

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO**

**Guilherme de Oliveira da Silva**

**PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE COM INCERTEZA NA  
DEMANDA EM UNIDADES DE DISTRIBUIÇÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Santa Maria, RS  
2019

**Guilherme de Oliveira da Silva**

**PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE COM INCERTEZA NA DEMANDA EM  
UNIDADES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de Concentração em Métodos Quantitativos para Tomada de Decisão, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do Título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Vinicius Jacques Garcia

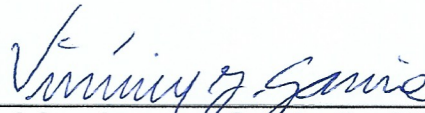
Santa Maria, RS  
2019

Guilherme de Oliveira da Silva

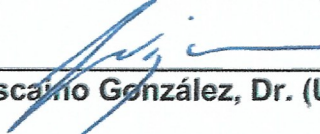
**PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE COM INCERTEZA NA DEMANDA EM  
UNIDADES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de Concentração em Gerência da Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

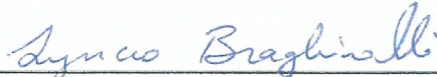
Aprovado em 19 de fevereiro de 2019:



**Vinícius Jacques Garcia, Dr. (UFSM)**  
(Presidente / Orientador)



**José Frederico Viscaíno González, Dr. (UNESP) - Parecer**



**Lynceo Falavigna Braghirolli, Dr. (UFSC) - Videoconferência**

Silva, Guilherme de Oliveira da Silva  
Planejamento de capacidade com incerteza na demanda  
em unidades de distribuição de energia elétrica /  
Guilherme de Oliveira da Silva Silva.- 2019.  
55 p.; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção, RS, 2019

1. Distribuição de energia elétrica 2. Planejamento de  
capacidade 3. Pesquisa operacional 4. Incerteza de  
demanda 5. Gestão de serviços I. Título.

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe Claudia e à minha avó Maria, pessoas as quais são as verdadeiras responsáveis por toda e qualquer conquista ao longo de minha vida, sendo as grandes fontes de minha inspiração pessoal e profissional e a principal razão de minha dedicação e persistência, hoje e sempre.

Ao meu irmão Douglas, igualmente responsável por minhas conquistas, pelo exemplo profissional e humano, pela preocupação e presença ao longo de minha vida e por ser minha referência no que diz respeito a basicamente tudo.

À minha avó Fani, a qual tenho a mais absoluta certeza que vibra de onde está com cada passo à frente e cada conquista por mim alcançada, agradeço pelos anos de convivência e pelo imensurável carinho e amor para mim e meu irmão dedicados.

À minha namorada Luciana, pela paciência e incentivo ao longo dos anos, pelo companheirismo e por ser parte indissociável de meu bom estado de espírito, a quem admiro pela pureza e coração genuínos que possui.

Aos meus amigos de faculdade, de mestrado e de infância, pelo apoio e por serem meu refúgio e braço forte nos momentos difíceis, por estarem sempre comigo, independentemente da situação.

Ao professor Dr. Vinícius Garcia, por todos ensinamentos no campo profissional e humano, pelo grande exemplo profissional e ético, por todo incentivo e dedicação e confiança em mim depositados. Estendo este mesmo agradecimento ao professor Dr. Lynceo, o qual teve grande contribuição não apenas neste trabalho, mas em boa parte de minha trajetória acadêmica, passando por graduação e mestrado.

Às servidoras Márcia e Laura do PPGEP, pela disponibilidade e boa vontade em me ajudar antes, durante e após o curso de mestrado, meus mais sinceros e profundos agradecimentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro fornecido ao longo do curso de mestrado e a RGE CPFL Energia pelos dados fornecidos para desenvolvimento do estudo.

## RESUMO

### PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE COM INCERTEZA NA DEMANDA EM UNIDADES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

AUTOR: Guilherme de Oliveira da Silva  
ORIENTADOR: Vinicius Jacques Garcia

O sucesso de um sistema de atendimento de serviços está diretamente ligado ao desempenho observado para tal sistema. Em unidades de distribuição de energia elétrica, um dos fatores que afetam a performance dos atendimentos é a incerteza relacionada ao ingresso de ordens de serviço, a qual agrega variabilidade ao sistema, dificultando a previsibilidade da capacidade necessária para atender a demanda. Este trabalho objetiva o desenvolvimento de um projeto de capacidade sob incerteza de demanda através de um modelo de programação linear estocástica, visando minimizar a capacidade máxima atingida pelo sistema. Para isto, modelos de distribuição de probabilidade foram ajustados a dados históricos de ocorrência de ordens de serviço e, após a geração de números aleatórios para um grande número de cenários, a capacidade máxima atingida e seu comportamento a partir da variação dos parâmetros de prazo para cumprimento das ordens e estoque inicial de ordens foram analisados. A partir disto, foi possível verificar que a variação dos parâmetros citados possui impacto sobre a capacidade máxima, alterando o comportamento do sistema.

**Palavras-chave:** Distribuição de energia elétrica, Planejamento de capacidade, Pesquisa operacional, Incerteza de demanda, Gestão de serviços.

## **ABSTRACT**

### **CAPACITY PLANNING WITH DEMAND UNCERTAINTY IN ELECTRIC POWER DISTRIBUTION UTILITIES**

**AUTHOR:** Guilherme de Oliveira da Silva  
**ADVISOR:** Vinicius Jacques Garcia

The service management system performance is closely related to the operational success. When considering electric power distribution systems, regulatory polices impose penalties and minimum service levels which demand a carefully observation on the available capacity. This work proposes a capacity planning approach involving uncertain demand by applying a stochastic linear programming model, in such a way that the maximum capacity is minimized. First, a probability distribution models are fitted to historical data to be further applied in random number generation, considering a large number of scenarios. From these numbers, a maximum capacity is obtained by using a deterministic linear programming model, specifically developed to include order deadlines and uncertain demand. Numerical results demonstrate how the proposed approach is suitable not only to have the final capacity level but also to study the variation on the initial inventory and its corresponding effect on the maximum capacity obtained.

**Keywords:** Electric power distribution, Capacity planning, Operational research, Demand uncertainty. Service management.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Nuvem de palavras .....	21
Figura 2 – Problema de planejamento de capacidade simplificado.....	23
Figura 3 – Exemplo prático de problema de planejamento de capacidade .....	24
Figura 4 – Etapas da pesquisa.....	25
Figura 5 – Obra de Nguyen, Sivakumar e Graves (2018) x presente trabalho.....	26
Figura 6 – Síntese do modelo desenvolvido.....	29
Figura 7 – Parâmetro de entrada.....	29
Figura 8 – Modelo conceitual.....	30
Figura 9 – Variáveis .....	31
Figura 10 – Conjuntos e funções .....	32
Figura 11 – Sobreposição de conjuntos .....	32
Figura 12 – Dias da semana e distribuições ajustadas.....	39
Figura 13 – Procedimento para geração e sequenciamento de números .....	40
Figura 14 – Valores de $q$ (global).....	41
Figura 15 – Valores de $q$ para variação de $W$ ( $E_0 = 4,88$ ) .....	42
Figura 16 – Valores de $q$ para variação de $W$ ( $E_0 = 112,71$ ) .....	42
Figura 17 – Valores de $q$ para variação de $W$ ( $E_0 = 290,65$ ).....	43
Figura 18 – Valores de $q$ para variação de $E_0$ ( $W = 2$ ) .....	45
Figura 19 – Valores de $q$ para variação de $E_0$ ( $W = 3, 5$ e $7$ ) .....	45
Figura 20 – $E_0$ e capacidade máxima $q$ : o ponto de inflexão .....	46



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estrutura exemplo da matriz de registro de ordens .....	36
Tabela 2 – Coeficiente de variação: dias da semana x dias do mês .....	37
Tabela 3 – Séries correspondentes a cada dia da semana.....	39
Tabela 4 – Variação de $q$ a partir de $E_0$ , para $W = 2$ e $W = 3$ .....	46

## LISTA DE SÍMBOLOS

$W$	Tempo máximo para execução das ordens
$E_0$	Estoque inicial de ordens
$n$	Número de unidades de tempo do horizonte de planejamento
$ORDENS$	Número de horas de ordens comerciais gerado aleatoriamente
$z_{ij}$	Ordens que chegam em $i$ e são alocadas para atendimento em $j$
$x_{ij}$	Ordens que tiveram agendamento para $i$ , mas foram realocadas para $j$
$d_j$	Taxa de saída de ordens do sistema
$\Delta_j$	“Carrega” ordens das variáveis $X_{ij}$ e $Z_{ij}$ que devem, ser atendidas no período $j$
$q$	Máxima capacidade requisitada ao longo do horizonte de tempo
$p$	Soma das ordens que foram postergadas para outro período de planejamento
$s$	Soma das ordens que devem, necessariamente, ser atendidas no período $j$
$v_{lj}$	Variável que indexa o que foi adiantado, em um período $j$ , de períodos futuros $l$
$adiant_{lj}$	Número de ordens de um instante futuro $l$ que foram atendidas no atual $j$
$dem\_total$	Soma, em horas, de todas ordens que entraram no sistema
$saida\_total$	Soma, em horas, de todas ordens que saíram do sistema
$N$	Conjunto dos períodos de 1 a $n$
$N_1$	Conjunto dos períodos de 1 a $(n+1)$
$N_2$	Conjunto dos períodos de $(W+1)$ a $(n+1)$
$N_3$	Conjunto dos períodos de 1 a $W$
$N_k$	Período $(n+1)$
$N\_1$	Período 1
$VJ_1$	Conjunto dos períodos de $W$ a $(n-W)$
$VJ_2$	Conjunto dos períodos de $(n-W+1)$ a $(n-1)$
$VJ_3$	Conjunto dos períodos de 1 a $(W-1)$
$N_{ADIANT}$	Conjunto dos períodos de 1 a $(n-W)$
$FL_1$	Função $(j+1)$ a $(j+W)$
$FL_2$	Função $(j+1)$ a $n$
$FL_3$	Função $(j+1)$ a $W$
$FL_4$	Função $(W+1)$ a $(j+W)$
$F_A$	Função $(l-1)$

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1.	OBJETIVOS .....	12
1.1.1.	Objetivo geral .....	12
1.1.2.	Objetivos específicos.....	12
1.2.	JUSTIFICATIVA .....	13
1.3.	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	14
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
2.1.	PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE .....	15
2.2.	INCERTEZA DE DEMANDA .....	17
2.3.	GESTÃO DE OPERAÇÕES .....	19
2.4.	SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
<b>3</b>	<b>O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE</b> .....	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>ABORDAGEM PROPOSTA</b> .....	<b>25</b>
4.1.	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	26
4.2.	ANÁLISE E TRATAMENTO ESTATÍSTICO DA DEMANDA .....	27
4.3.	APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO .....	28
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>36</b>
5.1.	EXPERIMENTO NUMÉRICO.....	36
5.2.	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	40
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO E CONCLUSÕES</b> .....	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>48</b>
	<b>APÊNDICE A – RESUMO DA REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desempenho de um sistema de atendimento de serviços merece ênfase semelhante ao de áreas estratégicas dentro das empresas, sendo os danos e implicações resultantes de um baixo desempenho as principais causas a que se deve tal ênfase (FITZSIMMONS; FITZSIMMONS, 2014). Toor (2008) ao comentar alguns pontos chave para a elaboração de um sistema de serviços de alto valor, define o nível de serviço como sendo uma espécie de índice que relaciona a expectativa do cliente com o que é fornecido pelas companhias, traduzido, muitas vezes, no encontro ou desencontro da demanda com a capacidade. Dentro do setor de distribuição de energia elétrica, Wu, Lee e Cao (2009) destacam que as empresas fornecedoras deste serviço dão grande ênfase no planejamento das interrupções do fornecimento de energia, visando minimizar o impacto para os clientes afetados e seguindo regulamentações para o agendamento destas interrupções.

O desempenho insatisfatório de um sistema de atendimento gera distúrbios prejudiciais a clientes e a própria prestadora em diversos setores. Elkhuisen et al. (2007) mostram a necessidade de se atingir as metas de nível de serviço estipuladas bem como formas de eliminar o acúmulo de pedidos em espera. No contexto de serviços de atendimento de energia elétrica, Lima et al. (2017) relatam consequências financeiras negativas geradas pela má concepção de um sistema de atendimento, especialmente relacionadas a questões de pico de demanda não previstas pelo projeto de capacidade. Segundo Mital (2010), semelhante a afirmação “zero defeitos” difundida no campo industrial, no ambiente de serviços há de se seguir o princípio de “zero falhas”, de modo a evitar discrepâncias entre o esperado pelo cliente e o serviço fornecido.

Neste contexto, as contribuições com maior relevância que vislumbram propostas de melhorias para sistemas de atendimento utilizam-se de técnicas matemáticas com vistas a um planejamento de capacidade mais adequado. Jiang e Seidmann (2013), Vlachos, Georgiadis e Iakovou (2007), So e Song (1998), Eppen, Martin e Schrage (1989) e Mieghem (2003) tratam do planejamento de capacidade sob a ótica de estratégia de negócio, avaliando pontos como, por exemplo, investimentos em expansão de capacidade, planejamento de capacidade para instalação de serviços de capital intensivo e avaliação de produtividade de plantas industriais.

Os trabalhos de Nguyen, Sivakumar e Graves (2018), Atwa e El-Saadany (2011), Dong, Lee e Song (2015), Higginson, Whyatt e Silvester (2010), Kurz (2016) e Rajagopalan e Yu (2001) trabalham o planejamento de capacidade no nível tático, de maneira a definir o número ótimo de servidores necessários, em cada contexto, para minimizar custos e evitar ociosidade, extraindo o melhor desempenho possível do sistema. Há, ainda, estudos que apresentam

propostas de melhoria através do uso de técnicas e conceitos vinculados a teoria das filas, casos dos trabalhos de Yankovic e Green (2011), Chadha, Singh e Kalra (2012) e Xu et al. (2014).

De maneira geral, os estudos desenvolvem projetos de capacidade sendo que alguns consideram o fator de incerteza de demanda, porém sem a garantia de que o modelo elaborado forneça resultados dentro dos limites de tempo usualmente existentes na prática. No que se refere ao setor de distribuição de energia elétrica, é relevante destacar que apesar de algumas das pesquisas considerarem o aspecto da incerteza da demanda, o fator crítico do prazo máximo para execução de ordens de serviço não é tratado, o que mostra a carência de trabalhos neste tema.

O presente estudo propõe um modelo de planejamento de capacidade capaz de lidar com a incerteza da demanda e com os prazos para execução de ordens de serviço, especificamente, no contexto dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Para isso, com base em modelos existentes na literatura, um modelo de programação linear estocástico foi desenvolvido, seguido de um experimento numérico a fim de aferir a adequação do modelo à realidade. Desta maneira, este trabalho serve como ferramenta de apoio à tomada de decisão com vistas ao gerenciamento de sistemas de atendimento.

## 1.1. OBJETIVOS

A finalidade desta pesquisa pode ser separada em objetivos geral e específicos, os quais são melhor detalhados e explorados nas subseções seguintes.

### 1.1.1. Objetivo geral

Desenvolver um modelo de planejamento de capacidade sob incerteza de demanda para empresas distribuidoras de energia elétrica, considerando diferentes prazos de atendimento de ordens de serviço e garantindo que tais prazos sejam, necessariamente, respeitados.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- i. Adaptação do modelo de programação linear estocástica de Nguyen, Sivakumar e Graves (2018) para o contexto de distribuidoras de energia elétrica, mantendo a característica de incerteza de demanda;

- ii. Inclusão e consideração do atributo de cumprimento dos prazos de atendimento das ordens de serviço na solução do projeto de capacidade;
- iii. Avaliação da eficácia do modelo de planejamento de capacidade desenvolvido por meio de experimento numéricos comprobatórios, indicando os principais fatores de impacto no modelo.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

O setor de distribuição de energia elétrica possui participação de 3,5% no Produto Interno Bruto (PIB), sendo responsável direto por 209 mil empregos, além de gerar receitas equivalentes a 216 bilhões de reais anuais e receber investimento em torno de 13,8 bilhões de reais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA - ABRADDEE, 2016). Apesar da relevância econômica, o setor de distribuição de energia elétrica apresenta alguns indicadores insuficientes relacionados a satisfação do cliente. Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2010), atributos como qualidade percebida, satisfação e confiança giram em torno de 70%, ao passo que confiabilidade apresenta 48,08% como índice final, de onde se pode supor que o setor como um todo possui uma baixa confiança de seus clientes.

