



UM MODELO PARA DIMENSIONAMENTO DE POSTOS DE RECARGA  
RÁPIDA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS BASEADO NO PERFIL DE CARGA  
DAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

Fabio Antonio Vieira Pinto

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmalski  
Costa

Rio de Janeiro  
Janeiro de 2016

UM MODELO PARA DIMENSIONAMENTO DE POSTOS DE RECARGA  
RÁPIDA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS BASEADO NO PERFIL DE CARGA  
DAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

Fabio Antonio Vieira Pinto

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

---

Prof. Aloysio de Castro Pinto Pedroza, Dr.

---

Prof. Célio Vinicius Neves de Albuquerque, Ph.D.

---

Prof. Mauro Sérgio Pereira Fonseca, Dr.

---

Prof. Pedro Braconnot Velloso, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
JANEIRO DE 2016

Pinto, Fabio Antonio Vieira

Um Modelo para Dimensionamento de Postos de Recarga Rápida para Veículos Elétricos Baseado no Perfil de Carga das Baterias de Íons de Lítio/Fabio Antonio Vieira Pinto. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XIV, 104 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 100 – 104.

1. Perfil de carga das baterias de íons de lítio. 2. Modelos de cadeia de Markov. 3. Carga rápida. I. Costa, Luís Henrique Maciel Kosmalski. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Dedico esse trabalho a duas  
pessoas às quais devo tudo o que  
sou hoje, ao meu pai, onde quer  
que se encontre, muito obrigado  
pela dignidade e caráter  
herdados, por ter me dado  
condições de concluir o curso de  
graduação e o curso de mestrado  
e ao Mestre Mauros Queiroz,  
muito obrigado pela  
oportunidade, apoio e dedicação  
incondicionais, pela simplicidade  
e sabedoria transmitidas.*

# Agradecimentos

A realização dessa tese não teria sido possível sem a generosa colaboração de várias pessoas. Esta seção é reservada à grandiosa contribuição que todos aportaram a esse trabalho, e em especial, à minha mãe, que deu todo apoio e força durante todo o percurso. Venho, assim, agradecer:

Ao meu orientador Professor Luís Henrique pela oportunidade (única) concedida, pela orientação, pela longa amizade, pelo empenho, motivação, pelo conhecimento compartilhado, pelos momentos de descontração, pelas caronas no fim do expediente, pela compressão de frequentes interrupções em sua sala para esclarecimento de dúvidas e pela (generosa) paciência no desenvolvimento da tese. Além disso, aqui deixo meu respeito e admiração pela sua serenidade e capacidade de análise do perfil dos seus alunos.

Ao Professor Otto Duarte pela oportunidade (única), por me disponibilizar um espaço no laboratório, fundamental para o desenvolvimento do trabalho, generosidade e pelo ambiente saudável do laboratório.

Ao Professor Aloysio Pedrosa pelos conhecimentos transmitidos e compartilhados nos tempos de graduação, recentemente nas primeiras disciplinas do doutorado e pelas palavras (sempre) motivadoras e encorajadoras.

Ao Marcelo Amorim pela longa amizade, pelo aprimoramento das ilustrações da tese, pelos conselhos, opiniões, críticas (sempre) construtivas e pelo tempo despendido nas seções de Skype na elaboração dos artigos.

Ao Professor Daniel Sadoc pela sua grande contribuição ao trabalho, nos conhecimentos compartilhado do Tangram-II, na presteza e esclarecimento das dúvidas sobre cadeias de Markov, seja via email, Skype e pessoalmente.

Ao Professor Miguel Campista pela amizade, bom humor, momentos de descontração e pela compreensão de algumas interrupções em sua sala, seja para tirar dúvidas, trocar idéias, ouvir conselhos, seja para emprestar a chave do laboratório e imprimir documentos.

Ao Professor Pedro Velloso pela amizade, descontração, e pela presteza nos apoios normativo-acadêmicos e esclarecimentos de diversas dúvidas.

Ao Professor Carlos Alberto pela amizade, pelas palavras de motivação, pelos artigos enviados para avaliação e pelas caronas ao sair da Unirio tarde da noite.

Ao Professor Gelson Mendonça pela amizade, pelos conhecimentos adquiridos na graduação, pelo incentivo, sabedoria e pelos momentos de descontração.

À Professora Cládice e ao Departamento de Engenharia de Produção da Unirio por me concederem tempo para realizar a tese.

Ao Professor Rodrigo Couto pelas dúvidas esclarecidas no LaTeX, artigos, Ubuntu, Debian, VirtualBox, dentre vários outros e sobretudo pela amizade.

Ao Professor Marcelo Rubinstein pela amizade e incentivo.

Ao Vitor Borges, Dianne Medeiros, Martin Andreoni, Lino Ferraz, Diogo Ferrazani e Daniel Dias pelas dúvidas tiradas no LaTeX, formatação de artigos, formatação de desenhos no Visio, dentre outros.

Ao Marcus Lima e Alyson Santos pela amizade e pelas dúvidas de Linux.

Ao Sofiene Jelassi pelos diálogos em inglês, fundamentais para a apresentação do primeiro trabalho internacional publicado.

Ao Maurício Cagy pela amizade, pelos esclarecimentos de dúvidas de Matlab.

Ao Geraldo Junior e João Batista pelos detalhes de instalação do VirtualBox, palavras de incentivo e bom humor sempre presentes.

Ao Pedro Cruz, Igor Alvarenga, Hugo Sadok, Lucas Gomes e Antonio Lobato pelas dúvidas de Gimp, Kile, Linux e pelo software Matlab.

Ao motorista Breno do Nissan Leaf taxi que permitiu fotografar o veículo no posto de carga da Lagoa.

À Daniele da Silva pela presteza nas dúvidas nos procedimentos de inscrição em disciplinas e ao Maurício Machado pelos esclarecimentos das prestações de contas.

Finalmente, muito obrigado ao Programa de Engenharia Elétrica da COPPE, à UFRJ e a todos os amigos e professores que direta ou indiretamente tenham contribuído para a realização desse trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

UM MODELO PARA DIMENSIONAMENTO DE POSTOS DE RECARGA  
RÁPIDA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS BASEADO NO PERFIL DE CARGA  
DAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

Fabio Antonio Vieira Pinto

Janeiro/2016

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Programa: Engenharia Elétrica

O desenvolvimento de cidades inteligentes possui entre seus principais objetivos a sustentabilidade, racionalidade e eficiência. Nesse contexto o uso de veículos elétricos no setor de transportes recebe destaque. O estudo do comportamento das estações de recarga em centros urbanos é importante pois a emergente frota de veículos elétricos irá impactar a planta de energia elétrica, principalmente em horários de pico. É necessário que o espaço físico e o aproveitamento de energia nos postos de carga sejam bem planejados para que sejam minimizados os impactos na rede elétrica, garantindo que os usuários sejam atendidos dentro de padrões de qualidade de serviço aceitáveis: o tempo de abastecimento difere substancialmente dos veículos convencionais. Assim, nesta tese utilizam-se modelos de Cadeia de Markov de Tempo Contínuo para obter métricas de desempenho fundamentais, tais como o número médio de clientes e o tempo médio de espera no sistema. Os resultados mostram a relação entre o projeto do espaço físico e instalações elétricas e a disponibilidade para os clientes. O modelo de cadeia de Markov é, em seguida, aprimorado incorporando o perfil de carga das baterias de íons de lítio, as mais utilizadas nos veículos elétricos atuais. Propõem-se quatro cenários que diferem na capacidade de lidar com os carregadores inativos e vagas de espera, mostrando através de análise numérica, que a variação do número de servidores contribui para uma melhor utilização da energia disponível. Finalmente, aplica-se os modelos propostos à cidade do Rio de Janeiro mostrando, progressivamente, melhor desempenho de resultados relacionados ao planejamento da estação de carga, sobretudo em relação ao melhor aproveitamento do espaço físico e da capacidade energética da estação de carga, em termos da potência disponível e percentual de utilização.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

## A MODEL FOR DIMENSIONING OF FAST CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC VEHICLES BASED ON THE LI-ION CHARGING PROFILE

Fabio Antonio Vieira Pinto

January/2016

Advisor: Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Department: Electrical Engineering

Sustainability, rationality, and efficiency are some of the main goals of smart cities development. Toward these goals, the use of electric vehicles in the transportation sector deserves special mention. The investigation of the behavior of a charging station in urban centers is important due to the impact on the power grid by the emerging fleet of electric vehicles, specially in peak hours. It is mandatory that the physical layout and energy reuse in charging stations are well planned, to minimize the negative effects in the power grid and to ensure that users met acceptable quality of service, as the charging time differs substantially from conventional vehicles. Thus, in this thesis, we use continuous time Markov chains to obtain some important performance metrics, such as the average number of users and the average waiting time in the system. The results show the tradeoff between the physical space and electrical supply design and availability to the users. Then, the Markov chain model is enhanced by considering the lithium-ion charging profile, currently the most used in electric vehicles. We propose four scenarios that differs on the ability to deal with idle sockets and waiting spaces to show that, through numerical analysis, that the variation of the number of servers contributes to a better utilization of the available power. Finally, the models are applied to the city of Rio de Janeiro yielding progressively better results related to the charging station planning, specially in terms of better use of the physical space and the power capacity of the charging station, considering the available power and percentage used power.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 A Tecnologia das Baterias</b>	<b>5</b>
2.1 Rendimento, aproveitamento e desempenho . . . . .	5
2.1.1 Terminologia para caracterização das baterias . . . . .	7
2.2 Procedimentos de carga . . . . .	9
2.2.1 Fases de carga . . . . .	9
2.2.2 Carga rápida . . . . .	11
<b>3 Modelos Probabilísticos</b>	<b>13</b>
3.1 Cadeia de Markov de estado discreto e Tempo Contínuo . . . . .	13
3.2 Cadeia de Markov de nascimento-e-morte . . . . .	15
<b>4 Modelo de Base da Estação de Carga</b>	<b>18</b>
4.1 Modelo da estação de carga com taxa de serviço simples . . . . .	18
4.2 Estratégia de modelagem . . . . .	19
4.2.1 Variáveis de entrada . . . . .	22
4.3 Resultados teóricos . . . . .	22
4.3.1 Número esperado de veículos no sistema . . . . .	23
4.3.2 Probabilidade de bloqueio . . . . .	24
4.3.3 Tempo esperado de serviço . . . . .	25
4.3.4 Tempo médio de espera na fila . . . . .	26
<b>5 Modelo de Reuso da Capacidade da Estação de Carga</b>	<b>27</b>
5.1 Modelo de serviço . . . . .	28
5.1.1 Parâmetros para análise dos cenários de carga . . . . .	30
5.1.2 Modelo do cenário Básico . . . . .	32
5.1.3 Resultados do cenário Básico . . . . .	36

5.1.4	Modelo do cenário Serviço Imediato . . . . .	41
5.1.5	Resultados do cenário Serviço Imediato . . . . .	46
5.1.6	Modelo do cenário Conectado em Espera . . . . .	51
5.1.7	Resultados do cenário Conectado em Espera . . . . .	56
5.1.8	Modelo do cenário Vaga Externa . . . . .	64
5.1.9	Resultados do cenário Vaga Externa . . . . .	68
5.1.10	Análise dos cenários Serviço Imediato e Conectado em Espera variando a potência disponível na estação . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Aplicação ao Caso da Cidade do Rio de Janeiro</b>	<b>82</b>
6.1	Resultados esperados na cidade do Rio de Janeiro . . . . .	83
<b>7</b>	<b>Trabalhos Relacionados</b>	<b>88</b>
7.1	Projeto de estações de recarga . . . . .	88
7.2	Sistemas de comunicação com veículos elétricos . . . . .	90
7.3	Impacto na rede elétrica . . . . .	93
<b>8</b>	<b>Conclusão e Trabalhos Futuros</b>	<b>96</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>100</b>

# Lista de Figuras

2.1	Célula, Módulo e <i>Pack</i> (Fonte: Nissan Motor Co. Ltd.) . . . . .	7
2.2	Perfil de carga da bateria de íons de lítio. . . . .	10
2.3	Equipamento de carga elétrica. . . . .	11
3.1	Fila M/M/m. . . . .	16
3.2	Processo de nascimento-e-morte. . . . .	16
4.1	Processo de nascimento-e-morte. . . . .	19
4.2	Modelo do posto de carga elétrica. . . . .	20
4.3	Número médio de veículos elétricos no sistema. . . . .	23
4.4	Probabilidade de bloqueio do sistema. . . . .	24
4.5	Tempo médio de serviço. . . . .	25
4.6	Tempo médio na fila de espera. . . . .	26
5.1	Cenário Básico de estações de carga – Modelo sem ESCVEs reservas.	32
5.2	Modelo da cadeia de Markov para o cenário Básico. . . . .	33
5.3	Veículos em carga no cenário Básico. . . . .	37
5.4	Probabilidade de bloqueio total no cenário Básico. . . . .	37
5.5	Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço no cenário Básico.	38
5.6	Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia no cenário Básico. . . . .	39
5.7	Probabilidade de serviço imediato no cenário Básico. . . . .	40
5.8	Consumo de potência média esperada no cenário Básico. . . . .	40
5.9	Porcentagem de potência usada esperada no cenário Básico. . . . .	41
5.10	Cenário Serviço Imediato de estações de carga – só recebe usuários quando há energia disponível. . . . .	42
5.11	Modelo da cadeia de Markov para o cenário Serviço Imediato. . . . .	44
5.12	Veículos em carga no cenário Serviço Imediato. . . . .	47
5.13	Probabilidade de bloqueio total no cenário Serviço Imediato. . . . .	47
5.14	Probabilidade de bloqueio devido a falta de energia no cenário Serviço Imediato. . . . .	48

5.15	Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia no cenário Serviço Imediato. . . . .	49
5.16	Probabilidade de serviço imediato no cenário Serviço Imediato. . . . .	50
5.17	Consumo de Potência média no cenário Serviço Imediato . . . . .	50
5.18	Porcentagem de potência usada no cenário Serviço Imediato. . . . .	51
5.19	Cenário Conectado em Espera – O ESCVE que se encontra com símbolo de proibido pode ser usado pelo veículo como vaga de espera. . . . .	52
5.20	Modelo da cadeia de Markov para o cenário Conectado em Espera. . . . .	54
5.21	Número esperado de veículos no cenário Conectado em Espera. . . . .	57
5.22	Número esperado de veículos conectados em espera no cenário Conectado em Espera. . . . .	58
5.23	Probabilidade de bloqueio total no cenário Conectado em Espera. . . . .	58
5.24	Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia no cenário Conectado em Espera. . . . .	59
5.25	Probabilidade de serviço imediato no cenário Conectado em Espera. . . . .	60
5.26	Probabilidade de admissão imediata no cenário Conectado em Espera. . . . .	60
5.27	Consumo de potência média no cenário Conectado em Espera. . . . .	61
5.28	Porcentagem de potência usada no cenário Conectado em Espera. . . . .	63
5.29	Tempo de espera conectado no cenário Conectado em Espera. . . . .	64
5.30	Cenário Vaga Externa – As vagas físicas permitem aos veículos que optam por entrar na estação de carga, esperar o momento oportuno de se conectar ao ESCVE. . . . .	65
5.31	Veículos no cenário Vaga Externa. . . . .	69
5.32	Veículos em espera no cenário Vaga Externa. . . . .	70
5.33	Veículos em espera na vaga no cenário Vaga Externa. . . . .	70
5.34	Probabilidade de bloqueio total no cenário Vaga Externa. . . . .	71
5.35	Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia no cenário Vaga Externa. . . . .	72
5.36	Probabilidade de serviço imediato no cenário Vaga Externa. . . . .	72
5.37	Probabilidade de admissão imediata no cenário Vaga Externa. . . . .	73
5.38	Consumo de potência média no cenário Vaga Externa. . . . .	74
5.39	Porcentagem de potência usada no cenário Vaga Externa. . . . .	75
5.40	Porcentagem de Potência Usada no Vaga Externa. . . . .	76
5.41	Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço. . . . .	78
5.42	Probabilidade de bloqueio devido a falta de energia. . . . .	79
5.43	Probabilidade de serviço imediato. . . . .	80
5.44	Número esperado de veículos em espera. . . . .	81
6.1	Número de veículos nos cenários propostos para $\lambda = 20$ veículos/hora. . . . .	83

6.2	Probabilidade de bloqueio nos cenários analisados para $\lambda = 20$ veículos/hora. . . . .	84
6.3	Probabilidade de serviço imediato nos cenários analisados para $\lambda = 20$ veículos/hora. . . . .	85
6.4	Tempo esperado na fila de espera nos cenários analisados para $\lambda = 20$ veículos/hora. . . . .	85
6.5	Potência esperada demandada nos cenários analisados para $\lambda = 20$ veículos/hora. . . . .	86
6.6	Porcentagem esperada de potência usada nos cenários analisados para $\lambda = 20$ veículos/hora. . . . .	86

# Lista de Tabelas

2.1	Baterias usadas pelas principais empresas de veículos elétricos. Adaptado de [1]. . . . .	6
4.1	Notações utilizadas no problema. . . . .	22
5.1	Parâmetros usados na avaliação. . . . .	31
5.2	Potência consumida esperada no cenário Básico (kW). . . . .	41
5.3	Probabilidade de consumo de máxima potência no cenário Básico. . . . .	41
5.4	Potência consumida no cenário Serviço Imediato (kW). . . . .	51
5.5	Probabilidade de consumo de máxima potência no cenário Serviço Imediato. . . . .	51
5.6	Porcentagem da potência usada nos cenários Básico e Serviço Imediato. . . . .	52
5.7	Potência consumida no cenário Conectado em Espera (kW). . . . .	62
5.8	Probabilidade de consumo de máxima potência no cenário Conectado em Espera. . . . .	62
5.9	Porcentagem da potência usada nos cenários Básico, Serviço Imediato e Conectado em Espera. . . . .	63
5.10	Tempo de espera em minutos no cenário Conectado em Espera. . . . .	64
5.11	Notações para o cenário Vaga Externa. . . . .	65
5.12	Transições de Estado da cadeia de Markov do estado $(n_{cc}, n_{cv}, n_e)$ e atualização do estado $(n_p, n_v, P)$ . . . . .	66
5.13	Potência consumida no cenário Vaga Externa (kW). . . . .	74
5.14	Probabilidade de consumo de máxima potência no cenário Vaga Externa. . . . .	75
5.15	Porcentagem da potência usada nos cenários Básico, Serviço Imediato, Conectado em espera e Vaga Externa. . . . .	75
5.16	Tempo de espera em minutos no cenário Vaga Externa. . . . .	76

# Capítulo 1

## Introdução

Hoje em dia, as principais fontes de emissão de gases de efeito estufa no mundo são os setores de transportes e de energia elétrica [1]. Portanto, existe um grande incentivo para adoção de fontes de energia alternativas que resultem em redução da dependência do petróleo a fim de promover a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>, gerando sustentabilidade econômica e ambiental. Além disso, no setor de transportes, a possibilidade de substituição dos veículos com motor a combustão por veículos elétricos à bateria (BEV – *Battery Electric Vehicle*) ou híbridos (PHEV – *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) é uma solução atraente, considerando os altos preços dos combustíveis fósseis no mercado. Apesar dos veículos híbridos possuírem motor a combustão combinado à propulsão elétrica, eles reduzem em até 32% a emissão de gases de efeito estufa [3]. As vantagens a serem oferecidas em um futuro próximo, pela crescente e contínua substituição de motores a combustão por motores elétricos, será certamente constatada no alívio da crise global de energia, na utilização crescente de fontes de energia renováveis e no surgimento de uma relação mais harmoniosa entre as pessoas e o meio ambiente. Tais benefícios começam a justificar a preocupação da indústria e da academia que voltam suas atenções para essa promissora alternativa para o transporte urbano.

No entanto, a substituição crescente dos veículos a combustão por veículos elétricos que são totalmente dependentes de baterias recarregáveis causará carga adicional significativa na rede elétrica. A rede de distribuição de energia atual pode se fragilizar ao suportar a carga adicional imposta pelos procedimentos de carga de veículos elétricos, principalmente nos horários de pico de consumo. Para se ter a ordem de grandeza, a energia gasta para carregar um veículo elétrico se assemelha com a média diária de consumo de energia de uma residência com quatro pessoas. Pode-se observar em [4] que para abastecer uma bateria de 36 kWh em 20 minutos, a estação de carga deve entregar 100 kW. O modo de carga rápida drena dos alimentadores de distribuição quantidade de fluxo de energia elétrica significativa, podendo ocasionar instabilidades no sistema, quedas de tensão e interrupções, causando inclusive

o envelhecimento prematuro dos transformadores do sistema de distribuição [5, 6] e redução da capacidade da estação de carga e utilização de energia. Uma solução é deslocar a demanda mas, em muitos casos, não é possível deslocar a demanda por energia para os períodos de baixo consumo, como por exemplo durante a noite.

Para que o veículo elétrico se torne um sucesso, é necessário que os usuários de veículos elétricos possam contar com facilidades de acesso à infraestrutura de carga elétrica, que esta esteja disponível a maior parte do tempo e, além disso, que os receba dentro de certos padrões de qualidade de serviço [7]. A rede de energia elétrica é limitada à capacidade de geração de energia, atrelada aos recursos naturais energéticos disponíveis e fatores climáticos, e sobretudo à prevenção de sobrecarga nas linhas de transmissão. Considerando que hoje em dia as subestações de energia nos centros urbanos precisam ser dimensionadas de acordo com a alta simultaneidade de utilização, é necessário que ocorra uma coordenação no procedimento de recarga dos veículos movidos à bateria evitando assim o risco de apagões nas subestações locais. Idealmente, deve-se evitar altos gastos com aumento da infraestrutura com base apenas nos momentos de alta simultaneidade de demanda de energia [8].

Em se tratando de transportes elétricos e sua integração com o sistema atual de transportes, a atenção dada ao projeto de dimensionamento de estações ou postos de carga é muito importante para tornar as cidades inteligentes. Vale ressaltar que o espaço físico disponível em um posto de carga é uma grandeza que deve ser pensada com cuidado, pois o modelo temporal do serviço de carga, no atual momento, difere definitivamente modelo temporal do serviço de abastecimento de combustível (álcool, gasolina, diesel e GNV). Para um veículo obter autonomia de 500 km precisa completar o tanque, e o tempo gasto, se vazio, não ultrapassa, em média, 2 a 3 minutos para álcool, gasolina e diesel e 5 a 10 minutos para GNV. Assim o tempo de serviço, no pior caso, não será maior que 10 minutos. Hoje, a tecnologia de recarga rápida que é encontrada nos equipamentos de suprimento de carga garante que o tempo de recarga se dê em 30 minutos (vide Figura 2.3), portanto até quase 10 vezes superior ao tempo de abastecimento por combustíveis convencionais. Os veículos elétricos mais comuns no mercado apresentam uma autonomia em torno de 200 km [9]. Isso aumenta a probabilidade de formação de filas, comum também no abastecimento convencional, mas com um maior tempo de espera. Além da preocupação no aumento do espaço físico das instalações do posto, tal fato impacta a qualidade de serviço oferecida ao cliente.

Observa-se então que o êxito do projeto de Cidades Inteligentes depende, sob essa perspectiva, do planejamento físico e também da distribuição geográfica das estações de carga. O objetivo é que os usuários, ao trafegarem com seus veículos, tenham o respaldo de encontrar infraestrutura de carga disponível e com níveis de qualidade de serviço aceitáveis, de forma que esta esteja disponível e que evite a sobrecarga

da infraestrutura da rede de distribuição de energia elétrica. O modelo de estações de carga deve considerar o espaço físico disponível, o número de carregadores ou equipamentos de suprimento de carga de veículo elétrico (ESCVE), a quantidade de vagas de estacionamento no pátio da estação e sua disposição e a utilização da rede de energia elétrica com a demanda originada das estações de carga. Os modelos de Markov existentes na literatura [10–12] abordam severamente o problema e buscam soluções eficazes utilizando um sistema de armazenamento auxiliar (banco de baterias) para contornar os picos de consumo de energia, porém não consideram as 2 fases do perfil das baterias de íons de lítio. Essa tese foca no modelo de Markov que incorpora o perfil de carga das baterias de lítio e usa essa característica particular para inferir valores úteis no planejamento do espaço físico e previsão do aproveitamento de capacidade da estação apresentando 4 modelos em ordem crescente de complexidade.

Para contornar as limitações associadas ao processo de carga rápida, será proposto um modelo de Cadeia de Markov Contínua no Tempo (CMCT) que captura as características principais das estações de carga rápida e as utiliza para analisar as diferentes métricas de interesse no planejamento de tais estações. Os resultados numéricos retornam valores tais como: a indisponibilidade da estação de carga associada à probabilidade de bloqueio, o tempo de espera até o começo do processo de carga, o número de clientes que a estação absorve, o consumo de energia observado na estação e o percentual de capacidade utilizada. A particularidade do modelo proposto é que leva em consideração tanto o perfil de carga da bateria quanto o planejamento do espaço físico da estação. Assim, em resumo, podem-se enumerar as contribuições do presente trabalho:

- **Modelo analítico.** O modelo proposto explora o perfil de carga da bateria de íons de lítio. Com as simplificações necessárias, sugere-se um modelo de estação de carga mais detalhado, nesse aspecto, que os existentes na literatura. São explorados 4 cenários que diferem na capacidade de admissão de veículos e reuso da capacidade da estação [13].
- **Planejamento da estação.** Do ponto de vista do proprietário da estação, o modelo auxilia no planejamento das estações de carga rápida, considerando o uso racional de energia, na previsão do porte (tamanho) da estação e no tempo de espera imposto aos clientes. Com a previsão da média de chegada de veículos na região onde a estação será implantada, é possível estimar o número de carregadores a ser instalado e o consumo de potência da estação [15].
- **Suporte para perfis de carga de baterias.** O perfil de carga da bateria afeta o uso eficiente do espaço disponível e capacidade da estação, impactando

o tempo de espera dos clientes e a utilização da capacidade da estação. No presente trabalho essa característica é levada em conta e fornece um modelo flexível que pode ser adaptado para outros tipos de bateria, o que determina o impacto de diferentes perfis de carga que os novos veículos elétricos possam vir a apresentar em momentos futuros [14].

Esta tese está organizada da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta de forma simplificada a construção das baterias de veículos elétricos, as terminologias aplicadas às baterias de íons de lítio e seu perfil de carga, o Capítulo 3 relaciona os modelos probabilísticos aplicados aos cenários que serão analisados, o Capítulo 4 mostra o cenário baseado no processo simples de carga (1 fase), o Capítulo 5 analisa o comportamento dos 4 cenários de estações de carga, o Capítulo 6 mostra o estudo de caso da cidade do Rio de Janeiro, Capítulo 7 aborda os trabalhos relacionados e por fim, o Capítulo 8 conclui o trabalho.

# Capítulo 2

## A Tecnologia das Baterias

Apesar da adoção de veículos elétricos ter se tornado muito discutida nos dias atuais, a tecnologia de transportes elétricos não é um tema novo. A importância das baterias para esse tipo de transporte pode ser testemunhada ao longo da história. O primeiro veículo elétrico de que se tem notícia usava bateria recarregável de chumbo ácido no final do século XVIII, de acordo com Corrigan e Masias [16]. O início do século XIX foi marcado pela predominância dos veículos elétricos. Nessa época, a quantidade de veículos elétricos que circulavam pelos Estados Unidos era praticamente duas vezes maior que a dos carros movidos a combustão. Porém, os veículos elétricos desapareceram em função do elevado peso, curto alcance, longo tempo de recarga e baixa durabilidade das baterias, e foram substituídos pelos veículos a gasolina, que ganharam o mercado definitivamente por volta de 1920. Mas, a título de curiosidade, sabe-se que já na década de 70 o veículo lunar era movido por 2 baterias de zinco-prata de 36 Volts cada e permitia uma velocidade máxima de 13 km/h e uma autonomia de 92 km. Na superfície da Lua pesava 36 kg (210 kg na Terra), podendo suportar um peso de 480 kg [17, 18]. Atualmente, os dois tipos mais usados de baterias em veículos elétricos são as baterias de níquel-metal-hidreto (NiMH) e de íons de lítio (Li-ion). Devido à vantagem de apresentar alta densidade de energia, o emprego de baterias de íons de lítio tem crescido muito nos veículos elétricos, tanto híbridos quanto puramente elétricos [19]. A Tabela 2.1, extraída de [1], dá exemplos dos tipos de baterias usadas em automóveis atualmente em fabricação.

### 2.1 Rendimento, aproveitamento e desempenho

Este capítulo apresenta algumas características das baterias que são parâmetros relevantes para a tese. Considerando que o veículo encontra-se no plano sem inclinação, a bateria irá fornecer a energia necessária para acelerar o veículo e vencer a resistência ao rolamento. Quando a velocidade é atingida, a potência da bateria supre a energia necessária para superar a resistência ao rolamento e à força de ar-

Tabela 2.1: Baterias usadas pelas principais empresas de veículos elétricos. Adaptado de [1].

Empresa	País	Veículo	Bateria	Tipo
GM	EUA	Volt	Li-íon	Híbrido
		Saturn Vue Hybrid	NiMH	Híbrido
Ford	EUA	Escape, Fusion, MKZ HEV	NiMH	Híbrido
		Escape PHEV	Li-íon	Híbrido
Toyota	Japão	Prius	NiMH	Híbrido
Honda	Japão	Civic, Insight	NiMH	Híbrido
Hyundai	Coréia do Sul	Sonata	Li-íon	Híbrido
Chrysler	EUA	Chrysler 200C EV	Li-íon	Híbrido
BMW	Alemanha	X6	NiMH	Híbrido
		Mini E	Li-íon	Elétrico
BYD	China	E6	Li-íon	Elétrico
Daimler Benz	Alemanha	ML450, S400	NiMH	Híbrido
		Smart EV	Li-íon	Elétrico
Mitsubishi	Japão	iMiEV	Li-íon	Elétrico
Nissan	Japão	Altima	NiMH	Híbrido
		Leaf	Li-íon	Elétrico
Renault	França	Zoe	NiMH	Híbrido
		Fluence	Li-íon	Elétrico
Tesla	EUA	Roadster	Li-íon	Elétrico
Kia	Coréia do Sul	Soul	Li-íon	Elétrico
Think	Noruega	Think EV	Li-íon	Elétrico

raste aerodinâmica. Para acelerar um veículo típico de passeio de 0 a 96,6 km/h em 10 segundos é necessária uma potência de 61 kW. Para parar o veículo a essa velocidade, em 5 segundos, é necessária uma potência de 186 kW. É observado que a potência requerida para parar o veículo é 3 vezes maior do que aquela que ele precisa para atingir tal velocidade [1]. Logo, nos veículos elétricos é usado o processo de frenagem regenerativa, onde grande parte da energia gasta com a desaceleração é recondicionada (devolvida) à bateria. O consumo de energia para o tráfego urbano é, em média, 165 Wh/km. Nas estradas o consumo cai para 137 Wh/km. Perfis de condução mais agressivos nas estradas de alta velocidade chegam a consumir 250 Wh/km. Fazendo-se uma média ponderada, considerando a condução 45% do tempo na cidade, 45% na estrada e 10% nas estradas de alta velocidade, tipicamente, o consumo médio de energia de um veículo fica em torno de 160 Wh/km. Os combustíveis líquidos, como a gasolina por exemplo, proporcionam ao veículo um alcance de 480 a 640 km com o tanque completo [1]. A gasolina tem alta energia específica (13 kWh/kg) praticamente 100 vezes mais energia que as baterias de íons de lítio [20]. No entanto, a eficiência da propulsão elétrica (80%) é muito superior à propulsão dos motores a combustão interna (20%). O total de energia requerida para que um veículo a bateria possa ter o mesmo alcance que um veículo a gasolina é, aproximadamente, um quarto da energia de um veículo a gasolina.

### 2.1.1 Terminologia para caracterização das baterias

Vários termos são utilizados tecnicamente para caracterizar as baterias e aferir seu desempenho. Esses termos são explicados a seguir:

- *Célula, Módulo e Pack*: a célula é o componente básico (menor unidade) da bateria. É composto pelos eletrodos, os pólos, o separador e o eletrólito. O módulo é formado por células com uma associação específica. O *Pack* é composto por módulos e organizado em um compartimento que apresenta a eletrônica dedicada para permitir o gerenciamento de temperatura. Os veículos elétricos possuem vários *Packs* localizados em regiões estratégicas do veículo, principalmente embaixo do assoalho, como ilustrado na Figura 2.1.

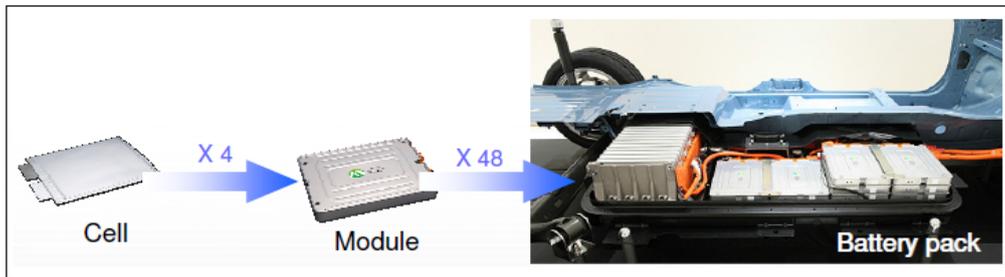


Figura 2.1: Célula, Módulo e *Pack* (Fonte: Nissan Motor Co. Ltd.)

- *Capacidade -  $C(Ah)$* : a capacidade indica o quanto pode ser drenado de corrente com a bateria completamente carregada sob condições nominais pré-estabelecidas pelo fabricante. O fator *C-rate* indica a capacidade da bateria no período de uma hora. Uma bateria com o parâmetro  $C = 2,5 Ah$  indica que esta bateria fornece 2,5 A durante o período de uma hora, ou se estiver completamente descarregada, é preciso uma hora para carregá-la com uma corrente de 2,5 A. Comumente é utilizada também a unidade de energia Wh para representar a capacidade da bateria ( $C_W$ ). Assim tem-se que a capacidade em Wh é o produto da capacidade  $C (Ah)$  vezes a tensão da bateria ( $V_{BAT}(V)$ ):

$$C_W = C \cdot V_{BAT}. \quad (2.1)$$

- *Energia específica -  $E_e(Wh/kg)$*  : é o parâmetro que indica o quanto de energia pode ser armazenado por unidade de massa (densidade gravimétrica). É expresso em Wh/kg. É um parâmetro que permite determinar o peso total da bateria para um alcance desejado do veículo. É expresso pela razão da capacidade ( $C_W(Wh)$ ) pela massa da bateria  $m_{BAT}(kg)$

$$E_e = \frac{C_W}{m_{BAT}}. \quad (2.2)$$

- *Densidade de Energia* -  $D_{en}(Wh/l)$ : este parâmetro é também conhecido como densidade volumétrica de energia e tem como unidade o Wh por litro (Wh/l). Este parâmetro é muito importante pois define o tamanho total da bateria.
- *Resistência interna* -  $R_{in}$ : é a resistência equivalente interna da bateria. Ela tem seu valor diferenciado na carga e na descarga e varia com as condições de operação.
- *Tensão de corte (Cut-off Voltage)* -  $V_{c-off}(V)$ : é a mínima tensão permitida pelo fabricante. É a tensão nos terminais quando a bateria está completamente descarregada.
- *Estado de Carga (State of Charge - SOC)*: o estado de carga é definido como a razão entre a capacidade restante ( $C_{res}(Wh)$ ) da bateria sobre a capacidade total ( $C_W(Wh)$ ). É um parâmetro que é afetado pelas condições de operação como corrente de carga e temperatura [21]. É expresso pela fórmula abaixo:

$$SOC = \frac{C_{res}}{C_W}. \quad (2.3)$$

Se a capacidade em Ah for usada e se conhecer o consumo da corrente  $i(t)$ , a variação na capacidade pode ser expressa como:

$$\Delta SOC = SOC(t) - SOC(t_0) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau. \quad (2.4)$$

$SOC$  é um parâmetro que está intimamente ligado ao gerenciamento do processo de carga da bateria. Aferições acuradas de  $SOC$  permitem garantir a vida útil e a operação segura.

- *Estado de Saúde (State of Health - SOH)*: é a razão que mede a máxima capacidade de carga atual em relação à máxima capacidade de carga quando a bateria era nova ( $C_{iW}(Wh)$ ).  $SOH$  é uma medida que afere o grau de degradação do desempenho da bateria e permite estimar o restante de vida útil.

$$SOH = \frac{C_W}{C_{iW}}. \quad (2.5)$$

- *Profundidade de Descarga (Depth of Discharge - DOD)*: é usado para definir o percentual da Capacidade Total que pode ser descarregada. Para ciclos de descarga profundos, as baterias podem ser descarregadas até 80%.

$$DOD = 1 - SOC. \quad (2.6)$$

- *Ciclos de Vida*: é o número de ciclos de carga e descarga que a bateria pode manipular em um específico *DOD* (normalmente 80%) antes de se observar uma degradação no desempenho. A vida útil de uma bateria é afetada pelas taxas de carga e descarga, *DOD* e outras condições como a temperatura. Quanto maior o *DOD* menor o ciclo de vida.
- *Sistema de Gerenciamento da Bateria*: é a combinação de sensores, controladores, *hardware*, *software* e algoritmos projetados para permitir a máxima duração de corrente de carga/descarga obtidos com subsídio nas informações de *SOC* e *SOH* do *pack* da bateria.
- *Sistema de Gerenciamento Térmico*: é projetado para proteger o *pack* de bateria do sobre-aquecimento, viabilizando a extensão da vida útil. Resfriamento por ar é implementado nas baterias de NiMH, enquanto as baterias de Li-íon requerem sistema mais sofisticado de líquidos refrigerantes na maioria das aplicações de veículos elétricos.

## 2.2 Procedimentos de carga

A vida útil, a segurança, a durabilidade e o desempenho das baterias estão associados à maneira como são carregadas e descarregadas. Hoje, o sistema de gerenciamento das baterias (*BMS - Battery Management System*), integrado ao veículo, se encarrega do controle ao processo de carga. No futuro é esperado que o controle seja também integrado no sistema de distribuição de energia.

### 2.2.1 Fases de carga

Nas baterias de veículos elétricos são empregados os seguintes procedimentos de carga:

1. *Tensão Constante* - este método consiste em aplicar uma tensão constante nos terminais da bateria e é caracterizado como método mais simples de recarga. A corrente de recarga é alta no início do processo e gradualmente decai a zero quando a bateria atinge o nível final de carga. É necessário uma potência elevada na fase inicial, o que restringe essa aplicação a infraestruturas mais robustas de carga, pouco comuns em áreas residenciais.
2. *Corrente Constante* - é aplicada uma tensão controlada nos terminais de forma que a corrente de carga se mantenha constante na bateria. O estado de carga aumenta linearmente em função do tempo para uma corrente constante de carga. O desafio deste procedimento é determinar o momento onde o estado

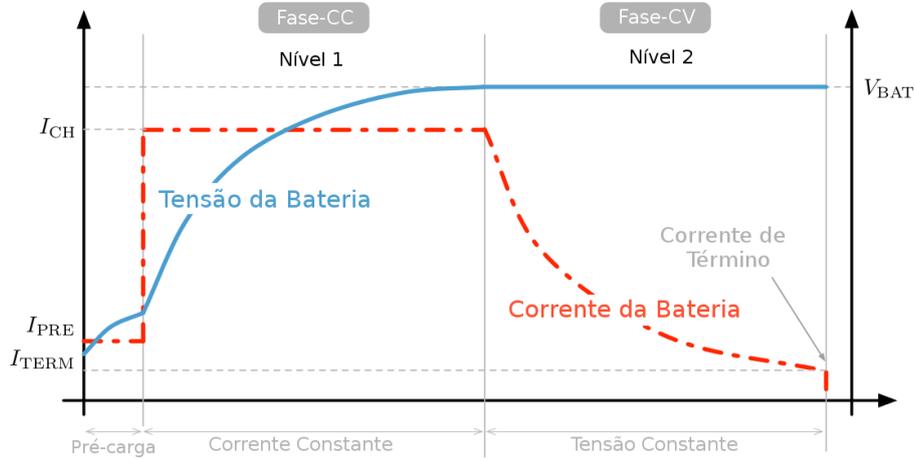


Figura 2.2: Perfil de carga da bateria de íons de lítio.

de carga atinge 100%, que é determinado pela aferição de alguns parâmetros como o aumento da temperatura ou gradiente de temperatura, o aumento da tensão, variação negativa de tensão ou o tempo de carga [28].

3. *Tensão Constante e Corrente Constante* - esse método é o mais usado nas baterias de íons de lítio. Consiste na combinação em série dos dois métodos anteriores. A primeira fase do método é a fase de pré-carga (fase p) que é efetuada se a bateria encontra-se totalmente descarregada. Quando a tensão atinge o valor nominal ( $V_{BAT}$ ), o processo muda para a fase de tensão constante. Esta fase é a que garante o condicionamento adequado da tensão em que a bateria opera, pois a corrente decai exponencialmente, o que explica a eliminação das quedas de tensão nas resistências internas da bateria, observada na fase de corrente constante, até a corrente atingir o valor da corrente de término  $I_{TERM} = 0.02 \times I_{CH}$ . A figura 2.2 ilustra o perfil de carga de uma bateria de íons de lítio.

