões mínimas para os casos com capacitor e sem capacitor.....	61
Figura 5.7 - Perdas elétricas no sistema para a configuração 1	63
Figura 5.8 - Tensões mínimas e máximas por fase no sistema de distribuição.....	64
Figura 5.9 - Perdas elétricas no sistema para a configuração 2.....	66
Figura 5.10 - Tensões mínimas e máximas por fase no sistema de distribuição.....	66
Figura 5.11 - Perdas elétricas das configurações apresentadas na Tabela 5.6.....	69
Figura 5.12 - Perdas elétricas no sistema para configuração com 12 capacitores.....	71
Figura B.1 - Sistema de distribuição IEEE 37.....	82
Figura B.2 - Primeira geração de anticorpos	83
Figura B.3 - Segunda geração de anticorpos	84
Figura B.4 - Anticorpos selecionados e descartados durante processo de maturação.....	85

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 - VEÍCULOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES	53
TABELA 5.2 - MELHORES ANTICORPOS DE 4 CAPACITORES DE 100 kVAr	62
TABELA 5.3 - MELHORES ANTICORPOS DE 7 CAPACITORES DE 50 kVAr	65
TABELA 5.4 - PERDAS PARA DIFERENTES QUANTIDADES DE VEÍCULOS	67
TABELA 5.5 - PERDAS PARA DIFERENTES QUANTIDADES DE VEÍCULOS	68
TABELA 5.6 - PERDAS PARA DIFERENTES TAMANHOS DE ANTICORPOS	69
TABELA 5.7 - ANTICORPOS COM 12 CAPACITORES DE 100 kVAr	70

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O setor elétrico mundial passa por um momento de grandes desafios, pressionado de um lado pela crescente demanda por energia elétrica, enquanto por outro lado, existe a necessidade de sustentabilidade e respeito ao meio ambiente no planejamento e operação do sistema elétrico.

O sistema elétrico atual é unidirecional por natureza. É formado por uma hierarquia estrita na qual as plantas de geração no topo da cadeia garantem o fornecimento aos consumidores na parte de baixo. Não existe comunicação entre as extremidades do processo. As perdas de transmissão chegam a quase 8%, enquanto 20% da capacidade de geração existente serve apenas para atender o período de ponta, que corresponde a apenas 5% do tempo total (FARHANGI, 2010).

O aumento da demanda, a escassez de investimentos em infraestrutura, o envelhecimento dos equipamentos, o desenvolvimento de novas tecnologias e o surgimento de necessidades antes inexistentes apresentam novos desafios, tais como:

- A desregulamentação abriu um mercado de energia entre redes regionais, apresentando diferentes cenários e incertezas;
 - O aprofundamento da penetração das energias renováveis no sistema aumenta a incerteza na geração e ao mesmo tempo estressa a infraestrutura existente;
 - A necessidade de crescimento sustentável e emprego de tecnologias de baixo impacto ambiental;
 - O aumento na inserção de outros tipos de cargas, como as não-lineares e de veículos elétricos.
-

Estes novos desafios demandam características operativas para as quais o sistema não foi desenvolvido, afetando a estabilidade, a segurança e a confiabilidade do mesmo (SANTACANA et.al., 2010).

Dentro deste novo cenário, o planejamento do sistema elétrico deve partir da concepção de uma infraestrutura dinâmica, incluindo novas tecnologias inteligentes, formas de controle global, capacidade de expansão, versatilidade, flexibilidade, conservação e eficiência energética (VOJDANI, 2008).

A resposta para o desafio de desenvolver um sistema elétrico que englobe todas estas características se encontra no conceito de *smart grid*, ou redes elétricas inteligentes. Estas aplicam tecnologia digital de comunicação e controle avançado para levar eletricidade das fontes geradoras aos consumidores, resultando em economia de energia; aumento da confiabilidade do sistema; aumento da conectividade, automação e coordenação entre produtores de eletricidade, consumidores e redes de transmissão e distribuição.

Para tal, diversas tecnologias são aplicadas de maneira a melhorar o desempenho e maximizar os benefícios, como por exemplo: medição digital avançada; automatização do sistema de transmissão e distribuição; sistemas de comunicação rápidos, baratos e seguros; recursos energéticos distribuídos; proteção avançada; sistemas de geração e de armazenamento distribuídos; monitoramento em tempo real; controles inteligentes e difusos (VOJDANI, 2008; HASSAN et. al., 2010)

Esta concepção moderna do sistema elétrico deve também oferecer uma solução para uma tendência observada no mercado automobilístico – a popularização dos veículos elétricos e híbridos recarregáveis, vistos como alternativas para a dependência do petróleo e seus derivados, cujos preços internacionais são muito instáveis, e ao enrijecimento das restrições sobre emissões de gases de efeito estufa.

Os carros elétricos (EV) se caracterizam pelo uso de um ou mais motores elétricos ligados a um eixo de transmissão ou diretamente às rodas. Possuem sistema de armazenamento de energia, mas ainda contam com uma baixa autonomia. Já os modelos híbridos (HEV) contam também com um motor de combustão interna, de menor porte, que pode fornecer energia ao motor elétrico, tracionar o veículo junto com este, ou funcionar somente em velocidades mais altas (CLEMENT-NYNS et. al., 2007).

A evolução natural dos veículos híbridos são os modelos recarregáveis (PHEV). Estes possuem eficiência e capacidade do sistema de armazenamento de energia ainda maiores que os anteriores, e podem ser recarregados em tomadas padrão a partir da rede de

distribuição. Além disso, possuem motores elétricos mais potentes e assim como os modelos anteriormente apresentados, podem ser operados em modo totalmente elétrico, mas também possuem uma autonomia limitada (CLEMENT-NYNS et. al., 2007).

As vantagens deste segmento de veículos incluem a maior eficiência, baixas emissões, menor ruído (CLEMENT-NYNS et. al., 2007) e principalmente maior economia, visto que para um mesmo percurso, o custo da eletricidade é cerca de três a quatro vezes menor que o da gasolina (IPAKCHI et. al., 2009).

Estimativas do Instituto de Pesquisas em Energia Elétrica dos Estados Unidos mostram que para um sedã híbrido que é recarregado de 3 a 4 horas por dia, o custo anual da eletricidade seria entre \$ 170,00 e \$ 215,00. Em contraste, a gasolina necessária para percorrer o mesmo percurso durante o ano custaria aproximadamente quatro vezes mais. Assim, a alternativa híbrida resultaria em uma economia média de \$ 600,00 anualmente (SANNA, 2005).

O maior investimento inicial devido ao custo dos sistemas de armazenamento de energia tem sido o maior obstáculo para a popularização dos veículos elétricos híbridos recarregáveis, que por terem um conjunto maior de baterias, são mais caros (SANNA, 2005; CLEMENT-NYNS et. al., 2007; KARPLUS, 2008; WIRASINGHA et. al., 2008). Por exemplo, um sedã médio híbrido com autonomia de 20 milhas (32 km) deve ter a capacidade de aproximadamente 6 kWh, o que aumenta o preço do automóvel em \$ 8.000,00 (WIRASINGHA et. al., 2008).

Veículos elétricos e híbridos recarregáveis também podem ser projetados para enviar energia de volta para a rede de distribuição. Esta tecnologia é chamada de *vehicle-to-grid* (V2G). Para tanto, o conversor envolvido deve ser bidirecional, ou seja, capaz tanto de absorver energia para recarga das baterias como de fornecer eletricidade quando solicitado (KRAMER et. al., 2008).

Esta comunicação bilateral inteligente entre a rede de distribuição e o veículo permite à concessionária gerenciar mais efetivamente os recursos, e possibilita também ganhos econômicos para os proprietários por meio de contratos de serviços *ancilares* para venda de energia (SOVACOOOL et. al., 2009).

Estudos desenvolvidos em (TOMIC et. al., 2007) mostram que estes ganhos podem atingir anualmente entre \$ 3.777,00 e \$ 4.000,00 por veículo. Outros resultados mais conservadores apontam ganhos menores, entre \$ 180,00 e \$3.000,00 por ano (LETENDRE et. al., 2006).

Os entusiastas do conceito V2G argumentam que este traz benefícios tanto para o setor de transportes como para o de energia elétrica. Citam como exemplos: a redução da dependência dos derivados de petróleo; melhorias ambientais com a diminuição das emissões de gases de efeito estufa; uniformização da demanda por eletricidade; adição de capacidade à rede elétrica nos períodos de ponta sem a necessidade de construção de novas plantas de geração (SOVACOOOL et. al., 2009).

Um ponto importante a ser considerado com a expansão do mercado de veículos elétricos e híbridos recarregáveis é a recarga dos mesmos. Estes se configuram como uma carga nova nas redes de distribuição primária e secundária, que possuem muitos circuitos operando com capacidade máxima e sem nenhum tipo de monitoramento ou automatização.

Condições de operação desbalanceadas resultarão em degradação da qualidade de energia, aumento de harmônicos, problemas de tensão e aumento de perdas nos alimentadores mais longos, sobrecarga de transformadores e possibilidade de danos à rede e equipamentos dos consumidores (IPAKCHI et. al., 2009).

Como fator significativo de crescimento de carga, EVs e PHEVs podem agravar a variabilidade da demanda e problemas relacionados à confiabilidade dependendo dos esquemas de carregamento e os padrões de comportamento dos consumidores. Longos períodos de recarga levam a uma indisponibilidade inaceitável do veículo e períodos curtos podem causar congestionamento ao nível de distribuição (MOSLEHI et. al., 2010).

Diante destas implicações, a recarga das baterias dos veículos elétricos e híbridos vem sendo estudada e soluções estão sendo apresentadas para que os efeitos nas redes de distribuição sejam minimizados. A idéia fundamental das propostas sempre parte de um esquema organizado de recarga, que obedece a horários pré-estabelecidos.

Na seção seguinte é apresentada uma revisão bibliográfica com os trabalhos mais relevantes e atuais que se dedicam a investigar o problema da recarga de veículos elétricos e híbridos recarregáveis em sistemas de distribuição de energia, e, além disso, também propõem soluções diversificadas para este mesmo problema.

1.1 Revisão Literária

Conforme visto anteriormente, diversas soluções para recarga das baterias de veículos elétricos e híbridos recarregáveis vêm sendo apresentadas com o objetivo de diminuir as consequências para o sistema de distribuição. Estes esquemas sempre partem do princípio de um carregamento organizado, que deve acontecer nos horários de menor demanda.

Em (CLEMENT-NYNS et. al., 2009a) os autores investigam os efeitos da recarga coordenada sobre as perdas do sistema e desvios de tensão, utilizando para tal as ferramentas de programação quadrática e dinâmica. Aplica ainda dois tipos de abordagens, determinística e estocástica, com o objetivo de determinar a curva de carga das unidades consumidoras.

Assume-se que a recarga ocorre na residência no período noturno (21h - 06h), sem nenhum reforço da instalação doméstica, com uma potência máxima de 4 kW. A capacidade do sistema de baterias do veículo é de 11 kWh. Não existe injeção de potência do carro para a rede. Utiliza-se como sistema-teste o alimentador de 34 nós do IEEE.

Considera-se ainda, que o único grau de liberdade do proprietário seria adiar o momento de conexão do veículo, sendo que depois desse instante as baterias são totalmente carregadas. A função objetivo deste problema é a minimização das perdas durante a recarga.

As análises realizadas utilizando as ferramentas mostram que as perdas para o carregamento coordenado são menores que para o caso desordenado, principalmente devido ao perfil de recarga do segundo caso que é constante durante todo o tempo.

Ainda em (CLEMENT-NYNS et. al., 2009a) é implementado um controle de tensão na rede de distribuição. Para tanto, assume-se que os veículos possuam um controlador de tensão e funcionem em modo V2G, fornecendo energia para a rede. Tem-se agora um problema de otimização cuja função objetivo é o custo, e as restrições são os limites de tensão nos nós do alimentador.

Os resultados apresentados foram semelhantes ao caso anterior, ou seja, no caso da recarga coordenada as tensões nodais da rede de distribuição ficaram dentro dos limites aceitáveis.

Em (CLEMENT-NYNS et. al., 2009b), os autores estendem a discussão anterior e admitem diferentes horários de recarga (21h - 06h; 00h - 06h; 10h - 16h; 18h - 21h); além de diferentes penetrações de veículos elétricos e híbridos recarregáveis no sistema (0%, 10%,

20%, 30%) e perfis de carga em diferentes estações do ano (verão e inverno). As demais condições são semelhantes ao caso apresentado anteriormente.

Observando os resultados apresentados, percebe-se que as perdas no sistema e a queda de tensão nos nós são maiores para o caso em que a penetração é de 30%, a recarga acontece durante o horário de ponta, 18h-21h, e durante o inverno. Obviamente, os resultados obtidos para o caso de recarga desordenada são piores que para o caso coordenado.

Os autores, em (CLEMENT-NYNS et. al., 2010), exploram os resultados anteriormente vistos discutindo as consequências do aumento da demanda para a rede de distribuição no que diz respeito à qualidade de energia e perdas. Mostra-se a necessidade de reforço do sistema, substituindo transformadores devido à sobrecarga e condutores devido ao aumento da corrente. Para diminuir o problema da queda de tensão sugere o uso de banco de capacitores e de transformadores de tape variável, que mesmo sendo incomuns em redes de baixa tensão, são considerados necessários para implantação do conceito V2G.

Em (CLEMENT-NYNS et. al., 2011), os autores estendem a discussão dos trabalhos anteriores incluindo o conceito V2G, ou seja, agora os veículos são capazes de fornecer energia para a rede de distribuição. Um esquema de controle de tensão a partir dos veículos é implementado, representando um embrião da ideia de suporte de tensão. O período de carga/recarga é estendido das 19h00 até 6h00 do dia seguinte, adotando-se duas tarifas para as transações de compra e venda. Uma tarifa noturna das 22h00 até 07h00 e a diurna durante o resto do tempo. Adotou-se ainda uma penetração de 0% a 75% de veículos no sistema.

A função objetivo são os custos de recarga, que devem ser minimizados considerando as restrições nas tensões nodais e a potência no intervalo entre -4 kW e 4 kW. Os resultados obtidos ratificaram as experiências anteriores mostrando que a recarga coordenada das baterias dos veículos causa menores quedas de tensão na rede de distribuição.

Estendeu-se ainda a pesquisa considerando a inclusão de geração distribuída baseada em fontes renováveis. Foram incluídas unidades de CHP (*combined heat-power*) de 1200 W, arranjos fotovoltaicos de 3000 W_p e turbinas eólicas de 1500 W. As quantidades de cada fonte de geração variavam de acordo com a penetração dos PHEV. Os resultados também mostraram que a recarga coordenada traz menores consequências para as tensões nodais do sistema.

Acha *et al.* (2010) propõem um método para diminuir as perdas elétricas devido à recarga de veículos. Tal método modela um sistema de armazenamento de energia a partir do uso do fluxo ótimo de potência de tempo coordenado (TCOPF) no qual as baterias são

despachadas a cada intervalo de tempo com o objetivo de minimizar a operação dos transformadores de tapés variáveis (OLTC) e as perdas elétricas.

O TCOPF calcula a quantidade de energia para carregar/descarregar os PHEV no sistema de acordo com o perfil de potência determinado pelo operador da rede de distribuição. As baterias da frota de veículos são modeladas como se existisse um único dispositivo concentrado, com a capacidade igual ao somatório de todos os dispositivos individuais. A simulação fornece resultados sobre perdas, desempenho da rede, demandas de base e de pico.

Os estudos de caso foram feitos sob as seguintes condições: penetração variável de CHP e PHEV na rede (0%, 10%, 30%); período diário de interação rede-veículo limitado (8h, 12h) ou ilimitado (24h); período diário de interação veículo-rede limitado (12h, 16h) ou ilimitado (24h) e que durante este período 80% da capacidade da bateria é mantido para fins de transporte e 20% pode ser comercializado com a rede de distribuição.

Os resultados apresentados mostram que o uso integrado de PHEV e CHP reduz o pico de demanda, deslocando a mesma para horas de menor carga. Estas operações, além do emprego do OLTC, resultam em melhoria do fator de carga da rede e redução das perdas. Como era esperado, à medida que a penetração daqueles dispositivos aumenta, os resultados obtidos são melhores. Isto confirma que o V2G também auxilia na redução das perdas quanto mais os veículos estiverem afastados do ponto de conexão da rede.

Em (MAITRA et. al., 2009) são exploradas as consequências da penetração de veículos elétricos no sistema de distribuição da concessionária *Hydro-Quebec*, considerando que o mesmo possui uma característica de maiores carregamentos durante o inverno, chegando quase ao limite de geração disponível.

Os resultados obtidos mostram que os transformadores e os circuitos primários são os equipamentos mais afetados pela recarga dos veículos, tendo efeitos principalmente sobre a vida útil daqueles. Realizando vários testes, percebeu-se ainda que, os impactos nos carregamentos dos transformadores eram maiores devido ao nível de tensão da rede e pelos perfis de recarga das baterias do que pela duração e horário da recarga.

Em (PAPADOPOULOS et. al., 2010) os impactos da recarga de veículos elétricos em redes de distribuição são investigados utilizando uma abordagem probabilística. Assume-se que a recarga é realizada entre 23h00 e 06h00, e utiliza-se uma distribuição uniforme para calcular o estado de carga (SOC) das baterias antes do carregamento.

Os resultados indicam violação nos limites de carregamento dos transformadores, principalmente no inverno, além de violação do limite térmico dos condutores por um

intervalo maior que quatro horas. Para o verão, este cenário só acontece considerando uma alta penetração de veículos. Os autores concluem ainda, de acordo com os resultados, que quanto maior o número de veículos, maiores são as perdas elétricas.

S. Lin et al. (2010) investigam os efeitos da recarga de veículos elétricos no sistema de distribuição durante faltas. Considerando falhas monofásicas e bifásicas, percebe-se que a presença de PHEVs aumenta a corrente de falta nos alimentadores da rede.

Em (TAYLOR et. al., 2010) é aplicada uma abordagem probabilística para determinar os efeitos da recarga de veículos elétricos em redes de distribuição. Os testes mostram que a recarga coordenada é capaz de reduzir os impactos, porém deve-se tomar cuidado para não criar um pico de demanda secundário caso muitos automóveis se conectem a rede simultaneamente.

Devido aos diferentes padrões de cada condutor e aos diferentes horários de conexão, pode-se verificar um acréscimo de cerca de 0,7 kW/veículo, não necessitando de capacidade extra de geração. Conclui-se ainda, que os maiores impactos acontecem sobre os transformadores e condutores da rede primária, os quais são mais susceptíveis à sobrecarga e violação dos limites térmicos.

Em (BABAEI et. al., 2010) são analisados cenários utilizando uma rede de distribuição real da cidade de Gotemburgo, Suécia. Assume-se que os veículos sejam recarregados no trabalho ou em casa, durante o período de ponta de cada sistema. No sistema comercial este horário acontece às 12h00, enquanto que no residencial ocorre às 19h00. São também consideradas duas redes, uma de alta tensão operando em 10 kV e outra de baixa tensão operando em 0,4 kV.

Os resultados obtidos mostram que nas duas áreas aconteceram sobrecargas nos transformadores e linhas, enquanto somente na área residencial aconteceram violações de tensão. Os estudos ainda foram repetidos posteriormente para se investigar a quantidade máxima de veículos que podem ser recarregados simultaneamente levando em conta o critério N-1. Os resultados mostram que este número depende da dispersão geográfica das cargas na rede de distribuição.

Em (GALUS et. al., 2010) a recarga dos veículos elétricos é investigada do ponto de vista do planejamento e operação da rede de distribuição. Neste trabalho é proposta uma estrutura composta por estados nos quais os automóveis podem se encontrar dependendo do estado de carga (SOC) das baterias e do modo de operação, a saber: V2G; recarga controlada; ou recarga não-controlada.

Uma característica interessante desta estrutura é sua natureza estocástica, visto que o estado do automóvel dependerá exclusivamente do proprietário do veículo e de suas necessidades. Ou seja, o automóvel pode alternar entre quaisquer dos modos de operação de acordo com o SOC e a necessidade do motorista.

Resultados obtidos aplicando a estrutura proposta durante a fase de planejamento do sistema mostraram a possibilidade de incorporar as transições entre estados dos PHEVs no curto prazo, minimizando os erros e evitando multas, além de disponibilizar dispositivos de armazenamento de energia distribuídos no sistema.

Em (SHAO et. al., 2009) são investigadas as consequências da penetração de PHEVs em transformadores de distribuição, tomando como exemplo um equipamento de 25 kVA alimentando cinco unidades residenciais. Assume-se, segundo dados de pesquisas disponíveis, uma penetração de 9% de veículos elétricos, o que seria equivalente a pelo menos uma unidade a cada cinco residências. Para as simulações são consideradas duas unidades.

São considerados dois casos para investigação: recarga normal e recarga rápida, sendo que cada um possui o cenário de recarga em horário de pico e fora de horário de pico. Para o caso de recarga normal e realizada no horário de ponta do sistema os veículos iniciam a recarga às 18h00, com um nível mínimo de 30% de SOC, demorando 6 horas para atingir 80% de carga.

O segundo cenário compreende a carga em horário fora de ponta, sob as mesmas condições anteriores de estado de carga das baterias. A mesma simulação acontece para o caso de recarga rápida, demorando cerca de 1,8 hora para atingir o estado de carga desejado.

Os resultados confirmam um pico de demanda no sistema de distribuição em todos os casos. No caso de recarga normal em horário fora de ponta observou-se que o aumento do carregamento do transformador causou uma melhora na eficiência do mesmo. Para os demais casos, houve perdas na eficiência do equipamento e aumento das perdas na rede de distribuição, com aumentos nos picos de carga variando entre 52% e 103%, de acordo com o caso.

Como solução é proposta a possibilidade de gerenciamento da demanda, com o deslocamento da mesma para horário fora de ponta. Por meio de *softwares*, disjuntores remotos e medição avançada seria possível controlar a potência do circuito, permitindo que a recarga fosse realizada sem sobrecarga no transformador.

Para o caso de recarga rápida, é proposto um acordo entre concessionária e consumidor que permita o gerenciamento de cargas não-essenciais, as quais podem ser desligadas para permitir a recarga do veículo sem prejuízo para o sistema.

Em (DE NIGRIS et. al., 2010) assume-se que: o sistema de armazenamento dos veículos tenha capacidade de 15 kWh; a recarga acontece a partir das 20h00 e dura 6 horas, com potência constante; depois de conectado, o automóvel só pode ser desconectado quando completamente recarregado; penetrações de 5 %, 10 %, 15 % e 20 %. Nenhum tipo de controle de recarga é utilizado. Os resultados apontam sobrecarga de linhas e transformadores, aumento dos picos da demanda e violações de tensão nos nós mais distantes do alimentador.

Em (SORTOMME et. al., 2011) as relações entre perdas, fator de carga e variância da demanda são investigadas no contexto da recarga coordenada de veículos elétricos em redes de distribuição. Assume-se ainda que não haja interação V2G com a rede.

Observou-se que minimizar as perdas equivale a maximizar o fator de carga e minimizar a variância da demanda. Partindo dessas premissas as funções objetivo são formuladas a fim de minimizar as perdas e melhorar a regulação de tensão. Estas formulações são convexas e tem como vantagens: maior rapidez e robustez, podendo ser empregadas em pacotes comerciais; possibilidade de serem integradas como restrições em outros problemas de otimização; são independentes da topologia da rede de distribuição.

Para aplicação do método proposto foram utilizados dois sistemas com 36 e 102 unidades residenciais, respectivamente. Assume-se ainda que a recarga ocorra de 18:00 h até as 06:00 h do dia seguinte. Cada veículo tem capacidade de armazenamento de 10 kWh considerando níveis de penetrações de 10%, 20%, 50% e 100%.

Os resultados obtidos mostram que os resultados obtidos por meio dos três métodos têm diferenças desprezíveis. No entanto, minimizar as perdas exige mais tempo computacional que os outros casos de otimização.

Em (EVANS et.al., 2009) são investigadas as consequências da presença de veículos elétricos recarregáveis e de dispositivos de armazenamento de energia em sistemas de potência. Para tanto, utiliza-se um sistema real composto por transmissão, sub-transmissão e distribuição. Os objetivos foram determinar o nível de penetração de PHEVs que causa problemas na rede e descrevê-los.

Assume-se que os automóveis tenham capacidade de 65 kWh, e sejam capazes de despachar uma potência de 25 kW por uma hora e recarreguem com potência de 16 kW. Com

o objetivo de minimizar simultaneamente as perdas de potência ativa e reativa e o desvio de tensão obteve-se que, com uma penetração de 20% de veículos no sistema já se atinge resultados negativos como o colapso do mesmo e desvios de tensão acima de 0,5 pu.

Um segundo cenário foi investigado, no qual se buscou elucidar as consequências da adição de pequenas unidades de armazenamento de forma segura no sistema estudado. Este permite adições de unidades de até 70 kW sem a violação dos limites de tensão. Um resultado importante é que o impacto na tensão da inclusão destas unidades é localizado, assim não existe uma capacidade máxima, mas cada região possui uma tolerância diferente para adição de cargas, sendo que os benefícios também são localizados.

Obeve-se um número de 5.564 unidades em 2.514 locais diferentes. Isto resulta em uma adição de 877 MW de capacidade em horário de ponta e 1.097 MW de carga fora de ponta. As principais consequências disto são o aumento das perdas de potência ativa e reativa durante o horário fora de ponta. E por outro lado, a diminuição dos mesmos durante o horário de ponta, além de um perfil de tensão melhor durante este horário.

Para se obter o máximo de benefícios, faz-se necessário um controle ativo por parte do operador do sistema de distribuição, pois se observou que os efeitos destes dispositivos no que se refere à diminuição das perdas, aumento da capacidade e melhoria nos perfis de tensão, são localizados.

Em (FARMER et. al., 2010) são resumidas algumas consequências da penetração de veículos elétricos em redes de distribuição. Dentre estas: sobrecarga nos transformadores de média tensão em subestações e de distribuição; diminuição da vida útil dos transformadores, sobretudo devido às frequentes sobrecargas; violações térmicas que atingem a isolação do equipamento; formação de gases no óleo isolante; aumento das distorções harmônicas.

