

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**A INTERAÇÃO ENTRE GERADORES SOLARES
FOTOVOLTAICOS E VEÍCULOS ELÉTRICOS CONECTADOS
À REDE ELÉTRICA PÚBLICA**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina com requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, para a obtenção do título de MESTRE em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ricardo Rüther, Ph.D

LUIZ CARLOS PEREIRA JUNIOR

Florianópolis, 2011

**A INTERAÇÃO ENTRE GERADORES SOLARES
FOTOVOLTAICOS E VEÍCULOS ELÉTRICOS CONECTADOS
À REDE ELÉTRICA PÚBLICA**

LUIZ CARLOS PEREIRA JUNIOR

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Prof. Dra. Janaíde Cavalcante Rocha
Coordenadora do PPGEC

Prof. Ricardo Rüther, Ph.D
Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Ricardo Rüther, Ph.D – Moderador
ECV/UFSC

Roberto Lamberts, Ph.D
ECV/UFSC

Antônio Augusto M. Fröhlich, Dr
INE/UFSC

Roberto Zilles, Dr
IEE/USP

DEDICATÓRIA

*Aos meus familiares que sempre
acreditaram em mim.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, que nesse processo me fez mais humano.

Ao Prof. Ricardo Rütger, pelas críticas e pela confiança.

Ao Prof. Trajano Viana, pelo apoio e pelas conversas nos momentos mais difíceis.

Aos membros da banca pelas contribuições para a versão final desta dissertação.

Aos meus colegas Alexandre, Annelise, Clarissa, Lucas, Marília, Paulo, Ísis, Isabel, Priscila e Jair pela amizade e disponibilidade ao longo deste trabalho.

Aos meus amigos mais chegados que irmãos, pelo privilégio de ter caminhado com cada um de vocês.

Ao Giovanni Bratti, meu amigo do departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelo auxílio com o Matlab.

A todos os meus familiares aqui não citados nominalmente, pela preocupação e carinho. Amo todos vocês.

Ao meu pai, Carlinhos Pereira, por ter acreditado em mim.

À minha mãe, Nice, aurora da minha vida, pelo exemplo de garra e fé.

À minha irmã, Abely, pelo carinho e cuidado. Serei eternamente devedor.

Ao CNPq pelo suporte financeiro concedido ao longo desta dissertação.

“Não é um dom que ensina seu possuidor. É o seu possuidor quem precisa aprender a usá-lo.”

Caio Fábio D’Araújo

Resumo da Dissertação apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

A interação entre geradores solares fotovoltaicos e veículos elétricos conectados à rede elétrica pública.

LUIZ CARLOS PEREIRA JUNIOR

Florianópolis, 2011.

Orientador: Prof. Ricardo Rüther, Ph.D

Área de Concentração: Construção Civil

Palavras chave: Geradores solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica, veículos elétricos, geração distribuída

Número de páginas: 137

Ao longo dos últimos anos, a geração centralizada de energia elétrica tem sido o modelo tradicionalmente utilizado no Brasil. Porém, com a crescente preocupação com as questões energéticas e ambientais, a geração distribuída tem despontado como uma opção para o setor elétrico, pois a geração ocorre de forma descentralizada, com unidades geradoras de pequeno porte, que podem otimizar o sistema de geração, transmissão e distribuição. Diferentes tecnologias podem ser utilizadas na forma de geração distribuída e dentre elas pode-se destacar os geradores solares fotovoltaicos, que geram eletricidade a partir da luz do sol através do efeito fotovoltaico. Embora não sejam geradores, os veículos elétricos ao serem conectados em uma tomada elétrica residencial, comercial ou industrial que fará parte de uma rede elétrica inteligente (*smart grid*), poderão ser utilizados como um gerador distribuído em momentos estratégicos, podendo contribuir para a redução do pico de demanda do alimentador no horário de ponta. Este trabalho tem como objetivo avaliar a interação de geradores solares

fotovoltaicos e veículos elétricos conectados à rede elétrica pública. Dessa forma, foi analisada a potencial contribuição energética dos veículos elétricos, no horário de ponta, para o alimentador TDE05 que abastece os bairros Santa Mônica, Córrego Grande e Trindade, na cidade de Florianópolis – SC, e que apresenta pico de consumo noturno. Além disso, foi analisado o potencial de geração de geradores solares fotovoltaicos instalados nas coberturas dos prédios da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, que abrigam os usuários de um grande grupo de veículos (os quais poderiam ser elétricos), a fim de verificar a sua contribuição para a recarga desses veículos e o impacto energético para o alimentador TDE06 que atende a região da universidade. Os resultados mostraram que a atuação dos veículos elétricos como geradores distribuídos (V2G) pode modelar de forma positiva a curva de demanda do alimentador, quando conectados à rede elétrica pública. A partir das análises verificou-se também que para a maior parte dos meses a recarga dos veículos elétricos no período da madrugada não representa um problema para a rede elétrica, pois não há ocorrência de picos de demanda superiores ao pico de demanda noturno do alimentador, exceto em dias muito quentes, tipicamente verificados nos meses de verão. Os estudos mostraram também a potencialidade da utilização dos veículos elétricos como dispositivos de armazenamento de energia gerada pelos geradores fotovoltaicos nas coberturas dos prédios da UFSC, visto que na maior parte do tempo os veículos permanecem estacionados. Observou-se que geradores solares fotovoltaicos integrados às coberturas dos prédios existentes na UFSC podem contribuir para a redução da curva de demanda do alimentador TDE06, uma vez que a geração solar é concomitante com o horário de maior consumo dos prédios da universidade (perfil de demanda diurno). Em vários dias verificou-se a possibilidade de injetar na rede elétrica o excedente da geração de energia, e caso houvesse um sistema de tarifação apropriado, essa energia poderia ser vendida à concessionária local.

Dissertation' Abstract presented to Universidade Federal de Santa Catarina as a partial of the requeriments to obtain the Master degree in Civil Engineering

The interaction between solar generators and electric vehicle connected to the public grid

LUIZ CARLOS PEREIRA JUNIOR

Florianópolis, 2011

Supervisor: Prof. Ricardo Rüther, Ph.D

Area of Concentration: Construção Civil

Keywords: Grid-connected photovoltaic system, electric vehicle, distributed generation

Number of pages: 137

However with the increasing preoccupation referring energy production and the environment, decentralized energy generation is appointing to an interesting alternative for the electrical grid. This because the small units of power generation units are able to contribute to the generation, transmission and distribution of electric energy. Different technologies can be used as distributed generation units and a favorite among them are photovoltaic solar generators, which generate to electricity from sunlight through the photovoltaic effect. Although they are not distributed generators, electric vehicles to be connected to an outlet of the residential commercial or industrial grid, can be used as a distributed generators at strategic times within a smart grid, contributing to the reduction of feeder peak demand at peak hours. This study aims to evaluate the interaction of photovoltaic generators and electric vehicles connected to the public grid. Therefore, for the feeder that supplies the neighborhoods TDE05 Santa Monica, Córrego Grande and Trindade, in Florianópolis - SC, which has peak evening consumption the potential energy contribution of electric vehicles during peak horary was analyzed. In addition, we analyzed the generation potential of photovoltaic systems on the roof tops of the buildings of the Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC which

are supposed to feed charging units of a large group of electric vehicles, in order to verify their contribution to recharge these vehicles and impact energy to the university grid feeder TDE06. The results showed that the usage of the energy from accumulators of electric vehicles for distributed generation (V2G) can positively shape the demand curve of the feeder, when connected to the public grid. It was also observed that for most months the recharging process of the electric vehicles during the early morning hours is not a problem for the residential grid. This is because the peak power of the electrical was not increased except on very hot days, typically seen in the summer months. The potential use of electric vehicles as storage devices for power generated by photovoltaic generators on the roofs of the buildings of the UFSC, since most of the time vehicles are parked. It was also observed that rooftop integrated photovoltaic generators contribute to the reduction of the power demand curve at TDE06 feeder, since solar generation is concomitant with the time of highest consumption of university buildings. In several days there it was observed that the PV-power generation was higher than the power consumption of the University feeder TDE06 delivering a power surplus to the electrical grid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa da rede de transmissão de energia elétrica que abastece a cidade de Florianópolis-SC.....	7
Figura 2.1: Total anual de geração de energia, por kWp instalado, com tecnologia de silício monocristalino (m-Si), em Freiburg (a) e em Florianópolis (b).....	14
Figura 2.2. Gerador fotovoltaico de 2 kWp conectado à rede e integrado a uma edificação, instalado em Florianópolis-SC, em operação desde 1997.....	16
Figura 2.3. Gerador fotovoltaico de 10,24 kWp instalado na cobertura do Centro de Cultura e Eventos da UFSC.....	17
Figura 2.4. Parque fotovoltaico de Sarnia, no Canadá.....	17
Figura 2.5: Ilustração do modo de gerenciamento de energia em função do estado de carga da bateria de um VEPH.....	26
Figura 2.6. Ilustração da interação de geradores solares fotovoltaicos e veículos elétricos com a rede inteligente.....	32
Figura 4.1. Perfil de demanda do alimentador TDE05, em MW, no ano de 2008.....	54
Figura 4.2. Perfil de demanda do alimentador TDE06, em MW, no ano de 2008.	55
Figura 4.3. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Janeiro de 2008 no horário das 19h às 24h.....	57
Figura 4.4. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Fevereiro de 2008 no horário das 19h às 24h.....	57
Figura 4.5. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Março de 2008 no horário das 19h às 24h.....	58
Figura 4.6. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Abril de 2008 no horário das 19h às 24h.....	58
Figura 4.7. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Maio de 2008 no horário das 19h às 24h.....	59
Figura 4.8. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Junho de 2008 no horário das 19h às 24h.....	59

Figura 4.9. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Julho de 2008 no horário das 19h às 24h.....	60
Figura 4.10. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Agosto de 2008 no horário das 19h às 24h.....	60
Figura 4.11. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Setembro de 2008 no horário das 19h às 24h.....	61
Figura 4.12. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Outubro de 2008 no horário das 19h às 24h.....	61
Figura 4.13. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Novembro de 2008 no horário das 19h às 24h.....	62
Figura 4.14. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Dezembro de 2008 no horário das 19h às 24h.....	62
Figura 4.15. Perfil de demanda do alimentador TDE05, em MW, com contribuição V2G no ano de 2008.....	65
Figura 4.16. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Janeiro de 2008 no horário da 0h às 06h.....	68
Figura 4.17. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Fevereiro de 2008 no horário da 0h às 06h.....	68
Figura 4.18. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior	

como suporte à rede elétrica no mês de Março de 2008 no horário da 0h às 06h.....	69
Figura 4.19. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Abril de 2008 no horário da 0h às 06h.....	69
Figura 4.20. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Maio de 2008 no horário da 0h às 06h.....	70
Figura 4.21. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Junho de 2008 no horário da 0h às 06h.....	70
Figura 4.22. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Julho de 2008 no horário da 0h às 06h.....	71
Figura 4.23. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Agosto de 2008 no horário da 0h às 06h.....	71
Figura 4.24. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Setembro de 2008 no horário da 0h às 06h.....	72
Figura 4.25. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Outubro de 2008 no horário da 0h às 06h.....	72
Figura 4.26. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior	

como suporte à rede elétrica no mês de Novembro de 2008 no horário da 0h às 06h.....	73
Figura 4.27. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Dezembro de 2008 no horário da 0h às 06h.....	73
Figura 4.28. Perfil de demanda do alimentador TDE05 com a recarga de veículos elétricos, em MW, no ano de 2008.....	76
Figura 4.28 (cont.). Perfil de demanda do alimentador TDE05 com a recarga de veículos elétricos, em MW, no ano de 2008.....	77
Figura 4.29. Planta das edificações do campus Trindade, UFSC, com os prédios selecionados em azul para o estudo em questão.	78
Figura 4.30. Geração de energia elétrica horária diária, em MW, considerando um gerador solar fotovoltaico (a-Si) de 3 MWp no ano de 2008.....	80
Figura 4.31. Geração de energia elétrica horária diária, em MW, considerando um gerador solar fotovoltaico (p-Si) de 6,7 MWp no ano de 2008.....	81
Figura 4.32. Comparação entre o perfil de demanda original do alimentador TDE05 e o perfil de demanda resultante com a contribuição solar fotovoltaica de um gerador de 992 kWp integrado às 496 residências do bairro Santa Mônica.....	83
Figura 4.33. Comparação entre o perfil de demanda original do alimentador TDE05 e o perfil de demanda resultante com a contribuição solar fotovoltaica de um gerador de 992 kWp integrado às 496 residências do bairro Santa Mônica.....	84
Figura 4.34. Perfil de demanda resultante do alimentador TDE 05 com a contribuição V2G para o ano de 2008.....	87
Figura 4.34 (cont.). Perfil de demanda resultante do alimentador TDE 05 com a contribuição V2G para o ano de 2008.....	88

Figura 4.35: Perfil de demanda do alimentador TDE06, em MW, resultante da contribuição da geração solar fotovoltaica (3 MWp de módulos de a-Si) no ano de 2008.....	91
Figura 4.36: Perfil de demanda do alimentador TDE06, em MW, resultante da contribuição da geração solar fotovoltaica (6,7 MWp de módulos de p-Si) no ano de 2008.....	92
Figura 4.37. Contribuição de um gerador solar fotovoltaico hipotético de 3 MWp (a-Si) para a recarga de veículos elétricos.....	94
Figura 4.38. Contribuição de um gerador solar fotovoltaico hipotético de 6,7 MWp (p-Si) para a recarga de veículos elétricos.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Parâmetros programados de uma rede inteligente (<i>smart grid</i>).....	37
Tabela 3.2. Especificações técnicas de um modelo de veículo elétrico – Nissan <i>Leaf</i> [www.nissan.pt].....	42
Tabela 4.1. Número máximo de veículos elétricos possíveis de serem utilizados como geradores distribuídos ao longo do ano de 2008 no alimentador TDE05 no horário das 19h às 24h.....	63
Tabela 4.2. Número máximo de veículos elétricos possíveis de serem recarregados no alimentador TDE05 ao longo do ano de 2008 no horário da 0h às 6h.....	74
Tabela 4.3. Áreas de coberturas disponíveis para a instalação de geradores fotovoltaicos na UFSC.....	79
Tabela 4.4. Geração solar fotovoltaica mensal e anual, em MWh, dos geradores solares hipotéticos integrados nas coberturas das 496 residências do bairro Santa Mônica.....	85
Tabela 4.5. Nível de penetração energética (NPE).....	90
Tabela 4.6. Balanço energético mensal e anual, em MWh, considerando um gerador solar fotovoltaico de 3 MWp com módulos de a-Si.....	96
Tabela 4.7. Balanço energético mensal e anual, em MWh, considerando um gerador solar fotovoltaico de 6,7 MWp com módulos de p-Si.....	97

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO	4
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	10
1.2.1	<i>Objetivo principal</i>	10
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	10
2	REVISÃO DA LITERATURA	12
2.1	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	12
2.1.1	<i>Células e Módulos Fotovoltaicos</i>	12
2.1.2	<i>Tecnologias fotovoltaicas</i>	12
2.1.3	<i>Radiação solar</i>	13
2.1.4	<i>Geradores solares fotovoltaicos</i>	15
2.2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	19
2.3	BATERIAS	21
2.3.1	<i>Bateria Chumbo-Ácido</i>	22
2.3.2	<i>Bateria Níquel-Cádmio (NiCd)</i>	22
2.3.3	<i>Bateria Níquel-Metal-Hidreto (Ni-MH)</i>	22
2.3.4	<i>Bateria de Íons de Lítio (Li-íon)</i>	23
2.4	VEÍCULOS ELÉTRICOS	23
2.4.1	<i>Veículo elétrico híbrido (VEH)</i>	24
2.4.2	<i>Veículo elétrico híbrido plug in (VEPH)</i>	25
2.4.3	<i>Veículo elétrico à bateria (VEB)</i>	26
2.4.4	<i>Veículo Elétrico de Célula de Combustível (VEFC)</i>	27
2.5	PADRÃO DE CONDUÇÃO	27

2.6	TEMPO DE RECARGA	28
2.7	DO VEÍCULO PARA A REDE (<i>VEHICLE TO GRID- V2G</i>)	29
2.8	ESTUDOS DE CASOS ENVOLVENDO VES	33

3 METODOLOGIA 36

3.1	LOCAIS DE ESTUDO	37
3.2	IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DE DEMANDA DO ALIMENTADOR.....	38
3.3	ANÁLISE DO POTENCIAL DE INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA.....	38
3.4	POTENCIAL DE GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NO CAMPUS DA UFSC E BAIRRO SANTA MÔNICA.....	40
3.5	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE UM MODELO DE VEÍCULO ELÉTRICO	41
3.6	DETERMINAÇÃO E LIMITAÇÕES DA TRANSFERÊNCIA G2V E V2G.....	42
3.7	ESTIMATIVA DO NÚMERO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS POSSÍVEIS DE SEREM UTILIZADOS COMO GERADORES DISTRIBUÍDOS (V2G).....	45
3.8	ANÁLISE DO IMPACTO ENERGÉTICO NO ALIMENTADOR TDE05 UTILIZANDO O VEÍCULO ELÉTRICO COMO GERADOR DISTRIBUÍDO (V2G).....	47
3.9	ANÁLISE DO IMPACTO ENERGÉTICO NO ALIMENTADOR TDE05 COM A RECARGA DO VEÍCULO ELÉTRICO (G2V)..	48
3.10	CONTRIBUIÇÃO FOTOVOLTAICA PARA O CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	49
3.11	BALANÇO ENERGÉTICO	51

4	RESULTADOS	53
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DO ALIMENTADOR TDE05	53
4.2	ESTIMATIVA DO NÚMERO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS UTILIZADOS COMO GERADORES DISTRIBUÍDOS (V2G)..	56
4.3	IMPACTO ENERGÉTICO NO ALIMENTADOR TDE05 COM A CONTRIBUIÇÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS (V2G).....	64
4.4	CONTRIBUIÇÃO DO ALIMENTADOR TDE05 PARA A RECARGA DE UM MODELO DE VEÍCULO ELÉTRICO	66
4.5	IMPACTO ENERGÉTICO NO ALIMENTADOR TDE05 COM A RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	75
4.6	ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE INSTALAÇÃO E GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DOS GERADORES INTEGRADOS AOS PRÉDIOS DA UFSC	77
4.7	NOVO PERFIL DE DEMANDA DO ALIMENTADOR TDE05.	86
4.8	CONTRIBUIÇÃO ENERGÉTICA DE GERADORES SOLARES FOTOVOLTAICOS NO CAMPUS DA UFSC, CONSIDERANDO DUAS TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: A- SI E P-SI	88
	<i>4.8.1 Caso 1: Contribuição energética dos geradores solares para a redução da curva de demanda do alimentador TDE06</i>	<i>89</i>
	<i>4.8.2 Caso 2: Potencial utilização de veículos elétricos como dispositivos móveis de armazenamento de energia.....</i>	<i>93</i>
5	CONCLUSÃO	98
6	REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

O aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera, o aquecimento global e a insegurança energética estão entre os grandes problemas da atualidade. Esses temas têm sido amplamente discutidos no mundo todo, requerendo dos órgãos governamentais e das instituições de pesquisas soluções imediatas na mitigação desses efeitos sobre o planeta. A questão energética, por exemplo, necessita de grandes mudanças na sua infraestrutura. O Brasil, quando o assunto é a composição do seu setor energético, tem se destacado da maioria dos países por apresentar uma matriz elétrica na sua maior parte de origem renovável, com geração predominantemente hidráulica. Por outro lado, a matriz energética da maioria dos países do mundo, tem dependido em grande parte das fontes não renováveis, como petróleo, carvão e gás natural (BEN, 2010).

Ao longo dos últimos anos a geração centralizada de energia elétrica tem sido o modelo tradicionalmente utilizado no Brasil. Em 2009a capacidade instalada das centrais de geração de energia elétrica alcançou 106,2 GW, incluindo as centrais de serviço público e autoprodutoras. A geração de energia elétrica atingiu 466,2 TWh, 0,7% superior ao ano de 2008 (BEN, 2010). Acrescente demanda energética obriga o setor elétrico a aumentar a oferta de energia para possibilitar e assegurar o avanço e o desenvolvimento da sociedade. No entanto, para atingir estes objetivos são necessários elevados investimentos na área de infraestrutura com a construção de novas unidades geradoras de energia e ampliação das linhas de transmissão.

Os riscos que novos empreendimentos enfrentam são enormes devido às novas exigências ambientais e às externalidades negativas tais como: desapropriação de terra; inundação de áreas para construção de reservatórios; impactos na fauna e flora da região; aumento do efeito estufa e aumento dos custos de operação e de manutenção. Diante deste cenário a geração distribuída desponta como uma opção para o setor elétrico, pois a geração ocorre de forma descentralizada, com unidades geradoras de pequeno porte que ocasionam menor impacto ambiental e podem oferecer benefício são sistema de geração, transmissão e distribuição. A energia gerada é entregue diretamente ou próximo ao ponto de consumo, reduzindo os elevados custos com as linhas de transmissão bem como as perdas associadas.

A geração distribuída caracteriza-se pela utilização de diferentes tecnologias, dentre as quais se destacam os geradores a diesel, as turbinas a gás, as pequenas centrais hidrelétricas, os geradores eólicos, os geradores solares (heliotérmicos e fotovoltaicos) e as células de combustível. O potencial para os avanços na geração distribuída é imenso do ponto de vista tecnológico.

A tecnologia fotovoltaica, utilizada na forma de geração distribuída, é uma opção complementar à geração hidráulica e pode ser considerada uma alternativa para medidas de gerenciamento pelo lado da demanda (GLD), quando conectada aos alimentadores urbanos¹. Os geradores solares fotovoltaicos geram eletricidade a partir da luz do Sol por meio do efeito fotovoltaico. Essa geração ocorre de maneira estática, silenciosa, sem emissão de gases e os geradores podem ser integrados às edificações gerando energia elétrica próxima ao ponto de consumo.

As edificações de serviço e comércio são propícias à integração de geradores solares fotovoltaicos, pois os picos de demanda históricos dos alimentadores responsáveis pelo abastecimento dessas regiões têm ocorrido no período diurno, devido principalmente às demandas energéticas causadas por cargas de ar condicionado. Observa-se que o elevado consumo de energia elétrica está diretamente ligado ao elevado nível de radiação solar, principalmente em dias de verão. Assim, é possível notar uma concomitância entre o consumo e a geração solar fotovoltaica (RÚTHER *et al.*, 2008).

Por outro lado, as edificações residenciais em zonas urbanas mistas, próximas de áreas de serviço e comércio, apresentam consumo energético significativo ao longo do dia, porém o maior consumo é verificado durante a noite, devido principalmente a demandas energéticas causadas por cargas de chuveiros elétricos. Neste caso, a geração solar fotovoltaica integrada a este tipo de edificação modelaria somente a curva de demanda do alimentador no horário em que há a ocorrência da geração solar, mas não seria possível modelar o pico de demanda que ocorre à noite.

¹Alimentador urbano – componente do sistema de distribuição em tensão primária com valores máximos operativos de 15 kV ou 24,5 kV e que alimenta diretamente, ou através de derivações primárias, os transformadores de distribuição ou consumidores (ANEEL, 2011).

Muitos são os países que têm incentivado por meio de políticas públicas a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, com a finalidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. O setor de transporte, no entanto, enfrenta ainda grandes desafios quanto à redução das emissões de CO₂, um dos principais gases de efeito estufa, emitidos pelos veículos com motor a combustão interna.

Depois de quase um século de domínio do motor à combustão interna no setor de transporte, o ressurgimento dos veículos elétricos (VEs) no cenário mundial, com produção em série, é recente e pode contribuir na redução das emissões de gases de efeito estufa, desde que a energia elétrica utilizada para recarregar as baterias seja proveniente de fontes renováveis e não poluentes.

Os veículos elétricos são caracterizados pela utilização de um motor elétrico em lugar do motor de combustão interna. O motor é alimentado pela energia armazenada em um banco de baterias, que pode ser recarregado ao ser conectado em uma tomada elétrica comum, residencial, comercial ou industrial. No passado o conceito de veículo elétrico teve várias tentativas de inserção no mercado automobilístico sem obter sucesso, apesar das suas vantagens sob o ponto de vista ambiental. Atualmente existe uma grande mobilidade no sentido de promover a sua utilização em grande escala em função dos consideráveis avanços que esta tecnologia vem experimentando.

Embora não sejam geradores, os veículos elétricos podem ser inseridos no sistema elétrico e atuar como se fossem geradores distribuídos, fornecendo parte da energia armazenada nas suas baterias para a rede elétrica pública em momentos estratégicos. Este conceito é conhecido como V2G (do inglês, *vehicle to grid*, do veículo para a rede).

Na situação típica de uso de um veículo elétrico no conceito V2G, o usuário se deslocará no início da manhã até o local de trabalho e deixará seu veículo estacionado, conectado em uma tomada elétrica disponível no estacionamento. O veículo elétrico permanecerá estacionado durante a maior parte das horas de incidência solar e, nesse período, um gerador solar fotovoltaico integrado à cobertura do estacionamento, ou integrado a uma edificação do local de trabalho, poderá fornecer energia para recarregar as baterias do veículo. Dessa forma, o veículo elétrico atua como um dispositivo móvel de armazenamento de energia. Ao final da jornada de trabalho o usuário

utilizará o veículo elétrico, com a bateria completamente carregada, para se deslocar de volta à residência, e ao chegar ao seu destino conectará o veículo à rede elétrica. Ao conectar o veículo elétrico em uma tomada elétrica residencial, que fará parte de uma rede elétrica inteligente (*smart grid*) com sistema de medição e decisão para gerenciar a carga e a descarga da bateria, será possível utilizá-lo como um gerador distribuído em momentos estratégicos, para auxiliar a rede elétrica pública.

Nesse processo gerenciado pela rede inteligente, a energia armazenada nas baterias do veículo elétrico fluirá para a rede elétrica, contribuindo para a redução do pico de demanda do alimentador no horário de ponta². De forma automática, a recarga das baterias será realizada nos horários de menor demanda da rede elétrica, durante a madrugada, logo após o serviço V2G. Todo o processo será gerenciado pela rede inteligente, cujos parâmetros de operação serão definidos pela concessionária local, com quem o proprietário do veículo elétrico terá um contrato específico de V2G e G2V (do inglês, *grid to vehicle*, da rede para o veículo).

Dessa forma, nesta dissertação optou-se por analisar a contribuição dos geradores solares fotovoltaicos e a potencial utilização dos veículos elétricos como dispositivos móveis de armazenamento de energia e como geradores distribuídos no horário de ponta.

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

Neste trabalho são abordados o setor elétrico, o potencial da geração solar fotovoltaica e o setor de transporte. O setor elétrico brasileiro apresenta grandes extensões de linhas de transmissão, o que é explicado pela configuração do segmento de geração, constituído principalmente por usinas hidrelétricas localizadas distantes dos centros consumidores, tecnicamente chamados centros de cargas. De acordo com o Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL, o setor de geração de energia elétrica brasileiro possui um total de 2405 empreendimentos em operação. A principal característica deste

² O horário de ponta é o período definido pela concessionária, considerando as características do seu sistema elétrico, composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceto sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, dia de finados e os demais feriados definidos por lei federal (ANEEL, 2010). A Celesc Distribuição adota como horário de ponta o período compreendido entre 18h30 e 21h30 (CELESC, 2010).

segmento é a sua divisão em dois blocos: o Sistema Interligado Nacional (SIN) e os Sistemas Isolados (SISOL)(ANEEL, 2011).

O SIN é um sistema de coordenação e controle formado pelas regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte, que congrega o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil. Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontram-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados, localizados principalmente na região amazônica.

Do outro lado, encontram-se as distribuidoras, que são empresas de grande porte que funcionam como elo entre o setor de energia elétrica e a sociedade, visto que suas instalações recebem das companhias de transmissão todo o suprimento destinado ao abastecimento no país. Após deixar as usinas, a tensão nas redes de transmissão varia de 88 kV a 750 kV. Ao chegar às subestações das distribuidoras, a tensão é rebaixada e, por meio de um sistema composto por transformadores, fios e postes, chega à unidade final em 127 V ou 220 V. Exceção a essa regra são unidades industriais que operam com tensões mais elevadas (2,3 kV a 88 kV) e recebem energia elétrica diretamente da subestação (ANEEL, 2011).

O estado de Santa Catarina possui uma rede de transmissão ramificada, que é parte integrante do SIN. A cidade de Florianópolis possui cinco subestações (SE), sendo quatro da concessionária Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A. (CELESC) e uma da ELETROSUL Centrais Elétricas, as quais são abastecidas a partir das subestações Palhoça e Biguaçu, localizadas na parte continental da região metropolitana de Florianópolis.

Uma linha de transmissão aérea com dois circuitos de 138 kV parte da SE Palhoça, com traçado que segue paralelo à rodovia BR-101, até a SE Coqueiros onde há a transição para cabos subterrâneos para a travessia Continente-Ilha. A SE Coqueiros é utilizada apenas para permitir a conversão da linha aérea em subterrânea, não havendo conexão elétrica com a linha de transmissão. Dessa subestação os dois circuitos saem em cabos isolados e atravessam a ponte Colombo Machado Salles e chegam subterrâneos à Ilha, onde um circuito se dirige para a SE Ilha Centro e o outro para uma estação de chaveamento, onde se torna novamente aéreo e segue até a SE Trindade. A partir da SE Trindade, o norte e o sul da Ilha são alimentados em 138 kV, através da SE Ilha Norte e SE Ilha Sul.

A SE Desterro, recentemente instalada, também é alimentada pela SE Palhoça, porém a partir de um cabo subaquático de 230 kV. Essa SE é responsável pela alimentação das SE Ilha Sul e SE Trindade interconectando-as (ELETROSUL, 2010).

Cada subestação da CELESC distribui energia elétrica na parte insular de Florianópolis através de alimentadores que partem dos transformadores de transmissão. Das quatro subestações CELESC, três apresentam três transformadores de transmissão: SE Ilha Centro, SE Trindade e SE Ilha Norte, das quais partem, respectivamente, 13, 10 e 11 alimentadores por transformador. Os alimentadores são distribuídos para cada transformador de modo que o carregamento não ultrapasse a capacidade de transformação do equipamento. A SE Ilha Sul apresenta apenas dois transformadores de transmissão e cinco alimentadores, compondo juntamente com as demais SEs, a rede de distribuição da Ilha de Santa Catarina (BRAUN-GRABOLLE, 2010).