De acordo com Hess *et al.* [9], o processo de carga pode ser realizado de três formas e em equipamentos distintos, dependendo de onde se encontre e qual o objetivo do usuário do veículo:

- *Carga lenta* – o veículo possui um carregador *on-board* que é conectado à tomada residencial (120 V/16 A/1.92 kW) e o tempo de carga costuma levar de 8 a 10 horas. Essa modalidade de carga é comum para quem chega em casa e carrega o carro durante a noite para o uso no dia seguinte.
- *Carga padrão* – também usa o carregador *on-board* conectado à tomada residencial (108-240 V/12-80 A/2.5-19.2 kW) e o tempo de carga diminui para 6 a 8 horas. Essa modalidade está mais relacionada aos lugares públicos, onde as

peças passam boa parte do tempo, como no trabalho, em compras nos centros comerciais, nos estacionamento de instituições públicas, dentre outros.

- *Carga rápida* – nessa condição há o equipamento de suprimento de carga de veículo elétrico (ESCVE) (Figura 2.3) que fornece uma alimentação DC (300 a 600V), onde não há um requisito mínimo de energia, mas o limite máximo de corrente é 400 A e 240 kW. O tempo de carga se reduz a 30 minutos. Para esse tipo de carga, o que se deseja é a aproximação da compatibilidade que temos hoje com o abastecimento nos postos de combustível líquido.



Figura 2.3: Equipamento de carga elétrica.

## 2.2.2 Carga rápida

Ultimamente a tecnologia de fabricação das baterias melhorou consideravelmente, mas as baterias ainda têm volume e peso elevados como principais obstáculos para permitir que um maior acúmulo de energia possibilite um maior alcance. O perfil de carga rápida das baterias de lítio pode ser dividido em 2 fases, conhecidas como fase-CC (Corrente Constante) e fase-CV (Tensão Constante), como mostrado na Figura 2.2. Embora existam propostas de procedimentos de otimização de carga rápida, sua implementação é bastante complexa e cara. Assim, o método de fases

CC/CV de carga rápida é o mais adotado [22, 23]. De acordo com [24, 25], em torno de 65% da carga total é armazenado na fase-CC, os outros 35% ocorrem na fase-CV. A fase-CC, aproximadamente, consome o dobro da potência da fase-CV. Assim, nesta tese, o perfil de carga específico das baterias de lítio será levado em conta na concepção de um modelo de estação de carga que aproveita as fases CC/CV para gerenciar a admissão de veículos na estação promovendo uma melhor utilização da rede de energia elétrica.

Além disso, neste trabalho são previstos futuros cenários consistentes com as estações de carga rápida hoje operacionais e serão definidos cinco cenários de estações de carga, detalhados nos próximos capítulos. Algumas suposições serão comuns para os cinco cenários. Dois aspectos do processo de carregamento formam uma base da análise.

O primeiro é relativo ao tempo decorrido e à potência necessária em cada fase para abastecer as baterias. São considerados apenas ESCVEs rápidos, que drenam mais energia da rede, mas levam menos tempo para carregar. Esse modo de carga é o único que facilita a mobilidade necessária para continuar a viagem em comparação com os veículos a combustão.

O segundo aspecto é devido ao perfil de carga específico de baterias de lítio que apresenta duas fases bem definidas, ilustradas na Figura 2.2. A pré-carga não é considerada porque é necessária apenas em uma condição extrema quando a bateria se encontra totalmente descarregada. Esta condição geralmente ocorre se há utilização pouco frequente. Quando o processo de carga se inicia na fase-CC e passa para a fase-CV, a tensão nominal nos terminais da bateria ( $V_{BAT}$ ) é alcançada e a corrente decai exponencialmente (Figura 2.2). Esta fase é necessária para eliminar quedas de tensão em elementos resistivos.

Será tomada como exemplo neste trabalho uma bateria de 24 kWh. É, por exemplo, usada no modelo Nissan Leaf, que é um veículo 100% elétrico e representa o tamanho das baterias, em média, da maioria dos veículos elétricos hoje no mercado. O procedimento de carga rápida leva, em média, meia hora. Por razões de segurança, quando a bateria atinge 80% da sua capacidade, o processo de carga rápida é interrompido e a energia armazenada gira em torno de 19 kWh que garante uma autonomia de 150 km. Será adotada uma aproximação no modelo que aloca uma potência constante de 51,2 kW na fase-CC (em um período de 15 minutos) e 25,6 kW para os 15 minutos restantes, na fase-CV. Assim, a taxa de serviço no processo de carga é dividida em duas taxas de serviços parciais, uma para a fase-CC e outra para a fase-CV. É preciso salientar que a hipótese do consumo da fase-CC ser o dobro é uma aproximação e é usada para se construir o modelo de Markov do posto de recarga.

# Capítulo 3

## Modelos Probabilísticos

Modelos probabilísticos são úteis para caracterizar o comportamento de sistemas cujo estado futuro não é previsível de forma determinística. Assim, descrições matemáticas são empregadas para caracterizar as regularidades estatísticas de determinado fenômeno. A construção de um modelo idealizado do mundo real permite que a coleção de todos os eventos e suas respectivas probabilidades sejam organizadas para a dedução de padrões de futuros eventos. Como um modelo é uma abstração do mundo real, as previsões (resultados) apoiadas nesse modelo precisam ser validadas com algumas medidas coletadas, mesmo que aproximadas, do mundo real. Nesse capítulo serão abordados processos de Markov de estado discreto e tempo contínuo e processos de nascimento-e-morte que serão usados como ferramenta de modelagem para a obtenção de resultados úteis, tanto no projeto de espaço físico das novas estações de carga de veículos elétricos, quanto na previsão da demanda que irá afetar a rede de energia elétrica.

### 3.1 Cadeia de Markov de estado discreto e Tempo Contínuo

Um processo estocástico de estado discreto e tempo contínuo  $\{X(t)|t \geq 0\}$  é chamado de cadeia de Markov se para  $t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < t$ , com  $t$  e  $t_r \geq 0$  ( $r = 0, 1, \dots, n$ ), sua *pmf* (*probability mass function*) condicional satisfaz a relação [26]:

$$P(X(t) = x|X(t_k) = x_k, X(t_{k-1}) = x_{k-1}, \dots, X(t_0) = x_0) = P(X(t) = x|X(t_k) = x_k). \quad (3.1)$$

Assim, o comportamento do processo é caracterizado pelo vetor de probabilidade do estado inicial da CMTC dado pela *pmf* de  $X(t_0)$ ,  $P(X(t_0) = s)$ ,  $s = 0, 1, 2, \dots$  e

as transições de probabilidades:

$$p_{ij}(v, t) = P(X(t) = j | X(v) = i), \quad (3.2)$$

para  $0 \leq v \leq t$  e  $i, j = 0, 1, 2, \dots$ , onde são definidos:

$$p_{ij}(t, t) = \begin{cases} 1, & \text{se } i = j, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.3)$$

A cadeia de Markov  $\{X(t) | t \geq 0\}$  é dita ser homogênea no tempo (ou apresentar probabilidade de estado estacionário), se  $p_{ij}(v, t)$  depende só da diferença  $(t - v)$ . Assim, é abreviada a notação para a probabilidade de transição:

$$\sum_{j \in \Omega} p_{ij}(v, t) = 1, \quad \forall i \text{ e } 0 \leq v \leq t. \quad (3.4)$$

Onde  $\Omega$  representa o espaço de estados que as variáveis  $(i, j)$  podem assumir. Um estado  $j$  é dito alcançável de um estado  $i$  para  $t \geq 0$  se  $p_{ij}(t) > 0$ , e a Cadeia de Markov Contínua no Tempo é dita irredutível se todo estado é alcançável de qualquer outro estado. Assim o limite abaixo irá sempre existir e será independente do estado inicial  $i$ :

$$\pi_j(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} p_{ij}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \pi_j(t), \quad i, j \in \Omega \quad \text{e} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d\pi_j(t)}{dt} = 0. \quad (3.5)$$

A probabilidade de  $X(t)$  estar em algum estado após um longo intervalo de tempo (estado estacionário) será:

$$\pi_j(t) = P(X(t) = j), \quad j = 0, 1, 2, \dots \text{ e } t \geq 0. \quad (3.6)$$

E fica claro que a soma das probabilidades dos estados estacionários é igual a 1:

$$\sum_{j \in \Omega} \pi_j = 1 \quad (3.7)$$

Uma vez que as probabilidades  $\pi_j(t)$  e  $\pi_j$  foram encontradas, medidas de interesse podem ser calculadas como médias ponderadas dessas quantidades. Assumindo um peso ou uma taxa de recompensa  $r_j$  associada ao estado  $j$  em uma CMTC no tempo  $t$ , o valor esperado de recompensa no tempo  $t$  pode ser calculado como:

$$E[R(t)] = \sum_{j \in \Omega} r_j \pi_j(t) \quad (3.8)$$

Para uma CMTC irredutível, o valor esperado da recompensa no estado estaci-

onário é:

$$E[R] = \lim_{t \rightarrow \infty} E[R(t)] = \sum_{j \in \Omega} r_j \pi_j \quad (3.9)$$

Essa propriedade permite que o termo cunhado como recompensa possa ser interpretado como uma grandeza relacionada ao respectivo estado, como por exemplo, o lucro que é obtido quando observamos determinados estados na cadeia de Markov que modela o sistema financeiro, ou os prejuízos associados àquele estado, ou ainda quanto é gasto ou poupado de energia em certos estados da cadeia de Markov que representam o estado da rede elétrica, e assim por diante.

## 3.2 Cadeia de Markov de nascimento-e-morte

Uma cadeia de Markov contínua no tempo  $X(t)|t \geq 0$  com o espaço de estados  $0, 1, 2, \dots$  é conhecida como um processo de nascimento-e-morte se existem parâmetros  $\lambda_i (i = 0, 1, \dots)$ , relacionado à taxa de nascimento que ocorre no estado  $i$ , e  $\mu_i (i = 0, 1, \dots)$ , conhecido como taxa de morte que simboliza a taxa em que ocorre uma morte no estado  $i$ . Essas taxas dependem somente do estado  $i$  e são independentes do tempo. As transições são permitidas só para o estado vizinho e, em determinado estado, nascimentos ou mortes são mutualmente independentemente. Para contextualizar a modelagem em cadeia de Markov de nascimento-e-morte será usado o modelo de filas de espera. Para modelar o caso de uma fila infinita M/M/m, com  $m$  servidores, onde a taxa de serviço  $\mu$  obedece a uma distribuição exponencial e a taxa de chegada  $\lambda$  obedece também a uma distribuição exponencial como mostra a Figura 3.1, tem-se:

$$\mu_k = \begin{cases} \lambda_k = \lambda, & k = 0, 1, 2, \dots, \\ k\mu, & \text{se } 0 < k < m, \\ m\mu, & \text{se } k \geq m. \end{cases} \quad (3.10)$$

O modelo em Cadeia de Markov Contínua no Tempo para essa fila está representada na Figura 3.2. Esse processo de Markov é conhecido como processo de nascimento-e-morte. É uma cadeia homogênea e com o espaço de estados  $0, 1, 2, \dots$ , onde a transição entre estados só é possível para um estado vizinho.

Para qualquer  $t \geq 0$ , em um dado instante o processo deve estar em algum estado. No estado estacionário, o vetor de probabilidades  $\pi = [\pi_0, \pi_1, \pi_2, \dots]$  pode ser representado sob a forma de um vetor-matriz  $\pi \mathbf{Q} = 0$ , em que  $\mathbf{Q}$  é conhecida como matriz Geradora Infinitesimal ou matriz de Taxa de Transições. A matriz

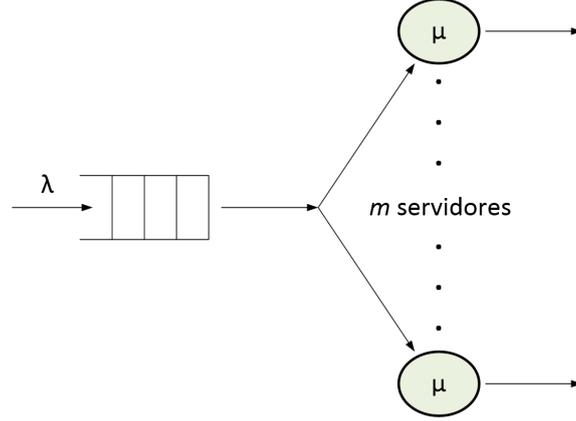


Figura 3.1: Fila M/M/m.

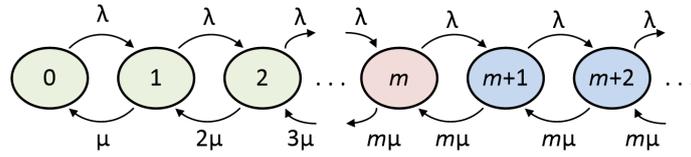


Figura 3.2: Processo de nascimento-e-morte.

$\mathbf{Q}$ , em regime permanente, mimetiza a matriz de transição de probabilidades do processo discreto, mas observando um detalhe: não há a probabilidade do processo permanecer em um mesmo estado, visto que o tempo de permanência no estado é uma variável aleatória de natureza exponencial, e decresce a uma taxa que é igual à soma das taxas de transição para um estado vizinho, que pode ser um nascimento ou uma morte, ou seja,  $-(\lambda_i + k\mu_i)$ . Isso é que o caracteriza a matriz de taxa de transição de probabilidades do processo contínuo no tempo. Assim, se  $\lambda_i (i = 0, 1, \dots)$  e  $\mu_i (i = 0, 1, \dots)$ , pertencentes ao espaço de estados, são definidos, as taxas de transição são dadas por:

$$q_{i,i+1} = \lambda_i, q_{i,i-1} = \mu_i, q_i = -(\lambda_i + \mu_i), q_{ij} = 0 \text{ para } |i - j| > 1. \quad (3.11)$$

Com base nesses valores, pode-se construir a matriz de taxa de transições  $\mathbf{Q}$  para um cenário onde  $m = 3$  servidores e  $n = 2$  vagas de espera (sistema M/M/m/n), tem-se que a matriz de taxa de transições é dada por:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu & -(\lambda + \mu) & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu & -(\lambda + 2\mu) & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3\mu & -(\lambda + 3\mu) & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3\mu & -(\lambda + 3\mu) & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3\mu & -3\mu \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

Pode-se notar que a soma dos elementos na mesma linha da matriz é igual a zero, ou seja,  $\sum_j q_{ij} = 0$ . Para determinar uma solução única diferente de zero, é

necessário utilizar a condição  $\pi\mathbf{Q} = 0$  em conjunto com  $\sum_{j \in \Omega} \pi_j(t) = 1$ , onde  $\Omega$  é o espaço de estados que o sistema pode assumir. Quando a solução do sistema linear, construído por essas condições, apresentar probabilidades-limite positivas  $\pi_j$ , a cadeia de Markov é conhecida como não-nula recorrente ou recorrente positiva, e estas são chamadas de probabilidades de estado estacionário. Assim, a solução do sistema de equações dado por  $\pi\mathbf{Q} = 0$  e  $\sum_j \pi_j = 1$  irá resultar nas probabilidades-limite, que é o comportamento assintótico quando  $t \rightarrow \infty$ . Esse procedimento de cálculo será usado na obtenção das probabilidades-limite no modelo adotado nos capítulos seguintes.

# Capítulo 4

## Modelo de Base da Estação de Carga

No capítulo anterior foram apresentados os conceitos fundamentais de cadeia de Markov de tempo contínuo e de nascimento-e-morte para modelagem de uma fila  $M/M/m$ . Nesse capítulo aplica-se um modelo de uma fila finita  $M/M/m/n$  às estações de carga de veículo elétrico. Mediante a variação de alguns parâmetros de entrada, obtém-se alguns resultados úteis no planejamento do projeto do espaço físico e previsão de demanda.

### 4.1 Modelo da estação de carga com taxa de serviço simples

O cenário de uma estação de carga de veículo elétrico (Figura 4.2) é um caso particular de uma fila  $M/M/m/n$ , onde a taxa de chegada de veículos obedece a uma distribuição de Poisson (exponencial, portanto), o serviço também apresenta distribuição exponencial [27], o sistema apresenta  $m$  servidores (os equipamentos de suprimento de carga para veículo elétrico (ESCVE)) e  $n$  vagas de espera na fila. Também pode ser considerado como um caso especial do processo de nascimento-e-morte já ilustrado, mas com um espaço de estados finito  $0, 1, \dots, m + n$ , com fila de espera finita  $n$ , com taxas de nascimento constantes  $\lambda_i = \lambda$  e taxas de morte constantes  $\mu_i = \mu$ , como mostra a Figura 4.1. Logo, a matriz de taxa de transição  $\mathbf{Q}$ , com  $(m + n)$  linhas por  $(m + n)$  colunas, no caso do modelo em questão, é dada

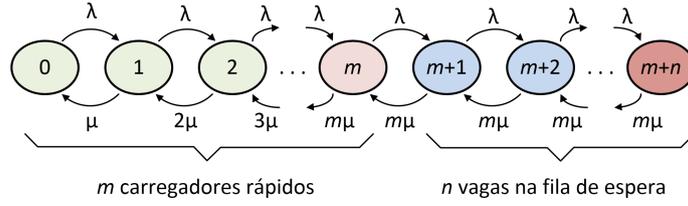


Figura 4.1: Processo de nascimento-e-morte.

por:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix}
 -\lambda & \lambda & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\
 \mu & -(\lambda + \mu) & \lambda & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 2\mu & -(\lambda + 2\mu) & \lambda & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & (m-1)\mu & -(\lambda + (m-1)\mu) & \lambda & \cdots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & m\mu & -(\lambda + m\mu) & \lambda & \cdots & 0 & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & m\mu & -(\lambda + m\mu) & \lambda \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & m\mu & -m\mu
 \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

Em um problema de modelagem de estação de carga de veículo elétrico, por vezes, a preocupação não consiste apenas na manipulação das diversas variáveis aleatórias, mas também como essas variáveis, que são funções do tempo, se relacionam. Por exemplo, se a estação de carga disponibilizar lugares na fila de espera, o tempo médio de espera na fila é uma quantidade de interesse. Outro valor de interesse, o número esperado de veículos elétricos  $E[N(t)]$  presentes no sistema no instante  $t$  (veículos em carga e, possivelmente os que esperam), deixa claro que é necessário especificar no modelo, o procedimento que retorne essa quantidade, caso alguns parâmetros variem. Esses parâmetros são o número de equipamentos de suprimento de carga de veículo elétrico (ESCVE) disponíveis e o número de vagas na fila de espera. O tempo médio de carga que se traduz no tempo médio de serviço, é outra variável aleatória de interesse, e assim por diante. Nessa tese, tais variáveis aleatórias, funções do tempo, são consideradas como processos estocásticos.

## 4.2 Estratégia de modelagem

Uma Cadeia de Markov de Tempo Contínuo (CMTC) será utilizada para se obter o comportamento de uma estação de carga. O objetivo é observar como a taxa de chegada dos veículos elétricos, o número de equipamentos de carga e o número de lugares na fila de espera influenciam as seguintes medidas de interesse: (i) o tempo médio de espera na fila, (ii) o número médio de clientes no sistema, (iii) o tempo médio de serviço e (iv) a probabilidade de bloqueio. Este último valor revela a indisponibilidade da estação de carga em receber mais veículos, que pode

representar prejuízo para clientes que têm urgência para abastecer e fornecedores do serviço que perdem possíveis clientes.

Para se compreender como o modelo de estação de carga funciona, supõe-se, em uma primeira instância, que a estação de carga está vazia, de modo que o estado do sistema é 0 (zero) veículos no sistema. Deste modo, quando todos os terminais de carga estão inativos, o primeiro veículo que chega conecta seu cabo de carga no primeiro terminal, e o estado do processo muda para 1, ou seja 1 (um) veículo no sistema. O processo de carga começa para o primeiro veículo. Dado que o primeiro veículo ainda está em carga, ao chegar o segundo veículo e ao se conectar à segunda tomada, o estado do processo muda para 2 (dois) veículos no sistema. Por outro lado, se ninguém mais chegar até o momento, aquele que completar a carga da sua bateria primeiro, deixa o sistema e o estado do processo muda para o estado 1. Caso contrário, uma nova chegada de veículo faz o processo saltar para o estado 3, e assim por diante. Repare que os saltos são permitidos apenas para um estado vizinho. Se todos os ESCVEs estão ocupados, o primeiro lugar disponível na fila de espera irá ser ocupado e, logo que vagar uma tomada de carga, esta receberá o primeiro da fila de espera (Figura 4.1). Uma vez que a fila (única) de espera lotou, o sistema atingiu seu estado de bloqueio e qualquer veículo que chegue ao sistema será redirecionado à próxima estação de carga.

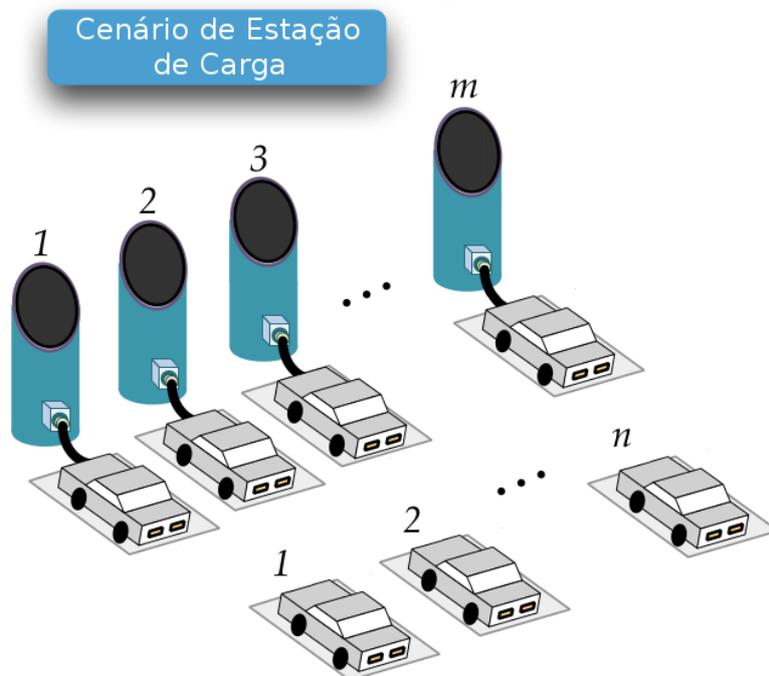


Figura 4.2: Modelo do posto de carga elétrica.

Um modelo de Cadeia de Markov de Tempo Contínuo é uma ferramenta adequada para estudar o comportamento de uma estação de carga. Considerando-se

que as chegadas de veículos nas estações de carga obedecem a um processo de Poisson onde os tempos entre chegadas são independentes, idêntica e exponencialmente distribuídos (i.i.d.), o número de chegadas ao longo de um determinado intervalo de tempo é uma distribuição de Poisson [10, 12, 27]. Quando um processo está em um estado  $k > 0$  as únicas transições possíveis são para os estados  $k - 1$  ou  $k + 1$ . Uma vez que a taxa de chegada de veículos é conhecida, assume-se que os veículos chegam ao sistema com uma taxa de chegada  $\lambda$ .

A partir do sistema formado por  $\pi_{\mathbf{Q}} = 0$  e  $\sum_j \pi_j = 1$ , é possível resolvê-lo e responder algumas questões importantes, de interesse tanto do cliente quanto do fornecedor do serviço, relacionadas às seguintes variáveis de interesse:

**Número esperado de clientes no sistema ( $E[N]$ )** - essa variável é de grande interesse do fornecedor do serviço. Quanto mais clientes estiverem no posto, mais lucrativo será o retorno. Do ponto de vista do usuário do serviço, quando o posto está muito cheio provoca insatisfação, pois gera a impressão que o tempo de espera será alto. Assim tem-se:

$$E[N] = \sum_{i=1}^N i \cdot \pi_i, \quad (4.2)$$

onde  $i$  é o número de veículos no estado  $i$  e  $\pi_i$  é a probabilidade do sistema se encontrar no estado  $i$ .

**Probabilidade de bloqueio ( $p_b$ )** - essa variável mede a indisponibilidade do sistema que se traduz na probabilidade de estar no último estado. Qualquer veículo que chegue ao posto de carga e o estado seja o último, terá que se dirigir ao posto mais próximo, pois não há tomada disponível nem lugar na fila. Assim, a probabilidade de bloqueio é:

$$p_b = \pi_N. \quad (4.3)$$

**Tempo esperado de serviço ( $E[T_s]$ )** - uma vez que a taxa de chegada de veículos é conhecida, assim como a probabilidade de permanência em cada estado e a probabilidade do veículo não ser aceito, de acordo com o Teorema de Little, tem-se:

$$E[N] = \lambda(1 - \pi_N)E[T_s], \quad (4.4)$$

e assim:

$$E[T_s] = \frac{E[N]}{\lambda(1 - \pi_N)}. \quad (4.5)$$

**Tempo esperado de aguardo na fila ( $E[T_e]$ )** - esse tempo mede o quanto um cliente espera na fila ao chegar em algum estado onde já não exista mais ESCVEs disponíveis mas haja vaga na fila de espera até ser atendido. Assim, o tempo médio

de fila ( $E[T_e]$ ) é expresso por:

$$E[T_e] = \frac{E[N_f]}{\lambda(1 - \pi_N)}. \quad (4.6)$$

### 4.2.1 Variáveis de entrada

As variáveis do problema são apresentadas na Tabela 4.1. Tomando como base que a recarga rápida de um veículo elétrico leva em média 30 minutos, o tempo de serviço  $\mu$  pode ser definido como 2 veículos/hora. As taxas de chegadas dos veículos ( $\lambda$ ) nos gráficos que seguem na próxima seção variam de 1 a 10 veículos/hora. O número de servidores (ESCVEs) varia de 1 a 6, enquadrando estações de pequeno porte até estações de maior porte que são observadas hoje nas cidades. São considerados casos em sistemas com 3 até 6 vagas de espera. Assim, ao variar a taxa de chegada, o número de vagas de espera e o número de servidores, podemos ter um panorama do número de veículos que o sistema comporta ( $E[N]$ ), da indisponibilidade do sistema ( $p_b$ ), do tempo de serviço ( $E[T_s]$ ) e do tempo de espera na fila ( $E[T_f]$ ).

Tabela 4.1: Notações utilizadas no problema.

Notação	Descrição	Valores Utilizados
$\lambda$	Taxa de chegada de veículos (veículos/hora)	1 a 10
$\mu$	Taxa de serviço (veículos/hora)	2
$m$	Número de ESCVE ( <i>unidades</i> )	1 a 6
$n$	Número de vagas de espera ( <i>unidades</i> )	3 a 6

## 4.3 Resultados teóricos

Os seguintes gráficos apresentados nessa seção, obtidos como o auxílio do Matlab 2013, mostram como se comportam as quantidades de interesse, acima apresentadas, de acordo com as variáveis de entrada do problema, como: a taxa de chegada de veículos ( $\lambda$ ), o número de servidores ou equipamentos de carga ( $m$ ) e o número de vagas na fila de espera ( $n$ ). Estas afetam de forma direta a quantidade de veículos no sistema, que é importante em alguns quesitos, como no planejamento do espaço físico do posto de carga, na previsão de quanto será o consumo de energia e principalmente na quantidade de energia demandada da subestação que abastece a região onde o posto se situa.

### 4.3.1 Número esperado de veículos no sistema

A quantidade de veículos, de certa forma, mede também o aspecto lucrativo do estabelecimento de carga. É interessante notar que há no entanto dois aspectos em relação à quantidade de veículos no sistema. Uma maior quantidade de veículos no sistema pode ser obtida com um número maior de ESCVEs e poucas vagas na fila de espera. Com um maior número de ESCVEs, a vazão do sistema é também maior. Um grande número de veículos nessa configuração, indica uma taxa de chegada de veículos alta, mas a quantidade maior de ESCVEs procura suprir essa demanda. A outra forma de aumentar a quantidade de veículos no sistema, mas que impacta de forma negativa a satisfação dos clientes, seria um grande número de vagas de espera com poucos ESCVEs de carga. Nesse caso, um alto número de clientes no posto significa elevado tempo de espera.

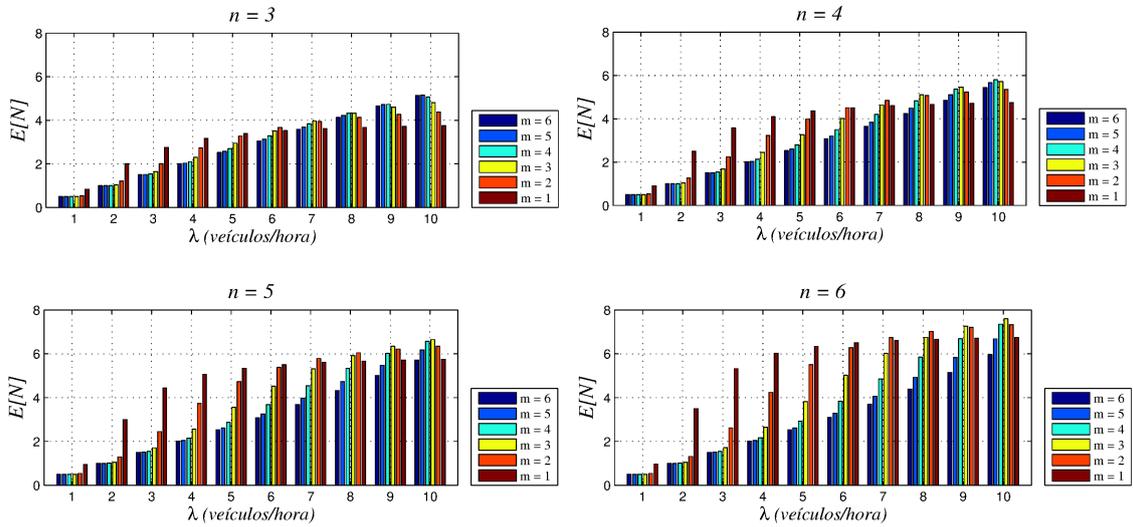


Figura 4.3: Número médio de veículos elétricos no sistema.

Como pode-se verificar na Figura 4.3, quando a taxa de chegada de veículos é a menor, ou seja  $\lambda = 1$ , a quantidade de veículos no sistema é praticamente a mesma para  $m = 2$  a 6. Só para  $m = 1$  é que se observa alguma variação significativa. Para  $\lambda = 1$ , à medida que são disponibilizadas mais vagas de espera, e quando se coloca mais servidores, a vazão do serviço se torna maior, e assim uma menor quantidade de veículos se acumula no sistema. No entanto os gráficos mostram um comportamento assintótico. Percebe-se que a medida que a taxa de chegada de veículos aumenta, a quantidade de veículos no sistema tende a aumentar e, se for considerado taxas de chegadas mais elevadas, o número de veículos tenderia a se estabilizar no valor  $n + m$ . Para o caso de um maior número de vagas de espera e servidores o comportamento assintótico só seria observável graficamente para taxas de chegada mais altas. Isso não é visualizado então, porque os gráficos estão limitados no eixo horizontal a

$\lambda = 10$  veículos/hora. É ainda interessante observar que existe uma combinação “ótima” de vagas de espera ( $n$ ) e servidores ( $m$ ) que viabilizam um maior acúmulo de clientes no sistema. Os casos mais significativos são os gráficos com  $n = 4, 5$  e  $6$ , para  $\lambda = 10$  e para as configurações com  $m = 4, 3$  e  $3$ , respectivamente. Estes casos de estações, se implantadas em regiões com fluxos de veículos semelhantes, devem auferir maior rentabilidade, com o custo de maior tempo de espera.

### 4.3.2 Probabilidade de bloqueio

Outra variável de interesse é a probabilidade de encontrarmos o posto de carga no estado de bloqueio ( $p_b$ ). Isso mostra a indisponibilidade do posto de carga. Permite também estimar a quantidade de veículos que se deixa de abastecer e que de certa forma representa “prejuízo” ao fornecedor do serviço.

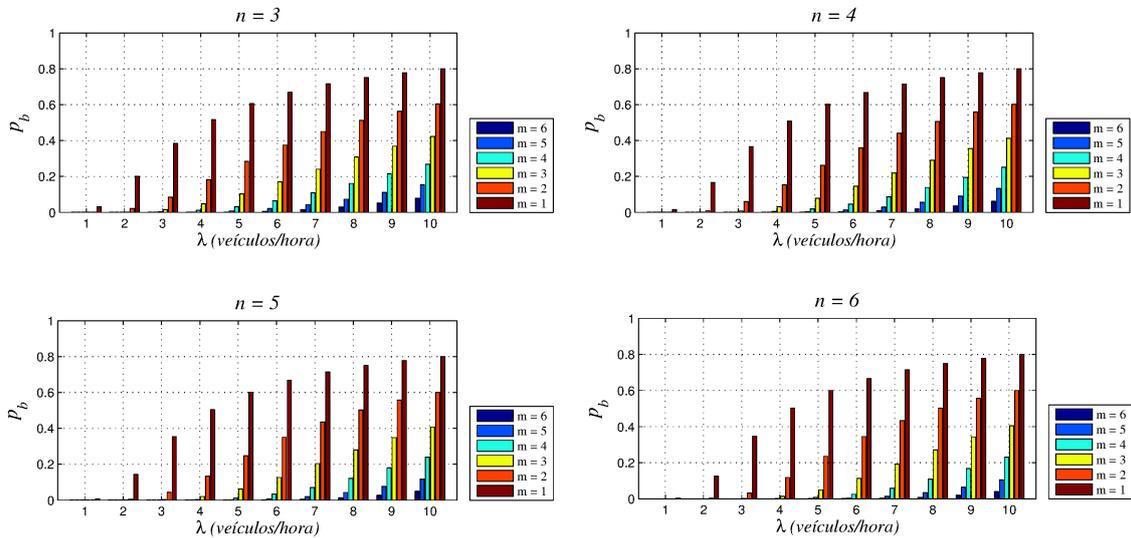


Figura 4.4: Probabilidade de bloqueio do sistema.

Pela análise dos gráficos na Figura 4.4, pode-se verificar que existe uma variação significativa na probabilidade de bloqueio para pequenas taxas de chegada de veículos. Isso se observa para taxas de  $\lambda = 1$  a 3 veículos/hora. Com o aumento do número de vagas na fila de espera, a chance de encontrar o sistema indisponível para essas taxas de chegada diminui. O aumento da taxa de chegada dos veículos, associado à taxa de serviço ( $\mu = 2$  veículos/hora) que é característica do carregador rápido, faz com que não ocorram variações tão significativas na probabilidade de bloqueio principalmente quando  $n \leq 4$ . Isso pode ser visualizado no gráfico para as taxas de  $\lambda > 3$ . Para o caso de 6 servidores, com 3 vagas na fila de espera e taxa de chegada de 10 veículos/hora tem-se uma probabilidade de bloqueio de aproximadamente 9.5%, e para o caso extremo de 6 vagas na fila, para essa mesma taxa de chegada, a probabilidade de bloqueio cai para 3%. Observa-se assim variações mais

significativas nas condições extremas.

### 4.3.3 Tempo esperado de serviço

Outra variável de interesse é o tempo esperado de serviço do sistema. É a medida que mostra o quanto o sistema responde à chegada dos veículos, os recebe e procura atendê-los, incluindo desde o tempo na fila até o momento em que o veículo deixa a estação. Foi desprezado o tempo gasto no pagamento da conta de carga elétrica. A Figura 4.5 apresenta esses resultados.

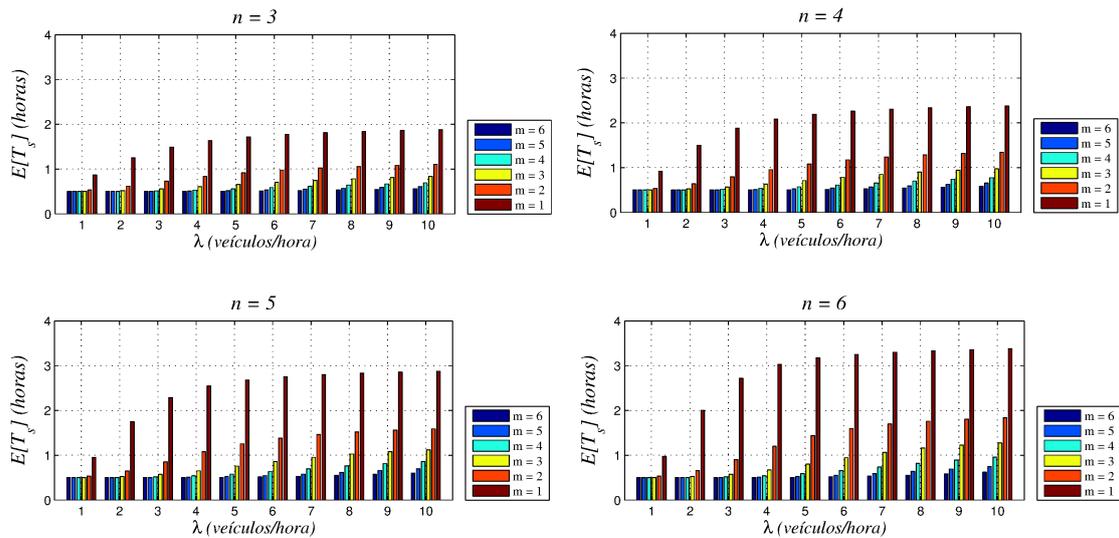


Figura 4.5: Tempo médio de serviço.

Os casos em que ocorre maior variação podem ser observados para  $\lambda > 2$  e onde existem menos servidores no sistema. Quanto menor o número de servidores, menor é a vazão observada pelos veículos que ingressam no sistema, ou seja, o tempo de serviço aumenta. Com mais servidores, o tempo médio de serviço se estabiliza em 30 minutos, como podemos observar nos gráficos da Figura 4.5. Pode-se ainda observar pela análise dos gráficos que o tempo mínimo de espera no sistema é de 30 minutos. Fixando o tempo de 1 hora como tempo máximo aceitável, observa-se que para o cenário com  $n = 3$  vagas, a partir de  $\lambda > 2$ , o cenário com  $m = 1$  não consegue cumprir essa meta. Para esse mesmo cenário, quando  $\lambda > 6$ , só com  $m = 3$  se consegue fazer que o tempo de serviço inferior a 1 hora seja atendido. Para o cenário com  $n = 6$  que apresente  $4 < \lambda < 6$ , precisam instalar, no mínimo, 3 servidores para o tempo em questão e, para  $\lambda > 6$ , só cenários com, no mínimo, 4 servidores atendem a um tempo inferior a 1 hora de permanência na estação de carga.

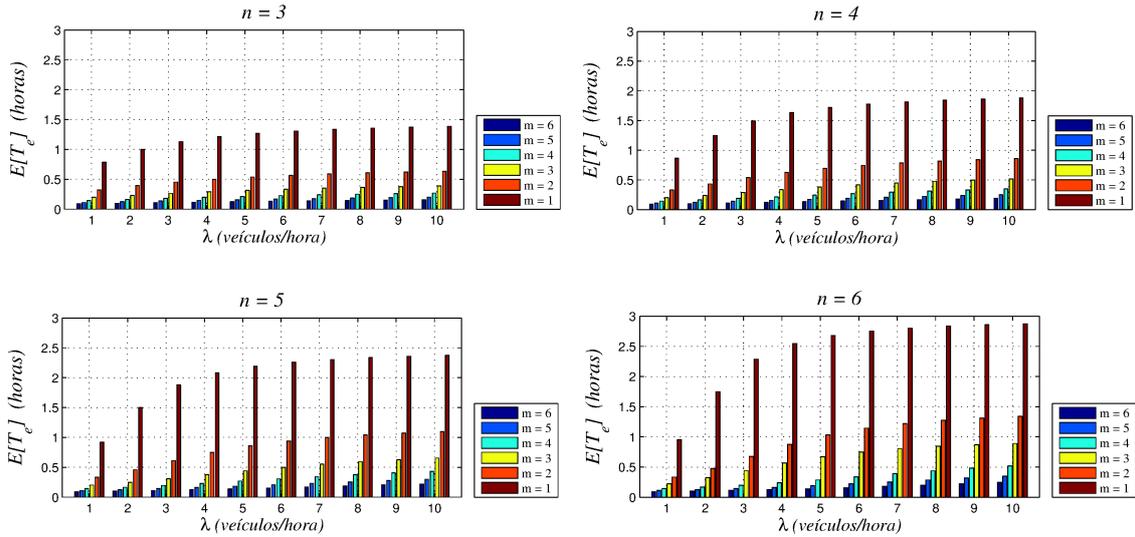


Figura 4.6: Tempo médio na fila de espera.