A conjuntura deste estudo abrange as particularidades e restrições existentes no processo de atendimento de serviços de uma empresa de distribuição de energia elétrica. Cabe destacar a complexidade do tipo de operação realizada por empresas deste ramo, sendo a existência de tal complexidade atribuída a significativa variabilidade observada no ingresso de serviços programados e emergenciais. Estes serviços, por sua vez, são processados por equipes e precisam ser equilibrados com a capacidade de processamento da empresa para que não se tenha recursos ociosos nem a capacidade máxima de processamento ultrapassada e uma provável diminuição do nível de serviço.

Os diferentes setores e casos onde há o desenvolvimento de modelos de planejamento de capacidade, bem como a expressividade do setor de distribuição de energia elétrica para a economia do país demonstram a magnitude do tema e o impacto de soluções que tenham este campo como alvo. Apesar de existente, supõe-se que o conteúdo acadêmico relacionado ao tema mostra-se, ainda, insuficiente, principalmente por não investigar todas as peculiaridades que o tema engloba, o que legitima o desenvolvimento desta pesquisa do ponto de vista teórico. Além disso, o enfoque deste trabalho se dá, mais precisamente, nas facetas ainda não exploradas

pelos trabalhos como, por exemplo, prazo para cumprimento de ordens de serviço, o que amplifica o impacto do estudo e garante o fornecimento de informações novas às empresas do setor interessadas na contribuição prática resultante do trabalho.

### 1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Na próxima seção, segunda do texto, apresenta-se o embasamento teórico para o desenvolvimento da pesquisa através, principalmente, da exposição do conteúdo dos trabalhos tomados como base para realização do estudo. A terceira e quarta seção trazem, respectivamente, a explanação do problema em questão e suas características e a abordagem metodológica proposta neste estudo para tratar do problema descrito. A quinta seção traz os resultados obtidos a partir do que foi traçado nas seções anteriores e, por fim, a sexta seção finaliza o trabalho apresentando os principais achados e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Há um número extenso de estudos que buscam solucionar problemas de planejamento de capacidade, passando por diversos setores e contextos. A incerteza na demanda surge como um advento a ser considerado em determinados casos; em outros, o enfoque na gestão de operações necessárias para realização das atividades planejadas é que ganha destaque. Este estudo está endereçado dentre estes três grandes campos – planejamento de capacidade, incerteza de demanda e gestão de operações – tendo como cenário as operações de sistemas de atendimento de concessionárias de energia elétrica.

### 2.1. PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE

O campo de *planejamento de capacidade* envolve trabalhos que, essencialmente, desenvolveram formas de lidar com o problema de adequação da capacidade à demanda, essa última, normalmente, com certo grau de incerteza. Modelos de programação linear e não-linear, associados a metodologias estruturadas em etapas bem definidas compõe boa parte das obras endereçadas neste campo.

Nguyen, Sivakumar e Graves (2018) desenvolveram um modelo de planejamento de capacidade para determinar o número de médicos necessários para atender um sistema com reentrada de pacientes, comparando tal modelo a um modelo puramente determinístico (NGUYEN; SIVAKUMAR; GRAVES, 2015). Dentre as contribuições dessa pesquisa, destacam-se i) a inclusão da característica de incerteza de demanda no modelo e ii) a inserção de um “risco de violação”, o qual representa a máxima probabilidade de um pedido de um paciente ser negado.

Vlachos, Georgiadis e Iakovou (2007) apresentam políticas de planejamento de capacidade em cadeias de suprimento reversas, considerando, além de fatores econômicos e ambientais, aspectos ligados a legislação vigente para tal atividade e o impacto na imagem da empresa com relação a seu comprometimento com a sustentabilidade. Atwa e El-Saadany (2011), apresentam uma metodologia para otimizar a alocação de unidades de geração distribuída a partir do vento em sistemas de distribuição, visando minimizar perdas de energia anuais. O problema é tratado por um modelo de programação não linear inteira mista, em que a função objetivo busca minimizar a perda de energia anual do sistema.

Mieghem (2003) expõe uma revisão da literatura quanto à gestão estratégica da capacidade, tendo em vista a determinação do quanto se deve investir em capacidade, bem como o momento



adequado e o tipo de investimento a ser realizado. O autor ainda demonstra possíveis ajustes em razão da incerteza enfrentada em alguns casos. So e Song (1998) analisam o impacto para empresas prestadoras de serviços de se empregar estratégias de garantia de tempo de entrega, em ambientes onde a demanda pode variar em função do preço e do prazo de entrega. Os autores elaboraram um modelo de otimização que considera de forma conjunta as variáveis de precificação, garantia de tempo de entrega e decisões de expansão de capacidade, com uma função objetivo que busca maximizar o lucro líquido médio.

Eppen, Martin e Schrage (1989) descrevem um modelo utilizado por uma montadora de automóveis para tomada de decisão sobre aumento de capacidade em suas linhas. O modelo de programação linear inteira mista estocástica, considerando o fator de risco, apresentou resultados que explicitaram a ociosidade de duas dentre quatro plantas industriais, servindo como base de informação para tomada de decisão. Dong, Lee e Song (2015) conceberam um modelo de programação estocástica de dois estágios, o qual é capaz de lidar com o planejamento de capacidade em serviços e com o roteamento dinâmico de containers em linhas de transporte marítimo.

Higginson, Whyatt e Silvester (2010) desenvolveram em sua obra uma espécie de guia de como se elaborar um planejamento de capacidade capaz de atender a demanda, especificamente, para o contexto de departamentos de emergência em hospitais. O trabalho apresenta de forma minuciosa quatro etapas a serem seguidas para a construção de um planejamento de capacidade, as quais incluem, entre outros aspectos: i) a compreensão do comportamento da demanda e ii) possível variação e sazonalidade, sendo este um ponto crucial para o bom desempenho de qualquer planejamento de capacidade. Kurz (2016) propõe a utilização de tecnologias de informação avançada na prestação de serviços de manutenção, investigando os benefícios que tal uso traz a processos complexos de manutenção, os quais estão associados a multas a seus provedores em caso de não cumprimento de prazos estabelecidos em contrato. O autor utiliza-se de um modelo de filas GI/G/1 para modelar o fluxo de trabalho, onde os custos de capacidade e multas são minimizados e as variáveis de decisão são as próprias taxas de serviço.

Jiang e Seidmann (2013), realizaram o desenvolvimento de uma abordagem integrada para o desenho simultâneo de um gerenciamento de contratos eficiente e um planejamento de capacidade para serviços de capital intensivo. Rajagopalan e Yu (2001) apresentam, dentro de um ambiente de produção *make-to-order*, um modelo de programação não-linear inteira capaz de auxiliar nas decisões relativas a capacidade dentro um ambiente de produção que enfrenta congestionamentos. A relevância de se reduzir os impactos de congestionamentos a fim de se

assegurar o atendimento de *lead times* é uma das principais incorporações do modelo apresentado, que tem vistas a garantir e minimizar o tempo de entrega ao cliente.

## 2.2. INCERTEZA DE DEMANDA

A *incerteza de demanda* é um fator que influencia a funcionalidade de diferentes modelos em diferentes cenários. Este fator, devido a sua usual e difícil tratabilidade, é, por vezes, deixado de lado nos procedimentos realizados em pesquisas de planejamento de capacidade. Ainda assim, por se tratar de algo inerente a determinados problemas, é de vital importância que se considere tal fator na elaboração de modelos os quais visam replicar a realidade com a maior assertividade possível, caso encontrado no presente trabalho. Desta maneira, pode-se dizer que neste campo há trabalhos em diferentes contextos que exploram o elemento de incerteza, geralmente associado a variabilidade da demanda inerente a cada caso.

Nesta linha, Calafiore e Ghaoui (2006) demonstram como adaptar restrições – pertencentes aos modelos de programação linear – as quais estão sujeitas à incerteza de demanda nos dados que as especificam. Em suma, os autores demonstram que, de acordo com a classe da distribuição de probabilidade que os dados seguem, há formas de contorno para essa situação de modo a garantir que o modelo possa ser resolvido com eficiência. Ainda, Calafiore e Ghaoui (2006) mostram que, mesmo em casos em que não se tenha conhecimento total da distribuição de probabilidade dos dados, também é possível estabelecer contornos nestas restrições para que o modelo possua solução.

Neste contexto do planejamento de capacidade – algumas obras já apresentadas para tal campo no presente estudo incorporam o fator de incerteza de demanda – Hu et al. (2015) formularam um modelo de programação dinâmica capaz de auxiliar na decisão do resguardo de capacidade para que se garanta o atendimento de situações emergenciais, sem desconsiderar a carga de trabalho advindo de *backlog*. Tais situações emergenciais estão necessariamente ligadas a uma incerteza de demanda inerente a este tipo de situação e são tratadas de forma diferente em relação ao cálculo de capacidade para demandas regulares (*backlog*).

Chien, Dou e Fu (2018) apresentam um modelo de estratégia de decisão multiobjetivo para estimativa de capacidade em indústrias manufatureiras de semicondutores. Baseado na teoria da incerteza para expansão e migração da capacidade, o modelo visa balancear decisões relacionadas a capacidade para que não se sobrestime nem se deixe ociosa a produção de

semicondutores, minimizando perdas financeiras potenciais em função deste excedente e/ou escassez de produção. Com relação a tratamento da variabilidade da demanda, os autores utilizaram o método de Delphi para gerar a distribuição de probabilidade dos dados, já que não possuíam um histórico de dados razoável para ajustes de distribuições.

A incerteza de demanda também aparece como elemento relevante em trabalhos inseridos em outros cenários que não o de planejamento de capacidade. Cardoso, Barbosa-Póvoa e Relvas (2013) apresentam um modelo de programação linear inteira mista voltado a gestão da cadeia de suprimentos, abrangendo atividades de produção, distribuição e logística reversa. O modelo dos autores fornece, através de seus resultados, informações importantes para de decisões de localização de plantas, depósitos e armazéns; o elemento de incerteza se dá através da demanda de produtos e é tratado por uma abordagem de árvore de cenários.

Mukhopadhyay e Ma (2009) mostram um sistema híbrido capaz de avaliar peças novas e peças usadas como forma de *input* de um sistema de produção. Através dos registros de rendimento relacionadas às partes usadas, o modelo informa a quantidade ótima para produção e suprimento, dentro de três cenários que variam conforme o acervo de informações de rendimentos disponível. Com relação à demanda, os autores ajustaram uma distribuição uniforme aos dados e comentam que é possível trabalhar com outras distribuições conforme comportamento dos dados. Em um ambiente de fabricação ágil, Pan e Nagi (2010) tratam de um problema de cadeia de suprimentos sob incerteza de demanda dos clientes, onde um modelo de otimização robusta foi desenvolvido para o desenho de tal cadeia. O modelo visa minimizar custos associados a variabilidade de demanda e multas em função do não cumprimento de atendimento de demanda; para tal objetivo, o autor trata a variabilidade da demanda com a construção de uma árvore de cenários.

Alguns dos trabalhos já citados neste estudo também agregam a seus modelos (ainda que não como principal contribuição) o tratamento a variação da demanda. Dong, Lee e Song (2015) e Wang, Tang e Huo (2013) ajustaram distribuições de probabilidade conhecidas a seus dados; Lima et al. (2017) ajustou um modelo de Box & Jenkins para estimar os parâmetros do modelo estatístico e simular cenários de demanda e Elkhuisen et al. (2007) fez uso do recurso de simulação para que o modelo fosse capaz de lidar com as variações diárias de demanda.

Conforme o que foi examinado nos trabalhos citados e, tomando por base a revisão de literatura realizada, de maneira simplificada e geral, há três formas de se tratar a incerteza na demanda: árvore de cenário, variáveis aleatórias e processos estocásticos. Para o presente estudo, o ajuste

dos dados a distribuições de probabilidade foi o método utilizado devido a boa representação que os modelos estatísticos apresentaram em relação aos números reais, com baixo percentual de erro.

### 2.3. GESTÃO DE OPERAÇÕES

O campo de *gestão de operações* engloba trabalhos os quais não estão necessariamente ligados a técnicas para desenvolvimento de planejamento de capacidade. A literatura se mostra mais inclinada à forma de como se deve pesquisar sobre o tema, apontando critérios e métodos para os pesquisadores formularem seus trabalhos de forma a contribuir, de maneira prática, para gerentes de operações de diversas áreas. O rigor das pesquisas é destacado como fator crítico de sucesso, visto que a replicação dos feitos dos trabalhos é o principal objetivo para este campo.

Nesta direção, McCutcheon e Meredith (1993) comentam que, de maneira geral, trabalhos relatando estudos de caso são vistos por alguns como obras que pouco contribuem para o contexto da ciência e a prática de gestão de operações, devido à falta de rigor e objetividade. Contrapondo este argumento, os autores apresentam trabalhos bem-conceituados que seguiram o método de estudo de caso e complementam apresentando uma espécie de guia para garantir que determinada pesquisa seja bem desenvolvida quanto a seu rigor.

Voss, Tsiriktsis e Frohlich (2002) defendem a importância de se utilizar estudos de caso para a compreensão do gerenciamento de operações, sintetizando em alguns passos básicos a construção de um bom estudo de caso para este campo de pesquisas. Coughlan e Coughlan (2002) guiaram seu trabalho apresentando como pesquisadores e gestores de operações podem aprender com as atividades práticas intrínsecas a este tipo de atividade. Os autores demonstram que o método de pesquisa-ação é adequado para o desenvolvimento de pesquisas sobre gestão de operações, argumentando que este método é capaz de promover conhecimento através das vivências práticas de gestores atuantes na área.

Forza (2002) mostra uma pesquisa seguindo método *survey* para compreensão do estado da arte da gestão de operações. O autor destaca algumas lacunas em pesquisas sobre a área e coloca como principal contribuição de sua obra o incremento da qualidade de pesquisa voltada a gestão de operações. Ainda Forza (2002) apresenta as devidas situações em que o método *survey* se encaixa como método de pesquisa e ilustra, passo a passo, como conduzir um trabalho seguindo

tal método, explicitando alguns atributos característicos de pesquisas bem estruturadas dentro da área.

Sousa e Voss (2008) trazem o estudo de gestão de operações para o contexto da teoria da contingência, apresentando um trabalho que mostra uma série de pontos a serem melhor explorados dentro do tema. Os autores destacam que o conhecimento em teoria da contingência é importante para profissionais do campo de gestão de operações, visto que o não reconhecimento dos limites de aplicação de algumas práticas de gestão de operações podem levar a implementação destas em contextos inadequados, gerando transtornos e prejuízos aos envolvidos.

Para o contexto de sistemas de atendimento de serviços no setor de distribuição de energia elétrica, tem-se a obra de Perrier et al. (2013), que envolve uma pesquisa feita pelo método *survey* com diversos trabalhos que exploram o contexto citado. Dentre estes, destacam-se aqueles cujas contribuições promovem melhorias nas operações dos sistemas de atendimento, tratando, entre outros temas complementares, de problemas de agendamento de equipes e roteamento de veículos, majoritariamente.

Johns (1995) e Weintraub et al (1999) tratam em suas obras de um problema de roteamento de veículos onde buscam, respectivamente, minimizar a distância total e o tempo total nas rotas percorridas. Ambos englobam em sua estrutura a estocasticidade de pedidos de reparos advindos dos clientes, o que confere um grau de incerteza de demanda aos modelos desenvolvidos. Além disso, ainda vale destacar que o primeiro também incorpora o fator de janela de tempo para realização de reparo, utilizando-se de heurísticas para solução do problema apresentado.