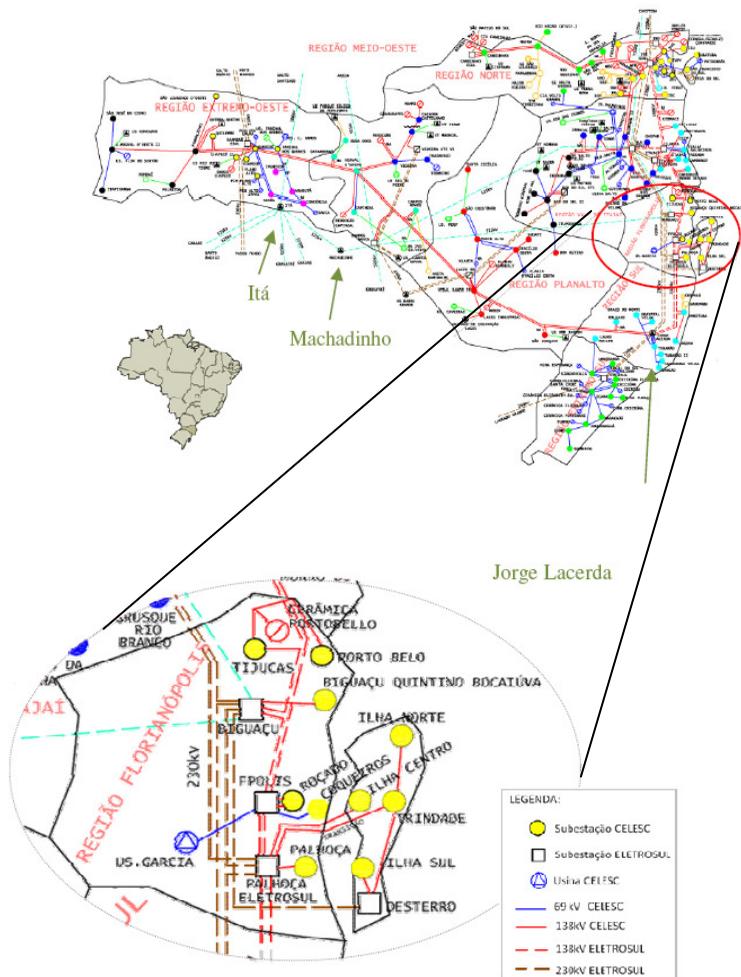


Figura 1.1. Mapa da rede de transmissão de energia elétrica que abastece a cidade de Florianópolis-SC.

Fonte: BRAUN-GRABOLLE, 2010

Os alimentadores TDE05 e TDE06 analisados neste trabalho estão conectados à subestação Trindade e são responsáveis por fornecer energia elétrica aos bairros Santa Mônica, Córrego Grande e Trindade, e para a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), respectivamente. O alimentador TDE05 foi escolhido por apresentar

pico de consumo noturno. Com isso será possível analisar a potencial contribuição dos veículos elétricos no horário de ponta. O alimentador TDE06 foi escolhido por apresentar pico de consumo diurno concomitante com a máxima geração solar fotovoltaica e por abrigar um grande número de usuários de veículos, que ficam estacionados a maior parte do dia.

O setor de transporte brasileiro, de acordo com o Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) registrou um total de 66 milhões de veículos movidos a motor à combustão interna ano de 2011. Destes, aproximadamente 38 milhões são automóveis. A cidade de Florianópolis possui uma frota de mais de 180 mil automóveis (DENATRAN, 2011).

A crescente preocupação com as questões energéticas e ambientais proporciona motivação cada vez maior para utilização das chamadas tecnologias verdes, o que cria um cenário favorável aos geradores eólicos, geradores fotovoltaicos e veículos elétricos, uma vez que o uso destas tecnologias contribuirá para a redução das emissões de gases causadores de efeito estufa.

Diante deste cenário, este trabalho analisa o potencial energético dos geradores fotovoltaicos integrados às áreas de coberturas disponíveis em edificações que concentram um grande número de veículos, os quais poderiam ser veículos elétricos à bateria. Ao mesmo tempo os geradores fotovoltaicos podem auxiliar na redução do pico diurno de demanda do alimentador de uma região urbana. Ou ainda, contribuir para a recarga das baterias dos veículos elétricos estacionados nessa região durante o período diurno.

No entanto, faz-se necessária uma avaliação do limite máximo de veículos que podem ser recarregados no período noturno pelo alimentador, a fim de não ultrapassar o seu limite de carregamento, nem representar uma situação de prejuízo para a rede elétrica. Outra consideração é a nova demanda energética representada pela introdução dos veículos elétricos. Ao considerar o veículo elétrico como um dispositivo de armazenamento de energia, que pode desempenhar o papel de um gerador distribuído, torna-se importante analisar o potencial de contribuição energética dos veículos elétricos para a rede elétrica no período de ponta. Assim, chegou-se ao objetivo deste trabalho: avaliar a interação entre geradores fotovoltaicos e veículos elétricos conectados à rede elétrica pública, avaliando também as possíveis dinâmicas de

carga/descarga das baterias destes veículos elétricos e sua potencial contribuição e efeitos sobre a rede elétrica pública.

O trabalho avalia também a nova demanda energética (MWh/ano) representada por uma frota de veículos elétricos e compara esta nova demanda com o potencial de geração fotovoltaica integrada à edificações que abriguem esta mesma frota.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo principal

O objetivo deste trabalho é avaliar a interação de geradores solares fotovoltaicos e veículos elétricos conectados à rede elétrica pública, analisando a potencial contribuição energética dos veículos elétricos, no horário de ponta, para o alimentador que abastece os bairros Santa Mônica, Córrego Grande e Trindade, que apresenta pico de consumo noturno. É também um objetivo analisar o potencial de geração de geradores solares fotovoltaicos instalados nas coberturas dos prédios da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que abrigam os usuários de um grande grupo de veículos (os quais poderiam ser elétricos), e verificar sua contribuição para a recarga desses veículos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o perfil dos alimentadores TDE05 e TDE06 responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica aos bairros Santa Mônica, Córrego Grande e Trindade, e Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), respectivamente, localizados na cidade de Florianópolis - SC;
- Estimar o número de veículos elétricos que podem ser utilizados como geradores distribuídos no alimentador TDE05 em função das características atuais deste alimentador;
- Analisar o impacto energético com a utilização de veículos elétricos como geradores distribuídos (V2G) quando conectados ao alimentador TDE05;
- Analisar o impacto energético ocasionado pela recarga (G2V) de um modelo de veículo elétrico no alimentador TDE05;
- Levantar a área de cobertura disponível nas edificações da UFSC e nas residências do bairro Santa Mônica, visando à integração de geradores solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica pública, com tecnologia de silício policristalino (p-Si);
- Estimar o potencial de instalação e de geração de geradores solares fotovoltaicos integrados às áreas de cobertura disponíveis na UFSC, considerando duas tecnologias de módulos fotovoltaicos (silício policristalino e silício amorfo);

-
- Estimar o potencial de geração de geradores solares fotovoltaicos instalados nas áreas de cobertura disponíveis da UFSC (TDE06);
 - Estimar o potencial de geração de geradores solares fotovoltaicos instalados em residências unifamiliares de uma zona urbana mista (TDE05);
 - Analisar o impacto energético da geração fotovoltaica das áreas de cobertura disponíveis sobre o alimentador que abastece a UFSC (TDE06);
 - Analisar a potencial contribuição energética de geradores solares fotovoltaicos instalados em coberturas de edificações localizadas nas áreas atendidas pelos alimentadores TDE05 e TDE06 para o carregamento de um modelo de veículo elétrico, considerando o número de vagas disponíveis no estacionamento da UFSC (TDE06) e a quantidade de residências unifamiliares no bairro Santa Mônica, atendido pelo alimentador TDE05;

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.1.1 Células e Módulos Fotovoltaicos

A conversão direta da energia solar em eletricidade ocorre por meio do efeito fotovoltaico, devido à interação da radiação solar com uma célula solar. A célula solar fotovoltaica é a unidade básica da conversão da energia do Sol em eletricidade e consiste de uma estrutura compostatipicamente por uma junção p-n de material semiconductor recoberto por uma película anti-refletores na face frontal, econtatos elétricos nas superfícies frontal e posterior destinados a fornecer tensão e correnteà uma carga.

A junção de várias células solares, interligadas eletricamente e encapsuladas, dá origem ao módulo fotovoltaico. Os módulos são formados por um determinado número de células conectadas em série de modo a aumentar a sua tensão.

2.1.2 Tecnologias fotovoltaicas

O atual mercado apresenta uma série de tecnologias fotovoltaicas que podem ser agrupadas em: células de silício cristalino e células de filmes finos. Dentre os semicondutores mais utilizados destacam-se, por ordem decrescente de maturidade (RÜTHER, 2004):

- silício cristalino (c-Si);
- silício amorfo hidrogenado (a-Si:H ou a-Si);
- telureto de cádmio (CdTe);
- disseleneto de cobre e índio (CIS), gálio e índio (CIGS).

A produção atual é dominada pelas células solares de junção única baseadas no silício, nas formas monocristalina (m-Si) ou policristalina (p-Si) (BAGNALL e BORELAND, 2008).

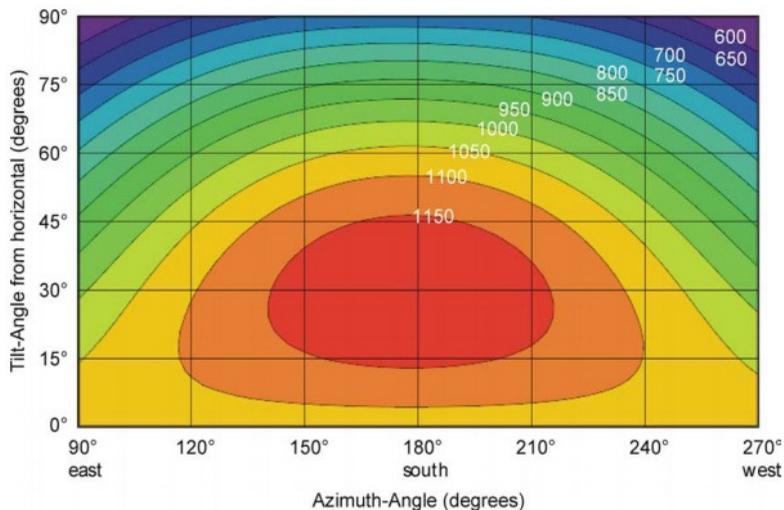
Rüther et. al (2003) discutiram a variação da perda de eficiência dos módulos de filmes finos de a-Si em função do efeito Staebler–Wronski, que pode ser revertido quando os módulos são expostos por duas horas a uma temperatura de 150 °C no escuro(STAEBLER e WRONSKI, 1977). Esse efeito ocasiona perda de eficiência no primeiro ano de exposição à radiação solar e tende a se estabilizar ao fim deste

período. Este estudo mostrou que os módulos com tecnologia de filmes finos de a-Si apresentam menor degradação quanto maiores forem suas temperaturas de exposição, sendo esta portanto, uma tecnologia apropriada para climas quentes como o brasileiro.

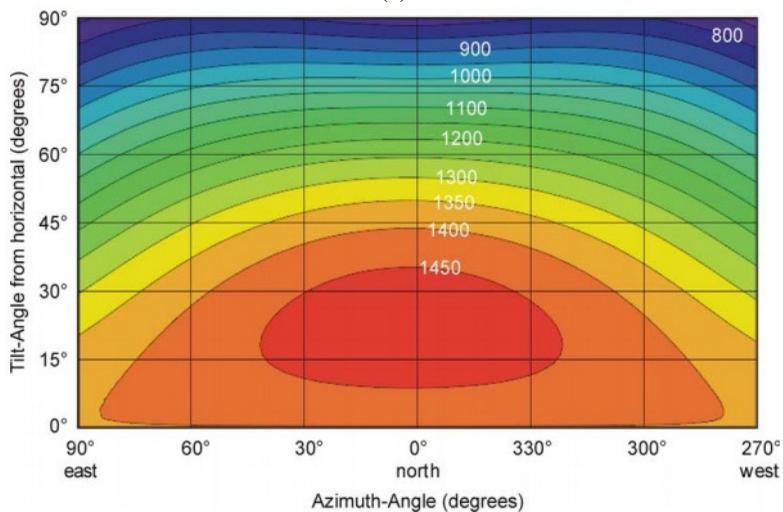
2.1.3 Radiação solar

O conhecimento da disponibilidade de radiação solar é fundamental para a utilização dos geradores fotovoltaicos. No Brasil, o Projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) estimou e mapeou o potencial solar e eólico do território brasileiro e apontou para grandes potenciais solares por todo o território. O projeto SWERA teve também como foco o levantamento de uma base de dados confiável e de alta qualidade visando auxiliar no planejamento e desenvolvimento de políticas públicas de incentivo a projetos na área de energia solar e eólica (PEREIRA *et al*, 2006).

O trabalho de Burger e Rüther (2006) analisou a variação nos níveis de radiação recebida por uma superfície conforme sua inclinação e azimute, tendo como referência a cidade de Florianópolis (Brasil) e a cidade de Freiburg (Alemanha). Neste trabalho pode-se verificar e quantificar que baixas latitudes são menos sensíveis a desvios de azimute, já que Florianópolis a 27°S apresentou menores variações que Freiburg a 48°N, conforme Fig.2.1. Diferentes posicionamentos dos módulos acarretam perdas no potencial de geração, mas para baixas inclinações, como é o caso típico das coberturas das edificações no Brasil, estas perdas podem ser consideradas pequenas.



(a)



(b)

Figura 2.1: Total anual de geração de energia em kWh, por kWp instalado, com tecnologia de silício monocristalino (m-Si), em Freiburg (a) e em Florianópolis (b).

Fonte: BURGUER e RÜTHER, 2006

2.1.4 Geradores solares fotovoltaicos

Os geradores solares fotovoltaicos são um conjunto de elementos compostos de módulo(s) fotovoltaico(s), podendo incluir dispositivos para controle, condicionamento, supervisão, proteção e armazenamento de energia elétrica (quando necessário), fiação, fundação e estrutura. Os geradores solares fotovoltaicos são classificados em: geradores isolados, sem conexão elétrica com a rede de distribuição, e em geradores conectados à rede, cuja energia gerada é injetada na rede elétrica de distribuição (ABNT, 2008).

Os geradores solares fotovoltaicos isolados (SFVI) necessitam de elementos para armazenar a energia fotogerada (normalmente um banco de baterias) e são muito utilizados em regiões remotas nas quais, por razões técnicas e/ou econômicas, não é viável a extensão da rede elétrica. A energia armazenada é consumida posteriormente de acordo com as necessidades dos consumidores. Um exemplo da ampla utilização dos geradores isolados no Brasil se deu com o programa Luz para Todos, do governo federal, que teve como objetivo fornecer energia elétrica às regiões que ainda não tinham acesso à rede pública.

Os geradores solares fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR) podem ser integrados a edificações urbanas (geração distribuída), ou em grandes áreas de terreno, constituindo uma usina geradora centralizada. Os SFVCR não necessitam de elementos armazenadores pois a energia gerada, em corrente contínua (CC), é convertida em corrente alternada (CA) pelos inversores e injetada diretamente na rede. A Fig. 2.2 mostra o primeiro gerador solar fotovoltaico conectado à rede e integrado a uma edificação no Brasil, com tecnologia de a-Si, em operação desde 1997 na cidade de Florianópolis (RÜTHER, 1998). Esse gerador, com 2 kWp³ de potência instalada, é composto por 65 módulos fotovoltaicos sem moldura de silício amorfo, sendo 53 módulos opacos e 12 módulos semitransparentes, distribuídos em 5 séries com 13 módulos cada. O gerador fotovoltaico encontra-se instalado com uma inclinação de 27°

³Wp – símbolo utilizado para especificar a potência nominal, ou potência de pico, de um módulo fotovoltaico, que é a potência de saída sob as condições-padrão de referência para ensaio, STC (do inglês, *Standard Test Conditions* -). As STC: temperatura de junção da célula de 25°C; irradiância total de 1.000 W/m² normal à superfície de ensaio e espectro solar AM 1,5 (ABNT, 2006)

voltado para o norte no prédio da Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.



Figura 2.2. Gerador fotovoltaico de 2 kWp conectado à rede e integrado a uma edificação, instalado em Florianópolis-SC, em operação desde 1997.

Além do gerador solar fotovoltaico apresentado na Fig. 2.2, existem outros geradores conectados à rede elétrica pública no campus da UFSC: Centro de Cultura e Eventos (10 kWp), Hospital Universitário (2 kWp), Colégio de Aplicação (2 kWp) e Centro de Convivência (1 kWp).

O Centro de Cultura e Eventos da UFSC (Fig. 2.3) possui um gerador solar fotovoltaico integrado à sua cobertura de 10,24 kWp composto por 80 módulos de silício amorfo flexível de 128 W cada um. O gerador ocupa 173 m² e está inclinado a 27° e voltado para o norte (VIANA et al.; 2007).



Figura 2.3. Gerador fotovoltaico de 10,24 kWp instalado na cobertura do Centro de Cultura e Eventos da UFSC.

O parque fotovoltaico de Sarnia, no Canadá, é um exemplo de uma grande usina fotovoltaica centralizada com uma capacidade instalada de 80 MWp (ENBRIDGE, 2011).



Figura 2.4. Parque fotovoltaico de Sarnia, no Canadá.

Segundo Salamoni (2004) e Santos (2009), os setores residenciais de áreas urbanas são propícios à instalação de sistemas fotovoltaicos, pois apresentam grande área de cobertura disponível. No entanto, por não apresentarem curva de demanda com pico diurno, a geração fotovoltaica não contribuiria para alívio de sobrecarga do alimentador. Porém, devido à quantidade de área disponível, este setor poderia ser aproveitado como uma mini-usina descentralizada, aliviando a sobrecarga em alimentadores urbanos adjacentes com a energia gerada.

Com a penetração de energia proveniente de geradores distribuídos, como os geradores solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica, o impacto dessa energia na rede de distribuição passou a ser o foco de diversas discussões (LAUKAMP *et al*, 2007; LIU e BEBIC, 2008; SANDIA, 2008). Hernández *et al* (2008) identificaram as variáveis para estimar o impacto da integração dos geradores solares fotovoltaicos em diferentes alimentadores. Essas variáveis estão relacionadas com as características de projeto e desempenho dos alimentadores. As principais delas abrangem as condições meteorológicas (nível de irradiância solar) do local de instalação, carregamento da rede, local de integração do gerador solar fotovoltaico no alimentador e nível de penetração, com o objetivo de garantir a qualidade da energia entregue à rede.

A Comissão Europeia fixou uma meta para produção de energia estabelecendo que, até o ano de 2020, 20% da energia da União Europeia deverá ser gerada a partir de fontes renováveis (UE, 2008). Em particular, graças à oferta de radiação solar em todo o mundo, a geração de energia por meio de geradores fotovoltaicos é uma opção de energia limpa para o futuro, pois não provoca emissões durante a fase de geração. Esse perfil ambiental positivo foi confirmado em estudos recentes, relatando também o retorno cada vez maior sobre o investimento de energia (FTHENAKIS e ALSEMA, 2006; FTHENAKIS *et al*, 2008).

As fontes de energias renováveis têm sido consideradas estratégicas na composição da matriz elétrica em diversas partes do mundo devido à preocupação com o aquecimento global e os geradores fotovoltaicos configuram-se como opção viável para integrar a matriz energética gerando energia de forma distribuída e reduzindo as externalidades negativas.

Mesmo com uma participação reduzida no suprimento da demanda energética mundial, a energia fotovoltaica tem apresentado um alto crescimento nos últimos anos. Países como Alemanha, Espanha e Japão tomaram a iniciativa com relação à tecnologia fotovoltaica implementando programas de incentivos a esta tecnologia, o que contribuiu para o aumento da capacidade acumulada, que registrou em 2010 um total de 35 GWp (EPIA, 2011).

2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O conceito de geração distribuída (GD) tem um significado diferente para cada concessionária de energia, não apresentando uma definição única. Em alguns países a GD é definida em função dos parâmetros técnicos como nível de tensão, tecnologia empregada e modo de operação (despacho de energia centralizado e programado ou não). Para outros é a geração conectada a circuitos em que as cargas dos consumidores são supridas diretamente (ACKERMANN *et al.*, 2001). Já outros definem a GD levando em consideração se suas instalações fazem uso de fontes renováveis ou de cogeração.

O *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* (CIGRE) define GD como a modalidade que utiliza unidades de geração com capacidade máxima de 50 a 100 MW, geralmente conectadas à rede de distribuição e que não têm seu despacho centralizado (CIGRE, 2011). O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), define GD como uma unidade de geração que apresenta uma potência de instalação muito inferior às grandes centrais de geração, e que permite a conexão em um ponto próximo aos centros de carga (IEEE, 2011). Já para o Instituto de Eficiência Energética (INEE) a GD é uma expressão utilizada para designar a geração elétrica realizada junto ou próximo do(s) consumidor(es), independente da potência, tecnologia e fonte de energia (INEE, 2011).

Na primeira metade do século XX, a geração elétrica próxima ao consumidor chegou a ser regra no Brasil, quando a energia industrial era praticamente toda gerada localmente. A partir da década de 40 a geração em centrais de grande porte ficou mais barata, reduzindo o interesse dos consumidores pela GD e, como consequência, o incentivo ao desenvolvimento tecnológico cessou (INEE, 2011).

Com a crescente necessidade de expansão do sistema elétrico a GD têm sido uma opção para que as diferentes fontes de energia possam ser conectadas ao longo das redes de distribuição. A GD torna-se atraente quando comparada às grandes centrais geradoras, pois requer baixos investimentos, apresenta reduzido impacto ambiental, possibilita a inovação tecnológica e a utilização de novas tecnologias (veículos elétricos e veículos de célula a combustível), flexibilidade de implementação, redução da necessidade de novas linhas de transmissão, além de aumentar a confiabilidade do sistema elétrico.

Spier *et al* (2001) pontuaram algumas desvantagens na utilização de GD no sistema de distribuição como: aumento no nível de curto circuito, competição por regulação de tensão e harmônico e flutuação de potência ativa na rede de distribuição. Um importante estudo de Caamaño *et. al* (2007) concluiu com base em estudos e projetos específicos que a geração fotovoltaica como GD não contribui para a capacidade de curto circuito da rede. Além disso, os inversores possuem dispositivos que interrompem a conexão no caso de perturbação na rede.

Diversos trabalhos científicos têm sido publicados sobre o impacto da GD no sistema de distribuição. A experiência acumulada com geradores fotovoltaicos distribuídos mostra que a tecnologia amadureceu muito nas últimas décadas. A possível ocorrência de *ilhamento* não intencional (injeção contínua de energia na rede, mesmo quando a rede está desligada) nas redes de distribuição é uma questão importante e resolvida, bem como a qualidade da energia entregue à rede (sobretensões, quedas de tensão, variação de frequência, distorções harmônicas na tensão e na corrente). As investigações mostram que com a tecnologia e o conhecimento atual essa questão não deve ser vista como uma barreira ou um fator de limitação para o desenvolvimento da geração distribuída utilizando geradores solares fotovoltaicos. Quando comparados a outras tecnologias, como por exemplo, com os geradores eólicos, nota-se que os geradores solares fotovoltaicos causam um menor impacto ao injetarem energia na rede elétrica (CAAMAÑO *et al.*, 2007).

Algumas tecnologias de GD estão sujeitas às influências meteorológicas e sazonais, ou seja, são vulneráveis à variabilidade dos fenômenos naturais como vento (no caso dos geradores eólicos) e incidência de sol (no caso dos geradores fotovoltaicos) (SENJYU *et al.*, 2008).

Os geradores solares fotovoltaicos são considerados como fontes não despacháveis de energia e possuem fatores de capacidade baixos por apresentarem características exclusivamente diurnas de geração. Entretanto, se analisados pelo lado da demanda, principalmente em regiões comerciais, onde os picos de demanda (devido principalmente à utilização de ar-condicionado) coincidem com a máxima geração fotovoltaica, os geradores fotovoltaicos podem contribuir efetivamente na redução deste pico, podendo sob algumas condições ser até considerados como uma fonte despachável de energia (RÜTHER *et al.*, 2008).

À medida que estudos são aprofundados com o intuito de eliminar as barreiras técnicas, tecnológicas e de mercado, a GD pode contribuir para que as energias renováveis tenham uma maior penetração no setor elétrico brasileiro.

2.3 BATERIAS

As concessionárias de energia são obrigadas a oferecer um abastecimento estável de eletricidade para atender a constante variação da demanda. Muitas vezes, as concessionárias têm de recorrer a métodos caros e ineficientes para cumprir com suas obrigações. Neste caso, para atenderem os picos de demanda colocam em operação usinas termelétricas movidas à carvão ou gás natural, que apresentam uma resposta rápida ao fornecimento de energia. Porém, tais medidas têm consequências diretas no custo da energia elétrica, bem como impacto negativo no meio ambiente.

Segundo Lindley (2010) as fontes renováveis de energia, como por exemplo a energia eólica e a energia solar, devido ao caráter intermitente, não são viáveis para atender a essa finalidade a não ser que a energia gerada seja armazenada em grande escala. A falta de boas opções de armazenamento tem sido um desafio para as concessionárias de energia. Neste caso, o amadurecimento tecnológico das baterias é uma possibilidade para poder armazenar energia em grande escala e disponibilizá-la nos horários críticos do sistema elétrico. Por outro lado, podem desempenhar um papel importante para a adoção generalizada dos veículos elétricos. Atualmente, as baterias encontram-se em desvantagem em relação aos combustíveis líquidos, por exemplo, pois apresentam baixa densidade energética (BROWN *et al*, 2010).

Todas as baterias são formadas por dois eletrodos conectados por um condutor iônico, denominadas eletrólito. Os eletrodos têm diferentes potenciais químicos determinados pela reação química que ocorre em cada um deles. Quando eles são conectados a um dispositivo externo, elétrons fluem do potencial negativo para o positivo, e íons se movimentam no eletrólito para manter o balanço de carga e a energia elétrica pode ser consumida no circuito externo. No caso de baterias secundárias, quando o sistema chega ao equilíbrio não pode mais extrair energia, mas pode-se aplicar uma tensão na direção oposta para recarregar a bateria. A quantidade de energia elétrica por massa ou volume que pode ser extraída depende da tensão da célula e de sua

capacidade, que por sua vez dependem da química dos eletrodos. Outro parâmetro é a potência, que depende em grande parte da engenharia da bateria, além dos parâmetros mencionados anteriormente (TARASCON e ARMAND, 2008). Em linhas gerais, as baterias são dispositivos que armazenam energia química e a tornam disponível na forma de energia elétrica.

As crescentes preocupações energéticas e ambientais têm acelerado o processo evolutivo tecnológico em diversas áreas e de igual modo na inovação das baterias recarregáveis, com profundo interesse em utilizá-las não somente para dispositivos pequenos mas também na propulsão de veículos elétricos. Certamente que o sucesso dos veículos elétricos está relacionado com o armazenamento de energia (TOLLEFSON, 2008).

2.3.1 Bateria Chumbo-Ácido

A seguir são descritos alguns dos principais tipos de baterias utilizados para os fins descritos neste trabalho.

As baterias do tipo chumbo-ácido têm sido as mais utilizadas pela indústria automotiva, possuindo vantagem em relação às demais tecnologias devido ao baixo custo. No caso da utilização em veículos elétricos apresentam desvantagem, pois oferecem baixa densidade de energia (BOSSCHE *et al.*, 2006). A energia específica dessas baterias está na ordem de 33 Wh/kg, sua densidade energética é de 75 Wh/L e potência específica de 75 W/kg (CHEN *et al.*, 2009).

2.3.2 Bateria Níquel-Cádmio (NiCd)

A tecnologia de NiCd possui energia específica igual a 50Wh/kg (BOSSCHE *et al.*, 2006) e tem sido utilizada em veículos de tração elétrica devido à disponibilidade de carga rápida. Possui uma potência específica de 120 W/kg, densidade energética da ordem de 80 Wh/L e um bom ciclo de vida (CHEN *et al.*, 2009). Todavia, apresenta elevados custos e preocupações ambientais com a presença de cádmio em sua composição, além do efeito memória (VIERA *et al.*, 2006).

2.3.3 Bateria Níquel-Metal-Hidreto (Ni-MH)

A bateria de NiMH tem desempenho comparável à de NiCd e, tem sido utilizada em veículos híbridos como o Toyota Prius. Os

componentes da NiMH são inofensivos ao meio ambiente. Além disso, as baterias podem ser recicladas (FETCENKO *et al.*, 2007), apresentam ciclo de vida longo e são resistentes a carga e descarga (LI *et al.*, 2009).

2.3.4 Bateria de Íons de Lítio (Li-íon)

As baterias de Li-íon são leves, compactas e apresentam uma densidade energética na faixa de 100 a 150 Wh/L (BURKE e MILLER, 2011) sendo, portanto, bastante atrativas para os VEs devido à sua alta densidade de energia. Apresenta uma potência específica de 370 W/kg e energia específica em torno de 120 Wh/kg (CHEN *et al.*, 2009).

Uma preocupação fundamental em relação ao aumento da escala de produção das baterias de Li é a disponibilidade dos elementos utilizados para sua fabricação, bem como o elevado custo das células da bateria, que está na faixa de 150 a 1000 US\$/kWh (WADIA *et al.*, 2011).

Peterson *et al* (2010) mostraram os efeitos do deslocamento de um VE e o uso V2G sobre o desempenho da vida de uma célula de Li. Foram impostas sobre as células diferentes graus de descargas contínuas a fim de imitar a transferência de energia à rede de um V2G, concluindo que os efeitos da utilização V2G sobre as células existem, porém as perdas na capacidade da bateria aparecerão depois de alguns anos de uso.