A principal contribuição deste artigo é a apresentação de um modelo que estima os impactos de veículos elétricos em redes de distribuição em relação aos condutores e transformadores de média e baixa tensão. Aplicado a um sistema real, os resultados demonstram sobrecargas em transformadores e condutores, contribuindo para a deterioração destes.

Deilami et. al. (2011) propõem uma nova solução de gerenciamento de recarga de veículos elétricos em sistemas elétricos inteligentes. Assim como em outras referências, a recarga não controlada é desestimulada por levar ao aumento nas perdas elétricas, sobrecargas

e flutuações de tensão, ocorrências estas que degradam diretamente a confiabilidade e a segurança da rede.

Assim, uma nova estratégia de gerenciamento de carga em tempo real é proposta e desenvolvida para a coordenação da recarga de PHEVs, baseada na minimização dos custos totais, incluindo as parcelas de custo de energia gerada e custo de energia perdida por efeito Joule. Esta abordagem reduz os custos de geração incorporando preços variáveis de energia de acordo com o nível de prioridade selecionado pelos proprietários.

O algoritmo proposto considera a conexão aleatória de veículos e utiliza a seleção de máxima sensibilidade como ferramenta de otimização, a qual possui uma velocidade de convergência apropriada para aplicações em tempo real.

Esta estratégia permite aos veículos iniciarem a recarga de acordo com um nível de prioridade, sendo que cada nível possui uma tarifa diferente. Os resultados obtidos mostram o sucesso da proposição, atingindo bons resultados em relação à minimização dos custos totais e manutenção dos limites de tensão do sistema e de potência nas máquinas.

Em (KRISTOFFERSEN et. al., 2011) o problema da recarga de veículos elétricos em sistemas de distribuição recebe uma abordagem diferente das demais referências. Mesmo utilizando as mesmas ferramentas matemáticas, os modelos de otimização se baseiam em uma abordagem baseada em transações de compra e venda de energia dentro de mercados elétricos em vez de uma abordagem baseada em restrições que visem ao bem-estar dos consumidores.

A partir da perspectiva de um agregador que gerencia a participação da frota de veículos em mercados elétricos, procurando otimizar a carga e a descarga dos mesmos, dado os padrões de utilização dos automóveis e as variações nas tarifas de eletricidade no mercado *spot*, busca-se minimizar os custos de carga e descarga, sujeito às restrições técnicas e contratuais.

Existem dois cenários possíveis dentro da simulação. Em um deles, quando não existe um número suficiente de veículos de forma que o agregador não influencie no preço devido à disponibilidade de energia para a venda, então este é um comprador de energia no mercado *spot*, devendo pagar pela tarifa atual vigente no mercado.

Para este caso, a recarga é planejada para o período noturno devido aos menores custos e a programação linear é utilizada como ferramenta de otimização, já que a função objetivo e as restrições são lineares.

O outro caso possível ocorre quando uma quantidade considerável de veículos está estacionada e sob o controle do agregador. Neste cenário, a quantidade de energia elétrica

disponível é suficiente para influenciar nos preços do mercado, e assim realizar as transações de compra e venda de energia a preços mais baratos.

Neste caso, também existe a possibilidade de planejamento de recarga durante o dia, devido aos preços mais acessíveis, e também para reduzir os preços da energia no período noturno, além de diminuir o tempo de recarga.

Para este caso a programação quadrática é aplicada como ferramenta de otimização já que a função objetivo é quadrática. A relação entre demanda e tarifas de eletricidade é calculada a partir de regressão linear utilizando dados disponíveis do mercado de energia elétrica do norte da Europa.

Os resultados mostram que tarifas baixas incentivam a recarga noturna, embora ocorram casos de recarga diurna mesmo com custos maiores. A venda de energia, quando possível, é encorajada devido à diferença entre as tarifas diurnas e noturnas. Entretanto, se o agregador tem influência sobre as tarifas do mercado, os veículos possuem um efeito estabilizador nos preços e os incentivos são reduzidos. Assim, pode-se concluir que os PHEVs proporcionam flexibilidade maior quase que exclusivamente durante o período de carregamento.

1.2 Motivação e Objetivo

Conforme visto na seção anterior, muitos pesquisadores têm investigado o problema da recarga de veículos elétricos em sistemas de distribuição de energia devido ao fato de este ser um problema atual, e que a curto e médio-prazo tende a se agravar devido ao aumento da quantidade de PHEVs presentes no sistema elétrico.

Além da quantidade de veículos, outro fator que tende a agravar a situação é a ausência de métodos eficientes para implementação da proposta de recarga controlada destes, levando às ocorrências descritas anteriormente por diversos pesquisadores.

Para tal, controladores eficientes embarcados nos veículos, a comunicação entre operador do sistema de distribuição e PHEVs, além de sistemas de medição avançada, esquemas de gerenciamento de demanda e resposta à demanda são necessários para garantir o sucesso e utilização em larga escala de automóveis híbridos e elétricos.

Tendo estes aspectos em vista, este trabalho propõe uma política de recarga de veículos em sistemas de distribuição de energia considerando restrições que evitem a sobrecarga no sistema e violações nos níveis de tensão.

Além disto, considera-se ainda a aplicação de um processo de otimização utilizando como ferramenta os sistemas imunológicos artificiais, com o objetivo de minimizar as perdas no sistema e melhorar as condições operativas do mesmo, instalando capacitores para garantir níveis de tensão apropriados durante todas as horas em que a recarga é permitida.

Assim, este trabalho visa contribuir no estudo deste tema e apresentar uma solução inovadora para a recarga de veículos aplicando uma técnica de otimização relativamente nova e inexplorada para este tipo de aplicações.

1.3 Organização da Dissertação

O trabalho está organizado da seguinte maneira. No capítulo 1, uma introdução ao tema é apresentada, seguido da revisão bibliográfica sobre o a recarga de veículos elétricos em sistemas de distribuição.

O capítulo 2 discute sobre os veículos híbridos elétricos recarregáveis com informações sobre as principais tecnologias envolvidas no desenvolvimento destes automóveis.

Discute principalmente os dispositivos de interesse da área da engenharia elétrica, como por exemplo, os sistemas de armazenamento de energia e as principais tecnologias existentes; os motores elétricos utilizados em aplicações veiculares e as novas pesquisas neste campo que buscam propor novos dispositivos e adequar os já existentes; e os conversores de frequência, mostrando o que já existe e os novos desafios encontrados para o desenvolvimento de conversores para uso em automóveis elétricos.

O capítulo 3 apresenta uma visão sobre o problema de fluxo de potência em sistemas de distribuição, discutindo as diferenças principais entre estes e os sistemas de transmissão, diferenças estas que impossibilitam a aplicação das mesmas técnicas de resolução. Assim, são apresentadas algumas técnicas de resolução encontradas na literatura e, finalmente, é apresentado o algoritmo aplicado durante o desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 4 discute sobre os sistemas imunológicos artificiais e sua aplicação em problemas de otimização. São apresentados uma visão geral sobre os sistemas imunológicos biológicos, que inspiraram a criação desta técnica, e discutidas as principais metáforas aplicadas neste sistema. Por fim são apresentados alguns trabalhos onde esta técnica de otimização já foi empregada.

O capítulo 5 apresenta a proposta central deste trabalho. Nele são discutidos os esquemas e algoritmos empregados no desenvolvimento da proposta, apresentando ao leitor as ferramentas aplicadas no desenvolvimento do mesmo. São apresentados também os resultados obtidos com a implementação dos esquemas propostos.

Finalmente o capítulo 6 apresenta as conclusões finais do trabalho, discussão sobre os resultados e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS RECARREGÁVEIS

Segundo a definição do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), um veículo híbrido elétrico recarregável é todo aquele que possui a capacidade de percorrer 16,1 km de distância em modo totalmente elétrico; possui um sistema de armazenamento de energia com capacidade mínima de 4 kWh; e possui meios para efetuar a recarga das baterias a partir de uma fonte de eletricidade externa (IEEE-EUA, 2005).

A alternativa da propulsão elétrica, juntamente com os biocombustíveis, deve diminuir a dependência dos combustíveis fósseis no setor de transportes (KRAMER et. al., 2008), além de influenciar diretamente nas emissões de gases poluentes para a atmosfera.

Os veículos elétricos possuem um conjunto de baterias conectado a um motor elétrico que fornece tração através de um eixo de transmissão. As baterias são recarregadas a partir de uma fonte externa. Uma tecnologia bastante empregada nestes modelos é a frenagem regenerativa, que consiste em o motor funcionar como gerador fornecendo energia para as baterias, freando o veículo (KRAMER et. al., 2008).

Já os veículos híbridos são modelos que possuem um conjunto de baterias maior, resultando em mais capacidade de armazenamento de energia, um motor elétrico e um motor de combustão funcionando em conjunto dentro de uma arquitetura definida pelo fabricante. Possuem uma eficiência maior que os modelos convencionais, devido ao conjunto motor de combustão-motor elétrico, economizando combustível e fornecendo maior torque em baixas velocidades, têm menores emissões de gases de efeito estufa e de ruídos (WIRASINGHA et. al., 2008). No entanto, estes veículos ainda têm baterias com baixa capacidade de armazenamento de energia, tornando-os mais voltados para uso em áreas urbanas.

Existem ainda outros elementos como o conversor de frequência e o controlador do motor elétrico. A tração pode ser fornecida pelos dois motores em conjunto através de um eixo de transmissão único, ou então apenas pelo motor elétrico, restando ao motor de combustão apenas a função de recarregar o sistema de baterias. Este também pode ser

recarregado por meio de uma conexão externa com a rede elétrica no caso dos modelos recarregáveis (KRAMER et. al., 2008).

Veículos elétricos e híbridos recarregáveis ainda têm a possibilidade de interagir com o sistema elétrico, despachando eletricidade para a rede, em um esquema conhecido como *vehicle-to-grid* (V2G). Dessa forma, passam a ser considerados elementos ativos e não mais simplesmente cargas passivas. Isto traz enormes possibilidades dentro das redes de distribuição, como por exemplo, a participação destes veículos em mercados de serviços *ancilares* (TOMIC et. al., 2007)

Nas seções a seguir são discutidos os principais componentes dos veículos híbridos, mostrando principalmente as tecnologias atualmente empregadas em sistemas de armazenamento de energia, motores elétricos e conversores de frequência. Além disso, o esquema V2G é discutido com maiores detalhes.

2.1 Componentes

Os veículos elétricos e híbridos recarregáveis são formados por diversos componentes mecânicos e elétricos que desempenham diversas funções no sistema. Dentre estes, esta seção discute principalmente as tecnologias envolvidas na propulsão, os sistemas de armazenamento de energia e conversores de frequência dos veículos.

2.1.1 Sistema de armazenamento de energia

Os sistemas de armazenamento de energia de veículos elétricos e híbridos recarregáveis devem ter algumas características que os tornem apropriados para este fim, dentre estas, citam-se: robustez e confiabilidade para suportar o regime diferenciado de operação ao qual serão submetidas, com constantes cargas e descargas; altas correntes de operação; uma expectativa de vida útil de aproximadamente 240.000 km ou de 10 anos; bom desempenho em estado de carga parcial; um gerenciamento de carga eficiente; características

térmicas, peso e volume apropriados para uso em automóveis (NELSON, 2000; KARDEN et. al., 2007).

Em um veículo híbrido, o sistema de baterias é operado próximo a um estado de carga de 50 %, de forma que uma corrente de carga ou de descarga mais acentuada não cause sobrecarga ou descarga profunda. Devido a tais surtos de corrente, um intervalo mais realístico de operação abrange 50% da capacidade nominal do sistema de armazenamento. Devido a esta característica, o conjunto de baterias deve ser dimensionado baseado em uma capacidade nominal duas vezes maior do que a capacidade útil, resultando em maior peso, custo e espaço necessário no interior do automóvel (NELSON, 2000).

Outra característica importante é que o nível de carga de operação deve ser escolhido baseado nas características de corrente de carga e corrente de descarga de cada tipo de bateria empregado. Se a segunda é maior que a primeira, o nível de carga escolhido deve ser um pouco abaixo de 50%, caso contrário, deve ser escolhido um SOC acima de 50% (NELSON, 2000).

Dentre as tecnologias de sistemas de armazenamento de energia, as baterias de chumbo-ácido apresentam muitas vantagens para a aplicação em veículos híbridos. Sua estrutura contém placas de chumbo metálico, mais eletropositivo, e óxido de chumbo, mais eletronegativo. O meio utilizado para transferência de elétrons é uma solução de ácido sulfúrico, pela sua boa estabilidade térmica, alta condutividade iônica, baixo nível de impurezas e baixo custo.

Este tipo de bateria é produzido em larga escala, diminuindo os preços comparativamente aos outros tipos, além de ser uma tecnologia madura. Entretanto, elas não permitem aplicações onde a profundidade máxima de descarga ultrapasse 80% da capacidade nominal e têm seu ciclo de vida diminuído quando submetidas a descargas profundas continuamente (KHALIGH et. al., 2010).

Convém lembrar que todo o material que compõe estas baterias são recicláveis, e os metais pesados são muito prejudiciais ao meio ambiente, não devendo ser descartados junto ao lixo comum e nem incinerados. O plástico da carcaça é reaproveitado, e os metais e o ácido sulfúrico são neutralizados e reaproveitados para manufatura de novas baterias.

Das principais tecnologias de baterias, os modelos de níquel-hidreto metálico (NiMH) e o de lítio são mais adaptados para aplicações veiculares. Os modelos de lítio devem superar aos outros modelos devido aos menores custos de produção, maturidade tecnológica,

maior energia específica e potência específica e recarga rápida (KARDEN et. al., 2007; WIRASINGHA et. al., 2008).

As baterias de NiMH utilizam uma solução alcalina como eletrólito, e eletrodos positivos de hidróxido de níquel e eletrodos negativos de uma liga composta de vanádio, titânio, níquel e outros metais. A densidade de energia é duas vezes maior que das baterias de chumbo-ácido, e seus componentes não são prejudiciais ao meio-ambiente, além de também serem recicláveis.

Este tipo de bateria opera em altas tensões com segurança e possui vantagens como maior capacidade de armazenamento de energia por volume, ciclo de vida longo, grande espectro de temperaturas de operação, e resistência a sobrecarga ou descarga acima do máximo permitido. Por outro lado, se submetida a altas correntes, a vida útil se reduz cerca de 200 a 300 ciclos. O melhor desempenho de operação é alcançado quando descarregada entre 20% e 50% de sua capacidade nominal. Além disso, a capacidade útil total da bateria se reduz a um valor menor que 100% com o decorrer do tempo (KHALIGH et. al., 2010).

As baterias de lítio possuem alta densidade de energia, bom desempenho em altas temperaturas e são recicláveis. O eletrodo positivo é feito de cobalto oxidado, enquanto que o eletrodo negativo é fabricado com carbono e os sais de lítio formam o eletrólito. Os aspectos promissores deste tipo incluem: a alta potência específica de 300 W/kg; alta energia específica de 100 Wh/kg; vida útil de aproximadamente 1000 ciclos; baixa memória; matéria-prima com preços mais competitivos (KHALIGH et. al., 2010).

As baterias de níquel-zinco possuem altas densidades de energia e de potência, são fabricadas com materiais baratos, possuem ciclos de descarga profunda e seus componentes são recicláveis e de baixo impacto ambiental. Operam em uma faixa de temperaturas de -10 °C a 50°C. Entretanto, possuem baixa vida útil devido à rapidez da deposição dos metais, inviabilizando aplicações veiculares (KHALIGH et.al., 2010).

Por sua vez, as baterias de níquel-cádmio possuem uma vida útil bem longa e podem ser completamente descarregadas sem causar avarias. A energia específica deste tipo de baterias é de 55 Wh/kg. É construída de materiais recicláveis, no entanto, o cádmio é um metal pesado altamente prejudicial ao meio ambiente se descartado de forma incorreta. A principal desvantagem deste modelo é o alto custo (KHALIGH et.al., 2010).

Os supercapacitores armazenam energia em duas placas paralelas com cargas de sinais diferentes, divididas por um isolante. Como não existem variações químicas nos eletrodos, os capacitores possuem uma vida útil longa, porém, têm uma baixa densidade de

energia. A densidade de potência destes é consideravelmente superior a das baterias devido ao fato de que as cargas são fisicamente armazenadas em eletrodos.

A baixa resistência interna dá aos capacitores alta eficiência, mas pode resultar em corrente de descarga muito alta se o mesmo for submetido a um baixo estado de carga. Outra característica importante é que a tensão terminal é diretamente proporcional ao estado de carga (KHALIGH et. al., 2010).

Assim, devido às suas características complementares, capacitores e baterias podem ser utilizados em conjunto dentro de sistemas de armazenamento de energia, resultando em maior eficiência do conjunto. A rápida resposta dos primeiros torna-os apropriados para armazenar a energia proveniente da frenagem regenerativa, entregando potência prontamente no trânsito mais carregado das cidades (NELSON, 2000; AMJADI et. al., 2010; KHALIGH et. al., 2010).

A célula-combustível é outra alternativa limpa de energia que gera eletricidade a partir da reação de um combustível e um oxidante em um eletrólito. A eletricidade é gerada enquanto o fluxo dos reagentes for mantido. Suas vantagens são a alta eficiência de conversão de combustível em energia elétrica, baixo ruído, emissões muito baixas, recuperação de calor, flexibilidade de combustível, durabilidade e confiabilidade. Entretanto, a alta constante de tempo das mesmas limita seu desempenho em aplicações veiculares, além do preço maior que as tecnologias concorrentes (KHALIGH et. al., 2010).

Diferentes combinações de combustíveis e oxidantes são possíveis. O hidrogênio é preferencialmente utilizado por ser um combustível não poluente e produzir apenas água como resultado da reação. Os protótipos que utilizam células-combustível para gerar energia geralmente utilizam um tanque pressurizado de hidrogênio, o qual é injetado juntamente com ar comprimido em uma célula, na qual ocorre a produção de corrente contínua proporcionalmente ao fluxo do combustível. No entanto, devido à baixa densidade de energia do hidrogênio comparativamente ao petróleo, são necessários tanques com grande volume (KHALIGH et. al., 2010).

A corrente de saída flui para um conversor CC/CC e deste para um barramento conectado às baterias e ao controlador do motor. A eficiência de uma célula-combustível depende da potência exigida da mesma e diminui quanto maior a potência fornecida. Em testes de campo, obtiveram-se eficiências entre 52 % e 58 % para este processo, e autonomia de até 316 km (KRAMER et. al., 2008, KHALIGH et. al., 2010).

Agora que as principais tecnologias utilizadas em sistemas de armazenamento de energia são conhecidas, pode-se discutir um pouco mais sobre as características de operação de cada uma delas. Cada tecnologia possui requisitos e eficiências de carga e descarga diferentes, resultando em uma operação próxima ao nível de 50 % de SOC.

Por exemplo, tanto baterias de níquel-cádmio quanto de chumbo-ácido possuem maior estabilidade durante a descarga do que durante o carregamento, tornando-as mais apropriadas à operação em um nível de carga abaixo de 50 %. Os modelos de lítio, por outro lado, têm queda de tensão ôhmica grande e curva de descarga acentuada, mas desempenho maior durante a recarga, sendo apropriadas para operar em níveis de SOC acima de 50 % (NELSON, 2000).

O ciclo de trabalho dos sistemas de armazenamento em veículos híbridos pode causar danos àqueles. Constantes descargas rasas de 2% a 3% com picos de corrente em ambas as direções resultam em uma maior quantidade de ciclos quando comparado ao funcionamento convencional em outros sistemas. Neste regime de operação contínua, baterias de chumbo-ácido podem sofrer perdas irreversíveis de capacidade de armazenamento. Os modelos de níquel-cádmio e níquel-hidreto metálico podem ter suas capacidades diminuídas devido ao efeito-memória.

Em baterias de lítio, os efeitos deste ciclo de trabalho são de difícil determinação, já que estes modelos são eficientes na faixa entre 40% e 60% de SOC, sem serem submetidas a sobrecargas ou descargas profundas. Entretanto, em alguns veículos nos quais existe a estratégia de recarga completa do sistema de armazenamento de energia periodicamente, este modelo pode não ter uma vida útil satisfatória (NELSON, 2000)

Outra preocupação é a taxa de auto-descarga das baterias. Modelos de lítio, níquel-hidreto metálico e chumbo-ácido podem sofrer perdas permanentes na capacidade nominal se descarregadas totalmente, particularmente em altas temperaturas.

Em caso de baixas temperaturas, existe a possibilidade de congelamento do eletrólito em modelos de chumbo-ácido. Baterias de lítio não funcionam em baixas temperaturas, enquanto modelos de níquel-cádmio e níquel-hidreto metálico terão desempenhos bem baixos (NELSON, 2000).

Outra opção de sistema de armazenamento de energia é o volante de inércia, em inglês *flywheel*. Este é formado por duas partes: um elemento armazenador de energia e outro elemento de transformação de potência. A energia cinética é armazenada em uma massa girante e depende do momento de inércia e velocidade angular da mesma. O elemento de

transformação entrega a energia na forma apropriada ao sistema mecânico do veículo (GAO et. al., 2003).

O volante de inércia oferece algumas vantagens quando comparado às tecnologias eletroquímicas, como por exemplo: alta potência e energia específicas; vida útil longa; eficiência alta; redução de manutenção e sobrecarga no sistema; e impossibilidade de contaminação por metais pesados. Para aplicações veiculares deve-se maximizar a potência e a capacidade de armazenamento de energia e minimizar peso e volume (GAO et. al., 2003).

Gao (2003) mostra as aplicações deste tipo de sistema de armazenamento e o desempenho do mesmo quando acompanhado de três diferentes tipos de motores elétricos: um motor CC de ímã permanente sem escovas; um motor de indução; e um motor de relutância chaveada. De acordo com os resultados obtidos e as características de cada modelo de máquina, os motores de relutância chaveada apresentaram melhor desempenho devido à sua capacidade de manter a potência constante durante um amplo intervalo de velocidades.

Outras aplicações de volantes de inércia podem ser vistas em (THELEN et.al., 2007) onde é aplicado em conjunto com um motor de indução de alta velocidade para um protótipo de um sistema híbrido de energia de uma locomotiva, e em (WANG et. al., 2009) onde é utilizado em um ônibus elétrico urbano.

Assim, o desenvolvimento das tecnologias aplicadas em sistemas de armazenamento de energia ainda necessita de mais tempo para obtenção de dispositivos capazes de unir características importantes como peso, eficiência, vida útil, autonomia e custo.

Além disso, deve-se considerar o impacto ambiental causado por metais usados na fabricação de alguns modelos, necessitando de procedimentos corretos de descarte e reciclagem para evitar contaminação.

2.1.2 Motores elétricos e motores de combustão

As pesquisas realizadas para adaptação dos motores elétricos em aplicações veiculares buscam melhorar o desempenho das máquinas elétricas, que devem ter um desempenho satisfatório e alta eficiência em um intervalo de rotações entre 12.000 e 15.000 rpm, e do conjunto motor elétrico/motor de combustão. As principais metas são aumentar a

eficiência; robustez; diminuir as dimensões; e minimizar os custos associados à produção (M. RAHMAN et. al., 1997; EMADI et. al., 2008).

A escolha de um tipo de motor elétrico para aplicação em veículos híbridos recarregáveis ou elétricos é determinada principalmente por três fatores principais: peso; eficiência; e custo global.

Existem três tipos principais de motores elétricos com possível aplicação, os quais são: os motores de corrente contínua de ímã permanente; os motores de indução; e os motores de ímã permanente, que abrangem tanto os motores síncronos quanto os motores de corrente contínua sem escovas, que na essência é um motor síncrono polifásico de ímã permanente eletronicamente comutado.

Os motores de indução convencionais e os motores de corrente contínua de ímã permanente geralmente necessitam de caixas de câmbio devido à faixa de velocidade limitada, grande peso e tamanho. Os motores síncronos de ímã permanente e os motores de corrente contínua sem escovas têm bom desempenho em velocidades acima de 12.000 rpm sem a necessidade de caixas de câmbio (M. RAHMAN et. al., 1997).

Assim, as máquinas de indução de gaiola de esquilo e os motores síncronos de ímã permanente devem se consolidar como as melhores opções para aplicações veiculares, já que as máquinas de corrente contínua, embora possuam controle simples, têm consideráveis custos e frequência de manutenção devido aos comutadores e escovas.

Comparando as outras opções de motores de corrente alternada, os modelos assíncronos possuem confiabilidade alta e baixa manutenção, entretanto, a variação da frequência atinge diretamente o torque da máquina, além de que a não-linearidade do modelo dinâmico torna o controle mais complexo. Além disso, motores de indução têm a desvantagem das perdas no cobre serem dependentes do escorregamento, e da dificuldade de resfriamento do motor (M. RAHMAN et. al., 1997).

Motores síncronos possuem diversas vantagens como alta eficiência, alto fator de potência e estabilidade. A operação suave e o rotor simples garantem bom desempenho em aplicações que demandam velocidades altas. Além disso, não há perdas no cobre em velocidade síncrona. Não possuem escovas, nem anéis deslizantes. Por outro lado, não possuem torque de partida, têm baixa tolerância às variações de temperatura, e durante a partida o ímã gera um torque resistente à partida, reduzindo a capacidade de sincronizar a carga (M. RAHMAN et. al., 1997).

Como alternativas a estes tipos de máquinas elétricas, M. Rahman et. al. (1997) propõem a utilização de um motor híbrido, o qual combina características de motores de histerese e motores síncronos de ímã permanente. Este motor possui ímãs permanentes inseridos nas ranhuras da superfície interna do anel de histerese.

Durante a velocidade assíncrona, o torque do motor é formado pelas componentes das correntes parasitas, de histerese, e dos ímãs permanentes, enquanto que na velocidade síncrona apenas estas últimas duas componentes formam o torque total do motor. Assim, o alto torque de partida do motor de histerese compensa a falta do mesmo em motores síncronos, além de ter bom desempenho em aplicações que demandam torque e velocidade constantes e baixo ruído.