Yao e Min (1998), Wu et al. (2004) e Wu, Lee e Cao (2009) exploram o problema de otimização de despacho de unidades de reparo para reestabelecimento do fornecimento de energia aos clientes. O primeiro apresenta um modelo de programação matemática de três níveis (tático, estratégico de curto prazo e estratégico de longo prazo), focando seu estudo, prioritariamente, na designação das equipes de reparo; os outros dois, combinam conceitos de agendamento e designação de equipes, utilizando a lógica *fuzzy* e um algoritmo híbrido para solucionar os problemas, respectivamente. Outros exemplos de obras que remetem a otimização de despacho de equipes são as de Guha et al (1999) e Guikema et al (2006), onde ambos buscam minimizar o tempo de interrupção de fornecimento do serviço devido a catástrofes naturais.



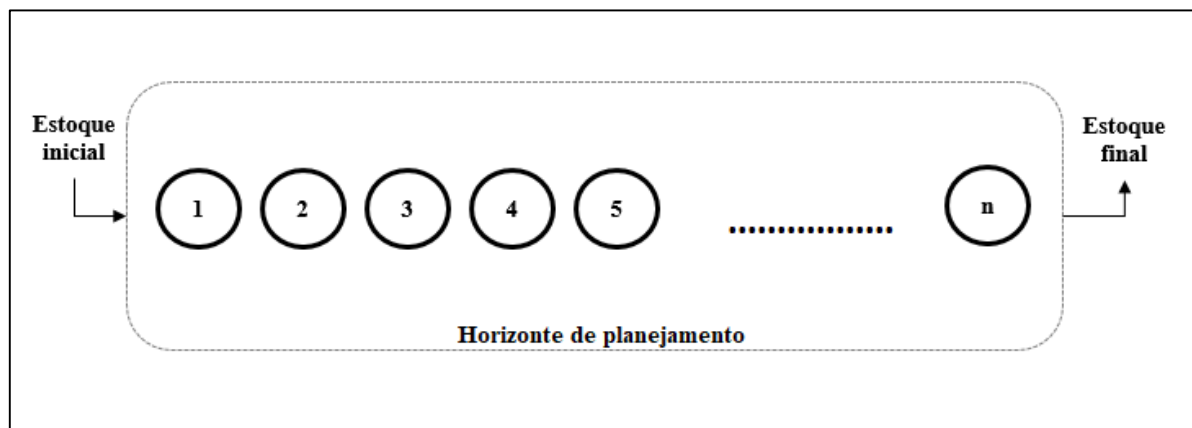
prazo possa ser variado) e também a reentrada de tais ordens no sistema. No presente estudo, um modelo que permite avaliar o impacto da variação do prazo de atendimento de ordens no sistema e que, ao mesmo tempo, abrange a possibilidade de que tais ordens possam ser realocadas para outro momento (respeitando o seu prazo de vencimento para execução), é apresentado.

### 3 O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE

A Figura 2 traz uma descrição geral do problema de planejamento de capacidade para um sistema de atendimento de serviços no setor de distribuição de energia elétrica. De maneira simplificada, tem-se um horizonte de planejamento que se constitui de 1 até  $n$  períodos – podendo se tratar de dias, semanas, meses, etc. – acompanhados de um estoque inicial e final de ordens, que podem ser comerciais ou emergenciais. De modo geral, ambos tipos de ordens chegam aleatoriamente ao sistema, porém, há diferenças significativas entre elas.

As ordens comerciais se caracterizam pela possibilidade de agendamento conforme prazo para sua execução, ao passo que ordens emergenciais demandam atendimento o mais rápido possível, pois em sua maioria representam interrupções indesejadas no fornecimento de energia elétrica causadas por ações da natureza ou falhas humanas e de equipamentos. Quanto aos estoques, o estoque inicial advém de horizontes de planejamento passados, os quais não tiveram suas demandas totalmente atendidas e, portanto, postergaram o atendimento destas para horizontes futuros; de forma análoga, o estoque final representa a demanda não atendida no horizonte presente e postergada para horizontes futuros.

Figura 2 - Problema de planejamento de capacidade simplificado



Fonte: Autor (2019)

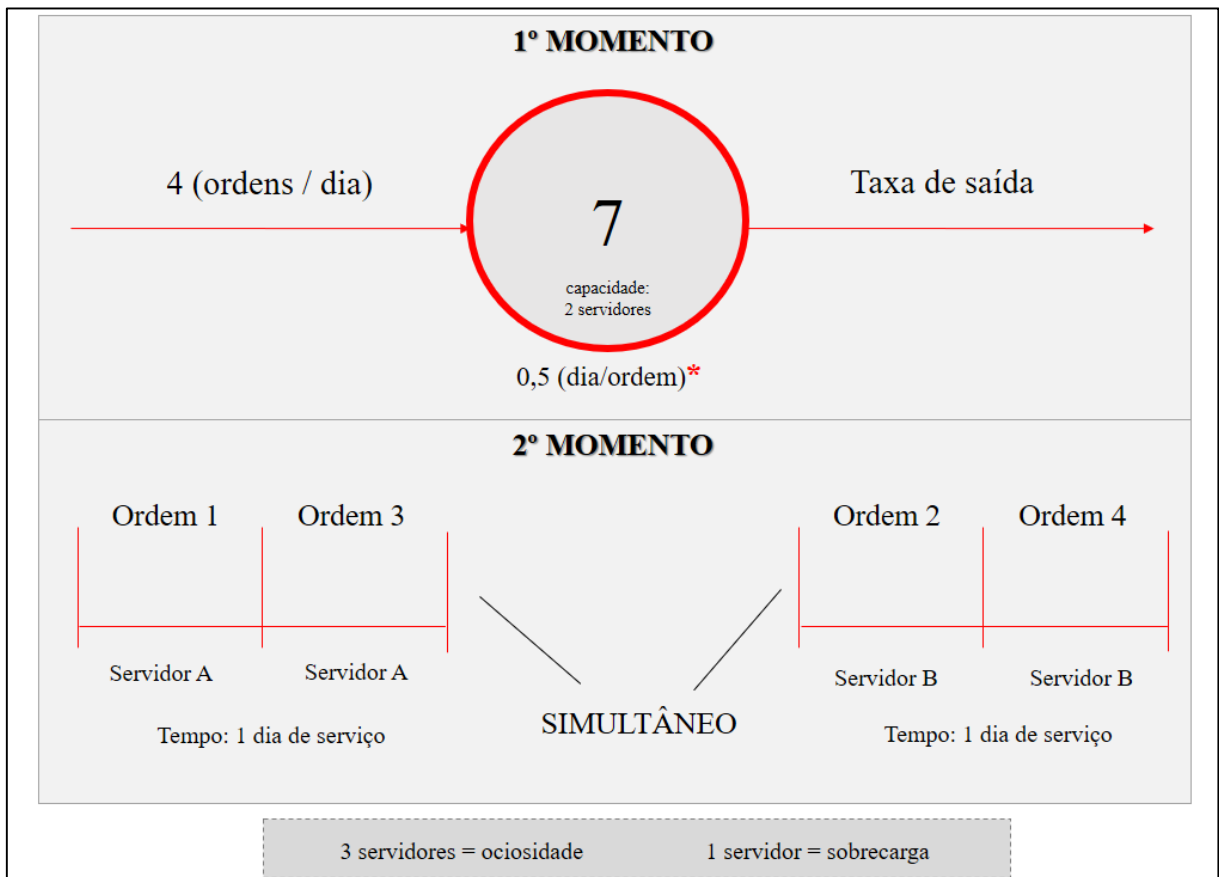
A Figura 3 introduz um exemplo prático a fim de demonstrar um pouco da complexidade encontrada neste tipo de planejamento. Partindo do sétimo dia de um horizonte de planejamento, de uma demanda de ordens comerciais igual a 4, de uma capacidade de 2 servidores e de um tempo de serviço equivalente a 12 horas (ou 0,5 dia), o que se percebe, após observação do 2º momento da Figura 3, é que a busca elementar consiste em achar um número ótimo de capacidade, pois tanto a falta desta quanto a ociosidade são prejudiciais ao sistema. A falta de capacidade implica no não atendimento total da demanda no período e consequente



postergação desta – o que, necessariamente, implica em aumento de demanda para o próximo período. Já a ociosidade representa um custo desnecessário, visto que, para determinada demanda, a capacidade instalada não seria utilizada totalmente, ao passo que o gasto incorrido para tê-la disponível existiria da mesma forma.

No ambiente em questão, é comum que se trabalhe tanto com estoque inicial quanto com estoque final e, mais do que isso, existem objetivos relativos a estes estoques a serem alcançados dentro do horizonte de planejamento (como, por exemplo, estoque final igual ao estoque inicial; ou, ainda, estoque final igual a zero). Além disso, todas ordens possuem prazos máximos para que sejam executadas e, portanto, torna-se mais complexa a tarefa de postergar a demanda, pois tal postergação deve, incondicionalmente, respeitar estes prazos.

Figura 3 - Exemplo prático de problema de planejamento de capacidade



Fonte: Autor (2019)

Ainda em relação aos prazos máximos para execução de ordens, há de se citar que o aumento do prazo máximo implica na diminuição da capacidade máxima que o sistema atinge, pois há uma flexibilização no tempo para execução das ordens, o que permite uma dissolução da demanda por mais períodos. Desta forma, o pico de capacidade atingido ao longo do horizonte

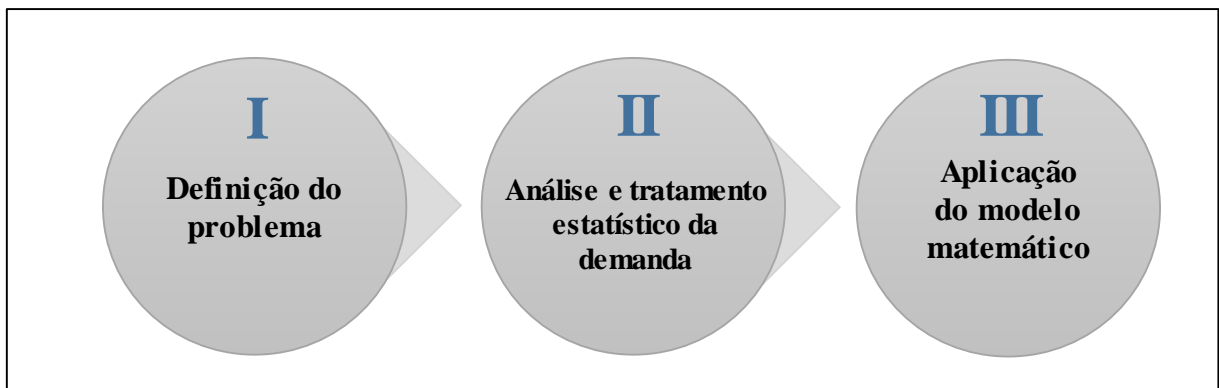
de planejamento – ou seja, a capacidade máxima – diminui, visto que as ordens não estão mais tão concentradas em poucos períodos, mas sim espalhadas por mais períodos.

Outro fator central dentro do planejamento de capacidade é a variabilidade da demanda. Sendo esse um aspecto de difícil tratamento, é válido destacar que quanto mais estável for a demanda existente, mais preciso se torna o planejamento de capacidade – em contraponto, uma grande variabilidade de demanda implica em dificuldades de planejamento. Uma das formas de se lidar com esta incerteza inerente à demanda é o tratamento estatístico dos dados provenientes de históricos de ocorrências de ordens de serviço, de maneira a conceber um caráter mais estável a demanda, aumentando a precisão do planejamento; além disso, a representação da característica estocástica da demanda – através das formas comentadas no fim da subseção 2.2 – deve ser considerada no projeto de capacidade. Toda conjuntura descrita nas Figuras 2 e 3, juntamente com o agravante dos fatores de variabilidade e prazo para cumprimento de ordens, constituem o problema de planejamento de capacidade.

#### 4 ABORDAGEM PROPOSTA PARA O PROJETO DE CAPACIDADE

Esta seção apresenta a abordagem utilizada para o tratamento do problema de planejamento de capacidade, que pode ser visualizada, em suas etapas, na Figura 4. Resumidamente, o que se apresenta é uma espécie de passo a passo de como realizar o procedimento que foi feito neste estudo, passando pela definição do problema, pelo modelo matemático desenvolvido e pelo experimento numérico. Desta forma, dadas as limitações que serão posteriormente apresentadas, esta seção estabelece as diretrizes para que a abordagem proposta possa ser reproduzida para outras unidades de distribuição de energia elétrica, proporcionando a replicação do método utilizado neste trabalho.

Figura 4 - Etapas da pesquisa



Fonte: Autor (2019)

Sob a ótica de metodologia científica, é válido ressaltar que, a pesquisa é de natureza aplicada (TURRIONI; MELLO, 2012), visto que tem por objetivo a obtenção de conhecimentos a partir do tratamento de uma situação prática. Com relação aos objetivos, ainda segundo Turrioni e Mello (2012), a pesquisa se enquadra como exploratória em virtude de que busca o desenvolvimento de um modelo o qual seja capaz de representar um cenário real, estabelecendo, assim, uma maior familiaridade com o problema, por meio da melhor compreensão de seu comportamento.

Segundo Miguel et al. (2012), quanto à abordagem, a pesquisa é quantitativa, pois tem-se a modelagem matemática de um fenômeno com vistas a quantificá-lo numericamente, visando a realização de análises com base no problema tratado. Quanto ao método, conforme Miguel et al. (2012), o estudo é de modelagem e simulação, sendo tal método empregado em trabalhos em que se deseja captar o comportamento de um sistema a partir de um modelo e simular possíveis modificações e cenários, a fim de se avaliar como se comporta tal sistema frente às variações propostas.

#### 4.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A definição do problema passa por algumas delimitações necessárias na busca pela solução do mesmo. Desta forma, por fins de simplificação, algumas limitações foram aceitas, sendo elas:

- i) Tempo de execução constante para as ordens de serviço;
- ii) Apenas ordens comerciais programadas no sistema;
- iii) Desconsideração do impacto da localização geográfica das ordens.

É importante ressaltar que tais limitações não invalidam a representatividade do modelo. O que se tem, de fato, é um modelo capaz de representar uma parcela vasta e importante do caso real, o qual serve como base imprescindível para desenvolvimentos futuros que, em última instância, representem a realidade global.

Como parte complementar da definição do problema, é importante destacar a abordagem utilizada na obra de Nguyen, Sivakumar e Graves (2018). A estrutura do problema explorado neste estudo é semelhante à estrutura do problema apresentado por Nguyen, Sivakumar e Graves (2018), envolvendo, porém, algumas diferenças devido ao diferente contexto de aplicação. Assim, a Figura 5 sintetiza tais diferenças, estabelecendo um paralelo entre o que foi desenvolvido neste trabalho e o que foi desenvolvido no trabalho de Nguyen, Sivakumar e Graves (2018).

Figura 5 – Obra de Nguyen, Sivakumar e Graves (2018) x presente trabalho

	<b>Nguyen, Sivakumar e Graves (2018)</b>	<b>Presente trabalho</b>
<b>Ambiente</b>	Serviços de saúde	Serviços de distribuição de energia elétrica
<b>Janela de tempo</b>	Metas de <i>lead-time</i> máximo para atendimento de pacientes	Metas de prazo máximo para execução de ordens
<b>Estocasticidade</b>	Chegada de pacientes	Chegada de ordens comerciais
<b>Demanda</b>	Separada em duas categorias: pacientes de primeira visita (FV) e pacientes de reentrada (RV)	Analisada e estratificada conforme menor variabilidade, seguindo uma só categoria.
<b>Capacidade</b>	Calculada levando em consideração taxas de saída constantes ( $\alpha$ para FV e $\beta$ para RV)	Calculada levando em consideração o que é mandatório para o período em questão juntamente com o que pode ou não ser adiantado.

Fonte: autor (2019)

Além das particularidades já citadas em relação à obra de Nguyen, Sivakumar e Graves (2018), a abordagem proposta precisa lidar com outras peculiaridades típicas do âmbito de serviços de

distribuição de energia elétrica. Nesta direção, Fonini (2016) traz alguns elementos relevantes que vão ao encontro do panorama desta pesquisa. O autor discorre sobre a complexidade de um sistema de atendimento em uma empresa de distribuição de energia elétrica, na qual tem-se diversos tipos de serviços prestados aos clientes, serviços estes que precisam ser alocados às respectivas equipes de trabalho de forma a minimizar tempo e custo de execução.