2.4 VEÍCULOS ELÉTRICOS

O veículo elétrico (VE) é caracterizado pela utilização de motor elétrico no lugar do motor de combustão interna destinado à propulsão. Existem modelos que apresentam uma combinação de motor elétrico e de combustão interna. Kempton (2000) apresenta a seguinte classificação para os VEs:

- veículos elétricos híbridos à gasolina (VEH);
- veículos elétricos híbridos plug in (PHEV);
- veículos elétricos à bateria (BEV);
- veículos elétricos de célula de combustível (VEFC)

De acordo com Steenhof e McInnis (2008) a transição dos veículos convencionais (com motor à combustão interna) para os VEs deverá ser conduzida pelos VEHs, seguida pelos PHEVs e finalmente pelos BEVs.

Um dos grandes desafios na utilização dos veículos elétricos em larga escala está na criação de pontos estratégicos de recarga, a fim de que estes não se limitem à baixa autonomia. Israel é o primeiro país a criar uma estratégia para eliminar a dependência de combustíveis fósseis no setor de transporte. O foco, porém, não está no veículo elétrico propriamente dito, mas sim na infraestrutura de recarga, onde as baterias podem ser recarregadas ou trocadas facilmente e rapidamente (ANDERSEN *et al*, 2009).

Em 2009, a JP Morgan realizou um estudo e estimou que até o ano de 2020 aproximadamente 11 milhões de VEs serão vendidos no mundo, sendo 6 milhões na América do Norte. Isto significa que os veículos elétricos representarão 20% do mercado norte americano e 13% do mercado mundial (AUTOMOTIVE NEWS, 2009).

A oportunidade de utilizar os VEs para revolucionar os setores de transportes e os sistemas de distribuição de energia é imensa. Em particular, o surgimento de novas tecnologias oferece um grande potencial para o estabelecimento dos VEs como parte integrante do sistema elétrico, ou seja, além de serem usados como veículos de transportes, poderão atuar como geradores distribuídos, utilizando a energia armazenada a bordo para contribuir com a rede elétrica em períodos críticos do dia (pico de carga).

2.4.1 Veículo elétrico híbrido (VEH)

O VEH é um veículo que utiliza um motor elétrico acionado pela energia armazenada em um pequeno banco de baterias e um motor à combustão interna (usado em veículos convencionais) alimentado por combustível líquido (gasolina, etanol, diesel) e/ou gasoso (gás natural veicular).

O conjunto motor a combustão interna e motor elétrico que caracteriza os VEHs, permite uma redução no consumo de combustível quando comparados aos veículos convencionais que só utilizam o motor à combustão interna. O VEH pode apresentar duas configurações: série e paralelo.

Na configuração em série, o motor à combustão move um gerador com a finalidade de gerar energia elétrica e o gerador pode tanto carregar as baterias ou alimentar o motor elétrico. Já na configuração em

paralelo, o motor à combustão e o motor elétrico são conectados à transmissão e, ambos podem fornecer energia para movimentar o veículo.

O modelo Prius da empresa Toyota é o exemplo mais bem sucedido de automóvel híbrido compacto, movido à gasolina e eletricidade. Apresenta um consumo médio de 26 km/l, muito inferior ao consumo da maioria dos veículos convencionais que utilizam apenas o motor à combustão (TOYOTA, 2011).

2.4.2 Veículo elétrico híbrido *plug in*(VEPH)

Os VEPHs são semelhantes aos VEHS, porém podem ser conectados a uma tomada elétrica para recarregar as baterias, e ainda podem operar em vários modos de gerenciamento de energia, dentre os quais se destacam:

- *Charge Sustaining Mode (CS)*: Modo no qual o estado de carga da bateria é controlado para permanecer dentro de uma faixa de operação. Como o estado de carga da bateria não muda com o tempo, o motor a combustão é o responsável pela propulsão do veículo.
- *Charge Depleting Mode (CD)*: Modo no qual uma parte da energia é fornecida pela bateria. Com isso o estado de carga da bateria diminui até atingir um nível mínimo.
- *Electric Vehicle Mode*: Modo no qual somente o motor elétrico está em funcionamento. A energia armazenada na bateria é a fonte principal de energia.
- *Engine Only Mode*: Modo no qual o sistema de tração elétrico não opera.

A alternância entre os modos de gerenciamento de energia é controlada automaticamente em função do estado de carga da bateria, velocidade do veículo, temperatura da bateria, temperatura ambiente, torque e velocidade de rotação do motor (EPRI, 2001).

A Fig. 2.5 ilustra o funcionamento do modo de gerenciamento de energia em função do estado de carga da bateria de um veículo elétrico híbrido *plug-in*.

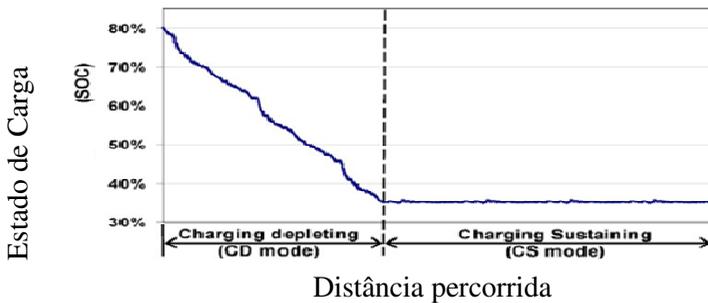


Figura 2.5: Ilustração do modo de gerenciamento de energia em função do estado de carga da bateria de um VEPH

Fonte: (SHIAU *et al.*, 2009)

No modo CD, o veículo percorre uma determinada distância com ambos os motores ligados ao mesmo tempo (motor a combustão e motor elétrico). A energia armazenada nas baterias é utilizada para movimentar o motor elétrico, porém quando o estado de carga da bateria atinge um limiar de 20%, o motor elétrico é desligado e o veículo funciona apenas com o motor a combustão interna (modo CS).

2.4.3 Veículo elétrico à bateria (VEB)

Os VEB utilizam a energia armazenada num banco de baterias como fonte de energia primária na alimentação do motor elétrico. As questões relacionadas à infraestrutura de recarga e ao desenvolvimento tecnológico em baterias ainda são limitações para utilização dos VEBs, que ficam restritos a trajetos urbanos devido à baixa autonomia. Os VEBs necessitam ser recarregados com grande frequência e isto implica em longos períodos de recarga. A recarga pode ser feita durante a noite (fora do horário de pico noturno) ou no período diurno durante o tempo em que o veículo ficar estacionado, a partir de uma tomada de tensão típica residencial, comercial ou industrial. No entanto, se for desejado que a recarga seja realizada num intervalo curto de tempo será necessária uma infra-estrutura elétrica diferenciada, com conexões elétricas adequadas a este tipo de serviço, pois as elevadas correntes relacionadas à grande potência requerida, excedem a capacidade elétrica das tomadas convencionais.

2.4.4 Veículo Elétrico de Célula de Combustível (VEFC)

O veículo de célula de combustível é um veículo em que a energia elétrica é gerada a bordo através de um processo eletroquímico em que a energia do hidrogênio é transformada diretamente em eletricidade. A energia elétrica gerada alimenta o motor elétrico e recarrega a bateria.

Diferentemente das baterias que fornecem energia elétrica através de materiais ativos armazenados em eletrodos sólidos, as células de combustível geram eletricidade à medida que são alimentadas de materiais ativos e reagentes, que pode ser o carvão, hidrocarbonetos, alcoóis, aldeídos e hidrogênio.

2.5 PADRÃO DE CONDUÇÃO

O padrão de condução ou perfil de condução do usuário de VE produzirá um impacto na rede de distribuição, simplesmente pela definição da localidade em que estará no momento da recarga. O padrão de condução é muito variável ao longo do dia; um deslocamento típico diário inicia-se geralmente à partir da residência, seguido de um deslocamento em direção ao trabalho e, no final da tarde, um retorno à residência. Em alguns casos pode haver um pequeno deslocamento em situações emergenciais. Isto significa que a qualquer momento do dia um VE pode estar na garagem, no estacionamento de uma empresa, num restaurante, no estacionamento de um *shopping center*, ou mesmo na estrada. Os padrões de condução são altamente estocásticos, sendo difícil responder onde os VEs estarão no momento da recarga (GREEN *et al.*, 2010).

Alguns estudos semelhantes a Huston *et al* (2008) deverão ser realizados no Brasil a fim de determinar onde os VEs serão recarregados. Pesquisas deverão ser realizadas a fim de determinar o local onde estes VEs estarão agrupados (estacionados) e como a elevação da concentração destes afetará a rede de distribuição local. Isto poderá ter um impacto drástico sobre os alimentadores dependendo da área em que estarão concentrados, pois contribuirão para o aumento do pico de carga durante o dia ou durante a noite, uma vez que representarão uma carga adicional ao sistema de distribuição.

A base para responder algumas destas questões tem sido desenvolvida por Huston *et al* (2008). Estudos analisando os efeitos

sobre a rede de distribuição terão de ser realizados em áreas que abrigam os usuários de VEs, sendo interessante analisar o impacto que causarão ao sistema considerando os padrões de condução de forma estocástica, ou seja, ao invés de utilizar os valores médios e esperados do deslocamento médio diário de um veículo, utilizar modelos estocásticos para ter uma visão mais realista da situação (GREEN *et al.*, 2010)

2.6 TEMPO DE RECARGA

Segundo Clement *et al* (2008) o nível de carga será um indicador importante na avaliação do impacto dos PHEVs no sistema de distribuição, bem como o momento em que as recargas serão efetuadas. De igual modo, a análise do impacto deve considerar as estações do ano e as tendências diárias de recarga. Geralmente, é nos períodos de verão e inverno que há um aumento na demanda de energia devido às cargas de ar condicionado e calefação. A adição de uma nova carga (PHEV) junto às cargas sazonais existentes pode comprometer a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico.

Diversos estudos têm apresentado diferentes cenários quanto ao tempo de recarga, desde os mais simples até os mais complexos. Alguns apresentam cenários com recargas controladas e/ou descontroladas; recargas regulamentadas e/ou desregulamentadas; recargas rápidas; recargas no horário de ponta e/ou fora do horário de ponta; recargas inteligentes ou uma combinação destas na tentativa de simular o impacto no sistema de distribuição.

O cenário de recarga mais simples é a recarga descontrolada, quando o usuário conecta o veículo elétrico na rede a qualquer hora do dia, desconectando-o quando a bateria estiver totalmente carregada (HADLEY, 2006; CLEMENT *et al.*, 2008 e PUTRUS *et al.*, 2009). Este tipo de recarga é também conhecida como recarga não inteligente (*dumb charging*), a qual assume que os custos de energia são constantes ao longo do dia.

De acordo com Shao *et al* (2009) a recarga rápida permite ao veículo drenar mais carga da rede para ser carregado em um intervalo curto de tempo, utilizando para isso uma tomada com conexões elétricas especiais. Karnama (2009) apresenta a definição de recarga regulamentada e desregulamentada. A recarga regulamentada é definida como a recarga baseada em incentivos ou informações que poderiam

incentivar ou inibir os usuários a carregar seus VE naquela hora específica do dia. A recarga desregulamentada é a recarga no momento em que há pouca ou nenhuma informação sobre o preço da energia.

O mais avançado perfil de recarga é aquele que incorpora uma tecnologia inteligente que escalona a carga do veículo elétrico e controla as demais cargas domésticas (SHAO *et al.*, 2009). A carga escalonada é característica de uma recarga inteligente, onde o veículo elétrico desacelera sua recarga com base nos níveis de energia pré definidos comunicados através da rede elétrica. O controle de cargas domésticas permite que as residências lancem mão de cargas não essenciais naquele momento para recarregar seus veículos elétricos totalmente ou mais rapidamente. Técnicas de recarga inteligente usando tecnologia embarcada são examinadas em Acha *et al* (2010). O tempo de carga é baseado nos hábitos de condução; todavia, os usuários tenderão a se comportar de forma aleatória quanto à recarga dos veículos elétricos, sendo este um parâmetro importante nas análises quanto ao impacto na rede de distribuição.

2.7 DO VEÍCULO PARA A REDE (*VEHICLE TO GRID- V2G*)

Um aspecto interessante dos veículos elétricos é a possibilidade de integração com a rede elétrica. O conceito V2G poderá criar um sistema de energia flexível que permitirá uma melhor utilização das fontes de energias renováveis (LUND e KEMPTON, 2008).

O recurso energético que cada veículo elétrico pode oferecer é bastante limitado, sendo sua carga individual (kW) desprezível para a rede elétrica. Guile e Gross (2009) em seu trabalho procuraram fornecer uma construção conceitual para servir de ferramenta na concepção e implementação de uma plataforma para a integração efetiva de VEs na rede de distribuição. A idéia está em criar um agregador que coletará uma série de veículos elétricos, a fim de criar um grupo para atuar como uma fonte de energia distribuída.

Desta forma, os veículos elétricos são o centro do conceito V2G. O conceito básico de V2G é a possibilidade de utilizar o veículo elétrico como um dispositivo para armazenar a energia ociosa da rede no período noturno ou armazenar a energia de fontes renováveis (eólica e solar) e utilizá-la durante o dia para aliviar ou deslocar a curva de carga do sistema elétrico ou utilizá-la no horário de ponta durante a noite.

Um estudo realizado nos EUA mostrou que a penetração de 25% de veículos elétricos em 13 regiões americanas em 2020, obrigará as concessionárias de energia a construir 160 novas usinas geradoras, caso todos os usuários conectem seus veículos elétricos no início da noite, por volta de 17 horas para recarregarem suas baterias. No entanto, com a tecnologia de rede inteligente (*smart grid*) as concessionárias poderão ajustar o tempo de recarga dos veículos elétricos e ainda oferecer taxas mais baratas aos consumidores no horário fora de ponta, incentivando a recarga nesse período (AMIN e WOLLENBERG, 2005)

O veículo elétrico deve apresentar três requisitos para ser utilizado no conceito V2G conforme definido por (KEMPTON e KUBO, 2000; KEMPTON e TOMIC, 2005; TOMIC e KEMPTON, 2007; GUILLE e GROSS, 2010):

- i) uma conexão à rede para fluxo bidirecional de energia elétrica,
- ii) controle ou conexão lógica necessário para a comunicação com o operador central da rede de distribuição e,
- iii) um sistema de medição de precisão a bordo do veículo.

A conexão bidirecional à rede permitirá que o usuário tanto carregue o veículo elétrico numa tomada residencial, comercial ou industrial (carga adicional ao sistema elétrico), quanto utilize-o como um gerador distribuído (veículo elétrico como um recurso de energia) injetando energia na rede elétrica e recebendo um valor diferenciado por este serviço.

A idéia de utilizar os PHEVs como um dispositivo de armazenamento de geradores distribuídos têm sido levada a sério, necessitando apenas de um projeto piloto de demonstração.

A *smart grid* desempenhará um papel importante no setor elétrico em relação ao gerenciamento de energia devido à possibilidade de comunicação entre o usuário do veículo elétrico e a rede de distribuição, aumentando a competitividade das energias renováveis e de armazenamento, pois os produtores locais poderão vender a energia quando os preços forem elevados (picos de demanda) e comprá-las com taxas mais baixas em períodos fora do pico de demanda (BUTLER, 2007). Em casos de picos de demanda ou sobrecarga no alimentador, o operador central da rede poderá enviar um sinal de solicitação de serviços a um escritório central onde uma frota de veículos elétricos estarão estacionados (GUILLE e GROSS, 2009) ou ainda emitir um sinal

para usuários individuais, a fim de utilizar a energia armazenada nas baterias (V2G) como um recurso ao sistema elétrico. O sistema de medição a bordo do veículo permitirá ao usuário ter controle de parâmetros importantes como temperatura da bateria, autonomia do veículo elétrico, pontos de recargas próximos, estado de carga da bateria (SOC), energia disponível e benefícios com a venda da energia à concessionária.

A Fig.2.6 ilustra a interação entre geradores solares fotovoltaicos e veículos elétricos conectados à rede elétrica. Neste contexto os veículos podem ser utilizados não apenas como um meio de transporte, mas também como um dispositivo de potência e energia. As fontes renováveis de energia como eólica e solar são intermitentes e não constituem-se como uma energia “firme”, fortemente susceptíveis a sazonalidade. Porém, a intermitência pode ser gerenciada através de duas formas: *back up* e/ou armazenamento. O *back up* refere-se a geradores que podem ser acionados para providenciar potência quando a fonte de energia renovável é insuficiente. O armazenamento tem a vantagem de adicionalmente ser capaz de absorver o excesso de energia e devolvê-la em horários críticos de demanda.

No período da madrugada os veículos elétricos são recarregados pela rede elétrica em suas residências e pela manhã, no trajeto residência – trabalho, os veículos consomem uma parcela da energia armazenada nas baterias, assim ao chegarem no local de trabalho, os veículos são conectados em uma tomada elétrica para recarregarem a energia consumida durante o percurso. Essa energia pode ser proveniente de um gerador solar fotovoltaico ou um gerador eólico, armazenando energia nas baterias do veículo.

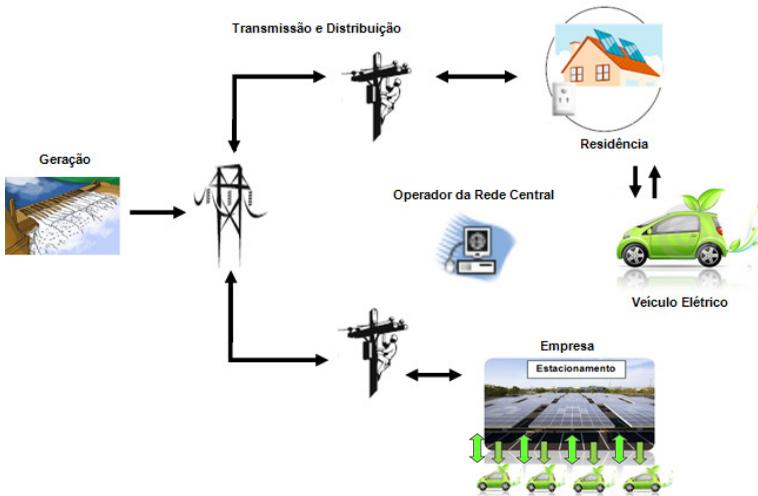


Figura 2.6. Ilustração da interação de geradores solares fotovoltaicos e veículos elétricos com a rede inteligente.

Fonte: Elaboração própria

Kempton e Tomic (2005) criaram modelos de custos e sugestões de mercados de energia (*baseload, peak power, regulation, spinning service*) onde o conceito V2G poderá ser utilizado. Os trabalhos realizados por Clement *et al* (2009), Sutanto (2004), Brooks (2006) e Srivastava *et al* (2010) levam em consideração as questões técnicas, as vantagens, as falhas e a economia na utilização do conceito V2G.

A opção V2G poderá contribuir para melhorar a eficiência da rede elétrica e sua confiabilidade. Uma simulação envolvendo uma análise diária (um dia todo) é essencial para obter uma avaliação precisa do impacto dos veículos elétricos. É importante saber quando, estatisticamente, os veículos estarão disponíveis para descarga e recarga. Uma recarga não controlada pode ocasionar problemas à rede de distribuição, no entanto, a otimização de estratégias de recarga pode trazer muitos benefícios. A utilização dos veículos elétricos pode melhorar a relação entre consumo e geração (NYNSet *al.*, 2011).

2.8 ESTUDOS DE CASOS ENVOLVENDO VES

Os efeitos sobre a rede elétrica estão diretamente relacionados com as características dos veículos elétricos. Estas características estão divididas em: características do veículo (peso, tecnologia das baterias, potência do motor elétrico), nível de carga, local e horário de recarga (residência, postos de recargas, local de trabalho). Os impactos serão determinados considerando o número de veículos conectados à rede num dado instante, o perfil de demanda do alimentador da área em questão e os efeitos da demanda no transformador (HADLEY, 2006).

O impacto da adição de uma nova carga (PHEV) no transformador de distribuição sob diferentes cenários de recarga em Blacksburg, VA, foram tratados por Shao *et al* (2009) considerando uma curva típica de demanda residencial. As simulações indicaram que novos picos de carga são gerados com a adição dos PHEV. A fim de manter o sistema seguro e eficiente foram considerados diferentes cenários de recarga e algumas soluções de gerenciamento de demanda, como o escalonamento de carga dos PHEV e o controle da carga residencial.

A simulação considerou um transformador de 25 kVA responsável pelo abastecimento de cinco residências e analisou dois PHEV com baterias de lítio-íon de 16 kWh. No estudo foram consideradas duas estratégias de carregamento. Na primeira, todos os veículos foram carregados após as 18 horas, o que representou um aumento de 68/52% na carga do transformador no inverno/verão. Na segunda, todos os veículos foram carregados fora do horário de maior demanda e, resultou num aumento de 58/52% na carga do transformador no inverno e verão. Em nenhum dos casos analisados houve sobrecarga do transformador. Assim, os cenários foram reconsiderados utilizando recarga rápida com o objetivo de diminuir o tempo de recarga dos veículos e com isso verificou-se uma sobrecarga no transformador com os veículos carregados após as 18 horas. No caso de recarga fora do horário da ponta, o transformador passou a trabalhar no limite da sua capacidade.

Embora alguns transformadores operem sobrecarregados num intervalo pequeno de tempo, isso poderá tornar-se um problema quando um grande número de veículos elétricos for conectado. O cenário final investigado envolveu cinco PHEV e duas metodologias de gerenciamento de demanda foram apresentadas: a primeira foi o

escalonamento de carga do PHEV e a segunda, o controle de carga residencial.

No escalonamento de carga os veículos foram carregados quando a demanda do transformador era menor do que um valor especificado. Já o controle de carga residencial foi uma forma de economia de energia a fim de que os veículos pudessem ser recarregados rapidamente sem sobrecarregar o transformador. Com o carregamento rápido e com a aplicação do gerenciamento de demanda residencial o trabalho mostrou que não houve sobrecarga do transformador. A recarga dos PHEVs representa uma nova carga para a rede de distribuição e isso acarretará uma ligeira diminuição na eficiência de operação dos transformadores de distribuição, e em alguns casos poderá causar a sobrecarga dos transformadores. No entanto, estas cargas poderão ser gerenciadas através de técnicas existentes nas redes inteligentes.

O impacto na rede elétrica de distribuição da Bélgica foi discutido por Clement *et al* (2008) considerando os dados atuais de tráfego e o perfil de condução dos usuários. Este trabalho investigou o fluxo de carga quando os PHEVs eram adicionados à rede de distribuição. Além disso, foram investigados três diferentes casos de recarga descontrolada: recargas entre 0h e 2h, recargas entre 6 h e 8 h e recargas durante o dia. Estes perfis de recargas foram avaliados tanto para o verão quanto para o inverno com quatro diferentes níveis de penetração de PHEV: 0%, 10%, 50% e 100%. O trabalho conclui que a integração de PHEVs afetam negativamente as perdas de potência e desvios de tensão da rede de distribuição.

Um modelo de programação quadrática e dinâmica para avaliação do impacto de PHEVs na rede de distribuição Belga quando os VEs estiverem sendo carregados em casa foi desenvolvido por Clement *et al* (2009), com a finalidade de avaliar os impactos sobre a rede de distribuição considerando dois cenários diferentes de recarga: recarga descontrolada e recarga inteligente controlada. O trabalho concluiu que a recarga deverá ser controlada via operador da rede central a fim de manter a integridade da rede de distribuição diminuindo as perdas de potência e queda de tensão.

Um quadro básico para analisar o impacto de PHEVs no sistema de distribuição foi desenvolvido por Taylor *et al* (2009). O modelo analisa a tensão de regulação, a perda de potência, a diminuição da vida

útil do transformador e os níveis de distorção harmônica, considerando um cenário determinístico e um cenário estocástico.

Os potenciais impactos da penetração dos PHEVs na rede elétrica da Califórnia foram discutidos por Axsen e Kurani (2010) e concluíram que a principal ameaça às concessionárias de energia é a recarga descontrolada no horário de ponta. Porém, com o advento de recargas inteligentes os PHEVs poderão tirar vantagem recarregando no horário fora de ponta.

A utilização da energia solar fotovoltaica para a recarga de PHEVs foi examinada por Li *et al* (2009). Este estudo considerou um PHEV – 40 (capaz de percorrer 64 km com apenas uma carga) com uma bateria de Li. Considerando a maior radiação solar anual concluiu – se que um sistema fotovoltaico de 20 m² era o suficiente para recarregar o modelo elétrico. Porém, ao considerar o comportamento da radiação solar diária, bem como o mês com a menor intensidade de radiação solar, o tamanho ideal do sistema fotovoltaico passou a ser de 78 m².

Farmer *et al* (2010) mostraram que pode haver três impactos principais na integração dos PHEVs à rede de distribuição:

- (i) aumento na temperatura do transformador devido ao aumento de carga;
- (ii) aumento dos harmônicos devido à eletrônica de potência do PHEV;
- (iii) desgaste das buchas do transformador.

O estudo desenvolveu ainda um modelo matemático para analisar os impactos, concluindo que os impactos serão amplamente variados ao longo da rede de distribuição.

3 METODOLOGIA

As etapas metodológicas utilizadas neste trabalho estão apresentadas na sequência.

A primeira etapa se refere ao levantamento das informações e dos dados relacionados às áreas de estudo: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e bairro Santa Mônica, localizados na malha urbana da cidade de Florianópolis - SC. As informações e dados levantados foram: identificação dos alimentadores que abastecem essas regiões; dados de demanda (MW) dos alimentadores; áreas possíveis de coberturas disponíveis nas edificações da UFSC e das residências e número de vagas nos estacionamentos da UFSC.

Em seguida, avaliou-se o impacto e a contribuição energética que geradores solares fotovoltaicos e veículos elétricos teriam sobre os alimentadores das regiões de estudo (TDE05 e TDE06).

Finalmente, na terceira etapa, analisou-se o possível potencial de instalação fotovoltaica nas áreas de coberturas disponíveis dessas regiões e o respectivo potencial de geração de energia elétrica, considerando as tecnologias de módulos fotovoltaicos de silício amorfo (a-Si) e de silício policristalino (p-Si).

Atualmente, o Brasil não possui um mercado para o veículo elétrico e nem um sistema de regulamentação por parte do setor elétrico quanto à possível utilização de veículos elétricos atuando como geradores distribuídos na rede elétrica pública. Dessa forma, foram considerados para efeito deste estudo os seguintes parâmetros de uma rede elétrica inteligente, que permitiu simular a interação entre os veículos elétricos e a rede elétrica, conforme a tabela 3.1.

Tabela 3.1. Parâmetros programados de uma rede inteligente (*smart grid*).

Parâmetros programados de uma rede elétrica inteligente (<i>smart grid</i>)	
Potência máxima do alimentador	O alimentador não pode apresentar, em nenhum ponto, queda de tensão maior do que 10,3% em relação à tensão nominal (13,8 kV), e nem apresentar carregamento máximo superior a 75% da capacidade nominal (limite térmico dos cabos) do cabo (9 MW).
Potência limite devido à contribuição V2G	Limite imposto pela concessionária local relativo à contribuição V2G, considerando que o carregamento do alimentador deve permanecer na faixa de 50 % da capacidade nominal do cabo (4,5 MW).
Medição, Comunicação e Conexão	A medição do sistema é realizada instantaneamente verificando a necessidade da concessionária local, e em seguida, os usuários dos veículos elétricos são informados da possibilidade de entregarem energia à rede elétrica nos horários solicitados, obedecendo a ordem de conexão e o limite máximo de veículos solicitados àquele dia pela concessionária, tendo prioridade o VE que se plugar primeiro ao sistema elétrico.
Limites da transferência V2G	A energia e potência elétrica disponíveis para ser entregue à rede (V2G) são limitadas pelo circuito elétrico onde são realizadas as recargas dos VEs ; capacidade de armazenamento das baterias e tempo de transferência V2G e potência máxima dos circuitos eletrônicos do veículo. O menor destes três limites é a potência para a configuração V2G.
Contribuição (V2G)	A contribuição do veículo elétrico à rede no período de ponta dependerá da necessidade da concessionária. Como as medições do sistema serão realizadas em tempo real, a concessionária informará instantaneamente aos usuários o número máximo de veículos a serem conectados naquele instante, e o interesse de cada um deles em se conectarem à rede, recebendo um valor diferenciado pela energia entregue. A conexão à rede para a operação V2G poderá ocorrer no período das 19h às 24h.
Recarga (G2V)	A recarga dos veículos ocorrerá de forma instantânea, logo após a contribuição V2G, no período da 0h às 6h.

Fonte: Elaboração própria

3.1 LOCAIS DE ESTUDO

Os objetos de estudo considerados neste trabalho são a Universidade Federal de Santa Catarina e a região que abrange os bairros Santa Mônica, Córrego Grande e Trindade.

A UFSC, campus Trindade, possui um complexo de edificações com 317 000 m² de área construída (ETUSC, 2010) e 2300 vagas de estacionamento (BEPPLER e PRIM, 2010), e está localizada na região urbana de Florianópolis - SC. O campus central da UFSC apresenta elevado consumo de energia elétrica ao longo do dia. Além disso, possui diversas edificações com grandes áreas de cobertura disponíveis, que são propícias à instalação de geradores solares fotovoltaicos.

A área que abrange os bairros Santa Mônica, Córrego Grande e Trindade estão localizadas numa zona urbana mista, com edificações residências, de serviço e comércio, e consumo significativo ao longo do dia, com a ocorrência de pico à noite.

3.2 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DE DEMANDA DO ALIMENTADOR

Os alimentadores apresentam características distintas entre si como extensão, cabeamento, perfil de demanda, carga nominal instalada, número de transformadores, corrente de despacho, fator de demanda, entre outros. De acordo com os critérios de planejamento da rede de distribuição local da CELESC, o alimentador não pode possuir, em nenhum ponto, queda de tensão maior do que 10,3% em relação à tensão nominal (13,8 kV) e nem apresentar carregamento máximo superior a 75% da capacidade nominal (limite térmico) do cabo. Este é um dado importante com relação ao alimentador, uma vez que a adição de veículos elétricos na rede representa uma nova carga para o alimentador. A integração de uma quantidade elevada de veículos elétricos poderá ocasionar a sobrecarga do alimentador, obrigando a concessionária de energia a aumentar a sua capacidade instalada ou fazer um remanejamento de carga de um alimentador para outro.