#### 4.3.4 Tempo médio de espera na fila

Outra quantidade de interesse é o tempo médio de espera na fila ( $E[T_e]$ ). Essa variável é importante pois mostra o quanto o cliente que está chegando ao sistema e encontra todos os servidores ocupados, esperará para concluir sua carga e continuar sua jornada. Nos gráficos da Figura 4.6 é natural observar que quanto menor o número de servidores, maior o tempo de espera. E quanto maior o número de chegadas de veículos ao sistema, também menor a vazão e maior o tempo de espera. Tal aumento do tempo de espera é mais sutil quando tem-se mais servidores para atender os veículos. Isso pode ser observado para  $m > 4$ . Naturalmente quando se aumenta o número de vagas de espera, o tempo de espera aumenta consideravelmente, nas taxas de chegadas mais elevadas e para poucos servidores ( $m = 1$  e  $2$ ).

Os resultados obtidos nesse capítulo mostram a variação dos valores de métricas importantes no planejamento de uma estação de carga mediante a variação da taxa de chegada de veículos, número de servidores e número de vagas. No Capítulo 5, modelos mais sofisticados serão apresentados e também serão usadas estas métricas discutidas nesse capítulo, além de outras métricas essenciais no projeto de estações de carga para previsão da demanda e utilização do espaço físico.

## Capítulo 5

# Modelo de Reuso da Capacidade da Estação de Carga

A grande barreira encontrada hoje pelos usuários de veículo elétricos é o problema da autonomia reduzida que esta modalidade de transporte apresenta devido às limitações de densidade de energia das baterias. Muitos avanços foram observados recentemente com as baterias de lítio mas, mesmo assim, a restrição de autonomia impulsiona a busca por soluções baseadas no abastecimento via recarga rápida. Assim os usuários tem a flexibilidade de parar em parte do trajeto para recondicionar a energia das baterias e continuar sua jornada, minimizando o problema da restrição do alcance. Sabendo-se que as baterias de íons de lítio apresentam um perfil de carga peculiar, onde há fases do processo de carga com taxas energéticas distintas, pode-se explorar este fato no dimensionamento dos postos de carga. O maior problema encontrado nos postos de carga rápida é o alto consumo de energia da rede. A grande quantidade de veículos, abastecendo simultaneamente, deve ser estritamente controlada, principalmente nas horas de maior consumo, para que não ocorram apagões nas subestações. A busca de um controle de ajuste fino sobre o processo de carga depende da distribuição esperada das requisições de carga no sistema. A mobilidade dos veículos é um fator determinante que substancialmente afeta a rede em relação aos requisitos de provisionamento de energia. Sendo assim, propor um modelo que mimetize a demanda de carga pelos veículos elétricos e a consequente resposta da estação de carga a tal demanda é de extrema importância.

Como já observado no Capítulo 2, a curva de carga da bateria de íons de lítio geralmente apresenta um comportamento não-linear. Neste trabalho, será usada uma aproximação, linearizando o perfil de carga da bateria de íons de lítio no modelo de carregamento, visto que reproduz de forma mais realista, dentro das devidas proporções, o sistema de abastecimento se comparado aos estudos previamente relacionados. Além disso, atualmente, esta é uma das baterias mais utilizadas pela indústria de veículos elétricos.

## 5.1 Modelo de serviço

O modelo de serviço será implementado usando uma Cadeia de Markov de Tempo Contínuo (CMTC). A fase de pré-carga na Figura 2.2 é necessária apenas quando a bateria está completamente descarregada, o que na prática raramente ocorre quando o veículo está sendo frequentemente usado. Tipicamente, quando a luz do painel indica bateria fraca, há ainda uma quantidade de carga para se dirigir ao posto mais próximo, situação análoga à reserva do convencional tanque de combustível líquido. Assim, assume-se que os motoristas de veículos elétricos irão ter a mesma iniciativa. Desta forma, podemos aproximar o processo de carga por 2 fases para construirmos a cadeia de Markov. A primeira fase (nível 1 na Figura 2.2) é a fase da corrente constante (fase-CC). A maior parte da potência de uma estação de carga é solicitada nessa fase, haja vista que a carga da bateria é a menor do processo. Ao fim desta fase, atingida a tensão  $V_{BAT}$ , o equipamento de suprimento de energia chaveia para a fase de tensão constante (fase-CV), e permanece nessa fase até a tensão residual nas resistências internas desaparecerem. A fase de tensão constante (nível-2 na Figura 2.2) corresponde a um período de menor taxa de energia, mas é fundamental para o condicionamento da bateria.

O projeto das estações de carga dos cenários que serão propostos deve levar em conta a potência que a estação pode fornecer, e a partir daí, se a subestação local é capaz de prover a estação de carga com  $G$  kW, e se a potência gasta na fase-CC é  $p$  kW, o sistema com espaço físico previamente planejado para o melhor aproveitamento da potência disponível, acomoda  $m = G/p$  equipamentos de carga, podendo suprir até  $m$  veículos em fase-CC [9]. A taxa de chegada de veículos obedece a uma distribuição de Poisson com taxa de chegada de  $\lambda$  veículos/hora e o serviço segue uma distribuição exponencial com taxa  $\mu$  veículos/hora. Caso a estação de carga seja planejada para comportar  $s$  equipamentos de suprimento de carga (ESCVE), e se  $s > m$ , como considerado nos cenários a seguir, apenas  $m$  carregadores dos  $s$  instalados, poderão abastecer  $m$  veículos em fase-CC concomitantemente. Os carregadores restantes terão que permanecer em modo espera, só entrando em funcionamento no momento permitido. Com a resolução do modelo de Markov serão extraídos os resultados das variáveis do sistema:

**Número esperado de clientes** –  $E[N]$ . Esse valor é de grande interesse para o proprietário da estação de carga representada pelos cenários propostos. Quanto maior o número de veículos em carga, maior o retorno para o proprietário. Para o usuário, quando uma estação apresenta um número de usuários se aproximando ou até mesmo atingindo lotação máxima, uma nova estação de carga precisa ser encontrada. Quando a estação de carga apresenta algum mecanismo de informação, os usuários podem ser advertidos para procurar outra estação mais próxima ou

menos congestionada. O número de clientes engloba aqueles que estão em processo de carga e os que aguardam o momento de serem energizados pelo sistema.

**Probabilidade de bloqueio total** –  $p_b$ . Esse valor retorna a indisponibilidade do sistema nos cenários, que pode ocorrer devido a 3 aspectos:

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço* –  $p_{b1}$ . O bloqueio devido a falta de espaço mostra a indisponibilidade de espaço para que os veículos possam se conectar e receber carga com energia disponível na estação. Há energia disponível mas falta espaço para os veículos se conectarem. Será visto que alguns cenários não apresentarão essa parcela de bloqueio.

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de energia* –  $p_{b2}$ . O bloqueio devido a falta de energia representa a indisponibilidade da estação devido ao déficit energético, ou seja, não há energia mesmo havendo espaço em ESCVEs ou vagas de espera. Em suma, há espaço físico nos conectores dos carregadores inativos e/ou vagas externas, mas não há energia disponível. Será idealizado, nesse caso, um sistema de comunicação que alertará o bloqueio aos usuários.

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia* –  $p_{b3}$ . Este bloqueio se configura em condições onde não há espaço e nenhuma energia ou ainda, indisponibilidade de espaço e insuficiente energia para abastecer mais um veículo em fase-CC. Como  $p_{b1}$ ,  $p_{b2}$  e  $p_{b3}$  são probabilidades de eventos independentes, podemos equacionar  $p_b = p_{b1} + p_{b2} + p_{b3}$ .

**Probabilidade de serviço imediato** –  $p_{e1}$ . A probabilidade de ser imediatamente servido indica a chance de o veículo, ao chegar na estação, ser imediatamente energizado e abastecido com carga, não sendo direcionado a nenhuma fila de espera nem ser bloqueado.

**Probabilidade de admissão imediata** –  $p_{e2}$ . A probabilidade de ser imediatamente aceito (admitido) pela estação de carga indica a chance de o veículo, ao chegar à estação de carga, não encontrar a estação com energia disponível e ser direcionado a fila de espera e aguardar o momento oportuno de ser carregado (disponibilidade de energia).

**Potência consumida esperada** –  $E[P_d]$ . Essa grandeza retorna o valor da potência consumida (demandada) pelos veículos à estação de carga, considerando o número de carregadores. Essa métrica é de fundamental importância no projeto de uma estação de carga. O valor a ser consumido é limitado pela potência total disponível na estação, que é suficiente para abastecer até  $m$  veículos em fase-CC (baseado no número de ESCVEs principais), o que equivale a dizer que o número de ESCVEs principais ( $m$  carregadores que suprem até  $m$  veículos em fase-CC) é baseado no cálculo simplificado da potência total disponível na estação de carga,

dividida pela quantidade de potência consumida na fase-CC. Cada estado da cadeia de Markov representa uma quantidade de potência consumida pelos veículos em diferentes fases de carga, que combinam fases CC e CV, nos diferentes cenários a serem analisados. O somatório do produto da potência consumida por cada estado da cadeia de Markov pela probabilidade de cada estado retorna a potência total demandada no sistema.

**Porcentagem da potência usada esperada** –  $E[P_u]$  (%). Esta grandeza é a razão entre a potência efetivamente consumida pelos veículos na estação e a potência total disponibilizada pela estação de carga.

**Tempo esperado de espera** –  $E[T_e]$ . Esse valor representa o tempo que o cliente espera conectado ao sistema e nas vagas externas do pátio até a disponibilidade de energia para começar o processo de carga, que está vinculado à saída de veículos do sistema com bateria carregada e/ou à transição de veículos de fase-CC para a fase-CV. A variável retorna o tempo (em horas) gasto conectado e nas vagas externas baseado no teorema de Little [26, 27]:

$$E[T_e] = \frac{E[N_e]}{\lambda(1 - p_b)}. \quad (5.1)$$

### 5.1.1 Parâmetros para análise dos cenários de carga

Essa seção introduz alguns parâmetros e relembra algumas aproximações adotadas na construção da cadeia de Markov de base do Capítulo anterior. O tempo total gasto no processo de carga, considerando a fase-CC e fase-CV, é de aproximadamente 30 minutos (a fase de pré-carga é desprezada pelos motivos já comentados). A taxa de energia gasta na fase-CC pode ser considerada 2 vezes maior que a gasta na fase subsequente, ou seja, na fase-CV. Assim a taxa de serviço foi dividida em duas,  $\mu_1 = 4$  veículos/hora, para a fase-CC e  $\mu_2 = 4$  veículos/hora para a fase-CV. O parâmetro  $\lambda$  corresponde à taxa de chegada de veículos ao posto de carga. Para obtermos uma razoável faixa de análise, variou-se a taxa de chegada de  $\lambda = 5$  a 50 veículos/hora, em passos de 5 veículos/hora. A Tabela 5.1 resume os parâmetros usados na avaliação.

Algumas simplificações serão adotadas para a definição do tamanho da estação de carga, como se segue. De acordo com Hess *et al.* [9], será tomado o veículo Leaf da Nissan como exemplo. A quantidade de energia que pode ser armazenada na sua bateria é 24 kWh. Quando o processo de carga se dá em carga lenta (3.3 kW), a bateria atinge plena carga em 8 horas. Por outro lado, usando o processo de carga rápida, a bateria atinge 80% da sua capacidade em aproximadamente 30 minutos. A energia total armazenada nesse caso é de 19,2 kWh. Assim, para a fase-CC, 51,2 kW de potência será necessária para atingir 12,8 kWh em 15 minutos, e 25,6 kW para

Tabela 5.1: Parâmetros usados na avaliação.

Notação	Descrição	Valores
$\lambda$	Taxa de chegada de veículo (veículos/hora)	5 a 50
$\mu$	Taxa Total de Serviço (veículos/hora)	2
$\mu_1$	Taxa de Serviço no modo CC (veículos/hora)	4
$\mu_2$	Taxa de Serviço no modo CV (veículos/hora)	4
$s$	Número de equipamentos de suprimento de carga de veículo elétrico (ESCVE)	5 a 15
$n$	Número de ESCVEs adicionais	2 a 7
$n'$	Número de vagas externas (NVE) disponibilizadas na estação	2 a 7
$C$	Potência normalizada da estação	6 a 18
$G$	Potência máxima disponível na estação	153,6 a 409,6 kW
$p$	Potência gasta na fase-CC	51,2 kW
$m$	Número de ESCVEs que abastecem em fase-CC concomitantemente	$m = G/p$

completar os 6,4kWh nos 15 minutos restantes. Para tornar o modelo genérico, será adotada a notação de potência normalizada da estação  $e$ , será atribuída a variável  $C$ . Será considerado que  $C = 2$  para a potência consumida na fase CC, que é praticamente o dobro da potência associada à fase-CV, onde se tem  $C = 1$ .

Consideram-se 4 cenários diferentes, chamados de cenários Básico (B), Serviço Imediato (SI), Conectado em Espera (CE) e Vaga Externa (VE), detalhados nas próximas seções. Todos foram implementados baseados nos cálculos simplificados para obtenção do número de carregadores principais (ESCVEs principais) como o resultado da fração da potência total disponível pela potência consumida na fase-CC. Por exemplo, se uma estação de carga tem a capacidade de fornecer 409,6 kW, então ela pode acomodar até 8 carregadores (409,6 kW/51,2 kW) que podem abastecer 8 veículos concomitantemente em fase-CC. No caso do cenário Básico, a estação terá 8 ESCVEs. O maior consumo ocorrerá se todos os veículos que estão abastecendo estiverem na fase-CC, consumindo da estação 409,6 kW. O menor consumo pode ocorrer quando todos os veículos estiverem em fase-CV, consumindo 204,8 kW. Apesar de todos os carregadores estarem ocupados, há um desperdício de metade da capacidade na estação de carga no caso extremo, ou seja, todos os veículos em fase-CV. No cenário Serviço Imediato, um veículo é aceito apenas se existir energia imediatamente disponível para iniciar a carga. A estação contará com ( $s = 2m - 1$ ) ESCVEs. Destes, somente  $m$  veículos poderão estar abastecendo em fase-CC, portanto, ocupando  $m$  carregadores. Assim, ( $m - 1$ ) carregadores estarão disponíveis para receber mais veículos caso haja disponibilidade de energia, ou seja, se já houver veículos em fase-CV que consomem metade da potência.

No cenário Conectado em Espera, os ( $m - 1$ ) ESCVEs cumprirão também o papel de receber veículos que podem usufruir do espaço como vaga de espera, flexibilizando a conexão ao sistema, aguardando o momento oportunistico de disponibilidade de energia para iniciar o processo de carga.

O cenário Vaga Externa é semelhante ao cenário Conectado em Espera, mas

possui uma fila de espera (vagas no pátio) que organizará os veículos em fila e adotará o regime de ordem de chegada. Estes aspectos são detalhados nas próximas seções.

Os resultados que são apresentados após o modelo de cada cenário a seguir, foram produzidos utilizando o Matlab 2013 e o TangramII [29] como ferramentas de cálculo. O Tangram-II é um software especializado para construir, simular e resolver modelos estocásticos <sup>1</sup>. São feitas comparações entre os cenários descritos para as variáveis do sistema, mencionadas anteriormente, variando-se os parâmetros  $\lambda$  e  $s$ , levando-se em conta sempre que destes  $s$  carregadores,  $m - 1$  estarão em espera se houver  $m$  carregadores em fase-CC. Vale a pena ressaltar que para o cenário Básico,  $s = m$ .

### 5.1.2 Modelo do cenário Básico

Primeiramente, o cenário Básico, ilustrado na Figura 5.1 representa uma estação de carga. A taxa de chegada de veículos obedece a uma distribuição de Poisson com taxa de chegada  $\lambda$  e o serviço segue uma distribuição exponencial com taxa  $\mu$  (média =  $1/\mu$ ). O sistema apresenta  $s = m$  equipamentos de suprimento de carga (ESCVE) ou servidores. Se a subestação local é capaz de prover à estação de carga  $G$  kW, e se a potência gasta na fase-CC é  $p$  kW, o sistema com espaço físico previamente planejado, acomoda  $s = G/p$  equipamentos de suprimento de carga. Aqui será

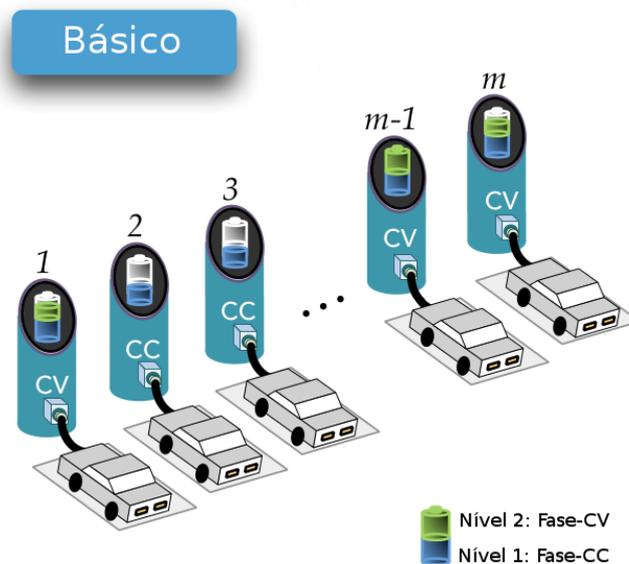


Figura 5.1: Cenário Básico de estações de carga – Modelo sem ESCVEs reservas.

usada uma cadeia de Markov Contínua no Tempo para modelar o cenário Básico.

<sup>1</sup>O software Tangram-II foi desenvolvido pelo Programa de Engenharia de Sistemas e Computação da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

O modelo descreve as duas fases de carga e usa um processo de nascimento-e-morte, baseado em uma cadeia bi-dimensional, finita no espaço de estados. Assume-se que o nível 1 (fase-CC) e o nível 2 (fase-CV) são dois bem definidos e distintos intervalos de tempo e potência, cada um com taxas de serviço  $\mu_1$  para o nível 1 e  $\mu_2$  para a nível 2. Assim, nesse primeiro modelo de estação de carga, a quantidade de ESCVEs é baseada na máxima potência que a subestação pode prover, dividida pela potência consumida na fase-CC. Esse resultado mostra quantos veículos a estação de carga pode receber em um primeiro momento, e é uma função da capacidade de potência da estação. Os estados da cadeia de Markov usada nesse cenário apresentam 2 variáveis,  $(i, j)$ . A variável  $i$  representa o número de veículos que se encontram na fase-CC, consumindo maior potência da rede. A variável  $j$  representa o número de veículos no fase-CV. A cadeia de Markov da Figura 5.2 descreve o comportamento da estação de carga. Um veículo, ao chegar à estação faz com que o estado da cadeia de Markov salte para  $(i+1, j)$ . Quando a fase-CC finaliza, a fase-CV inicia e o estado da cadeia salta para  $(i, j+1)$ . Quando os estados representados pela cor vermelho-claro são alcançados, a estação de carga não tem condições de receber mais veículos, pois está no seu limite físico. Essa indisponibilidade do sistema ocorre nos estados de bloqueio. O estado  $(m, 0)$  está consumindo toda potência disponibilizada pela subestação. Qualquer outro estado vermelho-claro consome menos potência que o estado  $(m, 0)$ , pois há veículos no nível 2, mas não há mais conectores disponíveis para receber mais veículos, embora haja potência não usada. Tal taxa de energia não é usada porque a estação não possui mais ESCVEs em espera que possam receber veículos adicionais. A cadeia de Markov da Figura 5.2 descreve o comportamento desse cenário.

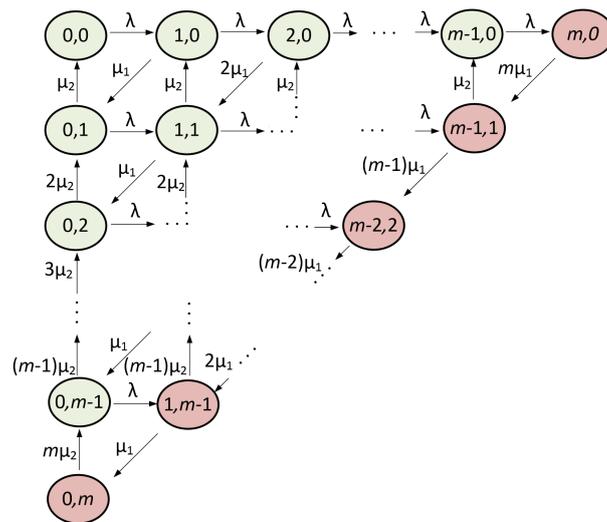


Figura 5.2: Modelo da cadeia de Markov para o cenário Básico.

## Descrição do Espaço de Estados para o cenário Básico

Em qualquer instante para  $t \geq 0$ , o sistema está em algum estado da Figura 5.2. O sistema é contínuo no tempo e a cadeia é irredutível. Sejam  $N_{cc}, N_{cv}$  variáveis aleatórias caracterizando o número de veículos em fase-CC e fase-CV que está contido no espaço de estados  $\Omega_B$ . No caso específico deste cenário tem-se que  $\sigma = (n_{cc}, n_{cv})$  representa o estado do sistema. No estado estacionário, sabendo-se que  $\mathbf{Q}$  representa a Matriz Geradora Infinitesimal, que o produto  $\pi\mathbf{Q} = \mathbf{0}$  e que  $\sum_{(i,j) \in \Omega_B} \pi_{i,j}(t) = 1$ , é possível extrair a solução única do sistema linear obtido que resulta no vetor-solução de probabilidades,  $\pi = [\pi_{0,0}, \pi_{0,1}, \pi_{1,0}, \pi_{0,2}, \dots, \pi_{m,0}]$ . Quando a solução deste sistema linear formado por  $\pi\mathbf{Q} = \mathbf{0}$  e  $\sum_{(i,j) \in \Omega_B} \pi_{ij} = 1$ , retornar resultados de probabilidades positivas-limite  $\pi_{ij}$ , a cadeia de Markov é dita como recorrente-positiva ou recorrente não-nula [27]. Mais uma vez, esses resultados são conhecidos como probabilidades de estado estacionário, que apresentam um comportamento assintótico quando  $t \rightarrow \infty$ . A estação de carga modelada pela cadeia de Markov é um caso especial de processo de nascimento-e-morte, apresentando um espaço finito de estados em duas dimensões, e um número de estados que está representado na Equação 5.2, onde  $m$  é o número de ESCVEs que podem receber veículos em fase-CC concomitantemente. A probabilidade de que o sistema permaneça em um dado estado decresce a uma taxa que é igual à soma das taxas de transições para um estado vizinho, ou seja um nascimento ou uma morte [26]. Foi definida a ordem dos estados nas colunas e nas linhas da matriz geradora infinitesimal  $\mathbf{Q}$  percorrendo os estados diagonalmente na Figura 5.2. Assim, a matriz geradora  $\mathbf{Q}$  é definida pela Equação 5.3.

$$N_{est}(m) = (0.5m^2 + 1.5m + 1). \quad (5.2)$$

$$\begin{bmatrix} (0,0) & (0,1) & (1,0) & (0,2) & (1,1) & (2,0) & (0,3) & (1,2) \dots & (m-1,1) & (m,0) \\ (0,0) & -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \dots & 0 & 0 \\ (0,1) & \mu_2 & -(\lambda + \mu_2) & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 \dots & 0 & 0 \\ (1,0) & 0 & \mu_1 & -(\lambda + \mu_1) & 0 & \lambda & 0 & 0 \dots & 0 & 0 \\ (0,2) & 0 & 2\mu_2 & 0 & -(\lambda + 2\mu_2) & 0 & 0 & \lambda \dots & 0 & 0 \\ (1,1) & 0 & 0 & \mu_2 & \mu_1 & -(\lambda + \mu_1 + \mu_2) & 0 & 0 \dots & 0 & 0 \\ (2,0) & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu_1 & -(\lambda + 2\mu_1) & 0 & 0 & 0 \\ (0,3) & 0 & 0 & 0 & 3\mu_2 & 0 & 0 & -(\lambda + 3\mu_2) & 0 & 0 \\ (1,2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu_2 & \mu_1 & -(\lambda + \mu_1 + 2\mu_2) & 0 & 0 \\ (2,1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_2 & 2\mu_1 \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ (m,0) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \dots & m\mu_1 & -m\mu_1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Sendo assim, ao se resolver o sistema formado por  $\pi\mathbf{Q} = \mathbf{0}$  e  $\sum_{(i,j) \in \Omega_B} \pi_{ij} = 1$ , podem-se obter as seguintes métricas que representam o interesse tanto do cliente quanto da estação de carga.

**Número esperado de veículos em carga** –  $E[N(B)]$ . No cenário Básico assume-se que  $n_{ij} = (i + j)$  corresponde ao número de veículos no estado  $(i, j)$ , o número de

veículos em carga pode ser obtido como:

$$E[N(B)] = \sum_{(i,j) \in \Omega_B} (i+j) \cdot \pi_{ij}. \quad (5.4)$$

**Probabilidade de bloqueio total** –  $p_b(B)$ . Neste cenário a indisponibilidade do sistema está representada pelos estados de cor vermelho-claro da Figura 5.2. O subconjunto de estados do cenário Básico para o qual o sistema apresentará bloqueio total será denominado por  $\mathcal{S}_b^{(B)}$ . Sabe-se que  $\mathcal{S}_b^{(B)} \subset \Omega_B$ . Qualquer veículo que chega na estação no momento em que o subconjunto de estados corrente é  $\mathcal{S}_b^{(B)} = \{(m-i, i)\}$ , para  $i = 0, 1, 2, \dots, m$ , deve procurar uma estação próxima, pois não há carregadores disponíveis para se conectar. A probabilidade de bloqueio é calculada como:

$$p_b(B) = \sum_{(i,j) \in \mathcal{S}_b^{(B)}} \pi_{ij}, \quad (5.5)$$

onde  $\mathcal{S}_b^{(B)} = \{(m-i, i)\}$ , para  $i = \{0, 1, 2, \dots, m\}$ .

**Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço** –  $p_{b1}(B)$ . Neste cenário será observado bloqueio devido, exclusivamente, à falta de espaço. Este bloqueio é computado pelos estados onde alguns veículos já atingiram a fase-CV, mas não há mais carregadores para aceitar mais veículos na estação, mesmo havendo potência não utilizada. Aqui o subconjunto dos estados de bloqueio devido a falta de espaço será  $\mathcal{S}_{b1}^{(B)}$ . Nota-se que  $\mathcal{S}_{b1}^{(B)} \subset \mathcal{S}_b^{(B)}$ . Esse bloqueio pode ser calculado por:

$$p_{b1}(B) = \sum_{(i,j) \in \mathcal{S}_{b1}^{(B)}} \pi_{ij}, \quad (5.6)$$

onde  $\mathcal{S}_{b1}^{(B)} = \{(m-i, i)\}$ , para  $i = \{2, 3, 4, \dots, m\}$ .

**Probabilidade de bloqueio devido a falta de energia** –  $p_{b2}(B)$ . O subconjunto dos estados de bloqueio devido a falta de energia, mesmo havendo espaço, é denotado  $\mathcal{S}_{b2}^{(B)}$ . Nesse cenário não é observado esse tipo de bloqueio. O único estado que não existe nenhuma energia é o estado  $(m, 0)$ , mas este estado também está bloqueado devido ao espaço. Assim,  $\mathcal{S}_{b2}^{(B)} = 0$

**Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e de energia** –  $p_{b3}(B)$ . O subconjunto de estados para ausências de energia e também de espaço nesse cenário é  $\mathcal{S}_{b3}^{(B)} = \{(m-i, i)\}$ , para  $i = \{0, 1\}$ . Observa-se que  $\mathcal{S}_{b3}^{(B)} \subset \mathcal{S}_b^{(B)}$ . Pode-se observar que o estado  $(m, 0)$  apresenta  $m$  veículos em fase-CC, ocupando os  $m$  carregadores e consumindo a potência máxima da estação. O estado  $(m-1, 1)$  mostra 1 veículo em fase-CV, havendo uma folga de potência consumida, mas insuficiente para receber

mais um veículo em fase-CC. Esse bloqueio pode ser calculado por:

$$p_{b3}(B) = \sum_{(i,j) \in \mathcal{S}_{b3}^{(B)}} \pi_{ij}, \quad (5.7)$$

onde  $\mathcal{S}_{b3}^{(B)} = \{(m-i, i)\}$ , para  $i = \{0, 1\}$ .

**Probabilidade de serviço imediato** –  $p_{c1}(B)$ . O subconjunto de estados para essa probabilidade será chamado de  $\mathcal{S}_{c1}^{(B)}$  e engloba todos os estados da cadeia observada na Figura 5.2, subtraindo-se os estados de bloqueio como descrito a seguir. Assim, a probabilidade de serviço imediato é:

$$p_{c1}(B) = \sum_{(i,j) \in \mathcal{S}_{c1}^{(B)}} \pi_{ij}, \quad (5.8)$$

onde  $\mathcal{S}_{c1}^{(B)} = \Omega_B - \mathcal{S}_b^{(B)}$ .

**Probabilidade de admissão imediata** –  $p_{c2}(B)$ . Para esse cenário, a probabilidade de admissão imediata é zero. Esse cenário, ao admitir veículos, a estação os atende imediatamente com o procedimento de carga. Não há a possibilidade de um veículo ser admitido e ser colocado em espera. Assim, é interessante observar que  $p_{c1} + p_{c2} = 1 - p_b$ .

**Potência consumida esperada** –  $E[P_d(B)]$ . Essa grandeza retorna o valor da potência consumida pelos veículos ou fornecida pela estação de carga, considerando o número de carregadores. Cada estado da cadeia de Markov representa uma quantidade de potência consumida. No caso do cenário Básico, pode-se ter  $i$  veículos em fase-CC e  $j$  veículos em fase-CV denotada como  $P_{ij}$  vezes a probabilidade de estado estacionário  $\pi_{ij}$ . Realizando o somatório de todos os estados da cadeia, temos a potência total gasta no sistema:

$$E[P_d(B)] = \sum_{(i,j) \in \Omega_B} P_{ij} \pi_{ij}. \quad (5.9)$$

### 5.1.3 Resultados do cenário Básico

Os resultados da análise de todos os cenários foram obtidos utilizando os *softwares* TangramII [29] e Matlab 2013 como ferramentas de cálculo e tratamento dos dados para traçar os gráficos que foram plotados variando-se os parâmetros  $\lambda$  e  $s$ .

**Número esperado de veículos em carga** ( $E[N(B)]$ ) – Observando o cenário Básico na Figura 5.3, é constatado que, para  $s = 3$ , o número de veículos tende assintoticamente para 3 quando a taxa de chegada aumenta. O comportamento assintótico se repete para todas as quantidades de ESCVEs ( $s = 4, 5, \dots, 8$ ), o que é esperado. O

número de veículos em carga quando a taxa de chegada é máxima (50 veículos/hora), em ordem crescente, é  $E[N(B)] = 2,8758, 3,8279, 4,7761, 5,7200, 6,6590, 7,5927$  para  $s = 4, 5, 6, 7$  e  $8$  respectivamente, na Figura 5.3.

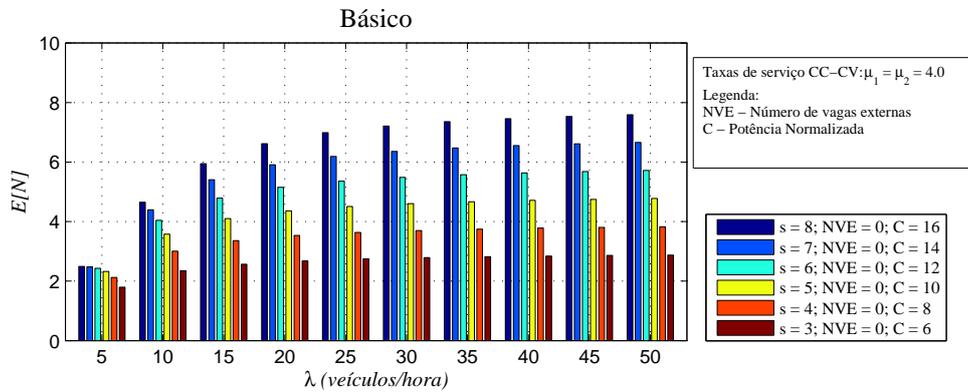


Figura 5.3: Veículos em carga no cenário Básico.

**Probabilidade de bloqueio total ( $p_b(B)$ )** – A probabilidade de o veículo chegar à estação de carga e não poder ser servido representa a insatisfação das duas partes: perdas na receita do proprietário da estação de carga e insatisfação do cliente. A Figura 5.4 mostra uma notável diferença na probabilidade de bloqueio entre cenários com poucos e muitos carregadores. Por exemplo, considerando  $\lambda = 5$  veículos/hora e  $s = 3$ , a probabilidade de bloqueio é  $p_b(B) = 0,2822$ . Já para  $s = 8$ , a probabilidade de bloqueio é  $p_b(B) = 0,0031$ , ou seja, muito baixa. O grande número de servidores (ESCVEs) garante para baixas (e até moderadas) taxas de chegada de veículos, a celeridade do serviço. O número de veículos associado a taxa de chegada  $\lambda = 5$  veículos/hora e  $s = 8$  na Figura 5.3 contabiliza  $E[N(B)] = 2,4922$ , mostrando que mais da metade dos ESCVEs encontram-se ociosos. Para regiões em cidades em que a taxa de chegada é inferior ou próxima a esse valor, a adoção de estações de carga com 3 carregadores supre suficientemente a demanda. Neste cenário será observado que  $p_b = p_{b1} + p_{b3}$

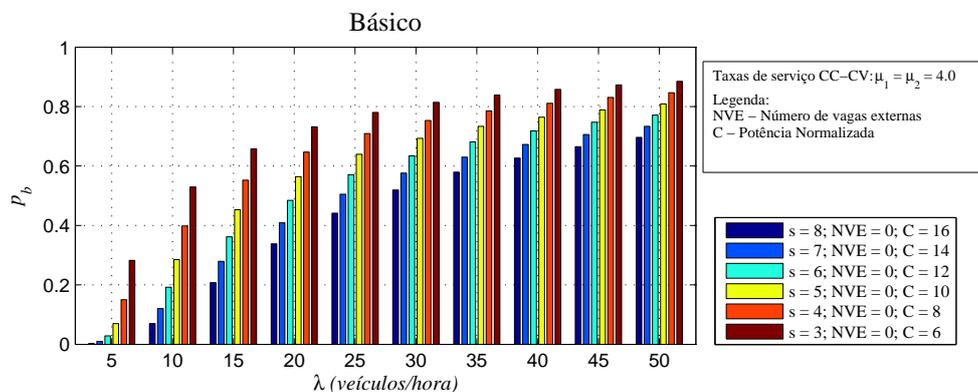


Figura 5.4: Probabilidade de bloqueio total no cenário Básico.

**Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço ( $p_{b1}(B)$ )** – Neste cenário, a probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço corresponde aos estados  $\mathcal{S}_{b1}^{(B)} = \{(m - i, i)\}$ , para  $i = \{2, 3, 4, \dots, m\}$ . Observa-se que para a taxa de chegada de veículos mais baixa ( $\lambda = 5$  veículos/hora), o número de estados da cadeia de Markov do subconjunto  $\mathcal{S}_{b1}^{(B)}$  é menor para estações com baixo número de ESCVEs e o valor da probabilidade  $p_{b1}(B)$  associada a estes estados é maior. Quando a taxa de chegada de veículos aumenta, observa-se, para as estações com maiores números de carregadores (maior número de estados da cadeia de Markov), que o subconjunto  $\mathcal{S}_{b1}^{(B)}$  aumenta, e a probabilidade associada a esses estados produz um acréscimo no valor de  $p_{b1}$ . Este comportamento é claro quando se observa a taxa máxima de chegada. Particularmente em  $\lambda = 25$  veículos/hora, ocorre uma probabilidade de bloqueio similar para  $s = 4$  e  $s = 7$ . Apesar das estações comportarem números de veículos diferentes, o bloqueio devido a falta de espaço é muito semelhante contabilizando 0,4834 e 0,4734, respectivamente. Enquanto um cenário apresenta menos servidores e vazão menor, a taxa de energia não aproveitada nessa configuração também é menor, enquanto para o outro cenário a vazão de serviço é maior, porém a energia não aproveitada também é maior, o que acaba perfazendo, para essa taxa de chegada, valores semelhantes.

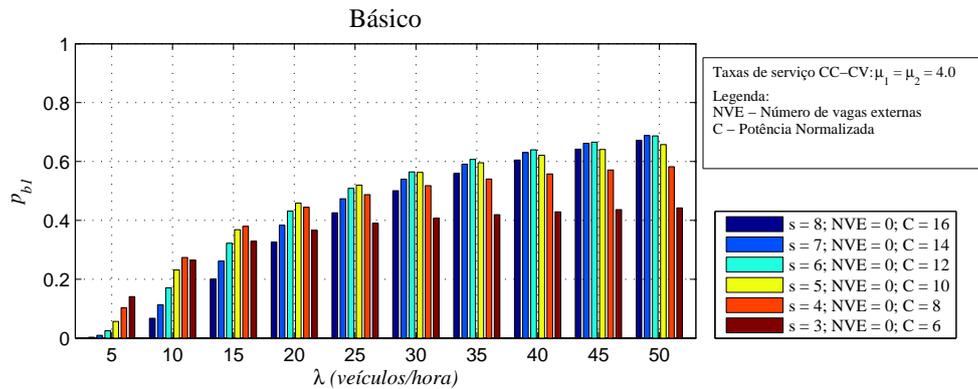


Figura 5.5: Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço no cenário Básico.

**Probabilidade de bloqueio devido a falta de energia ( $p_{b2}(B)$ )** – Neste cenário, particularmente, não se observa bloqueio devido a falta de energia exclusivamente, ou seja,  $p_{b2}$  é zero, pois excluindo os estados  $(m - i, i)$ , para  $i = \{0, 1\}$  que representam falta de energia e espaço, nos demais há energia, porém falta espaço.

**Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia ( $p_{b3}(B)$ )** – Neste cenário a probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia corresponde aos estados do subconjunto  $\mathcal{S}_{b3}^{(B)} = \{(m - i, i)$ , para  $i = \{0, 1\}$ . Como pode-se observar na Figura 5.6, quanto maior o número de carregadores, menor a probabilidade de bloqueio devido ao espaço e energia, e é aplicável a todas as taxas de chegada no gráfico. Entretanto, observando a Figura 5.4 pode-se observar que

esta parcela  $p_{b3}(B)$  contribui para a probabilidade de bloqueio total ( $p_b(B)$ ) de forma mais significativa nas estações com menor número de carregadores. Tomando o caso da maior taxa de chegada de veículos, pode-se observar por exemplo que, para  $s = 4$ ,  $p_{b3}(B) = 0,2647$  e  $p_{b1}(B) = 0,5822$ , resultando em  $p_b(B) = 0,8469$ . Já para o caso de  $s = 8$ ,  $p_{b3}(B) = 0,0245$  e  $p_{b1}(B) = 0,6718$  que fornece  $p_b(B) = 0,6963$ . Isso é devido às probabilidades dos estados  $(m, 0)$  e  $(m - 1, 1)$  terem valor mais elevado quando a estação possui menor número de carregadores, onde o subconjunto  $\mathcal{S}_b^{(B)}$  também é menor.

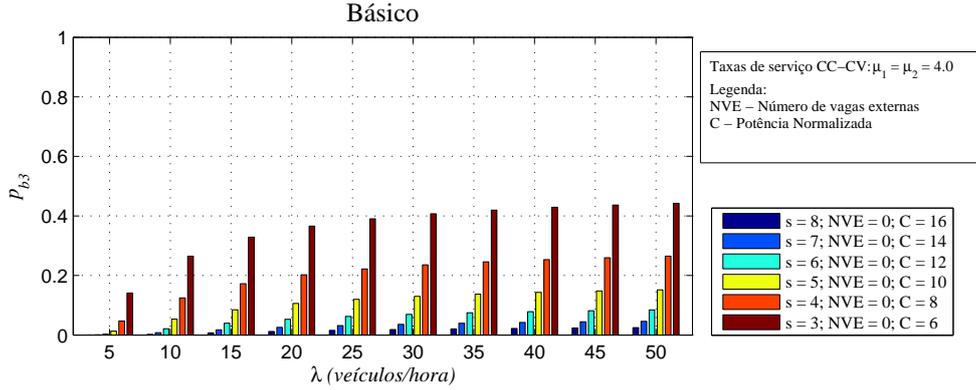


Figura 5.6: Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia no cenário Básico.

**Probabilidade de serviço imediato** –  $p_{c1}(B)$ . Observa-se na Figura 5.7 que estações de grande porte apresentam alta probabilidade de aceitar imediatamente os veículos quando a taxa de chegada de veículos é baixa. Nota-se que as estações com  $s = 8$  apresentam probabilidade  $p_{c1}(B) = 0,9969$  de aceitar veículos. Por outro lado, em estações de pequeno porte a probabilidade é de  $p_{c1}(B) = 0,7178$ . É natural que o aumento do fluxo de chegada de veículos cause um decréscimo no valor da probabilidade de serviço imediato. Para taxas de 50 veículos/hora, e em estações de carga com  $s = 3$ , no período de 1 hora, apenas 5,75 veículos (11,50%) seriam aceitos para carga. Em contrapartida, estações com  $s = 8$  conseguem absorver 15,19 veículos em 1 hora (30,37%).