Alguns fatores críticos para o atendimento de serviços neste tipo de operação devem ser considerados, como: a otimização da composição do despacho das equipes para execução de ordens, as penalizações as quais são impostas por entidades reguladoras pelo não atendimento aos níveis de serviço – em função disto é de vital importância a execução das ordens dentro do seu prazo máximo para atendimento – e o complexo equilíbrio buscado entre a execução de ordens emergenciais, as quais ingressam no sistema de forma inesperada, e ordens comerciais programadas com prazo máximo para execução.

#### 4.2. ANÁLISE E TRATAMENTO ESTATÍSTICO DA DEMANDA

A análise de demanda compreende, basicamente, o entendimento do comportamento da demanda e de sua variabilidade. A partir de tal análise, torna-se possível tratar o problema com maior acurácia e previsibilidade, possibilitando, assim, melhores resultados na próxima etapa de aplicação do modelo matemático. A seguir, o procedimento de análise e tratamento estatístico da demanda é descrito passo a passo, explicitando todas medidas necessárias para o cumprimento desta etapa da abordagem proposta.

- i) Cálculo da média e desvio padrão de ordens por dia da semana (1 a 7), dia do mês (1 a 31) ou qualquer outra forma de chegada de ordens (não necessariamente cronológica em relação ao histórico) que se deseje investigar: este passo visa o cálculo do Coeficiente de variação (CV) – que consiste na divisão do desvio padrão pela média – a fim de que se investigue qual forma de chegada das ordens tem menor variação;
- ii) Cálculo do tempo médio de execução das ordens;
- iii) Definição do parâmetro de entrada  $n$ , o qual corresponde ao horizonte de planejamento;

- iv) Desenvolvimento para simular o caráter estocástico do parâmetro de entrada *ORDENS* – que corresponde ao número de horas de ordens comerciais que chegam aleatoriamente ao sistema – conforme os seguintes passos:
  - a. Multiplicação do respectivo número de ordens acumulado no dia pelo tempo médio de execução, a fim de se transformar a unidade de número de ordens para número de horas de ordens (a opção por se trabalhar as ordens em horas, e não simplesmente em número de ordens, se dá em função da maior facilidade de se trabalhar estatisticamente com os dados nesta unidade);
  - b. Separação do histórico conforme forma de chegada de menor variação para obtenção de novas séries. Por exemplo, se o histórico compreende 5 anos de ordens e o horizonte de chegada de menor variação é por mês do ano (ou seja, 1 a 12), 12 novas séries seriam obtidas;
  - c. Cálculo da média e desvio padrão de cada novas séries e exclusão dos valores das que estejam fora dos limites de média  $\pm 2$  desvios padrões;
  - d. Ajuste de distribuição de probabilidade a cada uma das novas séries;
- v) Para cada uma das distribuições ajustadas, geram-se números aleatórios que, conjuntamente, formam um o horizonte de planejamento  $n$ ;
- vi) Repetição do passo anterior 1.000 vezes, gerando 1.000 demandas.

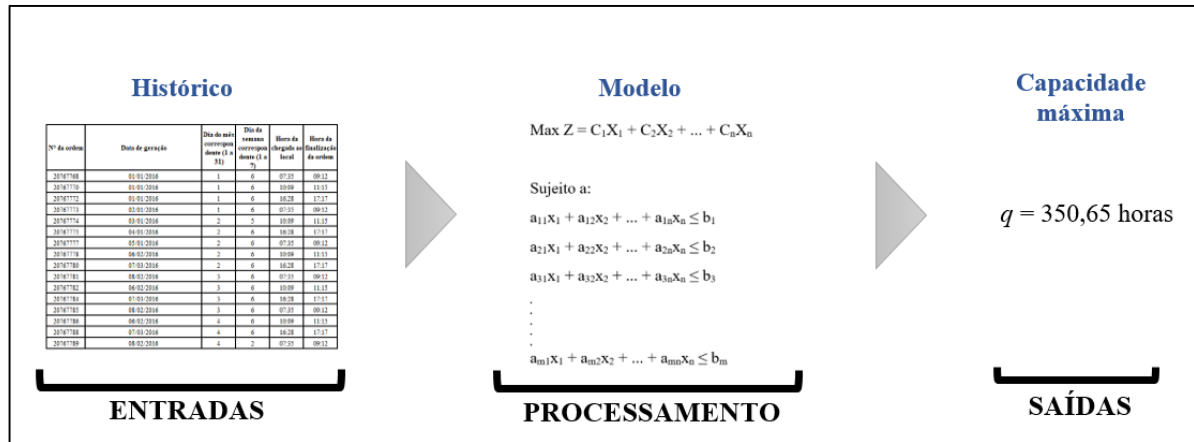
A próxima etapa, a qual já não pertence ao procedimento de análise e tratamento estatístico da demanda, é a aplicação do modelo matemático desenvolvido para achar a solução ótima para cada uma das 1.000 instâncias geradas no último passo. Esta etapa, juntamente com o procedimento descrito para demanda, pode ser melhor compreendida na Seção 5, onde números reais, juntamente com tabelas e figuras, são apresentados.

#### 4.3. APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Uma definição sintética do que o modelo proposto realiza pode ser observada na Figura 6. Em linhas gerais, o modelo desenvolvido visa apresentar uma solução para o problema de planejamento de capacidade a partir de um histórico de ocorrências de ordens comerciais, entregando um número correspondente a capacidade máxima atingida pelo sistema dentro de um horizonte de planejamento definido. Pode-se dizer, ainda, que o modelo entrega uma espécie

de número ótimo de capacidade (onde se tem o mínimo de ociosidade e sobrecarga possível para o cenário traçado), o qual pode ser atingido a partir de movimentos de postergações e adiantamos de ordens sugeridos pelo próprio modelo. De maneira mais direta, o modelo, a partir de um histórico de ordens, apresenta a capacidade ótima necessária para o bom desempenho do sistema de atendimento.

Figura 6 - Síntese do modelo desenvolvido



Fonte: autor (2019)

Os parâmetros de entrada do modelo estão descritos, resumidamente, na Figura 7. Em  $W$ , temos o tempo máximo, em dias, para cumprimento dos prazos de atendimento das ordens de serviço, enquanto o parâmetro  $E_0$  representa o estoque inicial de ordens em horas (provenientes de períodos de horizontes de planejamento passados) a ser considerado no início do horizonte de planejamento. Ressalta-se que, em relação às ordens contempladas por este parâmetro, garante-se apenas o seu atendimento dentro do tempo máximo estipulado pelo parâmetro  $W$ . Por fim, os parâmetros já comentados,  $n$  e  $ORDENS$ , completam a Figura 7.

Figura 7 - Parâmetro de entrada

Parâmetro	Descrição
$W$	Tempo máximo para execução das ordens
$E_0$	Estoque inicial de ordens
$n$	Número de unidades de tempo do horizonte de planejamento
$ORDENS$	Número de horas de ordens comerciais

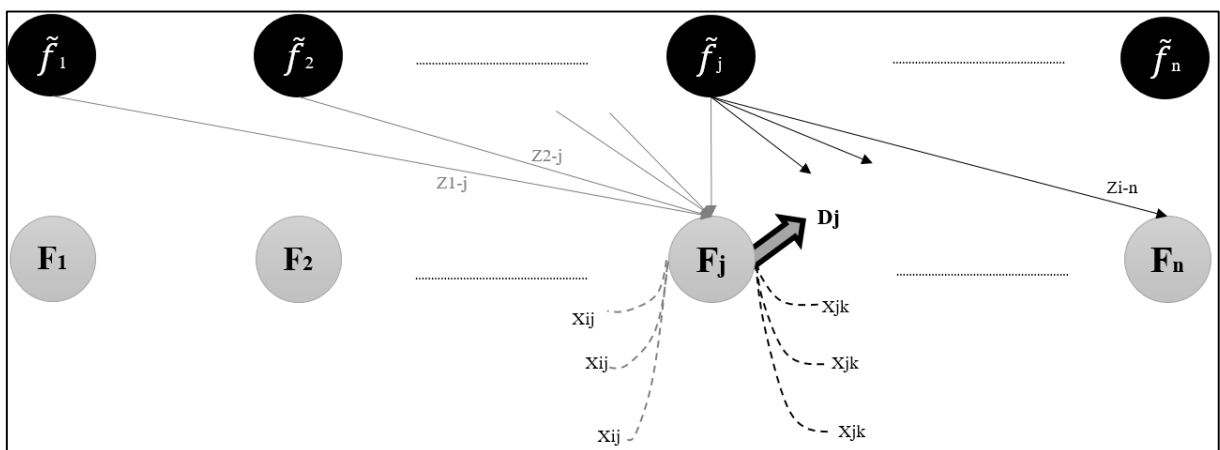
Fonte: Autor (2019)

A Figura 8 apresenta o modelo conceitual traçado para representação da entrada, atendimento e saída de ordens comerciais programadas. Os círculos em cor preta representam os nós que denotam a entrada aleatória das ordens comerciais no sistema (parâmetro  $ORDENS$ ) e estão representados pela letra  $\tilde{f}$ . Os círculos em cor cinza representam os nós que denotam o momento

que as ordens foram agendadas para atendimento e estão representados pela letra  $F$ . A variável  $z_{ij}$  denota o movimento que algumas ordens podem fazer de um instante  $i$  para um instante  $j$ , sendo  $i$  o instante em que a ordem chegou no sistema e  $j$  o instante o qual a ordem foi agendada para ser atendida.

A variável  $x$  denota o movimento que algumas ordens podem fazer de um instante  $i$  para um instante  $j$  em função de um possível não atendimento e/ou adiamento no instante  $i$ , sendo  $i$  o instante onde ocorreu a postergação da ordem e  $j$  o momento para o qual o atendimento foi reagendado; de forma análoga, ordens podem ser postergadas do período  $j$  para um período posterior  $k$ , podendo  $x$  ser uma entrada ou uma saída no nó, conforme o período analisado. Por fim,  $d_j$  denota a taxa de saída de ordens no nó  $F$  (ordens concluídas), sendo  $j$  o instante do atendimento.

Figura 8 - Modelo conceitual



Fonte: Autor (2019)

A Figura 9 apresenta as variáveis já comentadas e outras variáveis contempladas pelo modelo com breves explicativos sobre estas. Seja  $\Delta_j$  a variável a qual “carrega” ordens não atendidas em períodos anteriores a  $j$  e que, devido a  $W$ , devem, necessariamente, ter sua execução realizada em  $j$ . A capacidade máxima requisitada pelo sistema dentro do horizonte de planejamento é representada pela variável  $q$ . A soma das ordens que serão postergadas para “fora” do horizonte do planejamento ( $n + 1$ ) e, portanto, não serão atendidas neste é compreendida pela variável  $p$ . Já a soma das ordens que devem ser obrigatoriamente atendidas no período  $j$  é denotada por  $s$ .

A variável  $v_{lj}$  permite indexar o que foi adiantado, em um período  $j$ , de períodos futuros  $l$ . Esta variável é diferente da variável  $adiant_{lj}$ , a qual indica quantas ordens de atendimento obrigatório em um instante futuro  $l$  foram adiantadas no instante atual  $j$ . De modo simplificado, a variável



$v_{ij}$  é uma espécie de intermédio utilizado pelo modelo para que se possa saber de forma exata, através da variável  $adiant_{ij}$ , quantas ordens foram adiantadas em cada período. Finalmente, as variáveis  $dem\_total$  e  $saida\_total$  representam, respectivamente, a soma, em horas, de todas ordens que entraram no sistema juntamente com o estoque inicial e a soma, em horas, de todas ordens que são atendidas e, portanto, saíram do sistema.

Figura 9 – Variáveis

Variável	Descrição
$z_{ij}$	Ordens que chegam em $i$ e são alocadas para atendimento em $j$ .
$x_{ij}$	Ordens que tiveram agendamento para $i$ , mas, por algum motivo, não foram atendidas em $i$ e foram realocadas para $j$ .
$d_j$	Taxa de saída de ordens do sistema.
$\Delta_j$	“Carrega” ordens contidas nas variáveis $X_{ij}$ e $Z_{ij}$ de outros períodos que devem, necessariamente, ser atendidas no período $j$ .
$q$	Máxima capacidade requisitada ao longo do horizonte de tempo
$p$	Soma das variáveis que representam ordens que foram postergadas para outro período de planejamento ( $n + 1$ )
$s$	Soma das ordens que devem, necessariamente, ser atendidas no período $j$ (ou seja, aquilo que é obrigatório ser atendido em $j$ );
$v_{ij}$	Variável que permite indexar o número de ordens adiantadas em um período $j$ , de períodos futuros $l$ .
$adiant_{ij}$	Número de ordens de atendimento obrigatório em um instante futuro $l$ que foram adiantadas em um instante atual $j$ .
$dem\_total$	Soma, em horas, de todas ordens que entraram no sistema
$saida\_total$	Soma, em horas, de todas ordens que saíram do sistema.

Fonte: Autor (2019)

A Figura 10 apresenta os conjuntos e funções presentes no modelo. É preciso destacar que a construção destes conjuntos e funções se deu devido à necessidade de restrições de contorno ao longo do desenvolvimento do modelo. Logo, é notável que alguns conjuntos estão sobrepostos; ainda assim, estes foram mantidos devido ao fato de que facilitam a construção das restrições, especialmente para aquelas que envolvem peculiaridades em relação ao parâmetro  $W$ . Seguindo um exemplo hipotético, onde se tem os parâmetros  $W = 5$  e  $n = 28$ , a Figura 11 visa esclarecer a sobreposição dos conjuntos, de maneira a demonstrar, de forma sucinta, o cenário em que os

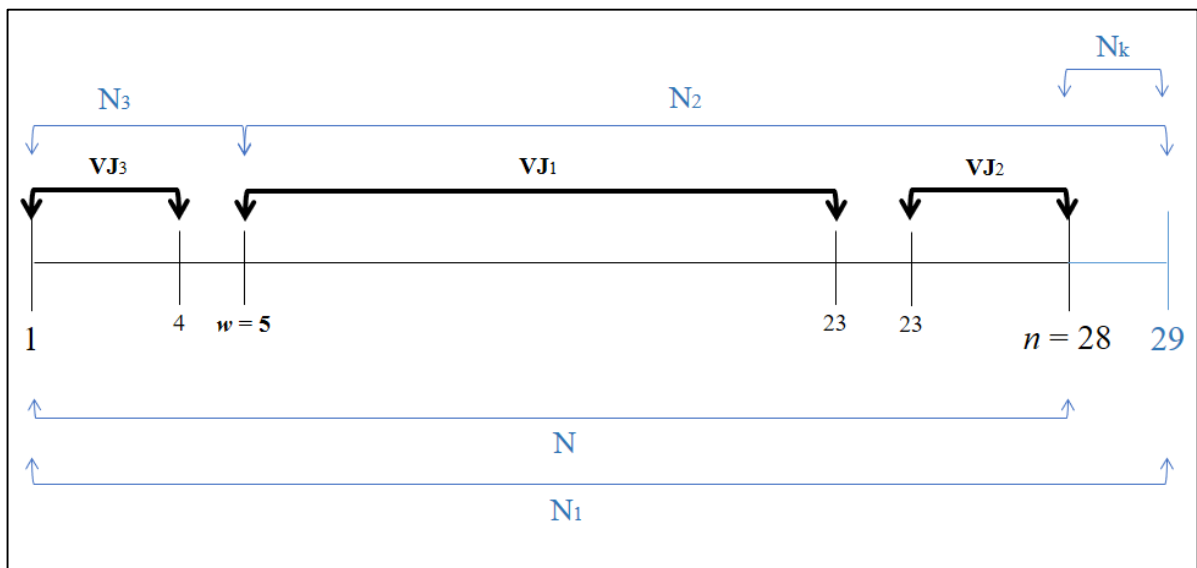
conjuntos contemplam diferentes partes do horizonte de planejamento. Por fim, o modelo de programação linear estocástica é apresentado a partir da Equação (1).