Testes realizados com este motor proposto tiveram resultados melhores comparativamente a motores síncronos de ímã permanente e motores de histerese, comprovando a possibilidade de aplicação do modelo de motor híbrido proposto em veículos.

Em (DORELL et. al., 2010) são investigados três tipos de motores elétricos: os motores síncronos de ímã permanente, por ser a tecnologia dominante em termos de aplicações veiculares, os motores de indução e os de relutância variável, vistos como alternativas ao primeiro. Os dois modelos alternativos apresentaram desempenhos próximos ao da máquina síncrona de ímã permanente e tem dimensões e peso menores, uma característica muito importante para aplicações em veículos.

Foram observadas algumas características como as maiores perdas no ferro da máquina de relutância variável em altas velocidades, enquanto que em baixas velocidades predominam as perdas no cobre. Ambos os modelos apresentaram eficiências inferiores comparados ao da máquina síncrona.

Também foram investigados os custos de produção dos três modelos, sendo que o da máquina de relutância variável foi o mais barato, seguido pela máquina de indução, que é mais cara devido à maior quantidade de cobre, e a mais cara é a máquina síncrona de ímã permanente devido aos custos dos materiais magnéticos.

O acoplamento entre os motores elétrico e de combustão pode ser feito por meio de uma conexão em série ou em paralelo. Nos modelos com acoplamento série as rodas são movidas pelo motor elétrico, que recebe energia de um gerador conectado ao motor de combustão ou das baterias.

Este tipo possui um consumo de combustível menor em áreas urbanas, pois o motor de combustão pode operar com sua máxima eficiência durante as frequentes paradas e arrancadas (NELSON, 2000; CLEMENT-NYNS et. al., 2007; EMADI et. al., 2008).

No caso dos modelos com acoplamento paralelo, ambos os motores tracionam o eixo de transmissão que se liga às rodas e cada um tem uma potência diferente de acordo com o modo de funcionamento do sistema. Possuem um custo menor comparado ao outro tipo de acoplamento, entretanto o sistema de controle é mais complexo.

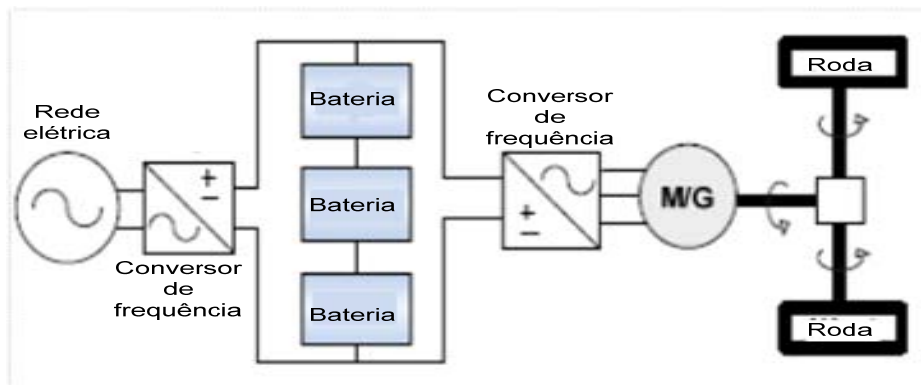
Existem várias configurações de acoplamento paralelo, dependendo do papel dos motores envolvidos. Além disso, possuem um menor consumo quando operam em velocidade constante, como em rodovias (NELSON, 2000; CLEMENT-NYNS et. al., 2007; EMADI et. al., 2008).

Devido aos diversos tamanhos dos sistemas de propulsão e ao espaço disponível, as configurações em paralelo e em série-paralelo são preferidas para veículos de passeio pequenos, enquanto que a configuração série é mais apropriada para veículos maiores (AMJADI et. al., 2010). As duas configurações podem ser vistas na Figura 2.1.

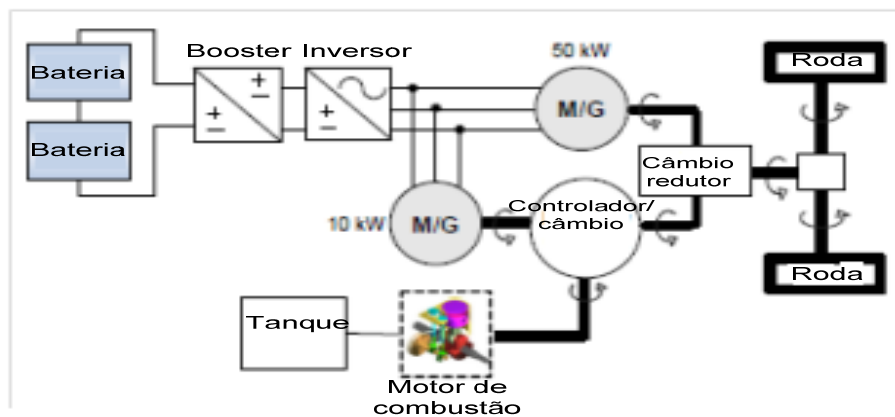
Uma novidade apresentada por muitas montadoras é o sistema ISG, em inglês *Idle Stop&Go*, que permite redução no consumo de combustível através do desligamento do motor de combustão em períodos ociosos e suavização do torque do mesmo. Estas características também têm um alto potencial de redução de emissões de gases e ruído e maior capacidade de geração de potência elétrica pelo gerador.

O sistema ISG possui uma arquitetura paralela na qual o motor elétrico e o de combustão fornecem torque às rodas separadamente ou simultaneamente. A máquina elétrica auxilia o motor de combustão fornecendo torque adicional quando a operação do motor de combustão é menos eficiente e têm uma potência entre 5 kW e 10 kW e pode substituir o sistema convencional de partida do veículo, devendo apenas ter sua corrente aumentada por um fator de 3. Para tal, também se deve atentar para os limites nominais dos componentes eletrônicos do conversor de frequência (EMADI et. al., 2008)

No caso de veículos equipados com células-combustível, o sistema de propulsão é diferente já que não existe motor de combustão. As vantagens são a conversão direta de energia; menos ruído devido ao menor número de elementos girantes; baixa emissão de gases; eficiência mais constante. Outros requisitos importantes são o peso; volume; densidade de potência; resposta rápida; economia e custos do combustível, além de fácil acesso e segurança no armazenamento do mesmo; custos de produção e vida útil (EMADI et. al., 2008).



(a)



(b)

Figura 2.1 - Acoplamento entre motores em veículos híbridos, (a) acoplamento série; (b) acoplamento paralelo (KRAMER et. al., 2008)

Quanto ao motor de combustão interna, este possui requisitos diferentes de acordo com a configuração do sistema de propulsão. Por exemplo, um motor próprio para aplicação em uma arquitetura em série deve ter uma eficiência maior em uma velocidade constante, enquanto que para configurações em paralelo, o motor deve ser desenvolvido para ser eficiente em um intervalo maior de velocidades, incluindo aceleração e desaceleração.

As pesquisas feitas tendo como objetivo a melhoria e desenvolvimento de novos motores para veículos híbridos tendem a diminuir as emissões, criar novos sistemas de injeção de combustível, sistemas de comando de válvulas e transmissão variáveis, dentre outros (WIRASINGHA et. al., 2008).

2.1.3 *Conversores de frequência*

O sistema de propulsão dos veículos deve contar ainda com um conversor de frequência capaz de alimentar o motor com energia proveniente do sistema de armazenamento de energia, e também de recarregar as baterias com energia fornecida pelo processo de frenagem regenerativa ou pelo gerador.

Com o objetivo de aumentar a eficiência, os motores de tração são tipicamente alimentados com uma tensão de 300 V a 600 V. Assim, uma topologia bidirecional é escolhida para permitir que os níveis de tensão sejam selecionados como uma função dos requisitos de potência do circuito, e assim também usados para alimentar outros dispositivos de baixa tensão (AMJADI et. al., 2010).

Os dispositivos eletrônicos devem ser eficientes para aumentar a economia de combustível e a autonomia dos veículos. A seleção de componentes eletrônicos de potência, conversores/inversores, estratégias de controle e operação, encapsulamento e a integração do sistema são cruciais para atingir um nível de desempenho satisfatório (EMADI et. al., 2008)

No caso de veículos híbridos, este sistema deve ser composto por um conversor CA-CC com correção de fator de potência e um controlador programável com um perfil tensão-corrente adequado. Um conversor bidirecional CC-CC também é necessário para transferir energia entre as baterias e o sistema de propulsão (EMADI et. al., 2008).

As diferentes topologias de conversores empregados em veículos têm em comum a tentativa de tornar o mais eficiente possível as relações: dispositivos de resposta rápida x alta densidade de potência, e componentes de resposta lenta x alta densidade de energia (KHALIGH et. al., 2010).

Alguns dos desafios encontrados são: o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos que combinem as características de controle de porta dos componentes do tipo MOS com a capacidade de condução de corrente e queda de tensão de tiristores, capazes de operar com altas correntes, superiores a 400 A, e frequência de chaveamento superior a 10 kHz; desenvolvimento de novos diodos de potência com características dinâmicas semelhantes aos dispositivos do tipo MOS; a aplicação de novos compostos de silício para fabricação de dispositivos eletrônicos capazes de operar em altas temperaturas; a necessidade de produzir dispositivos confiáveis para operar em condições de temperatura adversas e com muitas vibrações mecânicas (EMADI et. al., 2008).

O encapsulamento ainda continua sendo um obstáculo para as aplicações em veículos. A soldagem de condutores e as conexões entre dispositivos são barreiras para o desenvolvimento de componentes de potência com alta densidade de corrente. Algumas soluções estão em desenvolvimento, como conexões por meio de módulos, sem utilização de fios; dissipadores de calor mais eficientes; conexão direta de cobre sobre substratos de alumina ou nitreto de alumínio (EMADI et. al., 2008).

Outros componentes, como capacitores, indutores, diodos, barramentos e dissipadores ainda necessitam de maiores pesquisas para atingir um desempenho satisfatório em aplicações veiculares.

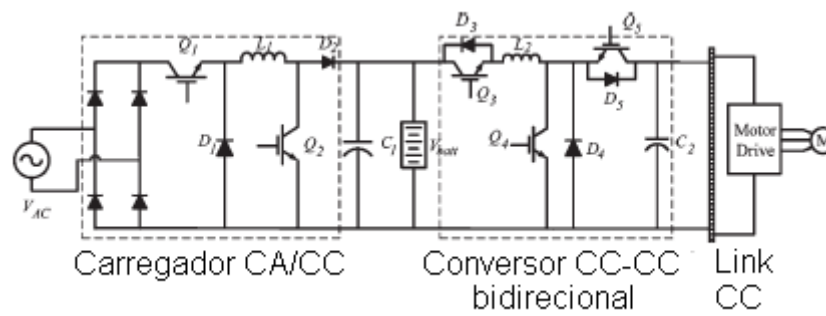
Alguns pontos onde a evolução é mais necessária são o desempenho em frequências, tensões e temperaturas altas; barramentos laminados com baixa indutância e alta isolamento; condutores entre os componentes dos circuitos e materiais dielétricos (EMADI et. al., 2008).

Faz-se necessário ainda desenvolver inversores complexos que possuam uma operação eficiente com poucos componentes eletrônicos, controle simplificado, com funções de inversor, recarregador de baterias e conversor CC-CC utilizando o menor número possível de capacitores, com filtros contra interferência magnética e tolerante à faltas (EMADI et. al., 2008).

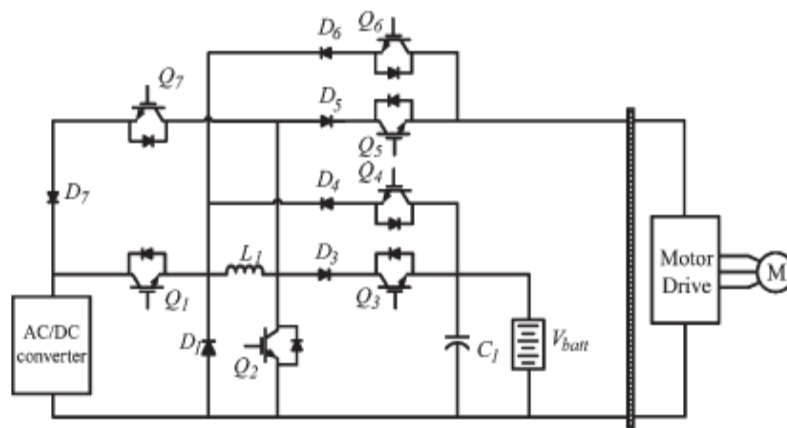
Algumas topologias são apresentadas em (KHALIGH et. al., 2010), como, por exemplo, estas que são vistas na Figura 2.2. Na Figura 2.2 a., pode-se observar uma configuração que utiliza um carregador em ponte completa com dois conversores não-inversores para PHEVs. Nesta topologia, o carregador, as baterias e os conversores CC estão em cascata, limitando a eficiência do sistema devido às maiores perdas nas chaves eletrônicas.

A Figura 2.2 b. apresenta uma proposta de topologia que possui conversores CA-CC e CC-CC integrados com a bateria, que possuem mais flexibilidade de operação. Além disso, o sistema de armazenamento conta também com supercapacitores em paralelo com as baterias. Esta configuração ainda não é comercial, já que não existem veículos que utilizem esta combinação de elementos armazenadores de energia em seus sistemas.

Outras topologias de conversores são propostas por Amjadi et. al. (2010), onde são utilizados principalmente componentes da família MOS devido à sua capacidade de operação em frequências maiores, por Emadi et. al. (2008) e por Khaligh et. al. (2010).



(a)



(b)

Figura 2.2 - Topologias de conversores de frequência para veículos híbridos recarregáveis (KHALIGH et. al., 2010)

2.2 Vehicle-to-grid

Os veículos elétricos e híbridos recarregáveis não se constituem apenas como cargas passivas no sistema, mas podem também interagir ativamente com este por meio do conceito *vehicle-to-grid* (V2G). Assim, os veículos podem fornecer energia para a rede elétrica enquanto estiverem ociosos. O sistema de armazenamento de energia pode ser carregado durante períodos de baixa demanda e descarregados quando requisitados, durante a ocorrência de faltas ou para regulação da rede elétrica.

Como pré-requisitos para despachar energia para a rede de distribuição, cada veículo deve ter uma conexão apropriada com o sistema elétrico e que permita o fluxo de energia em ambas as direções; uma conexão ou meio de comunicação com o operador da

rede; e controles e medidores embarcados para gerenciar o estado de carga das baterias e a energia despachada (KEMPTON et. al., 2005a).

Por meio do V2G, os veículos podem fornecer regulação de tensão e de frequência, reserva operativa de curto prazo e gerenciamento de carga pelo lado da demanda. Se utilizados em larga escala, têm o potencial de absorver o excesso de energia gerado por fontes renováveis durante períodos de baixa demanda, além de despacharem energia elétrica em momentos de pico de carga, evitando o uso de geradores de backup ou de regulação (KRAMER et. al., 2008).

O sinal de controle do operador do sistema pode ser por meio de ondas de rádio, redes de telefonia móvel, conexão com a internet, ou PLC (*Power Line Carrier*). Em qualquer caso, o operador requisita potência de um grande número de veículos, enviando o sinal para cada veículo individualmente ou para um agente agregador ou gerenciador da frota, que despacha a potência necessária (KEMPTON et. al., 2005a).

A participação de frotas de veículos em mercados de serviços *ancilares* está sujeita a contratos entre concessionárias de energia elétrica e proprietários para o uso da energia armazenada nos automóveis. Kempton et.al. (2005a) e Tomić et. al. (2007) investigam os mercados de energia dentro dos quais a participação dos PHEVs é mais apropriada e os possíveis lucros dos proprietários dos veículos obtidos a partir da comercialização de energia nestes mercados.

Por meio desta investigação, concluem que os mercados de regulação e de reserva girante são mais apropriados para os PHEVs, devido às características dos mesmos de baixa capacidade energética, rapidez na resposta e alto custo da energia armazenada na bateria. Continuando essa investigação, mostram que os ganhos dos proprietários podem ser expressivos, sobretudo no mercado de regulação primária (KEMPTON et. al., 2005a; TOMIĆ et. al., 2007).

Kempton et. al. (2005b) investigam ainda a presença de veículos elétricos em redes onde exista grande penetração de geração por fontes renováveis. Os estudos concluem que os PHEVs têm um papel muito importante na estabilização do sistema e auxiliam no aumento da participação da energia renovável, servindo como backup e como regulação para a energia excedente, armazenando-a para posterior utilização.

Os estudos são conduzidos utilizando como exemplos as fontes eólica e fotovoltaica. Novamente os resultados mostram que a participação de PHEVs em mercados de

energia torna o sistema mais flexível e permite uma penetração de fontes renováveis em maior escala.

Diversos fatores também devem ser observados para a conexão de veículos em sistemas elétricos, podendo ser determinantes na limitação do uso da energia armazenada nos automóveis. Por exemplo, pode-se citar: a capacidade de condução dos circuitos aos quais os veículos estão conectados; a quantidade de energia armazenada nas baterias; e a potência nominal do inversor do automóvel (KEMPTON et. al., 2005a; TOMIĆ et. al., 2007).

Como podem ser considerados fontes de geração distribuída, os PHEVs devem atender a norma IEEE 1547, que apresenta os requisitos para interconexão de dispositivos ao sistema. Alguns destes requisitos são apresentados a seguir (IEEE, 2003):

- Injeção de corrente contínua: o inversor que faz a conexão com a rede de distribuição deve atender os limites de injeção de corrente contínua estabelecidos na norma IEEE 1547. Este teste é conduzido em inversores conectados à rede sem uso de transformadores de isolamento;
 - Harmônicos: este teste mede os níveis de componentes harmônicas presentes e a taxa de distorção total do inversor operando em condições normais, que devem atender os requisitos da norma;
 - Sincronização com a rede e capacidade de transferência: para conexão com a rede, os inversores devem sincronizar-se causando o mínimo de transitórios. Se o inversor também alimenta uma carga, esta também deve estar livre de transitórios durante a transferência, independente das condições iniciais do mesmo;
 - Resposta à tensão anormal: estes testes são aplicados para certificar que o inversor desconecta da rede durante certo período de tempo sempre que as tensões ficam fora dos limites estabelecidos pela norma;
 - Resposta à frequências anormais: este comportamento garante que o inversor desconecte da rede durante certo período quando a frequência da rede está fora dos padrões da norma;
 - Ilhamento: esta condição da rede deve ser evitada, pois durante esta contingência o controle de tensão e de frequência não opera. Dessa forma, quando ocorrer, o inversor deve cessar o fornecimento em um tempo máximo de acordo com a norma;
-

- Teste de curto-circuito: este teste é feito para se calcular a resposta do inversor quando submetido a uma condição de falta, devendo estar em conformidade com a norma.

Para que o conceito V2G possa ser aplicado em larga escala, a comunicação entre veículos e o operador do sistema de distribuição (DSO) é imprescindível para que os comandos de despacho sejam enviados, além da possibilidade de gerenciamento de demanda por parte do operador.

Quinn et. al. (2010) propõem dois modelos de comunicação em redes inteligentes entre veículos elétricos e DSO. O primeiro modelo é chamado de arquitetura determinística ou direta, e nela existe uma linha direta de comunicação entre cada veículo e o operador, de forma que cada automóvel pode ser tratado e comandado como um recurso independente. Neste cenário o veículo pode participar do mercado de serviços *ancilares* enquanto estiver conectado à estação de recarga.

Esta arquitetura é simples, mas possui problemas sérios de viabilidade e dimensionamento a longo prazo, já que o número crescente de veículos exigirá uma infraestrutura inexistente de comunicação, além de que não é possível utilizar os meios convencionais de comunicação aplicados com outros prestadores de serviços *ancilares* devido à distribuição geográfica adversa dos veículos.

Ainda existe o problema de controle e monitoramento da comunicação com os milhares de veículos, exigindo atualizações constantes de contratos, de *status* de conexão e desconexão, estado de carga das baterias e outros aspectos que são determinados a partir da configuração pessoal que os proprietários aplicam aos seus automóveis.

O segundo modelo proposto é a utilização de outros agentes que atuem como intermediários dentro do mercado, e possam estabelecer comunicação direta com o DSO e com a frota de veículos. Estes intermediários, chamados agregadores, recebem os sinais diretos do operador e gerenciam o despacho da frota disponível em espaços geograficamente limitados ou em estacionamentos próprios.

Dentro deste cenário, os agregadores podem fornecer serviços a qualquer momento, enquanto os veículos podem conectar e desconectar das estações de recarga sem grandes prejuízos para o sistema. Além de que esta arquitetura facilita a compensação econômica dos proprietários sob contrato.

Este modelo soluciona o problema da comunicação entre DSO e agregador, já que a infra-estrutura de comunicação necessária entre as duas partes não difere muito do modelo

já existente e que o operador necessita de comunicar-se apenas com o agregador, o que torna a comunicação mais gerenciável comparado ao outro modelo. Outra característica é que o número de veículos sob contrato com cada agregador não modifica a estrutura de comunicação proposta, fazendo com que a quantidade de veículos participando do mercado deixe de ser um problema.

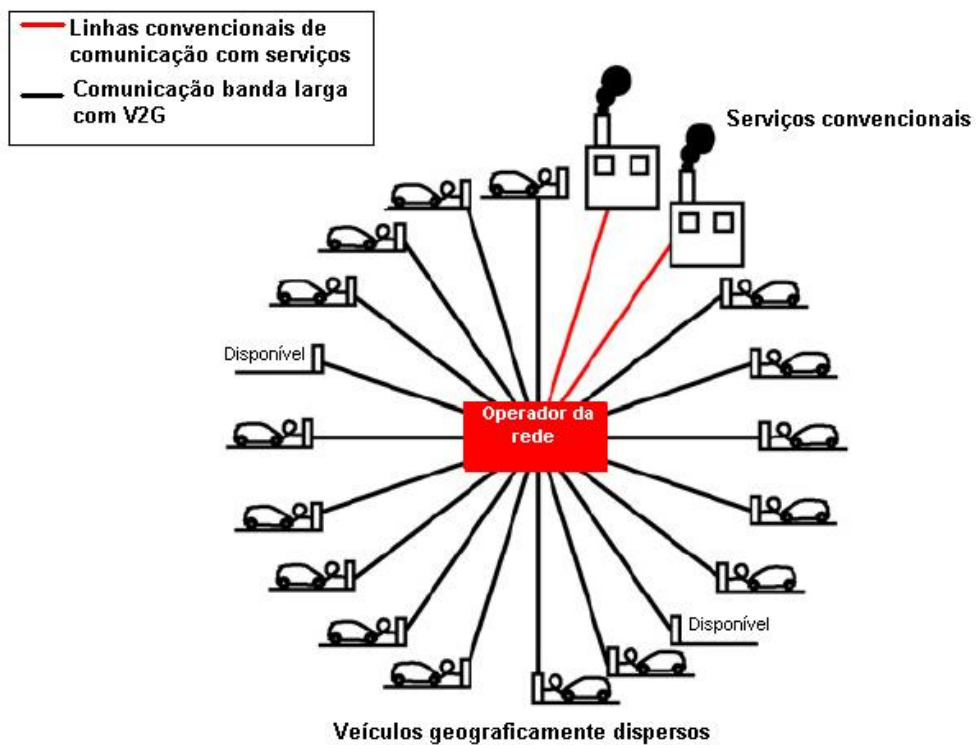
As duas arquiteturas propostas podem ser observadas na Figura 2.3. A Figura 2.3 a. mostra a arquitetura determinística, enquanto que a Figura 2.3 b. mostra a arquitetura composta por agregadores.

Outro fator importante quando se trata de V2G é a disponibilidade dos veículos conectados às estações de carga para despacho, que tem uma característica probabilística, e a localização das mesmas. Para a arquitetura determinística, assume-se que cada PHEV está disponível para prestação de serviços sempre que estiver conectado, o que só acontece durante uma parte do dia.

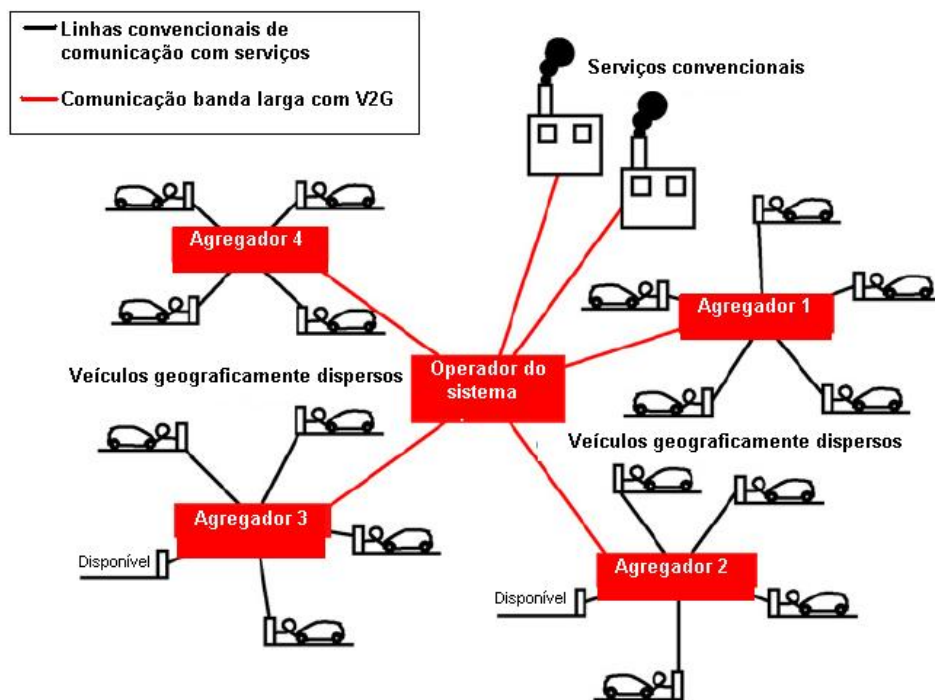
Para o caso em que se aplica a arquitetura com agregadores, estes têm disponibilidade durante maior período de tempo porque estão sempre conectados ao DSO e prontos para responder aos pedidos, variando apenas a potência disponível de acordo com o número de veículos conectados. Dessa forma, comparando as duas opções, percebe-se que a segunda possui uma disponibilidade maior.