**Potência consumida esperada** ( $E[P_d(B)]$  (kW)) – Através dos gráficos da Figura 5.8, pode-se perceber que devido à instalação de  $s$  ESCVEs (lembrando que nesse cenário  $s = m$ ), o limite de máxima potência não é atingido em nenhum dos casos, mesmo para a taxa mais alta de chegada de veículos. Em todos os casos há um desperdício de capacidade da estação de carga. A Tabela 5.2 mostra a demanda para  $s = 3, 4, 5, 6, 7$  e  $8$  carregadores em função de 3 taxas significativas de chegada ( $\lambda = 10, 30$  e  $50$  veículos/hora) para o cenário Básico. Se a taxa de chegada de veículos, em uma região onde uma determinada estação opere, atingir 30 veículos/hora, se  $s = 5$  a potência consumida será de 176,70 kW. A estação de carga poderia entregar

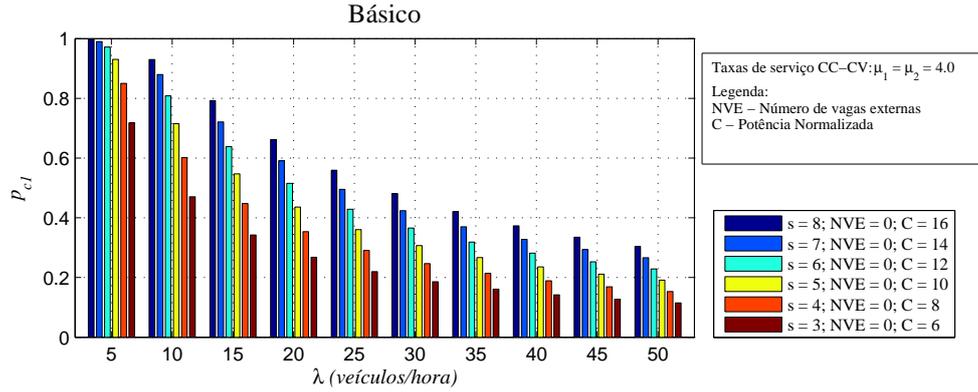


Figura 5.7: Probabilidade de serviço imediato no cenário Básico.

até 256,0 kW ( $5 \times 51,2$  kW). Mais 1 veículo poderia ser carregado em fase-CC para esta configuração. Para uma taxa mais elevada, e para uma estação de carga com  $s = 8$ , a potência consumida é de 291,56 kW e a potência máxima que a estação poderia fornecer é 409,6 kW ( $8 \times 51,2$  kW), ou seja, mais 2 veículos poderiam ser energizados em fase-CC. A instalação de  $s$  ESCVEs no modelo do cenário Básico indica que até no caso de menor demanda a capacidade da estação é subutilizada. Se a estação oferecesse alguns carregadores em modo de espera (*standby*), mais veículos poderiam entrar no sistema, conectarem-se aos carregadores reserva ou adicionais e receber carga, aproveitando a potência ainda disponível na estação. É o que será proposto no próximo cenário, Serviço Imediato. É interessante que seja apresentada a probabilidade do sistema estar operando na máxima potência que pode ser visualizado na tabela 5.3. Observa-se que, para as taxas de chegada consideradas, à medida que o porte da estação aumenta, a probabilidade de a estação estar funcionando na máxima potência decresce. E também se observa que, para cada porte de estação em particular, à medida que a taxa de chegada aumenta, a probabilidade de estar operando no limite da capacidade também aumenta.

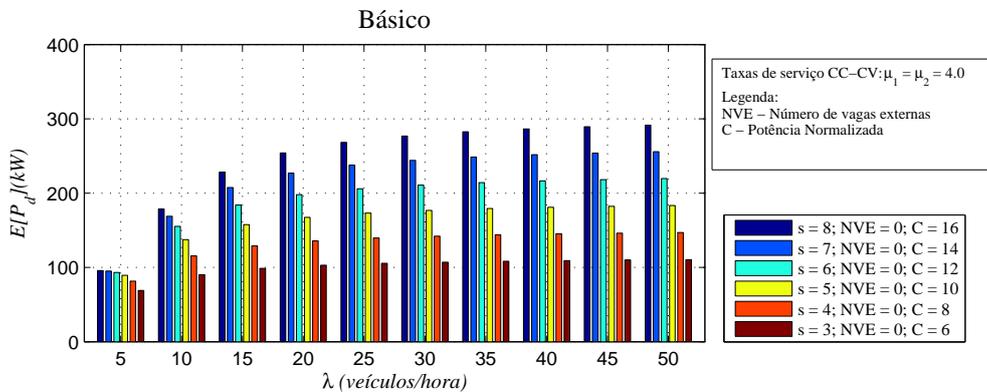


Figura 5.8: Consumo de potência média esperada no cenário Básico.

**Porcentagem da potência usada esperada ( $E[P_u(B)]$  (%))** – Aqui é observado

Tabela 5.2: Potência consumida esperada no cenário Básico (kW).

$\lambda$ (veículos/hora)	$s = 3$	$s = 4$	$s = 5$	$s = 6$	$s = 7$	$s = 8$
10	90,30	115,52	137,30	155,16	168,86	178,55
30	107,11	142,13	176,70	210,75	244,19	276,90
50	110,43	146,99	183,40	219,65	255,71	291,56

Tabela 5.3: Probabilidade de consumo de máxima potência no cenário Básico.

$\lambda$ (veículos/hora)	$s = 3$	$s = 4$	$s = 5$	$s = 6$	$s = 7$	$s = 8$
10	0,0662	0,0249	0,0089	0,0030	0,0009	0,0003
30	0,1018	0,0470	0,0217	0,0099	0,0045	0,0020
50	0,1106	0,0529	0,0253	0,0121	0,0057	0,0027

o percentual de utilização da estação de carga. O cálculo retorna a fração da potência atualmente usada. A potência total disponível na estação, já comentada, é igual ao número de ESCVEs vezes a potência consumida na fase-CC ( $m \times 51,2$  kW).

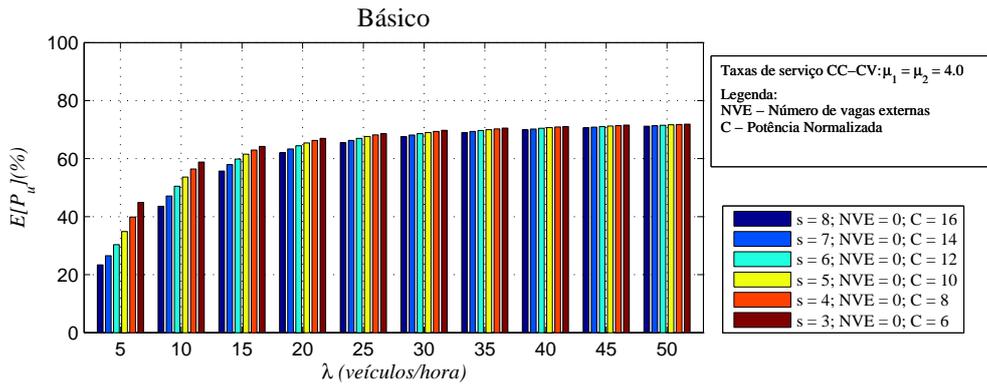


Figura 5.9: Porcentagem de potência usada esperada no cenário Básico.

Como se pode observar, o maior desperdício ocorre para a menor taxa de chegada. Para  $s = 3$ , a porcentagem da potência usada é de 23,36%. Para  $s = 8$ , o valor atinge 44,86%. Para a taxa de chegada mais alta, a porcentagem da potência usada fica em torno de 71% para todas as estações, ou seja, para estações de pequeno porte com  $s = 3$  até grande porte onde  $s = 8$ .

#### 5.1.4 Modelo do cenário Serviço Imediato

Este modelo de estação de carga foi objeto de estudo publicado em [14]. Como já observado no cenário anterior, o projeto da estação levou em conta apenas a instalação de carregadores (ESCVEs) calculando-se a potência máxima que a estação de carga receberia da subestação dividida pela potência gasta na fase-CC (51,2 kW) que resulta no número de ESCVEs que podem receber até  $m$  veículos em carga na

fase-CC. No entanto, como já visto no cenário anterior, há um subaproveitamento de energia que pode ser reduzido neste cenário chamado cenário Serviço Imediato (SI), que além dos  $m$  carregadores, conta com  $n = m - 1$  ESCVEs reserva. A estação de carga no cenário Serviço Imediato suporta até  $m$  veículos em carga na fase-CC. Se todos os ESCVEs usuais estão em serviço, na fase-CC, a estação de carga se encontra no seu estado de bloqueio  $(m, 0)$ . Isso significa que ela se encontra fornecendo  $G$  kW, a máxima potência disponível. Mas, a medida que alguns veículos passam para a fase-CV, há um desperdício de capacidade, como já observado. A redução no consumo, em virtude da fase-CV, permite que mais veículos sejam abastecidos. Alguns servidores (ESCVEs) são instalados como reserva, e assim que a fase-CV for alcançada no sistema pelos veículos que acabaram a fase-CC, veículos que chegam podem ser servidos, porque a capacidade total do posto não está sendo plenamente utilizada. Assim, neste cenário e nos seguintes, propõem-se o reaproveitamento de energia disponível. Neste primeiro cenário com reaproveitamento, um veículo só é habilitado a se conectar a um ESCVE quando há energia disponível para ser abastecido, caso contrário não é admitido no sistema, ou seja, neste cenário, não há filas. Este cenário é possível considerando um aplicativo no *smartphone* dos usuários que informa ao condutor da disponibilidade de energia na estação. Assume-se que o aplicativo irá redirecionar o EV para outra estação próxima com energia disponível. O cenário Serviço Imediato está representado na Figura 5.10. Os ESCVEs que apresentam o símbolo de “proibição” de energia não podem ser usados devido ao limite energético atingido naquele momento pela estação de carga.

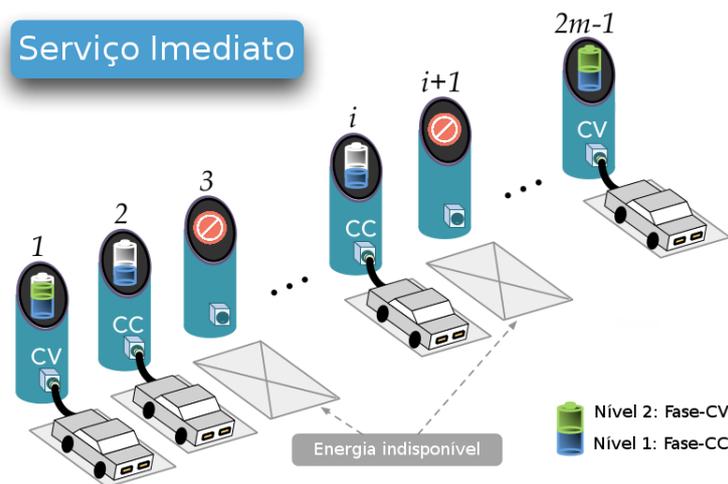


Figura 5.10: Cenário Serviço Imediato de estações de carga – só recebe usuários quando há energia disponível.

## Descrição do Espaço de Estados para o cenário Serviço Imediato

Em qualquer instante para  $t \geq 0$ , o sistema pode estar em algum estado da Figura 5.11. O sistema é contínuo no tempo e a cadeia é irredutível, apresentando as mesmas propriedades da cadeia do cenário anterior. Sejam  $N_{cc}, N_{cv}$  variáveis aleatórias caracterizando o número de veículos em fase-CC e fase-CV que está contido no espaço de estados  $\Omega_{SI}$ . Neste cenário tem-se que  $\sigma = (n_{cc}, n_{cv})$  representa o estado do sistema. A cadeia de Markov que modela o cenário Serviço Imediato está representada na Figura 5.11. Considerando que a potência requerida na fase-CC é o dobro da potência usada na fase-CV, o número de ESCVEs adicionais que podem ser instalados deve ser  $(m - 1)$ . O estado  $(m, 0)$  é um estado da cadeia de Markov onde o consumo de energia da rede se encontra no limite, e nenhum outro ESCVE pode ser usado, porque todos os veículos se encontram na fase-CC. Há outros estados nos quais a estação está no limite da sua potência total, mas estes combinam as fases-CC e CV. Todos os estados representados pela cor vermelho-claro são estados onde a máxima potência possível da estação é fornecida. Esses estados são os estados de bloqueio, onde a estação não pode receber mais veículos. A cadeia de Markov da Figura 5.11 mostra o comportamento do sistema. Podemos observar que o número ideal de carregadores adicionais é igual a  $(n = m - 1)$  para permitir a utilização da máxima potência que estação pode entregar se porventura for observado o estado  $(0, 2m - 1)$ . É interessante notar que alguns estados encontram-se ligeiramente abaixo do limite de potência, como por exemplo todos os estados de cor vermelho-claro da forma  $(m - k, 2k - 1)$ , para  $k = 1, 2, 3, \dots, m$ . Entretanto, estes só apresentam 25,6 kW de potência disponível, insuficiente para energizar um veículo em fase-CC. No cenário Serviço Imediato, o número de estados do modelo da cadeia de Markov aumentou se comparado com o cenário Básico, devido ao emprego de ESCVEs reservas (ou adicionais). O número de possíveis estados pode ser observado na Equação 5.10, onde a variável  $m$  representa o número de carregadores que a estação pode receber em fase-CC:

$$N_{est}(m) = (0, 5m^2 + 1, 5m + 1) + \sum_{q=0}^{m-2} (m - q). \quad (5.10)$$

A matriz de taxa de transições  $\mathbf{Q}$  será construída seguindo-se o mesmo conceito da cadeia de Markov do cenário Básico. A matriz  $\mathbf{Q}$  está representada na Equação 5.11:

No estado estacionário, sabendo-se que  $\mathbf{Q}$  representa a Matriz Geradora Infinitesimal, que o produto  $\pi \mathbf{Q} = \mathbf{0}$  e que  $\sum_{(i,j) \in \Omega_{SI}} \pi_{i,j}(t) = 1$ , é possível extrair a solução única do sistema linear obtido que resulta no vetor-solução de probabilidades,  $\pi = [\pi_{0,0}, \pi_{0,1}, \pi_{1,0}, \pi_{0,2}, \dots, \pi_{0,2m-1}]$ .

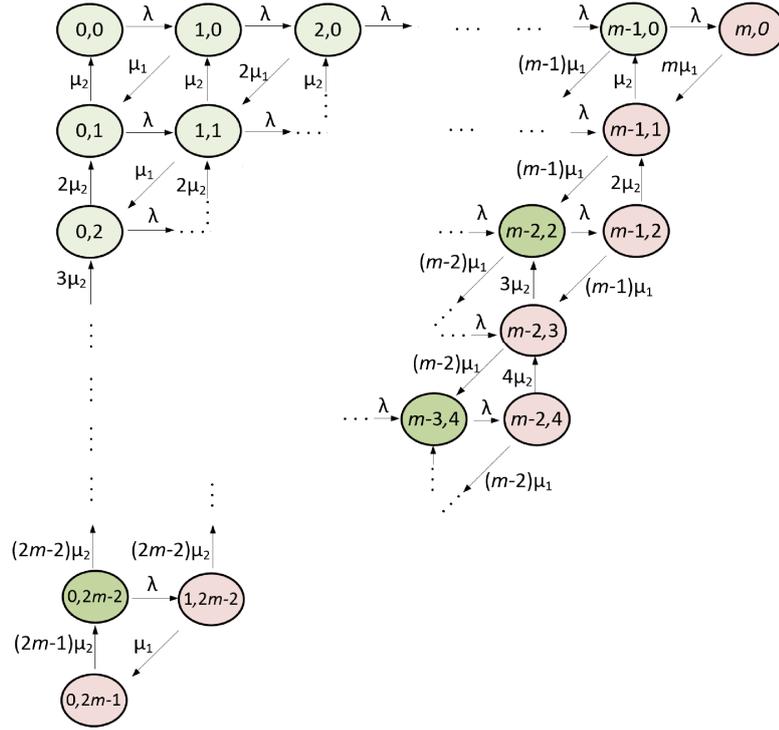


Figura 5.11: Modelo da cadeia de Markov para o cenário Serviço Imediato.

$$\begin{bmatrix}
 (0,0) & (0,0) & (0,1) & (1,0) & (0,2) & (1,1) & (2,0) & (0,3) \cdots & (0,2m-1) & (1,2m-2) \\
 (0,0) & -\lambda & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \cdots & 0 & 0 \\
 (0,1) & \mu_2 & -(\lambda + \mu_2) & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 \cdots & 0 & 0 \\
 (1,0) & 0 & \mu_1 & -(\lambda + \mu_1) & 0 & 0 & \lambda & 0 \cdots & 0 & 0 \\
 (0,2) & 0 & 2\mu_2 & 0 & -(\lambda + 2\mu_2) & 0 & 0 & 0 \cdots & 0 & 0 \\
 (1,1) & 0 & 0 & \mu_2 & \mu_1 & -(\lambda + \mu_1 + \mu_2) & 0 & 0 \cdots & 0 & 0 \\
 (2,0) & 0 & 0 & 0 & 2\mu_1 & -(\lambda + 2\mu_1) & 0 & 0 \cdots & 0 & 0 \\
 (0,3) & 0 & 0 & 0 & 3\mu_2 & 0 & -(\lambda + 3\mu_2) & 0 & 0 & 0 \\
 (1,2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu_2 & 0 & \mu_1 \cdots & 0 & 0 \\
 (2,1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_2 & 0 \cdots & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots \\
 (0,2m-1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \cdots & -(2m-1)\mu_2 & 0 \\
 (1,2m-2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \cdots & \mu_1 & -(\mu_1 + (2m-2)\mu_2)
 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

**Número esperado de veículos em carga** –  $E[N(SI)]$ . No cenário Serviço Imediato, os carregadores sobressalentes possibilitam uma utilização mais eficiente da capacidade da estação, permitindo que um maior número de usuários sejam admitidos no sistema. Cada estado representa um número de veículos em fase-CC e CV como  $n_{ij} = (i + j)$ . Da mesma forma, se a estação estiver congestionada, outro posto de carga terá que ser encontrado nas proximidades. Neste cenário não há vaga de espera nem a opção de esperar conectado ao ESCVE. O número de veículos nesse caso é calculado como:

$$E[N(SI)] = \sum_{(i,j) \in \Omega_{SI}} (i + j) \cdot \pi_{ij}. \quad (5.12)$$

**Probabilidade de bloqueio total** –  $p_b(SI)$ . Os estados de bloqueio nesse cenário estão representados pelos estados de cor vermelho-claro da Figura 5.11. Qualquer

veículo que chega na estação no momento em que o subconjunto de estados corrente é  $\mathcal{S}_b^{(SI)} = \{(m-i, 2i), (m-i-1, 2i+1)\}$ , para  $i = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, m-1\}$ , onde  $\mathcal{S}_b^{(SI)}$  é o conjunto dos estados de bloqueio, deve procurar uma estação próxima, pois não há ESCVEs disponíveis para se conectar. A probabilidade de bloqueio é definida como:

$$p_b(SI) = \sum_{(i,j) \in \mathcal{S}_b^{(SI)}} \pi_{ij}, \quad (5.13)$$

onde  $\mathcal{S}_b^{(SI)} = \{(m-i, 2i), (m-i-1, 2i+1)\}$ , para  $i = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, m-1\}$ .

Pode-se dividir a probabilidade de bloqueio total em 3 parcelas: (i) a probabilidade de bloqueio devido a indisponibilidade de espaço ( $p_{b1}$ ), (ii) a probabilidade de bloqueio devido a falta de energia ( $p_{b2}$ ) e (iii) a probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia ( $p_{b3}$ ). Pode-se equacionar o subconjunto associado a probabilidade de bloqueio total à soma das probabilidades (i), (ii) e (iii), ou seja,  $\mathcal{S}_b^{(SI)} = \mathcal{S}_{b1}^{(SI)} + \mathcal{S}_{b2}^{(SI)} + \mathcal{S}_{b3}^{(SI)}$ . Assim,  $p_b = p_{b1} + p_{b2} + p_{b3}$ . São elas:

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço –  $p_{b1}(SI)$ .* Neste cenário não se observa bloqueio devido a falta de espaço. Este bloqueio particular irá ser analisado posteriormente no cenário Conectado em Espera, logo,  $\mathcal{S}_{b1}^{(SI)} = \emptyset$ .

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de energia –  $p_{b2}(SI)$ .* O bloqueio devido a falta de energia é um caso característico deste cenário em particular. Como este cenário apresenta um sistema de informação que averte os clientes da falta de energia não os recebendo, assume-se que os veículos não contam com a opção de espera conectada ao ESCVE. Os estados que configuram esse bloqueio são  $\mathcal{S}_{b2}^{(SI)} = \{(m-i, 2i), (m-i-1, 2i+1)\}$ , para  $i = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, m-2\}$ . Assim,

$$p_{b2}(SI) = \sum_{(i,j) \in \mathcal{S}_{b2}^{(SI)}} \pi_{ij}, \quad (5.14)$$

onde  $\mathcal{S}_{b2}^{(SI)} = \{(m-i, 2i), (m-i-1, 2i+1)\}$ , para  $i = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, m-2\}$ .

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia –  $p_{b3}(SI)$ .* Este bloqueio se configura em condições onde não há espaço e a energia é insuficiente para abastecer os veículos. O espaço de estados é  $\mathcal{S}_{b3}^{(SI)} = \{(m-i, 2i), (m-i-1, 2i+1)\}$ , para  $i = \{m-1\}$ . Pode-se observar que o estado  $(0, 2m-1)$  apresenta  $2m-1$  veículos em fase-CV, não consumindo toda a energia disponível da estação, porém a energia não é suficiente para receber mais um veículo em fase-CC. Assim,

$$p_{b3}(SI) = \sum_{(i,j) \in \mathcal{S}_{b3}^{(SI)}} \pi_{ij}, \quad (5.15)$$

onde  $\mathcal{S}_{b3}^{(SI)} = \{(m - i, 2i), (m - i - 1, 2i + 1)\}$ , para  $i = \{m - 1\}$ .

**Probabilidade de serviço imediato** –  $p_{c1}(SI)$ . A probabilidade de ser imediatamente servido envolve o espaço de estados da cadeia observado na Figura 5.11, subtraindo-se os estados de bloqueio (estados vermelhos-claro). Assim, tem-se:

$$p_{c1}(SI) = \sum_{(i,j) \in \mathcal{S}_{c1}} \pi_{ij}, \quad (5.16)$$

onde  $\mathcal{S}_{c1} = \Omega_{SI} - \mathcal{S}_b$ .

**Probabilidade de admissão imediata** –  $p_{c2}(SI)$ . O subconjunto de estados  $\mathcal{S}_{c2}^{(SI)} = \emptyset$ . Para esse cenário, a probabilidade de admissão imediata é zero pois, nesse cenário, ao receber veículos, a estação inicia a carga imediatamente. Não há a possibilidade de um veículo entrar na estação e ser colocado em espera.

**Potência consumida esperada** –  $E[P_d(SI)]$ . Essa grandeza retorna o valor da potência consumida pelos veículos, considerando o número de carregadores. O valor é limitado pela potência total disponível na estação que é suficiente para abastecer  $s$  veículos em fase-CC. Cada estado da cadeia de Markov representa uma quantidade de potência consumida por  $i$  veículos em fase-CC e  $j$  veículos em fase-CV denotada como  $P_{ij}$  vezes a probabilidade do estado  $\pi_{ij}$ . Assim, tem-se a potência total gasta no sistema como:

$$P_d(SI) = \sum_{(i,j) \in \Omega_{SI}} P_{ij} \pi_{ij}. \quad (5.17)$$

### 5.1.5 Resultados do cenário Serviço Imediato

No cenário Serviço Imediato (SI) observa-se que os ESCVEs adicionais trazem uma melhoria de desempenho em vários aspectos. Cada um deles será mostrado e comparado com o cenário anterior para se ter uma referência e demonstrar o desempenho obtido. É preciso ressaltar que a comparação dos gráficos apresenta diferença entre o número de carregadores, pois esse cenário apresenta carregadores adicionais, mas ambos os cenários continuam apresentando o limite de só poder abastecer  $m$  veículos em fase-CC concomitantemente. Por exemplo, nos gráficos que apresentam valores relacionados a  $s = 5$  (que abastecem até 3 veículos em fase-CC) nesse cenário, são comparados com  $s = 3$ , no cenário anterior.

**Número esperado de veículos em carga** ( $E[N(SI)]$ ) – Observando os resultados do cenário Serviço Imediato na Figura 5.12, quando  $s = 5$  e  $\lambda = 50$  veículos/hora, o número de veículos  $E[N(SI)]$  contabiliza 3,4636, valor superior ao cenário anterior. Quando se aumenta o número de ESCVEs na estação ( $s = 7, 9, \dots, 15$ ), tem-se  $E[N(SI)] = 4, 7234, 5, 9751, 7, 2177, 8, 4498, 9, 6697$ . O número de veículos em carga

aumentou devido ao reuso de energia ainda disponível pela estação devido aos carregadores sobressalentes. A instalação de sobressalentes proporcionou, em relação ao cenário Básico, um aumento em 20, 43%, 25, 10%, 26, 89%, 27, 36% e 34, 69%, para  $s = 5$  a 15, respectivamente. Esses resultados evidenciam que a adoção de ESC-VEs sobressalentes permitiu um aumento no número de clientes atendidos além do melhor uso da potência ociosa, estimado mais adiante.

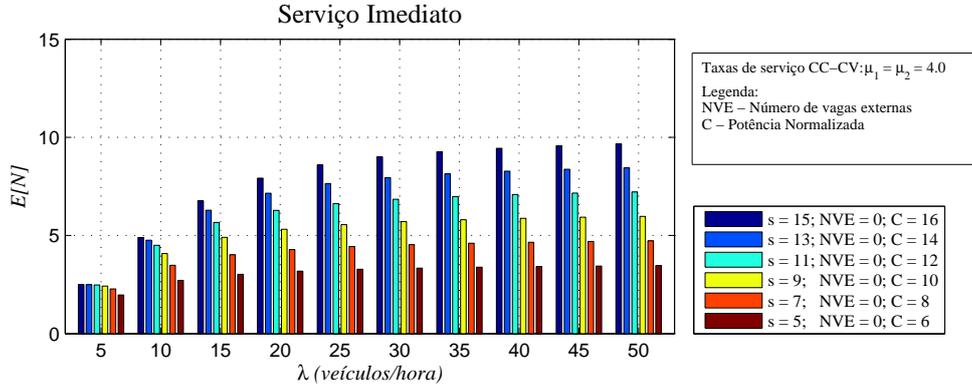


Figura 5.12: Veículos em carga no cenário Serviço Imediato.

**Probabilidade de bloqueio total ( $p_b(SI)$ )** – A Figura 5.13 mostra uma diferença na probabilidade de bloqueio total entre os cenários Básico (Figura 5.4) e Serviço Imediato. Por exemplo, considerando  $s = 5$  e  $\lambda = 5$  veículos/hora, as probabilidades de bloqueio são  $p_b(B) = 0,2822$  e  $p_b(SI) = 0,2123$ . A diferença na probabilidade de bloqueio entre os 2 cenários diminui para a taxa de chegada máxima, como se pode observar que  $p_b(B) = 0,8850$  e  $p_b(SI) = 0,8615$ , para  $\lambda = 50$  veículos/hora. Mais uma vez o emprego de carregadores adicionais contribuiu na redução da probabilidade de bloqueio no cenário Serviço Imediato, que usa melhor a capacidade de energia disponível. É interessante observar que esta configuração de estação de carga apresenta a formulação  $p_b = p_{b2} + p_{b3}$ .

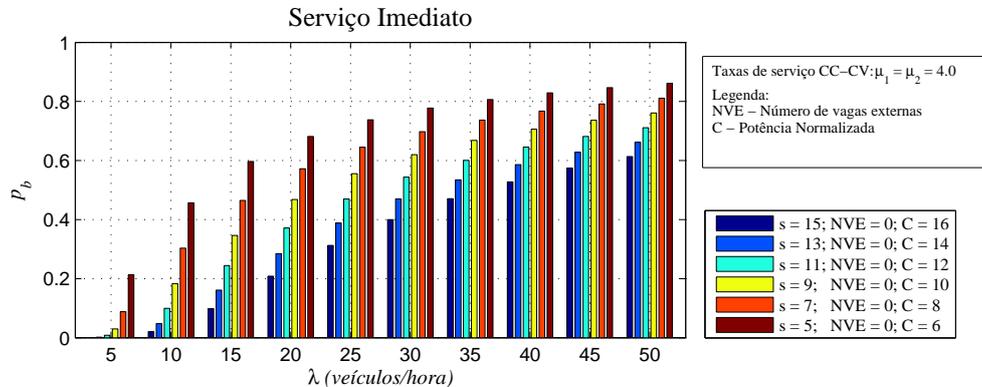


Figura 5.13: Probabilidade de bloqueio total no cenário Serviço Imediato.

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço ( $p_{b1}(SI)$ )* – Neste cenário, a pro-

babilidade de bloqueio devido a falta de espaço é zero. Este cenário só não apresenta espaço disponível nos estados  $(0, 2m - 1)$  e  $(1, 2m - 2)$ , pois estes estados configuram bloqueio devido a falta de espaço e energia. O estado  $(0, 2m - 1)$  por apresentar  $2m - 1$  veículos em fase-CV, apresenta 25,6 kW de energia disponível, insuficiente para receber mais um veículo. Excetuando estes, os outros estados de bloqueio da cadeia são relacionados a falta de energia. Haverá espaço, mas como este cenário informa da insuficiência de energia para os usuários, estes são redirecionados para as estações mais próximas.

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de energia ( $p_{b2}(SI)$ )* – Pode-se notar pela Figura 5.14, quando o fluxo de veículos é o menor, a probabilidade de bloqueio devido a falta de energia é praticamente zero para  $s = 11, 13$  e  $15$  carregadores. Este aspecto pode ser importante se o fluxo de veículos de uma determinada região puder ser estimado nessa faixa. Não seria vantajoso instalar mais que 11 carregadores, pois seriam gastos mais recursos sem um efetivo aproveitamento. À medida que a taxa de chegada aumenta, a probabilidade de bloqueio devido a falta de energia, naturalmente, é sempre menor quando se instala na estação de carga mais carregadores. Mas a diferença entre os valores das probabilidades de bloqueio entre uma estação com  $s = 5$  e  $s = 15$  é maior para taxas mais baixas do que para as mais altas. Taxas altas de chegada tendem a esgotar a energia da estação mesmo com um número elevado de carregadores, e a probabilidade de bloqueio devido a falta de energia tende a se aproximar da probabilidade de bloqueio de estações com um menor número de carregadores, tornando essa diferença menor.

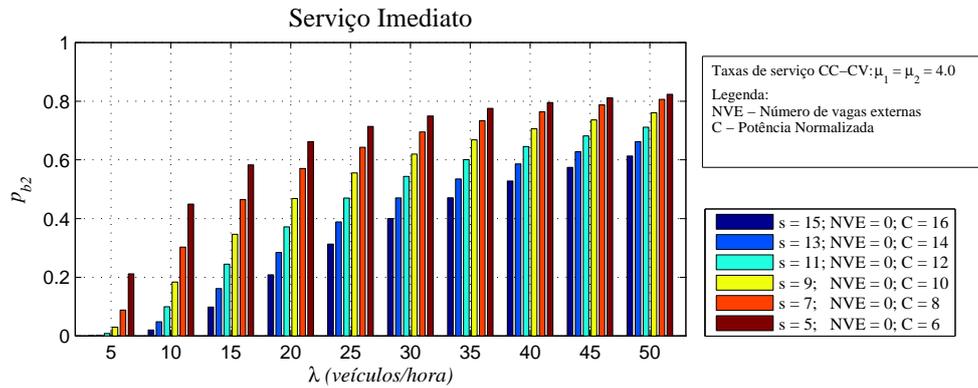


Figura 5.14: Probabilidade de bloqueio devido a falta de energia no cenário Serviço Imediato.

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia ( $p_{b3}(SI)$ )* – Neste cenário, a probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia abrange os estados  $\mathcal{S}_{b3}(SI) = \{(1, 2m - 2), (0, 2m - 1)\}$ . Pela Figura 5.15, pode-se observar que esta parcela de probabilidade não apresenta nenhum valor expressivo. A probabilidade associada aos estados de falta de espaço e energia é muito pequena, atingindo um

valor máximo para maior taxa de chegada e para  $s = 5$  que vale  $p_{b3}(SI) = 0.038$ , ou seja, praticamente zero.

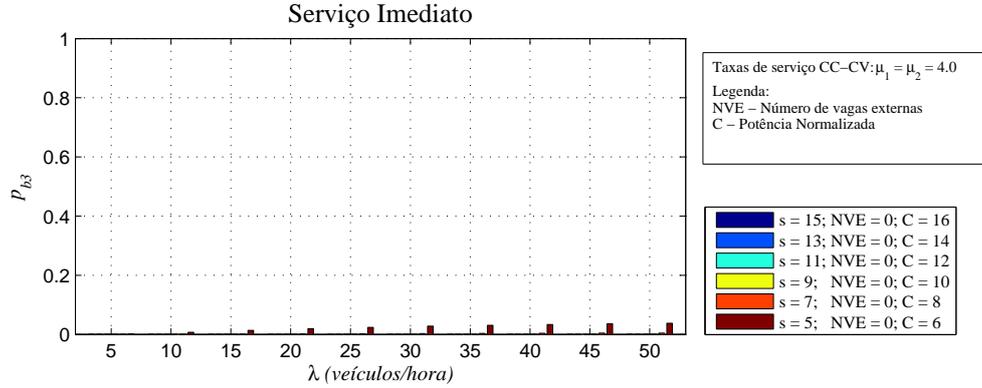


Figura 5.15: Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia no cenário Serviço Imediato.

**Probabilidade de serviço imediato –  $p_{c1}(SI)$ .** Este cenário apresenta resultados que superam o cenário anterior devido aos ESCVEs reservas. O reuso de energia beneficia um aumento na probabilidade de serviço imediato. Com base na Figura 5.16 nota-se que as estações com 15 ESCVEs, para taxa de chegada máxima, apresentam probabilidade  $p_{c1}(SI) = 0,9996$  de aceitar veículos. No cenário anterior a probabilidade era  $p_{c1}(B) = 0,9969$ . Em estações de pequeno porte – 5 ESCVEs, a probabilidade é de  $p_{c1}(SI) = 0,7868$ . Em relação ao cenário anterior tinha-se  $p_{c1}(B) = 0,7178$ . Comparando os gráficos das Figuras 5.7 e 5.16 é possível constatar que, para estações com 15 carregadores no cenário Serviço Imediato, até a taxa de chegada de 35 veículos/hora, a estação consegue absorver mais de 50% dos veículos (52,94%). Por outro lado, no cenário Básico, esta característica só é observada até o fluxo de chegada de 25 veículos/hora (55,90%). Os cenários Básico e Serviço Imediato, apesar de diferirem no aspecto de reuso de capacidade, apresentam uma característica em comum: ambos não disponibilizam vagas de espera, e assim  $p_{c2}(B) = p_{c2}(SI) = 0$ .

**Consumo de potência média esperada ( $E[P_d(SI)]$  (kW))** – É interessante notar que o cenário Serviço Imediato apresenta melhor utilização de energia do que o cenário Básico. Pelo gráfico da Figura 5.17 observa-se que a potência utilizada para todas as taxas de chegada de veículos e para todas as configurações de ESCVEs é a maior. A Tabela 5.4 destaca valores obtidos dos gráficos dos cenários Básico e Serviço Imediato para uma comparação. Através dos gráficos da Figura 5.17, pode-se perceber que devido a instalação de  $s$  ESCVEs, o limite de máxima potência não é atingido em nenhum dos casos, mesmo para a taxa mais alta de chegada de veículos havendo um efetivo reaproveitamento de energia. Para as taxas de chegada de 10, 30

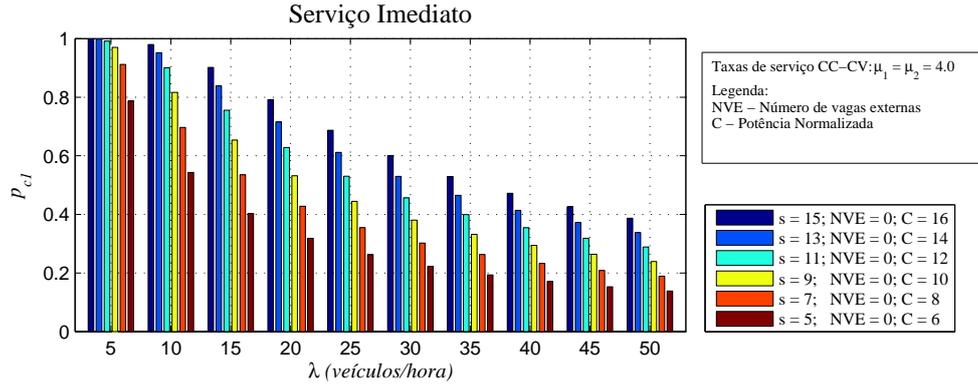


Figura 5.16: Probabilidade de serviço imediato no cenário Serviço Imediato.

e 50 veículos/hora é observado na Tabela 5.4 o desempenho superior do cenário Serviço Imediato em relação ao cenário Básico. O caso mais expressivo ocorre na taxa máxima de chegada e para o maior número de carregadores, como podemos destacar no cenário Básico que entrega  $P_d(B) = 291,56$  kW enquanto no cenário Serviço Imediato tem-se  $P_d(SI) = 371,31$  kW. No cenário Serviço Imediato, a probabilidade do sistema estar operando na máxima potência descrita na tabela 5.5 mostra, para as taxas de chegada consideradas, que a probabilidade da estação estar consumindo máxima potência diminui para estações com mais servidores. E, da mesma forma que o cenário anterior, para maiores ocupações da estação, a probabilidade de ocorrência de máxima potência aumenta. Nesse cenário há um maior número de estados que operam na máxima potência, refletindo em maiores valores de probabilidade que podem ser verificados na tabela 5.5. O cenário básico só apresenta o estado  $(m, 0)$  que consome a máxima potência.

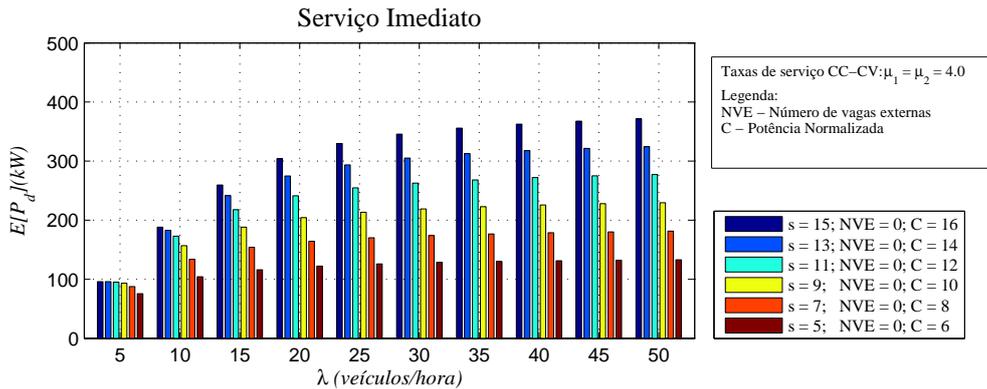


Figura 5.17: Consumo de Potência média no cenário Serviço Imediato

**Porcentagem da potência usada esperada ( $E[P_u(SI)]$  (%))** – O gráfico da Figura 5.18 mostra o desempenho percentual dos 2 cenários Básico e Serviço Imediato. A Tabela 5.7 apresenta alguns valores extraídos dos gráficos das Figuras 5.9 e 5.18 dos cenários Básico e Serviço Imediato, respectivamente. Como já observado

Tabela 5.4: Potência consumida no cenário Serviço Imediato (kW).

Cenários	$\lambda$	$s = 5$	$s = 7$	$s = 9$	$s = 11$	$s = 13$	$s = 15$
Básico	10	90, 30	115, 52	137, 30	155, 16	168, 86	178, 55
	30	107, 11	142, 13	176, 70	210, 75	244, 19	276, 90
	50	110, 43	146, 99	183, 40	219, 65	255, 71	291, 56
Serviço Imediato	10	104, 28	133, 80	156, 79	172, 88	182, 79	188, 08
	30	128, 23	174, 08	219, 01	262, 77	305, 08	345, 62
	50	133, 00	181, 38	229, 44	277, 16	324, 47	371, 31

Tabela 5.5: Probabilidade de consumo de máxima potência no cenário Serviço Imediato.

Cenários	$\lambda$	$s = 5$	$s = 7$	$s = 9$	$s = 11$	$s = 13$	$s = 15$
Básico	10	0,0662	0,0249	0,0089	0,0030	0,0009	0,0003
	30	0,1018	0,0470	0,0217	0,0099	0,0045	0,0020
	50	0,1106	0,0529	0,0253	0,0121	0,0057	0,0027
Serviço Imediato	10	0,1590	0,0992	0,0572	0,0298	0,0139	0,0057
	30	0,3141	0,2738	0,2368	0,2026	0,1711	0,1422
	50	0,3653	0,3380	0,3115	0,2858	0,2611	0,2377

na subseção anterior, o cenário Serviço Imediato, percentualmente, também apresenta um desempenho superior em relação ao cenário Básico. Isso é observado para todas as taxas de chegada e para todos os portes de estação de carga e mostra que a utilização de carregadores reserva promove efetivamente uma melhor relação entre a potência consumida e a potência disponível na estação de carga.