Os dados de demanda energética dos alimentadores são armazenados diariamente pela concessionária e medidos em intervalos horários. Com esses dados foi possível gerar gráficos horários diários, a fim de caracterizar e identificar o momento em que ocorrem os maiores picos de demanda. O formato da curva resultante destes dados permite classificá-los em picos diurnos, picos noturnos ou picos mistos.

O perfil de demanda de um alimentador está diretamente relacionado com os aspectos sociais da localidade e do tipo de classe consumidora (residencial, comercial ou industrial), apresentando comportamento distinto de uma região para outra.

Neste trabalho foram analisados os dados horários de demanda correspondentes ao ano de 2008 dos alimentadores TDE05 e TDE06, obtidos junto à CELESC.

3.3 ANÁLISE DO POTENCIAL DE INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA

Em relação às edificações da UFSC, este trabalho não tem a pretensão de analisar os pormenores das questões relacionadas a sombreamentos, nem tampouco avaliar a inclinação e o desvio azimutal dos possíveis geradores solares nas áreas de coberturas dos edifícios selecionados.

Para a simulação do potencial de instalação fotovoltaica foram selecionadas dentre todas as edificações espalhadas pela UFSC as edificações com grande área de cobertura disponível e aquelas que não apresentaram áreas de coberturas passíveis de sombreamento (verificação *in loco*). Para essa análise foi solicitada ao Escritório Técnico Administrativo da UFSC (ETUSC) a planta em arquivo digital do complexo de edificações do campus da universidade. Os valores de áreas de coberturas foram calculados pelas dimensões da área construída, uma vez que não é possível estimar exatamente o valor da área de cobertura disponível.

Na estimativa do potencial instalado na UFSC, assumindo as áreas anteriormente selecionadas, foi considerada uma fração de 80% da área total de cobertura das edificações para o cálculo do potencial de instalação fotovoltaica no campus da UFSC por meio da Eq. 01. Este percentual desconsidera as áreas não aproveitáveis na instalação dos módulos fotovoltaicos (SANTOS, 2009).

$$P_{cc} = (A * 0,80) * E_{ff} * G \quad \text{Equação 01}$$

Onde:

P_{cc} : Potência instalada [kW/m²];

A: Área de cobertura disponível [m²];

G: Irradiância de referência [kW/m²];

E_{ff} : Eficiência do módulo fotovoltaico [%].

Para o cálculo do possível potencial de instalação fotovoltaica na região delimitada pelo alimentador TDE05, que abastece uma zona urbana mista, foi considerado o trabalho realizado por Santos (2009), que analisou uma proposta de *kits* fotovoltaicos para as residências unifamiliares do bairro Santa Mônica. Neste trabalho foram consideradas as 496 residências unifamiliares existentes naquele bairro no ano de 2007, onde foram avaliadas a inclinação e o desvio azimutal das áreas de cobertura dessas residências, com a finalidade de quantificar a possível geração fotovoltaica com a instalação desses *kits*.

Cada *kit* fotovoltaico apresenta aproximadamente 7 m² de área e utiliza uma tecnologia de módulo fotovoltaico de p-Si, apresentando um potencial instalado de 1 kWp. Porém, na análise de cobertura disponível, verificou-se que seria possível a instalação de um *kit* fotovoltaico com área maior do que a inicialmente considerada. Neste trabalho foi proposto um *kit* fotovoltaico de 2 kWp de potência instalada, considerando as 496 residências unifamiliares da região de estudo.

3.4 POTENCIAL DE GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NO CAMPUS DA UFSC E BAIRRO SANTA MÔNICA

A partir do potencial possível de ser instalado na UFSC, foi calculado o potencial de geração solar fotovoltaica considerando duas tecnologias diferentes, uma de a-Si e outra de p-Si. Foram utilizados os dados de radiação solar do sistema de 2kWp do Laboratório de Energia Solar da UFSC, o qual possui um sistema de aquisição de dados que registra, a cada 5 minutos, parâmetros elétricos, temperatura e irradiação solar. Este gerador está em operação desde 1997 (Rüther, 1998; 2004; Rüther e Dacoregio, 2000; Rüther *et al.*, 2006).

Como dito no item 3.3, ao considerar as áreas de cobertura do campus da UFSC não está no escopo deste trabalho analisar as orientações e inclinações dos possíveis geradores instalados nas coberturas das edificações. Dessa forma, foi considerado que todos os geradores estariam instalados na posição ótima para a cidade de Florianópolis-SC (inclinadas a 27° e voltadas para o norte geográfico). A partir dos dados de radiação solar do ano de 2008, gerados pelo sistema de 2kWp do LABSOLAR e da potência instalada estimada através da metodologia descrita em 3.3, foram calculados os valores da geração solar fotovoltaica diária de acordo com a Eq. 02.

$$E = (H_{TOT} * P_{cc} * TD) / G \quad \text{Equação 02}$$

Onde:

E: Média diária da geração solar fotovoltaica [kWh];

H_{TOT}: Irradiação média diária recebida no plano do módulo [kWh/m²];

P_{cc} : Potência instalada do sistema fotovoltaico [kW/m²];

G: Irradiância de referência [kW/m²];

TD: Taxa de desempenho do sistema, tipicamente, 80%.

As áreas de coberturas analisadas para as 496 residências apresentam orientações e inclinações diferentes, com isso a geração de energia elétrica também apresentará valores diferentes de geração para cada uma das residências analisadas. A estimativa do potencial de geração fotovoltaica possível, considerando essas residências unifamiliares, permitiu concluir que mesmo sob as condições subótimas das coberturas existentes, todos os *kits* fotovoltaicos gerariam pelo menos 90% da energia que seria gerada caso estivessem instalados na melhor posição (inclinadas a 27° e voltadas para o norte geográfico) para a cidade de Florianópolis (SANTOS, 2009). Dessa forma, os valores obtidos na Eq.02 foram corrigidos pelo fator 0,9 para o cálculo da geração fotovoltaica diária.

3.5 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE UM MODELO DE VEÍCULO ELÉTRICO

Há três tipos de veículos de tração elétrica que podem fornecer energia para a rede: os veículos elétricos híbridos *plug-in*, os veículos elétricos à bateria e os veículos de célula de combustível. Os veículos elétricos híbridos *plug-in*, que utilizam combustível líquido (gasolina, gás natural, etanol) e eletricidade para movimentar o motor à combustão interna e o motor elétrico respectivamente, apresentam capacidade de armazenamento de energia limitada. Já os veículos elétricos de célula de combustível são vistos como uma opção a longo prazo.

Para este estudo foi considerado o veículo elétrico à bateria *Nissan-Leaf*, da empresa Nissan. Os dados técnicos são apresentados na Tabela 3.2 e foram obtidos junto ao site (<http://www.nissan.pt>). O modelo de veículo elétrico utilizado nas análises possui as características de um veículo *hatch* médio que comporta cinco passageiros.

O veículo elétrico, *Nissan Leaf*, possui uma bateria de Li íon com 24 kWh de capacidade energética, porém somente 95% dessa energia estão disponíveis (eficiência das baterias de Li íon) para uso (AMJAD *et*

al, 2010). Com essa capacidade energética o veículo elétrico é capaz de percorrer uma distância de aproximadamente 160 km sem a necessidade de recarga. A eficiência deste modelo elétrico encontra-se em torno de 6,67 km/kWh. O motor elétrico AC tem 80 kW de potência máxima, alimentado apenas por eletricidade e apresenta um carregador *on board* de 3.3 kW para recargas normais (entre 6 e 8 horas), que pode ser conectado a qualquer tomada comum que suporte de 20 a 35A de corrente. Para recargas rápidas é necessária a instalação de um carregador de 50 kW de potência, que necessita de uma tomada especial de alta corrente (230 a 460A). A Tabela 3.2 mostra as especificações técnicas do *Nissan Leaf*.

Tabela 3.2. Especificações técnicas de um modelo de veículo elétrico – *Nissan Leaf* [www.nissan.pt]

Motor e Transmissão	
Motor elétrico	Síncrono AC
Potência máxima	80 kW
Alimentação	Eletricidade
Bateria	
Bateria	Li-íon
Capacidade	24 kWh
Autonomia máxima	160 km
Velocidade máxima	145 km/h

Os veículos elétricos comparados aos modelos de veículos da mesma categoria com motores à combustão interna apresentam baixa autonomia e velocidade reduzida, sendo um fator limitante à adoção em larga escala.

3.6 DETERMINAÇÃO E LIMITAÇÕES DA TRANSFERÊNCIA G2V E V2G

A energia (kWh) e a potência (kW) elétrica requerida da rede elétrica (G2V) estão limitadas pelo circuito elétrico onde o veículo é conectado para ser recarregado, ou seja, pela potência (ou corrente) máxima da tomada elétrica (residencial, comercial ou industrial) disponível. Na situação em que o veículo é utilizado como um gerador

distribuído (V2G) as limitações estão associadas à capacidade de armazenamento da bateria, ao tempo da transferência V2G e à variação da potência máxima dos circuitos eletrônicos do próprio veículo.

Para calcular o limite do circuito elétrico onde o veículo elétrico será conectado e recarregado, basta multiplicar a corrente (A) pela tensão (V). Assim, tem-se a capacidade de potência da rede ou potência máxima do circuito (P_{rede}) conforme Eq. 03. Embora haja a possibilidade de recarga rápida, isso demandaria muita potência da rede elétrica e seria necessária a instalação de circuitos cuja fiação fosse capaz de suportar elevadas correntes. Neste trabalho foi considerado que os veículos elétricos serão recarregados em tomadas residenciais em um período de 6 horas.

$$P_{rede} = U * i \quad \text{Equação 03}$$

Onde:

P_{rede} : Potência limite imposta pela rede, em watts (W). Essa potência é comumente expressa em kW,

U: Tensão da rede, tipicamente, 220 V,

i: Máxima intensidade da corrente, em *Ampère* (A), tipicamente, 30 A.

O cálculo da quantidade de energia (kWh) e de potência (kW) disponível no veículo elétrico no momento do serviço V2G é dado pelas Eq. 04 e 05 (KEMPTON e TOMIC, 2005).

$$E_{V2G} = ((E_S - (d_d + d_{rb}) / 2R_{VE}) * DOD) * \eta_{inv} \quad \text{Equação 04}$$

$$P_{V2G} = ((E_S - (d_d + d_{rb}) / 2R_{VE}) * DOD) * \eta_{inv} / t_{disp} \quad \text{Equação 05}$$

$$E_{G2V} = (E_{V2G} * \eta_{inv}) \quad \text{Equação 06}$$

$$P_{G2V} = (E_{V2G} * \eta_{inv}) / t_{disp}$$

Equação 07

Onde:

E_{V2G} : Energia disponível para transferência V2G, em kWh;

E_{G2V} : Energia necessária da rede elétrica para recarga do VE;

P_{V2G} : Potência máxima disponível para transferência V2G, em kW;

P_{G2V} : Potência máxima requerida para recarga G2V, em kW;

E_S : Energia armazenada disponível como corrente contínua (CC) em kWh para o inversor, considerando a eficiência da bateria de Li íon ($\eta_{bat}=0,95$) (AMJAD *et al*, 2010);

DOD: Fração da energia disponível a ser injetada na rede elétrica, em %;

d_d : Distância média diária percorrida por um veículo convencional com motor a combustão interna, em km;

d_{rb} : Distância em km, utilizada para uma situação de emergência;

R_{VE} : Rendimento do veículo elétrico em km/kWh;

η_{inv} : Eficiência de conversão de CC para CA ($\eta_{inv}=0,93$)(KEMPTON, 2005);

t_{disp} : Tempo de despacho da energia armazenada no veículo e/ ou tempo de recarga do veículo.

Um estudo realizado pela GIPA (*Interprofessional Grouping in Automotive Products and Services*), órgão que realiza pesquisas referentes à rodagem de automóveis no mundo, mostrou que o deslocamento médio diário de um veículo convencional com motor à combustão interna no Brasil é de aproximadamente 40 km por dia ou 14 600 km por ano (GIPA, 2006). Desse modo, foi considerado que um veículo elétrico rodaria na média (d_d) 40 km/dia, além de um deslocamento de 10 km para atender a eventuais situações de emergência (d_{rb}), como por exemplo, uma necessidade de se deslocar até a farmácia, supermercado ou hospital.

Na situação típica de uso de um veículo elétrico no conceito V2G, o usuário se deslocará no início da manhã até o local de trabalho e deixará seu veículo estacionado, conectado em uma tomada elétrica disponível no estacionamento. O veículo elétrico permanecerá estacionado durante a maior parte das horas de incidência solar e, nesse período, um gerador solar fotovoltaico integrado à cobertura do estacionamento, ou integrado a uma edificação do local de trabalho, poderá fornecer energia para recarregar as baterias do veículo. Ao final da jornada de trabalho o usuário utilizará o veículo elétrico, com a bateria completamente carregada, para se deslocar de volta à residência e ao chegar novamente ao seu destino irá conectá-lo à rede elétrica.

Dessa forma, foi assumido nesta dissertação que ao percorrer o trajeto **residência – trabalho – residência**, o veículo elétrico chegará à residência no período da noite tendo consumido uma energia equivalente ao deslocamento de 20 km. Isso, porque ao ser conectado a uma tomada elétrica no trabalho, o veículo recarregará a energia consumida no trajeto matinal **residência - trabalho**. Dessa forma, a energia (kWh) e potência (kW) disponíveis para a situação V2G são expressas conforme as Eq. 04 e 05.

A descarga energética considerada neste trabalho para ser injetada na rede elétrica (DOD) foi de 60% da energia disponível no banco de baterias. Assim, durante o período da madrugada o veículo elétrico permanecerá conectado à rede elétrica para repor 60% da energia das baterias, completando totalmente a sua carga. Dessa forma, a energia necessária para V2G é a mesma para G2V, já considerando os fatores de eficiência de descarga e recarga.

3.7 ESTIMATIVA DO NÚMERO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS POSSÍVEIS DE SEREM UTILIZADOS COMO GERADORES DISTRIBUÍDOS (V2G)

A contribuição potencial possível do veículo elétrico para a rede (V2G) e os fluxos energéticos na operação de recarga (G2V) serão avaliados no contexto de uma rede inteligente (*smart grid*). A utilização do veículo como um gerador distribuído ocorrerá no período das 19h às 24h, estando incluso neste intervalo o horário de ponta. A recarga, por sua vez, ocorrerá preferencialmente no intervalo da 0h às 6h, equivalente a um período de 6 horas de recarga.

A possibilidade de aquisição e comunicação rápida de informações de consumo de energia elétrica no contexto de uma rede inteligente (*smart grid*) permitirá uma melhoria no perfil de consumo da rede elétrica. Dessa forma, a interação de veículos elétricos com a rede elétrica pública poderá contribuir para a redução do consumo no horário de ponta, bem como modelar a curva de demanda no horário de utilização do veículo como gerador distribuído.

Na prática os veículos deverão estar “plugados” na rede elétrica sempre que estiverem estacionados nas residências de seus usuários e a comunicação entre o veículo e a rede elétrica será feita de forma automática. Essa interação será gerenciada pela concessionária de energia local que sinalizará aos usuários de veículos o momento de se disponibilizarem para a rede elétrica para o fluxo V2G. O número de veículos elétricos que estarão conectados à rede oferecendo o serviço V2G (entregando energia para a rede) será calculado em função do montante de potência (kW) e energia (kWh) a ser oferecida como suporte à rede diariamente. Como as curvas de demanda diárias apresentam comportamentos diferentes ao longo dos meses, objetiva-se determinar qual o montante de potência e energia que deverá ser oferecido diariamente.

O estabelecimento de um valor limite de potência (MW) para o alimentador deverá ser feito pela concessionária local para que seja possível calcular o montante de potência e energia a ser oferecida. Como os conceitos de *smart grid* e V2G estão em fase de estudos, não há uma norma que defina o valor desse limite. Porém, sabe-se que o limite de carregamento do alimentador não pode ultrapassar 75% da carga nominal, para que não ocorram danos ao alimentador (CELESC, 2011). Com isso definiu-se neste trabalho um limite de 50% da carga nominal do alimentador, valor próximo à média anual de demanda do alimentador no ano de 2008.

Em se tratando de uma rede elétrica inteligente, a concessionária fará o monitoramento das necessidades da rede de distribuição, comunicando - se com os usuários de veículos elétricos. Através da análise em tempo real dos dados de demanda será possível prever o número de veículos que estarão conectados para entregar energia à rede no horário de ponta, bem como o número de veículos que poderão ser recarregados com prioridade após o término do serviço V2G.

A estimativa do número de veículos considerou a diferença entre as demandas horárias ocorridas no dia no período das 19h às 24h e o limite imposto pela concessionária (4,5 MW), como mostrado na Tabela 3.1. Para o cálculo da energia disponível neste intervalo, foram consideradas apenas as demandas diárias no intervalo acima mencionado maiores do que o limite imposto pela concessionária. O gerenciamento de carga e descarga dos veículos elétricos será feito por meio da rede inteligente, como anteriormente descrito. Dessa forma, o número de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos obedece às Eq. 08 e 09.

$$Edisp = \sum^t (Di - L), Di > L \quad \text{Equação 08}$$

$$N_{VE} = \frac{Edisp}{EV2G} * 1000 \quad \text{Equação 09}$$

Onde:

E_{disp} : Energia disponível num dado em intervalo de tempo em MWh;

Di : Demanda horária no período das 19h às 24h, em MW;

L : Limite imposto pela concessionária (4,5 MW);

E_{V2G} : Energia disponível na bateria de um veículo em kWh para a contribuição V2G.

3.8 ANÁLISE DO IMPACTO ENERGÉTICO NO ALIMENTADOR TDE05 UTILIZANDO O VEÍCULO ELÉTRICO COMO GERADOR DISTRIBUÍDO (V2G)

Para o cálculo do potencial de contribuição V2G para a rede elétrica no horário de ponta foi considerado o período onde os valores de demanda horária do alimentador são maiores do que o limite imposto pela concessionária. Isso porque dependendo do dia poderá ocorrer momentos em que não será necessária a contribuição do veículo naquela

hora específica (demanda horária inferior ao limite imposto pela concessionária). A partir do momento em que o limite estabelecido for ultrapassado os veículos serão acionados pela rede e terão a opção de vender a energia armazenada nas baterias do veículo para a concessionária local. Poderá ocorrer que nem todos os veículos estarão disponíveis para se conectarem à rede e contribuir com a redução do pico num determinado dia e horário.

O impacto da contribuição energética utilizando os veículos como geradores distribuídos para a modelagem da curva de demanda do alimentador levará em conta a previsão da demanda em tempo real que a concessionária fará. Ou seja, os veículos serão conectados à rede elétrica à medida que a demanda ultrapassar o limite imposto. A rede inteligente gerenciará a entrada de veículos para a contribuição V2G. A Eq.10 mostra a contribuição energética num dado instante.

$$C_{V2G} = D_i - (D_i - L), D_i > L \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

C_{V2G} : Contribuição num dado instante em MW.

D_i : Demanda horária no intervalo das 19h às 24h, dado em MW.

L : Limite imposto pela concessionária, dado em MW.

3.9 ANÁLISE DO IMPACTO ENERGÉTICO NO ALIMENTADOR TDE05 COM A RECARGA DO VEÍCULO ELÉTRICO (G2V)

Um das principais limitações da utilização de veículos elétricos é o tempo de recarga das baterias. A energia elétrica necessária para a realização de uma recarga rápida excede sobremodo a capacidade das tomadas elétricas, além do que ocasiona um desgaste nas baterias à medida que são realizadas descargas muito profundas, diminuindo o seu tempo de vida. As tomadas residenciais típicas podem suportar cargas que variam de 3 kW a 12 kW. Para realizar a recarga completa de um banco de baterias, como por exemplo, o modelo apresentado neste trabalho, considerando um tempo de 6 horas são necessários menos de 4 kW de potência. A adição de um modelo apenas, não implica em danos

ao sistema elétrico; todavia a adição de uma série de veículos representará uma carga considerável ao sistema elétrico.

Dessa forma, neste trabalho foi considerado que as baterias dos veículos elétricos serão recarregadas em tomadas elétricas típicas encontradas nas edificações residenciais, levando aproximadamente um tempo de 6 horas para uma recarga normal completa. Após a estimativa do número de veículos que podem ser utilizados como geradores distribuídos (V2G) no item 3.7, foi analisado o impacto energético da recarga desses veículos sobre o alimentador TDE05 na manhã do dia seguinte. No contexto de rede inteligente a recarga terá início automaticamente a partir da 0h com término às 6h.

Conforme a Eq. 05 do item 3.6, cada veículo ao ser conectado a rede demandará a mesma potência utilizada para o serviço V2G, pois neste trabalho considerou-se que todos os veículos conectados ao alimentador consomem a mesma potência para recarregarem suas baterias, ou seja, o estado de carga deles não varia. Por outro lado, numa situação real sabe-se que nem todos os veículos apresentarão o mesmo estado de carga das baterias ao se conectarem a rede elétrica.

3.10 CONTRIBUIÇÃO FOTOVOLTAICA PARA O CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Para estimar a contribuição dos geradores fotovoltaicos na recarga de veículos elétricos foram consideradas as gerações diárias horárias de duas tecnologias (a-Si e p-Si) ao longo do ano. A energia consumida por um veículo elétrico durante um trajeto típico (residência – trabalho – residência) foi calculado conforme a Eq.11.

$$E_{C_{VE}} = ((d_d + d_{rb}) / 2R_{VE}) \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

$E_{C_{VE}}$: Energia consumida durante o trajeto (residência – trabalho) em kWh

d_d : Distância média diária percorrida por um veículo em km;

d_{rb} : Distância em km, utilizada para uma situação de emergência;

R_{VE} : Rendimento do veículo elétrico em km/kWh;

A Eq.12 representa a energia consumida durante o trajeto, e também a energia requerida da rede (G2V) para recarregar totalmente a bateria do veículo. Assim:

$$E'_{G2V} = E_{CVE} = ((d_d + d_{rb})/2R_{VE}) * \eta_{inv} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

E'_{G2V} : Energia requerida da rede, em kWh, para completar a recarga da bateria (energia consumida no trajeto residência – trabalho),

d_d : Distância média diária percorrida por um veículo convencional com motor a combustão interna, em km;

d_{rb} : Distância em km, utilizada para uma situação de emergência;

R_{VE} : Rendimento do veículo elétrico em km/kWh;

η_{inv} : Eficiência de conversão de CC para CA ($\eta_{inv} = 0,93$)(KEMPTON, 2005);

Dessa forma, o número de veículos possíveis de serem recarregados utilizando a energia fotogerada é dado pela Eq.13.

$$N^{\circ}_{VE} = \frac{\int_0^t (fv) dt}{EG2V} \quad t = 0,1,2,\dots,23 \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

(fv): Representa a curva de geração fotovoltaica para um dia qualquer ao longo do tempo em kWh;

E_{G2V} : Representa a energia solicitada da rede pelo veículo elétrico, em kWh.

3.11 BALANÇO ENERGÉTICO

No cálculo do balanço energético foram consideradas as 496 edificações residenciais unifamiliares localizadas no bairro Santa Mônica, assumindo a existência de um VE/residência e o possível gerador solar fotovoltaico de ser instalado nessa região (992 kWp). De igual modo, foram consideradas as 2300 vagas de estacionamento disponíveis na UFSC, bem como os possíveis geradores solares de 3 MWp de módulos de a-Si e 6,7 MWp de módulos de p-Si. O objetivo do balanço energético é dar uma noção da interação entre a contribuição V2G + geração solar fotovoltaica + consumo (G2V) verificando a potencial contribuição para o alimentador em questão. A Eq. 14 mostra o consumo energético dos VEs com V2G para o caso da região do bairro Santa Mônica.

$$C_{en} = (x * E_{G2V} * d_n)/1000 \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

C_{en} : Consumo energético mensal dos VEs, em MWh;

x : Total de veículos (neste caso, 496 VE/residência);

E_{G2V} : Energia requerida da rede elétrica para recarregar um modelo de VE;

d_n : número de dias do mês.

O balanço energético anual para a região em estudo é dado pela Eq. 15.

$$B_{en} = \sum_{i,j=1}^{12} (GFV_i - C_{en_j}) \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

B_{en} : Balanço energético anual, em MWh;

GFV_i : Geração solar fotovoltaica mensal (p-Si);

Cen_j : Consumo energético mensal.

A Eq. 16 apresenta o consumo energético considerando os veículos (que poderiam ser VES) estacionados no campus da UFSC.

$$C'_{en} = (x * E'_{G2V} * d_n)/1000 \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

C'_{en} : Consumo energético mensal dos VEs, em MWh;

x: Total de veículos (neste caso, 2300 VE);

E'_{G2V} : Energia requerida da rede, em kWh, para completar a recarga da bateria (energia consumida no trajeto residência – trabalho);

d_n : número de dias do mês.

O balanço energético anual para a região delimitada pelo alimentador TDE06, que corresponde ao campus da UFSC é dado pela Eq. 17.

$$B_{en} = \sum_{i,j=1}^{12} (GFV_i - Cen_j) \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

B_{en} : Balanço energético anual, em MWh;

GFV_i : Geração solar fotovoltaica mensal (módulos de a-Si e p-Si);

Cen_j : Consumo energético mensal.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DO ALIMENTADOR TDE05

Como detalhado no Cap. 1, a subestação Trindade faz parte do sistema de distribuição CELESC na ilha de Santa Catarina e dela partem dez alimentadores, responsáveis pelo abastecimento da região centro-leste da cidade de Florianópolis. Os dez alimentadores partem de três transformadores (TT-1, TT-2 e TT-3) da SE Trindade e são nomeados e numerados como TDE01 a TDE10. Estes alimentadores são interligados entre si e agrupados em função da carga individual de cada um, a fim de não ultrapassar a capacidade de potência dos transformadores. Cada um destes transformadores possui uma determinada capacidade nominal de potência e são responsáveis pelo abastecimento dos alimentadores a eles conectados (BRAUN-GRABOLLE, 2010).

Para a realização deste trabalho foram solicitados à CELESC os dados de demanda do alimentador TDE05 e TDE06 correspondentes ao ano de 2008. Estes dados estão dispostos em uma planilha eletrônica que apresenta os valores diários horários de demanda (MW) para cada mês do ano.

A partir desses dados foram geradas curvas horárias contemplando todos os dias do ano de 2008, a fim de caracterizar o perfil de demanda destes alimentadores. A Fig. 4.1 apresenta o perfil de demanda do alimentador TDE05.

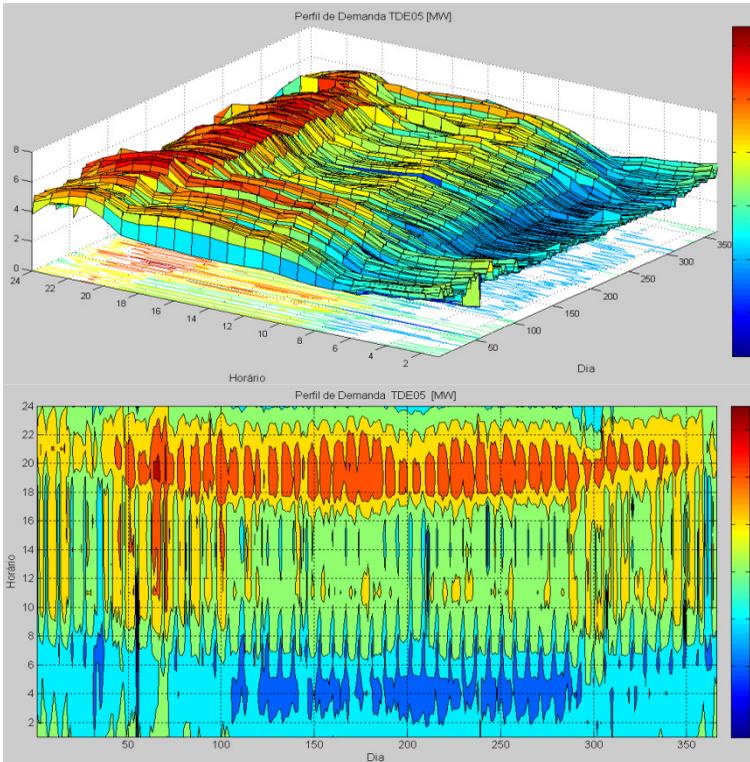


Figura 4.1. Perfil de demanda do alimentador TDE05, em MW, no ano de 2008.

Analisando as curvas de demandas diárias horárias ao longo do ano de 2008, observa-se que o perfil de demanda do alimentador TDE05 apresenta claramente picos noturnos, ou seja, o maior consumo de energia neste alimentador ocorre no período da noite. Durante a madrugada (da 0h às 06h), observa-se um baixo consumo energético, como mostram as faixas em tons de azul e verde. Nesse período o alimentador encontra-se praticamente “ocioso” com poucas cargas conectadas, apresentando grande potencial para a recarga dos veículos elétricos. Nos meses de verão, como pode ser observado na Fig. 4.1, com dias e noites tipicamente mais quentes, o consumo energético durante a madrugada é maior do que nos demais meses do ano, possivelmente devido às cargas de ar condicionado. No período das 10h às 18h, foi observado um consumo acentuado de energia devido à existência de edifícios comerciais e de serviços na região delimitada

pele alimentador. Dessa forma, os geradores fotovoltaicos integrados às edificações urbanas poderão contribuir para a redução do consumo energético desse alimentador. Já os maiores valores de demanda foram verificados no período das 19h às 21h, no assim chamado horário de ponta.

Em seguida, foram geradas as curvas diárias horárias ao longo do ano de 2008, considerando os dados de demanda (MW) do alimentador TDE06, conforme a Fig. 4.2.