Assim como a disponibilidade, a confiabilidade também afeta diretamente a prestação de serviços *ancilares* por parte dos veículos elétricos. Comparando as duas arquiteturas propostas de acordo com os resultados obtidos, observa-se também que a composta por agregadores é mais confiável que a determinística.

Para tornar a abordagem mais completa, os cálculos de disponibilidade e confiabilidade não devem envolver somente os canais de comunicação, mas também todos os componentes que fazem parte do processo, como as estações de carga, os carregadores dos veículos e os elementos da rede de distribuição.



(a)



(b)

Figura 2.3 - Arquiteturas de comunicação entre operador do sistema de distribuição e veículos elétricos (QUINN et. al., 2010)

CAPÍTULO 3

3. FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

A solução do problema de fluxo de potência em sistemas elétricos é o ponto inicial para quaisquer estudos de planejamento, expansão ou operação, dado que é possível obter as condições de operação em regime permanente. As grandezas de interesse são as tensões e ângulos nas barras, fluxos de potência ativa e reativa nas linhas, perdas nos condutores e transformadores, e outras.

A disponibilidade de recursos computacionais popularizou a simulação de sistemas elétricos aplicando técnicas numéricas, como por exemplo, os métodos de Gauss-Seidel, Newton-Raphson e suas versões desacopladas.

Entretanto, tais algoritmos foram planejados levando em conta na sua modelagem características básicas como: equilíbrio de carregamento entre as fases; presença de transposições; baixo valor da razão R/X ; e grandes susceptâncias capacitivas nas linhas de transmissão. Conforme observado, tais características são intrínsecas aos sistemas de transmissão de energia elétrica.

Os sistemas de distribuição, por sua vez, se caracterizam por: possuir topologia radial ou fracamente malhada; apresentar derivações múltiplas em ramos diferentes; são sistemas desbalanceados; ausência de transposições; presença de cargas de natureza distinta; e alto valor da razão R/X .

Tais características fazem com que as técnicas comumente utilizadas para solução do fluxo de potência apresentem desempenho limitado e dificuldades de convergência devido ao mau condicionamento das matrizes. Assim, diferentes procedimentos foram propostos para solução do fluxo de potência em redes de distribuição.

Os primeiros métodos propostos para solução de problemas de fluxo de potência em sistemas de distribuição foram baseados em métodos de varredura de rede. Estes métodos se aproveitam da natureza radial dos sistemas de distribuição, pois nestes só existe um único caminho desde a fonte até cada barra (SRINIVAS, 2000).

Em 1967, o primeiro trabalho apresentando a técnica de varredura inversa-direta (*backward-forward*) foi escrito por Berg. A partir de então, pode-se considerar os outros métodos propostos apenas versões mais refinadas desta técnica, com diversas variações. O algoritmo geral consiste em dois passos básicos descritos a seguir.

A varredura inversa (*backward*) é realizada a partir das barras terminais até o nó fonte, percorrendo toda a rede, realizando a soma de correntes ou de potências. O passo de varredura direta (*forward*) é realizado em seguida, a partir da barra fonte até as barras terminais, atualizando as tensões nodais.

Os seguintes passos detalham de melhor forma os procedimentos necessários para a implementação do algoritmo:

- Assuma um perfil de tensão inicial para todas as barras do sistema;
- Calcule as correntes de carga em cada nó;
- Percorrendo o sistema de forma inversa, a partir dos nós mais distantes, até o nó fonte, somam-se as correntes em cada ramo;
- Sabendo das impedâncias de cada ramo, e partindo do nó fonte, atualizam-se as tensões desde o nó fonte até os nós terminais mais distantes;
- Repetem-se os três últimos passos até que uma tolerância mínima seja atingida.

Uma variação da técnica de varredura inversa-direta utilizando as potências nodais em vez das correntes foi proposto por Broadwater et. al. (1988). O método da Soma de Potências apresenta bons resultados para redes de distribuição radiais em termos de precisão dos resultados, tempo total de computação e facilidade de modelagem dos componentes do sistema.

O método da soma de potências é um método iterativo composto basicamente pelas seguintes etapas (BROADWATER et. al., 1988):

- Cálculo das potências equivalentes em cada barra, considerando carga, geração e elementos em derivação;
 - No sentido das barras terminais para a barra fonte, somam-se as potências nodais e as perdas de cada ramo, percorrendo a rede no caminho inverso;
 - Cálculo das tensões nodais em cada barra, no sentido da barra fonte para as barras terminais (a tensão da barra fonte é conhecida) por meio da solução de uma equação biquadrada;
-

- Verificação da convergência: módulo da diferença entre tensões em iterações sucessivas menor que tolerância especificada;
- Se não houver convergência, cálculo das perdas nos ramos, no sentido das barras terminais para a barra fonte.

Shirmohammadi et. al. (1988) apresentam um algoritmo onde é possível solucionar o fluxo de potência em sistemas de distribuição fracamente malhados, monofásicos ou trifásicos, baseando-se em um método de compensação, com ênfase na modelagem de cargas distribuídas e desbalanceadas, reguladores de tensão e capacitores com chaveamento automático.

Primeiramente é aplicado o método de varredura direta-inversa mostrado anteriormente, dividindo os nós do sistema em níveis hierárquicos diferentes de acordo com a ordem dos mesmos a partir do nó fonte. Após a fase de varredura direta, é necessário simular os efeitos dos laços através da injeção de correntes nas duas extremidades dos mesmos.

Estas correntes são calculadas aplicando a técnica de compensação e uma matriz de impedância, cujo elemento da diagonal principal de cada submatriz é igual ao somatório da impedância da seção, e os elementos fora da diagonal principal serão não nulos apenas quando dois laços formados compartilharem seções comuns na linha. O processo se repete até que uma tolerância seja atingida.

Posteriormente, Cheng et. al. (1995) estenderam o método proposto por Shirmohammadi et. al. (1988), descrito anteriormente, para solução do fluxo de potência em sistemas de distribuição fracamente malhados trifásicos. Ainda investigam a instalação de geração distribuída e sua modelagem no fluxo de potência proposto, como barras de tensão controlada.

Chen et. al. (1991) desenvolvem um algoritmo onde se aplica uma fatoração triangular com ordenação ótima da matriz admitância Y , ou método de Gauss com matriz impedância Z implícita. Este método aproveita a esparsidade característica da matriz Y e também tem um desempenho satisfatório para aplicações em sistemas de distribuição radiais ou malhados desbalanceados, com ramos monofásicos, bifásicos e trifásicos, e geração distribuída.

O método de Gauss com matriz de impedância Z utiliza a matriz admitância Y bifatorada e injeções de corrente equivalentes para solucionar as equações de rede. A convergência do método depende em alto grau do número de barras com tensão constante,

barras PV. Se a única barra com tensão especificada do sistema for a de referência, a taxa de convergência é comparável ao do método de Newton-Raphson (CHEN et. al., 1991).

O método de Gauss é baseado no princípio de superposição aplicado às tensões das barras do sistema, onde cada tensão é a soma de uma componente da fonte e outra da corrente de injeção. As cargas, capacitores, reatores e geração distribuída são modelados como injeções positivas e negativas de corrente.

Pelo princípio da superposição, apenas um tipo de fonte é considerado por vez ao calcular as tensões. Quando se considera o nó swing, as demais fontes de corrente são desconectadas. Esta componente representa a tensão do sistema em vazio. Depois, aterrando este nó, considera-se a contribuição das demais fontes de corrente, calculada de forma iterativa (CHEN et. al., 1991).

Com o objetivo de aplicar os métodos desacoplados de Newton-Raphson, Garcia et.al. (1984) propuseram uma formulação que aumenta a relação R/X em sistemas de distribuição por meio de uma rotação geométrica nos eixos. Adicionando um ângulo tal que a razão X/R seja satisfatória, as grandezas da rede em regime permanente são calculadas. Posteriormente os eixos são colocados em suas posições originais, anulando a rotação, e os fluxos de potência e perdas são calculados na rede original.

Em outro trabalho posterior, Garcia et. al. (1996) estende a formulação do método de Newton-Raphson desacoplado rápido para abordar o problema do fluxo de potência trifásico em sistemas de distribuição aplicando este método.

Aravindhababu et. al. (2011) propuseram um método de solução do fluxo de potência de forma desacoplada baseada nos fluxos de corrente nas linhas em coordenadas retangulares para sistemas de distribuição radiais. Os fluxos de corrente nas linhas e seus valores equivalentes são linearizados em torno de um ponto de operação e transformados em uma matriz constante visando eliminar os elementos do Jacobiano fora da diagonal principal.

Esta transformação permite o desacoplamento do problema do fluxo de potência em dois sub-problemas, P- δ e Q-V, sem nenhuma modificação nas magnitudes de tensão, ângulos e razão R/X. A abordagem é simples e utiliza uma sub-matriz esparsa derivada do Jacobiano, que ao ser fatorada, serve para aplicação tanto na solução do problema P- δ quanto do problema Q-V, sendo solucionada iterativamente de forma similar ao método desacoplado rápido (ARAVINDHABABU et. al., 2011).

O método empregado neste trabalho para a resolução do fluxo de potência foi proposto em (FARAG et. al., 2011). O mesmo utiliza uma variação do método de varredura

direta-inversa apresentado anteriormente, aplicando matrizes de incidência em redes de distribuição trifásicas com topologia radial e considerando a penetração de fontes de geração distribuída. Este método é descrito brevemente a seguir.

O método proposto baseia-se na relação entre as correntes nodais e as correntes de ramo. Para um sistema radial com N nós, existem apenas $N-1$ elementos e as correntes de ramo podem ser expressas em função das correntes nodais. Para um ramo i - j , conectando as barras 'i' e 'j', a corrente nodal em j pode ser expressa pela seguinte equação linear, dada pela Equação 3.1, onde $k(j)$ é o conjunto de nós conectados a 'j' (FARAG et. al., 2011).

$$I_j = I_{ij} - \sum I_{jk(j)} \quad (3.1)$$

Assim, a relação entre correntes nodais e correntes de ramo é dada por uma matriz quadrada não-singular, conforme Equação 3.2. Invertendo a matriz, têm-se a Equação 3.3.

$$I_{nó} = K \cdot I_{ramo} \quad (3.2)$$

$$I_{ramo} = K^{-1} \cdot I_{nó} \quad (3.3)$$

A matriz K é chamada de matriz de incidência de elementos. É uma matriz quadrada não-singular de ordem $N-1$. É construída de maneira simples, onde cada linha descreve os elementos incidentes. Os elementos da diagonal principal, $K(j,j)$, são iguais a 1. Para os demais elementos incidentes, entre os nós 'i' e 'j', o valor de $K(i,j)$ é igual a -1. Todos os demais elementos são nulos (FARAG et. al., 2011).

Assim, a matriz de incidência de elementos K possui um aspecto onde todos os elementos da diagonal principal são unitários, e não existem elementos não-nulos abaixo da mesma. Ou seja, é uma matriz triangular superior.

Estendendo a formulação para uma rede de distribuição trifásica, obtêm-se três matrizes de incidência, cada uma para a respectiva fase, com dimensões $(N_A-1 \times N_A-1)$, $(N_B-1 \times N_B-1)$ e $(N_C-1 \times N_C-1)$, onde N_A , N_B e N_C são os números respectivos de nós existentes em cada fase (FARAG et. al., 2011).

As correntes nodais de cada fase são calculadas de acordo com a Equação 3.4:

$$\begin{aligned}
I_{nó}^A &= I_L^A + I_{sh}^A - I_G^A \\
I_{nó}^B &= I_L^B + I_{sh}^B - I_G^B \\
I_{nó}^C &= I_L^C + I_{sh}^C - I_G^C
\end{aligned} \tag{3.4}$$

onde

$I_L^{A,B,C}$ são calculadas de acordo com a Equação 3.5, na qual o índice ‘n’ representa o modelo de carga empregado (0 para potência constante, 1 para corrente constante e 2 para impedância constante);

$I_{sh}^{A,B,C}$ são calculadas de acordo com a Equação 3.6;

e $I_G^{A,B,C}$ são calculadas de acordo com a Equação 3.7.

$$I_L^{A,B,C} = \frac{abs(V_{nó}^{A,B,C})^n \times conj(S_{especificado}^{A,B,C})}{conj(V_{nó}^{A,B,C})} \tag{3.5}$$

$$\begin{bmatrix} I_{sh}^A \\ I_{sh}^B \\ I_{sh}^C \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Y_{AA} & Y_{AB} & Y_{AC} \\ Y_{BA} & Y_{BB} & Y_{BC} \\ Y_{CA} & Y_{CB} & Y_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{nó}^A \\ V_{nó}^B \\ V_{nó}^C \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

$$I_G^{A,B,C} = \frac{(P_{G,especificado}^{A,B,C} - jQ_{G,especificado}^{A,B,C})}{conj(V_{nó}^{A,B,C})} \tag{3.7}$$

Conhecidas as correntes nodais, as correntes de ramo de cada fase são calculadas de acordo com a Equação 3.3. A seguir, as quedas de tensão nos ramos são calculadas de acordo com a Equação 3.8, e finalmente, as tensões nodais são calculadas utilizando a Equação 3.9 (FARAG et. al., 2011).

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{ramo\ ij}^A \\ \Delta V_{ramo\ ij}^B \\ \Delta V_{ramo\ ij}^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA_ramoij} & Z_{AB_ramoij} & Z_{AC_ramoij} \\ Z_{BA_ramoij} & Z_{BB_ramoij} & Z_{BC_ramoij} \\ Z_{CA_ramoij} & Z_{CB_ramoij} & Z_{CC_ramoij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ramo\ ij}^A \\ I_{ramo\ ij}^B \\ I_{ramo\ ij}^C \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

$$\begin{bmatrix} V_{nó\ j}^A \\ V_{nó\ j}^B \\ V_{nó\ j}^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{nó\ i}^A \\ V_{nó\ i}^B \\ V_{nó\ i}^C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta V_{ramo\ ij}^A \\ \Delta V_{ramo\ ij}^B \\ \Delta V_{ramo\ ij}^C \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

O processo é repetido até que se atinja uma tolerância determinada.

CAPÍTULO 4

4. SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS

Em matemática, o termo otimização, ou programação matemática, refere-se ao estudo de problemas em que se busca minimizar ou maximizar uma função através da escolha sistemática dos valores de variáveis reais ou inteiras dentro de um conjunto viável.

Em problemas de engenharia, de administração, de logística, de transporte, de economia, de biologia ou de outras ciências, quando se consegue construir modelos matemáticos bastante representativos dos respectivos sistemas dinâmicos em estudo, é possível aplicar as técnicas matemáticas de otimização para maximizar ou minimizar uma função previamente definida, visando encontrar uma "solução ótima" do problema, isto é, que resulte no melhor desempenho possível do mesmo.

No campo da otimização existe um grande interesse em estudos, desenvolvimento e aplicações de técnicas inspiradas em sistemas ou fenômenos biológicos e comportamento de animais, como por exemplo: as redes neurais; a computação evolutiva; os algoritmos genéticos; os sistemas imunológicos; as colônias de formigas; as colônias de abelhas; enxame de partículas, e outros.

Os paradigmas da computação evolutiva geralmente se diferem dos processos tradicionais de otimização em algumas características, como por exemplo: utilizam um conjunto de possíveis soluções, chamado população; executam a busca a partir da própria função, e não de uma derivada ou outras informações; e aplicam regras probabilísticas de transição.

O fato de utilizar populações de possíveis soluções traz a vantagem de explorar simultaneamente pontos de máximo e de mínimo, diminuindo a probabilidade de se estagnar em pontos de máximo ou mínimo locais e, permitindo o deslocamento entre regiões totalmente diferentes e distantes no espaço amostral.

Por executar a busca a partir da própria função, a aptidão de uma solução pode ser medida diretamente naquela, avaliando diretamente o desempenho de cada indivíduo da população. Também o fato de utilizar transições probabilísticas não significa que uma busca

totalmente aleatória está sendo executada. Os operadores aplicados direcionam a busca para regiões do espaço amostral onde existe a maior possibilidade de haver valores ótimos.

Neste capítulo os principais aspectos dos sistemas imunológicos artificiais, método de otimização empregado no desenvolvimento do presente trabalho, são discutidos.

4.1 Histórico

O estudo dos sistemas imunológicos para aplicações em otimização iniciou-se na década de 90 do século XX, quando estudiosos de diversas áreas perceberam as enormes possibilidades de aplicações do mesmo, comparáveis à do cérebro humano.

Os historiadores indicam Thucydides, em Atenas, durante o quinto século antes de Cristo, como o primeiro a relacionar a imunidade a uma infecção, que ele chamou de "peste" (mas que provavelmente não era a peste bubônica que conhecemos atualmente). O conceito de imunidade pode ter existido há muito mais tempo, conforme sugere o antigo hábito chinês de tornar as crianças resistentes à varíola fazendo-as inalar partículas obtidas a partir de lesões cutâneas provenientes de pacientes em recuperação dessa doença (CASTRO et. al., 1999).

A Imunologia é uma ciência relativamente nova, cuja origem é creditada a Edward Jenner, que notou que as ordenhadoras que se recuperavam da varíola bovina jamais contraíam varíola humana, uma variedade mais grave da doença. Com base nessa observação, ele injetou o material de uma pústula de varíola bovina no braço de um menino de 8 anos. Quando, mais tarde esse menino foi intencionalmente inoculado com o vírus da varíola humana, a doença não se desenvolveu. O tratado de Jenner sobre vacinação (do latim *vaccinus*, das vacas) foi publicado em 1798.

Somente no século XIX, Robert Koch provou que as doenças infecciosas eram causadas por microorganismos patogênicos, e que cada um destes era responsável por transmitir apenas uma patologia. Posteriormente, Louis Pasteur desenvolveu com sucesso as vacinas anti-rábica e anti-varíola e Metchnikoff descobriu os processos celulares de fagocitose¹. Ainda no século XIX, Behring e Kitasato descobriram os anticorpos em soros de

¹ Fagocitose: englobamento e digestão de partículas sólidas e microorganismos por fagócitos ou células amebóides. Por meio deste processo os leucócitos do sistema imunológico atacam e digerem agentes exógenos presentes no organismo.

pacientes inoculados e Ehrlich investigou os processos de aumento de produção de anticorpos depois da exposição a antígenos² (CASTRO et. al., 1999).

Por volta de 1900, Bordet e Landsteiner investigaram a noção de especificidade da resposta imunológica, além de mostrarem a capacidade do sistema de produzir anticorpos específicos contra substâncias químicas sintetizadas artificialmente e inexistentes na natureza.

No decorrer do século XX, Breinl, Haurowitz e Linus Pauling propuseram a teoria instrutiva que defendia que o antígeno fornecia informação complementar para formação de anticorpos. Esta teoria foi abandonada posteriormente em favor da teoria de seleção clonal, proposta por Burnet (CASTRO et. al., 1999).

Atualmente, os estudos em Imunologia têm focado principalmente a apoptose³, identificação de antígenos, citocinas⁴, regulação da atividade imunológica, memória, doenças auto-imunes, vacinas de DNA, sinalização intracelular e intercelular e maturação da resposta imunológica.

4.2 O Sistema Imunológico

O sistema imunológico é composto por um conjunto de células, moléculas e órgãos que formam um mecanismo de identificação capaz de perceber e combater disfunções do próprio organismo ou a ação de microorganismos infecciosos exógenos de forma praticamente ilimitada. A interação do mesmo com outros sistemas permite a regulação do corpo, garantindo o funcionamento estável do mesmo (CASTRO et. al., 1999).

O sistema imunológico pode ser dividido didaticamente em dois subsistemas: o sistema inato e o adaptativo. O sistema imunológico inato recebe esta denominação por possuir mecanismos de defesa não-específicos, que constituem uma resposta indiferenciada ao agente invasor. O corpo já nasce com esta habilidade de reconhecer certos microorganismos e imediatamente destruí-los.

² Antígeno: qualquer substância que quando introduzida no corpo humano, é prontamente reconhecida como um agente exógeno e atacada pelo sistema imunológico.

³ Apoptose: conhecida como "morte celular programada", é um tipo de autodestruição celular que ocorre de forma ordenada.

⁴ Citocinas: proteína ou peptídeo de sinalização extracelular que atua como um mediador local na comunicação célula-célula.

A imunidade inata é baseada em um conjunto de receptores codificados em centros germinativos conhecidos como receptores de reconhecimento de padrões, os quais reconhecem padrões moleculares associados à microorganismos patogênicos. Estes padrões moleculares são encontrados apenas nos invasores e nunca no organismo hospedeiro, e a detecção indica a presença de agentes externos. Por meio destes padrões moleculares o sistema imunológico inato é capaz de distinguir as células e tecidos do próprio organismo do microorganismo invasor, desempenhando um papel muito importante na potencialização da resposta adaptativa (CASTRO et. al., 1999).

O aspecto mais importante da resposta imunológica inata é a estimulação da resposta adaptativa por meio de sinais da presença de antígenos. Por meio destes sinais de reconhecimento, os linfócitos⁵ T corretos são ativados, iniciando a resposta imunológica adaptativa.

O sistema imunológico adaptativo utiliza receptores de antígenos gerados somaticamente, os quais são distribuídos nos dois tipos de linfócitos: tipo B e tipo T. Estes receptores são gerados aleatoriamente por meio de processos de clonagem e mutação, e consequentemente, o padrão da resposta do sistema adaptativo é baseado na seleção clonal de linfócitos com especificidades particulares.

Os linfócitos B têm função de produzir e secretar anticorpos específicos como resposta a antígenos. Quando recebem sinais específicos, se diferenciam em plasmócitos⁶. Os linfócitos T têm função de regulação da ação de outras células e mecanismos de defesa e também atacam diretamente as células infectadas (CASTRO et. al., 1999; CASTRO et. al., 2002).

Os anticorpos desempenham um papel importante no sistema imunológico adaptativo devido à capacidade de reconhecimento e distinção de padrões moleculares específicos. Devido à diversidade de estruturas de antígenos, o repertório de anticorpos é muito grande. A informação genética necessária para codificar esta grande quantidade de padrões é armazenada no genoma de células germinativas e transmitida às próximas gerações.

Os receptores utilizados na resposta adaptativa são formados por segmentos de genes, e cada um possui uma especificidade própria, possibilitando que as células reconheçam

⁵ Linfócitos: é um tipo de leucócito (glóbulo branco) presente no sangue. São fabricados pela medula óssea vermelha, através das células-tronco linfóides que se diferenciam em células pre-búrsicas e pró-timocitos. Os pró-timocitos dão origem aos linfócitos T; já as células pre-búrsicas dão origem aos linfócitos B.

⁶ Plasmócito: célula funcionalmente e anatomicamente semelhante ao linfócito, encontrada nos tecidos em infecções crônicas, que atuam na síntese de hemoglobina.

agentes infecciosos durante toda a vida, mesmo que nunca tenha havido contato anterior (CASTRO et. al., 1999).

Uma das características do sistema imunológico é que o mesmo é difuso e descentralizado. Os tecidos, órgãos e células constituintes do mesmo estão distribuídos por todo o corpo, e são conhecidos como órgãos linfóides, já que estão relacionados à produção, desenvolvimento e maturação de linfócitos. Alguns destes órgãos e tecidos são as adenóides, amígdalas, vasos e nódulos linfáticos, timo, baço, apêndice, tecidos sanguíneo e hemocitopoético⁷ (CASTRO et. al., 1999).

Outra característica é que este sistema possui uma arquitetura de vários níveis, com mecanismos de defesa diferentes em cada um deles. Os níveis de proteção podem ser divididos em: barreiras físicas, como a pele e mucosas; barreiras fisiológicas, como fluido, temperatura e pH; e sistema imunológico inato e adaptativo (CASTRO et. al., 1999). A Figura 4.1 ilustra essa característica.

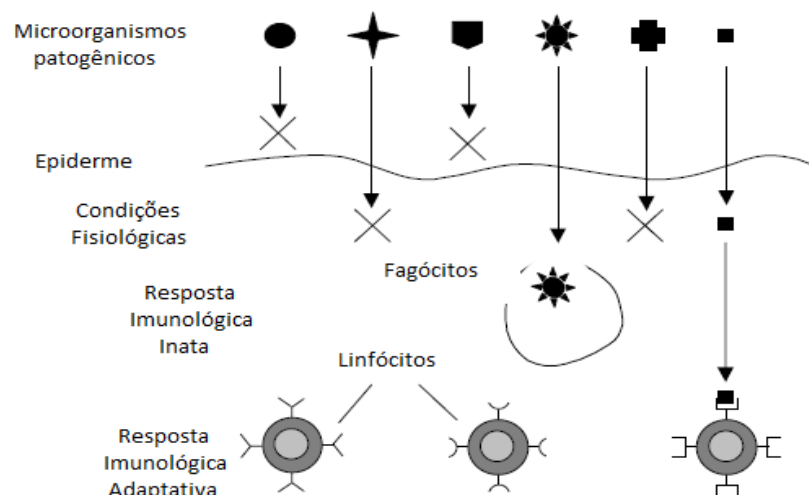


Figura 4.1- Estrutura multi-camadas do sistema imunológico (CASTRO et. al., 1999)

O mecanismo de defesa imunológica funciona como descrito a seguir.

Células especializadas na detecção de presença de antígenos, como os macrófagos⁸, percorrem o corpo digerindo os antígenos encontrados e fragmentando-os em peptídios, os quais são assimilados por moléculas do complexo de histocompatibilidade e disponibilizados na superfície celular.

⁷ Tecido hemocitopoético: produtor das duas linhagens de glóbulos: leucócitos e hemácias. Esse tecido aparece no baço, no timo e nos nódulos linfáticos, recebendo o nome de tecido linfóide. No interior da medula óssea vermelha, esse tecido é chamado mielóide, ocupando os espaços entre lâminas ósseas que formam o osso esponjoso. O tecido conjuntivo hemocitopoético também é chamado de tecido reticular.

⁸ Macrófagos: células de grandes dimensões do tecido conjuntivo que fagocitam elementos estranhos ao corpo.