Figura 10 - Conjuntos e funções

Conjuntos	Funções
$N = \{1..n\}$	$FL_1 = \{(j+1)..(j+W)\}$ ;
$N_1 = \{1..n+1\}$	$FL_2 = \{(j+1)..n\}$ ;
$N_2 = \{W+1..n+1\}$	$FL_3 = \{j+1..W\}$ ;
$N_3 = \{1..W\}$	$FL_4 = \{W+1..j+W\}$ ;
$N_k = \{n+1\}$	$F_A = \{(l-1)\}$ ;
$N\_1 = \{1\}$	
$VJ_1 = \{W..n-W\}$	
$VJ_2 = \{(n-W+1)..n-1\}$	
$VJ_3 = \{1..W-1\}$	
$N_{ADIANT} = \{1..W-1\}$	

Fonte: Autor (2019)

Figura 11 - Sobreposição de conjuntos



Fonte: Autor (2019)

$$\text{Min } q \tag{1}$$

**Sujeito a:**

$$q \geq d_j, \forall j \in N \tag{2}$$

$$\text{dem\_total} = \sum_{i=1}^n \text{ORDENS}_i + E_j, \forall j \in N\_1 \tag{3}$$

$$saida\_total = \sum_{i=1}^n d_i \quad (4)$$

$$dem\_total = saida\_total \quad (5)$$

$$x_{ij} = 0, \forall (j-i) \leq 0 \quad (6)$$

$$z_{ij} = 0, \forall (j-i) < 0 \quad (7)$$

$$x_{jk} = 0, \forall (k-j) \leq 0 \quad (8)$$

$$v_{lj} = 0, \forall (l-j) = 0 \quad (9)$$

$$d_j \geq 0, \forall (j-W) \leq 0 \quad (10)$$

$$\Delta_j = 0, \forall (j-W) \leq 0 \quad (11)$$

$$s_j = 0, \forall (j-W) \leq 0 \quad (12)$$

$$x_{ij}, z_{ij} = 0, \forall (j-i) > W \quad (13)$$

$$x_{jk} = 0, \forall (k-j) > W \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^n z_{ij} \geq ORDENS_i, \forall i \in N \quad (15)$$

$$\Delta_j = \sum_{b=j-w}^{j-1} z_{ib} + \sum_{b=j-w+1}^{j-1} x_{ib} - \sum_{p=1}^j adiant_{jp}, \forall j \in N \text{ e } \forall (i = j-W) \quad (16)$$

$$x_{jk} \leq \sum_{i=k-w}^j z_{ij} + \sum_{i=k-w}^j x_{ij}, \forall j \in N \text{ e } \forall k \in N_2 \quad (17)$$

$$x_{jk} \leq \sum_{i=1}^j z_{ij} + \sum_{i=1}^j x_{ij}, \forall j \in N \text{ e } \forall k \in N_3 \quad (18)$$

$$E_{0j} + \sum_{i=1}^j Z_{ij} + \sum_{i=1}^j X_{ij} = D_j + \sum_{k=j}^{n+1} X_{jk}, \forall j \in N \quad (19)$$

$$p \geq \sum_{j=(n+1-w)}^n x_{jk}, \forall k \in N_k \quad (20)$$

$$p \leq E_{0j}, \forall j \in N_{-1} \quad (21)$$

$$v_{lj} = v_{aj} + z_{ij} + x_{ij}, \forall j \in VJ_1, \forall l \in FL_1, \forall (i = l-W) \text{ e } \forall a \in F_A \quad (22)$$

$$v_{lj} = v_{aj} + z_{ij} + x_{ij}, \forall j \in VJ_2, \forall l \in FL_2, \forall (i = l-W) \text{ e } \forall a \in F_A \quad (23)$$

$$v_{lj} = 0; \forall j \in VJ_3, \forall l \in FL_3 \quad (24)$$

$$v_{lj} = v_{aj} + z_{ij} + x_{ij}, \forall j \in VJ_3, \forall l \in FL_4, \forall (i = l-W) \text{ e } \forall a \in F_A \quad (25)$$

$$v_{lj} \leq d_j - s_j, \forall j \in VJ_1, \forall l \in FL_1 \quad (26)$$

$$v_{lj} \leq d_j - s_j, \forall j \in VJ_2, \forall l \in FL_2 \quad (27)$$

$$v_{lj} \leq d_j, \forall j \in VJ_3, \forall l \in FL_1 \quad (28)$$

$$s_j = z_{ij} + x_{ij} + \Delta_j, \forall j \in N \text{ e } \forall (i = j - W) \quad (29)$$

$$adiant_{lj} = v_{lj} - v_{(l-1)j}, \forall j \in N_{ADIANT}, \forall l \in FL_1 \quad (30)$$

$$adiant_{lj} = v_{lj} - v_{(l-1)j}, \forall j \in VJ_2, \forall l \in FL_2 \quad (31)$$

$$z_{ij}, x_{ij}, d_j, \Delta_j, q, p, s_j, v_{lj}, adiant_{lj}, dem\_total, saida\_total \geq 0, \forall i, j \in N \quad (32)$$

A função objetivo (1) minimiza a capacidade máxima atingida no horizonte de planejamento. A restrição (2) define que a capacidade máxima corresponde a maior das taxas de saída  $d_j$  do horizonte de planejamento. As restrições (3) - (5) definem que, dentro do horizonte de planejamento estipulado, a soma das ordens atendidas deve ser igual a soma das ordens que entraram no sistema. As restrições (6) - (12) zeram os valores das variáveis em situações as quais não seria possível que estas tivessem valores diferentes de zero (e.g.,  $z_{53}$ , pois não é fisicamente possível que se envie uma ordem que chegou no período cinco para um período passado, no caso o período três). As restrições (13) - (14) restringem as variáveis  $z$  e  $x$  a janela de tempo permitida por  $W$ ; em (15) temos, por parte da variável  $z$ , a designação das ordens para os períodos a serem atendidas. O parâmetro *ORDENS* se origina dos passos iv) e v) do procedimento descrito na subseção 4.2, que busca reproduzir o cunho estocástico inerente à realidade.

É válido ressaltar que, para a restrição (15), há outra forma para a representação do parâmetro *ORDENS* e sua estocasticidade característica. Em seu trabalho, Nguyen, Sivakumar e Graves (2018) apresentam uma adaptação determinística para o fenômeno aleatório da geração de demanda que pode ser representado conforme (15.1), onde  $\bar{X}_i$  e  $S_i$  são, respectivamente, a média e o desvio padrão de cada período e  $\mathcal{E}$  é o parâmetro de “risco de violação”, o qual representa a probabilidade máxima que um cliente tem de ter seu pedido negado. Para (15.1), os passos iv), v) e vi) do procedimento descrito na subseção 4.2 não são necessários, visto que a geração de demanda é realizada pelo lado direito da inequação. Para o presente estudo, a restrição (15) e os passos iv), v) e vi) do procedimento foram utilizados.

$$\sum_{j=1}^n z_{ij} \geq \bar{X}_i + S_i \sqrt{\frac{n}{\epsilon}}, \forall i \in N \quad (15.1)$$

A restrição (16) garante a não ocorrência de atendimento duplo, ou seja, nenhuma ordem será atendida duas vezes. As restrições (17) - (18) definem as ordens que podem ser postergadas e (19) apresenta a equação de balanço a ser respeitada em cada instante do horizonte de planejamento. Em (20) tem-se a soma das ordens que foram postergadas para outro horizonte de planejamento e em (21) a definição de que esta soma deve ser menor ou igual do que o estoque inicial de ordens; em (22) - (23) tem-se a indexação das variáveis que representam um adiantamento de ordens obrigatórias de períodos posteriores para um dado conjunto de índices  $j$  e em (24) - (25) tal indexação continua para o restante dos índices  $j$ .

As restrições (26) - (28) garantem que o que foi atendido no período  $j$  ( $d_j$ ) seja a parte obrigatória a ser atendida no período acrescida daquilo que pode (ou não) ser atendido como forma de adiantamento em relação a períodos futuros. Em (29) tem-se a soma das variáveis que representam a parte obrigatória a ser atendida no período  $j$ , ao passo que (30) - (31) definem o que representa adiantamento no período  $j$ . Em (32) é definido o domínio de todas variáveis componentes do modelo.

## 5 RESULTADOS

### 5.1. EXPERIMENTO NUMÉRICO

O experimento numérico compreende um histórico de ordens que se inicia no dia 01/01/2016 e vai até 11/07/2016 e é estratificado por ordem; este histórico foi fornecido por uma empresa de distribuição de energia elétrica a qual atende uma região equivalente a 99.000 km<sup>2</sup>, servindo 118 cidades, aproximadamente 1.300.000 clientes e com uma média de 500.000 serviços gerados anualmente. A Tabela 1 traz o cabeçalho da matriz constituída pelos dados registrados e informados pela empresa estudada, juntamente com alguns dos possíveis valores para cada parâmetro. O histórico é composto por 193 dias os quais totalizam 66.617 ordens.

Tabela 1 – Estrutura exemplo da matriz de registro de ordens

Nº da ordem	Data de geração	Dia do mês correspondente (1 a 31)	Dia da semana correspondente (1 a 7)	Hora da chegada ao local	Hora da finalização da ordem
20767768	01/01/2016	1	6	7:35	9:12
20767770	01/01/2016	1	6	10:09	11:15
20767772	01/01/2016	1	6	16:28	17:17
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
20767779	02/01/2016	2	7	10:38	12:03
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
20819846	08/04/2016	5	3	15:27	16:47
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
20844244	11/07/2016	11	2	15:43	15:51

Fonte: Autor (2019)

A partir deste registro, um tratamento estatístico foi dado aos dados apresentados na Tabela 1. Em um primeiro momento, foi feito o passo *i* do procedimento descrito na subseção 4.2., que consiste no cálculo da média e do desvio padrão de ordens, por dia do mês e por dia da semana, a fim de identificar qual caminho apresenta menor variação através do coeficiente de variação. Conforme pode ser observado na Tabela 2, tratando a estocasticidade por dia da semana há

menor variação; assim, o modelo seguiu a ideia de que o horizonte de chegada das ordens se dá por dia da semana, e não por dia do mês.

Tabela 2 - Coeficiente de variação: dias da semana x dias do mês

	Por dia da semana			Por dia do mês			
	Média	Desvio padrão	CV	Média	Desvio padrão	CV	
1- Domingo	9,32	3,61	38,74%	1	294,43	198,55	67,44%
2- Segunda-feira	555,25	140,79	25,36%	2	296,00	261,97	88,50%
3- Terça-feira	491,67	124,22	25,27%	3	296,14	273,91	92,49%
4- Quarta-feira	497,78	73,54	14,77%	4	446,00	210,53	47,20%
5- Quinta-feira	430,63	136,35	31,66%	5	342,57	228,88	66,81%
6- Sexta-feira	417,57	133,48	31,97%	6	368,00	262,32	71,28%
7- Sábado	27,68	10,41	37,60%	7	348,71	249,80	71,63%
				8	369,00	195,81	53,06%
				9	247,14	284,56	115,14%
				10	271,00	248,59	91,73%
				11	423,29	268,22	63,37%
				12	357,83	262,77	73,43%
				13	367,17	271,31	73,89%
				14	359,33	274,62	76,43%
				15	446,00	234,01	52,47%
				16	397,50	291,28	73,28%
				17	328,00	256,24	78,12%
				18	437,00	218,22	49,94%
				19	335,67	244,78	72,92%
				20	331,50	251,19	75,77%
				21	274,00	284,45	103,81%
				22	408,33	218,61	53,54%
				23	374,50	279,36	74,60%
				24	354,00	279,35	78,91%
				25	345,00	259,81	75,31%
				26	221,17	226,40	102,37%
				27	339,00	251,17	74,09%
				28	315,83	241,48	76,46%
				29	385,33	203,22	52,74%
				30	293,60	256,98	87,53%
				31	323,33	288,17	89,12%

Fonte: Autor (2019)

Em um segundo momento, o procedimento seguiu para o cálculo do tempo médio de execução de ordens. Para tal, foi feita, para cada ordem, a subtração da hora de finalização da ordem pela hora da chegada ao local, chegando, assim, ao tempo aproximado de execução da ordem em questão. Em seguida, uma média do tempo de execução de todas as ordens foi feita, chegando a um tempo médio de 31 minutos e 24 segundos.

Em seguida, dois dos parâmetros de entrada do modelo  $n$  e *ORDENS* foram definidos. Desta maneira, o experimento tomou por base um horizonte de planejamento equivalente a  $n = 28$ . Com relação ao parâmetro *ORDENS*, todas as datas – de 01/01/2016 a 11/07/2016 – tiveram seu respectivo número de ordens acumulado no dia multiplicado pelo tempo médio de execução (e.g. 5 ordens no dia 10/04/2016 tornam-se 2 horas e 37 minutos e 02 segundos ou 2,62 horas no dia 10/04/2016). Em seguida, o histórico foi “filtrado” e estratificado por dia da semana, obtendo-se, assim, sete novas séries, cada uma correspondente a um dia da semana.

Visando uma redução do efeito da variação no modelo, média e desvio padrão foram calculados para cada uma das sete séries e, os valores que se encontravam fora do limite de  $\pm 2$  desvios padrões, foram deletados; a Tabela 3 ilustra as séries resultantes do procedimento descrito até aqui. Finalmente, uma distribuição de probabilidade contínua foi ajustada utilizando o software EasyFit 5.6 Professional (SCHITTKOWSKI, 2002) a cada uma das sete séries. A Figura 12 apresenta os dias da semana e suas respectivas distribuições ajustadas.

Depois destes procedimentos, uma implementação computacional através da linguagem de programação R (R Development Core Team, 2014) foi desenvolvida conforme o código apresentado no Apêndice B. Assim, foram gerados aleatoriamente horas de ordens para cada dia da semana conforme a sequência “domingo / segunda-feira / terça-feira / ... / sábado”, realizando este pequeno procedimento até fechar o horizonte de planejamento de 28 dias. Tal procedimento foi repetido 1.000 vezes, gerando 1.000 demandas diferentes. Para fins de elucidação do procedimento, a Figura 13 demonstra uma, dentre as 1.000 vezes, que este procedimento foi realizado, explicitando a lógica de geração de números aleatórios para cada dia da semana e sequenciamento para fechamento do horizonte de 28 dias.

Por fim, o que se seguiu foi uma segunda implementação computacional realizada através do uso de dois softwares computacionais. Para tal implementação, os parâmetros de entrada restantes,  $W$  e  $E_0$ , foram definidos, sendo quatro diferentes valores de  $W = \{2, 3, 5, 7\}$ , assim como três diferentes valores de  $E_0 = \{4.88, 112.71, 290.65\}$ , seguindo a ideia de testar o modelo com baixo, médio e alto volume de estoque inicial. Tais valores de  $E_0$  são provenientes, respectivamente, dos valores mínimo, médio e máximo de demandas geradas aleatoriamente.

O compilador ZIMPL (KOCH, 2004) foi utilizado para compilação do modelo matemático ao passo que o otimizador SCIP (GAMRATH et al., 2016) foi escolhido para achar a solução ótima para o modelo de programação linear estocástica. É importante destacar que, nesta segunda implementação, para cada uma das 1.000 demandas geradas obteve-se o valor de  $q$  para os



diferentes valores de  $W$  e diferentes valores de  $E_0$ , somando 12 valores de  $q$  por demanda gerada e totalizando, portanto, 12.000 valores de  $q$  ao término da simulação. O experimento foi realizado em um notebook Acer Aspire F 15 Intel Core i5-6200 CPU 2.3GHz com o sistema operacional Windows 10 Pro e os resultados foram obtidos, aproximadamente, em 8,5 horas.