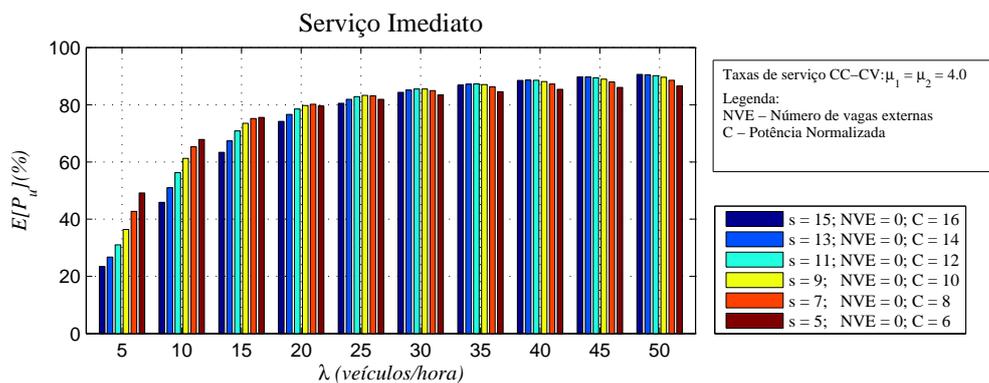


Figura 5.18: Porcentagem de potência usada no cenário Serviço Imediato.

### 5.1.6 Modelo do cenário Conectado em Espera

O cenário Conectado em Espera (CE) pode ser considerado uma variante do cenário Serviço Imediato. É considerada aqui neste cenário a possibilidade de o veículo, ao constatar que a estação de carga se encontra no limite de energia de-



Nesse novo cenário, quando algum veículo entrar na estação nessas condições, há a possibilidade de se conectar ao ESCVE e esperar a ocasião de ser energizado. Os estados azuis mostram que há 1 veículo conectado a um ESCVE esperando. Os estados de cor roxa no plano  $(n - 2)$  mostram que há  $(n - 2)$  veículos na espera e assim por diante. Uma vez que um veículo conclui a fase-CC e muda para a fase-CV, havendo capacidade disponível, um veículo na espera já pode receber carga iniciando a fase-CC. Soma-se 1 veículo em fase-CC e subtrai-se 1 veículo na espera. Caso contrário, não havendo capacidade, há uma transição de estados subtraindo-se uma unidade de veículos em fase-CC e somando-se uma unidade aos veículos em fase-CV. No limite de capacidade da estação, um veículo que termina a fase-CV e deixa a estação liberando apenas a capacidade normalizada  $C = 1$  ou 26,5 kW, não habilita a carga de outro veículo em espera, apesar de haver uma mudança de estados subtraindo-se 1 veículo do número de veículos em fase-CV. É possível observar tais transições nos planos acima do plano 0 na Figura 5.19.

No cenário Conectado em Espera, o número de estados do modelo da cadeia de Markov aumentou se comparado com o cenário Serviço Imediato. Isso se deve ao fato de o veículo poder esperar, conectado ao ESCVE, o momento certo para ser abastecido. O plano 1 na Figura 5.20, representado pelo subconjunto dos estados azuis  $\mathcal{S}_{p1.1}^{(CE)} = \{(m - i, 2i, 1), (m - i - 1, 2i + 1, 1)\}$ , para  $i = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, m - 2\}$  mostra que há 1 veículo conectado esperando o momento adequado para abastecer (terceira variável dos estados). O número de possíveis estados é:

$$n_{est}(m) = (0.5m^2 + 1.5m + 1) + \sum_{q=0}^{m-2} (m - q) + 2 \cdot \sum_{p=1}^{m-1} (m - p), \quad (5.18)$$

onde  $m$  é o número de veículos que podem ser abastecidos concomitantemente em fase-CC na estação.

**Número esperado de veículos –  $E[N(CE)]$ .** No cenário Conectado em Espera, os carregadores em modo espera possibilitam uma utilização ainda mais eficiente da capacidade da estação se comparado ao cenário Serviço Imediato, permitindo um maior número de usuários no sistema através do modo de espera. Uma vez que a estação se encontre com todos os ESCVEs ocupados, em processo de carga ou com veículos aguardando conectados, outro posto de carga terá que ser encontrado nas proximidades. O número de veículos nesse caso será:

$$E[N(CE)] = \sum_{(i,j,k) \in \Omega_{CE}} (i + j + k) \cdot \pi_{ijk}. \quad (5.19)$$

**Número esperado de veículos conectados em espera –  $E[N_e(CE)]$ .** Este valor representa o número de clientes que se encontram conectados esperando o momento

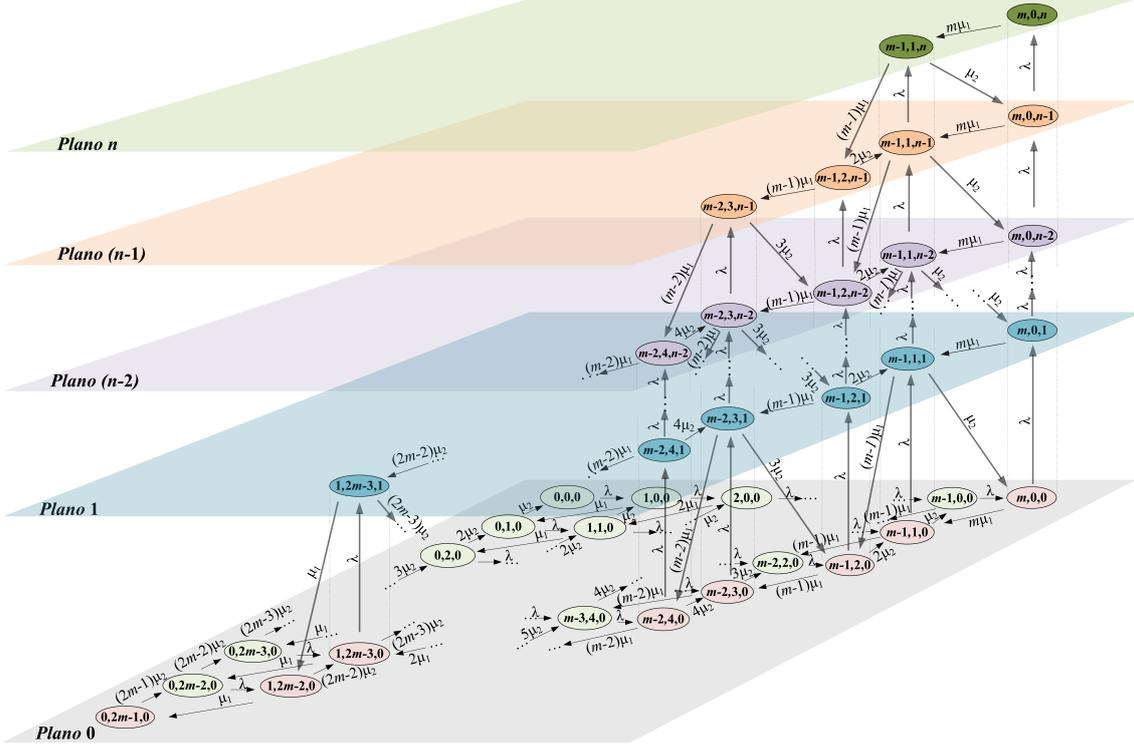


Figura 5.20: Modelo da cadeia de Markov para o cenário Conectado em Espera.

oportuno de receber carga, correspondendo a todos os estados acima do plano 0. O número de veículos nesse caso será:

$$E[N_e(CE)] = \sum_{(i,j,k) \in \mathcal{S}_{N_e}^{(CE)}} k \cdot \pi_{ijk}, \quad (5.20)$$

onde  $\mathcal{S}_{N_e}^{(CE)} = \Omega_{CE} - \mathcal{S}_{p1.0}^{(CE)}$  para  $k = 1, 2, 3, \dots, n$ .<sup>2</sup>

**Probabilidade de bloqueio –  $p_b(CE)$ .** Qualquer veículo que chega na estação no momento em que o estado corrente seja  $\mathcal{S}_b^{(CE)} = \{(m - i, 2i, n - i), (m - i - 1, 2i + 1, n - i)\}$ , para  $i = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, n\}$ , não consegue abastecer, onde  $\mathcal{S}_b^{(CE)} \subset \Omega_{CE}$  é o subconjunto dos estados de bloqueio do cenário Conectado em Espera. A probabilidade de bloqueio total é definida para este cenário como:

$$p_b(CE) = \sum_{(i,j,k) \in \mathcal{S}_b^{(CE)}} \pi_{ijk}, \quad (5.21)$$

onde  $\mathcal{S}_b^{(CE)} = \{(m - i, 2i, n - i), (m - i - 1, 2i + 1, n - i)\}$ , para  $i = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, n\}$ .

**Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço –  $p_{b1}(CE)$ .** Não há bloqueio devido a falta de espaço apenas, logo  $\mathcal{S}_{b1}^{(CE)} = \emptyset$ .

**Probabilidade de bloqueio devido a falta de energia –  $p_{b2}(CE)$ .** O bloqueio devido

<sup>2</sup> $\mathcal{S}_{p1.0}^{(CE)}$  significa todos os estados do plano 0.

apenas a falta de energia é um caso característico do cenário Serviço Imediato como já discutido anteriormente. Nesse cenário, o subconjunto  $\mathcal{S}_{b2}^{(CE)} = \emptyset$ , pois não há situação onde falte energia, exista espaço e o veículo seja bloqueado. Se há espaço, o veículo é admitido para ficar conectado em espera.

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia –  $p_{b3}(CE)$ .* Neste cenário o espaço de estados que configura a probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia é  $\mathcal{S}_{b3}^{(CE)} = \{(m - i, 2i, n - i), (m - i - 1, 2i + 1, n - i)\}$ , para  $i = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, n\}$ . Assim,

$$p_{b3}(CE) = \sum_{(i,j,k) \in \mathcal{S}_{b3}^{(CE)}} \pi_{ijk}, \quad (5.22)$$

onde  $\mathcal{S}_{b3}^{(CE)}$  e  $\mathcal{S}_{b3}^{(CE)} = \{(m - i, 2i, n - i), (m - i - 1, 2i + 1, n - i)\}$ , para  $i = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, n\}$ . A probabilidade de bloqueio total neste cenário se resume em  $p_{b3}$ . Pode-se dizer que  $\mathcal{S}_b^{(CE)} = \mathcal{S}_{b3}^{(CE)}$ .

**Probabilidade de serviço imediato –  $p_{c1}(CE)$ .** A probabilidade de ser imediatamente servido envolve o espaço de estados do plano 0 da cadeia de Markov da Figura 5.20, excetuando-se os estados de bloqueio (estados vermelhos-claro). Assim,

$$p_{c1}(CE) = \sum_{(i,j,k) \in \mathcal{S}_{c1}^{(CE)}} \pi_{ijk}, \quad (5.23)$$

onde  $\mathcal{S}_{c1}^{(CE)} = \mathcal{S}_{p1.0}^{(CE)} - \{(m - i, 2i, 0), (m - i - 1, 2i + 1, 0)\}$ , para  $i = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, m - 1\}$ .

**Probabilidade de admissão imediata –  $p_{c2}(CE)$ .** Para esse cenário, a probabilidade de admissão imediata consiste em a estação receber o veículo e o colocar em espera até o momento em que houver energia disponível. Com base na Figura 5.20, o espaço de estados é formado pelos estados vermelhos-claro do plano 0 que permitem a transição para o plano 1, pelos estados azuis do plano 1 que permitem a transição para o plano 2, e assim por diante, até os estados do plano  $n-1$  que permitem a transição para o plano  $n$ . Estes são estados que permitem a chegada de veículos para colocá-los em espera. Assim,

$$p_{c2}(CE) = \sum_{(i,j,k) \in \mathcal{S}_{c2}^{(CE)}} \pi_{ijk}, \quad (5.24)$$

onde  $\mathcal{S}_{c2}^{(CE)} = 1 - \{\mathcal{S}_b^{(CE)} + \mathcal{S}_{c1}^{(CE)}\}$ .<sup>3</sup>

**Potência consumida esperada –  $E[P_d(CE)]$ .** Essa grandeza retorna o valor da

<sup>3</sup>Esta notação para esse espaço de estados vem da propriedade de  $p_{c1} + p_{c2} = 1 - p_b$ .

potência consumida pelos veículos ou fornecida pela estação de carga, considerando o número de carregadores. O valor a ser consumido é limitado pela potência total disponível na estação que é suficiente para abastecer  $m$  veículos em fase-CC. De forma semelhante ao cenário anterior tem-se:

$$E[P_d(CE)] = \sum_{(i,j,k) \in \Omega_{CE}} P_{ijk} \pi_{ijk}. \quad (5.25)$$

**Tempo esperado conectado em espera** –  $E[T_e(CE)]$ . Esse valor mostra o tempo que o cliente espera conectado ao sistema até a oportunidade de começar o processo de carga, que está vinculado a saída de veículos do sistema com bateria carregada e/ou a transição de veículos de fase-CC para a fase-CV. A variável retorna o tempo gasto conectado em horas:

$$E[T_e(CE)] = \frac{E[N_e(C)]}{\lambda(1 - p_b)}. \quad (5.26)$$

### 5.1.7 Resultados do cenário Conectado em Espera

No cenário Conectado em Espera, os ESCVEs que estiverem impedidos de fornecer energia devido a estação de carga estar no limite de fornecimento, irão abrigar os veículos para que possam se conectar e aguardar o momento em que a energia se torne disponível. É considerado nesse cenário que os veículos sempre se conectam e, não havendo energia suficiente, esperam, a não ser que não existam carregadores vagos. Este cenário apresenta ganhos em relação ao cenário anterior, apontados a seguir.

**Número esperado de veículos** ( $E[N(CE)]$ ) – Observando o gráfico da Figura 5.21, que apresenta como resultado o número de veículos da estação, considerando a estação com  $s = 5$  e atribuindo uma taxa de chegada com  $\lambda = 50$  veículos/hora, o número de veículos no cenário é  $E[N(CE)] = 4,8354$ , superior ao cenário anterior ( $E[N(SI)] = 3,4636$ ) devido aos veículos em espera conectados. Para essa taxa de chegada máxima, se o número de ESCVEs na estação aumentar ( $s = 7, 9, \dots, 15$ ), tem-se  $E[N(CE)] = 6,7599, 8,6745, 10,5770, 12,4644, 14,3328$ , respectivamente. O acréscimo do número de veículos na estação deve-se à capacidade de receber os veículos nos carregadores que estão impedidos de fornecer carga naquele instante. A espera conectada, em relação ao cenário Serviço Imediato, promoveu um aumento no número de veículos na estação em 39,60%, 43,11%, 45,17%, 46,54%, 47,51% e 48,22%, para  $s = 5$  a 15, respectivamente, para a taxa de chegada máxima. Esses resultados evidenciam que a instalação de ESCVEs sobressalentes, ao habilitar veículos conectados, permitiu um aumento no número de clientes atendidos além do melhor uso da potência ociosa,

estimado logo a seguir.

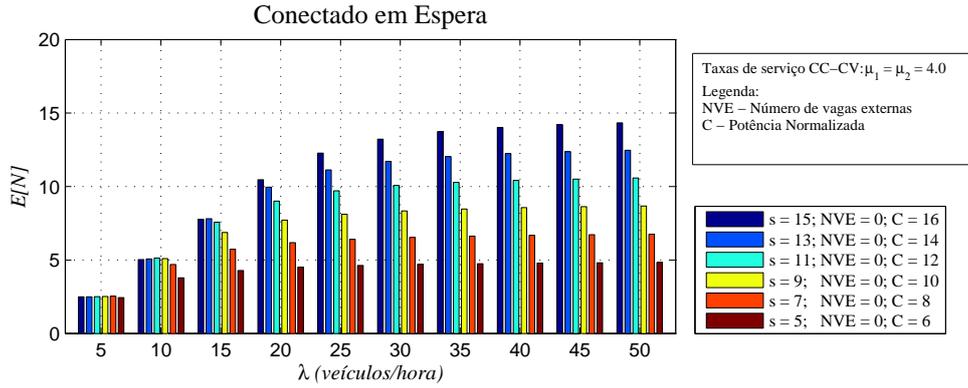


Figura 5.21: Número esperado de veículos no cenário Conectado em Espera.

**Número esperado de veículos conectados em espera ( $E[N_e(CE)]$ )** – Através da Figura 5.22, podemos visualizar o número de veículos que estão conectados ainda aguardando o momento em que a energia se torne disponível para começarem a ser carregados. É interessante notar que para esse cenário, no limite superior de ocupação, ou seja, para as taxas máximas de chegada e número máximo de ESCVEs ( $s = 15$  e  $\lambda = 50$  veículos/hora), o número de veículos em espera atinge  $E[N_e(CE)] = 4,0132$ . Isso significa que dos 15 carregadores da estação, 4 estão recebendo veículos em modo espera e praticamente 10 estão sendo usados para energizar os veículos em carga. É interessante observar que para estações com  $s = 11$ , à taxa de 20 veículos/hora, há um maior acúmulo de veículos em espera. Para esta mesma taxa de chegada, para as estações que possuem  $s = 7$  e  $s = 15$  há um número de veículos em espera semelhante, 1,3319 e 1,3189, respectivamente. Ainda para essa mesma taxa de chegada, as estações com  $s = 11$  e  $s = 13$  apresentam 1,5871 e 1,6169 veículos em espera, em média. Essa similaridade no número de veículos em espera para estes casos se explica: as estações com mais carregadores possuem maior celeridade de serviço e mais carregadores em operação, abrigam mais veículos em carga que os cenários com menos carregadores, mas coincidem, para essa taxa de chegada, com o número de veículos em espera das estações de menor porte.

**Probabilidade de bloqueio total ( $p_b(CE)$ )** – Observando a Figura 5.23, pode-se constatar que o cenário Conectado em Espera apresenta um melhor desempenho em relação ao cenário Serviço Imediato (Figura 5.13), principalmente nas baixas taxas de chegada e em estações de menor porte. Comparando os 2 cenários, balizados por  $s = 5$  e  $\lambda = 5$  veículos/hora, as probabilidades de bloqueio são  $p_b(SI) = 0,2123$  e  $p_b(CE) = 0,0948$ , respectivamente. Para  $s = 5$  e  $\lambda = 10$  veículos/hora, nota-se também uma diferença significativa, pois  $p_b(SI) = 0,4569$  e  $p_b(CE) = 0,3608$ . Para as taxas de chegada mais elevadas, os valores tendem a ficar mais próximos em virtude da intensa ocupação da estação devido ao alto fluxo de veículos. Por exemplo,

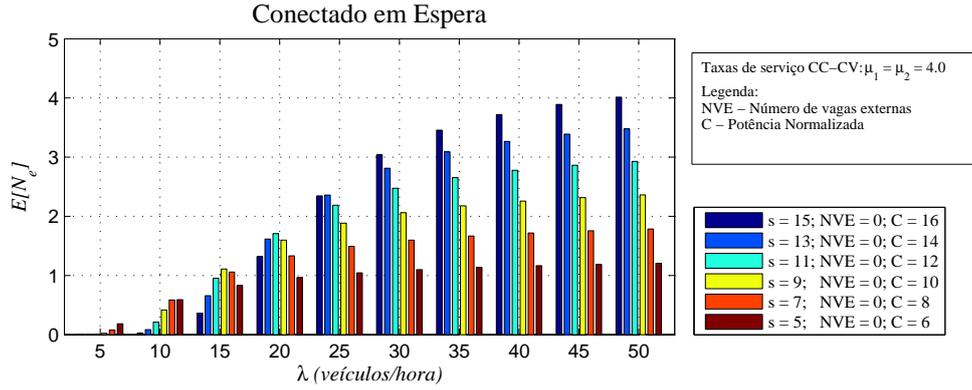


Figura 5.22: Número esperado de veículos conectados em espera no cenário Conectado em Espera.

para  $\lambda = 50$  veículos/hora, tomando os extremos em número de carregadores, para  $s = 5$ , as probabilidades de bloqueio são  $p_b(SI) = 0,8615$  e  $p_b(CE) = 0,8548$  e para  $s = 15$ ,  $p_b(SI) = 0,6132$  e  $p_b(CE) = 0,5872$ . A possibilidade do veículo esperar conectado o momento adequado para abastecer promove uma redução da probabilidade de bloqueio no cenário Conectado em Espera, em relação aos cenários Serviço Imediato e Básico. Observa-se, logo a seguir, que para este modelo de estação de carga  $p_b = p_{b3}$ .

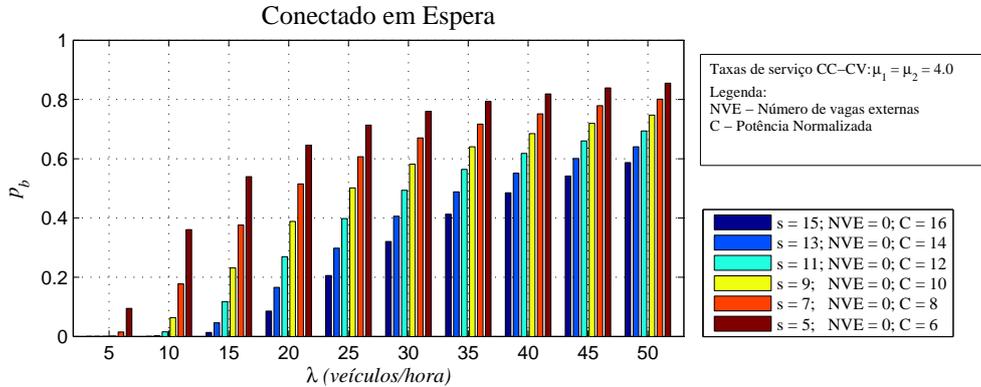


Figura 5.23: Probabilidade de bloqueio total no cenário Conectado em Espera.

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço ( $p_{b1}(CE)$ )* – Neste cenário, a probabilidade de bloqueio somente devido a falta de espaço é zero. Todos os estados que simbolizam falta de espaço também configuram falta de energia.

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de energia ( $p_{b2}(CE)$ )* – O bloqueio devido a falta de energia nesse cenário é zero. Os veículos nunca são bloqueados em relação a falta de energia apenas nesse cenário. Mesmo que não haja energia, haverá espaço para receber os clientes em modo espera.

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia ( $p_{b3}(CE)$ )* – É interessante mencionar novamente os estados que representam essa probabilidade de

bloqueio. Neste cenário a probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia abrange os estados  $\mathcal{S}_{b3}^{(CE)} = \{(m - i, 2i, n - i), (m - i - 1, 2i + 1, n - i)\}$ , para  $i = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, n\}$ . Pela Figura 5.20, pode-se observar que estes estados não apresentam espaço nem energia disponível, se resumindo à probabilidade de bloqueio total, conforme já analisado. Assim, pode-se constatar que o gráfico da Figura 5.24 é idêntico ao da Figura 5.23

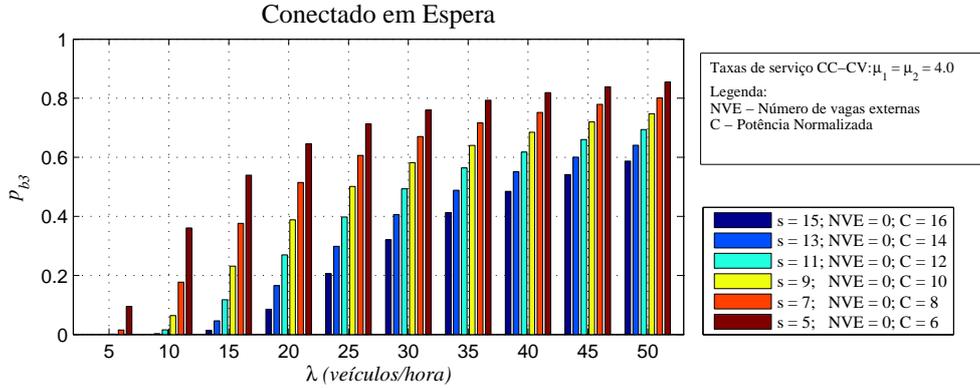


Figura 5.24: Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia no cenário Conectado em Espera.

**Probabilidade de serviço imediato** –  $p_{c1}(CE)$ . Este cenário oferece a possibilidade de veículos esperarem conectados. Essa característica irá influenciar nos valores das probabilidades do cenário Conectado em Espera, principalmente nas altas taxas de chegada. Comparando a Figura 5.25 com a Figura 5.16 do cenário anterior, nota-se que em estações de grande porte ( $s = 13$  e  $15$ ) e para baixas taxas de chegada (5 e 10 veículos/hora), a probabilidade de ser imediatamente servido é alta, muito semelhante ao cenário Serviço Imediato. A partir de fluxos de chegada mais elevados, a chance de ser servido de imediato diminui, devido à espera conectada. Este cenário apresenta resultados de  $p_{c1}(CE)$  menores que o cenário anterior devido à possibilidade de espera conectada. O reuso de energia produz uma redução na probabilidade de serviço imediato. Com base na Figura 5.16 nota-se que as estações com  $s = 15$  ESCVEs apresentam probabilidade  $p_{c1}(SI) = 0,9996$  de aceitar veículos. Neste cenário a probabilidade é  $p_{c1}(CE) = 0,9995$ , valores praticamente iguais. Em estações de pequeno porte – 5 ESCVEs, a probabilidade é de  $p_{c1}(CE) = 0,6457$ . Em relação ao cenário anterior tinha-se  $p_{c1}(SI) = 0,7868$ . O fato de o cenário permitir aos veículos esperarem conectados reduz a probabilidade de serviço imediato.

**Probabilidade de admissão imediata** –  $p_{c2}(CE)$ . Pode-se observar na Figura 5.26 que, para baixas taxas de chegada e para elevado número de servidores ( $s = 15$ ), a probabilidade de ser imediatamente servido é muito alta, como constatado no gráfico da Figura 5.25, logo a probabilidade de ser colocado em

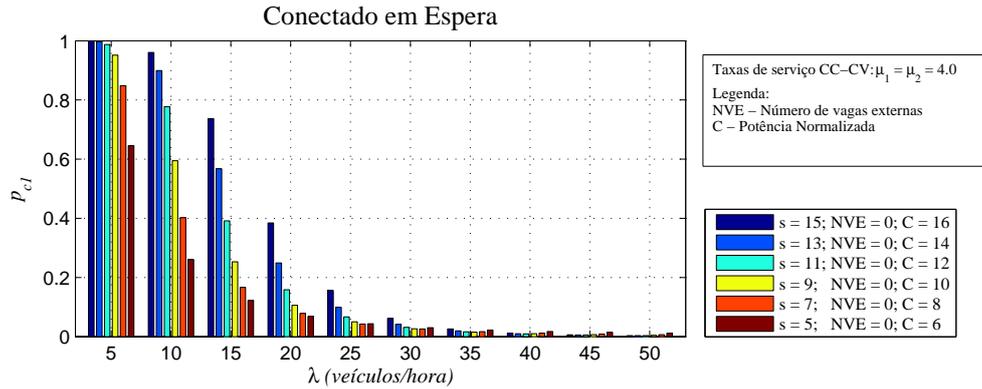


Figura 5.25: Probabilidade de serviço imediato no cenário Conectado em Espera.

espera é muito pequena. Para a taxa de 5 veículos/hora tem-se  $p_{c2}(CE) = 0,0005, 0,0028, 0,0125, 0,0470, 0,1364$  e  $0,2595$  para  $s = 15, 13, 11, 9, 7$  e  $5$  carregadores. À medida que a taxa de chegada aumenta, os carregadores começam a ficar ocupados em serviço e a probabilidade de ser imediatamente posto em espera aumenta. Observa-se esse comportamento nas taxas mais altas de chegada de veículos. Quanto maior o porte da estação, maior é a probabilidade de o veículo ser admitido nos carregadores em espera. Verifica-se pela análise do gráfico da figura 5.25 e pela condição  $p_{c1} + p_{c2} = 1 - p_b$  que, à medida que a probabilidade de o veículo ser imediatamente servido decresce, a probabilidade de ser posto em espera aumenta, e mais ainda nas estações com número elevado de carregadores.

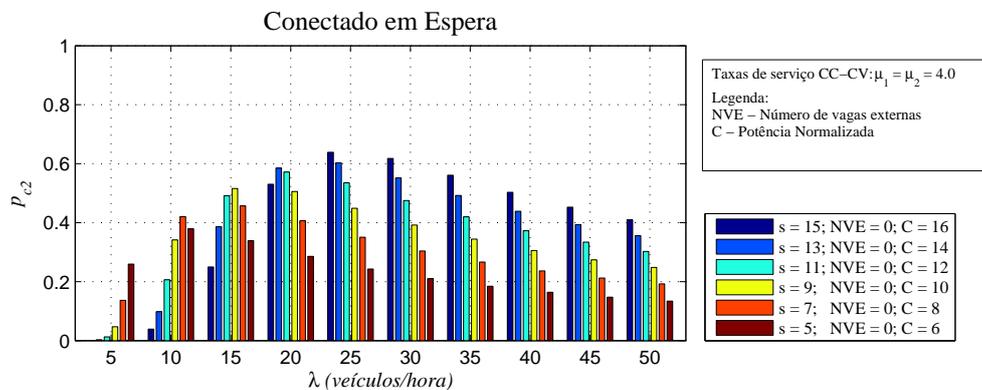


Figura 5.26: Probabilidade de admissão imediata no cenário Conectado em Espera.

**Potência consumida esperada ( $E[P_d(CE)]$  (kW))** – Pelo gráfico da Figura 5.21 é possível observar que o cenário Conectado em Espera, ao permitir que veículos aguardem conectados, consegue receber mais veículos e, assim, no momento da disponibilidade de energia, estes já estão conectados, prontos para receberem carga. O resultado do melhor desempenho é observado na Figura 5.27. A Tabela 5.7 resume o gráfico, mostrando a potência fornecida pela estação para taxas de chegada baixa ( $\lambda = 10$  veículos/hora), moderada ( $\lambda = 30$  veículos/hora) e alta ( $\lambda = 50$  veícu-

los/hora) e para  $s = 5$  até 15 carregadores. A Tabela 5.7 mostra também a potência consumida nos cenários Básico e Serviço Imediato, para comparação dos valores obtidos. Este cenário apresentou um desempenho superior ao cenário Serviço Imediato, e conseqüentemente ao cenário Básico. Por exemplo, tomando o máximo número de ESCVEs,  $s = 15$  e baixa taxa de chegada, foram conseguidos ganhos de 3,85 kW e 13,38 kW em relação aos cenários Serviço Imediato e Básico, respectivamente. Para taxas de chegada moderadas, os ganhos foram de 45,59 kW e 114,31 kW para os cenários Serviço Imediato e Básico, respectivamente. Para altas taxas de chegada, notam-se ganhos de 24,96 kW e 104,71 kW para os cenários Serviço Imediato e Básico, respectivamente. Percebe-se que os maiores ganhos estão nas taxas de chegada moderadas. Observando os gráficos das Figuras 5.3, 5.12, 5.21 e 5.22, justifica-se o maior valor de potência consumida nas taxas moderadas face à diferença observada entre o número de veículos em carga no cenário Conectado em Espera em relação ao cenário Básico. Para taxa de 50 veículos/hora, tem-se que o número de veículos em carga  $E[N(B)] = 7,5927$ ,  $E[N(SI)] = 9,6697$ ,  $E[N(CE)] - E[N_e(CE)] = 10,3196$ . Fazendo  $10,3196 - 9,6697 = 0,6449$  e  $10,3196 - 7,5927 = 2,7266$ , obtem-se a diferença de veículos em carga entre os cenários Conectado em espera e Serviço Imediato em relação ao cenário Básico. Para taxas moderadas (30 veículos/hora) tem-se que  $E[N(B)] = 7,2112$ ,  $E[N(SI)] = 9,0004$ ,  $E[N(CE)] - E[N_e(CE)] = 10,1878$ . De forma semelhante, tem-se que  $10,1878 - 9,0004 = 1,1838$  e  $10,1878 - 7,2112 = 2,9766$ . Assim, observa-se, para a taxa de 30 veículos/hora, 2,9766 veículos a mais em carga, em média, que no cenário Básico. Para a taxa de 50 veículos/hora, observa-se a diferença de 2,7266, inferior, portanto. A Tabela 5.8 mostra a probabilidade da estação estar operando na máxima potência disponível. A probabilidade da estação estar funcionando na máxima potência aumenta para o cenário Conectado em Espera.

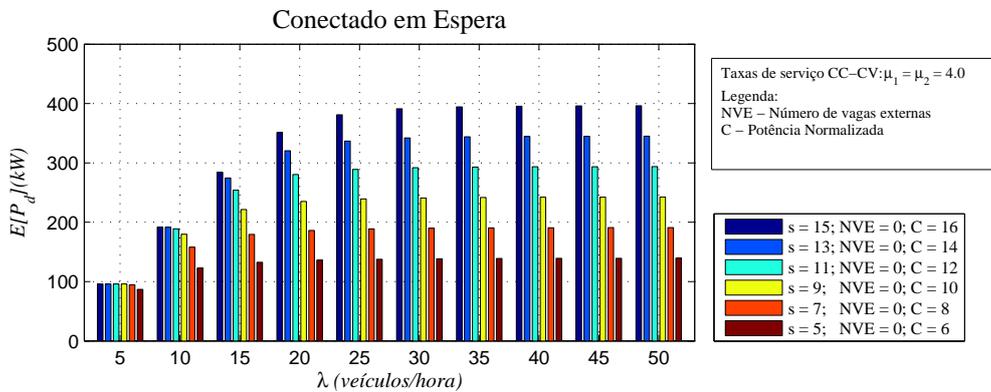


Figura 5.27: Consumo de potência média no cenário Conectado em Espera.

**Porcentagem da potência usada esperada ( $E[P_u(CE)]$  (%))** – Através da Figura 5.28 pode-se comparar o desempenho percentual dos cenários Básico, Serviço

Tabela 5.7: Potência consumida no cenário Conectado em Espera (kW).

Cenários	$\lambda$	$s = 5$	$s = 7$	$s = 9$	$s = 11$	$s = 13$	$s = 15$
Básico	10	90,30	115,52	137,30	155,16	168,86	178,55
	30	107,11	142,13	176,70	210,75	244,19	276,90
	50	110,43	146,99	183,40	219,65	255,71	291,56
Serviço Imediato	10	104,28	133,80	156,79	172,88	182,79	188,08
	30	128,23	174,08	219,01	262,77	305,08	345,62
	50	133,00	181,38	229,44	277,16	324,47	371,31
Conectado em Espera	10	122,73	157,91	179,74	188,97	191,48	191,93
	30	138,37	189,87	241,03	291,81	342,03	391,21
	50	139,41	191,02	242,4	293,77	345,04	396,27

Tabela 5.8: Probabilidade de consumo de máxima potência no cenário Conectado em Espera.

Cenários	$\lambda$	$s = 5$	$s = 7$	$s = 9$	$s = 11$	$s = 13$	$s = 15$
Básico	10	0,0662	0,0249	0,0089	0,0030	0,0009	0,0003
	30	0,1018	0,0470	0,0217	0,0099	0,0045	0,0020
	50	0,1106	0,0529	0,0253	0,0121	0,0057	0,0027
Serviço Imediato	10	0,1590	0,0992	0,0572	0,0298	0,0139	0,0057
	30	0,3141	0,2738	0,2368	0,2026	0,1711	0,1422
	50	0,3653	0,3380	0,3115	0,2858	0,2611	0,2377
Conectado em Espera	10	0,3211	0,2594	0,1729	0,0921	0,0403	0,0152
	30	0,4478	0,4588	0,4649	0,4640	0,4617	0,4530
	50	0,4802	0,4711	0,4776	0,4812	0,4842	0,4860

Imediato e Conectado em Espera. A Tabela 5.9 apresenta alguns valores extraídos dos gráficos das Figuras 5.9 e 5.18 dos cenários Básico e Serviço Imediato, respectivamente, com base em 3 taxas de chegada. O cenário Conectado em Espera, devido às vagas conectadas, possibilita um melhor aproveitamento da potência utilizada. Isso é confirmado para todas as taxas de chegada e para todos os portes de estação de carga e evidencia que o diferencial da possibilidade de espera conectada em relação ao cenário Serviço Imediato, resulta em uma melhor razão entre a potência consumida e a potência disponível na estação de carga, principalmente nas baixas taxas de chegada.

**Tempo esperado conectado em espera** –  $E[T_e(CE)]$ . Essa variável mostra o tempo decorrido em que os veículos se encontram conectados em espera antes de serem servidos. Essa informação indica aos clientes o tempo que falta para começar o processo de carga. O gráfico da Figura 5.29 mostra que, para estações de pequeno porte (poucos números de carregadores) e baixas taxas de chegada, o cliente não deve sair do veículo, porque o tempo de espera é muito reduzido. Quando a taxa é de 5 veículos/hora, na estação com 5 carregadores, o tempo em espera é de 2,4 segundos. A Tabela 5.10 mostra para 3 intensidades de taxa de chegada de veículos, baixa,

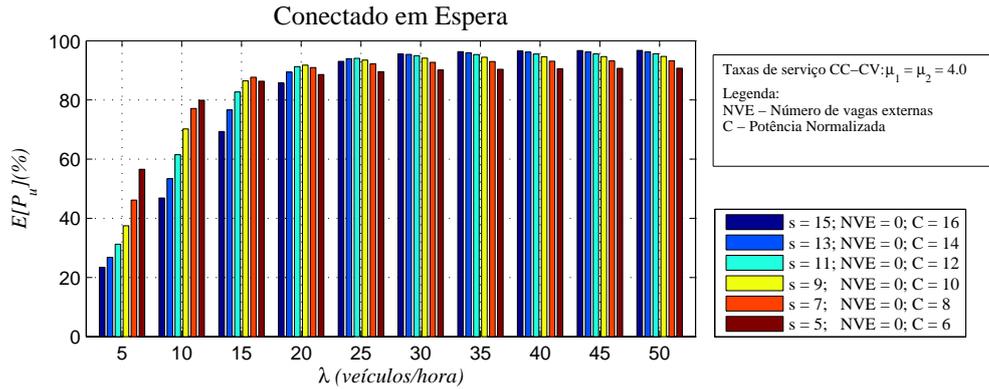


Figura 5.28: Porcentagem de potência usada no cenário Conectado em Espera.

Tabela 5.9: Porcentagem da potência usada nos cenários Básico, Serviço Imediato e Conectado em Espera.

Cenários	$\lambda$	$s = 5$	$s = 7$	$s = 9$	$s = 11$	$s = 13$	$s = 15$
Básico	10	58,79	56,40	50,63	50,50	47,11	43,59
	30	69,74	69,40	69,02	68,60	68,13	67,60
	50	71,89	71,77	71,64	71,50	71,34	71,18
Serviço Imediato	10	67,89	65,33	61,24	56,27	51,00	45,92
	30	83,49	85,00	85,55	85,54	85,12	84,38
	50	86,59	88,56	89,63	90,22	90,53	90,65
Conectado em Espera	10	79,90	77,10	70,21	61,51	53,43	46,86
	30	95,51	95,43	94,99	94,15	92,71	90,09
	50	96,75	96,27	95,63	94,71	93,27	90,76

moderada e alta, os tempos de espera conectado. Para taxas baixas de chegada, ocorre uma flutuação considerável no tempo de espera. Para a taxa de chegada de 10 veículos/hora, os tempos de espera variam de 5,54 minutos a 9,6 segundos para estações de carga de 5 a 15 carregadores, respectivamente. Estações com muitos carregadores, em baixas taxas de chegada conseguem prontamente atender os veículos, resultando em um tempo de espera desprezível. Em taxas moderadas, há um número específico de carregadores (e sobressalentes) que torna o tempo de espera máximo, em virtude da taxa de serviço resultante e vagas de espera conectadas. Para 30 veículos/hora, a média de espera se situa em torno de 9 minutos, quase atingindo 10 minutos para uma estação com 5 carregadores. Nas taxas mais elevadas (50 veículos/hora), o fluxo de chegada intenso provoca um acúmulo de veículos nas estações com maior número de carregadores (conectados em carga e em espera). Mesmo com uma taxa de serviço alta, há um aumento do tempo de espera devido ao elevado número de veículos no sistema. O tempo de espera nesse caso, como se pode observar na Tabela 5.10, se situa em torno de 11,7 minutos. No extremo oposto, estações com 5 carregadores, apesar de apresentarem taxa de serviço mais lenta, devido ao pouco espaço para receber veículos na estação, resultam em um

tempo de espera menor (9,96 minutos), mas maior bloqueio.