Por sua vez, os linfócitos T possuem moléculas receptoras que os permitem reconhecer diferentes combinações peptídicas⁹. Quando isto acontece, eles secretam substâncias químicas que mobilizam outros componentes do sistema imunológico e inicia a resposta adaptativa.

Os linfócitos B, que também possuem moléculas contendo receptores específicos, respondem a estes sinais químicos. No entanto, diferentemente dos receptores dos linfócitos T, os receptores deste último reconhecem antígenos livres no organismo.

Quando ativados, os linfócitos B se dividem e se diferenciam em células plasmáticas, os plasmócitos, que secretam anticorpos¹⁰, proteínas solúveis formadas a partir destes receptores. Ligando-se aos antígenos encontrados, os anticorpos podem neutralizá-los ou destruí-los por meio de enzimas.

O anticorpo, ou imunoglobulina, é composto por uma região variável, responsável pelo reconhecimento e contato com antígenos e por outra região constante, responsável por diversas funções como, por exemplo, auxiliar na ligação ao antígeno. As cadeias polipeptídicas dos anticorpos estão codificadas em múltiplos segmentos de genes armazenados no genoma¹¹, que são recombinados nos linfócitos B. Além disso, altas taxas de mutações são realizadas somaticamente nos genes da imunoglobulina, aumentando a diversidade de informações genéticas do genoma das células germinativas (CASTRO et. al., 1999).

A criação de um repertório de receptores é gerada por combinações aleatórias entre fragmentos de genes de antígenos. A recombinação dos genes dos anticorpos é realizada em primeiro lugar, e é completada quando as células são expostas aos antígenos pela primeira vez, criando uma população de células com alta variabilidade de especificidades, das quais apenas algumas são compatíveis com o antígeno em questão. Tanto os processos de recombinação, quanto as mutações somáticas estão sob controle durante o desenvolvimento dos linfócitos B (CASTRO et. al., 1999).

A partir do contato entre linfócitos B e antígenos, os mecanismos de mutações são iniciados durante a proliferação dos clones dos linfócitos B selecionados. Alterando as bases

⁹ Peptídica: referente aos peptídeos, os quais são produto da degradação de proteínas ou resultado da agregação de várias moléculas de aminoácidos.

¹⁰ Anticorpo: Molécula de hemoglobina que possui uma sequência específica de aminoácidos em virtude da qual interage apenas com o antígeno que induziu a sua síntese nas células da série linfóide ou com antígeno estreitamente relacionado a ele. Também são chamados imunoglobulinas.

¹¹ Genoma: informação hereditária de um organismo que está codificada em seu DNA, ou RNA em caso de alguns vírus.

de nucleotídeos¹² individualmente, as mutações refinam a resposta imunológica, criando anticorpos mais eficientes contra os antígenos.

Alguns linfócitos, tanto B quanto T, se tornam células de memória que continuam circulando no organismo e potencializam a capacidade de combate ao mesmo tipo de antígeno em um contato futuro. Devido às constantes mutações sofridas pelos linfócitos B, a resposta imunológica se torna melhor depois de repetidas imunizações, devido ao fenômeno de maturação, aumentando a afinidade da resposta (CASTRO et. al., 1999).

O processo imunológico é ilustrado na Figura 4.2.

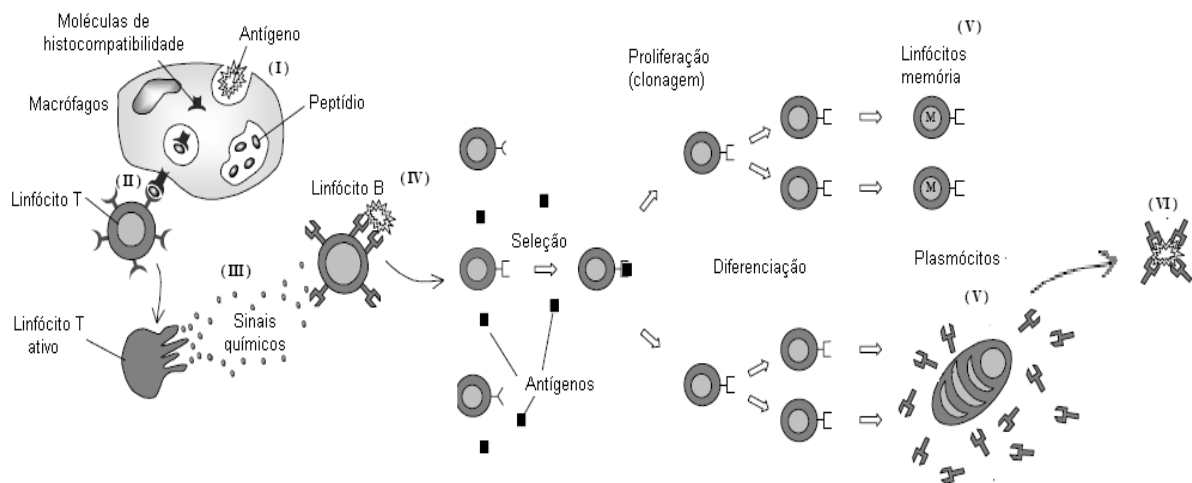


Figura 4.2 - Processo imunológico (CASTRO et. al., 1999)

4.3 Sistemas Imunológicos Artificiais

A capacidade dos sistemas naturais vai além daquelas observadas em tecnologias convencionais. A elucidação e aplicação de um conjunto de princípios gerais que determinam o comportamento destes têm desenvolvido novas ferramentas para aplicações em diversas áreas, sobretudo em otimização.

A natureza fornece diversos exemplos de sistemas com componentes simples, nos quais a competição ou cooperação entre seus membros torna o comportamento do sistema inteiro muito complexo. Uma das características mais marcantes destes sistemas é a robustez,

¹² Nucleotídeos: Elemento bioquímico constituinte elementar dos ácidos nucleicos (DNA e RNA).

expressa em uma alta tolerância às perturbações em componentes individuais, que podem realizar tarefas complexas quando agem em conjunto (CASTRO et. al., 1999).

O sistema imunológico possui grande potencialidade de resolver problemas de reconhecimento de padrões, além de ser robusto, possuir memória, capacidade de aprendizado e adaptação.

Os sistemas imunológicos artificiais são ferramentas computacionais baseadas em metáforas dos sistemas imunológicos biológicos, as quais aplicam informações contidas em um problema para obter a solução do mesmo utilizando os padrões existentes na resposta imunológica dos seres vivos. Nesta seção são discutidos alguns destes padrões e características mais relevantes para o desenvolvimento dos sistemas imunológicos artificiais (CASTRO et. al., 1999; CASTRO et. al., 2002).

O *princípio de seleção clonal* é o algoritmo utilizado para descrever as principais características da resposta imunológica aos estímulos por antígenos. Ele estabelece basicamente que apenas as células que reconhecem os antígenos presentes serão multiplicadas, enquanto as outras não o serão.

Para realizar a função de proteção, a capacidade de *reconhecimento de antígenos* não é suficiente. O sistema imunológico deve ter recursos suficientes para efetuar uma resposta efetiva contra os agentes externos. Como em uma típica situação predador-presa, o tamanho da população de linfócitos específicos contra os microorganismos patogênicos é crucial para a recuperação da infecção (CASTRO et. al., 1999).

Assim, a resposta imunológica adaptativa envolve o aumento do tamanho da população daqueles linfócitos que apresentam maior afinidade contra o antígeno reconhecido. Devido ao fato de a população total de linfócitos ser regulada, o aumento em uma variedade deles implica na diminuição das outras variedades.

Um organismo deve encontrar um mesmo tipo de antígeno repetidas vezes durante a vida. A exposição inicial estimula a resposta adaptativa e cria uma variedade de clones de linfócitos B, que por sua vez produzem anticorpos com diferentes afinidades. Ao entrar em contato com determinado antígeno, a resposta se inicia por meio dos anticorpos com maior especificidade, mesmo que esta não seja completa, caracterizando a *flexibilidade* do sistema e sua capacidade de *deteção anômala* (CASTRO et. al., 1999).

A ação continua por meio de um processo de hipermutação somática¹³ dos anticorpos, com o objetivo de criar uma variedade mais eficiente contra o antígeno presente no organismo por meio de mutações nos receptores dos mesmos. Esta *diversidade* no repertório de células permite ao sistema combater antígenos nunca antes encontrados, mesmo que não haja reconhecimento absoluto dos padrões presentes nos mesmos, dada a flexibilidade da resposta.

A efetividade da resposta durante infecções posteriores depende do armazenamento das informações sobre anticorpos com maior afinidade produzidos durante eventos anteriores. Esta característica de *aprendizado reforçado* traz uma evolução contínua da resposta devido à maior especialização das células, aumentando a efetividade do sistema.

Dentre estas células criadas por meio dos processos de clonagem e mutação, alguns linfócitos B se diferenciam e se tornam células de *memória*, permitindo que as melhores variedades encontradas pelo corpo sejam armazenadas geneticamente para posterior produção em outra ocasião (CASTRO et. al., 1999; CASTRO et. al., 2002).

Algumas possibilidades para aplicação de sistemas imunológicos artificiais são reconhecimento de padrões; aproximação e otimização de funções; detecção anômala; segurança de redes de computadores; aplicações que exijam geração de diversidade e tolerância a erros; robótica; controle adaptativo; abordagens com sistemas multi-agente (CASTRO et. al., 2000).

Outra aplicação é observada em (SATHYANATH et. al., 2002), onde os sistemas imunológicos artificiais são aplicados no desenvolvimento de um modelo de sistema multi-agente inteligente aplicado a problemas de mineração de dados e difusão mostrando resultados satisfatórios.

Por sua vez, T. Rahman et. al. (2006) desenvolveram um algoritmo que aplica os sistemas imunológicos artificiais em um problema de otimização de despacho econômico em sistemas de geração de energia.

¹³ Hipermutação somática: mecanismo de mutação das células que faz com que o sistema imunológico se adapte a novos elementos invasores. A hipermutação somática diversifica os receptores que utilizam o sistema imunológico para identificar antígenos, e permite que o sistema imunológico adapte sua resposta a novas ameaças durante o tempo de vida de um organismo.

CAPÍTULO 5

5. RECARGA OTIMIZADA DE VEÍCULOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Conforme apresentado nos capítulos anteriores, a tendência de popularização do segmento de veículos elétricos e híbridos recarregáveis causará um aumento considerável na demanda dos sistemas de potência, trazendo consequências ruins principalmente em nível de distribuição, com diversas ocorrências como: violações de limites de tensão, térmicos e de carregamento em transformadores de potência e cabos condutores; além de aumento de harmônicos no sistema devido aos conversores eletrônicos dos veículos, diminuindo a qualidade de energia; e, ainda, no aumento das correntes de falta e das perdas elétricas.

Essa tendência ainda esbarra no custo das baterias que compõem o sistema de armazenamento de energia, que encarecem muito o preço final dos modelos. No entanto, novas tecnologias e o aumento da produção devem equiparar os preços entre os veículos convencionais e os híbridos.

Outros aspectos já discutidos em capítulos anteriores mostram que a presença desse tipo de veículo em sistemas de potência pode trazer muitas possibilidades de flexibilização de operação, de acordo com o conceito *vehicle-to-grid*. Por meio deste, considera-se que tais veículos podem deixar de ser uma carga e se tornarem fontes de energia distribuídas em todo o sistema a serem despachadas em emergências, além de atuarem como fontes de regulação e reserva operativa de curto prazo.

Com o objetivo de combater os efeitos permissivos já expostos, uma das soluções propostas é a aplicação de um esquema controlado de recarga dos veículos com a ajuda dos sistemas imunológicos artificiais com o objetivo de minimizar as perdas na rede, além de atingir um nível operativo qualitativamente superior apresentando níveis de tensão mais altos. Para tal, se necessário, considerar-se-á a instalação de capacitores em diversos pontos da rede.

Neste capítulo é demonstrado o funcionamento do esquema de recarga proposto com a aplicação de sistemas imunológicos artificiais, com os objetivos de atingir uma melhor

condição operativa; e minimizar as perdas elétricas no sistema, considerando as restrições impostas às soluções.

5.1 Considerações iniciais

O sistema de distribuição utilizado para realizar as simulações é o IEEE 34, que é um sistema aéreo com característica radial, derivações monofásicas, reguladores de tensão, capacitores, cargas concentradas e distribuídas representadas pelo modelo de potência constante. A tensão base de linha da rede é de 24.9 kV e a potência base de 2500 kVA (KERSTING, 2001). Nenhuma das configurações iniciais do sistema foi alterada, como por exemplo, tape de reguladores de tensão ou capacitores já instalados.

Antes de iniciar o processo de recarga, algumas restrições foram consideradas para serem seguidas durante a simulação. Para este sistema, considerou-se que a carga de cada nó trifásico representa um conjunto de 15 unidades consumidoras, cada uma com 1 veículo elétrico ou híbrido recarregável. No caso dos nós monofásicos, considera-se que cada um representa um conjunto de 5 unidades consumidoras, cada uma com 1 automóvel. A exceção é o nó 800, ao qual não existe nenhum veículo conectado.

Neste sistema foram consideradas 2 cargas especiais. A primeira se encontra no nó 848 e se trata de um edifício comercial-residencial. A ala residencial conta com 60 apartamentos, cada um dispendo de uma vaga na garagem, totalizando 60 veículos. A segunda carga especial se trata de um *shopping center* localizado no nó 840. No estacionamento deste não são permitidas recargas noturnas dos veículos dos clientes. Assim a carga se resume à demanda da unidade consumidora.

Assim, de acordo com estas informações, existem 445 veículos neste sistema a serem recarregados durante o período noturno que vai de 22:00 h até 6:00 h do dia seguinte, correspondendo a um período de 8 horas, em suas respectivas residências. A potência nominal de recarga de cada veículo equivale a 4 kW. A curva de demanda foi selecionada com um intervalo de 15 minutos entre cada medição, considerando assim a carga do respectivo nó constante durante os próximos 15 minutos.

Considera-se ainda a existência de dispositivos inteligentes, como medidores ou controladores de carga embarcados nos veículos, e meios de comunicação eficazes entre o

operador do sistema de distribuição e as cargas, por meio dos quais é possível gerenciar a demanda através de sinais enviados aos dispositivos pelo operador. Dessa forma é possível restringir a potência disponível, limitando a mesma para o cenário de recarga controlada.

Dessa forma, foram disponibilizados 75 kVA para cada nó trifásico, e para os nós monofásicos foram disponibilizados 15 kVA. A exceção é feita para os nós 848, correspondente ao edifício residencial-comercial, cuja carga limite é de 225 kVA; e 840, que não permite recarga, mas que é alimentado por uma subestação de 2000 kVA. A Figura 5.1 representa este sistema.

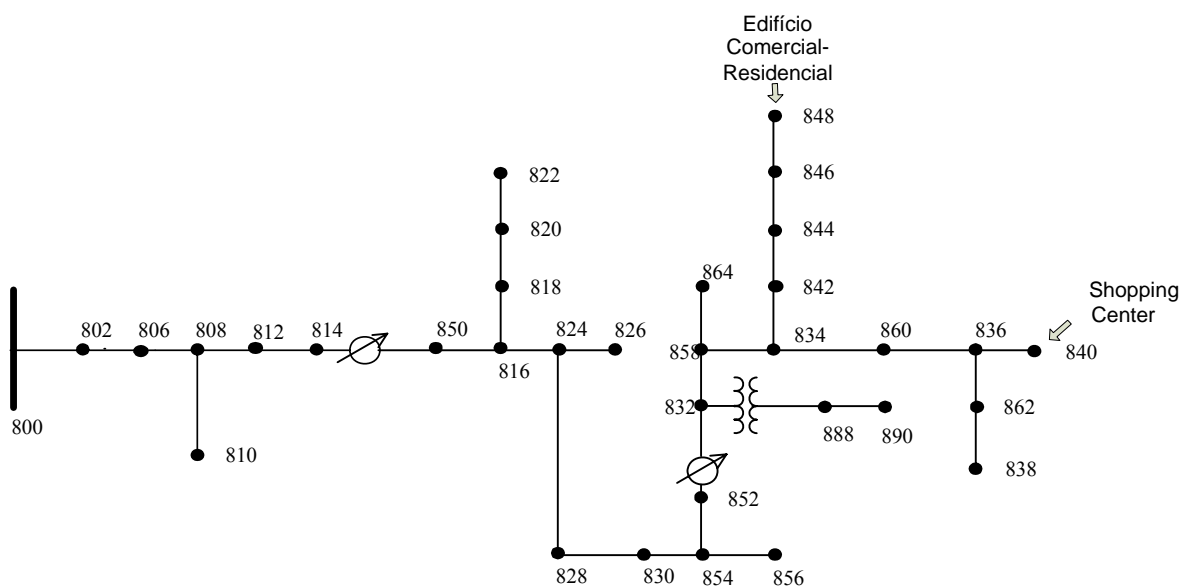


Figura 5.1 - Sistema de distribuição IEEE 34

Existem vários modelos de automóveis elétricos e híbridos recarregáveis disponíveis no mercado. Para realizar as simulações, optou-se por modelos reais, cujas características estão resumidas na Tabela 5.1 e foram coletadas a partir de informações fornecidas pelos fabricantes.

Para evitar problemas, foram utilizados nomes fictícios para os mesmos, os quais são mostrados na primeira coluna. A segunda coluna mostra a tecnologia empregada no sistema de armazenamento do respectivo modelo. A terceira coluna mostra a capacidade nominal de armazenamento de energia do sistema, dado em kWh. A quarta coluna mostra a profundidade máxima de descarga (DOD) de cada respectivo modelo. Esta grandeza mostra a porcentagem de energia útil das baterias do veículo.

TABELA 5.1 - VEÍCULOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

Modelo	Tipo de bateria	Capacidade de energia (kWh)	Profundidade máxima de descarga (DOD)
Modelo 1	NiMH	27.4	80%
Modelo 2	Li-ion	5.33	60%
Modelo 3	Li-ion	16	65%
Modelo 4	Li-ion	24	65%
Modelo 5	Li-ion	16	65%

5.2 Recarga não controlada

Quando não existe nenhum tipo de controle embarcado no veículo ou gerenciamento por parte de um medidor inteligente, os veículos imediatamente começam a carregar em plena carga quando são conectados até o momento em que estão completamente carregados ou estão desconectados.

Diversas referências existentes apontam que a recarga não controlada de veículos elétricos em sistemas de distribuição leva a consequências ruins para o sistema, como violações de tensão e aumento nas perdas elétricas (EVANS et.al., 2009; ACHA et. al., 2010; FARMER et. al., 2010; PAPADOPOULOS et. al., 2010; CLEMENT-NYNS et. al., 2011; DEILAMI et. al., 2011).

Na Figura 5.2 são mostradas as tensões mínimas por fase no sistema em intervalos de 15 minutos para 445 veículos, distribuídos conforme descrito anteriormente, sendo recarregados durante o período noturno.

O resultado mostrado leva à conclusão que a recarga não controlada produz violações no sistema, as quais são inaceitáveis sob condições normais de operação. Os níveis de tensão estão abaixo do limite de 0,9 pu durante grande parte do tempo, chegando a valores aceitáveis nas três fases apenas por volta de 02:00 h.

Por esta razão, o processo de recarga controlada aplicando a otimização por meio de sistemas imunológicos artificiais é aplicado conforme é descrito na seção seguinte. Dessa

forma, é possível chegar a um estado operativo geral satisfatório durante o processo de recarga.

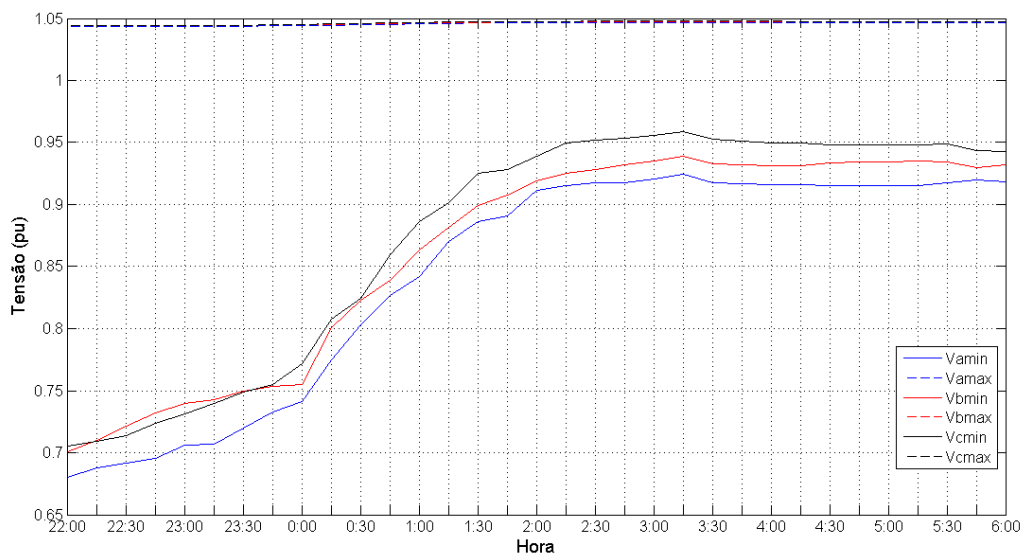


Figura 5.2 - Tensões no sistema durante a recarga não controlada

5.3 O processo de recarga controlada

Para solucionar os problemas ocorridos durante o processo de recarga não controlada e otimizar a operação de recarga de veículos, a aplicação de um esquema de recarga controlada e um processo de otimização por meio de sistemas imunológicos artificiais é proposta. O objetivo é atingir uma melhor condição operativa minimizando as perdas elétricas, evitando sobrecargas e se necessário, instalar capacitores para melhorar os níveis de tensão.

O processo ocorre conforme descrito a seguir. No início são sorteados aleatoriamente os tipos de veículos, dentre os cinco apresentados na Tabela 5.1, a serem conectados em cada nó, de acordo com as quantidades pré-determinadas para cada um. O estado de carga (SOC) do sistema de armazenamento de energia de cada veículo também é escolhido aleatoriamente, estando restrito apenas à condição de ser maior que a profundidade máxima de descarga (DOD) do mesmo, também mostrada na Tabela 5.1.

A partir de então, as potências ativa P_{no} e reativa Q_{no} de cada nó são calculadas considerando os limites impostos pelo esquema de recarga. A demanda dos consumidores residenciais é dada pelo termo P_{res} e Q_{res} , e a potência de recarga dos veículos é dada pelos termos P_{veh} e Q_{veh} , de acordo com as Equações 5.1 e 5.2. A potência máxima de recarga individual de cada veículo é de 4 kW.

$$P_{no} = P_{res} + n \cdot P_{veh} \quad (5.1)$$

$$Q_{no} = Q_{res} + n \cdot Q_{veh} \quad (5.2)$$

$$\text{Max } P_{no} = 60 \text{ kW};$$

$$\text{Max } Q_{no} = 45 \text{ kVAr};$$

$$\text{Max } P_{veh} = 4 \text{ kW};$$

n : número de veículos conectados ao nó

Para nós monofásicos $\text{Max } P_{no} = 12 \text{ kW}$ e $\text{Max } Q_{no} = 9 \text{ kVAr}$.

Depois o fluxo de potência é executado de acordo com as equações descritas no capítulo 4 desenvolvidas por Farag et. al. (2011). Para facilitar a leitura, as equações são reproduzidas a seguir. O fluxo de potência é executado usando a Equação 5.3 para a fase de varredura inversa e a Equação 5.4 para a varredura direta, de acordo com (FARAG et. al., 2011). $K_{A,B,C}$ são as matrizes de incidência para cada fase e ‘m’ representa o modelo de carga.

$$I_{ramo_{ij}}^{A,B,C} = K_{A,B,C}^{-1} \cdot \left[\frac{\text{abs}(V_{no\ i}^{A,B,C})^m \times \text{conj}(S_{carga,especificado}^{A,B,C})}{\text{conj}(V_{no\ i}^{A,B,C})} \right] \quad (5.3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{no\ j}^A \\ V_{no\ j}^B \\ V_{no\ j}^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{no\ i}^A \\ V_{no\ i}^B \\ V_{no\ i}^C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ramo_{ij}}^A \\ I_{ramo_{ij}}^B \\ I_{ramo_{ij}}^C \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Todos os carros que estiverem conectados iniciam a recarga ao mesmo tempo. O SOC de cada veículo é atualizado a cada intervalo de 15 minutos, desconectando o mesmo do sistema caso já tenha sido totalmente carregado. O processo é descrito abaixo na Figura 5.3.