Tabela 3 - Séries correspondentes a cada dia da semana

Domingo	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado
2,62	175,36	206,77	256,50	238,70	213,57	16,23
7,33	322,45	275,34	284,76	239,22	221,42	18,84
3,14	355,43	274,29	274,82	264,35	237,13	17,80
7,33	324,02	207,29	262,78	227,71	186,35	10,47
2,09	187,92	263,83	243,41	244,98	232,42	13,09
5,23	204,67	352,29	201,53	334,49	299,94	15,70
5,23	362,76	340,25	303,08	245,50	259,11	14,13
2,62	354,91	236,61	337,11	250,74	266,44	11,52
4,71	328,21	313,55	228,23	257,54	249,17	12,56
5,23	337,63	280,58	287,38	276,39	264,35	14,13
7,85	358,05	207,81	325,07	280,58	240,27	15,70
3,14	296,28	242,36	245,50	226,66	219,33	13,61
4,19	293,66	299,94	279,01	210,43	198,92	13,61
4,19	357,00	254,93	281,62	235,03	281,62	11,52
5,76	285,29	264,87	249,69	245,50	239,75	10,47
5,23	292,09	190,54	238,18	259,11	223,00	16,75
2,09	228,23	317,74	259,11	221,42	273,77	20,94
4,71	271,15	268,01	300,47	272,20	269,06	16,75
6,81	320,88	229,80	306,75	233,46	209,91	8,90
2,62	330,83	306,75	221,95	292,09	270,63	10,47
4,71	319,84	295,23	260,68	253,36	254,93	18,32
7,33	283,19	298,37	224,04	187,92	231,37	16,75
7,85	354,91	263,83	287,38	242,36	208,34	17,27
7,33	326,12	276,39	251,79	179,02	231,89	15,70
6,81	300,99	196,30	238,18	141,86	203,63	12,56
3,14	256,50	274,29	223,00		127,20	5,23
4,71	288,95					
2,62						


Fonte: Autor (2019)

Figura 12 – Dias da semana e distribuições ajustadas

Dia da semana	Distribuição
Domingo	Generalizada de Pareto
Segunda-feira	Generalizada de Valores de Extremos
Terça-feira	Burr
Quarta-feira	Generalizada de Valores de Extremos
Quinta-feira	Qui-Quadrado
Sexta-feira	Lognormal de três parâmetros
Sábado	PERT

Fonte: Autor (2019)

Figura 13 - Procedimento para geração e sequenciamento de números

4 números de horas de ordens gerados por dia da semana						Organização seguindo a sequência	
Domingo	6,37	2,21	2,69	3,86		Domingo	6,37
Segunda-feira	270,16	361,25	342,01	315,18		Segunda-feira	270,16
Terça-feira	240,05	274,12	238,09	276,83		Terça-feira	240,05
Quarta-feira	318,33	328,39	227,96	316,23		Quarta-feira	318,33
Quinta-feira	213,50	228,77	225,34	234,15		Quinta-feira	213,50
Sexta-feira	219,42	220,26	223,87	198,63		Sexta-feira	219,42
Sábado	15,80	13,32	16,42	9,46		Sábado	15,80
						Domingo	2,21
						Segunda-feira	361,25
						Terça-feira	274,12
						Quarta-feira	328,39
						Quinta-feira	228,77
						Sexta-feira	220,26
						Sábado	13,32
						Domingo	2,69
						Segunda-feira	342,01
						Terça-feira	238,09
						Quarta-feira	227,96
						Quinta-feira	225,34
						Sexta-feira	223,87
						Sábado	16,42
						Domingo	3,86
						Segunda-feira	315,18
						Terça-feira	276,83
						Quarta-feira	316,23
						Quinta-feira	234,15
						Sexta-feira	198,63
						Sábado	9,46

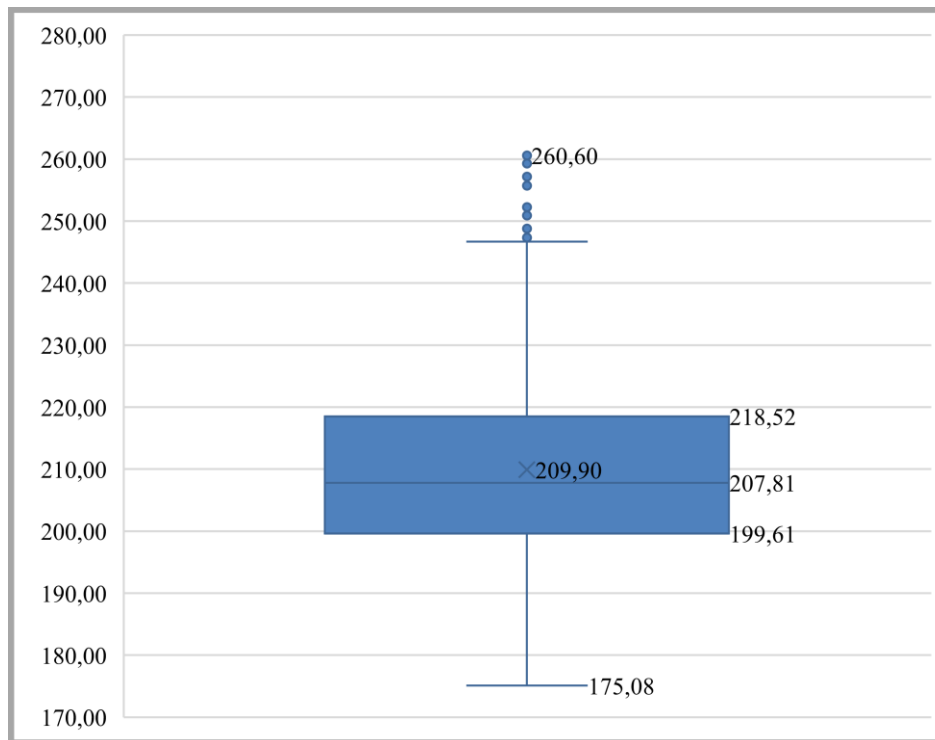
Fonte: Autor (2019)

## 5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Dadas as limitações assumidas e os dados de entrada descritos nas seções anteriores, os resultados foram construídos de maneira a verificar a capacidade máxima  $q$  atingida pelo sistema, bem como o efeito que o aumento ou decréscimo dos parâmetros  $W$  e  $E_0$  possuem no modelo. Desta forma, da Figura 14 a 19 tem-se, através de gráficos do tipo *boxplot*, a comparação dos valores de  $q$  de forma global (ou seja, os 12.000 valores de  $q$  assumidos na simulação), os valores de  $q$  para a variação de  $E_0$  e os valores de  $q$  para a variação de  $W$ .

A Figura 14 apresenta o gráfico com os valores de mínimo, máximo e média assumidos por  $q$ , bem como o 1º, 2º e 3º quartis. Observa-se pelo gráfico que, dados os *inputs* e os parâmetros variados, a máxima capacidade que o sistema assume vai de 175,08 a 260,60 horas, sendo, em média, 209,90 horas. Para fins de informação e complemento do estudo, o cálculo do 95º percentil foi realizado e o valor encontrado corresponde a 235,98 horas; logo, isto implica que, um número de equipes capaz de atender 235,98 horas seria suficiente para atender 95% dos 1.000 casos de demanda gerados durante o processo de simulação.

Figura 14 - Valores de  $q$  (global)



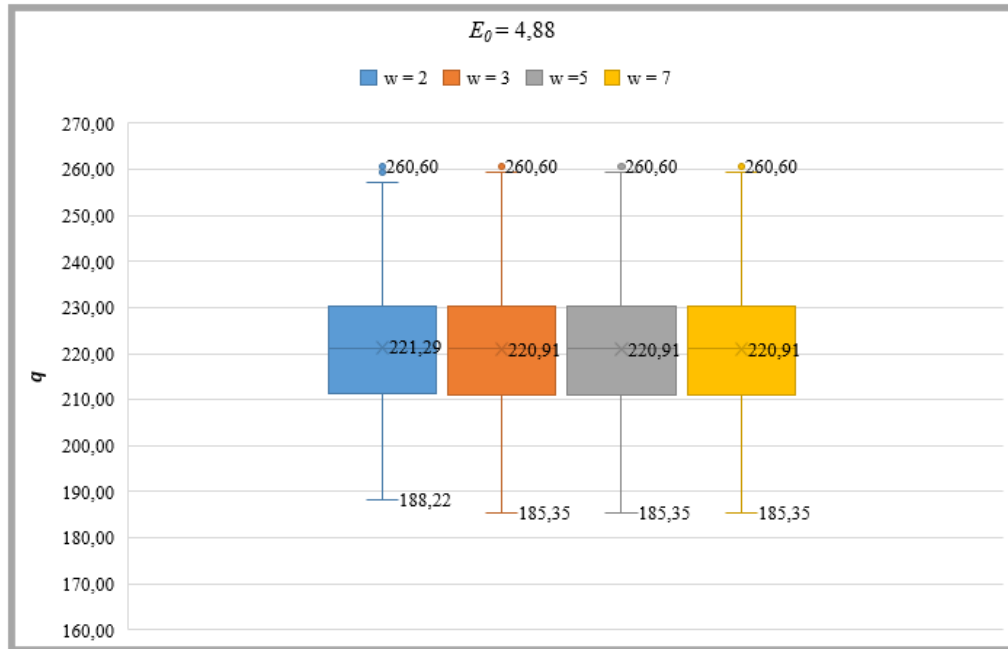
Fonte: Autor (2019)

As Figuras 15, 16 e 17 mostram o impacto em  $q$  em função da variação de  $W$ , fixando o valor de  $E_0$ . Assim, analisando as três figuras de forma conjunta destacam-se três pontos relevantes:

- i) O *boxplot* fica com a mesma aparência para os valores de  $W = 3, 5$  e  $7$ , independentemente do valor de  $E_0$ , o que indica que o ponto de mudança do sistema é entre  $W = 2$  e  $W = 3$ ;
- ii) O impacto de  $W$  em  $q$  ( $q$  decresce à medida que  $W$  aumenta) torna-se mais relevante à medida que  $E_0$  aumenta;
- iii) O valor médio e o valor mínimo de  $q$  decaem à medida que  $W$  aumenta;

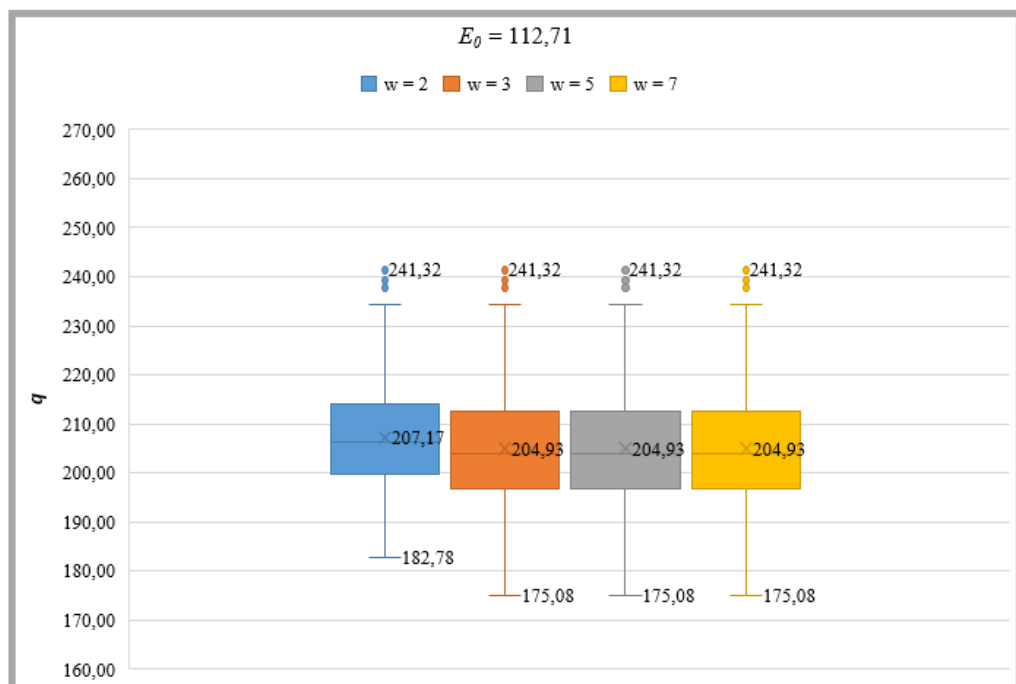
- iv) O valor máximo de  $q$  só apresenta decréscimo para o aumento de  $W$  quando se tem um valor alto de  $E_0$ .

Figura 15 - Valores de  $q$  para variação de  $W$  ( $E_0 = 4,88$ )



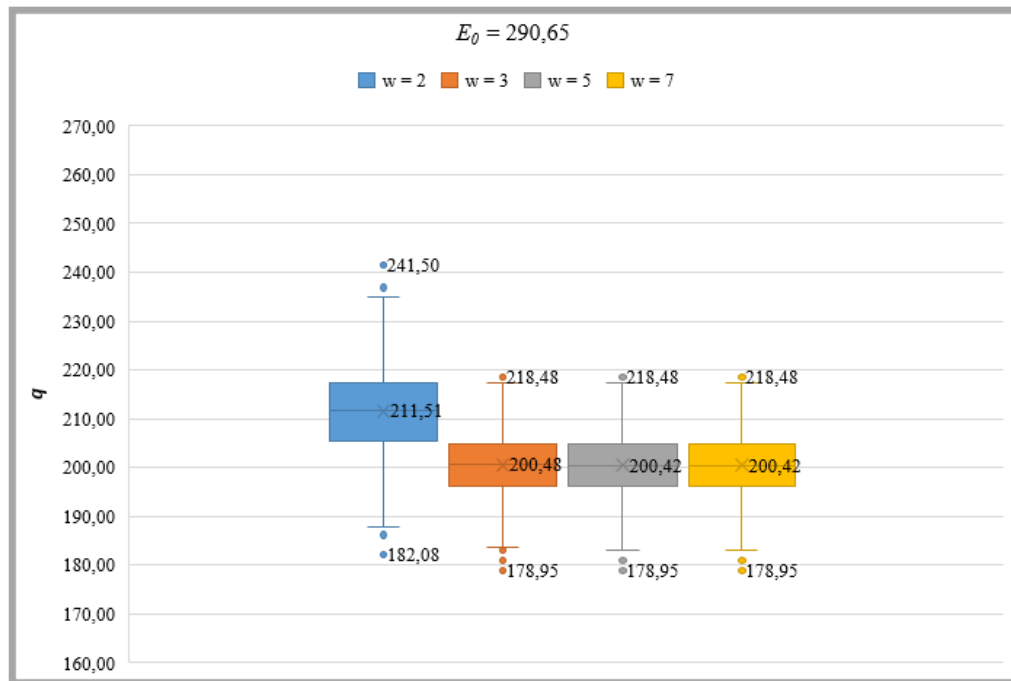
Fonte: Autor (2019)

Figura 16 - Valores de  $q$  para variação de  $W$  ( $E_0 = 112,71$ )



Fonte: Autor (2019)

Figura 17 - Valores de  $q$  para variação de  $W$  ( $E_0 = 290,65$ )



Fonte: Autor (2019)

As Figuras 18 e 19 mostram o impacto em  $q$  em função da variação de  $E_0$ , fixando o valor de  $W$ ; desta forma, tratam-se de gráficos semelhantes aos das figuras anteriores, sendo os gráficos das Figuras 18 e 19 apenas um “ângulo” diferente de se observar os resultados, mas que trazem os mesmos números já apresentados anteriormente. Assim, analisando as duas figuras de forma conjunta nota-se que a faixa de valores de  $q$  torna-se mais estreita à medida que  $E_0$  aumenta, o que é refletido no achatamento do retângulo central do gráfico de *boxplot*.

Analisando as figuras separadamente, um fenômeno importante pode ser percebido. A Figura 19 apresenta apenas decaimento do valor máximo de  $q$  e de sua média ao longo dos três *boxplot*. Isto se dá devido ao fato de que, para um  $E_0$  baixo, uma taxa de saída baixa para o primeiro período estará necessariamente associada, pois o modelo adianta de outros períodos apenas aquilo que já chegou no sistema e poderia ser atendido posteriormente respeitando  $W$ ; logo, não há como se ter uma taxa de saída elevada no primeiro período quando se tiver um estoque baixo.