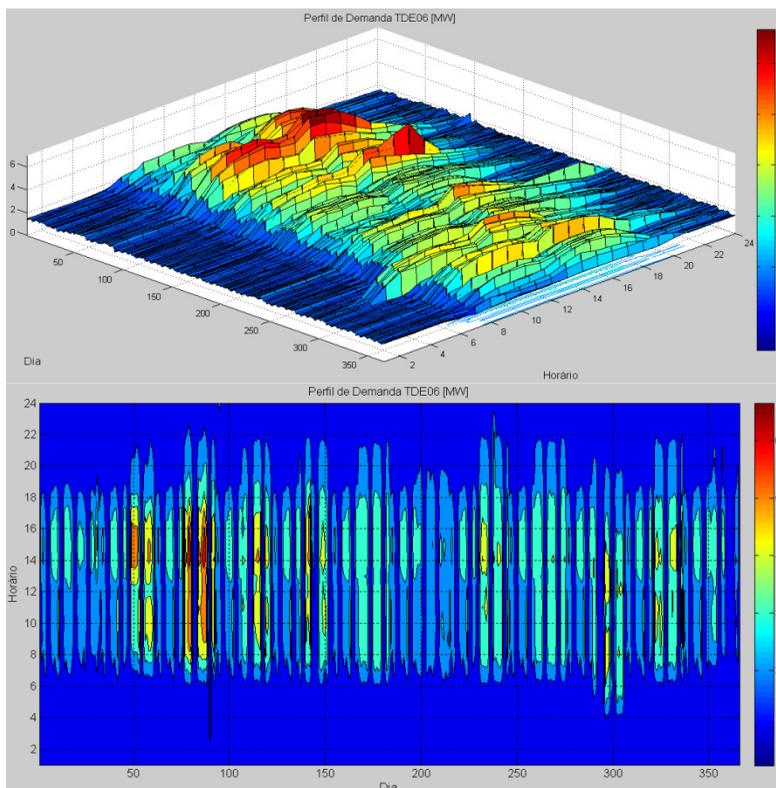


Figura 4.2. Perfil de demandado alimentador TDE06, em MW, no ano de 2008.

O perfil de demanda do alimentador TDE06 mostrou a ocorrência de dois picos diurnos, um pela manhã e o outro à tarde, com um leve declínio no horário do almoço. Observa-se que nos dois primeiros meses de recesso da universidade (dezembro e janeiro) o alimentador

apresentou baixo consumo comparado aos demais meses do ano. A partir do mês de fevereiro foi observado um aumento considerável no consumo, atingindo um pico máximo de demanda de 6,67 MW no mês de março. Isso devido ao início do ano letivo na universidade.

Um grande percentual energético do alimentador TDE06 é direcionado exclusivamente para o abastecimento da universidade, que apresenta horário diurno de funcionamento de seus centros de ensino, explicando o baixo consumo nas caudas das curvas de demandas diárias e um maior consumo ao longo do dia.

Nas curvas apresentadas ao longo do ano observa-se claramente o perfil de demanda noturno do TDE05 (apresentando pico noturno, que ocorre durante o horário de ponta definido pela CELESC) e um perfil de demanda diurno do alimentador TDE06. No contexto da proposta de veículos elétricos + redes inteligentes + geração fotovoltaica integrada às edificações urbanas será então apresentado o potencial de suporte à rede que os veículos elétricos podem oferecer, principalmente no horário de ponta com a finalidade de modelar a curva de demanda do alimentador TDE05. E posteriormente, o impacto que a nova demanda de energia representada por estes VEs poderá representar para o sistema elétrico. Adicionalmente, será avaliado o potencial que áreas de coberturas das edificações existentes nas áreas em estudo poderá ter para acomodar geradores solares fotovoltaicos e a geração correspondente.

4.2 ESTIMATIVA DO NÚMERO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS UTILIZADOS COMO GERADORES DISTRIBUÍDOS (V2G)

O número máximo de veículos elétricos que serão conectados oferecendo o serviço V2G (entregando energia para a rede) será calculado em tempo real em função do montante de energia a ser reduzida diariamente, no período das 19h às 24h, conforme o item 3.7. Ou seja, estabelecidas as normas e os parâmetros técnicos pela concessionária, será possível fazer a previsão do número de veículos que seriam necessários para a redução desse montante de energia. Nesse caso, a concessionária estabelecerá um limite máximo de veículos que poderão conectar-se à rede naquele momento. As Fig. de 4.3 a 4.14 mostram o número de veículos possíveis de serem utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE05 ao longo dos meses do ano de 2008, em função dos parâmetros estabelecidos na tabela 3.1.

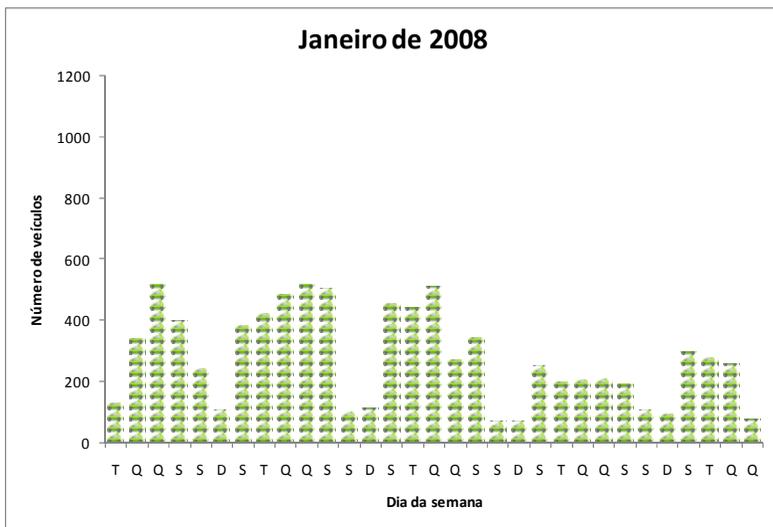


Figura 4.3. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Janeiro de 2008 no horário das 19h às 24h.

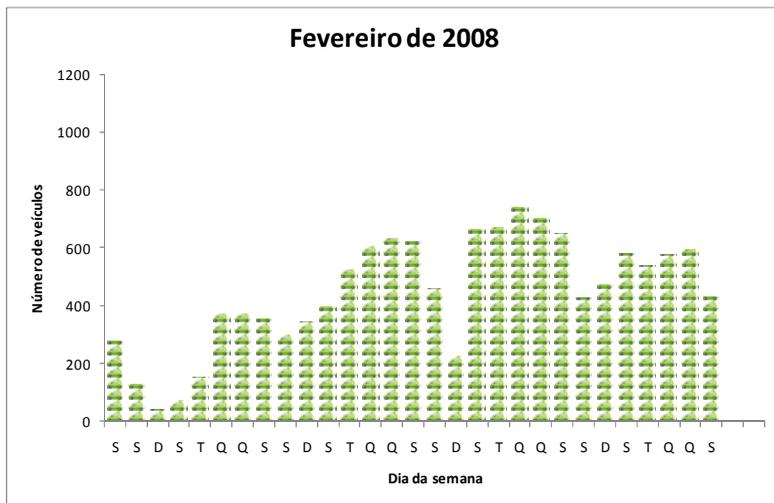


Figura 4.4. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Fevereiro de 2008 no horário das 19h às 24h.

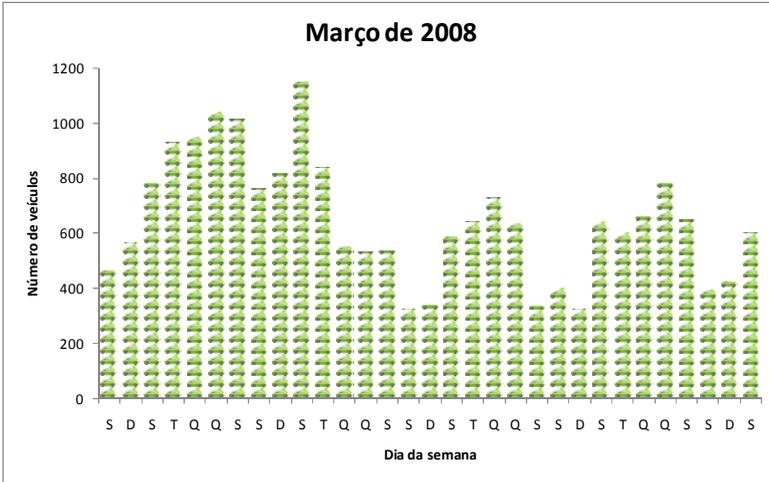


Figura 4.5. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Março de 2008 no horário das 19h às 24h.



Figura 4.6. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Abril de 2008 no horário das 19h às 24h.

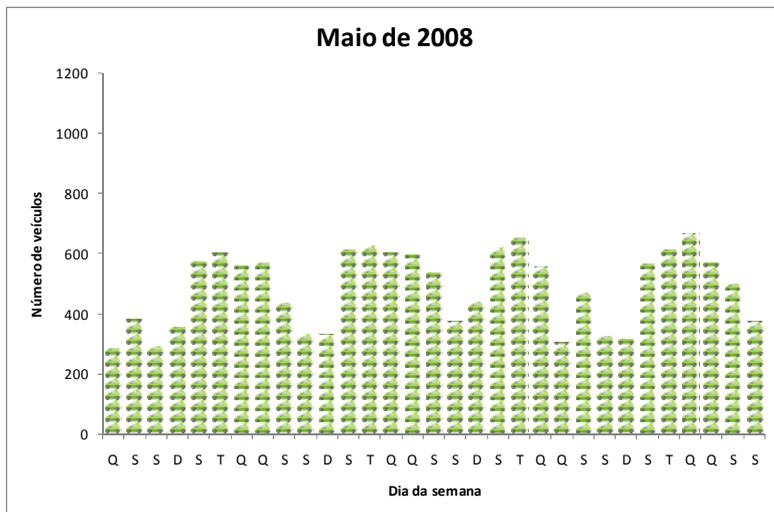


Figura 4.7. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Maio de 2008 no horário das 19h às 24h.

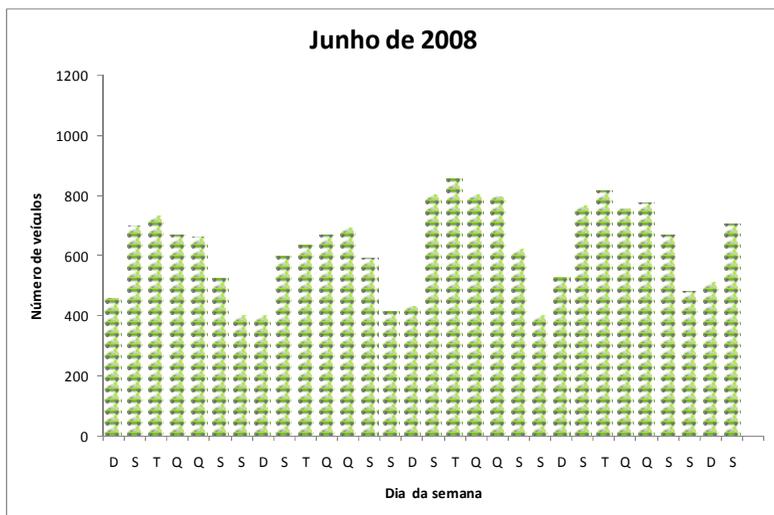


Figura 4.8. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Junho de 2008 no horário das 19h às 24h.

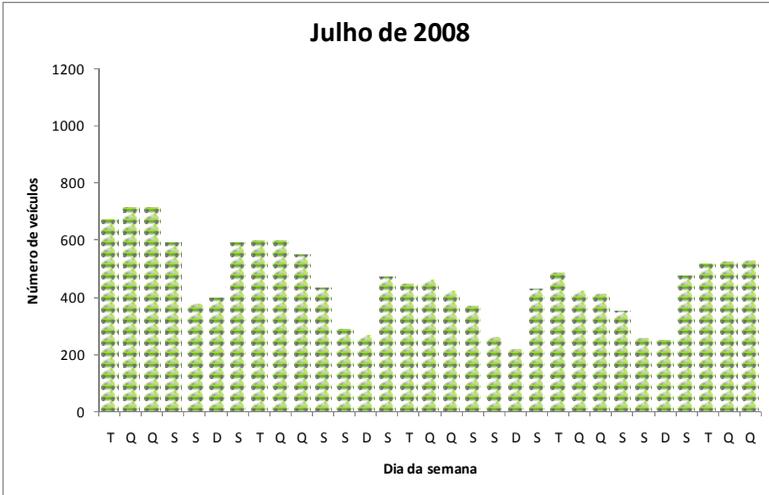


Figura 4.9. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Julho de 2008 no horário das 19h às 24h.

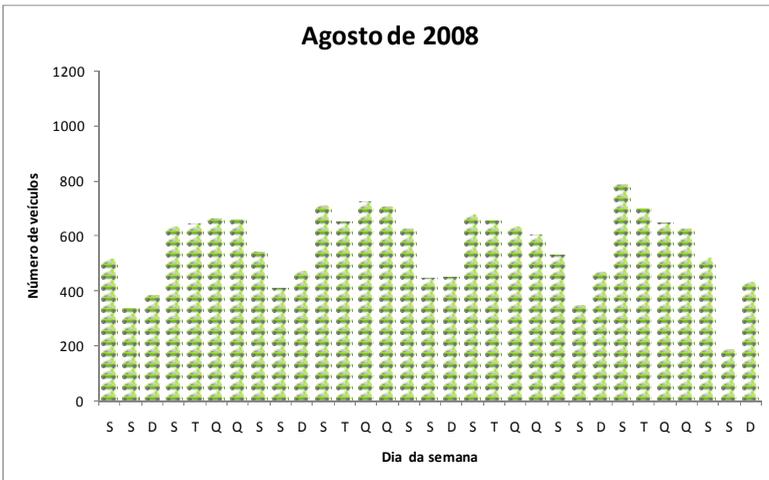


Figura 4.10. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Agosto de 2008 no horário das 19h às 24h.

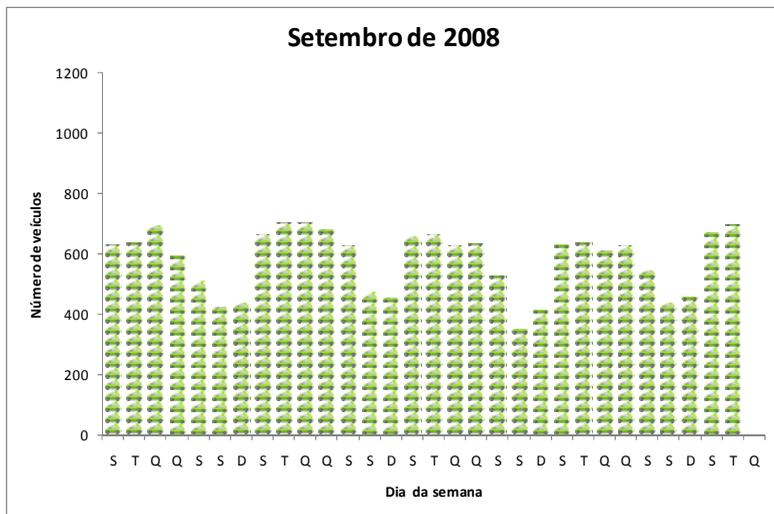


Figura 4.11. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Setembro de 2008 no horário das 19h às 24h.

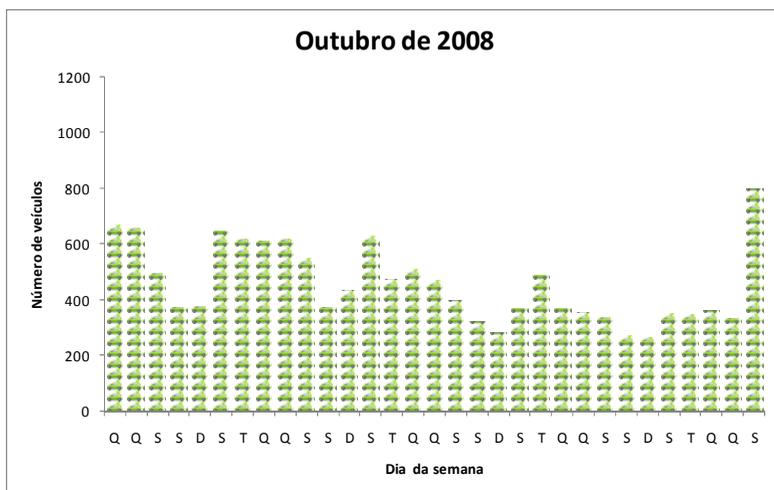


Figura 4.12. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Outubro de 2008 no horário das 19h às 24h.

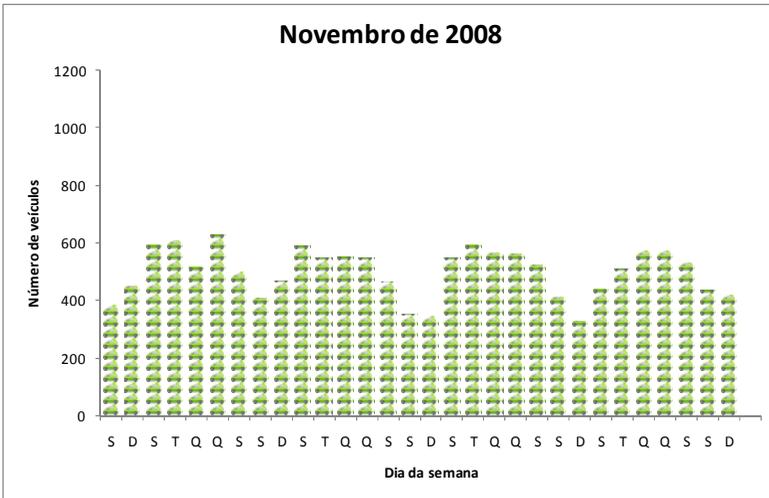


Figura 4.13. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Novembro de 2008 no horário das 19h às 24h.

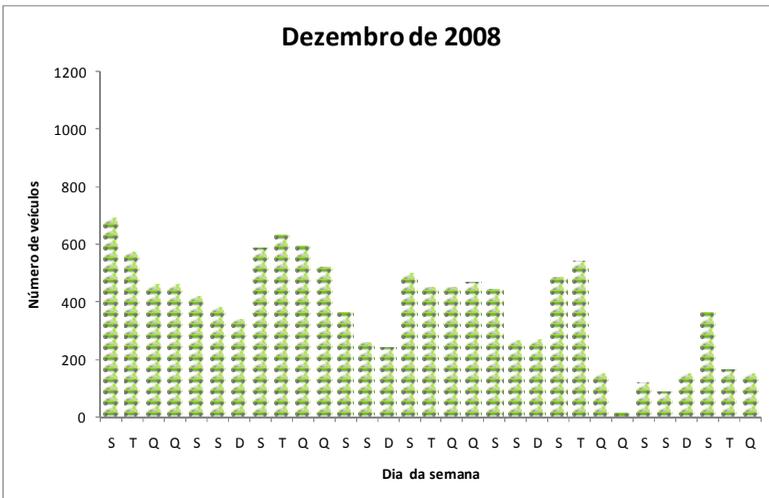


Figura 4.14. Número máximo de veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos diariamente no alimentador TDE 05 no mês de Dezembro de 2008 no horário das 19h às 24h.

Nota-se em geral que aos sábados, domingos e feriados a quantidade de veículos oferecendo suporte à rede no período das 19h às 24h é menor do que o observado para os demais dias da semana. O

motivo está associado à característica da curva de demanda energética verificada nestes dias.

Observa-se que no verão há uma variação considerável na quantidade diária de veículos que oferecem suporte à rede, como pode ser observado nas Fig. 4.3, 4.4, 4.5 e 4.14. Nas demais estações do ano têm-se uma menor variação dessa quantidade de VEs. No início do mês de março foram necessárias quantidades elevadas de veículos para a modulação da curva de demanda do alimentador TDE05, pois geralmente é o mês mais quente do ano, apresentando elevados picos de demanda ao longo das 19h às 24h.

A tabela 4.1 mostra os valores numéricos apresentados nas Fig. 4.3 a 4.14.

Tabela 4.1. Número máximo de veículos elétricos possíveis de serem utilizados como geradores distribuídos ao longo do ano de 2008 no alimentador TDE05 no horário das 19h às 24h.

Número de veículos mensais - Contribuição V2G												
Dia	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1	133	279	461	627	288	458	671	515	630	670	384	694
2	351	130	565	618	381	699	714	334	637	656	448	572
3	536	40	778	782	292	733	714	387	693	498	593	463
4	447	75	930	495	355	666	590	634	594	372	606	461
5	267	152	950	341	571	664	374	643	513	378	517	422
6	115	374	1039	386	603	526	396	665	426	646	628	382
7	384	374	1012	692	562	400	591	661	439	617	497	338
8	430	355	759	779	569	400	599	542	667	608	409	587
9	514	299	816	845	437	601	599	409	704	618	471	630
10	565	344	1148	708	334	636	550	470	705	548	592	596
11	542	396	838	640	330	667	434	713	682	371	549	521
12	109	524	554	513	612	691	290	652	628	434	552	363
13	115	604	533	454	628	594	266	722	471	629	548	258
14	455	634	537	533	602	413	470	707	455	477	467	243
15	469	619	325	558	595	430	444	626	656	509	354	500
16	543	459	339	585	536	799	464	448	667	470	344	450
17	324	228	587	593	378	855	422	450	625	398	547	448
18	345	662	641	434	440	799	366	678	634	321	593	469
19	76	671	732	277	618	797	258	656	526	281	565	445
20	72	743	633	194	654	622	218	633	353	368	562	265
21	253	706	335	395	557	400	429	603	413	487	526	273
22	201	652	405	633	306	531	482	529	632	369	412	487
23	208	428	328	620	472	766	419	347	638	356	329	538
24	212	470	643	618	327	818	414	466	609	340	440	150
25	194	580	603	542	314	758	352	786	626	272	511	12
26	106	539	658	428	564	776	257	697	544	264	575	116
27	93	577	776	390	610	668	253	646	436	350	574	88
28	302	595	650	597	664	484	473	627	456	349	531	151
29	281	432	395	580	567	514	515	520	669	366	438	361
30	258	425	425	412	499	707	525	184	699	333	420	164
31	77		603		378		527	434		799		151

Quanto maior são as demandas nesse intervalo maior será o montante de energia e potência passível a ser oferecida pelos veículos elétricos como suporte à rede elétrica, e consequentemente maior será o

número de veículos conectados necessários para realizar tal modelagem (contribuição V2G). O mês de março, por exemplo, foi o mês que apresentou o maior consumo do alimentador TDE05 no ano de 2008.

4.3 IMPACTO ENERGÉTICO NO ALIMENTADOR TDE05 COM A CONTRIBUIÇÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS (V2G)

A possibilidade de aquisição e comunicação rápida de informações de consumo energético e as variações na tarifa ao longo do tempo no contexto de uma rede inteligente (*smart grid*) permitirão uma melhoria no perfil de consumo da rede elétrica. Neste âmbito, a interação de veículos elétricos com a rede elétrica pública poderá auxiliar o sistema elétrico no horário de ponta e modelar a curva de demanda diária do alimentador. Essa interação será gerenciada pela concessionária de energia local que sinalizará aos usuários de veículos elétricos o momento de verter energia para a rede elétrica.

A análise do impacto energético no alimentador TDE05 com a contribuição V2G considerada neste trabalho levou em conta o número máximo de veículos elétricos possíveis de serem utilizados como geradores distribuídos ao longo do ano. Essa simulação explica o que deveria ter acontecido com o perfil de demanda do alimentador caso essa análise estivesse ocorrendo em tempo real e num contexto de rede inteligente.

A contribuição V2G deverá ocorrer no período das 19h à 24h e os veículos deverão reduzir o pico de demanda até o limite imposto pela concessionária local, neste caso 4,5 MW. Após receberem um sinal da central de operação, os veículos estão liberados para conectarem-se à rede elétrica e por meio de um inversor a bordo dos mesmos, a corrente contínua (CC) armazenada nas baterias é convertida em corrente alternada (CA) e injetada na rede elétrica.

O fluxo energético V2G somente ocorrerá nos momentos em que os picos de demanda forem maiores do que o limite imposto pela concessionária. Nos horários em que isso não ocorrer, a rede inteligente interromperá automaticamente o fluxo de corrente elétrica do veículo para a rede, retomando assim que o pico de demanda for maior.

A capacidade de potência (kW) de um veículo individual é limitada. Com isso as concessionárias ou os operadores que controlarão

os contratos de serviços V2G, irão necessitar de grandes quantidades de veículos elétricos.

A Fig. 4.15 apresenta a contribuição potencial dos possíveis veículos elétricos utilizados como geradores distribuídos para a modelagem da curva de demanda do alimentador TDE05 ao longo do ano de 2008.

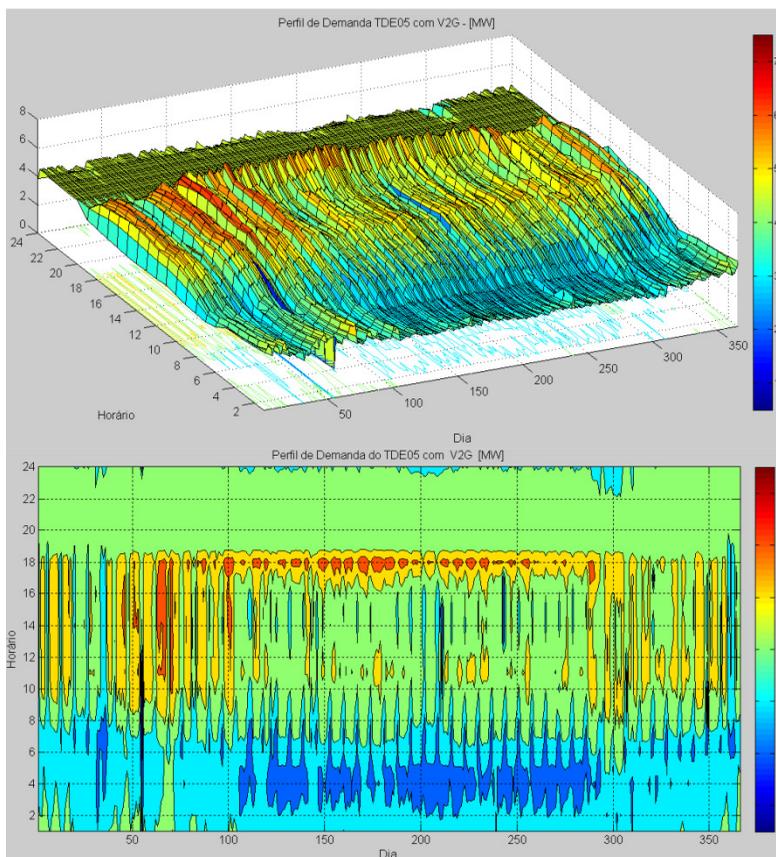


Figura 4.15. Perfil de demanda do alimentador TDE05, em MW, com contribuição V2Gno ano de 2008.

Ao comparar a Fig. 4.1 com a Fig. 4.15 constata-se um deslocamento do pico de demanda do alimentador para as 18h, fato antes ocorrido no período das 19h às 21h. É possível observar no gráfico algumas regiões em tons de azul, logo após o serviço V2G, devido à

demanda naquele dia ter sido menor do que o limite imposto pela concessionária, não havendo a contribuição do veículo naquela hora específica.

Embora a avaliação de suporte à rede elétrica oferecida pelos veículos elétricos tenha considerado apenas o período compreendido entre 19h e 24h, é possível estender essa mesma avaliação ao longo de todo o dia, desde que haja uma quantidade significativa de veículos plugados em tomadas inteligentes e à disposição da rede. Observa-se que caso os veículos elétricos fossem conectados à rede elétrica a partir das 17h, o perfil de demanda do alimentador TDE05 apresentaria um perfil de demanda melhor otimizado.

4.4 CONTRIBUIÇÃO DO ALIMENTADOR TDE05 PARA A RECARGA DE UM MODELO DE VEÍCULO ELÉTRICO

Na seção anterior foi avaliado o potencial V2G para o alimentador TDE05. Outro resultado importante deste trabalho foi estimar a quantidade de veículos elétricos que poderiam ser recarregados quando conectados ao alimentador. As análises consideraram que as recargas ocorreriam durante o período da noite (0h às 6h), para não coincidir com o horário de pico e também aproveitar o horário mais “ocioso” do alimentador como mostrado na Fig. 4.1.

A adição de novas cargas aos alimentadores poderá ocasionar uma sobrecarga dos transformadores ou fazer com que trabalhem próximos dos limites técnicos de operação permitidos pela concessionária local, podendo comprometer a qualidade do serviço de entrega de energia. Com isso, o uso de estratégias de recargas inteligentes se torna fundamental e possibilitará aos veículos elétricos serem recarregados sem a necessidade de aumento da capacidade de potência nominal instalada dos alimentadores. Se na seção anterior foi proposto o uso de veículos elétricos para oferecer suporte à rede elétrica, o momento de recarregar as baterias destes mesmos veículos elétricos não deverá representar uma situação de prejuízo para esta mesma rede elétrica.

Assim, a quantidade de veículos que poderiam ser recarregados diariamente pelo alimentador considerou uma rede elétrica inteligente, responsável pelo gerenciamento de carga e descarga das baterias dos veículos. Após a contribuição V2G e de forma automática, a

concessionária faria a previsão do número de veículos que seriam recarregados nas primeiras horas da madrugada do dia seguinte a partir da 0h para recarregarem suas baterias pela rede elétrica (G2V).

Neste trabalho foi considerada uma análise estática da interação entre os veículos elétricos e a rede elétrica pública. O modelo estático é limitado, pois não considera as variáveis (perfil de condução do usuário, tempo de recarga e descarga, deslocamento diário do veículo, energia disponível no banco de baterias) ao longo do tempo, trabalhando apenas com os valores médios. A análise dinâmica (instantânea) dos fluxos de potência e energia ultrapassa o escopo deste trabalho.

Nas análises foram utilizados os parâmetros de uma bateria de lítio (Li - íon). O ciclo de vida (ou números de ciclos) de uma bateria está em função da profundidade de descarga (DOD), ou seja, quanto menor o DOD maior o ciclo de vida da bateria. Através da forma simplificada de ver as coisas no modelo estático, foi fixada uma taxa de descarga de 60% da capacidade total de energia armazenada na bateria do veículo elétrico para a contribuição V2G. Observa-se nos trabalhos apresentados por Rosenkranz (2003); Dallinger *et al* (2008) que para uma descarga de 60% o ciclo de vida de uma bateria de lítio é da ordem de 9 anos.