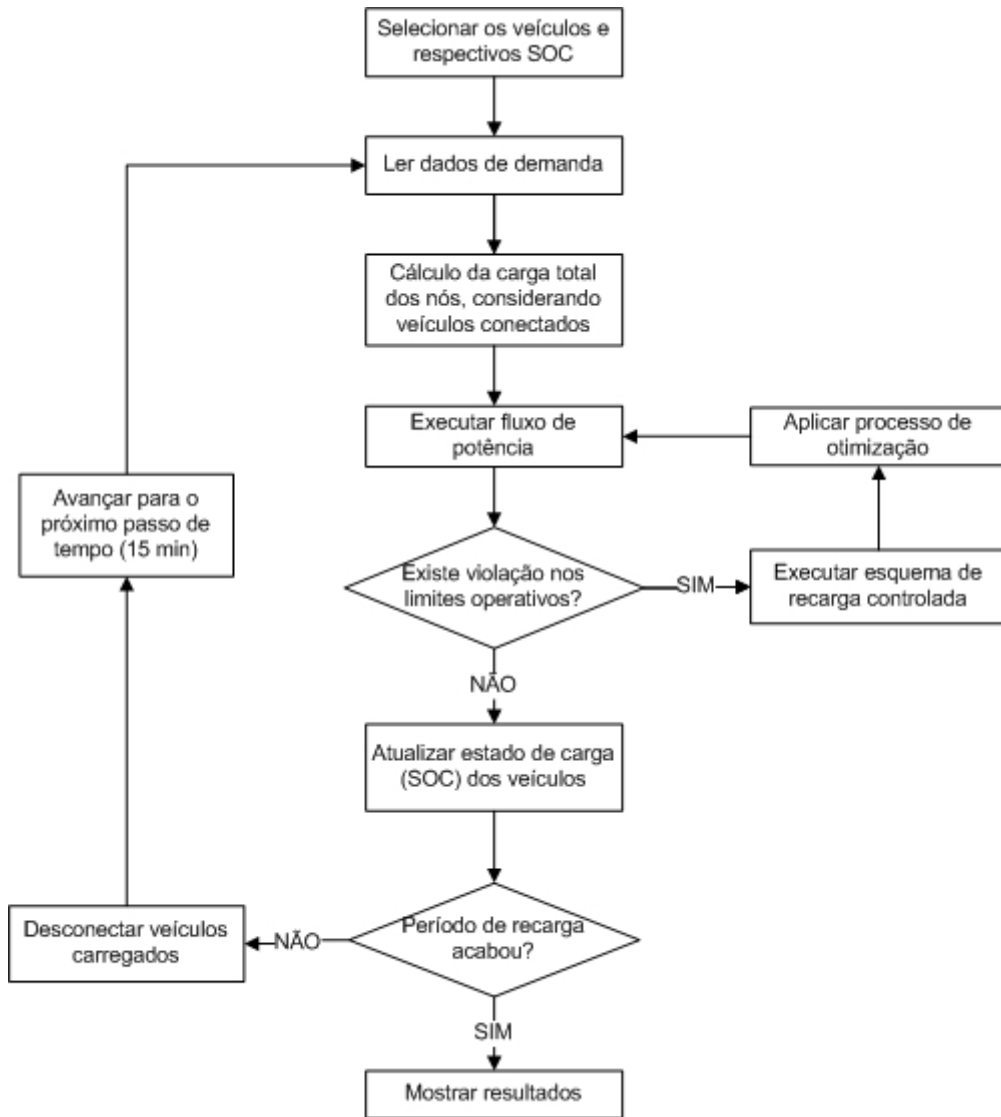


Figura 5.3 - Fluxograma do processo de recarga no sistema de distribuição

Embora o esquema de recarga controlada garanta condições operativas mínimas em um primeiro momento, o processo de otimização continua buscando a minimização das perdas elétricas, descritas na Equação 5.5, e melhorando os níveis de tensão por meio da aplicação dos sistemas imunológicos artificiais, e observando as restrições impostas.

$$\min \sum_{x=1}^j Re(S) = Re(Z_{ramo\ x} \cdot I_{ramo\ x}^2) \tag{5.5}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} V_{min} \leq V_a \leq V_{max}; V_{min} \leq V_b \leq V_{max}; V_{min} \leq V_c \leq V_{max} \\ V_{min} = 0.9; V_{max} = 1.05 \end{cases}$$

O processo de otimização é descrito a seguir e resumido na Figura 5.4, a seguir.

- O primeiro passo consiste em determinar o comprimento ‘y’ do anticorpo e a potência nominal das unidades de capacitores;
 - O próximo passo é criar um conjunto de anticorpos de primeira geração alocando capacitores aleatoriamente em nós do sistema de modo a minimizar as perdas. Cada anticorpo representa um conjunto diferente de ‘y’ capacitores instalados no sistema;
 - Executar o fluxo de potência considerando os novos capacitores instalados nos nós i , representados por um novo termo $B_{sh_no\ i}^{A,B,C}$ adicionado à potência reativa na Equação 5.3. A cada iteração um novo capacitor é instalado até que o tamanho do anticorpo seja atingido;
 - Clonar todos os anticorpos da primeira geração e classificá-los de acordo com as respectivas perdas elétricas. A quantidade de anticorpos e clones produzidos é arbitrária. Para esta simulação, foi escolhida uma quantidade dez vezes maior que o comprimento arbitrado para os anticorpos;
 - Para cada um destes anticorpos clonados, um processo de hipermutação cria uma variedade de anticorpos diferentes entre si a partir de outro. A hipermutação consiste na substituição de uma parte do anticorpo original, a qual é arbitrariamente escolhida, instalando capacitores em nós diferentes para obtenção de soluções melhores. Assim, um clone preserva uma parte do anticorpo original, mas também possui uma parte que os individualiza. Para esta simulação, 1/3 das posições foram substituídas e 2/3 foram mantidas;
 - Os clones são classificados de acordo com as respectivas perdas elétricas. Se existir algum clone com solução melhor que a do anticorpo original, ele o substitui. Os demais clones são destruídos;
 - Se não existir um clone com uma solução melhor, o anticorpo original é mantido e continua no processo. Os clones são destruídos;
 - O processo é repetido para esta nova geração de anticorpos, a qual possui uma solução melhor que a anterior, ou no mínimo igual;
 - O processo de otimização continua até que uma tolerância seja atingida entre as soluções de duas gerações.
-

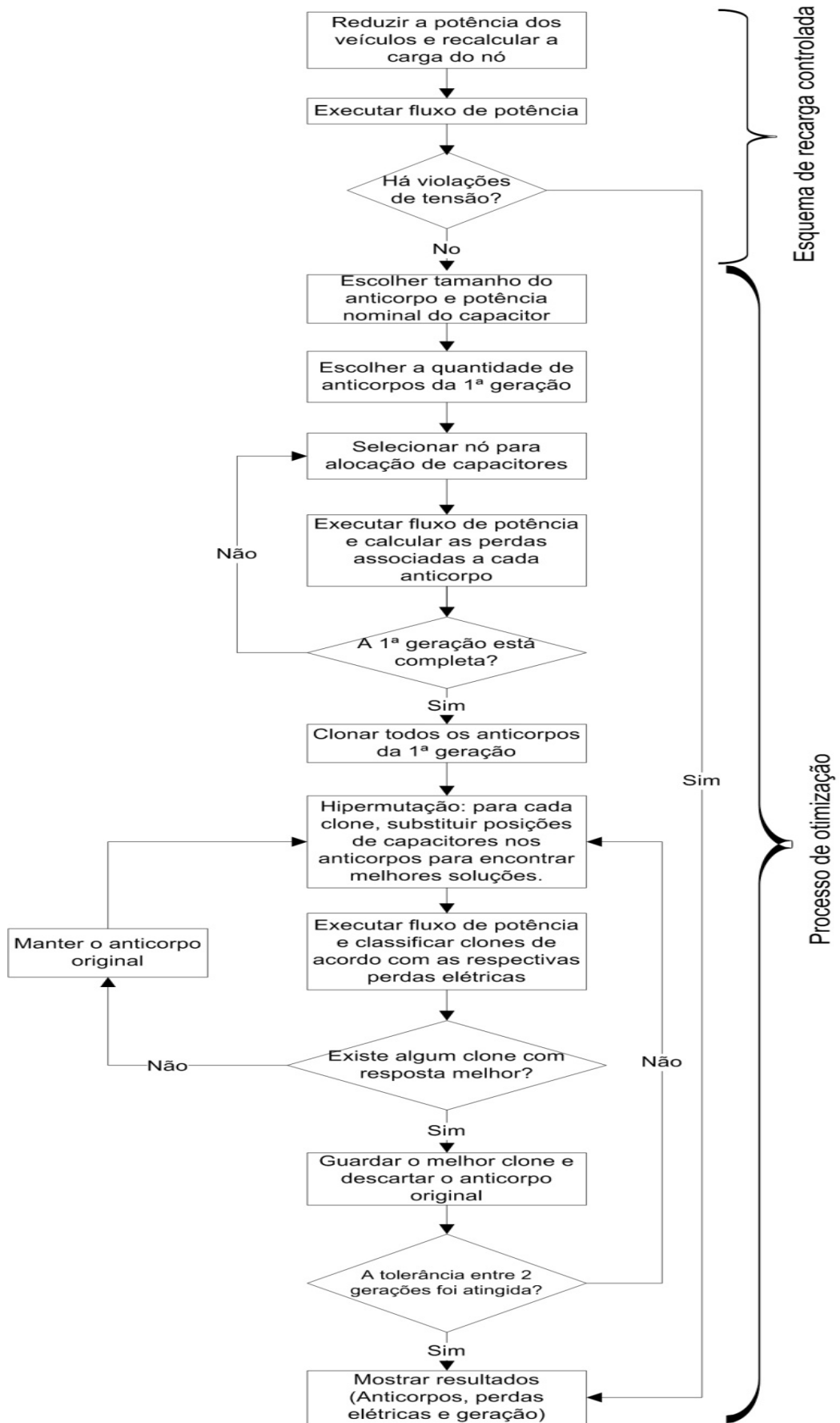


Figura 5.4 - Fluxograma do processo de otimização utilizando sistemas imunológicos artificiais

Este processo resulta em um conjunto de anticorpos de alta afinidade. Cada um deles representa as melhores posições para instalar capacitores com o objetivo de diminuir as perdas elétricas no sistema e melhorar os níveis de tensão.

Para o processo aplicando Sistemas Imunológicos Artificiais é importante enfatizar que as quantidades de anticorpos criados na primeira geração e de clones criados a cada geração são importantes para criar uma variabilidade maior, facilitando a obtenção de soluções melhores.

Se não houver violação das restrições, o SOC das baterias dos veículos é atualizado e os mesmos são desconectados quando totalmente recarregados. O processo é simulado em intervalos de 15 minutos até o final das oito horas do período noturno.

5.4 Resultados do esquema de recarga controlada

Quando o processo de recarga controlada é executado de acordo com as restrições descritas anteriormente, o medidor inteligente ou controlador embarcado calcula o ponto de carregamento do sistema de forma a respeitar as restrições impostas. Isto leva a um deslocamento da demanda durante o intervalo de recarga e nenhuma violação de tensão e carregamento é observada.

A Figura 5.5 mostra as tensões mínimas do sistema durante o período de recarga quando o esquema de recarga controlada é aplicado. O resultado mostra que este passo é suficiente para garantir a operação do sistema em um nível de tensão apropriado. Assim, nenhuma outra ação é necessária ao longo do período de recarga.

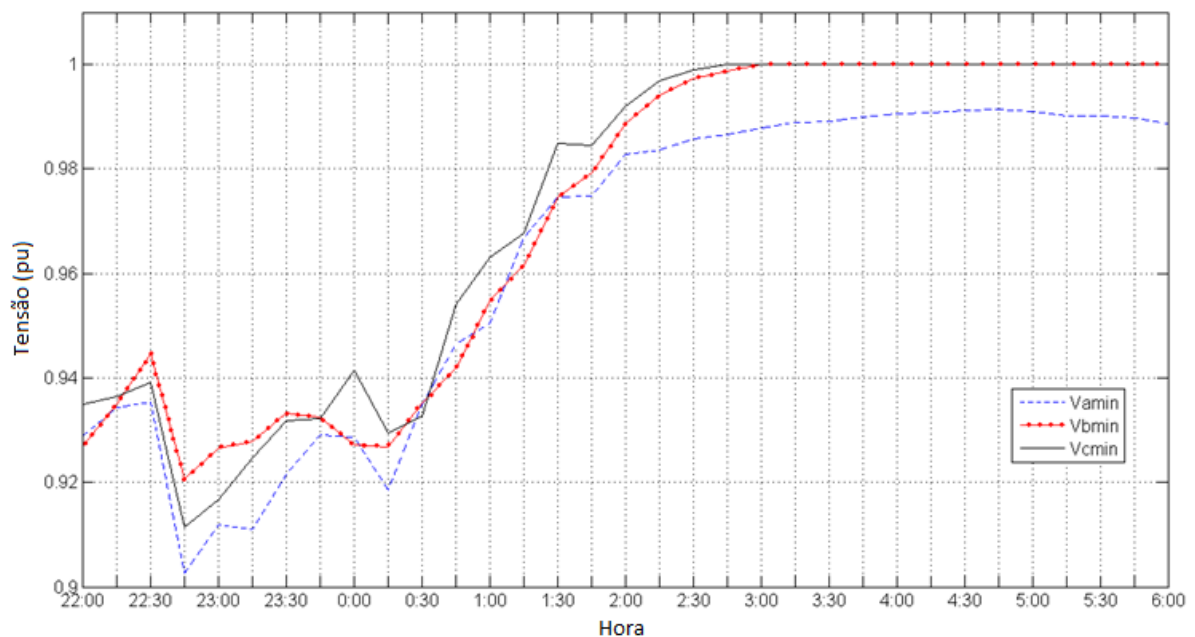


Figura 5.5 - Tensões mínimas nas fases durante o processo de recarga

5.5 Resultados do Sistema Imunológico Artificial

Agora, considerando o mesmo sistema de distribuição, mas com carregamento de 1,53 pu, maior que no exemplo anterior. Em contraste com o carregamento anterior, de 1,44 pu, este representa um incremento de 6,25 % de carga, o que acarreta problemas de tensão durante o processo de recarga.

Desta vez, o esquema de recarga controlada não é suficiente para manter o perfil de tensão dentro dos limites especificados. Assim, a segunda parte do método é empregada para a alocação de capacitores.

O resultado obtido a partir da implementação deste passo do processo de otimização é mostrado na Figura 5.6. Nesta figura são mostrados os níveis mínimos de tensão para ambos os cenários, com e sem colocação de capacitores. Em ambos os cenários existem 445 PHEVs recarregando no sistema. Na legenda, as grandezas acompanhadas por ‘org’ representam as tensões no sistema original, enquanto as grandezas acompanhadas de ‘opt’ representam as tensões no sistema otimizado.

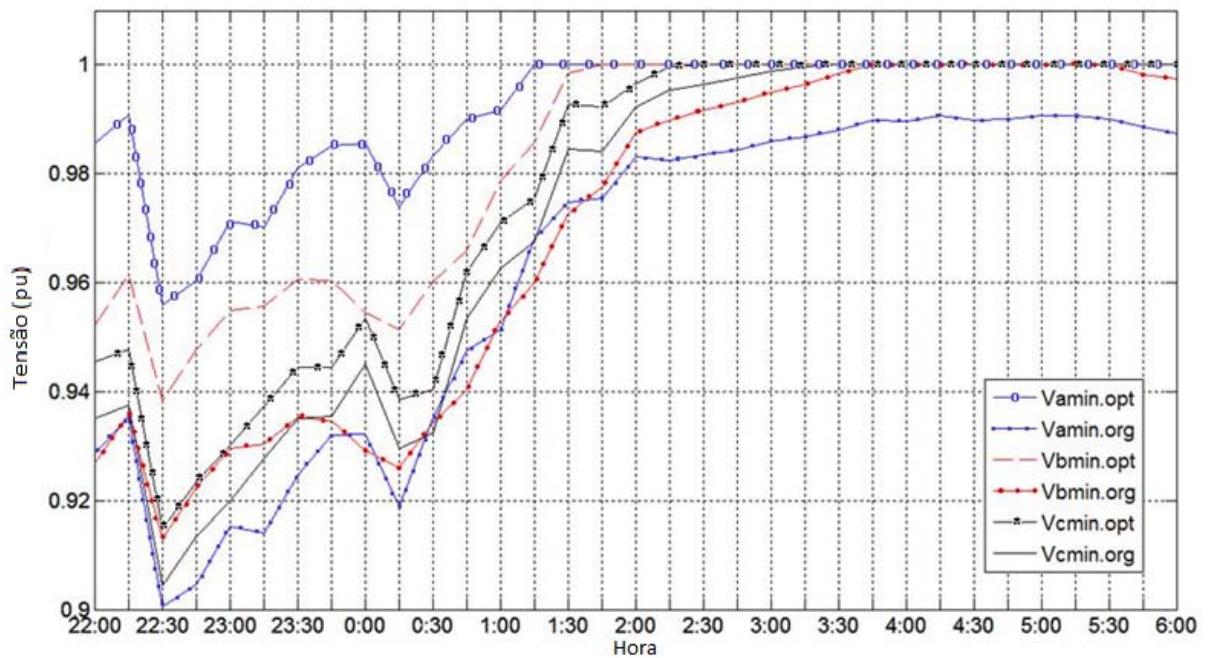


Figura 5.6 - Tensões mínimas para os casos com capacitor e sem capacitor.

A seguir alguns casos são investigados para maiores detalhes e apresentando outros resultados interessantes para discussão. Os seguintes conjuntos de anticorpos foram obtidos durante as simulações.

5.5.1 Anticorpos com 4 capacitores

Esta configuração apresenta as soluções obtidas utilizando anticorpos com quatro elementos, cada um representando um nó onde um capacitor de 100 kVAr foi instalado. É importante afirmar que são instaladas unidades de mesma potência em todas as fases existentes em determinado nó.

As sete melhores soluções são apresentadas na Tabela 5.2. Os resultados apresentam os nós onde os capacitores foram instalados nas primeiras quatro colunas; as perdas ativas resultantes sob máximo carregamento são apresentadas na quinta coluna; a perda total de energia durante todo o processo de recarga é apresentada na sexta coluna; e a geração correspondente ao anticorpo em questão é apresentada na sétima coluna. É importante frisar que os resultados mostrados neste trabalho consideram o mesmo conjunto de veículos para fins comparativos.

As perdas obtidas para este cenário sem a aplicação da otimização são de 0,2103 pu sob máximo carregamento permitido e 0,7423 pu de perdas totais de energia durante todo o processo de recarga.

TABELA 5.2 - MELHORES ANTICORPOS DE 4 CAPACITORES DE 100 kVAr

Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Perdas sob máximo carregamento(pu)	Perdas de energia(pu)	Geração
852	864	864	840	0.1638	0.6536	7
862	832	864	864	0.1639	0.6439	8
852	864	864	858	0.1643	0.6459	8
852	864	864	888	0.1652	0.6490	12
836	852	812	864	0.1744	0.6928	5
858	812	864	852	0.1750	0.6912	1
840	820	864	828	0.1760	0.7019	4

Observando os resultados apresentados na Tabela 5.2, pode-se ver que existe uma coincidência de resultados em alguns nós, como o 852 e o 864, por exemplo, que se repetem com maior frequência. Isto acontece não somente nessas respostas mostradas aqui, mas na maioria das melhores respostas. Isso mostra que a compensação de reativos nesses nós traz uma diminuição significativa nas perdas, de forma que estes estão sempre presentes nas melhores respostas.

Um resultado interessante é apresentado na linha 6 da Tabela 5.2. Nela, o anticorpo apresentado, formado por capacitores de 100 kVAr nos nós 858-812-864-852, é obtido durante a primeira geração. Isto significa que durante todo o processo, nenhum anticorpo das gerações posteriores apresentou uma solução melhor que esta. Sendo assim, este anticorpo formado na primeira geração permaneceu como a melhor solução encontrada.

Outro aspecto observado nas soluções é que a escolha de uma configuração como a melhor, depende muito do que se deseja durante todo o processo. Conforme os resultados, nem sempre a configuração que apresenta as menores perdas sob carga máxima é a mesma que garante a menor perda ao final do processo. Por exemplo, a configuração que considera os capacitores instalados em 852, 864 e 840, embora seja a que leva à perda mínima sob máximo carregamento, não garante a minimização das perdas de energia.

Tomando a primeira configuração como exemplo, com capacitores de 100 kVAr nos nós 852, 864 (2 unidades) e 840, e realizando a simulação da recarga dos veículos durante o intervalo de tempo, obtêm-se o seguinte resultado mostrado na Figura 5.7. As tensões máximas e mínimas por fase no sistema, para cada horário, são mostradas na Figura 5.8.

As perdas no sistema original são maiores do que as perdas no sistema otimizado, como esperado, sendo praticamente iguais durante as últimas horas. Isso se deve ao fato de que a maioria dos veículos já está carregada e desconectada do sistema. Quanto às tensões, observam-se tensões menores no início do processo devido ao maior carregamento do sistema com posterior aumento gradativo à medida que os automóveis vão sendo carregados.

Ainda com relação às tensões, os casos de violação do limite mínimo acontecem entre nós que se localizam nas extremidades de ramos de grande comprimento, principalmente durante as primeiras horas do processo, que correspondem às horas de maior carga.

Para resolver este problema, sugere-se que o esquema de gerenciamento da demanda seja mais elaborado, dividindo a carga de maneira mais racional durante o período inteiro para evitar que a tensão nos nós mais distantes sejam afetadas.

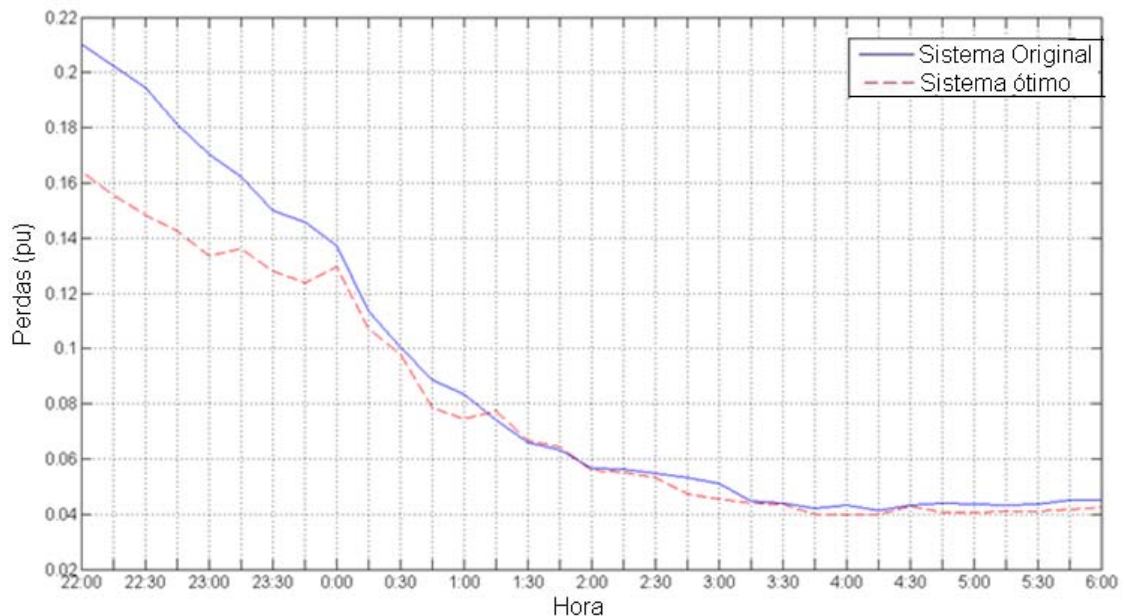


Figura 5.7 - Perdas elétricas no sistema para a configuração 1

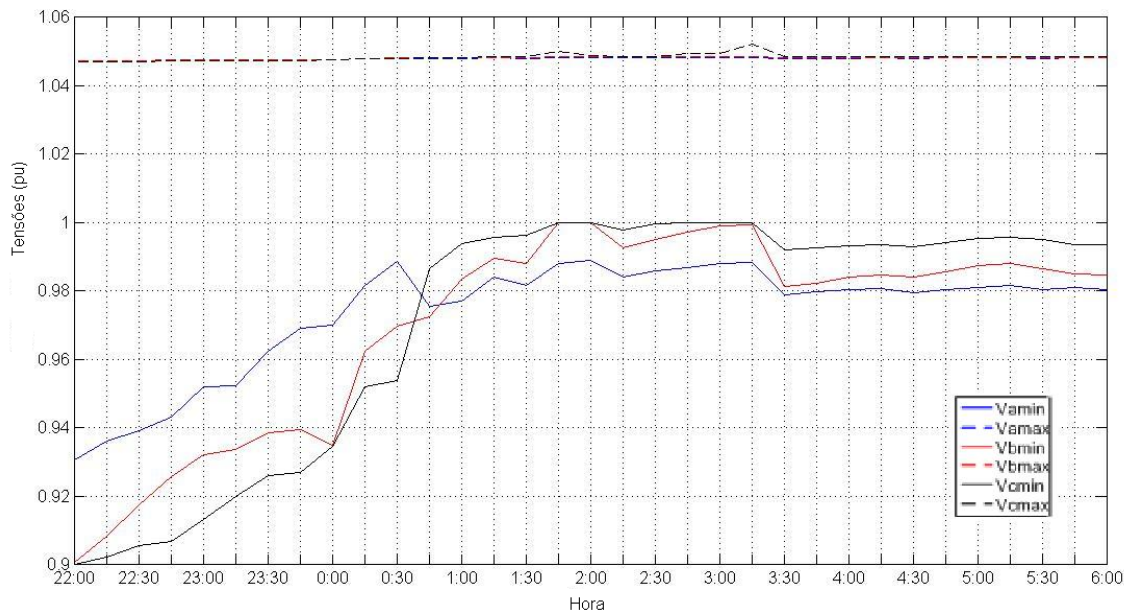


Figura 5.8 - Tensões mínimas e máximas por fase no sistema de distribuição

5.5.2 Anticorpos com 7 capacitores

Esta configuração corresponde às soluções formadas por anticorpos com sete elementos, com capacitores de 50 kVAR instalados nos locais indicados pela solução. Da mesma forma que no caso anterior, unidades de mesma potência são instaladas em cada fase existente em determinado nó.

Para esta simulação, considerou-se o mesmo conjunto de veículos do exemplo anterior, de modo que é possível comparar as soluções obtidas nos dois cenários. Da mesma forma, as perdas obtidas são respectivamente 0,2103 pu para o período de máximo carregamento, e 0,7423 pu de perdas de energia.

A Tabela 5.3 resume as melhores soluções para a configuração em questão. Das colunas 1 a 7 são apresentadas as posições onde unidades capacitivas de 50 kVAR foram instaladas; na coluna 8 são apresentadas as perdas de energia em situação de máximo carregamento, em pu; na coluna 9 são apresentadas as perdas de energia durante todo o processo de recarga, em pu; a coluna 10 apresenta a geração do respectivo anticorpo.

Da mesma maneira que no caso anterior, existem várias posições que se repetem frequentemente nas soluções, mostrando que a compensação de reativos em alguns nós é

indispensável quando se tem em vista a minimização das perdas elétricas no sistema. Estes nós são o 852, 840 e 864.