Somado a isto, temos o fato de que nos períodos seguintes a demanda sofre uma elevação natural decorrente de dias da semana como segunda, terça ou quarta-feira, o que ocasiona uma elevação na taxa de saída e, por consequência, um pico de capacidade. Como o que o modelo capta é a máxima capacidade atingida  $q$ , ou seja, o pico de capacidade atingido, valores de  $E_0$  menores acabam por implicar em valores de  $q$  maiores, porém, isto não significa que nestes

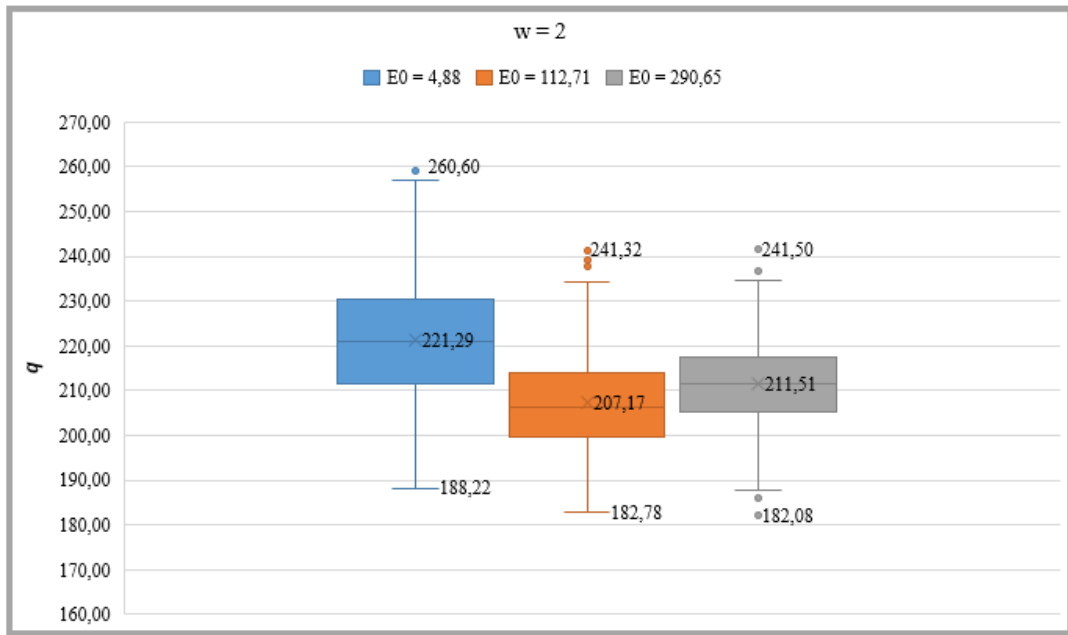
casos seja necessária mais capacidade para atender a respectiva demanda. Vale lembrar que a máxima capacidade atingida  $q$  representa o valor máximo de capacidade que o sistema atinge ao longo do horizonte de planejamento e não um valor de capacidade “perfeito” para todos os períodos; na verdade, os valores de capacidade para os períodos podem ser inferiores a  $q$ , pois  $q$  representa o maior dentre esses valores, o que, logicamente, não significa que para todos os períodos a capacidade deva ser igual à  $q$ , mas, sim, que sejam no máximo igual a  $q$ .

No entanto, à medida que  $E_0$  se torna ainda mais alto o problema apresenta outro comportamento. Quando  $E_0$  se torna muito superior à demanda média característica (aproximadamente 190 horas),  $q$  voltará a apresentar elevação, portanto,  $E_0$  muito grandes acabam por implicar em valores de  $q$  também muito grandes (maiores que os valores resultantes de baixo  $E_0$ ). Logo, existe um valor de  $E_0$  a partir do qual somente elevações de  $q$  serão percebidas. É válido destacar que tal valor de  $E_0$  é menor quando se tem valores pequenos de  $W$ , caso da Figura 18, e maior quando se tem valores de  $W$  grandes, caso da Figura 19. Esta espécie de inflexão de  $q$  para determinado valor de  $E_0$  pode ser percebido já no último *boxplot* da Figura 18.

De forma geral e mais direta, pode-se dizer que  $q$  diminui à medida que  $E_0$  aumenta, porém até determinado nível de  $E_0$ . Deste determinado nível de  $E_0$  em diante,  $q$  somente aumentará de valor, sendo que isto vale para quaisquer valores de  $W$ ; este cenário é observado na Figura 20, construída a partir de um exemplo com uma das 1.000 demandas geradas e com  $W = 3$ . A Tabela 4, construída a partir da mesma demanda utilizada para a Figura 20, mostra que o nível de  $E_0$  a partir do qual  $q$  apenas cresce varia conforme o valor de  $W$ , explicitando que para  $W = 2$ , com  $E_0$  entre 112,71 e 290,65,  $q$  já apresenta aumento, ao passo que para  $W = 3$ , apenas com valores de  $E_0$  após 290,65 é que a variável  $q$  apresentará aumento.

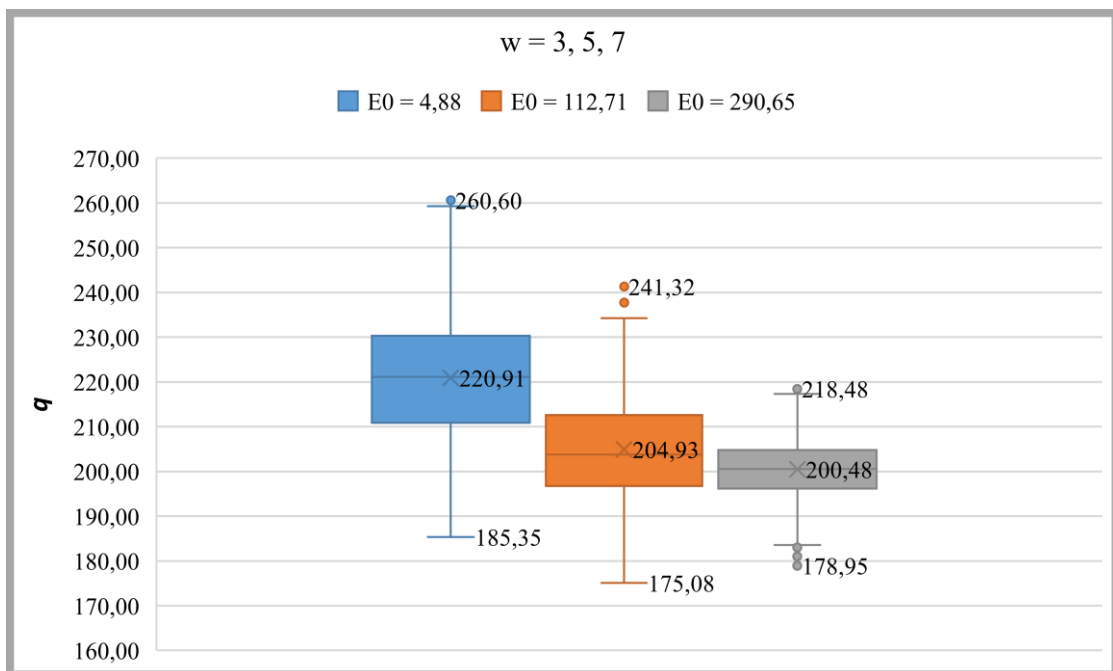
Por fim, a diferença do nível de  $E_0$  (a partir do qual só se observa aumento) de um valor de  $W$  para outro se explica da seguinte forma: para valores baixos de  $W$ , postergar o  $E_0$  não impacta em uma grande diminuição da demanda intermediária – logo, não impacta em um  $q$  menor – pois precisa-se executar as ordens dentro de um prazo pequeno. Para valores maiores de  $W$ , a postergação de  $E_0$  impacta mais em uma possível diminuição da demanda intermediária – logo, um possível  $q$  menor – pois há mais períodos para se “dissipar” o alto  $E_0$ .

Figura 18 - Valores de  $q$  para variação de  $E_0$  ( $W = 2$ )



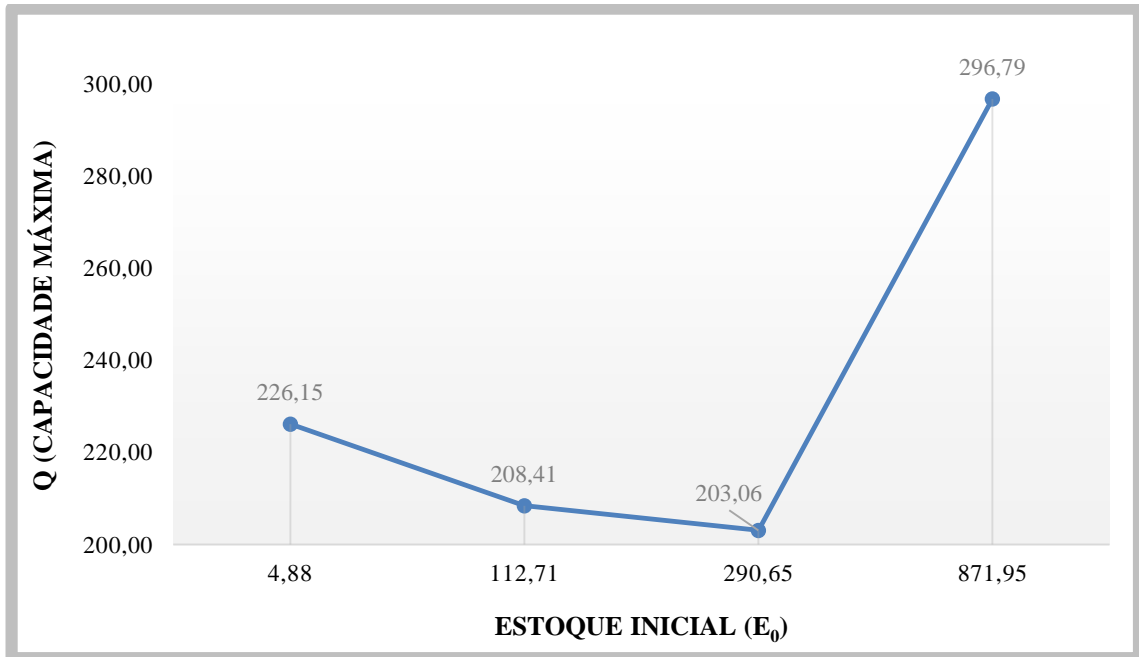
Fonte: Autor (2019)

Figura 19 - Valores de  $q$  para variação de  $E_0$  ( $W = 3, 5$  e  $7$ )



Fonte: Autor (2019)

Figura 20 -  $E_0$  e capacidade máxima  $q$ : o ponto de inflexão



Fonte: Autor (2019)

Tabela 4 - Variação de  $q$  a partir de  $E_0$ , para  $W = 2$  e  $W = 3$

	$E_0 = 4,88$	$E_0 = 112,71$	$E_0 = 290,65$	$E_0 = 871,95$
$q (W = 2)$	226,160	210,230	214,831	654,080
$q (W = 3)$	226,153	208,408	203,059	296,788

Fonte: Autor (2019)



## 6 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O presente estudo visou o desenvolvimento de um modelo de projeto de capacidade sob incerteza de demanda, especificamente, para o setor de distribuição de energia elétrica. O modelo considerou os diferentes prazos de atendimento das ordens de serviços de modo a assegurar que estes sejam, obrigatoriamente, atendidos. Para tanto, um modelo de programação linear estocástica foi desenvolvido aproveitando algumas contribuições da literatura e agregando outras ainda não exploradas (como o prazo para atendimento de ordens e o procedimento para geração da demanda aleatória de ordens), buscando a avaliação da capacidade máxima  $q$  atingida pelo sistema, assim como o impacto que a variação dos prazos de atendimento  $W$  e do estoque inicial  $E_0$  possuem sobre esta capacidade máxima.

Os experimentos numéricos mostraram que o modelo é capaz de atender aos diferentes cenários propostos, onde prazos de atendimento de ordens e volume de estoque inicial foram variados, o que sugere, dadas as limitações, uma boa representatividade da realidade apresentada. Os resultados obtidos remetem à conclusão de que tanto  $W$  quanto  $E_0$  possuem influência sobre  $q$ :  $W$  resulta, de maneira geral, na diminuição de  $q$  à medida que aumenta e  $E_0$  resulta na diminuição de  $q$  à medida que aumenta, porém somente até o ponto em que assuma valores semelhantes à demanda média característica do horizonte, pois, a partir de valores acima desta demanda média, o aumento de  $E_0$  passa a resultar também no aumento de  $q$ . Isto também depende do valor de  $W$ , pois, para valores maiores, o volume de  $E_0$  que resultará no aumento de  $q$  será, provavelmente, muito maior do que a demanda média característica do horizonte, ao passo que para valores menores de  $W$  este aumento de  $q$  já ocorre para volumes de  $E_0$  um pouco acima da demanda média característica.

Visando trabalhos futuros, aponta-se a extensão da aplicabilidade do modelo desenvolvido como principal fator de impacto, sendo tal extensão referente às limitações assumidas neste estudo para o tratamento do problema. Desta maneira, o tempo de execução de ordens, o qual tem certa aleatoriedade intrínseca, deve ser alvo de melhores aproximações, assim como a modelagem da entrada de ordens emergenciais no sistema, a qual também é habitual neste tipo de cenário. Por fim, poderia se tratar o efeito que a localização geográfica das ordens a serem executadas tem sobre o sistema, visto que este fator compõe os critérios de decisão dos gestores de operação deste cenário.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa 414**. 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA – ABRADDEE. 2016. **Elétricas tratam de revisão com ANEEL**. Disponível em: <<http://www.abrapch.org.br/noticias/2461/eletricas-tratam-de-revisao-com-aneel>>. Acesso em: 26 nov. 2018.
- ATWA, Y.M; EL-SAADANY, E.F. Probabilistic approach for optimal allocation of wind- based distributed generation in distribution systems. **IET Renewable Power Generation**. v. 5, p.79-88, out. 2011.
- CALAFIORE, G. C.; GHAOUI, L. EL. On Distributionally Robust Chance-Constrained Linear Programs. **Journal of optimization theory and applications**. v. 130, p. 1–22, jul. 2006.
- CARDOSO, Sônia R.; BARBOSA-PÓVOA, Ana Paula F.D.; RELVAS, Susana. Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty. **European Journal of Operational Research**. v. 226, p. 436–451, 2013.
- CHADHA, Rajeev; SINGH, Amita; KALRA, Jay. Lean and queuing integration for the transformation of health care processes: A lean health care model. **Clinical Governance: An International Journal**. v.17, p. 191-199, 2012.
- CHIEN, Chen-Fu; DOU, Runliang; FU, Wenhan. Strategic capacity planning for smart production: Decision modeling under demand uncertainty. **Applied Soft Computing**. v. 68, p. 900-909, jun. 2018.
- COUGHLAN, Paul; COUGHLAN, David. Action research for operations management. **International Journal of Operations & Production Management**. v. 22, p. 220-240, 2002.
- DONG, Jing-Xin; LEE, Chung-Yee; SONG, Dong-Ping. Joint service capacity planning and dynamic container routing in shipping network with uncertain demands. **Transportation Research Part B**. v. 78, p. 404-421, jun. 2015.
- ELKHUIZEN, S. G. et al. Using computer simulation to reduce access time for outpatient departments. **Quality and Safety in Health Care**. v. 16, p. 382-386, out. 2007.
- EPPEN, Gary D.; MARTIN, R. Kipp; SCHRAGE, Linus. A Scenario Approach to Capacity Planning. **Operations Research**. v. 37, p. 517-527, jul/ago 1989.
- FITZSIMMONS, J. A.; FITZSIMMONS, M. J. **Administração de serviços: operações, estratégia e tecnologia da Informação**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.
- FONINI, Julio Schenato. **Análise de desempenho do sistema de atendimento de serviços em concessionária de energia**. 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- FORZA, Cipriano. Survey research in operations management: a process-based perspective. **International Journal of Operations & Production Management**. v. 22, p. 152-194, 2002.
- GAMRATH, Gerald et al. **The SCIP Optimization Suite 3.2**. 2016. Disponível em: <[http://www.optimization-online.org/DB\\_FILE/2016/03/5360.pdf](http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2016/03/5360.pdf)>. Acesso em: 01 fev. 2019.
- GUHA, Sudipto et al. **Efficient Recovery from Power Outage. 1999**. Thirty-first annual ACM symposium on Theory of computing - STOC '99: Atlanta, 1999.
- GUIKEMA, SD. **Optimization of crews in post-earthquake electric power restoration**. 8<sup>th</sup> U.S. national conference on earth quake engineering: San Francisco, 2006.