Considerando que o veículo deverá carregar completamente o seu banco de baterias, a rede elétrica deverá fornecer a mesma quantidade de energia entregue durante a contribuição V2G, acrescido da pequena parcela relacionada às perdas no processo carga/descarga.

A variação na quantidade de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente ao longo dos meses é totalmente dependente dos parâmetros e normas técnicas que serão impostos pelas concessionárias de energia locais e são apresentados nas Fig.4.16 a 4.27 para o estudo de caso relacionado ao alimentador TDE05 da CELESC em Florianópolis-SC.

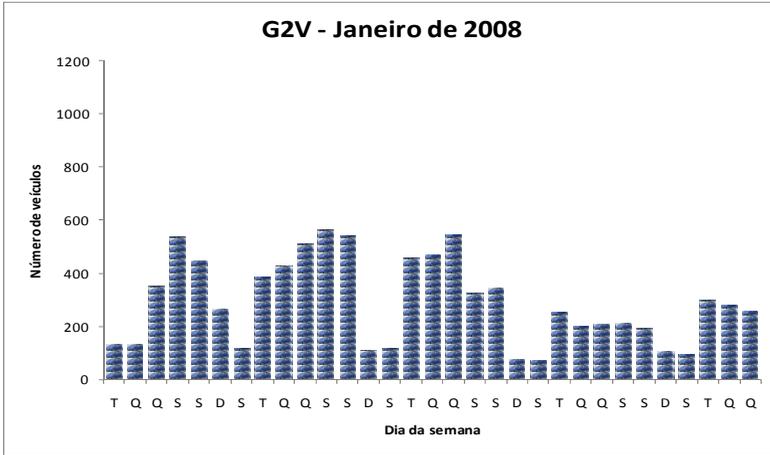


Figura 4.16. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Janeiro de 2008 no horário da 0h às 06h.

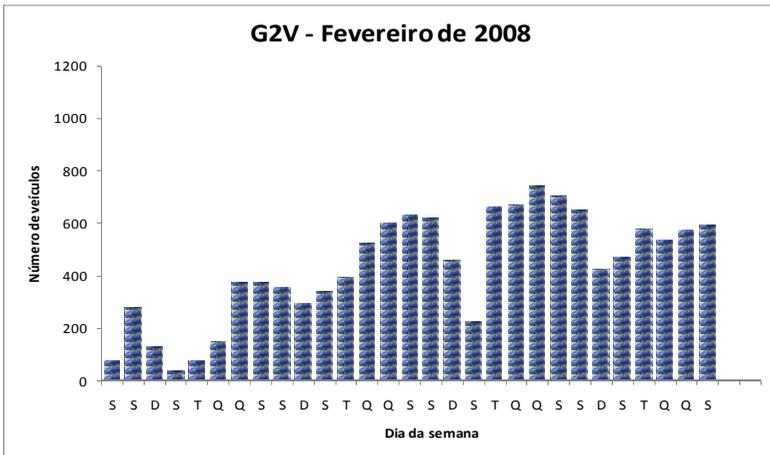


Figura 4.17. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Fevereiro de 2008 no horário da 0h às 06h.

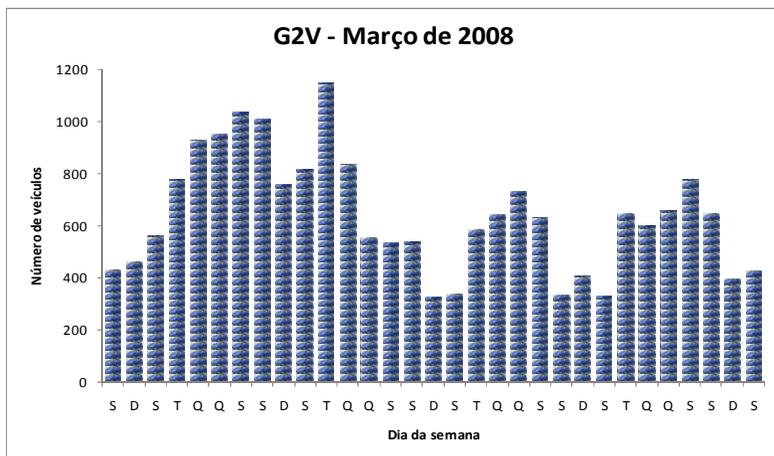


Figura 4.18. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Março de 2008 no horário da 0h às 06h.

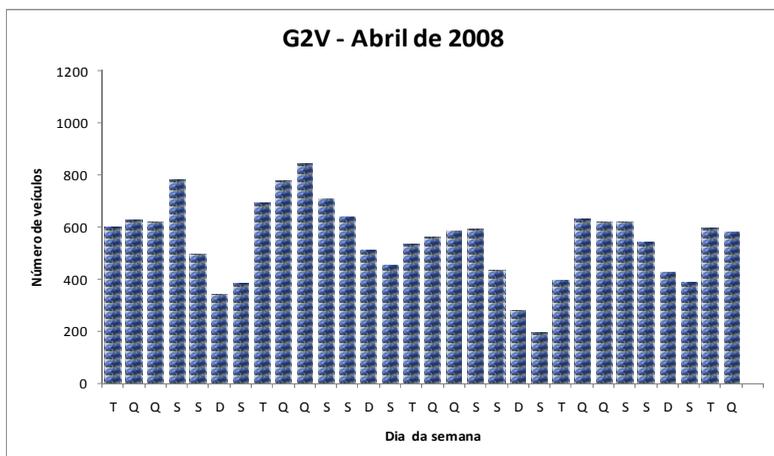


Figura 4.19. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Abril de 2008 no horário da 0h às 06h.

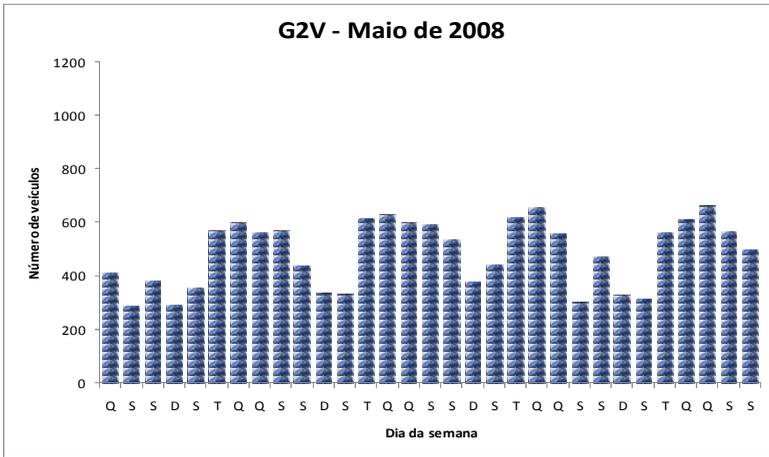


Figura 4.20. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Maio de 2008 no horário da 0h às 06h.

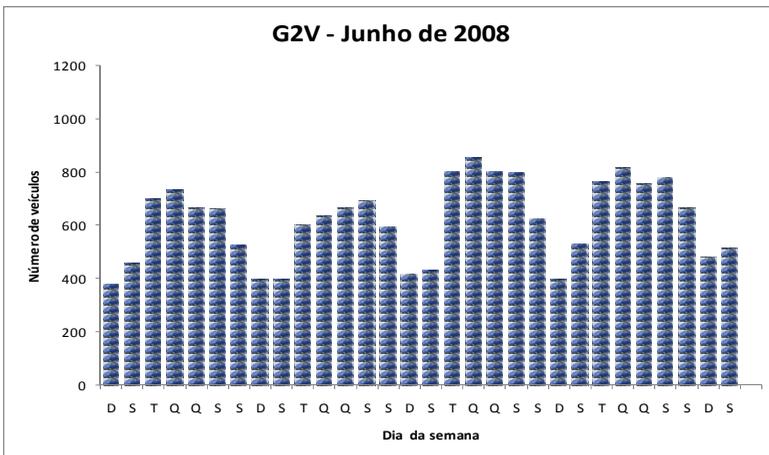


Figura 4.21. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Junho de 2008 no horário da 0h às 06h.

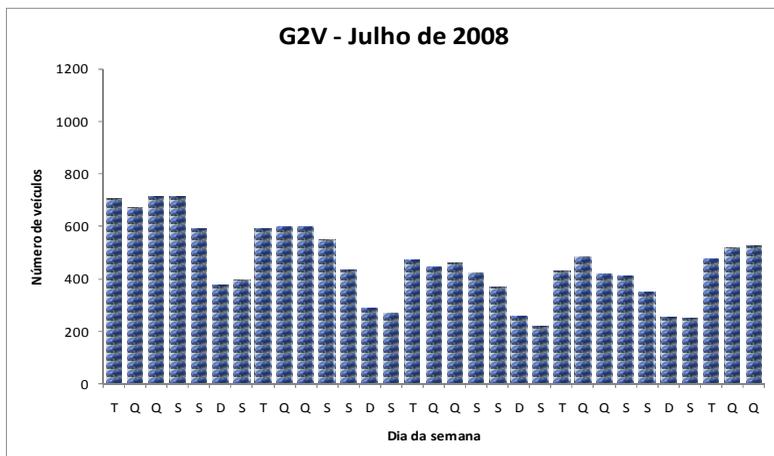


Figura 4.22. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Julho de 2008no horário da 0h às 06h.

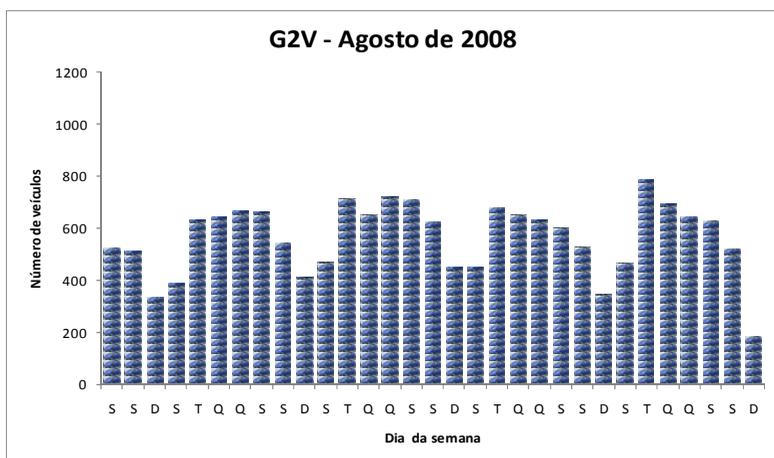


Figura 4.23. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Agosto de 2008no horário da 0h às 06h.



Figura 4.24. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Setembro de 2008 no horário da 0h às 06h.

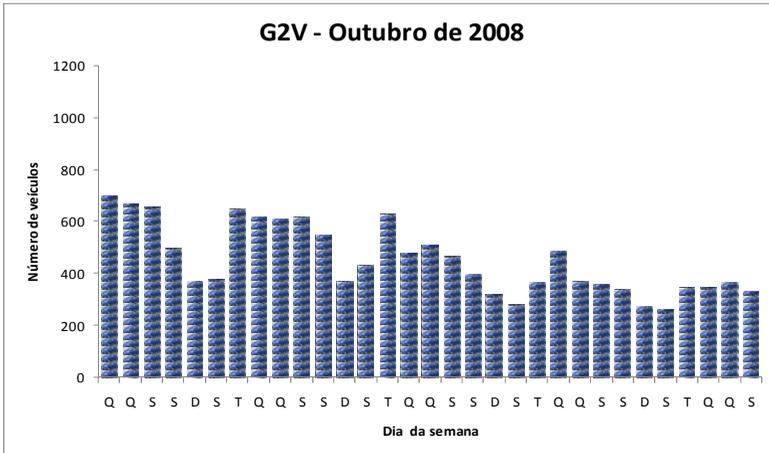


Figura 4.25. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Outubro de 2008 no horário da 0h às 06h.

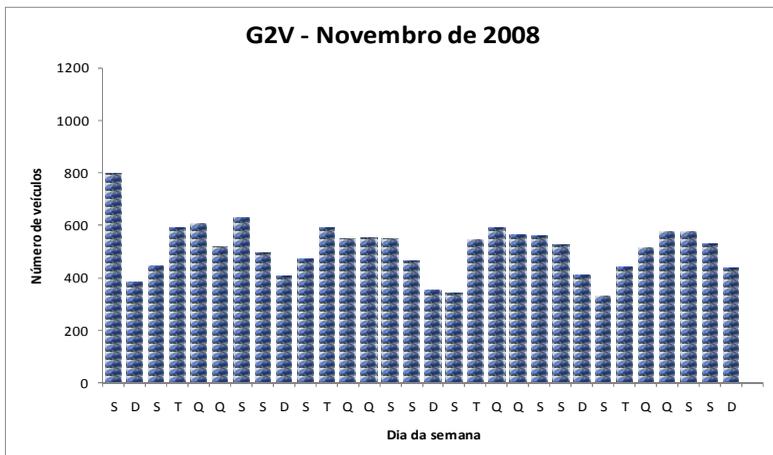


Figura 4.26. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Novembro de 2008 no horário da 0h às 06h.

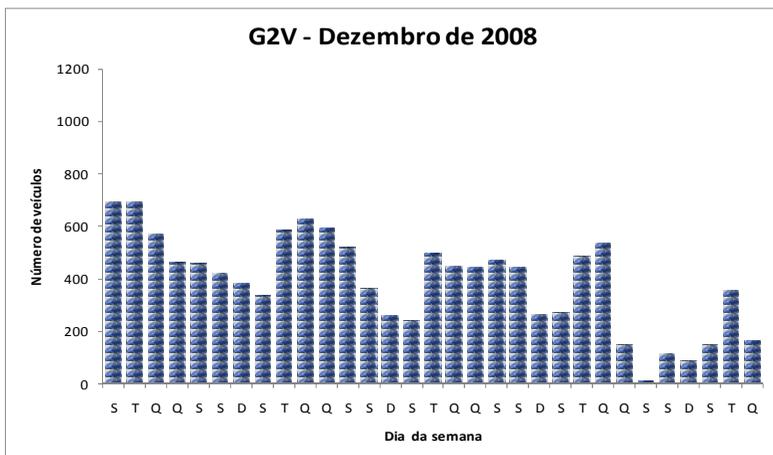


Figura 4.27. Número de veículos elétricos possíveis de serem recarregados diariamente no alimentador TDE05 no período da manhã em função do número de veículos elétricos utilizados na noite anterior como suporte à rede elétrica no mês de Dezembro de 2008 no horário da 0h às 06h.

A quantidade de veículos elétricos a serem recarregados diariamente pelo alimentador TDE05 é fortemente dependente da quantidade de veículos elétricos que ofereceram suporte à rede elétrica no dia anterior. Nota-se em geral que aos domingos e segundas feiras a

quantidade de veículos a serem recarregados pelo alimentador TDE05 é menor do que ao observado para os demais dias da semana. O motivo está associado à contribuição V2G na noite anterior e também à característica da curva de demanda verificada aos domingos e segundas feiras.

Por exemplo, os veículos que ofereceram suporte à rede na sexta feira à noite serão recarregados pelo alimentador no dia seguinte e como a quantidade de VEs que ofereceram este tipo de serviço é elevada, têm – se um número também elevado de VEs sendo recarregados no dia seguinte (aos sábados). Como a curva de demanda energética característica de finais de semana é inferior às curvas de demanda energética verificada ao longo da semana, têm-se um número reduzido de VEs oferecendo serviço V2G, com isso a quantidade de veículos a serem recarregados no dia seguinte (domingo) é menor do que nos demais dias.

A tabela 4.2 mostra os valores numéricos apresentados nas Fig. 4.16a 4.27.

Tabela 4.2. Número máximo de veículos elétricos possíveis de serem recarregados no alimentador TDE05 ao longo do ano de 2008 no horário da 0h às 6h.

Número de veículos mensais - Recarga (G2V)												
Dia	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1	151	77	432	603	412	378	707	527	434	699	799	420
2	133	279	461	627	288	458	671	515	630	670	384	694
3	351	130	565	618	381	699	714	334	637	656	448	572
4	536	40	778	782	292	733	714	387	693	498	593	463
5	447	75	930	495	355	666	590	634	594	372	606	461
6	267	152	950	341	571	664	374	643	513	378	517	422
7	115	374	1039	386	603	526	396	665	426	646	628	382
8	384	374	1012	692	562	400	591	661	439	617	497	338
9	430	355	759	779	569	400	599	542	667	608	409	587
10	514	299	816	845	437	601	599	409	704	618	471	630
11	565	344	1148	708	334	636	550	470	705	548	592	596
12	542	396	838	640	330	667	434	713	682	371	549	521
13	109	524	554	513	612	691	290	652	628	434	552	363
14	115	604	533	454	628	594	266	722	471	629	548	258
15	455	634	537	533	602	413	470	707	455	477	467	243
16	469	619	325	558	595	430	444	626	656	509	354	500
17	543	459	339	585	536	799	464	448	667	470	344	450
18	324	228	587	593	378	855	422	450	625	398	547	448
19	345	662	641	434	440	799	366	678	634	321	593	469
20	76	671	732	277	618	797	258	656	526	281	565	445
21	72	743	633	194	654	622	218	633	353	368	562	265
22	253	706	335	395	557	400	429	603	413	487	526	273
23	201	652	405	633	306	531	482	529	632	369	412	487
24	208	428	328	620	472	766	419	347	638	356	329	538
25	212	470	643	618	327	818	414	466	609	340	440	150
26	194	580	603	542	314	758	352	786	626	272	511	12
27	106	539	658	428	564	776	257	697	544	264	575	116
28	93	577	776	390	610	668	253	646	436	350	574	88
29	302	595	650	597	664	484	473	627	456	349	531	151
30	281		395	580	567	514	515	520	669	366	438	361
31	258		425		499		525	184		333		164

No contexto em que este trabalho é apresentado o gerenciamento do número de veículos num dado instante e a necessidade de energia da rede é verificada pela concessionária dentro de um contexto de modernas tecnologias de informação e comunicação, que estarão integrados à infraestrutura da rede, permitindo a coordenação da geração distribuída. Estas tecnologias são a base para a integração dos veículos elétricos na rede elétrica pública. Pode-se observar na Tab.4.2 quantidades de VEs a serem recarregados diariamente pelo alimentador TDE05 bem abaixo das outras quantidades verificadas ao longo do ano de 2008, como por exemplo, os dias 20/01/2008, 21/01/2008, 27/01/2008, 28/01/2008, 01/02/2008, 04/02/2008, 05/02/2008, 26/12/2008, 27/12/2008 e 28/12/2008. Isso não significa que o alimentador TDE05 não seja capaz de recarregar quantidades maiores do que as verificadas na Tab. 4.2. Devido à configuração da rede inteligente (parâmetros estabelecidos para assegurar que o alimentador não sofrerá danos) e da característica da curva de demanda verificada naquele dia específico é que se têm uma quantidade menor do que as demais.

4.5 IMPACTO ENERGÉTICO NO ALIMENTADOR TDE05 COM A RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Como observado na Fig. 4.1, o perfil de demanda do alimentador TDE05 apresenta baixo consumo durante a madrugada, possibilitando a recarga dos VEs nesse período. Após a estimativa diária do número de VEs possíveis de serem conectados ao alimentador para recarregar completamente o banco de baterias, foi possível analisar o impacto devido à recarga desses veículos.

A Fig. 4.28 mostra o impacto energético no alimentador TDE05 com a recarga de veículos elétricos.No contexto deste trabalho, o veículo *Nissan Leaf* quando conectado estará requerendo da rede elétrica uma energia equivalente a 11,5kWh(energia que foi utilizada como suporte à rede elétrica no intervalo das 19h às 24h) para recarregar completamente o banco de baterias, ou o equivalente a 1,9 kW de potência ao longo das 6 horas em que permanecerá conectado à rede elétrica. Vian (2009) afirma que o sistema elétrico brasileiro não deverá ter maiores problemas para atender à demanda dos veículos elétricos nestes níveis de potência, o que pode ser confirmado neste trabalho.Neste trabalho não foram consideradas recargas rápidas que

demandariam potência superior a 1,9 kW e mudariam completamente a configuração da curva observada na Fig. 4.28.

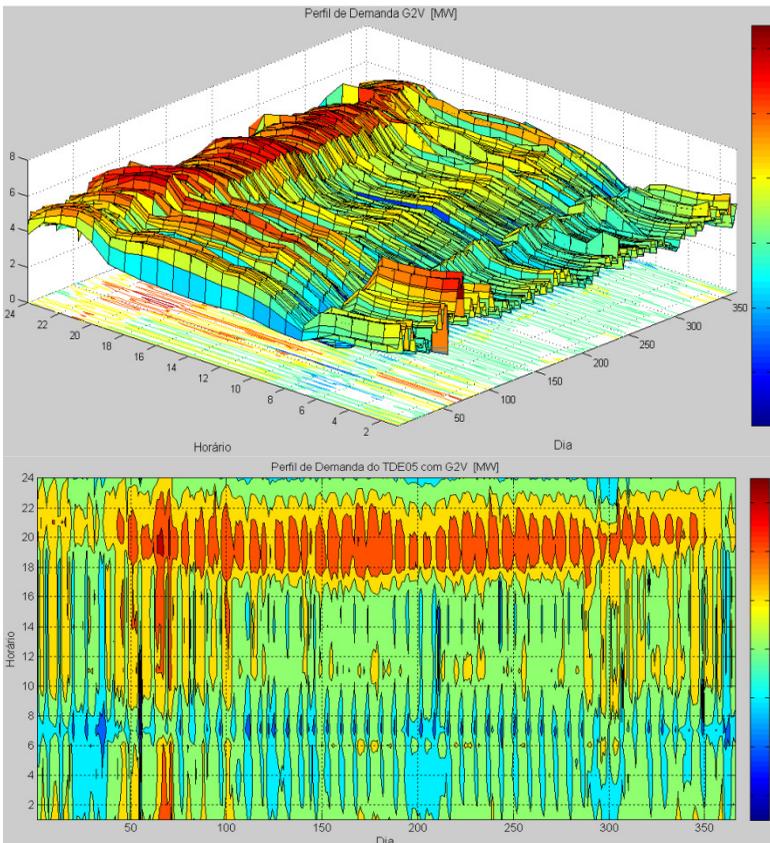


Figura 4.28. Perfil de demanda do alimentador TDE05 com a recarga de veículos elétricos, em MW, no ano de 2008.

Entretanto, é necessário verificar o impacto energético que esses veículos terão nos alimentadores e transformadores. Não basta apenas analisar o sistema como um todo; deve-se também analisar as partes que o compõem.

A recarga dos veículos elétricos pode ter tanto efeitos positivos como efeitos negativos sobre a rede elétrica. Sem uma efetiva estratégia de recarga, os picos de demanda diários podem aumentar consideravelmente, no caso dos veículos recarregarem suas baterias no horário de ponta (19h às 21h). Nos meses de verão, especificamente no

mês de março, foi possível observar pela Fig. 4.28 momentos em que a curva de demanda apresentou valores superiores aos demais dias no horário da recarga dos veículos, como mostram as faixas em tons vermelho, devido à ocorrência de temperaturas elevadas nesses dias com uso intenso do ar condicionado. A rede inteligente será a responsável por permitir e escalonar a entrada de veículos elétricos para serem recarregados, segundo uma estratégia inteligente e que leve em conta os custos e a disponibilidade da energia em todos os instantes.

4.6 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE INSTALAÇÃO E GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DOS GERADORES INTEGRADOS AOS PRÉDIOS DA UFSC

Na simulação do possível potencial de geração de energia elétrica por geradores solares fotovoltaicos, foi necessária uma análise prévia das áreas de cobertura disponíveis no campus da UFSC, para estimar o possível potencial de instalação fotovoltaica. Através da planta em arquivo digital, fornecida pelo ETUSC, selecionou-se dentre todas as edificações espalhadas pelo campus da UFSC aquelas com possibilidades mínimas de sombreamento (verificação in loco) e aquelas com grandes áreas de coberturas disponíveis, conforme Tabela 4.3.

Neste trabalho, não foram consideradas as particularidades das coberturas das edificações, tampouco está no escopo desta dissertação uma análise detalhada de quais seriam as melhores orientações e inclinações dos possíveis geradores a elas integrados. Foi definido que todos os geradores fotovoltaicos estariam a 27° de inclinação e orientados ao norte geográfico. A partir daí, foi possível estimar a geração solar fotovoltaica diária ao longo do ano, utilizando os dados do sistema de 2 kWp instalados no prédio da Engenharia Mecânica da UFSC. A Fig. 4.29 mostra a planta do campus da UFSC com as edificações selecionadas para este estudo na coloração azul. A Tabela 4.3 apresenta as edificações da UFSC utilizadas como referência para a estimativa da área de cobertura disponível.



Figura 4.29. Planta das edificações do campus Trindade, UFSC, com os prédios selecionados em azul para o estudo em questão.

Tabela 4.3. Áreas de coberturas disponíveis para a instalação de geradores fotovoltaicos na UFSC

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA			
LOCALIZAÇÃO		Área Total [m²]	Área Útil [m²]
CONJUNTO	NOME		
CCB	CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS	2.095,00	1.676,00
CCE	CENTRO DE COMUNICAÇÃO E EXPRESSÃO	3.245,00	2.596,00
CCS	CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE	3.883,00	3.106,40
CDS	CENTRO DE DESPORTOS	11.702,48	9.361,98
CED	CENTRO DE CIÊNCIAS DA EDUCAÇÃO	707,00	565,60
CFH	CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS	1.613,00	1.290,40
CFM	CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS	4.860,40	3.888,32
CSE	CENTRO SÓCIO-ECONÔMICO	1.260,00	1.008,00
STU	SIND. DOS TRAB. DA UFSC - SINTUFSC	720,00	576,00
CTC	CENTRO TECNOLÓGICO	8.456,00	6.764,80
HU	HOSPITAL UNIVERSITÁRIO	10.432,30	8.345,84
BU	BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA	5.248,00	4.198,40
FND	FEESC	678,00	542,40
CVU	CENTRO DE CONVIVÊNCIA SOCIAL	1.250,00	1.000,00
CCU	CENTRO DE CULTURA	3.118,00	2.494,40
REI	REITORIA	756,00	604,80
TOTAL		60.024,18	48.019,34

Estima-se que o campus Trindade da UFSC possui aproximadamente 140000 m² de área disponível de cobertura (ETUSC, 2010). As áreas selecionadas para o cálculo do potencial de instalação fotovoltaica na UFSC representam 42,85% da área total de cobertura e a área útil disponível para uma possível integração de módulos fotovoltaicos, considerando um fator de 0,8 (SANTOS, 2009) é da ordem de 48000 m².

Dentre os conjuntos acima citados, apenas o Centro de Cultura, o Centro de Convivência Social, o Centro Tecnológico e o Hospital Universitário possuem um gerador solar fotovoltaico conectado à rede elétrica. Um estudo mais detalhado do prédio do Centro de Cultura pode ser observado no trabalho realizado por Viana e Rütther (2007) e Viana *et al* (2007). O gerador instalado na cobertura deste prédio ocupa uma área de 173 m², o que representa 7,3 % da área disponível da cobertura e apresenta um potencial instalado de 10,24 kWp em módulos fotovoltaicos de a-Si, e a energia gerada por esse sistema é responsável por 7 % do consumo da edificação.

O potencial de instalação fotovoltaica encontrado, considerando as tecnologias de módulos fotovoltaicos de a-Si e p-Si foi de 3 MWp e 6,7 MWp, respectivamente. A Fig. 4.30 e a Fig. 4.31 mostram as gerações solares potenciais diárias ao longo do ano de 2008 para cada uma das tecnologias mencionadas, com base na geração real medida no

gerador de 2 kWp que opera no LABSOLAR desde 1997 (RÜTHER *et al.*, 2006).

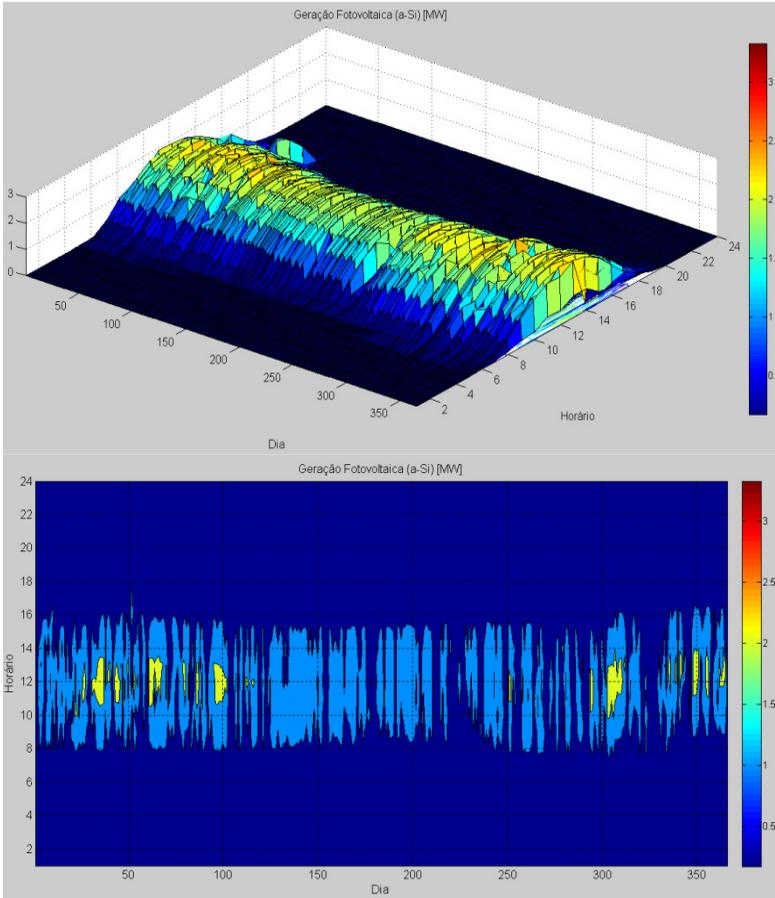


Figura 4.30. Geração de energia elétrica horária diária, em MW, considerando um gerador solar fotovoltaico (a-Si) de 3 MWp no ano de 2008.