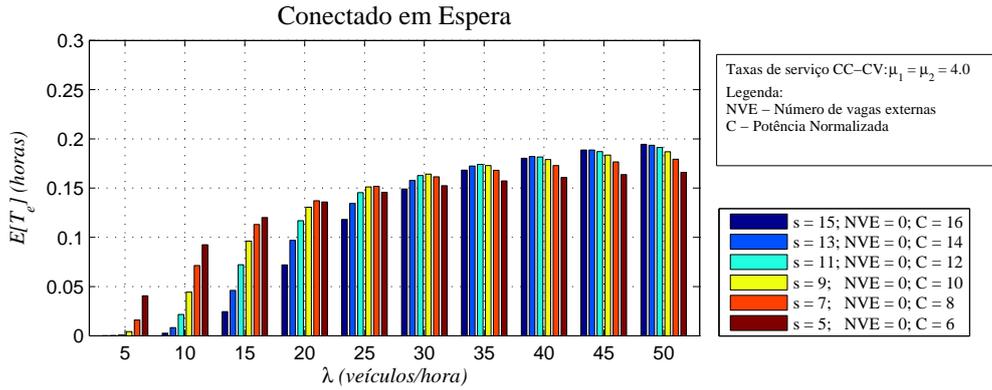


Figura 5.29: Tempo de espera conectado no cenário Conectado em Espera.

Tabela 5.10: Tempo de espera em minutos no cenário Conectado em Espera.

Cenários	$\lambda$	$s = 5$	$s = 7$	$s = 9$	$s = 11$	$s = 13$	$s = 15$
Conectado em Espera	10	5,54	4,28	2,66	1,30	0,50	0,16
	30	9,15	9,69	9,85	9,77	9,45	8,95
	50	9,96	10,77	11,22	11,48	11,62	11,66

### 5.1.8 Modelo do cenário Vaga Externa

O cenário Vaga Externa (VE) é uma variante do cenário Conectado em Espera. Neste cenário, são acrescentadas vagas físicas que viabilizam a existência de veículos em fila (com ordem de chegada) que esperam o momento adequado para avançarem e se conectarem aos ESCVEs. Assim que os veículos em carga completarem o abastecimento e deixarem a estação, um ESCVE será liberado e o veículo que se encontra nas vagas físicas pode se conectar ao ESCVE que estiver livre, aguardando conectado. A Figura 5.30 ilustra o cenário Vaga Externa. Esse cenário pode ser uma extensão do cenário Conectado em Espera com as vagas físicas e o número destas, por convenção espelhadas no número de ESCVEs adicionais ( $n' = m - 1$ ). No cenário Vaga Externa, o número de estados do modelo da cadeia de Markov aumenta se comparado com o cenário Conectado em Espera. Isso se deve ao fato de o veículo poder esperar, nas vagas externas, o momento oportuno para ser conectado ao ESCVE. O número de possíveis estados é dado por:

$$N_{est}(m) = (1.5m^2 + 2.5m + 1) + \sum_{q=0}^{m-2} (m - q) + 2 \cdot \sum_{p=1}^{m-1} (m - p). \quad (5.27)$$

Não será exibida aqui a cadeia de Markov para esse cenário pela dificuldade de representá-la, devido à quarta variável representando o número de veículos estaci-

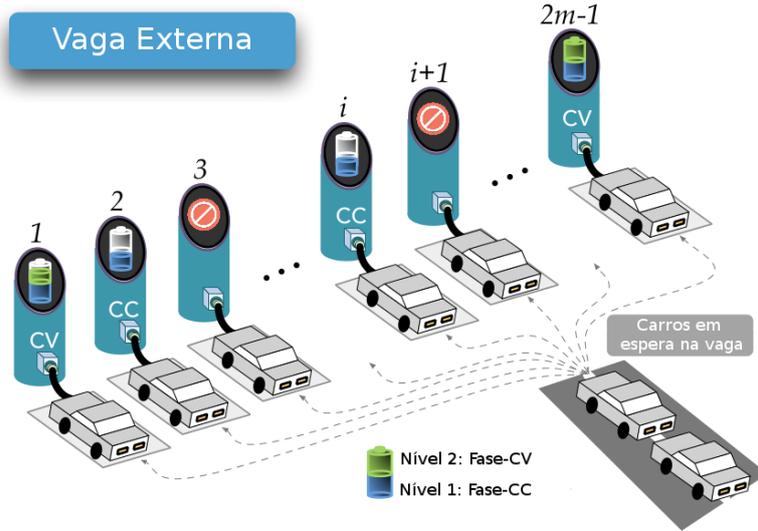


Figura 5.30: Cenário Vaga Externa – As vagas físicas permitem aos veículos que optam por entrar na estação de carga, esperar o momento oportuno de se conectar ao ESCVE.

onados nas vagas externas. No entanto a Tabela 5.12 indica as condições para as transições de estado. Esta tabela mostra a tupla  $(n_p, n_v, P)$ , onde  $n_p$  indica o número de veículos conectados,  $n_v$  simboliza o número de veículos nas vagas externas e  $P$  indica a capacidade normalizada atual da estação. A Tabela 5.11 lista as notações necessárias para a compreensão das variáveis usadas no problema para esse cenário.

Tabela 5.11: Notações para o cenário Vaga Externa.

Variável	Descrição	Observação
$n_{cc}$	Número de veículos em Fase-CC.	
$n_{cv}$	Número de veículos em Fase-CV.	
$n_e$	Número de veículos esperando.	
$n_p$	Número de veículos conectados (“plugados”).	
$n_v$	Número de veículos nas vagas externa.	$n_p + n_v = n_{cc} + n_{cv} + n_e$
$P$	Potência normalizada demandada.	$P = 2n_{cc} + n_{cv}$
Parâmetro	Descrição	Valor Default
$s$	Número de carregadores (ESCVE).	$2m - 1$
$n'$	Número de vagas externas (NVE).	$m - 1$
$C$	Potência normalizada	$2m$
Métrica	Descrição	Observação
$p_b$	Probabilidade de Bloqueio.	
$p_{c1}$	Probabilidade de ser admitido com serviço imediato.	
$p_{c2}$	Probabilidade de ser admitido e esperar.	$p_{c1} + p_{c2} = 1 - p_b$
$T_e$	Tempo de espera.	$E[T_e] = E[N_e]/(\lambda(1 - p_b))$

**Número esperado de veículos** –  $E[N(V E)]$ . No cenário Vaga Externa, as vagas físicas possibilitam uma admissão de veículos ainda mais eficiente quando comparado ao cenário Conectado em Espera, permitindo um maior número de usuários no sistema através da fila física. Uma vez que a estação se encontra com todos os ESCVEs ocupados e vagas externas ocupadas, em processo de carga e veículos aguardando, outro posto de carga deverá ser procurado. Cada estado apresenta um

Tabela 5.12: Transições de Estado da cadeia de Markov do estado  $(n_{cc}, n_{cv}, n_e)$  e atualização do estado  $(n_p, n_v, P)$ .

Condição	Taxa	Próximo estado	Atualização		
			$n_p$	$n_v$	$P$
<b>1. Serviço em fase-CC não seguido por um início de serviço CC:</b> $(n_{cc} > 0) \ \&\& \ ((n_e = 0) \    \ (n_p = (n_{cc} + n_{cv}))) \    \ ((P + 1) \leq C)$	$n_{cc}\mu_1$	$(n_{cc} - 1, n_{cv} + 1, n_e)$	$n_p$	$n_v$	$P - 1$
<b>2. Serviço em fase-CC seguido por um início de serviço CC:</b> $(n_{cc} > 0) \ \&\& \ (n_e > 0) \ \&\& \ (n_p > (n_{cc} + n_{cv})) \ \&\& \ (P + 1) \leq C$	$n_{cc}\mu_1$	$(n_{cc}, n_{cv} + 1, n_e - 1)$	$n_p$	$n_v$	$P + 1$
<b>3. Serviço em fase-CV seguido por não-início de serviço CC nem por ocupação de ESCVE:</b> $(n_{cv} > 0) \ \&\& \ !(n_e > 0 \ \&\& \ P + 1 \leq C) \ \&\& \ !(n_e > 0 \ \&\& \ n_v > 0)$	$n_{cv}\mu_2$	$(n_{cc}, n_{cv} - 1, n_e)$	$n_p - 1$	$n_v$	$P - 1$
<b>4. Serviço em fase-CV seguido por ocupação de ESCVE mas sem serviço CC:</b> $(n_{cv} > 0) \ \&\& \ !(n_e > 0 \ \&\& \ P + 1 \leq C) \ \&\& \ (n_e > 0 \ \&\& \ n_v > 0)$	$n_{cv}\mu_2$	$(n_{cc}, n_{cv} - 1, n_e)$	$n_p$	$n_v - 1$	$P - 1$
<b>5. Serviço em fase-CV seguido por início de serviço CC mas sem ocupação de ESCVE:</b> $(n_{cv} > 0) \ \&\& \ (n_e > 0 \ \&\& \ P + 1 \leq C) \ \&\& \ !(n_e > 0 \ \&\& \ n_v > 0)$	$n_{cv}\mu_2$	$(n_{cc} + 1, n_{cv} - 1, n_e - 1)$	$n_p - 1$	$n_v$	$P + 1$
<b>6. Serviço em fase-CV seguido por início de serviço CC e com ocupação de ESCVE:</b> $(n_{cv} > 0) \ \&\& \ (n_e > 0 \ \&\& \ P + 1 \leq C) \ \&\& \ (n_e > 0 \ \&\& \ n_v > 0)$	$n_{cv}\mu_2$	$(n_{cc} + 1, n_{cv} - 1, n_e - 1)$	$n_p$	$n_v - 1$	$P + 1$
<b>7. Chegada e serviço imediato:</b> $(n_p < s) \ \&\& \ (P + 2) \leq C$	$\lambda$	$(n_{cc} + 1, n_{cv}, n_e)$	$n_p + 1$	$n_v$	$P + 2$
<b>8. Chegada e ocupação de ESCVE sem serviço imediato:</b> $(n_p < s) \ \&\& \ (P + 2) > C$	$\lambda$	$(n_{cc}, n_{cv}, n_e + 1)$	$n_p + 1$	$n_v$	$P$
<b>9. Chegada e espera na vaga:</b> $(n_p \geq s) \ \&\& \ (n_p + n_v < s + n')$	$\lambda$	$(n_{cc}, n_{cv}, n_e + 1)$	$n_p$	$n_v + 1$	$P$

número de veículos contabilizado por  $n_{i,j,k,\ell} = (i + j + k + \ell)$ . O número de veículos nesse caso será:

$$E[N(VE)] = \sum_{(i,j,k,\ell) \in \mathcal{S}_b^{(VE)}} (i + j + k + \ell) \cdot \pi_{ijkl}, \quad (5.28)$$

onde  $(i, j, k, \ell) \in \Omega_{VE}$ .

**Número esperado de veículos em espera** –  $E[N_e(VE)]$ . Este valor retorna o número de clientes que se encontram conectados em espera e nas vagas do pátio aguardando o momento oportuno de receber carga. O número de veículos nesse caso

será:

$$E[N_e(VE)] = \sum_{(i,j,k,\ell) \in \mathcal{S}_{N_e}^{(VE)}} k \cdot \pi_{ijkl}. \quad (5.29)$$

onde  $(i, j, k, \ell) \in \Omega_{VE}$ , para todo  $k > 0$  e  $\ell > 0$ .

**Número esperado de veículos em espera na vaga** –  $E[N_v(VE)]$ . Este valor retorna o número de clientes que se encontram em espera nas vagas externas do pátio aguardando o momento oportuno de receber carga. O número de veículos nesse caso será:

$$E[N_v(VE)] = \sum_{(i,j,k,\ell) \in \mathcal{S}_{N_v}^{(VE)}} \ell \cdot \pi_{ijkl}. \quad (5.30)$$

onde  $(i, j, k, \ell) \in \Omega_{VE}$ , para todo  $k = n$  e  $\ell > 0$ .

**Probabilidade de bloqueio** –  $p_b(VE)$ . De forma semelhante ao cenário Conectado em Espera, os estados de bloqueio são aqueles onde não há mais vagas nem ESCVEs disponíveis. Assim, a probabilidade de bloqueio é definida como:

$$p_b(VE) = \sum_{(i,j,k,\ell) \in \mathcal{S}_b^{(VE)}} \pi_{ijkl}, \quad (5.31)$$

onde  $\mathcal{S}_b^{(CE)} = \{(m - i, 2i, n - i, n), (m - i - 1, 2i + 1, n - i, n)\}$ , para  $i = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, n\}$ .

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço* –  $p_{b1}(VE)$ . Não há bloqueio devido a falta de espaço para esse cenário. Assim, tem-se que  $\mathcal{S}_{b1}^{(VE)} = \emptyset$ .

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de energia* –  $p_{b2}(VE)$ . O bloqueio devido a falta de energia é um caso característico do cenário Serviço Imediato, como já discutido anteriormente, portanto  $\mathcal{S}_{b2}^{(VE)} = \emptyset$ .

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia* –  $p_{b3}(VE)$ . Neste cenário o espaço de estados que configura a probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia é idêntico ao espaço de estados relativo a  $p_b(VE)$ . Pode-se dizer que  $\mathcal{S}_{b3}^{(VE)} = \mathcal{S}_b^{(VE)}$ . Em outras palavras, a probabilidade de bloqueio total neste cenário se resume a  $p_{b3}$ . Assim,

$$p_{b3}(VE) = \sum_{(i,j,k,\ell) \in \mathcal{S}_b^{(VE)}} \pi_{ijkl}, \quad (5.32)$$

onde  $\mathcal{S}_b^{(CE)} = \{(m - i, 2i, n - i, n), (m - i - 1, 2i + 1, n - i, n)\}$ , para  $i = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, n\}$ .

**Probabilidade de serviço imediato** –  $p_{c1}(VE)$ . A probabilidade de ser imediatamente servido envolve o espaço de estados que corresponde à condição 7 da Tabela 5.12. Assim,

$$p_{c1}(VE) = \sum_{(i,j,k,\ell) \in \mathcal{S}_{c1}^{(VE)}} \pi_{ijkl}, \quad (5.33)$$

onde  $\mathcal{S}_{c1}^{(VE)}$  obedece à condição 7 da tabela 5.12.

**Probabilidade de admissão imediata** –  $p_{c2}(VE)$ . A probabilidade de ser imediatamente servido envolve o espaço de estados que corresponde às condições 8 ou 9 da Tabela 5.12. Assim,

$$p_{c2}(VE) = \sum_{(i,j,k,\ell) \in \mathcal{S}_{c2}^{(VE)}} \pi_{ijkl}, \quad (5.34)$$

onde  $\mathcal{S}_{c2}^{(VE)}$  obedece às condições 8 ou 9 da tabela 5.12.

**Potência consumida esperada** –  $E[P_d(VE)]$ . Essa grandeza retorna o valor da potência consumida pelos veículos, considerando o número de carregadores. O valor é limitado pela potência total disponível na estação. Cada estado da cadeia de Markov representa uma quantidade de potência consumida por  $i$  veículos em fase-CC, e  $j$  veículos em fase-CV (denotado por  $P_{ijkl}$ ) vezes a probabilidade do estado  $\pi_{ijkl}$ . Realizando o somatório de todos os estados da cadeia, tem-se a potência total gasta no sistema:

$$E[P_d(VE)] = \sum_{(i,j,k,\ell) \in \Omega_{VE}} P_{ijkl} \pi_{ijkl}, \quad (5.35)$$

onde  $(i, j, k, \ell) \in \Omega_{VE}$ .

**Tempo esperado de espera** –  $E[T_e(VE)]$ . Esse valor mostra o tempo que o cliente espera no sistema até a oportunidade de começar o processo de carga, que está vinculado à saída de veículos do sistema com bateria carregada e/ou a transição de veículos de fase-CC para a fase-CV. A variável retorna o tempo gasto em espera em horas.

$$E[T_e(VE)] = \frac{E[N_e(VE)] + E[N_v(VE)]}{\lambda(1 - p_b)}. \quad (5.36)$$

### 5.1.9 Resultados do cenário Vaga Externa

No cenário Vaga Externa (VE), quando todos os ESCVEs estiverem ocupados, a estação ainda pode receber o cliente em vagas físicas para que ele possa aguardar até o momento de se conectar. Nesse caso, a estação deve ter espaço suficiente para acomodar as vagas físicas. Este cenário é uma variante do cenário anterior com vantagens que serão destacadas.

**Número esperado de veículos na estação ( $E[N(VE)]$ )** – Pelo gráfico da Figura 5.31, que contabiliza o número de veículos da estação, pode-se perceber que o número de veículos que a estação recebe é superior aos cenários já apresentados. O motivo se deve às vagas físicas que permitem que veículos esperem na vaga externa. Na taxa de chegada mais baixa, as vagas externas permitem um maior número de veículos na estação com  $s = 5$  carregadores comparado ao mesmo porte de estação nos cenários anteriores. Para as taxas de 10, 15 e 20 veículos/hora, há uma combinação ótima de ESCVES e número de vagas de espera, associada à respectiva taxa de serviço, que possibilita um maior número de veículos nas estações que apresentam 7, 11 e 13 ESCVES, contabilizando 6, 2908, 9, 9994 e 14, 3499 veículos, respectivamente, como se observa no gráfico da Figura 5.31. Para as taxas de chegada mais elevadas, o número de veículos que o cenário Vaga Externa comporta é maior que os cenários anteriores. O caso extremo se localiza na taxa de 50 veículos/hora. Para estação com  $s = 5$ , nota-se  $E[N(VE)] = 6, 8343$  veículos, enquanto o cenário Conectado em Espera admite  $E[N(VE)] = 4, 8354$  (um aumento de 41, 33%). Para  $s = 15$  se verifica  $E[N(VE)] = 21, 3312$  e no cenário Conectado em Espera, tem-se  $E[N(CE)] = 14, 3328$  (ganho de 48, 83%). As vagas externas aos ESCVES promoveram, em relação ao cenário Conectado em Espera, um aumento no número de veículos na estação (número de clientes atendidos) além do melhor uso da potência total, verificado mais adiante.

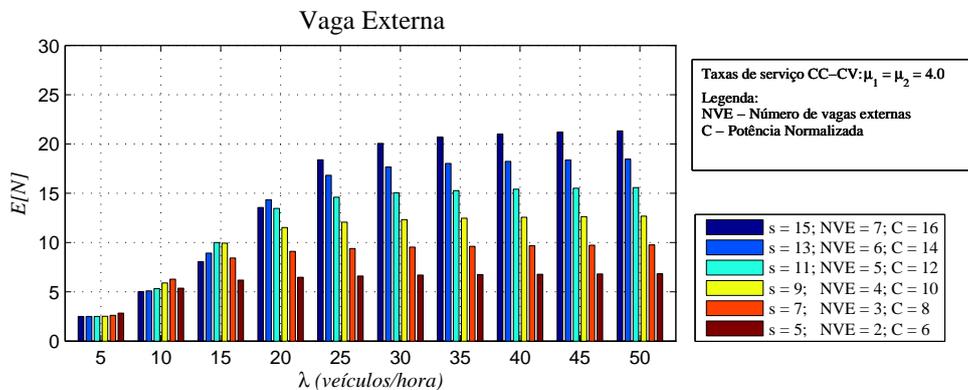


Figura 5.31: Veículos no cenário Vaga Externa.

**Número esperado de veículos em espera ( $E[N_e(VE)]$ )** – Neste cenário, há duas formas de espera. Uma delas é a espera conectada e a outra é a espera nas vagas externas. O gráfico da Figura 5.32 mostra a soma dos veículos que se encontram conectados com os veículos que aguardam nas vagas externas. Para baixas taxas de chegada, o número de veículos em espera começa a apresentar valores mais expressivos a partir da taxa de chegada de 15 veículos/hora. É interessante notar que para as taxas de 15 e 20 veículos/hora, há um número maior de veículos em espera que contabiliza  $E[N_e(VE)] = 3, 7911$  e  $E[N_e(VE)] = 5, 8609$  em estações de carga

com  $s = 9$  e  $s = 11$  carregadores, respectivamente. Estas estações apresentam, para essas taxas de chegada, uma combinação de número de carregadores e de vagas, associadas à respectiva taxa de serviço, que favorecem (“otimizam”) uma maior concentração de veículos na estação. A partir do fluxo de 25 veículos/hora, as estações com maior número de carregadores tendem a comportar mais veículos em seu pátio de estacionamento. Vale lembrar que as estações com maior número de carregadores apresentam maior número de vagas de espera. Para a taxa mais alta de chegada, observa-se 11,0058 veículos nas estações de  $s = 15$  e 3,1885, nas estações de  $s = 5$ .

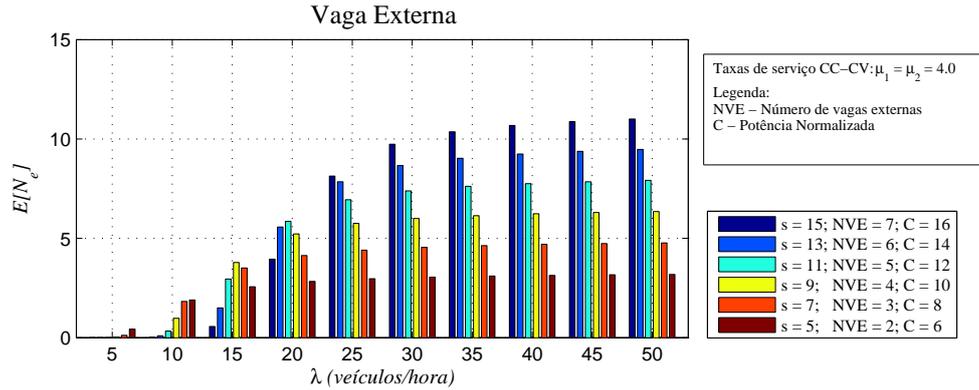


Figura 5.32: Veículos em espera no cenário Vaga Externa.

*Número esperado de veículos em espera na vaga ( $E[N_v(VE)]$ )* – O gráfico da Figura 5.33 mostra o número de veículos que aguardam nas vagas externas, apresentando um comportamento bastante semelhante ao gráfico anterior. Para a taxa mais alta de chegada de veículos, nota-se que o número de veículos nas vagas externas apresenta um comportamento assintótico que tende a se igualar ao número de vagas externas. Para  $s = 5$ , tem-se  $E[N_v(VE)] = 1,8363$  e para o caso de  $s = 15$ ,  $E[N_v(VE)] = 6,3316$ , para a taxa de 50 veículos/hora. Estes 2 casos apresentam 2 e 7 vagas externas, respectivamente.

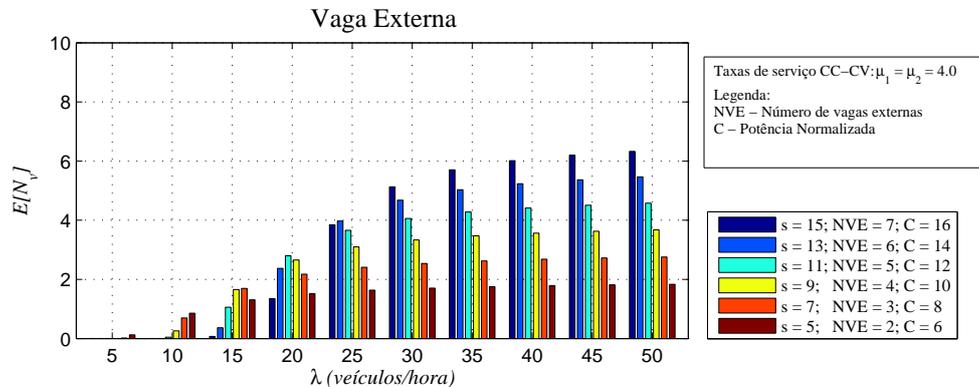


Figura 5.33: Veículos em espera na vaga no cenário Vaga Externa.

**Probabilidade de bloqueio total ( $p_b(VE)$ )** – Com base na Figura 5.34, o cenário

Vaga Externa promove um melhor desempenho em relação aos 3 cenários anteriores, principalmente nas baixas taxas de chegada e em estações com poucos carregadores. Comparando os 2 últimos cenários, tomando por base  $s = 5$  e  $\lambda = 5$  veículos/hora, as probabilidades de bloqueio são  $p_b(CE) = 0,0948$  e  $p_b(VE) = 0,0341$ , respectivamente. Para  $s = 5$  e  $\lambda = 10$  veículos/hora, nota-se também uma diferença significativa, pois  $p_b(CE) = 0,3608$  e  $p_b(VE) = 0,3049$ . Para o fluxo de entrada na estação mais intenso, os valores das probabilidades de bloqueio tendem a ficar mais próximos. Para  $\lambda = 50$  veículos/hora, tomando os extremos em número de carregadores, ou seja,  $s = 5$  carregadores, as probabilidades de bloqueio são  $p_b(CE) = 0,8548$  e  $p_b(VE) = 0,8542$  e para  $s = 15$ ,  $p_b(CE) = 0,5872$  e  $p_b(VE) = 0,5870$ . Para altas taxas de chegada, a redução da probabilidade de bloqueio total no último cenário é sutil. Este modelo de estação de carga, assim como o cenário Conectado em Espera, apresenta a probabilidade de bloqueio total igual à probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia ( $p_b = p_{b3}$ ).

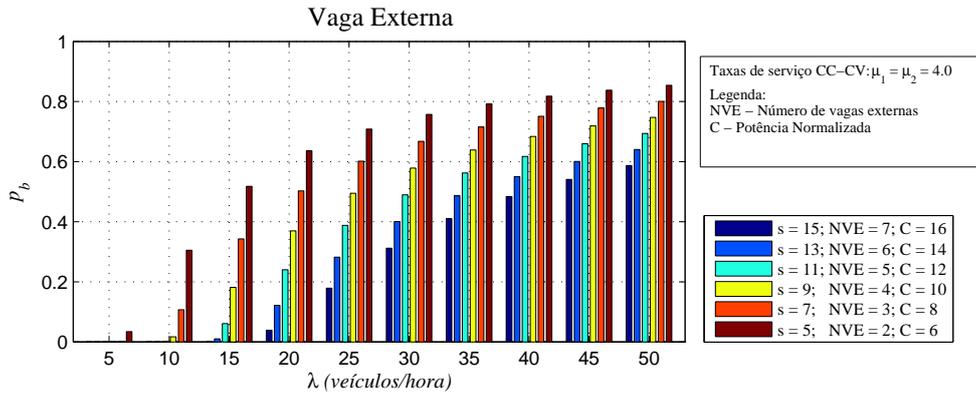


Figura 5.34: Probabilidade de bloqueio total no cenário Vaga Externa.

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço ( $p_{b1}(VE)$ )* – De modo semelhante ao cenário Conectado em Espera, neste cenário, a probabilidade de bloqueio exclusivamente devido a falta de espaço é zero, portanto  $\mathcal{S}_{b1}^{(VE)} = \emptyset$ . Todos os estados que significam falta de espaço também apresentam falta de energia.

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de energia ( $p_{b2}(VE)$ )* – A probabilidade devido a falta de energia no cenário Vaga Externa é zero, logo  $\mathcal{S}_{b2}^{(VE)} = \emptyset$ . Não há bloqueio só por falta de energia nesse cenário. Mesmo com falta de energia, há espaço para os clientes aguardarem.

*Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia ( $p_{b3}(VE)$ )* – Neste cenário a probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia abrange os estados  $\mathcal{S}_{b3}^{(VE)} = \{(m - i, 2i, n - i, n), (m - i - 1, 2i + 1, n - i, n)\}$ , para  $i = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, n\}$ . Como já comentado, estes estados se resumem à probabilidade de bloqueio total, conforme já analisado.

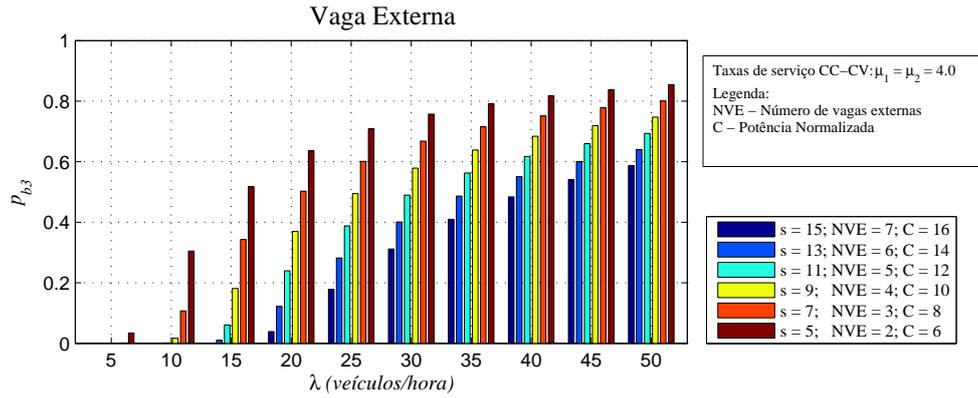


Figura 5.35: Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço e energia no cenário Vaga Externa.

**Probabilidade de serviço imediato –  $p_{cl}(VE)$ .** A probabilidade de ser imediatamente servido no cenário Vaga Externa está representada no gráfico da Figura 5.36. Por oferecer, além da possibilidade de espera conectada, vagas no pátio de estacionamento, este cenário apresenta probabilidade de o veículo ser imediatamente servido menor que o cenário Conectado em Espera. Para a taxa mais baixa de chegada de veículos, observa-se as seguintes probabilidades de ser imediatamente servido –  $p_{cl}(VE) = 0,9995, 0,9972, 0,9874, 0,9508, 0,8369$  e  $0,5751$ , para estações com  $s = 15, 13, 11, 9, 7$  e  $5$  carregadores, respectivamente. As estações com maior número de servidores, para taxas baixas de chegada, conseguem servir de imediato os veículos que chegam na estação. No entanto, com o aumento da taxa de chegada de veículos observa-se que  $p_{cl}(VE)$  decresce ainda mais que o cenário anterior, como pode-se observar na Figura 5.25, pois além das vagas conectadas, há as vagas no estacionamento que admitem os veículos em espera na vaga externa. Observa-se que, para as taxas de chegada acima de 30 veículos/hora,  $p_{cl}(VE)$  é praticamente zero para todos os portes de estação de carga.

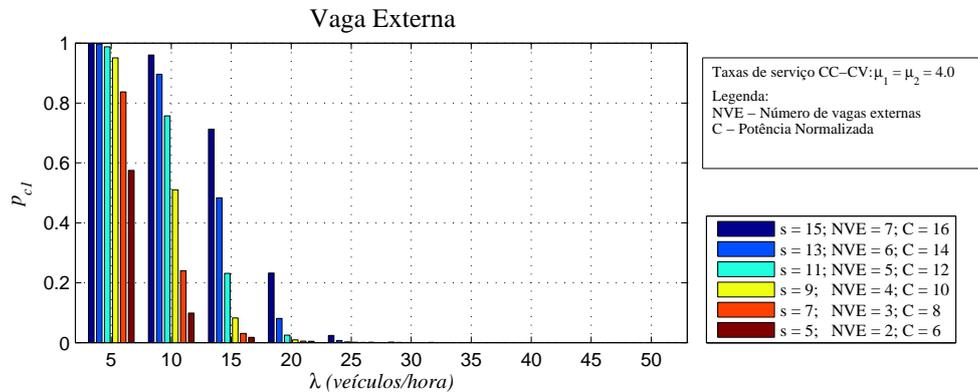


Figura 5.36: Probabilidade de serviço imediato no cenário Vaga Externa.

**Probabilidade de admissão imediata –  $p_{e2}(VE)$ .** De acordo com o gráfico da

Figura 5.37, a probabilidade de ser imediatamente admitido no cenário Vaga Externa é superior à do cenário Conectado em Espera em função dos espaços oferecidos no pátio da estação. Na mais baixa taxa de chegada, os valores de  $p_{c2}(VE)$  para estações com 5, 7, 9, 11, 13 e 15 ESCVEs são 0,0005, 0,0028, 0,0126, 0,1618 e 0,3908, respectivamente. A maior probabilidade de ser imediatamente admitido na estação ocorre para a taxa de 20 veículos/hora, igual a 0,7973. No cenário anterior, o maior valor de  $p_{c2}(CE)$  ocorre para a taxa de 25 veículos/hora e é igual a 0,6385, o que mostra o quanto a admissão nos cenários difere para aqueles cenários que disponibilizam aos clientes espaço nas vagas externas.

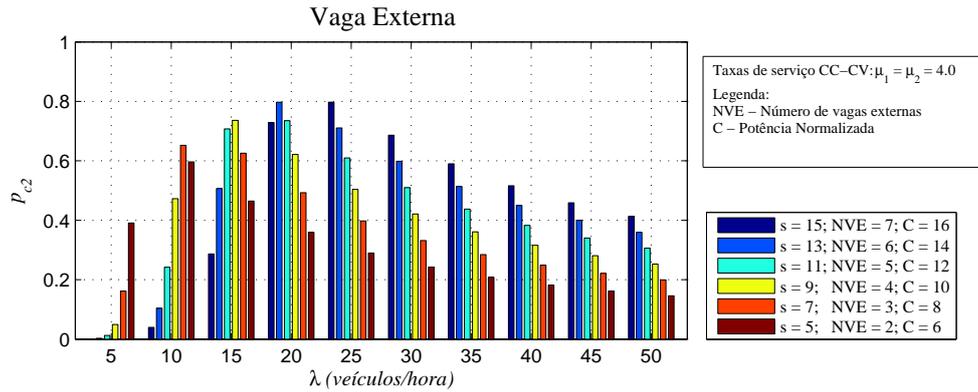


Figura 5.37: Probabilidade de admissão imediata no cenário Vaga Externa.

**Consumo de potência ( $E[P_d(VE)]$  (kW))** – O cenário Vaga Externa, em última análise, uma vez que disponibiliza vagas externas, permite um maior número de veículos no sistema. Assim, quando veículos concluem seus processos de carga, aqueles que ocupavam a vaga física se dirigem às vagas conectadas. O desempenho obtido é modesto em relação ao cenário anterior. O resultado é observado na Figura 5.38. A Tabela 5.13 mostra uma comparação entre os 4 cenários. Deve-se ressaltar que o cenário Básico só possui  $s = m$  carregadores, enquanto os outros cenários apresentam  $s = 2m - 1$  carregadores. Assim, na tabela o valor de  $s$  está descrito como  $s = m + (m - 1)$ . Para o cenário Básico só existem  $m$  ESCVEs. Pode-se examinar a Tabela 5.13 e constatar que houve um sutil acréscimo na potência consumida para todas as taxas de chegada e número de carregadores. Isso se deve às vagas externas que possibilitam que os veículos em espera já estejam no sistema, passando à conexão ao sistema sensivelmente mais rápido que o cenário anterior. A Tabela 5.13 mostra melhores resultados para esse cenário, embora muito sutis. Para a taxa de 50 veículos/hora e para  $s = 15$  tem-se  $E[P_d(VE)] = 396,49$  kW e no cenário anterior tem-se  $E[P_d(CE)] = 396,27$  kW, apenas 220 W de diferença. Para a taxa mais baixa de chegada e para  $s = 5$  tem-se  $E[P_d(VE)] = 133,46$  kW e  $E[P_d(CE)] = 122,73$  kW, apenas 11,27 kW de diferença. Mesmo sutil, esse cenário apresenta melhor desempenho que o anterior proporcionado pelas vagas externas que

garantem maior número de veículos na estação de carga. A Tabela 5.14 apresenta a probabilidade da estação estar entregando a máxima potência disponível. Agora comparando os últimos cenários pode-se constatar que o cenário Vaga Externa, por apresentar estados com veículos na vaga que representam também estados de máxima potência consumida, irá apresentar valores de probabilidade maiores que o cenário Conectado em Espera, porém, muito próximos.

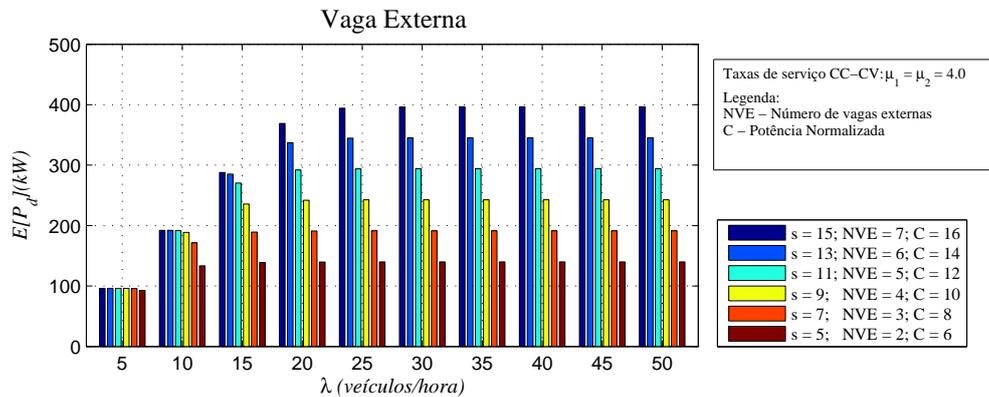


Figura 5.38: Consumo de potência média no cenário Vaga Externa.

Tabela 5.13: Potência consumida no cenário Vaga Externa (kW).

Cenários	$\lambda$	$s = 3 + 2$	$s = 4 + 3$	$s = 5 + 4$	$s = 6 + 5$	$s = 7 + 6$	$s = 8 + 7$
Básico	10	90,30	115,52	137,30	155,16	168,86	178,55
	30	107,11	142,13	176,70	210,75	244,19	276,90
	50	110,43	146,99	183,40	219,65	255,71	291,56
Serviço Imediato	10	104,28	133,80	156,79	172,88	182,79	188,08
	30	128,23	174,08	219,01	262,77	305,08	345,62
	50	133,00	181,38	229,44	277,16	324,47	371,31
Conectado em Espera	10	122,73	157,91	179,74	188,97	191,48	191,93
	30	138,37	189,87	241,03	291,81	342,03	391,21
	50	139,41	191,02	242,4	293,77	345,04	396,27
Vaga Externa	10	133,46	171,39	188,71	191,78	191,99	192,00
	30	138,97	191,37	242,69	293,97	345,20	396,33
	50	139,99	191,38	242,71	293,99	345,25	396,49

**Porcentagem da potência usada ( $E[P_u(VE)]$  (%))** – A Figura 5.39 mostra a porcentagem de potência usada no cenário Vaga Externa. A Tabela 5.15 mostra alguns valores extraídos do gráfico da Figura 5.39 e valores já obtidos dos cenários Básico, Serviço Imediato e Conectado em Espera. O cenário Vaga Externa, devido às vagas externas, possibilita sensível aproveitamento do percentual de potência utilizada, devido às vagas externas que agilizam a conexão ao sistema por já abrigarem os veículos no pátio da estação. Para a taxa de 50 veículos/hora e para  $s = 15$  tem-se  $E[P_u(VE)] = 91,14$  % e no cenário anterior tem-se  $E[P_u(CE)] = 90,76$  %. Para a taxa mais baixa de chegada e para  $s = 5$  tem-se  $E[P_d(VE)] = 86,89$  % e  $E[P_d(CE)] = 79,90$  %. Os ganhos são modestos, mas esse cenário apresenta melhor desempenho que o anterior.

Tabela 5.14: Probabilidade de consumo de máxima potência no cenário Vaga Externa.

Cenários	$\lambda$	$s = 3 + 2$	$s = 4 + 3$	$s = 5 + 4$	$s = 6 + 5$	$s = 7 + 6$	$s = 8 + 7$
Básico	10	0,0662	0,0249	0,0089	0,0030	0,0009	0,0003
	30	0,1018	0,0470	0,0217	0,0099	0,0045	0,0020
	50	0,1106	0,0529	0,0253	0,0121	0,0057	0,0027
Serviço Imediato	10	0,1590	0,0992	0,0572	0,0298	0,0139	0,0057
	30	0,3141	0,2738	0,2368	0,2026	0,1711	0,1422
	50	0,3653	0,3380	0,3115	0,2858	0,2611	0,2377
Conectado em Espera	10	0,3211	0,2594	0,1729	0,0921	0,0403	0,0152
	30	0,4478	0,4588	0,4649	0,4640	0,4617	0,4530
	50	0,4802	0,4711	0,4776	0,4812	0,4842	0,4860
Vaga Externa	10	0,4126	0,3464	0,2201	0,1030	0,0417	0,0153
	30	0,4683	0,4758	0,4807	0,4838	0,4860	0,4833
	50	0,4687	0,4760	0,4808	0,4841	0,4864	0,4884

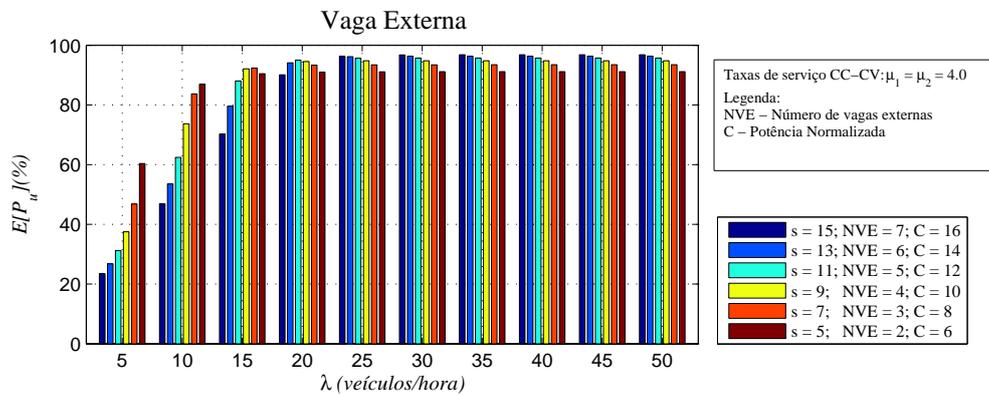


Figura 5.39: Porcentagem de potência usada no cenário Vaga Externa.