- HIGGINSON, I.; WHYATT, J.; SILVESTER, K. Demand and capacity planning in the emergency department: how to do it. **Emergency Medicine Journal**. v. 28, p. 128-135, jan. 2010
- HU, Xinxin et al. Prioritizing regular demand while reserving capacity for emergency demand. **European Journal of Operational Research**. v. 247, p. 472-487, 2015.
- JIANG, Yabing; SEIDMANN, Abraham. Capacity planning and performance contracting for service facilities. **Decision Support Systems journal**. v. 58, p. 31-42, 2013.
- JOHNS, S. Heuristics to Schedule Service Engineers Within Time Windows. **Journal of the Operational Research Society**. v. 46, n. 3, p. 339-346, 1995.
- KOCH, Thorsten. **Rapid Mathematical Programming**. 2004. Disponível em: <<https://opus4.kobv.de/opus4-zib/files/834/ZR-04-58.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2019.
- KURZ, Julian. Capacity planning for a maintenance service provider with advanced information. **European Journal of Operational Research**. v. 251, p. 466-477, 2016.
- LIMA, Delberis A.; CÉSPEDES, Andrés Maurício; TELLES, Érica; BITTENCOURT, E. M. M. Peak demand contract for big consumers computed based on the combination of a statistical model and a mixed integer linear programming stochastic optimization model. **Electric Power Systems Research**. v. 154, p. 122-129, ago. 2017.
- MCCUTCHEON, David M.; MEREDITH, Jack R. Conducting case study research in operations management. **Journal of Operations Management**. v. 11, p. 239-256, 1993.
- MIEGHEM, Jan A. Van. Capacity Management, Investment, and Hedging: Review and Recent Developments. **Manufacturing & Service Operations Management**. v. 5, p. 269-302, 2003.
- MIGUEL, P.A.C. (Org.) **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- MITAL, K.M. Queuing analysis for outpatient and inpatient services: a case study. **Management Decision**. v. 48, p. 419-439, abr. 2010.
- MUKHOPADHYAY, Samar K.; MA, Huafan. Joint procurement and production decisions in remanufacturing under quality and demand uncertainty. **International Journal of Production Economics**. v. 120, p. 5-17, 2009.
- NGUYEN, Thu Ba T.; SIVAKUMAR, Appa Iyer; GRAVES, Stephen C. A network flow approach for tactical resource planning in outpatient clinics. **Health Care Management Science**. v. 18, p. 124-136, 2014.
- NGUYEN, Thu Ba T.; SIVAKUMAR, Appa Iyer; GRAVES, Stephen C. Capacity planning with demand uncertainty for outpatient clinics. **European Journal of Operational Research**. v. 267, p. 338-348, 2018.
- PAN, Feng; NAGI, Rakesh. Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing. **Computers & Operations Research**. v. 37, p. 668-683, 2010.
- PERRIER, Nathalie et al. A survey of models and algorithms for emergency response logistics in electric distribution systems. Part II: Contingency planning level. **Computers & Operations Research**. v. 40, p. 1907-1922, 2013.
- R Development Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- RAJAGOPALAN, S.; YU, Hung-Liang. Capacity planning with congestion effects. **European Journal of Operational Research**. v. 134, p. 365-377, 2001.
- SCHITTKOWSKI, K. EASY-FIT: a software system for data fitting in dynamical Systems. **Structural and Multidisciplinary Optimization**. v. 23, p. 153-169, 2002.

- SO, Kut C.; SONG, Jing-Sheng. Price, delivery time guarantees and capacity selection. **European Journal of Operational Research**. v. 111, p. 28-49, 1998.
- SOUSA, Rui; VOSS, Christopher A. Contingency research in operations management practices. **Journal of Operations Management**. v. 26, p. 697–713, jun. 2008.
- TOOR, T. P. S. Building effective service management system. **Business Strategy Series**. v. 10, p.61-67, ago. 2008
- TURRIONI, J.B.; MELLO, C.H.P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção**. UNIFEI, 2012. Disponível em: <[http://www.carlosmello.unifei.edu.br/Disciplinas/Mestrado/PCM-10/Apostila-Mestrado/Apostila\\_Metodologia\\_Completa\\_2012.pdf](http://www.carlosmello.unifei.edu.br/Disciplinas/Mestrado/PCM-10/Apostila-Mestrado/Apostila_Metodologia_Completa_2012.pdf)>. Acesso em: 21 jan. 2019.
- VLACHOS, Dimitrios; GEORGIADIS, Patroklos; IAKOVOU, Eleftherios. A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. **Computers and Operations Research**. v. 34, p. 367–394, 2007.
- VOSS, Chris; TSIKRIKTSIS, Nikos; FROHLICH, Mark. Case research in operations management. **International Journal of Operations & Production Management**. v. 22, pp.195-219, 2002.
- WANG, Daqin; TANG, Ou; HUO, Jiazhen. A heuristic for rationing inventory in two demand classes with backlog costs and a service constraint. **Computers & Operations Research**. v. 40, p. 2826–2835, 2013.
- Weintraub, A. et al. An emergency vehicle dispatching system for an electric utility in Chile. **Journal of the Operational Research Society**. 1999.
- WU, J.S. et al. **A Fuzzy Rule-Based System for Crew Management of Distribution Systems in Large-Scale Multiple Outages**. 2004. International Conference on Power System Technology – POWERCON: Singapore, 2004
- WU, Jaw-Shyang; LEE, Tsung-Em; CAO, Chih-Hao. **Intelligent Crew and Outage Scheduling in Electrical Distribution System by Hybrid Generic Algorithm**. The 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Xi'an, 2009.
- XU, Ningxiong et al. Optimizing scheduling of post-earthquake electric power restoration tasks. **Earthquake engineering and structural dynamics**. v. 36, p. 265-284, 2007.
- XU, Xin-yue et al. Analysis of subway station capacity with the use of queueing theory. **Transportation Research Part C**. v. 38, p. 28-43, 2014.
- YANKOVIC, Natalia; GREEN, Linda V. Identifying Good Nursing Levels: A Queuing Approach. **Operations Research**. v. 59, p. 942-955, ago. 2011.
- YAO, Ming-Jong; MIN, K. Jo. Repair-Unit Location Models for Power Failures. **IEEE Transactions on Engineering Management**. v. 45, p. 57-65, fev. 1998.

## APÊNDICE A – RESUMO DA REVISÃO DA LITERATURA

Figura A.1 - Resumo da revisão da literatura

(continua)

Artigo	Realizado	Autores	Campo
Capacity planning with demand uncertainty for outpatient clinics	Modelo estocástico de planejamento de capacidade para determinar o nº de médicos necessários para atender um sistema com reentrada de pacientes.	Nguyen, Sivakumar e Graves (2018)	Planejamento de capacidade
A network flow approach for tactical resource planning in outpatient clinics	Modelo determinístico de planejamento de capacidade para determinar nº de médicos necessários para atender metas de <i>lead time</i> .	Nguyen, Sivakumar e Graves (2015)	Planejamento de capacidade
Capacity planning and performance contracting for service facilities	Desenvolvimento de uma abordagem integrada para o desenho simultâneo de um gerenciamento de contratos eficiente e um planejamento de capacidade para serviços de capital intensivo.	Jiang e Seidmann (2013)	Planejamento de capacidade
System dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains	Modelo dinâmico de planejamento de capacidade com vistas a unidades de refabricação em cadeias de suprimentos reversas.	Vlachos, Georgiadis e Iakovou (2007)	Planejamento de capacidade
Probabilistic approach for optimal allocation of wind-based distributed generation in distribution systems	Metodologia de alocação ótima de geração distribuída a partir do vento em sistemas de distribuição, visando minimizar a perda de energia.	Atwa e El-Saadany (2011)	Planejamento de capacidade
Capacity Management, Investment, and Hedging: Review and Recent Developments	Revisão literária de gestão estratégica da capacidade, visando a determinação dos tamanhos, tipos e tempo certo para investimentos em capacidade, bem como ajustes considerando a incerteza.	Mieghem (2003)	Planejamento de capacidade

Fonte: Autor (2019)

Figura A.1 - Resumo da revisão da literatura

(continuação)

<b>Artigo</b>	<b>Realizado</b>	<b>Autores</b>	<b>Campo</b>
Price, delivery time guarantees and capacity selection	Estrutura matemática modelo que avalia as inter-relações entre precificação, garantia de tempo de entrega e decisões de expansão de capacidade, considerando uma demanda sensível ao preço e ao tempo de entrega.	So e Song (1998)	Planejamento de capacidade
A scenario approach to capacity planning	Descrição de um modelo utilizado por uma montadora de automóveis para tomada de decisão sobre aumento de capacidade em 4 de suas linhas.	Eppen, Martin e Schrage (1989)	Planejamento de capacidade
Joint service capacity planning and dynamic container routing in shipping network with uncertain demands	Modelo de programação estocástica de dois estágios capaz de lidar com o planejamento de capacidade em serviços e roteamento dinâmico de containers em linhas de transporte marítimo.	Dong, Lee e Song (2015)	Planejamento de capacidade
Demand and capacity planning in the emergency department: how to do it	Guia ilustrado com exemplo que apresenta um passo a passo detalhado de como desenvolver um planejamento de capacidade adequado no contexto de setores de emergência hospitalares.	Higginson, Whyatt e Silvester (2010)	Planejamento de capacidade
Capacity planning for a maintenance service provider with advanced information	Procedimento de otimização para planejamento de capacidade de serviços de manutenção para uma dada empresa.	Kurz (2016)	Planejamento de capacidade
Capacity planning with congestion effects	Desenvolvimento de um modelo que faz o equipamento tomar decisões em um ambiente de produção multiproduto, multi-máquina e de estágio único com efeitos de congestionamento.	Rajagopalan e Yu (2001)	Incerteza de demanda
Prioritizing regular demand while reserving capacity for emergency demand	Modelo de programação dinâmica capaz de auxiliar na decisão do resguardo de capacidade para que se garanta o atendimento de situações emergenciais.	Hu et al. (2015)	Incerteza de demanda

Fonte: Autor (2019)

Figura A.1 - Resumo da revisão da literatura

(continuação)

Artigo	Realizado	Autores	Campo	
Strategic capacity planning for smart production Decision modeling under demand uncertainty	Modelo de estratégia de decisão multiobjetivo para estimativa de capacidade em indústrias manufatureiras de semicondutores.	Chien, Dou e Fu (2018)	Incerteza demanda	de
Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty	Modelo de programação linear inteira mista voltado a gestão da cadeia de suprimentos, abrangendo atividades de produção, distribuição e logística reversa.	Cardoso, Barbosa-Póvoa e Relvas (2013)	Incerteza demanda	de
Joint procurement and production decisions in remanufacturing under quality and demand uncertainty	Sistema híbrido capaz de avaliar peças novas e peças usadas como forma de <i>input</i> de um sistema de produção, a fim de satisfazer a incerteza de demanda do mercado.	Mukhopadhyay e Ma (2009)	Incerteza demanda	de
Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing	Tratamento de um problema de cadeia de suprimentos sob incerteza de demanda dos clientes, onde um modelo de otimização robusta foi desenvolvido para o desenho de tal cadeia.	Pan e Nagi (2010)	Incerteza demanda	de
On Distributionally Robust Chance-Constrained Linear Programs	Demonstração de adaptação de restrições – pertencentes a modelos de programação linear – as quais estão sujeitas a incerteza de demanda nos dados que as especificam	Calafiore e Ghaoui (2006)	Incerteza demanda	de
Peak demand contract for big consumers computed based on the combination of a statistical model	Previsão de demanda, via simulação - 2.000 cenários - por um modelo de séries temporais ARIMA e, a partir disto, um modelo de otimização foi elaborado e utilizado para para achar os melhores valores de contrato de pico de eletricidade.	Lima et al. (2018)	Incerteza demanda	de
Using computer simulation to reduce access time for outpatient departments	Uso de simulação para rodar um modelo de filas e cálculo do tempo de acesso / tempo de espera.	Elkhuizen et al. (2007)	Incerteza demanda	de

Fonte: Autor (2019)

Figura A.1 - Resumo da revisão da literatura

(continuação)

Artigo	Realizado	Autores	Campo
Action research for operational management	Demonstração do método de pesquisa-ação como adequado para o desenvolvimento de pesquisas sobre gestão de operações, demonstrando que este método é capaz de promover conhecimento através das vivências práticas de gestores atuantes na área.	Coughlan e Coughlan (2002)	Gestão de operações
Case research in operations management	Avaliação da eficácia de estudos de caso para a compreensão do gerenciamento de operações, sintetizando em poucos passos básicos a construção de um bom estudo de caso para este campo de pesquisas.	Voss, Tsikriktsis e Frohlich (2002)	Gestão de operações
Conducting case study research in operations management	Apresentação de trabalhos bem-conceituados que seguiram o método de estudo de caso, apresentando uma espécie de guia para garantir que determinada pesquisa seja bem desenvolvida quanto a seu rigor.	McCutcheon e Meredith (1993)	Gestão de operações
Survey research in operations management: a process-based perspective	Apresentação de uma pesquisa seguindo método <i>survey</i> para compreensão da gestão de operações.	Forza (2002)	Gestão de operações
Contingency research in operations management practices	Estudo de gestão de operações para o contexto da teoria da contingência, apresentando uma pesquisa que mostra uma série de pontos a serem melhor explorados dentro do tema.	Sousa e Voss (2008)	Gestão de operações
Heuristics to Schedule Service Engineers within Time Windows	Conjunto de heurísticas para problemas de roteamento de veículos com janela de tempo sob incerteza de demanda com agendamentos feitos de forma interativa.	Johns (1995)	Gestão de operações
An emergency vehicle dispatching system for an electric utility in Chile	Sistema computacional baseado em algoritmos para roteamento de veículo, com demanda incerta (que são as próprias quebras ocorridas as quais requerem equipes de manutenção).	Weintraub et al (1999)	Gestão de operações

Fonte: Autor (2019)



Figura A.1 - Resumo da revisão da literatura

(conclusão)

<b>Artigo</b>	<b>Realizado</b>	<b>Autores</b>	<b>Campo</b>
Optimizing scheduling of post-earthquake electric power restoration tasks	Modelo de programação inteira estocástica para otimização de tarefas de restauração de sistemas elétricos de potência pós terremotos.	Xu et al (2007)	Gestão de operações
Repair-unit location models for power failures	3 modelos de programação matemática (tático, estratégico de curto prazo e estratégico de longo prazo) para localizar e fazer despacho de unidades de reparo para restabelecer transmissão de energia.	Yao e Min (1998)	Gestão de operações
Efficient Recovery from Power Outage	Otimização de agendamento de equipes em situações de desastre natural; modelo estruturado em duas partes: i) problema de orçamento e ii) latência ponderada do cliente.	Guha et al (1999)	Gestão de operações

Fonte: Autor (2019)

## APÊNDICE B – CÓDIGO DA IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL ATRAVÉS DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO R

```
1   R=1000
2   N=4
3
4   m<-c()
5   b<-c()
6   y<-c()
7
8   for (i in 1:R)
9   {
10      n<-c()
11      m<-c()
12
13      for (j in 1:N)
14      {
15         gpd<-rgpd(n=1,loc=1.7352, scale=5.8741 , shape=-0.86828)
16         gev<-rgev(n=28,shape=-0.77465, scale=58.187,loc=295)
17         br<-rburr(n=1, m=331.61 , s=8.0841 , f=4.0154)
18         gev2<-rgev(n=1,shape=-0.16036, scale=32.158,loc=250.21)
19         qqquad<-rchisq(n=1, df=242, ncp=0)
20         log3<-rlnorm3(n=1, meanlog = 7.2182, sdlog = 0.02603, threshold = -1128.4)
21         p<-rpert(n=1, min=2.2402, mode=15.227, max=21.81)
22
23         m<-matrix(c(gpd[1], gev[1], br[1], gev2[1], qqquad[1], log3[1], p[1]))
24         n<-rbind(n,m)
25      }
26      b<- cbind(b,n)
27   }
```