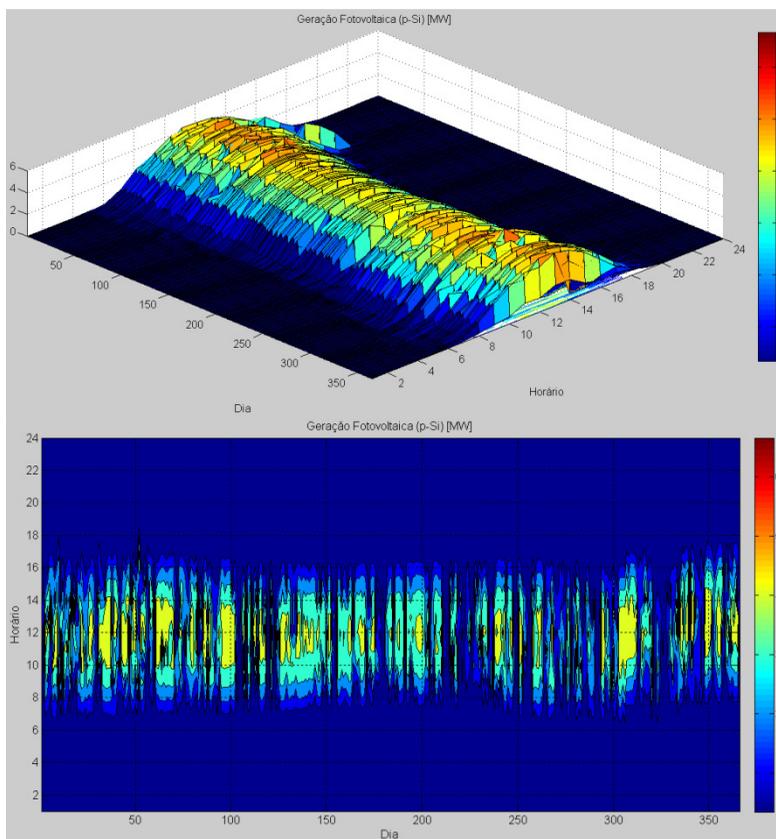


Figura 4.31. Geração de energia elétrica horária diária, em MW, considerando um gerador solar fotovoltaico (p-Si) de 6,7 MWp no ano de 2008.

Nota-se que ao longo dos dias de verão as curvas de geração solar fotovoltaica são superiores às curvas dos dias de inverno, devido à intensidade de radiação solar nesses meses ser maior que nos demais meses do ano. Para os meses de junho, julho e agosto observam-se baixos índices de irradiância, que implica na baixa geração solar.

Na sequência foram levantadas as áreas de coberturas disponíveis nas 496 residências unifamiliares do bairro Santa Mônica. Tais análises foram embasadas nos estudos realizados por Santos (2009). O estudo

propôs uma tipologia de *kits* fotovoltaicos com áreas e potências predefinidas a serem instaladas nas coberturas das edificações. Dentre os *kits* propostos por Santos (2009) estão o *kit* com módulos fotovoltaicos de p-Si (mais eficiente) de 1 kWp e o *kit* com módulos fotovoltaicos de a-Si (menos eficiente) de 0,5 kWp, com 7 m² e 8,6 m² de área, respectivamente. Neste trabalho foram avaliados os parâmetros: inclinação e desvio azimutal em relação ao norte. Concluiu-se que as residências apresentavam coberturas com elevado potencial para a instalação de geradores solares fotovoltaicos. Na análise da cobertura disponível, verificou-se que seria possível a instalação de um *kit* com módulos fotovoltaicos de p-Si com área superior a 7 m².

O bairro Santa Mônica possui 79.398,56 m² de área de coberturas existentes; neste trabalho foi considerado um *kit* fotovoltaico com módulos de p-Si de 2 kWp, com 14 m² de área. Assim, a área de cobertura utilizada considerando as 496 residências representa 8,75% da área total de coberturas existentes no bairro. Não foram considerados os *kits* de módulos fotovoltaicos de a-Si amorfo, pois estes apresentam baixa eficiência, e como a área de cobertura considerada neste trabalho é reduzida, o potencial instalado também seria reduzido.

Dessa forma, o potencial fotovoltaico instalado encontrado para essa região, considerando um gerador solar hipotético com módulos fotovoltaicos de p-Si de 2kWp instalado por residência foi da ordem de 992 kWp. A partir desse potencial possível de ser instalado foi calculada a geração fotovoltaica diária, conforme metodologia proposta no item 3.4, considerando um fator de 0,9 de geração se todos esses geradores estivessem instalados na posição ideal para a cidade de Florianópolis.

Para visualizar a contribuição energética dos geradores solares fotovoltaicos (992 kWp) ao longo das horas para o alimentador TDE05, foram gerados gráficos de demanda energética diária, mostrando o perfil de demanda do alimentador TDE05 sem a contribuição fotovoltaica e a demanda resultante com a contribuição desse gerador solar hipotético, como mostrado na Fig. 4.32 e Fig. 4.33.

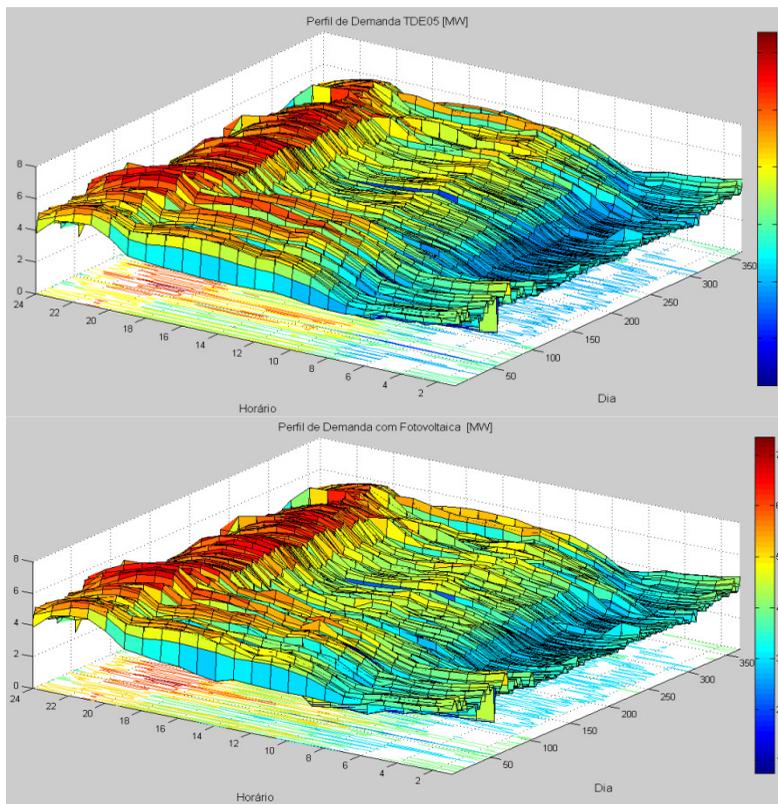


Figura 4.32. Comparação entre o perfil de demanda original do alimentador TDE05 e o perfil de demanda resultante com a contribuição solar fotovoltaica de um gerador de 992 kWp integrado às 496 residências do bairro Santa Mônica.

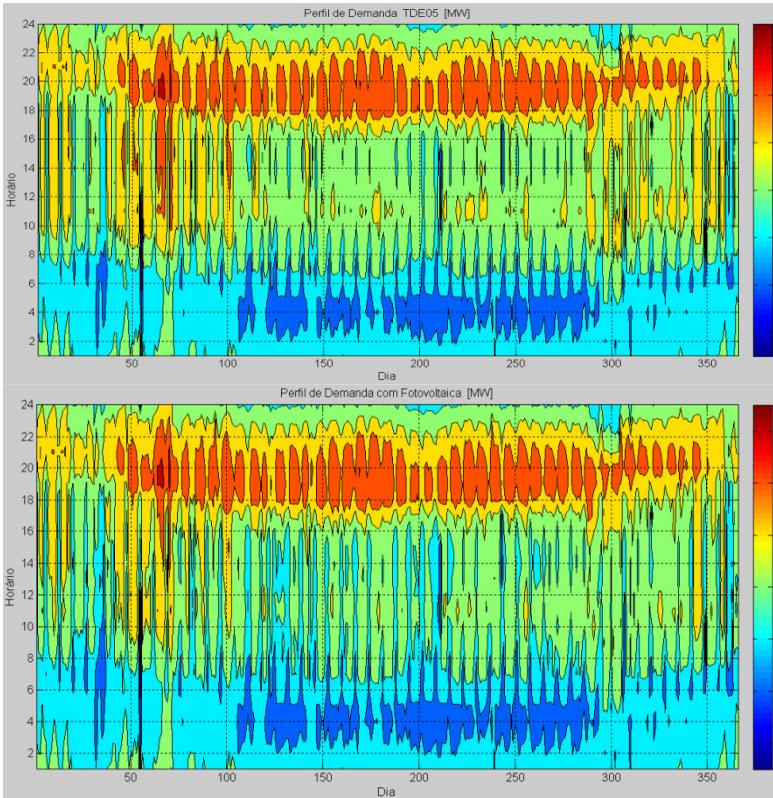


Figura 4.33. Comparação entre o perfil de demanda original do alimentador TDE05 e o perfil de demanda resultante com a contribuição solar fotovoltaica de um gerador de 992 kWp integrado às 496 residências do bairro Santa Mônica.

Os alimentadores responsáveis pelo abastecimento energético de zonas urbanas mistas, com edificações residenciais, comerciais e de serviços, apresentam geralmente perfis de demanda noturno, bem como elevado consumo energético ao longo do dia (entre 8h e 18h), como é o caso do alimentador TDE05. A média de demanda registrada para o mês de março (faixas em tons de vermelho) foi superior a 4,78 MW no período das 8h às 18h e o maior valor de demanda registrado no período da noite, das 19h às 24h foi de 7,36 MW.

A integração de geradores solares nas áreas de coberturas existentes dessas residências pode contribuir para atenuar o consumo

energético do alimentador nesse período. Neste caso, a geração solar não tem efeito direto para a redução do pico noturno, uma vez que não gera energia durante a noite.

Ao comparar o perfil de demanda do alimentador TDE05 sem a contribuição da geração solar e o perfil de demanda resultante com a contribuição de um hipotético gerador solar de 992 kWp de potência, observa-se que nos dias dos meses de verão há uma potencial contribuição para a modelagem da curva de demanda do alimentador.

A Tabela 4.4 apresenta os balanços energéticos mensal e anual, obtidos a partir dos geradores solares hipotéticos nas coberturas das 496 residências do bairro Santa Mônica (992 kWp).

Tabela 4.4. Geração solar fotovoltaica mensal e anual, em MWh, dos geradores solares hipotéticos integrados nas coberturas das 496 residências do bairro Santa Mônica.

Edificações Residenciais Bairro Santa Mônica (TDE05)					
Mês	Geração Solar Fotovoltaica (p-si) [MWh]	Número de VEs	Consumo Energético dos VEs [MWh]	Balanco Energético sem V2G [MWh]	Balanco Energético com V2G [MWh]
JAN	98,56	496	177,44	-78,88	98,56
FEV	101,21		165,99	-64,78	101,21
MAR	111,09		177,44	-66,35	111,09
ABR	90,70		171,72	-81,02	90,70
MAI	103,98		177,44	-73,46	103,98
JUN	78,28		171,72	-93,43	78,28
JUL	91,23		177,44	-86,21	91,23
AGO	73,87		177,44	-103,57	73,87
SET	80,82		171,72	-90,89	80,82
OUT	85,06		177,44	-92,38	85,06
NOV	85,71		171,72	-86,00	85,71
DEZ	104,77		177,44	-72,67	104,77
Anual	1105,28		2094,93	-989,65	1105,28

Considerando um veículo elétrico por residência com consumo médio de 11,5 kWh/dia, observa-se que o balanço energético mensal sem levar em conta a contribuição V2G mostra-se negativo, ou seja, a geração solar fotovoltaica correspondente aos 992 kWp instalados no bairro Santa Mônica não foi suficiente para suprir a demanda energética desses possíveis veículos elétricos. Todavia, ao considerar a contribuição V2G no balanço energético ao longo das 19h às 24h, nota-

se um efeito positivo para o alimentador TDE05, resultando em um excedente de 1.105,28 MWh por ano.

4.7 NOVO PERFIL DE DEMANDA DO ALIMENTADOR TDE05

Supondo a ocorrência simultânea da contribuição V2G (19h às 24h), da recarga dos veículos elétricos durante a madrugada (0h às 6h) e da contribuição energética dos geradores solares fotovoltaicos (6 às 18h) foi gerado o gráfico da Fig. 4.34 que representa o novo perfil de demanda do alimentador TDE05.

Observa-se que no contexto da proposta de veículos elétricos + redes inteligentes, os veículos elétricos podem oferecer um potencial suporte à rede elétrica, principalmente no horário de ponta e contribuir para a redução do pico nesse horário, bem como modelar a curva de demanda do alimentador. A mesma situação pode ser vista na proposta de integração de geradores solares fotovoltaicos nas coberturas existentes das edificações residenciais.

Embora a utilização de veículos elétricos represente uma carga adicional ao alimentador elevando o consumo de energia nos períodos noturnos, este aumento poderá modular e uniformizar a demanda energética ao longo do dia, otimizando a infraestrutura do setor elétrico. Todavia, é importante que não ocorra um aumento descompensado de consumo de energia que afete a disponibilidade de energia na fonte primária da matriz elétrica nacional (*e.g.* água nas represas das hidrelétricas) para geração de energia elétrica.

Como a proposta dos veículos elétricos resulta na entrada em cena de um novo “consumidor”, a integração de geradores solares fotovoltaicos como geradores distribuídos é fundamental para manter o balanço energético para suprir a nova carga. Além disso, a geração fotovoltaica pode suprir eventual baixa nos reservatórios em época de estiagem. A Tabela 4.4 mostrou que o balanço energético pode ser positivo com a utilização de fontes renováveis como a solar para compensar o consumo energético dos veículos elétricos

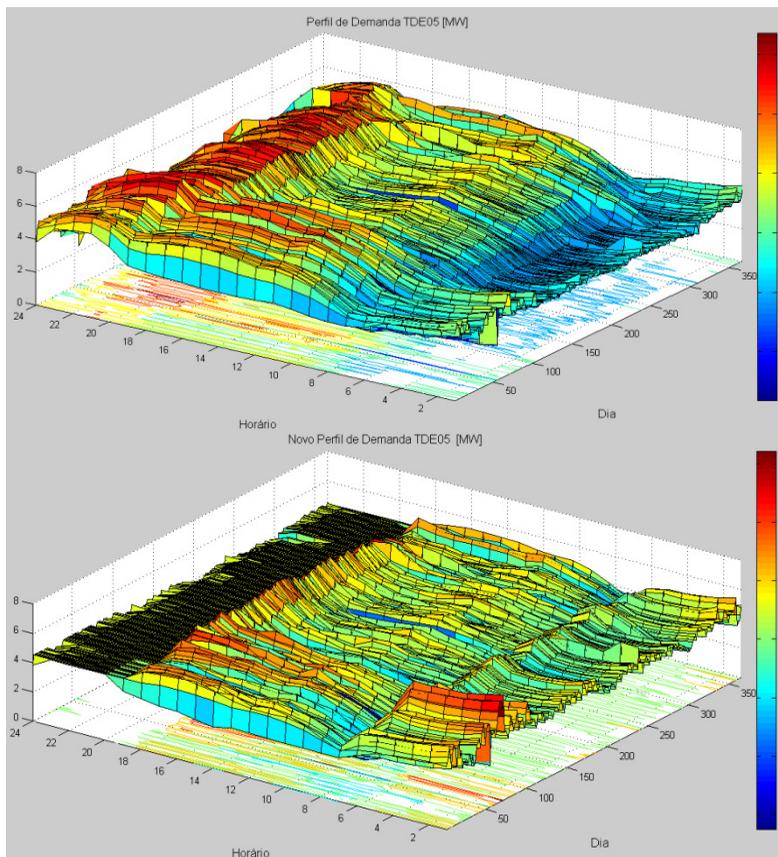


Figura 4.34. Perfil de demanda resultante das contribuições V2G, G2V e da geração solar fotovoltaica no alimentador TDE 05 com a contribuição V2G para o ano de 2008.

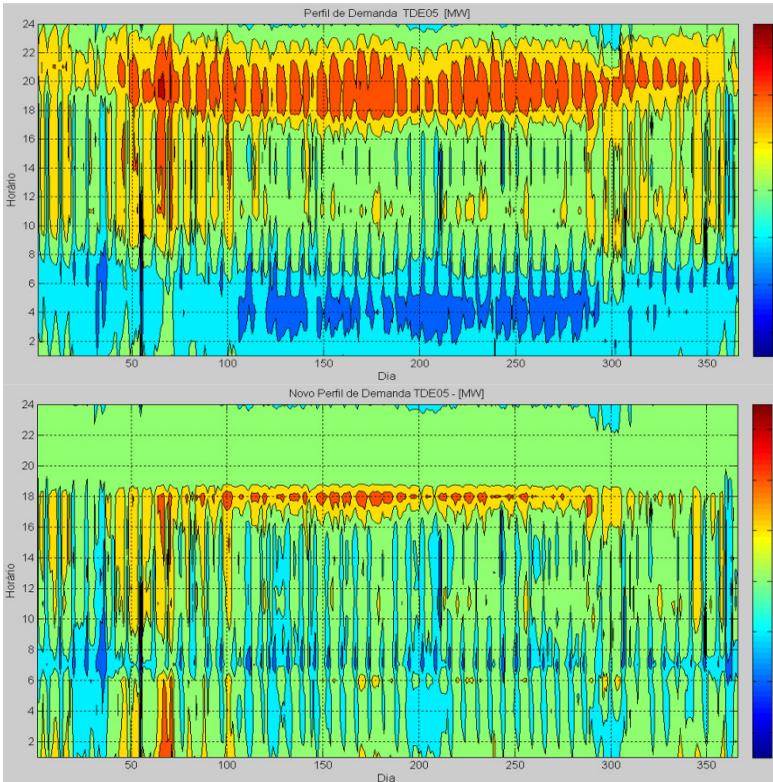


Figura 4.34 (cont.). Perfil de demanda resultante das contribuições V2G, G2V e da geração solar fotovoltaica no alimentador TDE 05 com a contribuição V2G para o ano de 2008.

4.8 CONTRIBUIÇÃO ENERGÉTICA DE GERADORES SOLARES FOTOVOLTAICOS NO CAMPUS DA UFSC, CONSIDERANDO DUAS TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: a-Si E p-Si

A simulação de geração solar fotovoltaica considerando os geradores solares hipotéticos de 3 MWp e 6,7 MWp com tecnologias de módulos de a-Si e p-Si, respectivamente, foi proposta para algumas áreas de coberturas disponíveis da UFSC. Foram utilizados dados reais de irradiância para estimar a contribuição desses geradores para a redução da curva de demanda do alimentador TDE06, bem como foram

analisados a potencial utilização dos veículos elétricos como dispositivos de armazenamento da energia fotogerada.

4.8.1 Caso 1: Contribuição energética dos geradores solares para a redução da curva de demanda do alimentador TDE06

A quantidade de geração solar fotovoltaica (kWh/m^2) está diretamente relacionada à intensidade de irradiância solar (W/m^2) recebida ao longo das horas do dia na superfície dos módulos. A máxima geração solar possível de ser obtida ocorre no período em que a irradiância é máxima.

Com a finalidade de analisar a contribuição energética dos geradores solares na demanda total do alimentador TDE06, foi utilizado o Nível de Penetração Energética (NPE). O NPE representa o percentual da energia anual ou mensal que os geradores fotovoltaicos interligados à rede elétrica com determinado nível de penetração em potência podem contribuir para um alimentador (BRAUN *et al.*, 2007; JARDIM, 2008).

O dados de irradiância utilizados neste trabalho para o cálculo da geração solar foram obtidos do gerador solar de 2 kWp de potência instalado na Universidade Federal de Santa Catarina (RÜTHER, 1998; RÜTHER e DACOREGIO, 2000) e correspondem ao mesmo período de análise do alimentador (ano de 2008).

O trabalho realizado por Braun e Rütther (2010) mostra que geradores solares fotovoltaicos instalados estrategicamente podem contribuir para aliviar as redes de distribuição, deslocando os picos de demanda quando há uma boa correspondência entre as cargas e os recursos de radiação solar. O estudo mostrou que um gerador solar hipotético de 1 MWp, utilizando uma área de aproximadamente 8000 m^2 , pode contribuir para a redução de 30% do consumo de um edifício comercial, uma vez que uma fração considerável da carga do alimentador é direcionada para suprir essa edificação. Além disso, o gerador solar pôde oferecer benefícios consideráveis para a concessionária local com a redução dos picos de demanda durante o dia para o alimentador correspondente.

De igual modo, a possível integração de geradores solares fotovoltaicos nas coberturas disponíveis existentes na UFSC pode

contribuir para a redução do consumo destas edificações, bem como aliviar o pico de demanda do alimentador. Grande parte da carga do alimentador TDE06 está direcionada para o suprimento das demandas da universidade. Conforme observado na Fig. 4.2 esse alimentador apresenta consumo energético diurno (devido às cargas de iluminação e ar condicionado), concomitante com a máxima geração solar fotovoltaica, evidenciando a contribuição dos geradores solares para estas edificações (UFSC).

Neste trabalho foi observado um nível de penetração energética (NPE) médio anual de 42,96 % e de 19,33% para o alimentador TDE06 utilizando módulos de p-Si (6,7 MWp) e a-Si (3 MWp), respectivamente.

A Tabela 4.5, expressa o consumo mensal do alimentador TDE06 ao longo do ano, a possível geração solar fotovoltaica para as tecnologias de módulos fotovoltaicos de p-Si e a-Si, e o nível de penetração energética mensal (NPE).

Tabela 4.5. Nível de penetração energética (NPE)

Mês	TDE06					
	Consumo [MWh]	GFV p-Si [MWh]	GFV a-Si [MWh]	NPE [%]		
				GFV p-Si	GFV a-Si	
Jan	1427,30	709,13	319,11	49,68	22,36	
Fev	1537,34	728,20	327,69	47,37	21,32	
Mar	1729,61	787,49	354,37	45,53	20,49	
Abr	1584,68	652,57	293,66	41,18	18,53	
Mai	1563,47	748,10	336,65	47,85	21,53	
Jun	1509,05	563,24	253,46	37,32	16,80	
Jul	1476,56	656,42	295,39	44,46	20,01	
Ago	1597,82	531,46	239,16	33,26	14,97	
Set	1556,111	581,52	261,68	37,37	16,82	
Out	1605,30	611,99	275,39	38,12	17,16	
Nov	1531,16	616,70	277,51	40,28	18,12	
Dez	1418,95	753,81	339,21	53,12	23,91	
Média Anual				42,96	19,33	

Para uma melhor visualização da contribuição da geração solar fotovoltaica (Fig. 4.30 e 4.31) sob as curvas de demanda do alimentador TDE06, foram gerados gráficos de demandas diárias horárias. As Fig. 4.35 e 4.36 mostram as demandas diárias horárias resultantes com a contribuição da geração solar fotovoltaica (a-Si e p-Si).

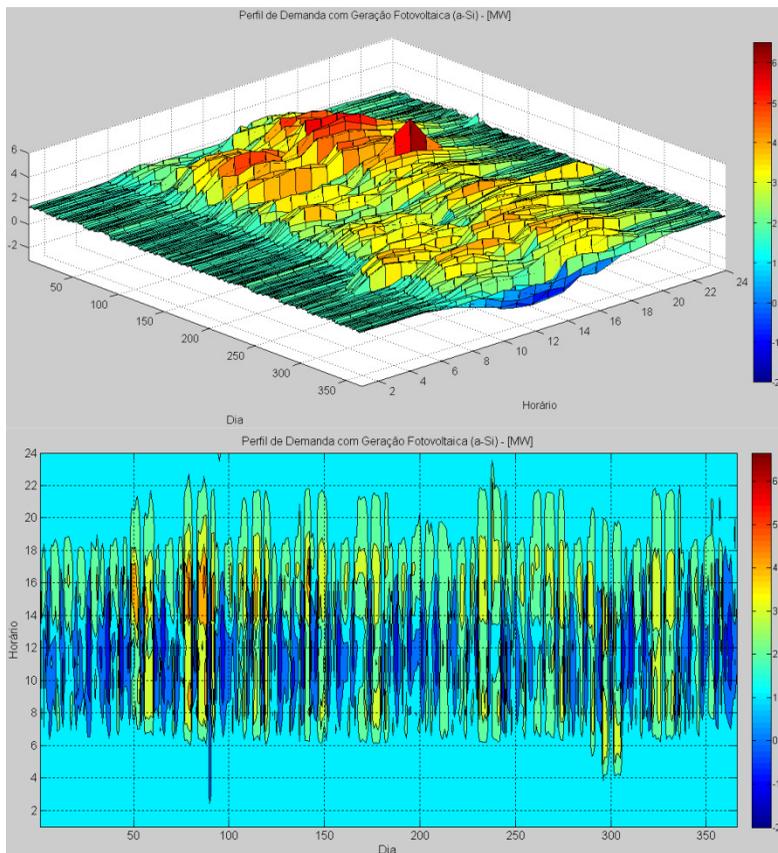


Figura 4.35: Perfil de demanda do alimentador TDE06, em MW, resultante da contribuição da geração solar fotovoltaica (3 MW_p de módulos de a-Si) no ano de 2008.

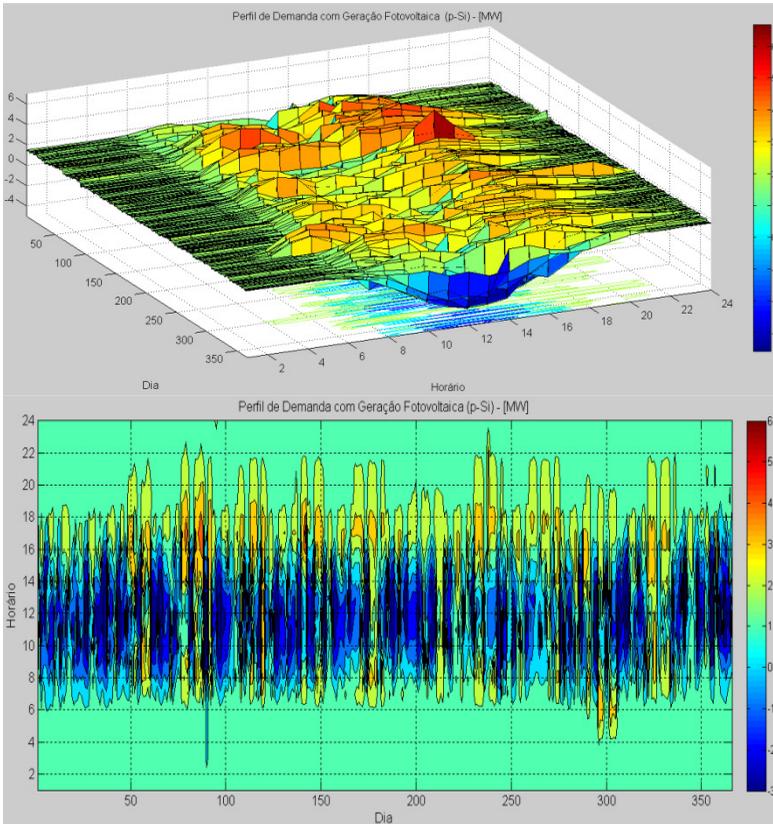


Figura 4.36: Perfil de demanda do alimentador TDE06, em MW, resultante da contribuição da geração solar fotovoltaica (6,7 MWp de módulos de p-Si) no ano de 2008.

Nas Fig. 4.35 e 4.36 foi possível verificar os efeitos da contribuição solar fotovoltaica ao longo do ano de 2008. Observa-se que geradores solares de grande porte podem aliviar a carga do alimentador, como podem injetar o excedente da geração na rede elétrica pública.

A Fig.4.2 mostrou que dias de semana apresentam valores de demanda superiores aos observados para os dias de final de semana, devido ao funcionamento da universidade. Dessa forma, pode-se inferir que para os dias de final de semana, além de aliviar a demanda do alimentador, a energia excedente injetada na rede elétrica será superior à observada para os dias de semana. Nos meses de dezembro, janeiro e

fevereiro o nível de intensidade de radiação solar é elevado, porém o alimentador TDE06 apresenta baixo consumo nesses meses. Com isso o excedente de energia a ser injetada na rede é superior aos demais meses. Nos meses de inverno, a intensidade de radiação solar é mais baixa e o consumo da edificação também é baixo. Isso resulta numa menor contribuição dos geradores solares. Nesse período o excedente de energia é mais evidente nos dias de finais de semana, quando os valores de demanda do alimentador são menores do que os valores de demanda em dias de semana.

Durante o mês de março, os valores de demanda são elevados, apresentando demandas superiores a 6,5MW nos horários de maior intensidade de radiação, devido às cargas de ar condicionado.

4.8.2 Caso 2: Potencial utilização de veículos elétricos como dispositivos móveis de armazenamento de energia

Os veículos elétricos são frequentemente mencionados como uma das soluções para os problemas da dependência dos combustíveis fósseis no setor de transporte, redução das emissões de gases de efeito estufa (BRADY e O' MAHONY, 2010), gerenciamento pelo lado da demanda em sistemas de potência e também como um potencial dispositivo de armazenamento de energia de fontes intermitentes, como eólica e solar.

Embora os veículos elétricos não apresentem emissões diretas de gases de efeito estufa durante o seu deslocamento, a sua utilização implica em um aumento por geração de energia elétrica. Daí, a importância da energia elétrica utilizada para a recarga das baterias ser proveniente de fontes renováveis e não poluentes.

Na situação típica de uso de um veículo elétrico no conceito V2G, o usuário se deslocará no início da manhã até o local de trabalho e deixará seu veículo estacionado, conectado em uma tomada elétrica disponível no estacionamento. O veículo permanecerá estacionado durante a maior parte das horas de incidência solar. Nesse período, um gerador solar fotovoltaico integrado à cobertura do estacionamento, ou integrado a uma edificação do local de trabalho, poderá fornecer energia para recarregar as baterias do veículo. Assim, o veículo elétrico poderá

atuar como um dispositivo móvel de armazenamento de energia repondo a energia consumida durante o deslocamento.