Tabela 5.15: Porcentagem da potência usada nos cenários Básico, Serviço Imediato, Conectado em espera e Vaga Externa.

Cenários	$\lambda$	$s = 3 + 2$	$s = 4 + 3$	$s = 5 + 4$	$s = 6 + 5$	$s = 7 + 6$	$s = 8 + 7$
Básico	10	58.79	56.40	50.63	50.50	47.11	43.59
	30	69.74	69.40	69.02	68.60	68.13	67.60
	50	71.89	71.77	71.64	71.50	71.34	71.18
Serviço Imediato	10	67.89	65.33	61.24	56.27	51.00	45.92
	30	83.49	85.00	85.55	85.54	85.12	84.38
	50	86.59	88.56	89.63	90.22	90.53	90.65
Conectado em Espera	10	79.90	77.10	70.21	61.51	53.43	46.86
	30	95.51	95.43	94.99	94.15	92.71	90.09
	50	96.75	96.27	95.63	94.71	93.27	90.76
Vaga Externa	10	86.89	83.68	73.71	62.43	53.57	46.87
	30	96.76	96.32	95.69	94.80	93.44	91.12
	50	96.80	96.33	95.70	94.81	93.45	91.14

**Tempo de espera** –  $E[T_e(VE)]$ . A partir do gráfico da Figura 5.40 tem-se o tempo decorrido na espera (tempo de fila externa mais tempo conectado em espera) antes de o veículo ser servido. É importante sob o ponto de vista dos clientes,

porque informa o quanto o motorista vai ter que esperar. Esse intervalo pode ser útil para beber um café, realizar um saque ou realizar pequenas compras na loja de conveniência, para ilustrar alguns exemplos. O gráfico mostra que para estações de grande porte (15 carregadores) e baixas taxas de chegada, o cliente não deve sair do veículo, porque o tempo de espera é muito reduzido (10 segundos). Taxas moderadas de chegada levam a tempos de espera que variam de 25 a 28 minutos. Valores bem superiores aos obtidos no cenário anterior, como pode-se observar na Tabela 5.16, o que já era esperado.

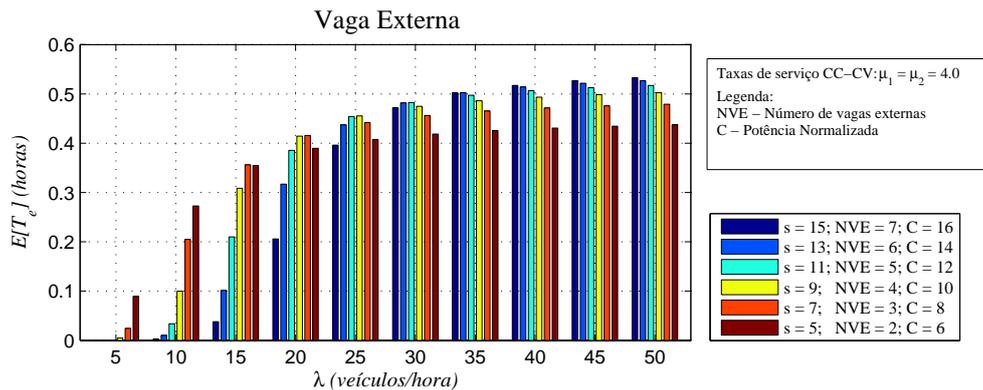


Figura 5.40: Porcentagem de Potência Usada no Vaga Externa.

Tabela 5.16: Tempo de espera em minutos no cenário Vaga Externa.

Cenário	$\lambda$	$s = 5$	$s = 7$	$s = 9$	$s = 11$	$s = 13$	$s = 15$
Conectado em Espera	10	5.54	4.28	2.66	1.30	0.50	0.16
	30	9.15	9.69	9.85	9.77	9.45	8.95
	50	9.96	10.77	11.22	11.48	11.62	11.66
Vaga Externa	10	16.37	12.82	5.99	2.03	0.61	0.17
	30	25.11	27.38	28.49	28.95	28.91	28.31
	50	26.24	28.74	30.16	31.03	31.61	31.97

### 5.1.10 Análise dos cenários Serviço Imediato e Conectado em Espera variando a potência disponível na estação

Nessa seção será analisado o comportamento da estação de carga se for aumentada a capacidade de potência disponível na estação. Serão analisados os cenários Serviço Imediato e Conectado em Espera quando a potência normalizada  $C$  é incrementada em passos de 2 unidades.

**Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço ( $p_{bl}(SI)$ )** – A Figura 5.41 mostra que, quando mais potência é disponibilizada, a probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço aumenta no cenário Serviço Imediato, enquanto a chance de

que o veículo seja bloqueado por falta de energia vai diminuindo. Para  $s = 7$ , quando a capacidade é de 204.8 kW ( $C = 8$  no gráfico da Figura 5.41), a probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço é zero para todas as taxas de chegada, pois nesse caso o bloqueio é somente devido a falta de energia (Figura 5.42). Tomando o caso de uma estação com  $s = 7$  e  $C = 8$ , ela apresentará os seguintes estados em que há espaço disponível (carregadores inativos) – (4, 0), (3, 1), (3, 2), (2, 4), (2, 3) e (1, 5) – mas falta capacidade para que a estação receba mais veículos. Se mais capacidade for adicionada às estações, em passos de  $C = 2$ , observa-se que a probabilidade de bloqueio devido ao espaço ( $p_{b1}(SI)$ ) aumenta até atingir um limite ( $C = 2m$ ) onde qualquer acréscimo de potência conferido à estação irá ser perdido, e a probabilidade de bloqueio devido ao espaço torna-se constante caso  $C \geq 2m$ . É o caso do primeiro gráfico ( $s = 7$ ) da Figura 5.41, observando as barras que vão do azul-claro ao azul-escuro, para todas as taxas de chegada. Isto significa que a estação está em condições energéticas de receber  $s$  veículos em fase-CC a partir de  $C = 2m$ . Observa-se que em estações com maior número de carregadores, a probabilidade de bloqueio devido ao espaço é menor. No caso da estação com  $s = 15$ , não se observa o limite da probabilidade de bloqueio devido ao espaço porque a variação máxima de potência normalizada disponível ficou abaixo de 2 vezes o número de carregadores que podem receber os veículos em fase-CC ( $C < 2m$ ).

**Probabilidade de bloqueio devido a falta de energia ( $p_{b2}(SI)$ )** – O comportamento do cenário Serviço Imediato para 7, 11 e 15 carregadores é analisado se for entregue à estação mais potência do que a previamente projetada. Mais uma vez o incremento de potência disponível será realizado em passos de  $C = 2$ , como se pode observar na Figura 5.42. As barras marrons nos gráficos mostram a probabilidade de bloqueio devido à energia e coincidem com os valores das barras laranja do gráfico da Figura 5.14 que correspondem às estações com  $s = 7$  carregadores. À medida que se eleva a potência disponível em passos de  $C = 2$  unidades pode-se notar que a probabilidade de bloqueio devido à energia decresce (barras vermelhas) porque a estação de carga pode admitir mais um veículo em fase-CC. Se mais um incremento de potência for realizado, novamente a probabilidade de bloqueio devido à energia se reduz (barras laranjas). Por fim, qualquer novo incremento de potência na estação torna a probabilidade de bloqueio devido à energia igual a zero. Não há no gráfico da Figura 5.42 valores associados às outras barras, das verdes às azuis escuras. Deste ponto em diante, a probabilidade de bloqueio da estação se deve à falta de espaço ou espaço e energia. Se mais carregadores forem acrescentados à estação, a probabilidade de bloqueio devido à energia decresce, mas no caso extremo de  $s = 15$ , para que a probabilidade de bloqueio seja nula, será necessário designar mais que  $C = 30$  unidades de potência à estação. Pode-se observar que, à medida que a taxa de chegada de veículos aumenta, a probabilidade de bloqueio aumenta.

**Probabilidade de serviço imediato** –  $p_{c1}(CE)$ . Será analisada a probabilidade de o veículo ser imediatamente servido no cenário Conectado em Espera caso a potência designada a essa estação for incrementada em passos de 2 unidades de potência normalizada ( $C$ ) mais uma vez, para estações com porte de 7, 11 e 15 carregadores. Na Figura 5.43, para a taxa mais baixa de chegada, nota-se que, se mais potência é provida ao sistema, a probabilidade de o veículo ser imediatamente servido é evento muito provável para estações com  $s = 15$  servidores e que apresentem capacidade normalizada de energia  $C > 20$ . Nas estações com  $s = 11$ , na taxa de chegada mais baixa os resultados são muito similares à estação anterior. Para as taxas de chegada mais altas, pode-se observar no primeiro cenário com  $s = 7$  que a partir de  $C \geq 14$ , qualquer incremento de potência não confere melhoria no valor

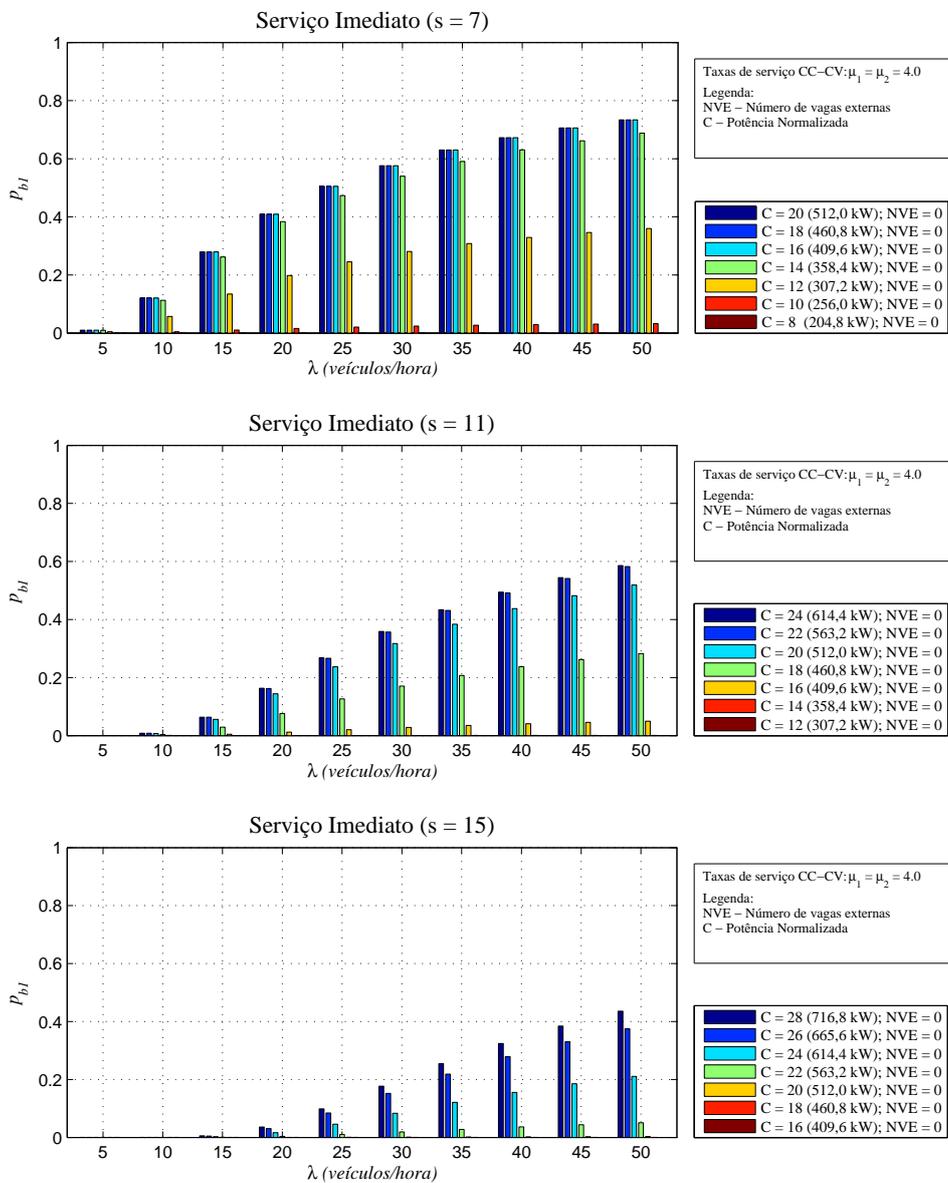


Figura 5.41: Probabilidade de bloqueio devido a falta de espaço.

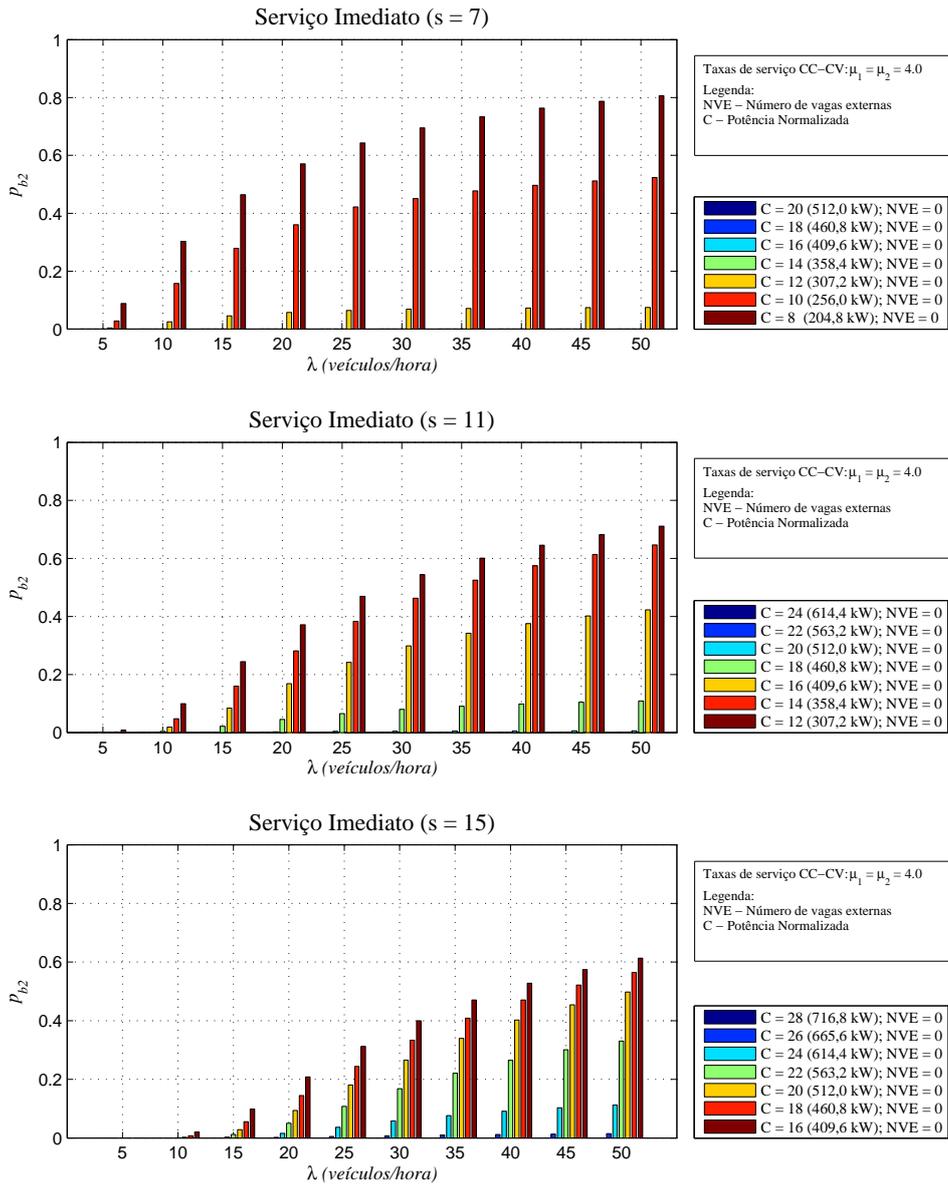


Figura 5.42: Probabilidade de bloqueio devido a falta de energia.

da probabilidade de ser imediatamente servido, ou seja, potência será contratada e desperdiçada elevando o custo fixo da estação de carga. Nas respostas dos outros cenários com  $s = 11$  e  $s = 15$  constata-se que o acréscimo de servidores promove um aumento na chance de o veículo ser imediatamente servido e o limite de incremento da capacidade da estação que leva ao desperdício de potência é mais elevado.

**Número esperado de veículos em espera –  $E[N_e(CE)]$ .** O cenário Conectado em Espera disponibiliza a opção ao cliente de aguardar conectado o momento oportuno de disponibilidade de energia. Se a concessionária disponibiliza mais potência para suprir a estação, mais carregadores que abrigavam veículos em espera podem entrar em operação e, a “fila” de conectados que aguardam diminui, como mostra a Figura 5.44. Os gráficos mostram as estações com 7, 11 e 15 carregadores. Os re-

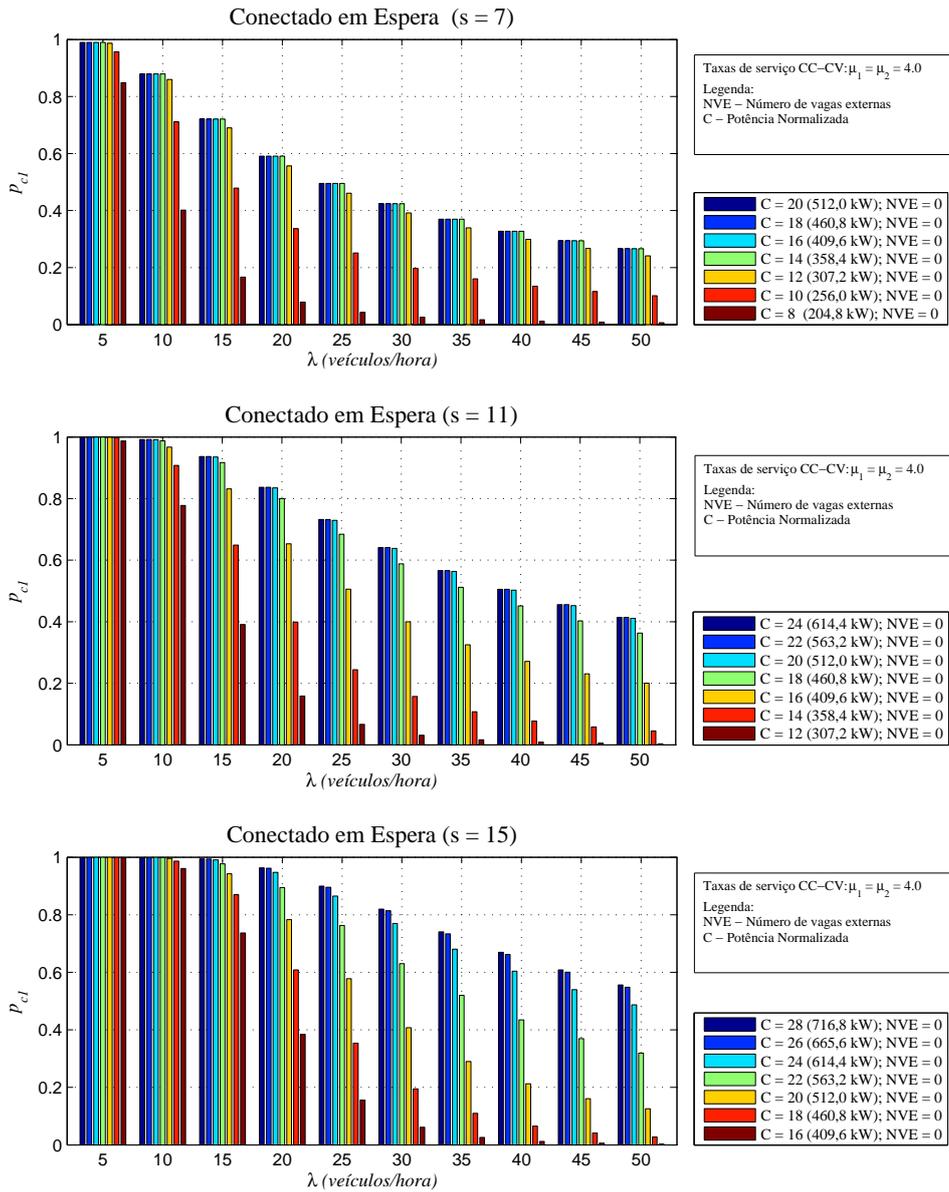


Figura 5.43: Probabilidade de serviço imediato.

sultados refletem que, ao se contratar mais energia, redirecionando aos carregadores que abrigam veículos em espera, mais veículos serão atendidos, reduzindo o número de veículos em espera na estação.

Este capítulo mostra resultados úteis que podem ser aplicados ao cenário de uma cidade, como será visto no capítulo 6, caso se conheça o fluxo médio de veículos para determinado período do dia. Com base nessa informação e no espaço físico disponível é possível aplicar o modelo adequado e obter o valor das variáveis de interesse. Assim é possível obter estatísticas valiosas para o proprietário da estação de carga e para os usuários de veículos elétricos. O número de veículos, o tempo de fila de espera, a capacidade da estação absorver a demanda com serviço imediato, a potência total demandada do sistema e seu fator de utilização determinam o quanto será gasto

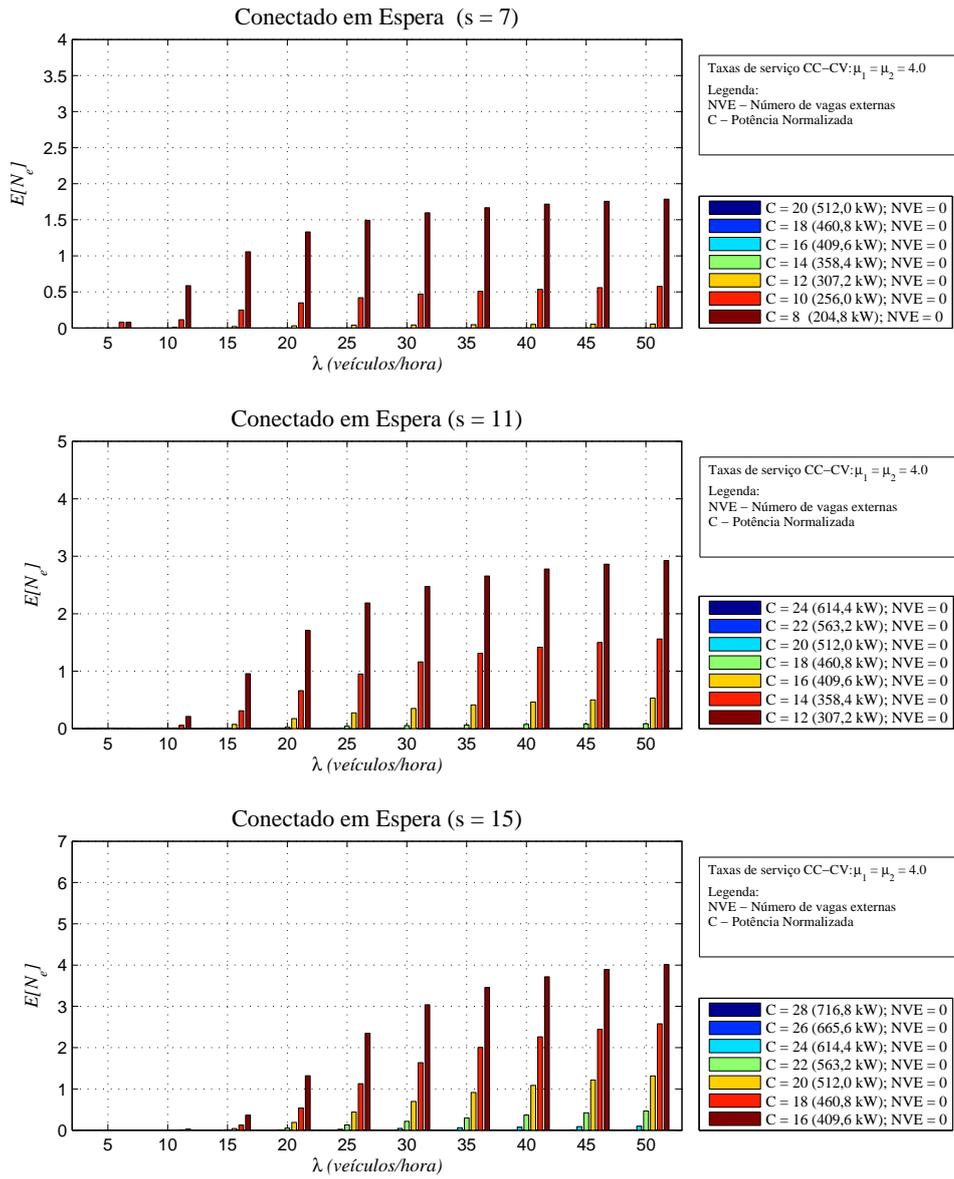


Figura 5.44: Número esperado de veículos em espera.

financeiramente para o planejamento do espaço físico e instalações elétricas da futura estação de carga. Um modelo com aproximações será discutido no próximo Capítulo.

## Capítulo 6

# Aplicação ao Caso da Cidade do Rio de Janeiro

A fim de ilustrar como os modelos propostos podem ser aplicados, são apresentados a seguir alguns resultados dos modelos aplicados a um cenário baseado na cidade do Rio de Janeiro. Segundo o Departamento Nacional de Trânsito [30] na cidade do Rio de Janeiro existem 1,8 milhões de veículos registrados. Por outro lado, existem por volta de 1,2 mil postos de gasolina para abastecer veículos na cidade [31]. Um motorista típico de uma cidade como o Rio de Janeiro trafega diariamente cerca de 50 km. Assim, tomando como base o veículo elétrico Nissan Leaf que tem autonomia de 160 km, o motorista típico da cidade precisaria abastecer a cada 3 dias, aproximadamente. Assim, supondo que só existam estabelecimentos de recarga como os convencionais postos de gasolina de hoje, e supondo também que o número de veículos previamente apresentados represente veículos movidos à bateria, ao tomarmos uma distribuição uniforme das taxas de chegadas dos veículos, ou seja, dividindo o número de veículos na cidade pela quantidade de postos e posteriormente dividindo por 72 horas, obtém-se uma taxa de chegada média em torno de  $\lambda = 20$  veículos/hora. É interessante observar que na Europa, a cidade de Amsterdã já está considerando que estações com um número de 6 carregadores é uma quantidade eficiente a ser adotada nas estações de carga rápida [32]. Como os postos de gasolina atuais na cidade do Rio de Janeiro apresentam em média 8 bombas de combustível, será atribuído aos postos de carga esse número para os equipamentos de suprimento de carga (ESCVE -  $s$ ). Assim, são obtidos resultados em postos com 8 bombas, e para a taxa de chegada  $\lambda = 20$  veículos/hora.

## 6.1 Resultados esperados na cidade do Rio de Janeiro

Os resultados abaixo descritos foram extraídos dos resultados representados nos gráficos do capítulo 5 para a taxa de 20 veículos/hora e para estações que conseguem abastecer até 8 veículos em fase-CC para os 4 cenários.

**Número esperado de veículos –  $E[N]$ .** O gráfico da Figura 6.1 mostra o número de veículos que as estações de carga nos cenários estudados conseguiriam atender na cidade do Rio de Janeiro. É possível observar que, para os cenários Básico, Serviço Imediato, Conectado em Espera e Vaga Externa, o número de veículos esperados na estação de carga seria  $E[N] = 6.62, 7.92, 10.46$  e  $13.57$  veículos, respectivamente. É preciso observar que todos os cenários conseguem energizar em fase-CC, no máximo, 8 veículos, mas apenas o cenário Básico possui só 8 carregadores em sua planta. Os demais cenários usam o reuso de energia, incorporam mais 7 carregadores que podem entrar em operação no momento adequado e ainda possibilitam espera conectada e vagas externas, o que justifica um maior número de veículos no espaço físico. Analisando as Figuras 5.22, 5.32 e 5.33 para  $s = 15$  ESCVEs e  $\lambda = 20$  veículos/hora, que representam o número de veículos em espera, observa-se que o cenário Conectado em Espera apresenta  $E[N_e(CE)] = 1.3184$  em espera, contabilizando assim,  $E[N(CE)] = 9.1445$  veículos em carga. O cenário Vaga Externa já abriga  $E[N_e(VE)] = 1.3503$  veículos conectados em espera e  $E[N_v(VE)] = 3.9548$  nas vagas externas, que resulta em um total de  $E[N(VE)] = 8.2608$  veículos em carga. O cenário Conectado em Espera se mostra mais eficiente na carga dos veículos, embora o último cenário obtenha maior lucratividade devido ao maior número de veículos que consegue receber.

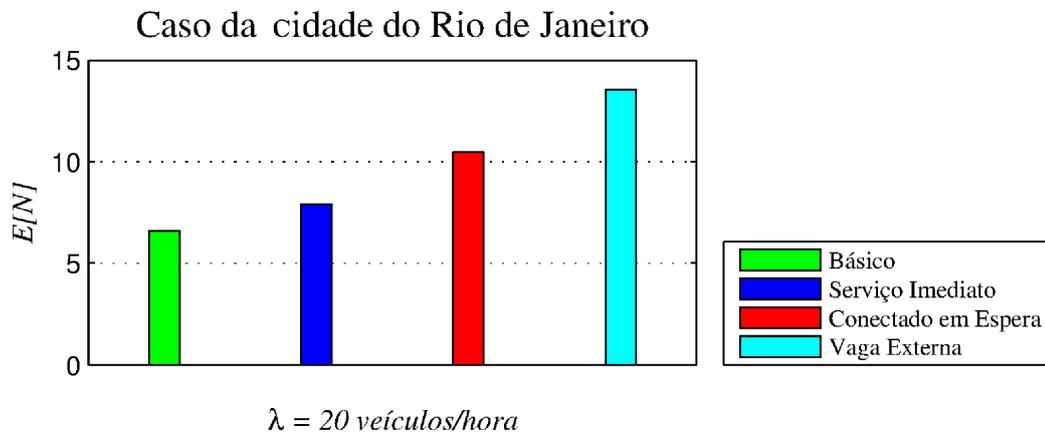


Figura 6.1: Número de veículos nos cenários propostos para  $\lambda = 20$  veículos/hora.

**Probabilidade de bloqueio** –  $p_b$ . O gráfico da Figura 6.2 ilustra a probabilidade de bloqueio observada nos cenários analisados. O valor mais alto está associado ao cenário Básico, que retorna o valor de  $p_b(B) = 0.3383$ . Nos cenários Serviço Imediato e Conectado em Espera, os valores são  $p_b(SI) = 0.2083$  e  $p_b(CE) = 0.0856$ . Finalmente, a menor probabilidade de bloqueio é observada no cenário Vaga Externa que atinge  $p_b(VE) = 0.0389$  e consegue abrigar os veículos nas vagas externas e na espera conectada. No período de 1 hora, considerando a taxa de  $\lambda = 20$  veículos/hora, 6.766, 4.166, 1.712 e 0.778 veículos não são aceitos pelos cenários Básico, Serviço Imediato, Conectado em Espera e Vaga Externa, respectivamente. O último cenário apresenta o melhor desempenho no que tange à disponibilidade que a estação de carga oferece ao receber os veículos, apresentando um valor mínimo de rejeição.

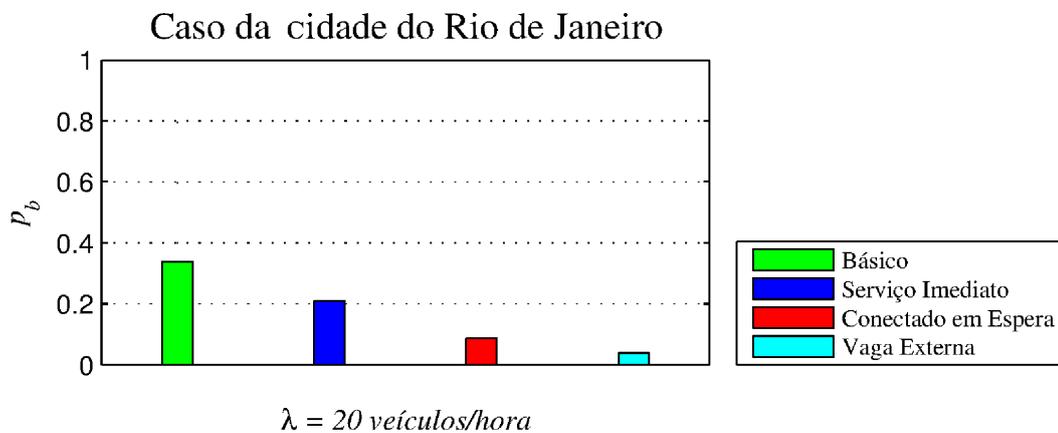


Figura 6.2: Probabilidade de bloqueio nos cenários analisados para  $\lambda = 20$  veículos/hora.

**Probabilidade de serviço imediato** –  $p_{e1}$ . O gráfico da Figura 6.3 ilustra a probabilidade de serviço imediato observado nos cenários analisados. O cenário que apresenta a maior probabilidade em servir imediatamente os veículos é o cenário Serviço Imediato. A chance de o veículo ser prontamente servido é a maior dos 4 cenários, no valor de  $p_{e1}(SI) = 0.7917$ . Em segundo lugar, tem-se o cenário Básico com  $p_{e1}(B) = 0.6617$  e, por fim, os cenários Conectado em Espera e Vaga Externa com  $p_{e1}(CE) = 0.4697$  e  $p_{e1}(VE) = 0.2714$ , respectivamente. Para a taxa de 20 veículos/hora, a ausência de espera conectada e vagas externas aumenta consideravelmente a probabilidade de ser prontamente servido para essa taxa de chegada e número de carregadores.

**Tempo esperado na fila de espera** –  $E[T_e]$ . Na Figura 6.4 estão plotados os dois cenários que apresentam tempo de espera. O cenário Conectado em Espera apresenta o menor tempo de espera por não apresentar vagas externas, e os veículos

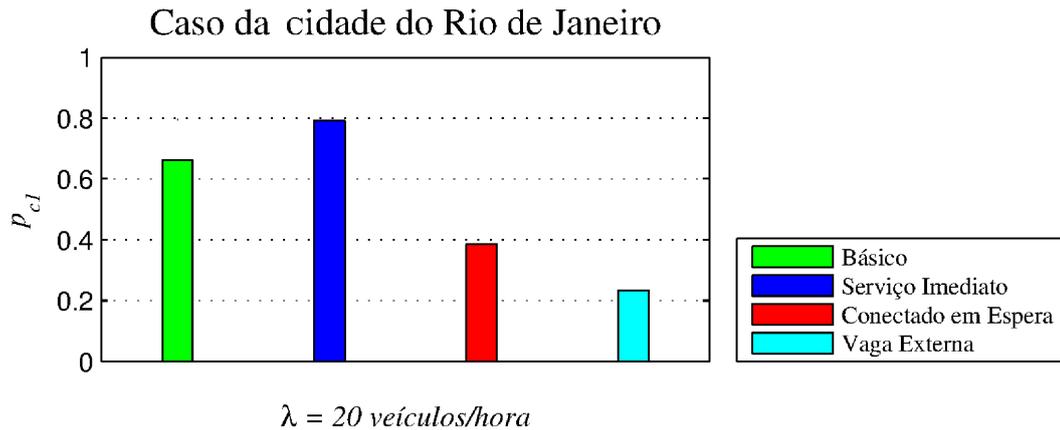


Figura 6.3: Probabilidade de serviço imediato nos cenários analisados para  $\lambda = 20$  veículos/hora.

esperam para começarem a carga, em média,  $E[T_e(CE)] = 4.34$  minutos. Já o cenário Vaga Externa apresenta um tempo de espera de  $E[T_e(VE)] = 12.34$  minutos.

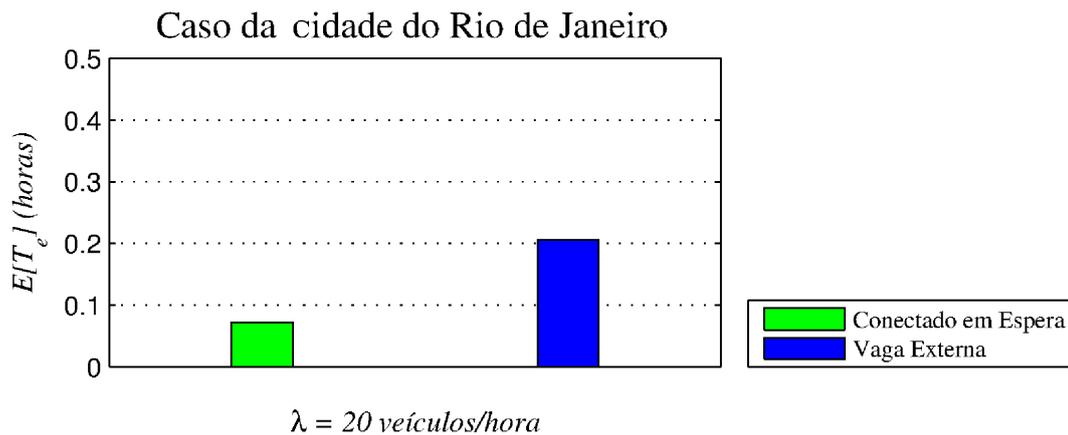


Figura 6.4: Tempo esperado na fila de espera nos cenários analisados para  $\lambda = 20$  veículos/hora.

**Potência esperada demandada** –  $E[P_d](kW)$ . O uso do espaço físico para organizar a fila de espera e dos conectores inativos usados como vaga proporciona o aumento da potência utilizada nos cenários Conectado em Espera e Vaga Externa. O fato de o veículo já estar no estabelecimento de carga aguardando conectado e nas vagas externas faz com que haja um melhor aproveitamento da potência disponível na estação. O gráfico da Figura 6.5 ilustra a potência esperada demandada observada nos cenários analisados. Os valores obtidos de potência demandada são:  $E[P_d](B) = 254.09$  kW,  $E[P_d](SI) = 303.99$  kW,  $E[P_d](CE) = 351.15$  kW e  $E[P_d](VE) = 369.07$  kW para os cenários Básico, Serviço Imediato, Conectado em Espera e Vaga Externa, respectivamente.

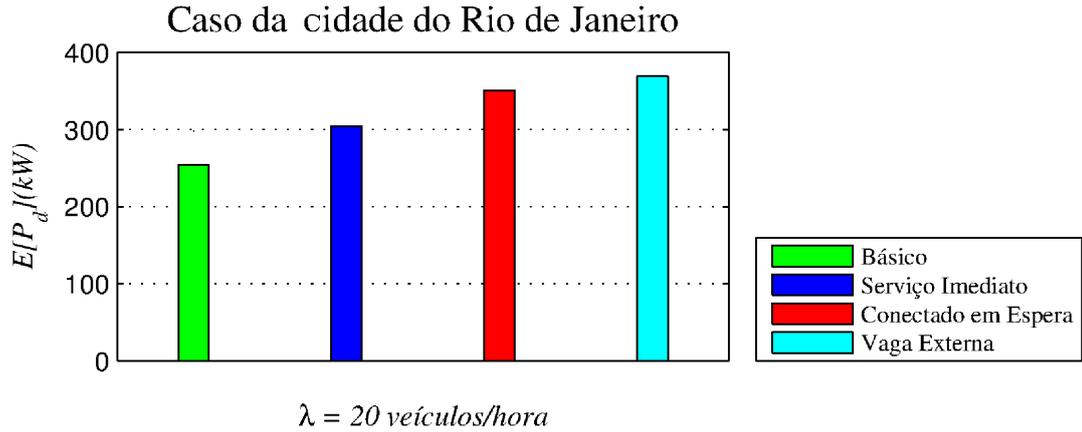


Figura 6.5: Potência esperada demandada nos cenários analisados para  $\lambda = 20$  veículos/hora.

**Porcentagem esperada da potência usada –  $E[P_u](\%)$ .** O percentual da potência utilizada maior é do cenário Vaga Externa com  $E[P_u](VE) = 90.10\%$ , seguido pelos cenários Conectado em Espera com  $E[P_u](CE) = 85.73\%$ , Serviço Imediato no total de  $E[P_u](SI) = 74.22\%$ , e por fim, com o menor valor de  $E[P_u](B) = 62.03\%$ , o cenário Básico que só apresenta 8 carregadores e não implementa o reuso de energia. O gráfico da Figura 6.6 ilustra a porcentagem da potência usada observada nos cenários analisados.