TABELA 5.3 - MELHORES ANTICORPOS DE 7 CAPACITORES DE 50 kVAr

Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5	Posição 6	Posição 7	Perdas sob máximo carregamento	Perdas de energia	Geração
852	852	840	840	864	864	864	0.1681	0.666	5
836	862	832	860	812	864	864	0.1707	0.686	1
852	852	888	862	864	864	824	0.1713	0.6923	7
854	852	840	840	864	864	840	0.1700	0.693	18
852	852	836	840	834	864	864	0.1711	0.6942	12
862	862	844	862	830	864	864	0.1707	0.6945	8
852	852	840	840	864	864	840	0.1711	0.6952	1

Da mesma forma que no exemplo anterior, alguns anticorpos são obtidos já na primeira geração, sinalizando que as soluções encontradas nas gerações posteriores não apresentaram uma solução melhor do que esta.

Considerando a melhor solução apresentada na Tabela 5.3, que representa capacitores de 50 kVAr instalados nos nós 852, 864 e 840, e realizando a simulação para o período noturno, tem-se a seguinte resposta mostrada na Figura 5.9 para as perdas do sistema e, na Figura 5.10 para as tensões no sistema durante a recarga dos veículos. Novamente os problemas de tensão se restringiram aos ramos de maior extensão, principalmente durante os períodos de carregamento máximo.

Uma diferença observada quando se comparam as curvas de tensão entre as duas configurações mínimas apresentadas é a forte queda de tensão ocorrida às 0h30min para a segunda configuração. Isto acontece devido ao chaveamento de capacitores que foram instalados durante a otimização para evitar que a fase ‘a’ ultrapassasse o limite máximo estabelecido para a tensão.

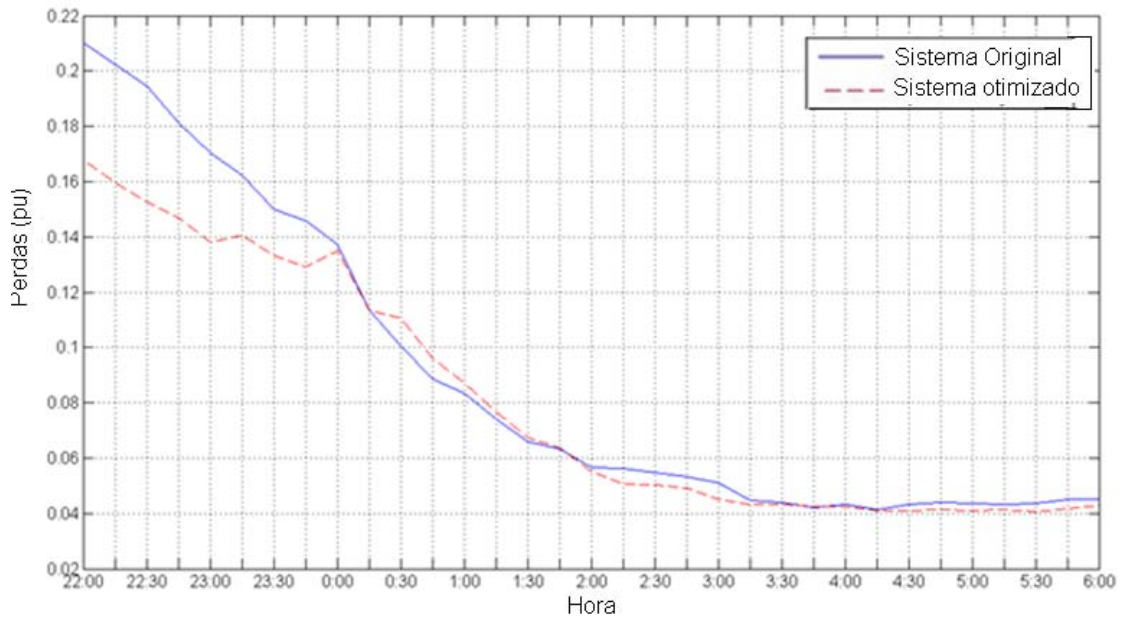


Figura 5.9 - Perdas elétricas no sistema para a configuração 2

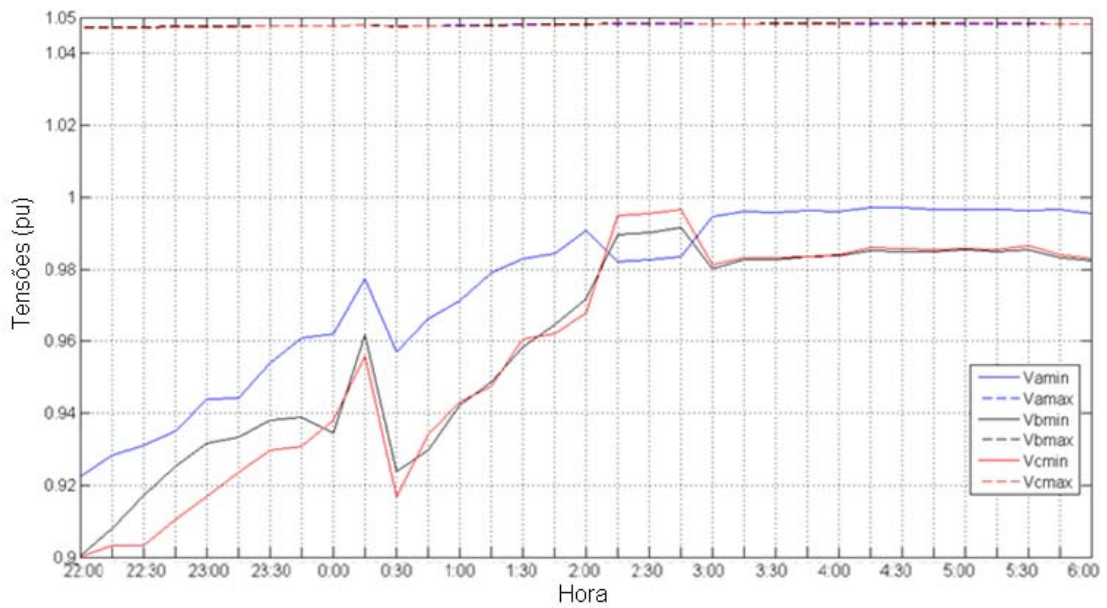


Figura 5.10 - Tensões mínimas e máximas por fase no sistema de distribuição

5.5.3 Outros resultados

Diversos outros casos com variações de máximo carregamento e número de veículos também foram simulados. Em todos eles, a minimização das perdas elétricas no

sistema apresentou bons resultados comparando ao sistema original. Alguns desses casos são apresentados a seguir.

Como exemplo, considera-se uma variação do caso 1. Neste são mantidas as restrições anteriores, resultando em um ponto de máximo carregamento de 1.53 pu. É utilizado o anticorpo apresentado na primeira linha da Tabela 5.2, correspondente a capacitores de 100 kVAr nos nós 852, 864 e 840.

Apresenta-se na Tabela 5.4 o efeito do aumento do número de veículos dentro do sistema. Consideram-se apenas as perdas de energia do processo total, já que as perdas de potência sob máximo carregamento são sempre iguais a 0,2103 pu, dado que o ponto de máximo de carregamento e o anticorpo utilizado são sempre os mesmos.

TABELA 5.4 - PERDAS PARA DIFERENTES QUANTIDADES DE VEÍCULOS

Quantidade de veículos	Perdas de energia no sistema original	Perdas de energia no sistema otimizado
445	0.7423	0.6536
610	0.7721	0.6771
765	0.7825	0.6946
885	0.7822	0.7094
955	0.7853	0.707
1230	0.7863	0.7120
1505	0.7873	0.7138
1780	0.9621	0.8604

De acordo com o resultado obtido, o aumento de veículos no sistema causa aumento das perdas elétricas no mesmo. E ainda, pode-se confirmar a eficácia do método empregado, pois em todas as situações existe uma diminuição das perdas, resultando em economia. Além disso, o perfil de tensões do sistema também é superior para o caso otimizado quando se compara os dois cenários.

As mesmas considerações podem ser feitas utilizando o caso 2. Mantendo as mesmas restrições de máximo carregamento para o sistema, de 1.53 pu, e aumentando a quantidade de veículos, tem-se o seguinte quadro mostrado na Tabela 5.5. Lembrando que foi utilizado o mesmo anticorpo de sete posições apresentado na primeira linha da Tabela 5.3, 852-852-840-840-864-864-864.

Para cada quantidade de veículos conectada, são mostradas as perdas no sistema original e no sistema otimizado. E ainda, as perdas sob máximo carregamento são iguais a 0,2103 pu em todos os casos, já que esta depende exclusivamente do máximo carregamento e do anticorpo, que são sempre iguais.

TABELA 5.5 - PERDAS PARA DIFERENTES QUANTIDADES DE VEÍCULOS

Quantidade de veículos	Perdas de energia no sistema original	Perdas de energia no sistema otimizado
445	0.7423	0.666
610	0.7721	0.7032
765	0.7825	0.7116
885	0.7822	0.7147
955	0.7853	0.7117
1230	0.7863	0.7142
1505	0.7873	0.7186
1780	0.9621	0.8547

Em outro caso investigado, no qual o ponto de máximo carregamento do sistema é de 1,45 pu, 445 veículos conectados, mas com fator de potência do sistema de aproximadamente 0.9, aumentou-se o tamanho dos anticorpos, com o mesmo conjunto de veículos para todas as análises assim como capacitores de 100 kVAr instalados em cada nó.

Os resultados são apresentados na Tabela 5.6. Na primeira coluna da mesma é mostrado o tamanho dos anticorpos considerados. Na segunda coluna é mostrada a melhor configuração do respectivo comprimento mostrado na coluna 1. Na terceira coluna é apresentada a perda sob máximo carregamento no sistema, que neste caso é de 0,2669 pu para o sistema original. Na quarta coluna são apresentadas as perdas de energia de cada configuração de acordo com os respectivos anticorpos aplicados. Para o caso original, tais perdas são de 0,9083 pu.

Além de confirmar a eficácia do método empregado, pode-se observar que o aumento na quantidade de capacitores no sistema tem como efeito uma queda mais acentuada nas perdas elétricas, uma vez que a condição de operação do sistema leva em conta o momento apropriado para chaveamento de capacitores. As respectivas perdas elétricas de cada caso estudado na Tabela 5.6 são mostradas na Figura 5.11.

TABELA 5.6 - PERDAS PARA DIFERENTES TAMANHOS DE ANTICORPOS

Quantidade de capacitores	Anticorpo escolhido (posições dos capacitores)	Perdas sob máximo carregamento (pu)	Perdas de energia (pu)
4	852 - 840 - 864 - 864	0.219	0.8065
5	852 - 864 - 854 - 864 - 818	0.2153	0.7833
6	832 - 850 - 864 - 818 - 850 - 864	0.2158	0.7959
7	864 - 840 - 814 - 822 - 806 - 864 - 864	0.2088	0.768
8	822 - 864 - 818 - 864 - 858 - 822 - 818 - 818	0.204	0.7773

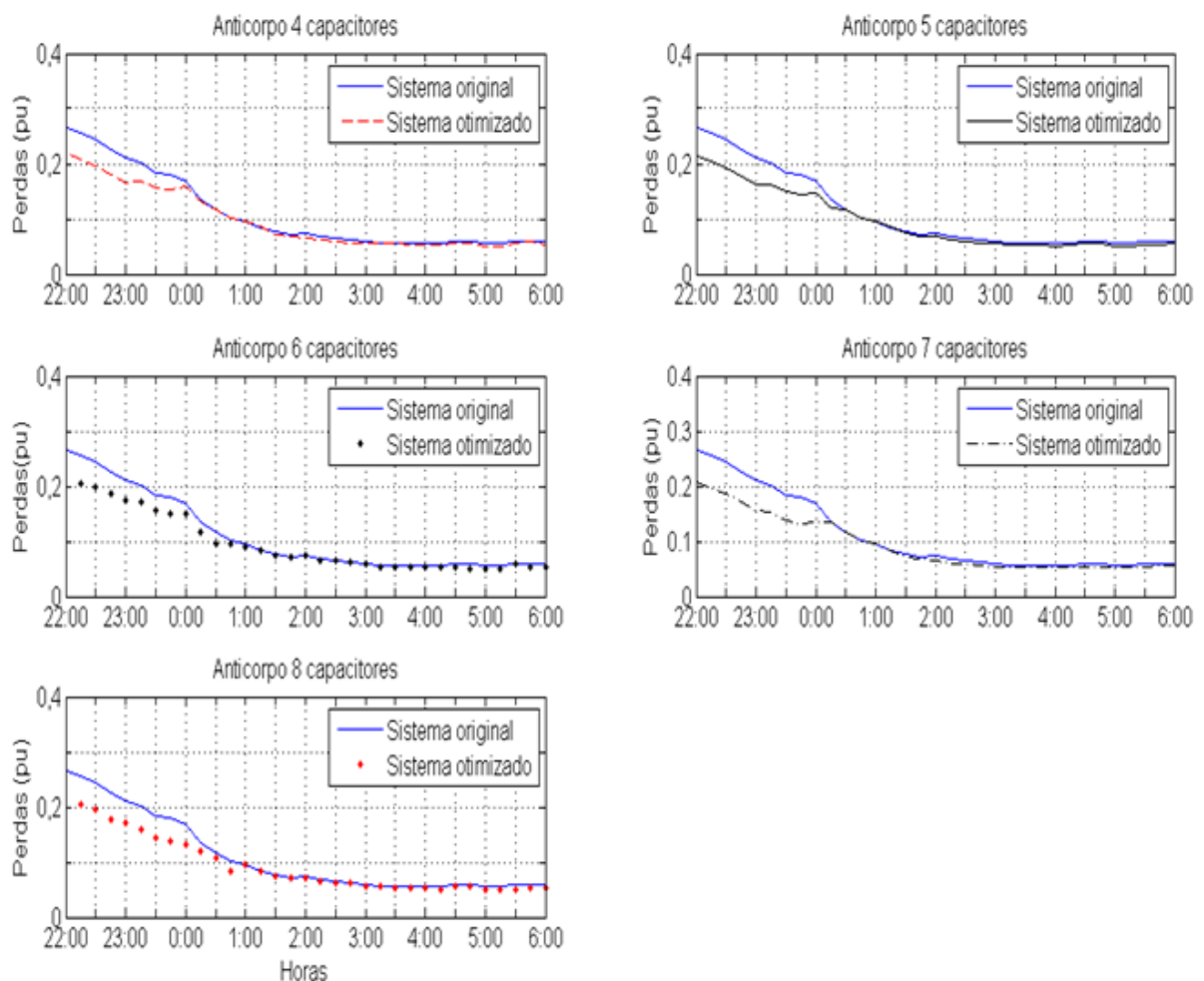


Figura 5.11 - Perdas elétricas das configurações apresentadas na Tabela 5.6

Para um cenário com um carregamento máximo de 1,623 pu e presença de 610 veículos no sistema, os menores anticorpos que possibilitaram uma solução válida têm 12 posições, cada uma com capacitores de 100 kVAr instalados nas fases existentes no respectivo nó. As doze primeiras linhas apresentam as posições onde os capacitores são

instalados no sistema; a décima terceira linha mostra as perdas sob máximo carregamento; a décima quarta linha mostra as perdas de energia do sistema; e a décima quinta linha mostra a geração do respectivo anticorpo.

Os resultados obtidos para o sistema original são de 0,3179 de perdas para o máximo carregamento permitido e de 1,4058 de perdas de energia ao final do processo. Os melhores resultados para este caso são descritos na Tabela 5.7, logo abaixo.

Tomando como exemplo o anticorpo apresentado na primeira coluna, formado por capacitores de 100 kVAr nos nós 814-830-830-852-852-852-864-820-822-864-806-864, e utilizando o mesmo durante o processo de recarga dos veículos, obtém-se o seguinte perfil de perdas elétricas mostrado na Figura 5.12.

TABELA 5.7 - ANTICORPOS COM 12 CAPACITORES DE 100 kVAr

	ANTICORPOS						
Posição 1	814	802	818	802	814	818	864
Posição 2	830	814	864	818	806	822	864
Posição 3	830	818	820	820	820	808	818
Posição 4	852	820	818	810	822	814	808
Posição 5	852	810	814	818	806	830	852
Posição 6	852	818	852	864	864	830	852
Posição 7	864	818	852	814	864	818	852
Posição 8	820	852	830	830	852	802	800
Posição 9	822	852	852	830	852	852	820
Posição 10	864	830	830	852	852	822	814
Posição 11	806	852	826	852	830	852	830
Posição 12	864	830	822	852	830	852	830
Perdas sob máximo carregamento	0.2665	0.2794	0.2738	0.2786	0.2787	0.2819	0.2772
Perdas de energia	1.2477	1.2669	1.2508	1.2234	1.2543	1.2804	1.2548
Geração	1	165	1	111	81	5	1

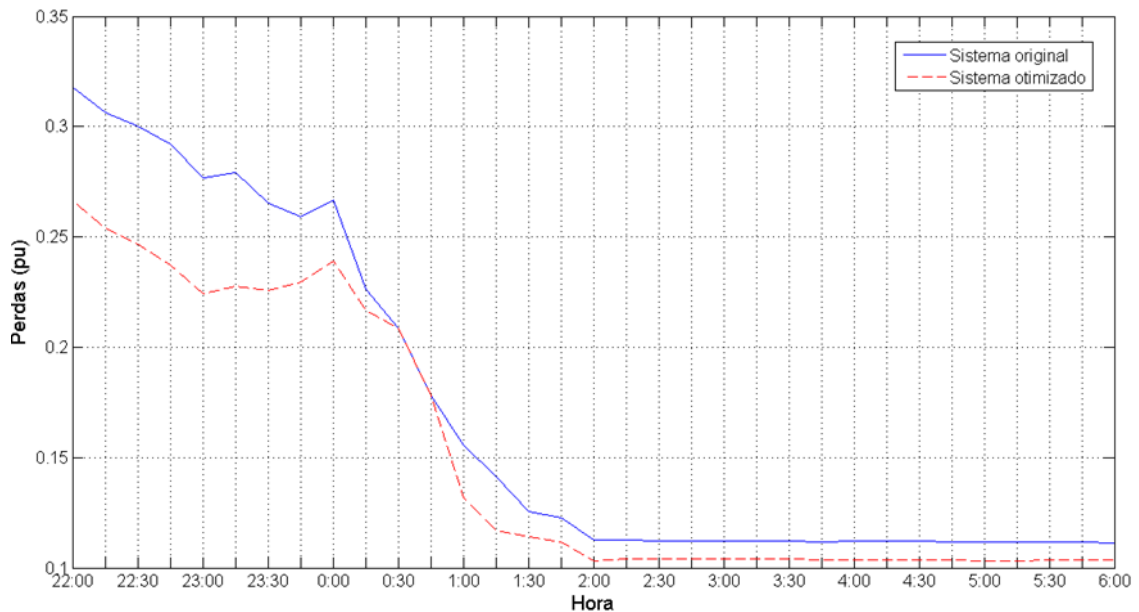


Figura 5.12 - Perdas elétricas no sistema para configuração com 12 capacitores

Os cenários considerados durante as simulações apresentam características próprias que resultam nas soluções encontradas, como por exemplo: um número determinado de veículos conectados; um perfil de carga residencial de determinado dia; configurações fixas de anticorpos; e horários restritos de recarga.

Assim, a viabilidade prática de implementação das soluções pode ser vista como um problema, visto que não existem garantias de que, por exemplo, uma configuração ótima de um determinado dia seria também ótima, ou até mesmo viável, para o dia seguinte.

No entanto, mesmo considerando aplicações reais nas quais nenhum destes aspectos anteriormente citados é determinístico, o método proposto ainda se mostra válido devido aos princípios empregados no desenvolvimento de uma política de recarga de veículos e minimização de perdas em sistemas de distribuição.

Embora a demanda seja uma grandeza estocástica e possua variações diárias, tais variações podem ser medidas de acordo com distribuições de probabilidades, como a distribuição gaussiana. De acordo com tal função, percebe-se que a carga média possui maior possibilidade de ocorrência e os eventos com maior ou menor carga possuem probabilidades decrescentes.

Assim, a preocupação se resume aos eventos nos quais a carga apresenta desvio padrão elevado, apresentando uma demanda maior que a média. Observando a curva gaussiana, percebe-se que tais eventos possuem uma probabilidade pequena de ocorrência.

Para estes casos, o esquema de recarga controlada funciona da mesma forma, limitando o carregamento total do sistema através do gerenciamento da potência de recarga dos veículos conectados de acordo com as restrições impostas pela configuração adotada. Assim, apenas o tempo de recarga completa de cada veículo seria maior que em situações normais.

Relativo à quantidade de veículos conectados ao sistema, pode-se considerar que esta é praticamente constante, dado as considerações iniciais do problema, onde se realiza o processo de recarga em área residencial e sem possibilidade de recarga fora do horário pré-estabelecido. Assim, variações bruscas nesta grandeza não são eventos comuns.

Alguns cenários com número crescente de veículos foram apresentados anteriormente. Os resultados obtidos mostraram que a política de recarga proposta funciona bem, independentemente da quantidade de veículos existente. Em relação às perdas elétricas, observa-se que os benefícios se mantêm independentemente da quantidade de veículos.

Quanto à dimensão dos anticorpos, a escolha das configurações com quatro unidades de capacitores de 100 kVAr e de sete unidades de capacitores de 50 kVAr é meramente ilustrativa. Conforme resultados apresentados anteriormente, existem outros anticorpos com maior número de capacitores que podem ser escolhidos em detrimento destes apresentados.

A consequência imediata da escolha de anticorpos de configurações diferentes, contando com maior número de capacitores, é a flexibilização da operação do sistema. Assim, por meio da escolha de uma configuração com maior número de capacitores é possível abranger um maior número de estados operativos do sistema.

Como exemplo disto, cita-se a possibilidade de uso de uma das configurações apresentadas na Tabela 5.7, que contém anticorpos com 12 capacitores de 100 kVAr de potência nominal. A aplicação desta configuração a um cenário de recarga de 610 veículos foi apresentada na Figura 5.12. Seguindo o mesmo procedimento, o mesmo anticorpo ou qualquer outro de mesmo tamanho pode ser usado na recarga de 445 ou 1780 veículos, mudando apenas as ações de controle para operação do sistema durante o período considerado.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES

As diversas transformações exigidas do setor elétrico visam ao desenvolvimento de um sistema capaz de suprir a demanda energética crescente com alta qualidade, continuidade elevada, confiabilidade, sustentabilidade e respeito ao meio ambiente.

Dentro deste novo cenário, conforme mencionado, o planejamento do sistema elétrico deve partir da concepção de uma infraestrutura dinâmica, incluindo novas tecnologias inteligentes, formas de controle global, capacidade de expansão, versatilidade, flexibilidade, conservação e eficiência energética.

Além disso, ainda existe a necessidade de integração de novas tecnologias presentes no cotidiano ao sistema elétrico. Dentre estas, pode-se citar o exemplo dos veículos elétricos e híbridos recarregáveis, os quais são uma nova tendência dentro do mercado automobilístico cada vez mais competitivo e, que sinaliza pelo emprego de tecnologias mais limpas no futuro, em substituição aos derivados do petróleo.

Os carros elétricos e híbridos caracterizam-se pelo uso de um ou mais motores elétricos ligados a um eixo de transmissão ou diretamente às rodas. Os veículos elétricos ainda possuem baixa autonomia devido aos respectivos sistemas de armazenamento de energia, cuja tecnologia ainda não permite grande autonomia.

Já os modelos híbridos contam também com um motor de combustão interna, de menor porte, que pode fornecer energia ao motor elétrico, aumentando a autonomia do veículo e possibilitando uma popularização mais rápida dentro do mercado. Também possuem maior eficiência, baixas emissões e menor ruído que os modelos convencionais.

A recarga dos veículos híbridos e elétricos nos sistemas de distribuição se tornará um problema à medida que este segmento se popularizar. Um grande contingente de veículos recarregando as baterias ao mesmo tempo pode ocasionar diversos problemas em nível de distribuição, conforme já explicado em diversas referências. Dentre estes problemas, podem-se citar violações de limites mínimos de tensão; sobrecargas em circuitos, condutores e transformadores de distribuição; aumento de harmônicos e de correntes de falta.

Diante destas implicações, a recarga das baterias dos veículos elétricos e híbridos vem sendo estudada e diversas soluções já foram apresentadas para que os efeitos nas redes de distribuição sejam minimizados.

Durante este trabalho foi desenvolvida uma proposta de um esquema de recarga controlada de veículos elétricos em sistemas de distribuição. A recarga é realizada no período noturno nas próprias residências durante um período de 8 horas, das 22:00 h até às 6:00 h do dia seguinte.

A idéia fundamental parte de um esquema organizado de recarga, que obedece a restrições de carregamento do sistema para evitar que os limites mínimos de tensão sejam violados e ocorram sobrecargas. O esquema proposto também assume a possibilidade de recarga apenas durante o horário permitido e somente na residência do proprietário.

Um segundo passo otimiza o processo, aplicando os sistemas imunológicos artificiais para minimização das perdas elétricas do sistema. A aplicação deste passo permite um maior carregamento do sistema, além de garantir melhores níveis de tensão e minimizar as perdas elétricas do mesmo.

Isto é realizado por meio da alocação de capacitores no sistema em busca de soluções ótimas. Cada solução é formada por um conjunto diferente de capacitores instalados no sistema. A cada conjunto deste se deu o nome de anticorpo.

O processo descrito durante o trabalho produz um conjunto de soluções diferentes, as quais podem ser implantadas no sistema de acordo com as necessidades encontradas e tendo em vista outros parâmetros, sobretudo financeiros.

A aplicação do esquema de recarga proposto durante o trabalho mostrou bons resultados, minimizando as perdas elétricas e mantendo os níveis de tensão adequados. Além disso, o deslocamento da demanda durante o período de recarga foi importante para o sucesso do esquema como um todo.

O trabalho é uma contribuição no estudo do tema da recarga de veículos elétricos em sistemas de distribuição, seguindo a tendência de aplicar esquemas de recarga controlada e propondo a aplicação da técnica de sistemas imunológicos artificiais para minimização de perdas, ainda não empregada com este objetivo.

Além desta contribuição, existe também o fato de ser um trabalho pioneiro realizado e publicado por pesquisadores brasileiros sobre o tema, já que até o presente momento em que a proposta foi elaborada e executada não se encontrou referências de autores brasileiros versando sobre o tema.