As Fig. 4.37 e 4.38 mostram a contribuição da geração solar fotovoltaica diária (p-Si e a-Si) para a recarga de possíveis veículos elétricos. Conforme o item 3.10, estimou-se a quantidade de veículos que poderiam ser recarregados nas redondezas do alimentador TDE06, considerando a necessidade de 3,75 kWh/VE (energia que foi consumida ao longo do trajeto **residência-trabalho** e que deverá ser reposta).

A linha destacada em vermelho nos gráficos representa as 2300 vagas de estacionamentos disponíveis na universidade (BEPPLER e PRIM, 2010). Como visto anteriormente, as edificações com grandes áreas de coberturas disponíveis apresentam um grande potencial à integração de geradores solares. A energia fotogerada pode ser utilizada tanto para reduzir o consumo dessas edificações, como para recarregar as baterias dos veículos que ali ficam estacionados a maior parte do dia.

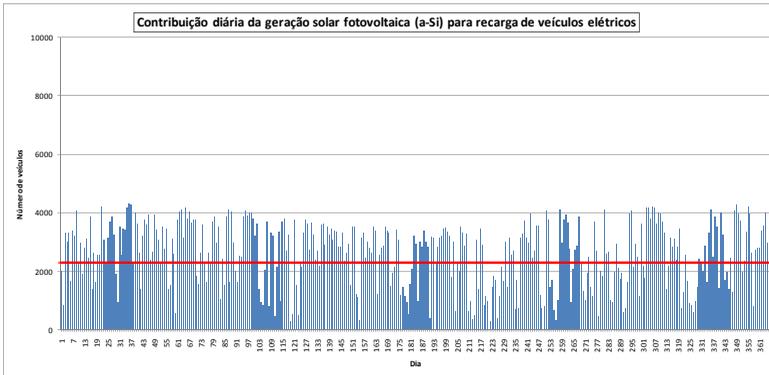


Figura 4.37. Contribuição de um gerador solar fotovoltaico hipotético de 3MWp (a-Si) para a recarga de veículos elétricos.

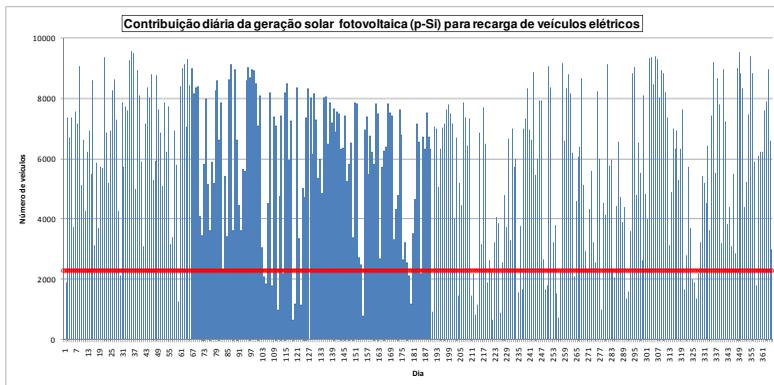


Figura 4.38. Contribuição de um gerador solar fotovoltaico hipotético de 6,7 MWp (p-Si) para a recarga de veículos elétricos.

Na Fig. 4.37 observa-se que a quantidade máxima, média e mínima de veículos que podem ser recarregados, supondo a necessidade média de energia de 3,75 kWh/VE, foi de 4305, 2611 e 300, respectivamente. Já na Fig. 4.38 a quantidade máxima, média e mínima de veículos utilizando energia solar para a recarga das suas baterias foi de 9567, 5813 e 668, respectivamente.

As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam o balanço energético mensal e anual, em MWh, considerando a geração solar mensal e anual dos geradores solares fotovoltaicos de a-Si e p-Si, respectivamente, e o consumo energético, em MWh, com a recarga dos 2300 veículos, caso fossem todos veículos elétricos.

Tabela 4.6. Balanço energético mensal e anual, em MWh, considerando um gerador solar fotovoltaico de 3 MWp com módulos de a-Si

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC (TDE06)				
Mês	Geração Solar Fotovoltaica (a-Si) [MWh]	Número de VEs	Consumo Energético dos VEs [MWh]	Balanco Energético [MWh]
JAN	319,11		267,38	51,73
FEV	327,69		250,13	77,56
MAR	359,67		267,38	92,30
ABR	293,66		258,75	34,91
MAI	336,65		267,38	69,27
JUN	253,46	2300	258,75	-5,29
JUL	295,39		267,38	28,02
AGO	239,16		267,38	-28,22
SET	261,68		258,75	2,93
OUT	275,39		267,38	8,02
NOV	277,51		258,75	18,76
DEZ	339,21		267,38	71,84
Anual	3578,58		3156,75	421,83

Observa-se a partir da Tabela 4.6 que nos meses de junho e agosto a geração solar fotovoltaica com módulos de a-Si não foi capaz de suprir a demanda de todos os veículos conectados ao alimentador TDE06 para completar a recarga de suas baterias (3,75 kWh), requerendo dessa forma um adicional de energia elétrica da rede elétrica pública. No entanto, o balanço energético anual mostrou-se positivo, apresentando um excedente energético de 421,83 MWh, que pode ser utilizado para a redução do consumo das edificações da UFSC.

Na Tabela 4.7 nota-se que a geração solar fotovoltaica com módulos de p-Si apresentou um balanço energético positivo ao longo de todos os meses do ano. Além de suprir toda a demanda com a recarga dos 2300 veículos (caso fossem elétricos) apresentou um excedente de 4 903 MWh.

Tabela 4.7. Balanço energético mensal e anual, em MWh, considerando um gerador solar fotovoltaico de 6,7 MWp com módulos de p-Si.

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC (TDE06)				
Mês	Geração Solar Fotovoltaica (p-Si) [MWh]	Número de VEs	Consumo Energético dos VEs [MWh]	Balanco Energético [MWh]
JAN	711,51	2300	267,38	444,14
FEV	732,13		250,13	482,00
MAR	787,49		267,38	520,11
ABR	672,62		258,75	413,87
MAI	752,37		267,38	485,00
JUN	573,87		258,75	315,12
JUL	674,34		267,38	406,97
AGO	554,31		267,38	286,93
SET	595,69		258,75	336,94
OUT	624,08		267,38	356,71
NOV	625,69		258,75	366,94
DEZ	755,75		267,38	488,38
Anual	8059,85		3156,75	4903,10

Ao contrastar os valores mensais e anuais do balanço energético mostrados nas Tabelas 4.6 e 4.7 com os gráficos das Fig. 4.37 e 4.38, foi possível verificar que o balanço energético apresentou valores positivos na maioria dos meses, exceto para os meses de junho e agosto. No entanto, notou-se a partir dos gráficos que vários dias os geradores solares não foram capazes de suprir a demanda dos 2300 veículos (caso fossem todos veículos elétricos), necessitando recorrer à geração convencional.

5 CONCLUSÃO

As crescentes preocupações energéticas e ambientais apresentam-se como novos desafios para o setor elétrico brasileiro. Ao longo de muitos anos a geração centralizada tem sido o modelo utilizado no país; no entanto, as externalidades negativas associadas a esses empreendimentos são aspectos cada vez mais críticos e o custo da geração por meio de usinas centralizadas tende a crescer ao longo dos anos. Neste contexto, a geração distribuída desponta como uma opção viável, pois pode ser utilizada como uma ferramenta estratégica no intuito de postergar os custos de expansão do sistema elétrico.

Os geradores solares fotovoltaicos, por apresentarem uma característica modular, configuram-se como opção viável como gerador distribuído e podem contribuir para a redução da demanda de alimentadores urbanos, bem como podem acrescentar à sua capacidade nominal. Neste trabalho foi possível observar a contribuição dos geradores solares fotovoltaicos para o alimentador TDE06, que apresenta um perfil de demanda diurno, tendo consumo e geração fotovoltaica concomitantes. Em diversos momentos, o gerador não só reduziu o pico de demanda deste alimentador como também injetou na rede um excedente significativo da energia gerada.

O alimentador TDE05 com perfil de demanda noturno apresentou grande potencialidade para a recarga de VEs no período da madrugada. A utilização de veículos elétricos na rede elétrica pública será totalmente dependente do conceito de *smart grid*, afinal, a aleatoriedade das recargas, em especial as recargas rápidas poderá ocasionar uma sobrecarga no alimentador, principalmente se forem realizadas no horário de ponta. Neste caso, estratégias de recargas inteligentes deverão ocorrer. Neste trabalho, observou-se que no período da madrugada o alimentador encontra-se bastante ocioso, e em condições de promover a recarga de quantidades consideráveis de veículos elétricos, e constatou que a nova carga representada pelos VEs não representam uma situação de prejuízo para o alimentador. Verificou-se que para alguns dias do ano, tipicamente os mais quentes, os valores de demanda observados durante o período de recarga se apresentaram superiores aos valores de demanda observados às 18h (novo pico de demanda resultante com o serviço V2G). Mas em nenhum momento os valores de demanda ultrapassaram o limite do alimentador (9 MW). Além disso, observou-se que a utilização de grandes quantidades de VEs no período das 19h às 24h pode contribuir significativamente para a modulação da curva de

demanda deste alimentador. O balanço energético verificado ao longo do ano de 2008, considerando a geração fotovoltaica, a contribuição V2G e o consumo energético da frota de 496 veículos (caso fossem VEs) apresentou valor positivo, com um crédito de aproximadamente 1 GWh para o alimentador TDE05. Porém, sem a contribuição V2G o balanço energético seria negativo, com necessidade de recorrer à geração convencional para completar a recarga dos VEs.

A interação entre a recarga dos VEs no período da madrugada (G2V) + a contribuição dos geradores solares fotovoltaicos + a contribuição V2G mostrou-se capaz de uniformizar a curva de demanda do alimentador. Observou-se também a contribuição de grandes áreas de coberturas disponíveis, e que abrigam os usuários de um grande número de veículos (que poderiam ser elétricos) quanto à integração de geradores solares, que podem tanto contribuir para a redução do consumo da edificação, como fornecer energia para recarregar uma frota de veículos que fica grande parte do dia estacionada. O potencial de utilizar os veículos como dispositivos de armazenamento de energia viabilizando a oferta de serviços V2G no horário de ponta e G2V nas horas ociosas da madrugada, mostrou ser uma opção viável. Com este trabalho foi possível concluir que é possível utilizar as coberturas das edificações residenciais e locais de trabalho de um conjunto significativo de potenciais usuários das tecnologias de veículos elétricos e geradores solares fotovoltaicos integrados às edificações associadas às redes inteligentes, para abastecer a nova demanda por energia elétrica representada pelos veículos elétricos. Além de oferecer à rede elétrica um suporte de redução da demanda nos horários de ponta.

Este trabalho mostrou a interação entre os geradores solares fotovoltaicos e os veículos elétricos no contexto de rede inteligente, mostrando que os veículos elétricos podem oferecer benefícios à rede elétrica pública.

Este estudo apresentou algumas limitações em sua abordagem por tratar de conceitos ainda em fase de desenvolvimento, como *smart grid* e V2G. Diversos estudos têm sido realizados no mundo inteiro, porém a falta de resultados empíricos dificulta a conclusão dos trabalhos feitos nessas áreas.

A *smart grid*, por exemplo, desempenhará um papel importante na interação dos veículos elétricos com a rede elétrica, pois será a responsável pela comunicação entre o usuário do veículo elétrico e a concessionária local. Assim, à medida que estudos são realizados nessa

área, avanços também poderão ocorrer no setor de transporte, alterando a forma como o veículo é utilizado pelo usuário, ou seja, o veículo passará a ser uma fonte de renda, visto que a energia a ser injetada na rede elétrica no horário de ponta terá um valor diferenciado.

Analisar a viabilidade econômica com o serviço V2G é fundamental, pois será a base de apoio para tomada de decisões do usuário quanto à utilização da energia armazenada no seu veículo. O valor pago por essa energia deverá compensar os custos relacionados aos fluxos bidirecionais de energia, uma vez que o ciclo de vida das baterias é função das descargas realizadas ao longo do tempo.

Os desafios para a inserção de veículos elétricos são imensos. Uma normalização terá que ser desenvolvida, conceito de postos de abastecimentos deverão ser implantados e a infraestrutura de energia elétrica deverá ser adaptada e expandida. Um programa de incentivo seria um passo importante para acelerar a adoção dos veículos elétricos nas grandes cidades.

6 REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 11704 Sistemas fotovoltaicos - Classificação. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2008.
- _____. NBR 10899 Energia solar fotovoltaica - Terminologia. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2006.
- ACHA, S.; GREEN, T.; SHAH, N. Effects of optimised plug-in hybrid vehicle charging strategies on electric distribution network losses. **In: PES, Editor, Conference and exposition on transmission and distribution, IEEE**, Prague, p. 1–6, 2010.
- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SODER, L. Distributed generation: a definition. **Electric Power Systems Research**. Issue 3, v.57, p.195-204, 2001.
- AMIN, M.S.; WOLLENBERG, F. B. Toward a smart grid: power delivery of the 21st century. **Power and Energy Magazine, IEEE**.pp. 34–41, 2005.
- AMJAD, S.; NEELAKRISHNAN, R.; RUDRAMOORTHY, R. Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Issue 3, vol. 14. p. 1104-1110, 2010.
- ANDERSEN, H.P.; MATHEWS, A. J.; RASK, M. Integrating private transport into renewable energy policy: The strategy of creating intelligent recharging grids for electric vehicles. **Energy Policy**. Issue 7, v. 37. p. 2481-2486, 2009.
- ANEEL, Resolução 090 de 27 de março de 2001. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/glossario.cfm?att=H>. Acesso em: Novembro de 2010.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp> Acesso em: Maio de 2011.
- AUTOMOTIVE NEWS, 2009. JP Morgan Article, 2009.
- AXSEN, J.; KURANI, S.K. Anticipating plug-in hybrid vehicle energy impacts in California: constructing consumer-informed recharge

- profiles. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**. Issue 4, v.15, p. 212–219, 2010.
- BAGNALL, D.M. e BORELAND, M. Photovoltaic technologies. **Energy Policy**. Issue 12, v. 36, p. 4390-4396, 2008.
- BEN. Balanço Energético Nacional. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf. Acessado em maio de 2011.
- BEPPLER, F.R.; PRIM, J.S. Análise do campus da UFSC como um pólo gerador de viagens. Trabalho realizado pelo PET Engenharia Civil UFSC, 2010.
- BOSSCHE, P.V.; VERGELS. F.; MIERLO, J.V.; MATHEYS, J.; AUTENBOER, W. V. SUBAT: An assessment of sustainable battery technology. **Journal of Power Sources**. Issue 2, v. 162, p.913-919,2006.
- BRADY, J.; O'MAHONY, M. Travel to work in Dublin. The potential impacts of electric vehicles on climate change and urban air quality. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**. Issue 2, v.16. p. 188-193, 2011.
- BRAUN, P.; JARDIM, C.D.S.; RÜTHER, R. **Análise da Contribuição Energética de Sistemas Fotovoltaicos Integrados em Edificações: Aeroporto Internacional de Florianópolis, um Estudo de Caso**: In: IX Encontro nacional sobre Conforto no Ambiente Construído – ENAC. Ouro Preto – MG, 2007.
- BRAUN, P.; RÜTHER, R. The role of grid-connected, building-integrated photovoltaic generation in commercial building energy and power loads in a warm and sunny climate. **Energy Conversion and Management**. Issue 12, v.51. p. 2457-2466, 2010.
- BRAUN-GRABOLLE, P. A integração de sistemas solares fotovoltaicos em larga no sistema elétrico de distribuição urbana. (Tese de doutoramento). Florianópolis-SC, 2010.
- BROOKS, A. Vehicle-to-grid demonstration project: grid regulation ancillary service with a battery electric vehicle. **Report, AC Propulsion**, 2006.

-
- BROWN, S.; PYKE, D.; STEENHOF, P. Electric vehicles: The role and importance of standards in an emerging market. **Energy Policy**. Issue 7, v.38, p. 3797-3806, 2010.
- BURGER, B.; RÜTHER, R. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. **Solar Energy**. Issue 1, v.80, p.32-45, 2006.
- BURKE, A.; MILLER, M. The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications. **Journal of Power Sources**. Issue 1, v. 196, p. 514-522, 2011.
- BUTLER, D. Meters to manage the future. **Nature**. v. 445, 2007.
- CAAMAÑO, E.; THORNYCROFT, J.; MOOR, H. D.; COBBEN, S.; JANTSCH, M.; ERGE, T.; LAUKAMP, H.; SUNA, D.; GAIDDON, B. State-of-the-art on dispersed PV power generation: Publications review on the impacts of PV Distributed Generation and Electricity networks. **PVUpscale. Issue PV in Urban Policies-Strategic and Comprehensive Approach for Longterm Expansion**, 2007.
- _____. Celesc Distribuição S/A. Contato pessoal. Departamento de Operações, 2011.
- CHEN, H; CONG, T.N.; YANG, W.; TAN, C.; LI, Y. e DING, Y. Progress in electrical energy storage system: A critical review. **Progress in Natural Science**. Issue 3, vol. 19. p. 291- 312, 2009.
- CIGRE. Conseil International des Grands Réseaux Électriques. Disponível em: <http://www.cigre.org/>. Acesso em: Janeiro de 2011.
- CLEMENT, K.; HAESSEN, E.; DRIESEN, J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on the distribution grid. **Proceedings 2008-4th IEEE BeNeLux young researchers symposium in electrical power engineering** Eindhoven, The Netherlands. pp. 1-6, 2008.
- CLEMENT, K.; HAESSEN, E.; DRIESEN, J. Stochastic analysis of the impact of plug-in hybrid electric vehicles on the distribution grid, **Electricity distribution, 2009. CIRED 2009.20th International**

- conference on electricity distribution** Prague, Czech Republic.pp. 1–4, 2009.
- DALLINGER, D.; NESTLE, D.; RINGELSTEIN, J. Indirect control of plug-in hybrid vehicles with variable tariffs.Würzburg, Germany: **European Conference SmartGrids + Mobility**, 2009.
- DENATRAN. Departamento Nacional de Trânsito. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/frota.htm>. Acesso em: Maio de 2011.
- ELETROSUL. Sala de Imprensa. Releases. **Reforços no Sistema de Transmissão que abastecem a ilha de SC e leste catarinense são inaugurados.** Disponível em: http://www.eletrosul.gov.br/home/conteudo.php?cd=65&tipo=55&galeria=8&id_codigo=873. Acesso em: Maio de 2011.
- ENBRIDGE. Planta Solar fotovoltaica em Sarnia, Canadá. Disponível em: <http://www.enbridge.com/DeliveringEnergy/RenewableEnergy/Solar.aspx>.
- EPIA.European Photovoltaic Industry Association.**Solar Photovoltaic Electricity em Powering the World**, 2011.
- EPRI, **Comparing the benefits and impacts of hybrid electric vehicle options**, EPRI - Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA, 1000349; 2001.
- ETUSC. Escritório Técnico Administrativo da Universidade Federal de Santa Catarina. Arquivo digital, 2010.
- EUROPEAN COMMISSION, 2008.Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions—20 20 by 2020 Europe's climate change opportunity.COM (2008) 30 final.
- FARMER, C.; HINES, P.; DOWDS, J.; BLUMSACK, S. Modeling the impact of increasing PHEV loads on the distribution infrastructure, **43rd Hawaii international conference on system sciences**, pp. 1–10, 2010.
- FETCENKO, M.A.; OVISHINSKY, S.R.; REICHMAN, B.; YOUNG, K.; FIERRO, C.; KOCH, J.; ZALLEN, A.; MAYS, W.; OUCHI, T.

-
- Recent advances in NiMH battery technology. **Journal of Power Sources**. Issue 2, vol. 165, p. 544-551, 2007.
- FTHENAKIS, V. e ALSEMA, E. Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2004–early 2005 status, **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**. Issue 3, v.14, p. 275–280, 2006.
- FTHENAKIS, V.; KIM, H.C. e ALSEMA, E. Emissions from photovoltaic life cycles. **Environmental Science and Technology**. Issue 6, v.42, p. 2168–2174, 2008.
- GIPA do Brasil, Brasil Motors, pesquisa de deslocamento de automóveis no Brasil, 2006.
- GREEN, C. R.; WANG, L.; ALAM, M. The impact of plug-in hybrid vehicles on distribution networks: A review and outlook. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Issue 1, v. 15, p. 544-553, 2010.
- GUILLE, C.; GROSS, G.A Conceptual framework for the vehicle – to – grid (V2G) implementation. **Energy Policy**. Issue 11, v. 37, p. 4379-4390, 2009.
- HADLEY, W.S. Impact of plug-in hybrid vehicles on the electric grid. Technical report ORNL/TM-2006/554, Oak Ridge National Laboratory, TN, 2006.
- HERNÁNDEZ, J. C.; MEDINA, A.; JURADO, F. Impact comparison of PV system integration into rural and urban feeders. **Energy Conversion and Management**. Issue 6, v.49, p.1747-1765, 2008.
- HUSTON, C.; VENAYAGAMOORTHY, K.G.; CORZINE, A.K. Intelligent scheduling of hybrid and electric vehicle storage capacity in a parking lot for profit maximization in grid power transactions. **IEEE Energy** 2030, 2008.
- IEEE. Instituto f Electrical and Eletronics Engineers, Inc. Disponível em: <<http://www.ieee.org.br>>. Acesso em Janeiro de 2011.
- INEE. Instituto Nacional de Eficiência Energética. Disponível em: <http://www.inee.org.br/>. Acesso em Janeiro de 2011.
- JARDIM, C.D.S. A Inserção no Contexto Brasileiro de Sistemas Solares Fotovoltaicos Integrados à Rede Elétrica, quando analisados

através do Fator Efetivo de Capacidade de Carga (FECC), enfocando a redução do pico de demanda diurno em centros urbanos. (Tese de doutoramento). Florianópolis, 2008.

- KARNAMA, A. **Analysis of integration of plug-in hybrid electric vehicles in the distribution grid**. Master's thesis. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology; 2009.
- KEMPTON, W.; KUBO, T. Electric-drive vehicles for peak power in Japan. **Energy Policy**. Issue 1, v. 28, pp. 9–18, 2000.
- KEMPTON, W.; TOMIC, J. Vehicle-to-grid fundamentals: calculating capacity and net revenue. **Journal of Power Sources**. Issue 1, v. 144, pp. 268–279, 2005.
- LAUKAMP, H.; DIAZ, J.; ERGE, T.; EBERT, G. Grid effects of a large, distributed PV capacity in a modern urban settlement. In: **22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**. Anais, 2007. Milano, Italy, p. 2280-2283, 2007.
- LI, H.; LIAO, C., WANG, L. Research on state-of-charge estimation of battery pack used on hybrid electric vehicle, in **Proc., Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference**, p. 1-4, 2009.
- LI, X.; LOPES, C.A.L.; WILLIAMSON, S.S. On the suitability of plug-in hybrid electric vehicle (phev) charging infrastructures based on wind and solar energy, **IEEE Power & Energy Society General Meeting**. doi: 10.1109/PES.2009.5275753, pp. 1–8, 2009.
- LINDLEY, D. The energy storage problem. **Nature**. Vol. 463, 2010.
- LIU, E. e BEBIC, J. Subcontract Report NREL/SR-581-42298 **Distribution System Voltage Performance Analysis for High-Penetration Photovoltaics** New York, 2008.
- LUND, H. Large-scale integration of wind power into different energy systems. **Energy**. Issue 13, v. 30. p. 2402–2412, 2005.
- LUND, H.; KEMPTON, W. Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G. **Energy Policy**. Issue 9, v. 36, p. 3578 – 3587, 2008.
- NYNS, C. K.; HAESEN, E.; DRIESEN, J. The impact of vehicle to grid on the distribution grid. **Electric Power Systems Research**. Issue 1, v. 81, p. 185-192, 2011.

-
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. Ed. São José dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, v. 1, p. 60, 2006.
- PETERSON, B.S.; APT, J.; WHITACRE, F. J. Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization. **Journal of Power Sources**. Issue 8, vol. 195. p. 2385-2392, 2010.
- PUTRUS, G.; SUWANAPINGKARL, P.; JOHNSTON, D.; BENTLEY, E.; NARAYANA, M. Impact of electric vehicles on power distribution networks, **IEEE vehicle power and propulsion conference**, p. 827–831, 2009.
- ROSENKRANZ, C. (2003). Deep Cycle Batteries for Plug-in Hybrid Application, EPRI Workshop at EVS 20, November 2003.
- RÜTHER, R. Experiences and Operational Results of the First Grid - Connected, Building - Integrated, Thin Film Photovoltaic Installation in Brazil. In: 2nd World Conference and Exhibition of Photovoltaic Solar Energy Conversion, 1998, Viena. Proceedings of the 2nd World Conference and Exhibition of Photovoltaic Solar Energy Conversion, 1998. p. 2655-2658.
- RÜTHER, R. e DACOREGIO, M. Performance Assessment of a 2 kWp Grid-connected, Building-integrated, Amorphous Silicon Photovoltaic Installation in Brazil. **Prog. Photovolt. Res. Appl.**, n.8, p.257-266. 2000.
- RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos - O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligadas à Rede Elétrica Pública**. LABSOLAR Florianópolis: UFSC. ISBN 85-87583-04-2. 2004. 114p.
- RÜTHER, R. ; DACOREGIO, M. M. ; SALAMONI, I. T. ; KNOB, P. ; BUSSEMAS, U. . Performance of the First Grid-Connected, BIPV Installation in Brazil Over Eight Years of Continuous Operation. In: 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, v. 1. p. 119-122, Dresden - Alemanha., 2006.
- RÜTHER, R.; KNOB, P. J.; JARDIM, C. D. S.; REBECHI, S. H. Potential of building integrated photovoltaic solar energy generators in assisting daytime peaking feeders in urban areas in

- Brazil. **Energy Conversion and Management**. Issue 5, v.49, p.6, 2008.
- RÜTHER, R.; TAMIZH-MANI, G.; CUETO, J. D.; ADELSTEIN, J.; MONTENEGRO, A. A.; ROEDEM, B. V. Performance test of amorphous silicon modules in different climates: higher minimum operating temperatures lead to higher performance levels: **3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**. Osaka, Japão, 2003.
- SALAMONI, I. T. **Metodologia para cálculo de geração fotovoltaica em áreas urbanas aplicada a Florianópolis e Belo Horizonte**. PPGEC, UFSC, Florianópolis, 2004.
- SANDIA. **Sandia National Laboratories. Solar Energy Grid Integration Systems “SEGIS”**. 2008.
- SANNA, L. Driving the solution, the plug-in hybrid vehicle. **EPRI Journal**, pp. 8–17, 2005.
- SANTOS, P.I. **Integração de painéis solares fotovoltaicos em edificações residenciais em um alimentador de energia de zona urbana mista**. (Dissertação de mestrado). Florianópolis-SC, 2009.
- SENJYU, D et al, Optimal control of distribution voltage profile by considering the number of operation of the distribution installations, **Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE**. p. 1-8, July 2008.
- SHAO, S.; PIPATTANASOMPORN, M.; RAHMAN, S. Challenges of PHEV penetration to the residential distribution network, **2009 IEEE PES General Meeting**. p. 1–8, 2009.
- SHIAU, N. S. C.; SAMARAS, C.; HAUFFE, R.; MICHALEK, J. J. Impact of battery weight and charging patterns on the economic and environmental benefits of plug-in hybrid vehicles. **Energy Policy**. Issue 7, v. 37, p. 2653-2663, 2009.
- SPIER, E.B et al. Avaliação da conexão de produtores independentes em alimentadores radiais de sistemas de distribuição, **In: IV SBQEE SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 2001.

-
- SRIVASTAVA, K.A.; ANNABATHINA, B.; KAMALASADAN, S. The challenges and policy options for integrating plug-in hybrid electric vehicle into the electric grid. **The Electricity Journal**. Issue 3, v. 23, pp. 83–91, 2010.
- STAEBLER, D. L.; WRONSKI, C. R. Reversible conductivity changes in discharge produced amorphous Si. **Applied physics letters**. v.31, 1977.
- STEENHOF, P.A.; MCINNIS, B.C. A comparison of alternative technologies to de-carbonize Canada's passenger transportation sector. **Technological Forecasting and Social Change**. Issue 8, v. 75, pp. 1260–1278, 2008.
- SUTANTO, D. Alternative energy resource from electric transportation, **First international conference on power electronics systems and applications proceedings**. p. 149–154, 2004.
- TARASCON, J.M.; ARMAND, M. Building better batteries. **Nature**. vol. 451, 2008.
- TAYLOR, J.; MAITRA, A.; ALEXANDER, M.; BROOKS, D.; DUVALL, M. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations. **Power & Energy Society General Meeting 2009** Calgary, AB. p. 1–6, 2009.
- TOLLEFSON, J. Charging up the future. **Nature**, vol. 456, 2008.
- TOMIC, J.; KEMPTON, W. Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. **Journal of Power Sources**. Issue 2, v. 168, p. 459–46, 2007.
- VIAN, A. Veículos elétricos: impactos sobre a rede de distribuição (apresentação). In: VE 2009 - 6º Seminário e Exposição de Veículos Elétricos. Campinas, 2009.
- VIANA, T. S.; ZOMER, C. D.; NASCIMENTO, L. e RÜTHER, R. **Centro de Eventos da UFSC: Integração de Sistemas Fotovoltaicos à Arquitetura**. IX ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Ouro Preto, MG, Brasil, 2007.

- VIANA, T. S. e RÜTHER, R. **Análise do desempenho de um sistema fotovoltaico de 10 kWp conectado à rede elétrica.** I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza, Brasil, 2007.
- VIERA, J.C.; GONZALES, M.; ANTON, J.C.; CAMPO, J.C.; FERRERO, F.J.; VALLEDOR, M. NiMH vsNiCd Batteries under high charging rates, in **Proc., 28th Annual Telecommunications Energy Conference**, pp. 1-6, 2006.
- WADIA, C.; ALBERTUS, P.; SRINIVASAN, V. Resource constraints on the battery energy storage potential for grid and transportation applications. **Journal of Power Sources**. Issue 3, v. 196, p. 1593-1598, 2011.