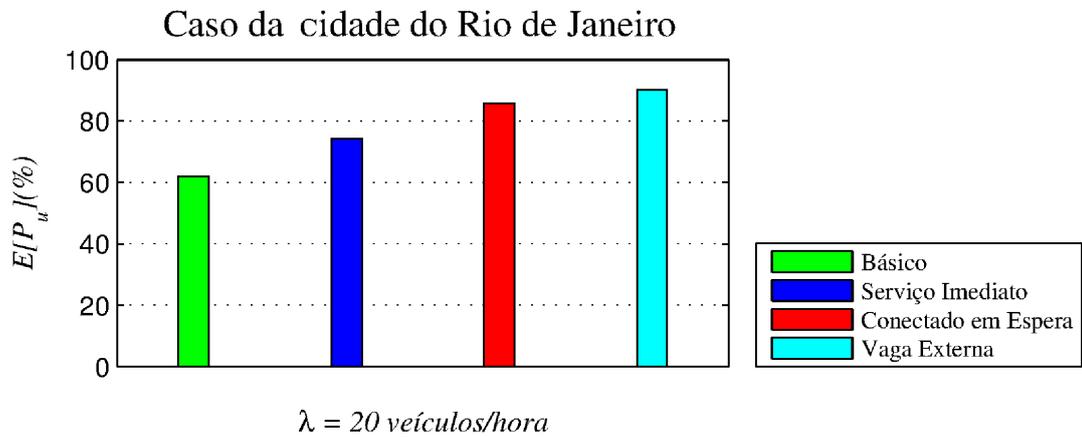


Figura 6.6: Porcentagem esperada de potência usada nos cenários analisados para  $\lambda = 20$  veículos/hora.

É necessário observar que o exemplo da cidade do Rio de Janeiro é um exemplo simplificado que foi usado para ilustrar uma aplicação futura para os modelos em estudo. O fluxo de veículos em uma cidade depende de inúmeros fatores como a densidade de veículos em bairros específicos, horas específicas do dia, se considerados os dias da semana, fins de semana ou feriados, o clima (o consumo dos veículos elétricos

varia conforme esse fator), dentre outros. Uma outra hipótese simplificadora foi a de considerar que todos os veículos que hoje transitam pela cidade, fossem 100% elétricos, o que não corresponde hoje à realidade, e muito provavelmente também não se observará no futuro próximo, uma vez que outros combustíveis não poluentes poderão também apresentar propostas promissoras, como é o caso do hidrogênio nos dias atuais. No entanto, o modelo se mostrou adequado para a previsão de valores úteis no projeto de estações de carga, e como demonstrado, pode ser facilmente parametrizado para fornecer as métricas de interesse, do ponto de vista do aproveitamento do espaço físico, da rentabilidade da estação de carga, do uso eficiente da energia disponível e qualidade de serviço esperada pelos usuários.

# Capítulo 7

## Trabalhos Relacionados

Este capítulo mostra esforços encontrados na literatura para promover a futura integração dos veículos elétricos em várias cidades do mundo. Apesar das diferenças sociais, culturais, climáticas e econômicas entre as diferentes localizações geográficas, o desafio maior parece ser comum e inerente ao novo aspecto da mobilidade sustentável – uma nova categoria de veículos, apoiada em uma nova modalidade de armazenamento de energia que substitui os tanques de gasolina, álcool, GNV e diesel: as baterias, que precisam ser recarregadas frequentemente, passa a apresentar restrições de abastecimento em relação ao consumo global de energia. Além disso, em certos casos, o período de carga deve ser compatível com o reabastecimento de combustível dos veículos com motores de combustão interna.

Diferentes preocupações surgem com o novo sistema de abastecimento. Em um primeiro momento a rede elétrica irá contar com uma nova parcela de consumidores em horários diversos, mas a principal preocupação estará no suprimento de energia nos horários de pico. Ocorrerá um impacto direto na estabilidade das redes elétricas. Muitas propostas surgem no sentido de controlar a demanda para outros horários do dia onde a demanda geral se encontra menor ou roteando os veículos para estações menos congestionadas. O espaço físico dos postos de recarga também é motivo de esforços para que o serviço ocorra sob certo grau de qualidade. Há a necessidade de estabelecer critérios na admissão de veículos ao sistema para que não ocorra congestionamento nos postos de recarga. Pode-se assim classificar os trabalhos relacionados em categorias: *Projeto de estações de recarga*, *Sistemas de comunicação com veículos elétricos* e *Impacto na rede elétrica*.

### 7.1 Projeto de estações de recarga

Ban *et al.* em [33] propõem um sistema de postos de recarga multi-fila. Da mesma forma que esta tese, é assumida uma taxa de chegada dos veículos obedecendo uma distribuição Poisson, e uma taxa de serviços obedecendo uma distribuição

exponencial. A configuração e planejamento do posto de recarga são diferentes. É investigado como o consumo de energia reage quando o comportamento dos proprietários de veículos elétricos é controlado. Em um primeiro momento é investido um esforço para que os veículos sejam alocados às estações de carga e conseqüentemente o tempo de espera seja o menor possível. Adicionalmente é proposto um tamanho limite de fila de espera nas estações de carga e proposto um algoritmo de alocação. Em um segundo momento é proposto um modelo mais realista onde o preço do abastecimento estará estritamente associado ao tamanho das filas. O incentivo de abastecer a preços mais reduzidos ou a penalidade de pagar mais irão influenciar de forma eficiente o comportamento das chegadas dos veículos aos postos de recarga.

Tendo em vista as características de consumo particulares e localizadas em determinadas horas do dia, a preocupação no dimensionamento de postos de carga é fator extensamente estudado, no sentido de prover a infraestrutura necessária ao abastecimento. As subestações de energia elétrica atendem a determinada região com base nas previsões do consumo tradicional de energia. O novo padrão de carga dos veículos elétricos se configura como um desafio, e modelos baseados em teoria de filas e cadeias de Markov se consolidam como ferramentas analíticas de apoio. Cairo *et al.* [34] propõem um método analítico baseado em cadeias de Markov para o dimensionamento de postos de carga. É feito um estudo baseado no abastecimento de veículos em áreas residenciais na cidade de Alava (Espanha), tomando como referência, dados de mobilidade dos veículos a gasolina hoje existentes, para se obter informações de distância diária média percorrida. Com base no consumo do veículo, é estimada a quantidade de energia necessária que este veículo solicitará diariamente. É proposto um modelo de cadeia de Markov contínuo no tempo baseado no processo de nascimento-e-morte que permite prever o tempo médio de espera e número médio de usuários na infraestrutura do posto de carga, obtendo-se dados para o dimensionamento das estações de recarga. Nesse aspecto a cadeia de Markov implementada no trabalho de Cairo *et al.* se assemelha bastante à cadeia apresentada nessa tese na Figura 4.1, mostrando que o modelo é uma ferramenta útil no projeto de estações de carga.

Bayram *et al.* usam em [11] um modelo bidimensional de cadeia de Markov semelhante para observar o comportamento do sistema de carga, usando diretamente a rede e o armazenamento auxiliar de energia, de acordo com estratégias diferentes de abastecimento. É usada também a métrica da probabilidade de bloqueio da estação em função das diferentes taxas de chegada e taxas de serviço, para aferir o desempenho do sistema em relação às estratégias de abastecimento. Em um primeiro momento, ocupa-se toda a rede para depois utilizar a energia armazenada do armazenamento auxiliar de energia, e invertendo-se a ordem das ocupações em um segundo momento, observa-se melhor desempenho. Mais uma vez, o emprego de um

modelo analítico como a cadeia de Markov é usada para obtenção de métricas de desempenho de forma semelhante ao modelo usado nessa tese.

Um sistema para aliviar o estresse provocado pela crescente demanda de veículos elétricos na rede elétrica, é apresentado em [12]. É sugerida uma arquitetura para carga rápida de veículos elétricos com a possibilidade de armazenamento auxiliar de energia. A arquitetura é modelada através de uma cadeia de Markov bidimensional que descreve as características operacionais e avalia o desempenho desse sistema. O armazenamento auxiliar de energia pode utilizar um banco de baterias, supercapacitores ou *flywheels*, que têm por objetivo suavizar o impacto do consumo na rede elétrica devido ao comportamento estocástico dos veículos. Estes, quando chegam para abastecer, costumam se conectar à rede de energia elétrica e, caso não haja mais bombas de eletricidade disponíveis (ligadas à rede de energia), são redirecionados às bombas ligadas ao armazenamento auxiliar de energia. Outra característica desse sistema é o reestabelecimento de energia no armazenamento auxiliar de energia, quando há bombas ociosas conectadas à rede. A energia que poderia ser despendida com mais veículos conectados à rede, é aproveitada na recarga do armazenamento auxiliar de energia para uso futuro. A métrica estabelecida para medir o desempenho do sistema é a probabilidade de bloqueio, que afere a indisponibilidade do posto de carga quando se variam as variáveis de entrada do sistema, como a taxa de chegada dos veículos, a quantidade de conexões disponíveis na rede e no armazenamento auxiliar, e a proporção dos usuários que irá utilizar cada serviço diferenciado.

## 7.2 Sistemas de comunicação com veículos elétricos

Apesar de se encontrar em estágio embrionário, o projeto de sistemas de recarga de veículo elétrico vem tomando iniciativas também relacionadas aos sistemas de comunicação veicular [9]. Atualmente, muitos veículos contam com sistemas de tecnologia sem-fio que suportam comunicação Veículo-a-Veículo (V2V - *Vehicle-to-Vehicle*) e Veículo-a-Infraestrutura (V2I - *Vehicle-to-Infrastructure*) com base nas redes celulares 3G e 4G e no protocolo IEEE 802.11p. Atualizações frequentes das localizações de postos de recarga e sua disponibilidade (vagas disponíveis e número de tomadas livres) assim como do tempo médio de espera poderão em breve ser transmitidos para os instrumentos de bordo. Além disso, a informação prévia associada ao atual estado de carga em que as baterias se encontram poderá servir de subsídio aos condutores para estimar o tempo de viagem rumo aos postos de recarga mais próximos. Neste mesmo trabalho, com o auxílio do *software* SUMO (*Simulator of Urban MObility*) são inseridas as informações geográficas dos atuais

postos de gasolina para a simulação dos futuros cenários de postos de energia elétrica na cidade. É assumido que cada posto de recarga pode fornecer até  $X$  kW de potência e, dividindo esse valor por  $k$  *plugs*, tem-se o limite de potência que pode ser fornecida a cada veículo. Em relação ao comportamento de carga das baterias é interessante notar que é usada uma aproximação linear. Para a carga rápida, como o período de carga é de 30 minutos, a taxa de preenchimento da bateria será de 3,33%/minuto. Particularmente, para o processo de descarga, o consumo é considerado somente com base na distância percorrida, independente do estilo de condução do veículo pelo usuário e perfil da estrada, que influenciam o consumo da bateria. Perfis de condução mais arrojados (maior aceleração) tendem a consumir mais que perfis mais conservadores. Estradas íngremes também aumentam o consumo. Finalmente é implementada uma visão de cooperação integrada em rede veiculares *ad hoc* ou celular que, através de troca informações V2V e V2I promove eficientemente um melhor uso da infraestrutura de carga. Cabe comentar que este artigo apresenta alguns pontos relacionados com esta tese, são eles: as características energéticas da bateria (24 kWh), autonomia do veículo (160 km) e a capacidade de potência que cada carregador pode ofertar a cada veículo, obtido pela divisão da potência total disponível na estação pelo total de carregadores da estação, semelhante ao que ocorre nessa tese, quando é calculado, para cada cenário, o número de veículos que podem receber carga em fase-CC, concomitantemente.

Na tentativa de melhorar a QoS dos postos de recarga elétrica, foram feitas propostas de algoritmos de reserva, ou seja, de acordo com os requisitos dos usuários em relação aos tempos de chegada, quantidade de carga requerida e disponibilidade de permanência na estação, um escalonamento é efetuado para que prioridades sejam atendidas e uma melhor vazão em termos de tempo de serviço seja alcançada. É exatamente o que Kim *et al.* [35] sugerem para a República da Coreia. Apesar do abastecimento poder ser realizado nas próprias residências, em shopping centers, em estacionamentos de aeroportos e instituições públicas, é nos postos de carga onde se observa a maior necessidade de coordenação. A necessidade individual de cada usuário difere, como já comentado, e tais requisitos individuais constituem dados de entrada usados pelo posto de recarga para organizar o escalonamento dos usuários através de uma função escalonadora baseada na ordem de preferência. Através de redes veiculares e comunicações de curta distância (IEEE 802.11), o usuário envia seus requisitos de carga e tempo máximo que pode aguardar no sistema, e o sistema escalonador do posto, ao receber as requisições dos usuários, as reordena: estima o tempo de realização do serviço, observa se não são excedidos os limites de tolerância para todos os pedidos, e os retorna ao usuário informando se o posto de carga pode aceitar a requisição do usuário.

Baldauf *et al.* em [36] desenvolvem um protótipo de aplicativo *Web* para celular

que permite também aos usuários de veículos elétricos obter informações a respeito de postos de carga disponíveis mais próximos da rota de destino e também efetuarem reservas em um desses postos. A idéia é estabelecer uma espécie de corretor virtual que recebe as requisições dos usuários de veículos elétricos na busca por estações de carga mais convenientes. Esse aplicativo permite aos usuários saber o quanto obterão de carga e se o atual estado das baterias (*SOC – State of Charge*) será suficiente para que cheguem até o posto de recarga. Assim, os usuários de veículos elétricos recebem as informações de disponibilidades mais próximas ao destino. Para que o processo de reserva se torne mais robusto e preciso, faz-se necessário adotar algumas medidas, como restringir a reserva a um único posto e estabelecer uma janela de tempo, dentro da qual o veículo deverá chegar. Caso essa janela seja violada, a reserva é descartada. Em paralelo, o algoritmo de escalonamento procura evitar a sobrecarga da rede. Isso ocorre porque o pedido (antecipado) de reserva de recarga permite que a demanda seja antecipada e fornece subsídios para que a energia necessária seja planejada com antecedência. Mais do que isso, os dados coletados e processados permitem uma análise para planejamento da infraestrutura elétrica em momentos futuros. É interessante observar que esse trabalho usa a autonomia de 160 km para o veículo elétrico, semelhante ao caso do Nissan Leaf.

Pode-se observar que uma grande barreira a ser vencida é a questão da simultaneidade pelo alto fator de demanda. Isso se torna mais crítico nas estações de carga rápida onde a potência é mais elevada para garantir a recarga em um tempo mais curto. O problema se agrava mais ainda nas horas de pico de consumo. Deseja-se evitar, do ponto de vista econômico, investimentos de infraestrutura da rede elétrica unicamente para atender a demanda nas horas de maior uso.

Alternativas são propostas, como é o caso da implantação gradativa de uma estrutura de tecnologia de informação e telecomunicações para contornar tais problemas. Lewandowski *et al.* [8] propõem um modelo de simulação que monitora o processo de recarga de veículos elétricos para que as subestações locais não entrem em colapso. É sugerido um Controlador de Comunicações de Veículo Elétrico (*EVCC – Electric Vehicle Communication Controller*) que envia requisições ao posto de carga (*CP – Charging Point*) e este, por sua vez, atua como um *gateway* encaminhando-as ao Controlador de Carga (*LC – Load Coordinator*). Este último recebe as requisições de todos os veículos que estão sob seu domínio e as responde com mensagens de atualização, informando o estado da rede. É interessante notar que, assim como nessa tese, os autores levam em conta o perfil de recarga característico das baterias de íons de lítio, que apresenta 3 estágios de carga. É incluído no veículo elétrico um controlador de carga (simulador). Quando a simulação se desenvolve, a mudança no estágio de carga de cada veículo ou o término de carga de algum(ns) veículo(s), faz com que o Controlador de Carga envie mensagens de atualização ao Coordenador de

Carga que recalcula a informação de capacidade de carga e a dissemina atualizando cada Posto de Carga (*CP – Charging Point*).

Uma plataforma projetada levando em conta a disponibilidade de espaço físico e coordenação de carga é proposta em [37]. A incerteza na previsão de chegadas dos veículos elétricos ao posto de carga, é um dos grandes obstáculos. A informação da quantidade de vagas disponíveis nos postos de carga é valiosa para o planejamento do espaço físico e para a previsão do consumo de energia. Os postos de carga são considerados nesse artigo entidades principais do sistema. Todas as informações relativas aos postos de carga como o número de vagas alocáveis, potência disponível, tarifação e localização geográfica são armazenadas em um controlador central. Os usuários de veículos elétricos se conectam ao controlador central pela rede celular e os aplicativos de celulares enviam requisições e recebem respostas do controlador central em relação às condições do posto de carga. O controlador, por sua vez, periodicamente atualiza as informações de todos os processos de carga em andamento nos postos de carga que controla. O sistema conta com GPS, comunicação bidirecional entre os veículos elétricos e a infraestrutura (V2I) via tecnologia sem-fio celular (GPRS or 3G), que viabiliza o envio de informações relativas ao status de bateria e localização geográfica. A partir dessas premissas, através de otimização linear obtém-se uma solução ótima favorável aos usuários, propondo uma alocação que seja pautada na localização da estação mais próxima com disponibilidade de energia, vaga e que atenda ao alcance permitido pelo estado de carga da bateria.

### 7.3 Impacto na rede elétrica

Uma previsão de implantação gradativa de veículos elétricos a longo prazo é realizada em [38]. A China é um país que apresenta uma grande frota de veículos, incluindo transporte público, táxis, veículos privados e oficiais. Desde 2009, a China vem desenvolvendo um plano que visa a substituição gradativa da frota existente de motores a combustão interna pela frota de veículos elétricos, em todos os setores de transporte mencionados. As datas que estipulam a mudança já estão acontecendo na agenda do governo. O primeiro lote de substituição está sendo no transporte público (ônibus e táxis) e carros oficiais, e por último atingirá os veículos privados até 2030. Luo *et al.* preveem o impacto da nova carga de consumo de energia elétrica, relacionando os períodos típicos de abastecimento de cada modalidade de transporte. Isso leva em conta a distância percorrida diariamente de cada modalidade de transporte e o período de abastecimento associado às oportunidades de recarga que ocorrem à noite (geralmente em carga lenta) e ao dia (geralmente em carga rápida), em horários específicos para cada tipo de transporte. É calculado o consumo previsto em 2030 de 479 GW, nas horas de pico, e chega-se à conclusão que a rede deve exercer

controle sob a demanda, pois a carga será muito alta, principalmente nos horários de pico.

Bernhard *et al.* [39] propõem uma arquitetura de comunicação baseada na entidade do agregador de veículos elétricos (*EVPP – Electric Vehicle Virtual Power Plant*) que tem a função não só de agrupar, como também de gerenciar a frota de veículos elétricos, intermediando o diálogo entre a frota de veículos elétricos e a planta geradora de energia. Os objetivos são: (i) fornecer energia suficiente aos veículos - estes precisam de um nível de carga que garanta a jornada até o destino, (ii) minimizar o custo de carga - a flutuação dos recursos energéticos (microgeração), em um futuro próximo, pode levar a uma diferenciação na tarifa de energia ao longo do dia, (iii) respeitar as restrições energéticas da rede elétrica. Assim, a figura do agregador pode ser interpretada como uma entidade-núcleo que integra os módulos de armazenamento de dados (históricos de rotas, dados de tarifação, dados de previsão do tempo, *status* da rede), módulo de previsão (depende do módulo de armazenamento de dados), módulo de informação de tarifação e relacionamento com o cliente (infraestrutura de TI que manipula as contas de usuário, consumo dos veículos) e módulo de comunicação (interconecta e recolhe informações dos usuários, da rede de distribuição e geração e demais módulos mencionados). Assim, baseando-se em históricos de viagens anteriores dos veículos, o comportamento de carga pode ser antecipado, otimizado e alinhado com as previsões de flutuação de produção de energia. Um protocolo que viabiliza a troca de informações entre o agregador e a rede de energia elétrica é a emenda IEC 61850-7-420 do protocolo IEC 61850. O padrão define dispositivos lógicos que são representações virtuais de um dispositivo físico dentro do ambiente da subestação. Um dispositivo lógico terá um ou mais nós lógicos representando os componentes do dispositivo e um servidor irá ter a função de estabelecer a comunicação com este dispositivo na rede elétrica, estabelecendo um endereço IP e uma porta. Uma planta eólica, solar ou carros elétricos conectados à rede elétrica podem pertencer aos nós lógicos desse servidor. É interessante notar que os veículos elétricos também poderão vir a representar fontes de energia distribuídas na operação V2G (*Vehicle to Grid*), na qual o veículo retorna energia à rede em momentos onde não será usado. Assim, como o padrão segue um modelo hierárquico, o dispositivo lógico <veículo elétrico> está contido no nó lógico <posto de carga>, que por sua vez está inserido no nó lógico <subestação de energia> e assim por diante [40].

Wang *et al.* [41] estudam os efeitos da ampla adoção de estações de carga rápida. É considerada a estação de carga em estacionamentos públicos, onde o comportamento de chegada dos clientes é altamente estocástico. A fim de aliviar o estresse da rede de energia devido a este consumo não convencional e proporcionar uma qualidade satisfatória dos níveis de serviço, considerou-se um armazenamento de bateria

auxiliar para suprir a demanda de clientes em horas de pico. Além disso, foi implantado um sistema de energia local, com base em energias renováveis (eólica e solar) que alimentam o sistema de armazenamento de bateria auxiliar quando as condições do tempo permitem. Assim, nesse artigo, é proposto um modelo de controle estocástico em tempo contínuo baseado em uma cadeia de Markov de nascimento e morte para mimetizar os cenários. O modelo tem um aspecto semelhante com o modelo desta tese por ser um modelo tridimensional usado para modelar o ambiente de uma estação de carga, com a sofisticação de apresentar um parque de fontes de energia renováveis dedicado.

Outro trabalho realizado por Wang *et al.* [42] propõem um plano de carga para veículos elétricos para evitar sobrecarga da rede elétrica. Estabelece-se uma arquitetura de rede elétrica inteligente com recursos de comunicação, centrada em aspectos de mobilidade e explorando recursos de redes *ad hoc* veiculares (VANETs – *Vehicle Ad hoc NETWORKs*) para comunicação em tempo real entre as unidades de acostamento (RSUs – *Road Side Units*) e veículos elétricos. A rede de comunicação desempenha dois papéis: primeiro divulga informações para os veículos sobre as condições de energia das estações de carga e segundo, reúne dados de posição geográfica atual e o estado de carga da bateria de cada veículo. Há uma entidade de um servidor de tráfego que recebe das RSUs as informações provenientes de veículos e de cada barramento da rede de energia e calcula uma estratégia de carga otimizada para o condutor do veículo.

Através dos trabalhos relacionados nota-se que os modelos de Markov se mostraram uma ferramenta útil no apoio à análise e obtenção de métricas úteis para o planejamento de uma estação de carga rápida para veículos elétricos. Nesta tese, foram propostos modelos baseados em cadeias de Markov para analisar diferentes cenários de postos de recarga, com reaproveitamento de energia ociosa, modelos inéditos na literatura. Como se pode constatar dos trabalhos relacionados, um próximo passo importante é transmitir os parâmetros obtidos através dos modelos propostos através de um sistema de comunicação com os veículos elétricos.

Nessa tese foram propostos modelos em cadeia de Markov para analisar diferentes cenários de postos de recarga, com reaproveitamento de energia ociosa, modelos inéditos na literatura. Como se pode constatar dos trabalhos relacionados, um próximo passo importante é transmitir os parâmetros obtidos através dos modelos propostos através de um sistema de comunicação com os veículos elétricos.

# Capítulo 8

## Conclusão e Trabalhos Futuros

Esta tese utilizou modelos matemáticos (cadeia de Markov de estado discreto e tempo contínuo) como ferramenta de análise para postos de recarga rápida de veículos elétricos. Com base na variação da taxa de chegada de veículos na estação e no perfil de recarga das baterias mais utilizadas hoje pela indústria automotiva, foi possível construir modelos de estação de carga e obter resultados de variáveis de interesse úteis no planejamento das estações de carga.

A análise teórica e resultados numéricos mostraram que a idealização dos 4 cenários forneceram argumentos que sedimentam a base para o projeto de uma estação de carga rápida para veículos elétricos. É importante repetir que os modelos foram elaborados com base em um conjunto de hipóteses, dentre as principais, a linearização das potências consumidas nas duas fases de carga, a premissa de os clientes só abastecerem as baterias quando estas estiverem sem carga útil, e por fim, a hipótese dos veículos só deixarem a estação com a bateria completamente carregada. Tal procedimento tornou possível a construção detalhada do primeiro modelo de Markov, e sua generalização para outros cenários.

O primeiro modelo analítico do cenário Básico permitiu gerar resultados e observar como se comportam o número de clientes, a indisponibilidade do posto (nesse cenário em específico, devido somente a falta de energia), a chance de pronto atendimento, a potência demandada e seu fator de utilização, quando alguns parâmetros de entrada variam. Esse modelo, ao disponibilizar carregadores que permitem carregar concomitantemente em fase-CC apenas os veículos que os ocupam, inspirou a construção de um modelo de cadeia de Markov mais aprimorado que aproveitasse a energia ociosa ao instalar carregadores adicionais que pudessem receber novos veículos quando alguns carregadores passassem à fase-CV de abastecimento dos veículos.

Assim, o segundo cenário foi chamado de Serviço Imediato por só admitir veículos se houver potência disponível para abastecê-los. Além disso, o posto Serviço Imediato incorpora mais carregadores à nova planta de carga que o primeiro cenário,

a fim de reaproveitar a energia remanescente. O modelo aprimorado proporcionou resultados consideravelmente melhores que o modelo do cenário Básico. Os resultados observados na potência demandada e percentual de potência utilizada, efeito do uso de equipamentos de carga adicionais em modo espera, demonstraram o aumento da capacidade do posto de carga em todos os sentidos, tanto no quesito de aproveitamento de energia quanto na qualidade do serviço prestado aferido pela probabilidade de bloqueio. Os resultados obtidos confirmam a melhoria de desempenhos nesses aspectos.

Com o intuito de aproveitar o espaço disponível nos carregadores inativos do cenário Serviço Imediato, um novo modelo de cadeia de Markov foi proposto para contemplar o novo cenário chamado de Conectado em Espera. Este modelo de estação permite receber ainda mais veículos que o segundo cenário, refletindo em maior lucro para o estabelecimento de carga. Com o novo modelo de Markov foi possível inferir o tempo que os veículos aguardariam em conexão até o momento de efetivo carregamento. Se esse valor for informado ao usuário, viabiliza que este opte por entrar na estação ou por se dirigir a outra estação nas proximidades, com menor tempo de espera. Os melhores desempenhos foram obtidos na probabilidade de bloqueio da estação nas baixas taxas de chegada, superior ao cenário anterior. Para baixas taxas de chegada, a probabilidade de ser imediatamente servido também é muito similar. Assim, se numa determinada região se esperar estas baixas taxas de chegada de veículos e, como os carregadores inativos possibilitam aos veículos a conexão em espera, sem custo adicional, vale a pena implantar esse novo modelo de estação em relação ao anterior. Nas altas taxas de chegada, o desempenho neste quesito foi modesto em relação ao cenário anterior. A probabilidade de ser imediatamente servido é menor que no cenário anterior, uma vez que a espera em conexão reduziu a probabilidade de serviço imediato. A espera conectada proporcionou um melhor desempenho, embora modesto, no percentual de utilização da potência da estação, principalmente nas altas taxas de chegada de veículos.

O quarto e último modelo de estação de recarga, o cenário Vaga Externa, considera um pátio de estacionamento onde os veículos podem esperar em vagas externas, caso a estação estivesse congestionada com todos os carregadores inativos ocupados. O uso de vagas externas depende de espaço físico. Atendido esse requisito, o cenário proporciona um maior número de veículos atendidos na estação de carga (e maior receita ao estabelecimento de carga). A probabilidade de bloqueio é consideravelmente menor para as baixas taxas de chegada, mas sutil em relação às altas taxas de fluxo de veículos em relação ao cenário anterior. A chance de ser imediatamente servido não apresenta ganhos notáveis nas baixas taxas de chegada de veículos, principalmente nas estações com mais de 9 ESCVEs, mas para as altas taxas de chegada, a chance de ser imediatamente servido é praticamente nula. Em relação

ao percentual de potência utilizado, os ganhos do último cenário são pequenos em comparação ao cenário anterior. O emprego de vagas de espera não contribui de forma muito eficiente para o aumento do fator de utilização de potência. O tempo de espera também aumenta consideravelmente, uma vez que as vagas externas, ao proporcionarem maior acúmulo de veículos na estação, provocam a formação de filas.

Assim, conclui-se que a cadeia de Markov de estado discreto/tempo contínuo revelou ser um modelo adequado para descrever, com as devidas simplificações, o ambiente de estação de carga rápida para veículos elétricos. Os modelos desenvolvidos viabilizam a obtenção de valores que são úteis no projeto de instalação de capacidade numa estação de carga de veículo elétrico. Relembrando, “capacidade” da estação de carga, no contexto desta tese, se refere tanto à capacidade energética, quanto à capacidade de espaço físico. O presente trabalho, no intuito de propor uma melhor utilização da energia contratada pela estação de carga, focou no perfil de carga peculiar das baterias de íons de lítio como um elemento fundamental no planejamento do espaço físico e para viabilizar o abastecimento de um maior número de veículos, implementando carregadores adicionais à estação de carga.

Finalmente, a cidade do Rio de Janeiro foi usada como exemplo de aplicação do modelo de previsão dos postos de carga. A aproximação da taxa de chegada de 20 veículos/hora permite inferir vários parâmetros úteis para os usuários e para o planejamento do espaço físico da estação de carga. Outro ponto relevante é observar que o modelo permite, baseado nos resultados com 8 carregadores (número usual nos postos de combustível líquido nos dias atuais) inferir para um número inferior (ou superior) de carregadores, qual taxa de chegada traria o mesmo desempenho do cenário atual. Isso permite adequar o modelo ao espaço físico disponível para a construção da estação com o número de carregadores e número de vagas de espera adequados para tentar se tornar competitivo com os concorrentes.

Como trabalhos futuros, existe a necessidade de desenvolvimento de um sistema de comunicação entre os usuários de veículos elétricos e entidades que agreguem a informação sobre os postos de carga na cidade, para que os veículos possam obter informações e formular estratégias a respeito do posto mais próximo a se dirigir baseado no estado de carga atual da bateria (aplicativos semelhantes ao WAZE poderiam ser desenvolvidos). Cabe ainda ressaltar que, caso os avanços tecnológicos permitam que novos materiais venham a constituir uma nova bateria, o novo perfil de carga pode ser adaptado aos modelos aqui propostos.

Para que a implantação efetiva dos veículos elétricos no Brasil, assim como em outros países, tenha uma maior abrangência, há vários fatores a serem considerados. Estes fatores compreendem desde ações governamentais que encorajem a população a ver nessa modalidade de transporte a melhor opção para curtas distâncias diárias a serem percorridas, assim como parcerias sólidas entre indústrias automo-

tivas e de baterias, até regulação governamental em relação às concessionárias de energia elétrica que resultem em incentivos a aquisição dos veículos elétricos. Para se ter uma idéia, um bom exemplo a ser seguido é o caso norueguês [43]. Neste país a associação NEVA (*Norwegian Electric Vehicle Association*), em cooperação com autoridades nacionais, organizações internacionais e indústria automotiva, vem trabalhando com sucesso nesse sentido. Essa entidade criou uma série de incentivos para os usuários de veículos elétricos, como a isenção de impostos na aquisição, isenção de taxas de pedágio, gratuidade em estacionamento na cidade, livre acesso em faixas onde circulam os ônibus e táxis. Mais ainda, alguns estacionamentos oferecem carregamento gratuito aos usuários de veículos elétricos. Este caso particular explica o sucesso dos veículos elétricos na Noruega.

# Referências Bibliográficas

- [1] GARCIA-VALLE, R., LOPES, J. A. P. *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*. Springer, 2013.
- [3] BOULANGER, A. G., CHU, A. C., MAX, S., et al. “Vehicle Electrification: Status and Issues”. *Proceedings of the IEEE*, 2011.
- [4] SADEGHI-BARZANIA, P., RAJABI-GHAHNAVIEHB, A., KAZEMI-KAREGARC, H. “Optimal fast charging station placing and sizing”, *Journal of Applied Energy*, v. 125, pp. 289–299, 2014.
- [5] PHONRATTANASAK, P., LEEPRECHANON, N. “Development of Fast Charging Station for Thailand”, *International Journal of Innovation, Management and Technology*, v. 3, n. 6, pp. 668–674, 2012.
- [6] RUTHERFORD, M. J., YOUSEFZADEH, V. “The Impact of Electric Vehicle Battery Charging on Distribution Transformers”. In: *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE*, pp. 396–400, 2011.
- [7] EROL-KANTARCI, M., SARKER, J. H., MOUFTAH, H. T. “Quality of service in plug-in Electric vehicle charging infrastructure”. In: *IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, pp. 1–5, 2012.
- [8] LEWANDOWSKI, C., SCHMUTZLER, J., WIETFELD, C. “A Simulation Environment for Electric Vehicle Charging Infrastructures and Load Coordination”. In: *GI Jahrestagung (1), 2010*, pp. 479–484, Set. 2010.
- [9] HESS, A., MALANDRINO, F., REINHARDT, M. B., et al. “Optimal Deployment of Charging Stations for Electric Vehicular Networks”. In: *First workshop on Urban networking-UrbaNe’12*, pp. 1–6, Nova Iorque, Nova Iorque, EUA, 2012.
- [10] BAYRAM, S., MICHAILIDIS, G., GRANELLI, M. D. F. “Local energy storage sizing in plug-in hybrid electric vehicle charging stations under blocking probability constraints”. In: *IEEE International Conference on Smart*

- Grid Communications (SmartGridComm)*, pp. 78–83, Bruxelas, Bélgica, 2011.
- [11] BAYRAM, S., MICHAILEDIS, G., DEVETSIKIOTIS, M., et al. “Strategies for competing energy storage technologies for in DC fast charging stations”. In: *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pp. 1–6, Tainan City, Taiwan, 2012.
- [12] BAYRAM, S., MICHAILEDIS, G., GRANELLI, M. D. F. “Electric Power Allocation in a Network of Fast Charging Stations”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 31, n. 7, pp. 1235–1246, Mar. 2013.
- [13] PINTO, F. A. V., COSTA, L. H. M. K., AMORIM, M. D. “Um Modelo de Previsão de Demanda de Postos de Recarga de Veículos Elétricos em Cidades Inteligentes”. In: *XX Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2014*, pp. 2794–2801, Set. 2014.
- [15] PINTO, F. A. V., COSTA, L. H. M. K., MENASCHÉ, D. S., et al. “Space-aware Modeling of Two-phase Charging Stations”, *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems - ITS*, 2015. (Submetido em 11/15).
- [14] PINTO, F. A. V., COSTA, L. H. M. K., AMORIM, M. D. “Modeling Spare Capacity Reuse in EV Charging Stations based on the Li-ion Battery Profile”. In: *The 3rd International Conference on Connected Vehicles and Expo - ICCVE*, pp. 92–98, Nov. 2014.
- [16] CORRIGAN, D. A., MASIAS, A. “Reddy TB (ed) Lindens handbook of batteries”. cap. Batteries for electric and hybrid vehicles, McGraw Hill, New York, 2011.
- [17] MUNKHAMMAR, J. *Markov-chain modeling of energy users and electric vehicles*. Tese de Doutorado, Uppsala University, 2012.
- [18] MOREA, S. F. “The Lunar Roving Vehicle - Historical Perspective”. In: *2nd Conference on Lunar Bases and Space Activities, NASA*, pp. 619–632, 2002.
- [19] MAKANSI, H., BERGHOLTZ, C. “Electric Vehicle and Batteries - Charging Ahead”. Gpbullhound Ltd., 2010. <http://www.yumpu.com/en/document/view/147913945/electric-vehicles-and-batteries-chargig-ahead-gp-bullhound> (acessado em 17/12/2015).
- [20] DINGER, A., MARTIN, R., MOSQUET, X., et al. “Batteries for Electric Cars”. The Boston Consulting Group., 2009.

<http://www.bcg.com/documents/file36615.pdf> (acessado em 17/12/2015).

- [21] LUKIC, S. M., EMADI, A. “Charging Ahead - The Development of Adequate Energy Storage Systems in Electric, Hybrid Electric and Plug-in Vehicles”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, pp. 2–12, Dez. 2008.
- [28] MAUNEY, C. “Charging a three-cell nickel-based battery pack with a Li-ion charger”. *Analog Applications Journal*, 2012. <http://www.ti.com/lit/an/slyt468/slyt468.pdf> (acessado em 17/12/2015).
- [22] INOA, E., WANG, J. “PHEV Charging Strategies for Maximized Energy Saving”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 60, n. 7, pp. 2978–2986, 2011.
- [23] HYOK-MIN, Y., JONG-HYUN, K., EUI-HO, S. “Design of a novel 50 kW fast charger for electric vehicles”, *Journal of Central South University (2013)*, v. 36, n. 4, pp. 372–377, 2013.
- [24] KESTER, W., BUXTON, J. “BATTERY CHARGERS SECTION 5 BATTERY CHARGERS”. [http://bushwalkingsw.org.au/clubsites/FAQ/FAQ\\_fsect5.pdf](http://bushwalkingsw.org.au/clubsites/FAQ/FAQ_fsect5.pdf) (acessado em 17/12/2015).
- [25] LINDEN, D., REDDY, T. B. “HANDBOOK OF BATTERIES”. cap. CHAPTER 35 - Lithium-Ion Batteries, McGraw-Hill, 1995.
- [26] OLOFSSON, P. “Probability, Statistics and Stochastic Processes”. cap. Continuous-Time Markov Chains, pp. 440–453, John Wiley and Sons, 2005.
- [27] TRIVEDI, K. S. “Probability and Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Applications”. cap. Continuous-Time Markov Chains, pp. 405–450, John Wiley and Sons, 2002.
- [29] DE SOUZA E SILVA, E., FIGUEIREDO, D. R., LEAO, R. M. “The TANGRAM II Integrated Modeling Environment for Computer Systems and Networks”, *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, v. 36, n. 4, pp. 64–69, 2009.
- [30] DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO DO RIO DE JANEIRO - DETRAN-RJ. “Estatísticas”, [http://www.detrان.rj.gov.br/\\_estatisticas.veiculos/04.asp](http://www.detrان.rj.gov.br/_estatisticas.veiculos/04.asp) (acessado em 17/12/2015), 2015.

- [31] AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO - ANP. “Postos cadastrados no Município do Rio de Janeiro”, <http://www.anp.gov.br/postos/consulta.asp> (acessado em 17/12/2015), 2015.
- [32] AM-SMART-ERDAM CITY. “The municipality of Amsterdam is expanding the charging network for electric vehicles with six fast chargers”. out. 2015. <http://amsterdamsmartcity.com/news/detail/lang/en/id/717/slug/the-municipality-of-amsterdam-is-expanding-the-charging-network-for-electric-vehicles-with-six-fast-chargers>.
- [33] BAN, D., MICHAILIDIS, G., DEVETSIKIOTIS, M. “Demand response control for PHEV charging stations by dynamic price adjustments”. In: *ISGT '12 Proceedings of the 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, pp. 1–8, 2012.
- [34] CAIRO, J., CRUZ, M., SUMPER, A. “Dimensioning electric charging posts for PEV”. In: *Integration of Renewables into the Distribution Grid, CIRED 2012 Workshop*, pp. 1–4, Mai. 2012.
- [35] KIM, H.-J., LEE, J., PARK, G.-L., et al. “Security-Enriched Urban Computing and Smart Grid Communications in Computer and Information Science”. v. 78, cap. An Efficient Scheduling Scheme on Charging Stations for Smart Transportation, pp. 274–278, Springer, 2010.
- [36] BALDAUF, M., BESSLER, S., FRÖHLICH, P. “Prototyping A Mobile Routing Assistant for Optimizing Energy Scheduling and Charging of Electric Vehicles”. In: *Adj. Proceedings of the 4th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI), Workshop on Electric Vehicle Information Systems*, pp. 1–5, Portsmouth, EUA, 2012.
- [37] RUZMETOV, A., NAIT-SIDI-MOH, A., BAKHOUYA, M., et al. “Towards an optimal assignment and scheduling for charging electric vehicles”. In: *Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2013 International*, pp. 537–541, Mar. 2013.
- [38] LUO, Z., SONG, Y., HU, Z., et al. “Forecasting Charging Load of Plug-in Electric Vehicles in China”. In: *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, pp. 1–8, Jul. 2011.
- [39] JANSEN, B., BINDING, C., SUNDSTROM, O., et al. “Architecture and Communication of an Electric Vehicle Virtual Power Plant”. In: *Smart*

*Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*, pp. 149–154, Out. 2010.

- [40] GUIMARÃES, P. H. V., MURILLO, A., ANDREONI, M., et al. “Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC’2013”. cap. Comunicação em Redes Elétricas Inteligentes: Eficiência, Confiabilidade, Segurança e Escalabilidade, 2013.
- [41] WANG, Q., BAYRAM, I. S., GRANELLI, F., et al. “Fast Power Charging Strategy for EV/PHEV in Parking Campus with Deployment of Renewable Energy”. In: *Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), 2014 IEEE 19th International Workshop on*, pp. 370–374, Dez. 2014.
- [42] WANG, M., LIANG, H., ZHANG, R., et al. “Mobility-Aware Coordinated Charging for Electric Vehicles in VANET-Enhanced Smart Grid”, *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, v. 32, pp. 1344–1360, 2014.
- [43] HAUGNEL, P., KVISLE, H. H. “Norwegian electric car user experiences”. In: *EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, pp. 1–11, Set. 2013.