6.1 Temas para trabalhos futuros

Existem ainda muitas questões relacionadas à integração de veículos elétricos em sistemas de distribuição que podem ser objetos de pesquisa.

Por exemplo, podem-se citar os temas relacionados ao controle dos veículos; estruturas e meios eficientes de comunicação; desenvolvimento de técnicas de controle inteligente; desenvolvimento de dispositivos eletrônicos para realização de diversas tarefas, dentre muitas outras possibilidades.

Alguns tópicos que abrem caminhos para novas discussões que podem ser abordadas futuramente em outros trabalhos se relacionam à:

- Integração de veículos elétricos e fontes renováveis em sistemas de distribuição de energia;
 - Investigação das possibilidades de remuneração de serviços *ancilares* por meio de V2G para veículos elétricos no sistema brasileiro;
 - Pesquisa dos aspectos econômicos relacionados à integração de veículos elétricos em sistemas de distribuição;
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHA, S.; GREEN, T. C.; SHAH, N.; “Effects of Optimized Plug-in Hybrid Vehicle Charging Strategies on Electric Distribution Network Losses”. In: 2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, p.1-6, 2010.

AMJADI, Z.; WILLIAMSON, S. S.; “Power-Electronics-Based Solutions for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Energy Storage and Management Systems”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 2, pp. 608-616, 2010.

ARAVINDHABABU, P.; ASHOKKUMAR, R.; “A robust decoupled power flow for distribution systems”. Energy Conversion and Management, No. 52, pp. 1930-1933, 2011.

BABAEI, S.; STEEN, D.; TUAN, L. A.; CARLSON, O.; BERTLING, L.; “Effects of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Systems: A Real Case of Gothenburg”, In: 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, ISGT Europe, pp. 1-8, Gotenburgo, Suécia, 2010.

BROADWATER, R.P.; CHANDRASEKARAM, A.; HUDDLESTON, C.T.; KHAN, A.H.; “Power Flow Analysis of Unbalanced Multiphase Radial Distribution Systems”, *Electric Power System Research*, vol. 14, 1988.

CASTRO, L. N. DE; VON ZUBEN, F. J.; “Artificial Immune Systems: Part I – Basic Theory and Applications”. Technical Report, DCA-RT 01/99, UNICAMP, Brasil, 1999.

CASTRO, L. N. DE; VON ZUBEN, F. J.; “Artificial Immune Systems: Part II - A Survey of Applications”. Technical Report, DCA-RT 02/00, UNICAMP, Brasil, 2000.

CASTRO, L. N. DE; VON ZUBEN, F. J.; “Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle”. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 3, pp. 239-251, 2002.

CHEN, T. H.; CHEN, M.S.; HWANG, K. J.; KOTAS, P.; CHEBLI, E. A.; “A Distribution System Power Flow Analysis - A Rigid Approach”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 3, pp. 1146-1152, 1991.

CHENG, C.S.; SHIRMOHAMMADI, D.; “A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 671-679, 1995.

CLEMENT-NYNS, K.; VAN REUSEL, K.; DRIESEN, J. “The consumption of electrical energy of plug-in hybrid electric vehicles in Belgium”, In: 2nd European Electric-Drive Transportation Conference, Bruxelas, Bélgica, 2007.

CLEMENT-NYNS, K.; HAESSEN, E.; DRIESEN, J. “Analysis of the Impact of Plug-In Hybrid Electric Vehicles on Residential Distribution Grids by using Quadratic and Dynamic Programming”. World Electric Vehicle Journal, No.3, 2009a.

CLEMENT-NYNS, K.; HAESSEN, E.; DRIESEN, J. “Coordinated charging of multiple plug-in hybrid electric vehicles in residential distribution grids”. In: Power Systems Conference and Exposition, PSCE-09, Seattle, Washington, EUA, 2009b.

CLEMENT-NYNS, K.; HAESSEN, E.; DRIESEN, J. “The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid”. IEEE Transactions on Power Systems, No. 25, pp. 371-380, 2010.

CLEMENT-NYNS, K.; HAESSEN, E.; DRIESEN, J.; “The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid”. Electric Power Systems Research, No. 81, pp. 185-192, 2011.

-
- DE NIGRIS, M.; GIANINONI, I.; GRILLO, S.; MASSUCCO, S.; SILVESTRO, F.; "Impact Evaluation of Plug-in Electric Vehicles (PEV) on Electric Distribution Networks", In: 2010 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, pp. 1-6, Bergamo, Itália, 2010.
- DEILAMI, S.; MASOUM, A. S.; MOSES, P. S.; MASOUM, M. H. S.; "Real-Time Coordination of Plug-in Electric Vehicle Charging in Smart Grids to Minimize Power Losses and Improve Voltage Profile ". IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No. 3, pp. 456-467, 2011.
- DORRELL, D.G.; KNIGHT, A.M.; POPESCU, M.; EVANS, L.; STATON, D.A.; "Comparison of different motor design drives for hybrid electric vehicles". In: IEEE Energy Conversion Congress and Exposition 2010, ECCE2010, pp. 3352-3359, Atlanta, Estados Unidos, 2010.
- EMADI, A.; LEE, Y. J.; RAJASHEKARA, K.; "Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 6, pp. 2237-2245, junho 2008.
- EVANS, P. B.; KULLOOR, S.; KROPOSKY, B.; "Impacts of Plug-in Vehicles and Distributed Storage on Electric Power Delivery Networks", In: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC'09, pp. 838-846, Dearborn, EUA, 2009.
- FARAG, H. E.; EL-SAADANY, E.F.; EL SHATSHAT, R.; ZIDAN, A.; "A generalized power flow analysis for distribution systems with high penetration of distributed generation". Electric Power Systems Research, No. 81, pp. 1499-1506, 2011.
- FARHANGI, H. "The Path of the Smart Grid", IEEE Power & Energy Magazine, Vol. 8, No. 1, pp.18-28, janeiro/fevereiro 2010.
- FARMER, C.; HINES, P.; DOWDS, J.; BLUMSACK, S.; "Modeling the Impact of Increasing PHEV Loads on the Distribution Infrastructure", In: Proc. Of 43rd Hawaii International Conference on System Sciences 2010, pp. 1-10, Hawaii, EUA, 2010.
- GALUS, M. D.; ZIMA, M.; ANDERSSON, G.; "On integration of plug-in hybrid electric vehicles into existing power system structures", Energy Policy Journal, 38 (2010) 6739-6745.
- GAO Y.; GAY, S.E.; EHSANI, M.; THELEN, R.F.; HEBNER, R.E., "Flywheel electric motor/generator characterization for hybrid vehicles", In: IEEE Vehicular Technology Conference 2003, VTC2003, vol. 5, pp 3321-3325, Orlando, Estados Unidos, 2003.
- GARCIA, A. V.; MONTICELLI, A.; FRANÇA, A. M.; TANAKA, M.; MURARI, C. A. F.; "Automatização da Distribuição de Energia Elétrica: Simulação utilizando Fluxo de Carga Desacoplado Rápido".In: 5º Congresso Brasileiro de Automática, pp. 256-261, Campina Grande, 1984.
- GARCIA, A. V.; ZAGO, M. G.; "Fluxo de Carga Desacoplado Trifásico". In: SBA Controle & Automação, Vol. 7, No. 1, pp. 1-6, Janeiro-Fevereiro-Março-Abril, 1996.
- GUYTON, A.C.; HALL, J.E. "Tratado de Fisiologia Médica". 11^a ed., Rio de Janeiro, Elsevier Ed., 2006.
- HASSAN R.; RADMAN, G. "Survey on Smart Grids", In: Proc. IEEE SoutheastCon 2010, pp. 210-213, março 2010.
- IPAKCHI A.; ALBUYEH, F. "Grid of the Future", IEEE Power & Energy Magazine, Vol. 7, No. 2, pp. 52-62, março/abril 2009.
- KARDEN, E.; PLOUMEN, S.; FRICKE, B.; MILLER, T.; SNYDER, K.; "Energy storage devices for future hybrid electric vehicles". Journal of Power Sources, No. 168, pp. 2-11, 2007.
- KARPLUS, V. L. "Prospects for Plug-in Hybrid Electric Vehicles in the United States: A General Equilibrium Analysis". Dissertação de mestrado, Instituto de Tecnologia de Massachussets, Estados Unidos, 2008.
-

KEMPTON, W.; TOMIĆ, J.; “Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue”, *Journal of Power Sources*, No. 144, pp. 268–279, 2005a.

KEMPTON, W.; TOMIĆ, J.; “Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy”, *Journal of Power Sources*, No. 144, pp. 280–294, 2005b.

KERSTING, W.H.; “*Radial distribution test feeders*”, In: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. Available in: <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/>.

KHALIGH A.; LI Z.; “Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art”. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 59, No. 6, pp. 2806-2814, julho 2010.

KRAMER, B.; CHAKRABORTY, S.; KROPOSKI, B. “A Review of Plug-in Vehicles and Vehicle-to-Grid Capability” In: *Proc. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, pp. 2278–2283, 2008.

KRISTOFFERSEN, T. K.; CAPION, K.; MEIBOM, P.; “Optimal charging of electric drive vehicles in a market environment”. *Journal of Applied Energy*, No. 88, pp. 1940-1948, 2011.

LETENDRE, S.; DENHOLM, P.; LILIENTHAL, P. “Electric and Hybrid Vehicles: New Load or New Resource?” *Public Utilities Fortnightly*, pp 28-37, December 2006.

LIN, S.; HE, Z.; ZANG, T.; QIAN, Q.; “Impact of Plug-In Hybrid Electric Vehicles on Distribution Systems”, In: *International Conference on Power System Technology, POWERCON*, pp. 1-5, 2010.

MAITRA, A.; KOOK, K. S.; GIUMENTO, A.; TAYLOR, J.; BROOKS, D.; ALEXANDER, M.; DUVALL, M.; “Evaluation of PEV Loading Characteristics on Hydro-Quebec’s Distribution System Operations”, In: *24th Electric Vehicle Symposium, Stavanger, Noruega*, pp. 1–11, maio 2009.

MOSLEHI, K.; KUMAR, R. “A Reliability Perspective of the Smart Grid”. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, No.1, junho 2010.

NELSON, R. F.; “Power requirements for batteries in hybrid electric vehicles”. *Journal of Power Sources*, No. 91, pp. 2-26, 2000.

PAPADOPOULOS, P.; SKARVELIS-KAZAKOS, S.; GRAU, I.; AWAD, B.; CIPCIGAN, L. M.; JENKINS, N.; “Impact of Residential Charging of Electric Vehicles on Distribution Networks, a Probabilistic Approach”, In: *45th International Universities Power Engineering Conference, UPEC*, pp.1-5, 2010.

PARSLOW, T. G.; STITES, D. P.; TERR, A. I.; IMBODEN, J. B.; “*Imunologia Médica*”. 10^a ed., Guanabara-Koogan, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

QUINN, C.; ZIMMERLE, D.; BRADLEY, T. H.; “The effect of communication architecture on availability, reliability, and economics of plug-in hybrid electric vehicle-to-grid ancillary services”. *Journal of Power Sources*, No. 195, pp. 1500-1509, 2010.

RAHMAN, M. A.; QIN, R.; “A Permanent Magnet Hysteresis Hybrid Synchronous Motor for Electric Vehicles”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 44, No.1, pp. 46-53, fevereiro 1997.

RAHMAN, T. K. A.; SULIMAN, S. L.; MUSIRIN, I.; “Artificial Immune-Based Optimization for Solving Economic Dispatch in Power System”. *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3931, pp 338-345, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2006.

SANNA, L., “Driving the solution: the plug-in hybrid vehicle”, *EPRI Journal*, pp. 8-17, 2005

SANTACANA, E.; RACKLIFFE, G.; TANG L.; FENG, X. “Getting smart”, *IEEE Power & Energy Magazine*, Vol. 8, No. 2, pp.41-48, março/abril 2010.

SATHYANATH, S.; SAHIN, F.; “Application of artificial immune system based intelligent multi agent model to a mine detection problem”. In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 3, pp. 6, 2002.

SHAO, S.; PIPATTANASOMPORN, M.; RAHMAN, S.; “Challenges of PHEV penetration to the residential distribution network”. In: Proc. IEEE/PES General Meeting 2009, pp.1-8, 2009.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X.; “A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 753-762, maio 1988.

SORTOMME, E.; HINDI, M. M.; MACPHERSON, S. D. J.; VENKATA, S. S.; “Coordinated Charging of Plug-In Hybrid Electric Vehicles to Minimize Distribution System Losses”, IEEE Transactions on Smart Grid, V.2, No.1, pp.198-205, março 2011.

SOVACOOOL, B. K.; HIRSH, R. F. “Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and vehicle-to-grid (V2G) transition”, Energy Policy Journal, No. 37, pp. 1095-1103, 2009.

SRINIVAS, M. S.; “Distribution Load Flows: A brief review”. In: Proc. of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol 2, pp. 942-945, Cingapura, 2000.

TAYLOR, J.; MAITRA, A.; ALEXANDER, M.; BROOKS, D.; DUVALL, M.; “Evaluations of Plug-in Electric Vehicle Distribution System Impacts”, In: 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp.1-6, Minneapolis, EUA, 2010.

THELEN, R.F.; GATTOZZI, A.; WARDELL, D.; WILLIAMS, A.; “A 2-MW Motor And ARCP Drive for High-Speed Flywheel”. In: 32th IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC2007, pp. 1690- 1694, Anaheim, Estados Unidos, 2007.

TOMIC, J.; KEMPTON, W. “Using fleets of electric-drive vehicles for grid support”. Journal of Power Sources, No. 168, pp. 459–468, 2007.

VOJDANI, A. “Smart Integration”, IEEE Power & Energy Magazine, Vol. 6, No. 6, pp.71-79, novembro/dezembro 2008.

WANG, C.; LIANG, X.; CHAPELSKY, C.; KOVAL, D.; KNIGHT, A.M.; “Application of a flywheel system in series hybrid transit bus”. In: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC2009, pp. 1529-1534, Dearborn, Estados Unidos, 2009.

WIRASINGHA S. G.; SCHOFIELD N.; EMADI, A. “Plug-in hybrid electric vehicle developments in the US: trends, barriers, and economic feasibility”, In: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Harbin, China, 2008.

Internet:

IEEE-USA, Board of Directors, Position Statement: Plug-in Electric Hybrid Vehicles, 15 June 2007, www.ieeeusa.org/policy.

IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers); “IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems”, IEEE 1547-2003, IEEE, 2003.

TOYOTA - www.toyota.com/prius-hybrid/specs.html

NISSAN - www.nissan.com.br/carros/leaf

GENERAL MOTORS - www.gm.com

MITSUBISHI MOTORS - www.mitsubishi-motors.com

APÊNDICES

A. Traduzindo o problema dos sistemas imunológicos artificiais

Os sistemas imunológicos artificiais, técnica de otimização aplicada neste trabalho, reproduzem computacionalmente algumas características e processos dos sistemas imunológicos. Para tanto, tais características são aplicadas através de metáforas, cujo significado geralmente foge ao entendimento da engenharia por conter termos técnicos de outras áreas, como medicina e biologia.

Este apêndice tem como objetivo ajudar no entendimento das principais metáforas aplicadas neste trabalho. Maiores informações podem ser consultadas no glossário de (CASTRO et. al., 1999).

- *Anticorpo*: molécula de proteína solúvel produzida e secretada pelos linfócitos B em resposta à presença de antígenos, a qual é capaz de se ligar a um antígeno específico. Traduzindo para o problema de otimização, o anticorpo é a solução do problema que satisfaz a função objetivo. Particularmente neste caso, trata-se do conjunto de nós onde os capacitores são instalados;
 - *Antígeno*: qualquer agente que, quando introduzido no corpo, é reconhecido pelo sistema imunológico e prontamente combatido. Para este problema, o antígeno é a função objetivo ou qualquer outra equação a ser calculada;
 - *Clone*: um grupo de células ou organismos geneticamente semelhantes que descendem de um ancestral comum; múltiplas cópias idênticas reproduzidas a partir de um antecessor comum. Neste caso, os clones são apenas cópias da mesma solução;
 - *Seleção clonal*: teoria que afirma que a resposta imunológica é realizada pelos anticorpos de maior afinidade obtidos a partir de um processo evolutivo onde os melhores indivíduos são escolhidos a cada geração. Para
-

esta aplicação, é equivalente a afirmar que o processo de busca encontra a melhor solução através da seleção e clonagem das melhores soluções de uma geração anterior;

- *Hipermutação*: altas taxas de mutações somaticamente introduzidas nos genes dos anticorpos. Essas mutações são realizadas a partir de recombinação de genes durante a reprodução dos anticorpos. Para este problema, o processo de hipermutação é executado quando algumas posições de capacitores são mudadas para atingir uma menor perda elétrica, ou seja, uma resposta melhor;
 - *Maturação*: processo de desenvolvimento e produção de anticorpos de alta afinidade através da aplicação de hipermutação e edição de receptores. O processo de pesquisa de soluções diferentes pode ser considerado um processo de maturação, visto que durante o mesmo são aplicados os processos de hipermutação e seleção;
 - *Diversidade de repertório*: o conjunto de anticorpos produzidos pelo sistema imunológico durante toda a vida do indivíduo, contendo informações sobre a produção de anticorpos de alta afinidade dentro dos linfócitos. Para esta aplicação, o repertório é o conjunto de melhores soluções;
 - *Memória*: capacidade do sistema imunológico de armazenar informações sobre antígenos combatidos anteriormente, possibilitando a produção de anticorpos de alta afinidade em uma infecção posterior pelo mesmo antígeno. Para este problema, trata-se da armazenagem das respostas obtidas para determinado problema. Todas as soluções obtidas fazem parte do repertório e ficam arquivadas na memória;
 - *Aprendizado reforçado*: característica que permite ao sistema imunológico melhorar as respostas para determinados antígenos, criando anticorpos de maior afinidade a cada vez que o organismo entra em contato com um determinado antígeno. Para o problema de otimização em questão, trata-se da capacidade de obter melhores respostas a cada vez que a função objetivo é solucionada.
-

B. Sistemas Imunológicos Artificiais: passo-a-passo

O sistema imunológico artificial é uma ferramenta de otimização criada a partir de metáforas do sistema imunológico dos seres humanos. Observando o comportamento deste, diversas características e processos foram considerados úteis para aplicações em problemas de engenharia, como por exemplo, planejamento da expansão do sistema elétrico, redução de perdas elétricas em sistemas, e outros.

Conhecendo o potencial da ferramenta, este apêndice foi criado com o intuito de fornecer um guia para a solução de problemas aplicando os sistemas imunológicos artificiais. Um problema de minimização de perdas é apresentado como uma forma mais específica de aplicação, mas deve-se entender que os princípios gerais de aplicação são iguais para quaisquer problemas.

Desta vez, será utilizado o sistema de distribuição IEEE 37, apresentado na Figura B.1, a fim de promover um exemplo ainda não apresentado para facilitar o entendimento.

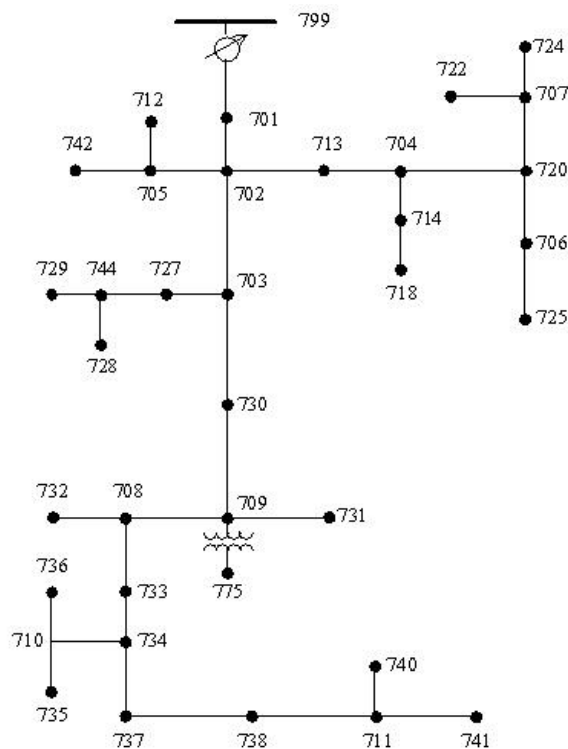


Figura B.1 - Sistema de distribuição IEEE 37

O primeiro passo em qualquer problema de otimização é determinar a função objetivo do problema. Esta se refere à grandeza que se deseja minimizar ou maximizar, sujeita a algumas restrições impostas no problema. Tais restrições classificam as soluções encontradas em viáveis, se obedecer a todas as restrições, e não-viáveis, caso contrário.

A função objetivo do problema é considerada como o *antígeno* durante a execução da otimização aplicando sistemas imunológicos. É a partir dela que as soluções são pesquisadas dentro de um possível espaço amostral. Estas soluções são chamadas *anticorpos*.

Por ser um método baseado em inteligência, o sistema imunológico artificial é uma metodologia de pesquisa que usa heurística somente para explorar áreas de interesse no espaço de solução. Porém, diferente de outros métodos, ele executa simultaneamente esta pesquisa local e global, baseado nos conceitos de *hipermutação* e *edição de receptores*. Enquanto a primeira permite a busca em um espaço limitado, a segunda permite a busca em diferentes locais do espaço amostral, tornando mais fácil encontrar soluções de maior aptidão.

Para o caso apresentado, o antígeno é a função objetivo que representa a minimização das perdas sujeita às restrições de tensão apresentadas.

O processo é iniciado pela pesquisa das possíveis soluções que resultem na minimização/maximização do problema. Estas possíveis soluções farão parte da primeira geração de anticorpos e podem ser escolhidas aleatoriamente ou conforme algum critério de sensibilidade aplicado ao problema.

Para o caso apresentado de minimização das perdas, escolhem-se aleatoriamente posições para instalação de capacitores na rede de distribuição. Um exemplo de primeira geração é apresentado abaixo na Figura B.2.

701	703	734	713	731	730	733	728	703	737	711
742	708	711	727	734	705	738	730	701	741	734
744	737	740	718	735	727	702	732	713	732	735
724	710	734	725	725	732	720	735	709	730	725

Figura B.2 - Primeira geração de anticorpos

Esta primeira geração é formada por um conjunto de 11 anticorpos com capacitores instalados em 4 posições, conforme mostrado na Figura B.2. Estes nós são escolhidos aleatoriamente no momento de formação da primeira geração, e podem ou não se

repetir no mesmo nó. A potência nominal de cada unidade capacitiva pode ser escolhida antes de iniciar o processo e mantida constante durante o mesmo, ou pode entrar como uma variável dentro do problema.

Outra observação importante é que a quantidade de anticorpos criados na primeira geração influencia durante a resolução do problema. Isso acontece porque quanto mais anticorpos forem criados na primeira geração, uma maior área do espaço amostral pode ser pesquisada em vez de ficar restrita a poucas opções.

Essa possibilidade tem uma influência direta na rapidez do processo e na qualidade da solução final, uma vez que existe maior probabilidade de encontrar um ponto ótimo global, em vez de um ponto ótimo local.

A partir do momento em que a primeira geração de anticorpos está pronta, o próximo passo é a clonagem de todos os anticorpos da mesma. A quantidade de clones criados é arbitrária, mas deve-se salientar que quanto maior esta quantidade, maior a possibilidade de se obter uma solução melhor em um menor número de iterações.

A partir de então, um processo de hipermutação cria uma variedade de anticorpos diferentes entre si a partir deste ancestral comum. Este novo grupo de anticorpos compõe uma nova geração, que neste caso é a segunda, conforme mostrado abaixo na Figura B.3. Para o exemplo dado, escolhe-se para representar o processo o anticorpo mais à esquerda da página, que é o conjunto 701-742-744-724.

701	701	701	701	701	701	701	701	701	701	701
742	742	742	742	742	742	742	742	742	742	742
744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744
724	724	724	724	724	724	724	724	724	724	724
725	741	731	740	737	708	733	724	735	730	732

Figura B.3 - Segunda geração de anticorpos

Durante o processo de hipermutação, cada um dos clones recebe um novo elemento que o torna diferente dos demais. Neste caso, uma nova unidade capacitiva foi instalada no nó mostrado em vermelho. Estes anticorpos diferentes compõem uma nova geração diferente da anterior.

Nessa nova geração, os anticorpos são classificados de acordo com as respectivas respostas quando aplicadas ao antígeno, que é a função objetivo, o que caracteriza a especificidade dos mesmos em relação ao antígeno. Essa classificação é realizada através do fluxo de potência e posterior cálculo de perdas elétricas quando cada configuração é aplicada ao sistema de 37 nós da Figura B.1.

De acordo com estas respostas, os melhores indivíduos são selecionados para continuar no processo e os indivíduos menos aptos são descartados. Se houver entre os clones algum que tenha uma resposta melhor que a apresentada na geração anterior, então o clone toma o lugar da solução original e continua no processo. Caso contrário, o anticorpo original continua no processo e um novo passo de hipermutação é realizado.

Este passo caracteriza a natureza evolutiva do processo de *maturação*, pois a cada geração os indivíduos menos aptos são descartados. Esta nova geração de anticorpos apresenta uma resposta melhor ou no mínimo igual à anterior.

Esta característica pode ser observada na Figura B.4, onde o anticorpo que apresentou a menor perda é representado na cor preta, enquanto os outros que foram descartados são representados na cor vermelha. Este anticorpo, 701-742-744-724-741, apresentou uma solução melhor que o anticorpo original, 701-742-744-724, e continuará participando no processo no lugar daquele.

701	701	701	701	701	701	701	701	701	701	701
742	742	742	742	742	742	742	742	742	742	742
744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744
724	724	724	724	724	724	724	724	724	724	724
725	741	731	740	737	708	733	724	735	730	732

Figura B.4 - Anticorpos selecionados e descartados durante processo de maturação

Este processo é repetido tantas vezes quantas forem necessárias até que uma tolerância mínima entre a solução de duas gerações seguidas seja atingida, ou até que um número determinado de gerações seja criado.

Este mesmo processo é repetido para todos os anticorpos obtidos na primeira geração até que se atinjam soluções ótimas obedecendo aos critérios de parada do processo ou que o número de gerações pré-determinado haja sido criado.