

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Modelagem, previsão de séries de tráfego e controle estatístico de
indicadores de qualidade em redes celulares

Bruno Leandro Campos de Miranda

MACSNL - Modelagem, Análise e Controle de Sistemas Não Lineares
Departamento de Engenharia Elétrica

2010

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Modelagem, previsão de séries de tráfego e controle estatístico de indicadores de qualidade em redes celulares

Dissertação de mestrado submetida ao Colegiado de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requerimento parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Sinais e Sistemas

Aluno: Bruno Leandro Campos de Miranda
Orientador: Doutor Eduardo Mazoni Andrade Marçal Mendes
Co-Orientadora: Doutora Carmela Maria Polito Braga

Departamento de Engenharia - UFMG
2010

*À minha mãe e aos
meus avós.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por abrir caminhos em minha vida e proporcionar meios para que eu possa trilhá-los, sendo toda a fonte de inspiração e energia.

À minha mãe pelo amor incondicional, incentivo e compreensão. Você sempre será a minha referência de caráter, persistência, dedicação, superação e ética.

Aos meus avós, por me acolherem desde o princípio com todo o amor e carinho que uma pessoa precisa. Obrigado pelo apoio incomensurável em todas as etapas da minha vida.

Aos meus familiares, que mesmo distantes me proporcionam momentos de felicidade.

Ao professor Luis Antônio Aguirre, primeira pessoa com quem tive contato na instituição, pelo pronto acolhimento e incentivo, e pelos valiosos conhecimentos transmitidos nas duas cadeiras as quais tive a oportunidade de acompanhar, em especial àquela relativa à identificação de sistemas, base para parte desta obra.

Ao professor Eduardo Mazoni Andrade Marçal Mendes, por acreditar na viabilidade do desenvolvimento desta pesquisa mesmo não me conhecendo antes do seu início, pela orientação objetiva e sensata, e por compreender as dificuldades relacionadas à distância impostas pelo meu trabalho.

À professora Carmela Maria Polito Braga, por prontamente aceitar a co-orientação desta pesquisa, e pela excelente maneira com que foram ministradas as aulas relativas ao controle estatístico de processos, as quais foram fonte de incentivo ao desenvolvimento de parte deste texto.

Aos professores Hani Camille Yehia, João Antônio de Vasconcelos e Walmir Matos Caminhas, pelo conhecimento proporcionado por meio das disciplinas cursadas.

Ao Giuseppe Glionna, pelo incentivo sem o qual não seria possível iniciar esta pesquisa.

Ao Ricardo Fernandes de Arruda, pelo companheirismo, confiança, paciência e estímulo. A Danielle Mendonça Okamoto e Flávio Henrique Batista de Souza, amigos que conhecia antes de ingressar no mestrado, e que tive a oportunidade de cursar disciplinas em conjunto, pelas discussões produtivas e pelos estudos desenvolvidos.

Ao Bruno Leite Costa, Bruno Lúcio Oliveira, Caio Lira Bretas, Fabiano Márcio de Souza, Janderlaine Gracieli Tatiana da Silva e Guilherme Magalhães Nolasco, pessoas cuja distância não abrandou a amizade, por todas as alegrias proporcionadas.

Aos meus amigos que conheci no trabalho, em especial Eliane Chan, Gabriel Mesquita de Paula, Guilherme Duarte Hiss, Karine Cristina Barbosa, Milene de Moura Braga Calazans, Milene Neiva Rezende, e Raquel da Silveira Assis, pela paciência, transferência de conhecimento e momentos de diversão.

RESUMO

A evolução das redes celulares gerou um grande incremento em número de usuários, refletido no aumento da quantidade de elementos de rede, os quais devem possuir capacidade suficiente, e cujos indicadores de qualidade devem ser monitorados de forma eficiente.

Propõe-se nesta pesquisa a aplicação de modelos Auto-regressivos Integrados de Médias Móveis na identificação e previsão de séries temporais de tráfego em entidades no âmbito do *Base Station Subsystem*, com a finalidade de auxiliar no processo de ampliação pró-ativa de capacidade. Realizou-se a estimação dos parâmetros por meio do método dos mínimos quadrados. Coletaram-se os dados na Hora de Maior Movimento diária, utilizando-se 210 amostras para janela de identificação e 60 para validação. Avaliam-se os resultados em forma gráfica e também por meio do Erro Quadrático Médio e da diferença das médias das quatro maiores amostras de tráfego reais e estimadas. Determina-se a aleatoriedade dos resíduos por meio do teste de Lilliefors.

Também se investiga nesta pesquisa a aplicabilidade de gráficos de controle de Shewhart no acompanhamento de indicadores estatísticos em nível de setores, com o objetivo de detecção de falhas por meio da alteração do comportamento do processo. Utilizaram-se os gráficos de medidas individuais e os gráficos \bar{x} e R para efeito de comparação. Coletaram-se os indicadores na Hora de Maior Movimento diária. Apresentam-se os resultados de forma gráfica, e se determinou a aleatoriedade dos pontos descritos nos gráficos por meio do teste de Lilliefors.

Palavras chave: Capacidade, Gráficos de Controle de Shewhart, Indicadores Estatísticos de Qualidade, Modelos Auto-Regressivos Integrados de Médias Móveis, Redes Celulares, Tráfego.

ABSTRACT

The cellular networks evolution lead to a growth in the number of users that resulted in the increment of network elements, which must have enough capacity and efficiently monitored key performance indicators.

The application of the Autoregressive Integrated Moving Average models in the identification and prediction of traffic time series in the Base Station Subsystem entities has been proposed in this research in order to support the proactive capacity extension process. The least squares method has been used to estimate the parameters of the model. The data has been collected in the daily Busy Hour, with 210 samples used in the identification step and 60 for the validation part. The results have been presented by means of graphics; using the Mean Square Error; and the difference between the four highest measured and estimated traffic samples. The Lilliefors test has been used to determine the randomness of the residues.

The applicability of Shewhart control charts in the sector performance indicators monitoring, has also been proposed, in order to detect failures through the process tendency disturbance. The results have been presented graphically and the randomness of the samples described in the charts has been determined using the Lilliefors test.

Keywords: Autoregressive Integrated Moving Average Models, Capacity, Cellular Networks, Key Performance Indicators, Shewhart Control Charts, Traffic.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Topologia simplificada de redes celulares	1
1.1.1	Gráfico da evolução da quantidade e densidade de acessos do Serviço Telefônico Fixo Comutado (STFC) de uso individual instalados e em serviço no Brasil	3
1.1.2	Gráfico da evolução da quantidade e densidade de acessos dos Serviços Móvel Celular (SMC) e Pessoal (SMP) no Brasil	3
2.1.1	Técnicas de duplexação (a) FDD e (b) TDD	8
2.2.1.1	FDMA	9
2.2.2.1	TDMA	10
2.2.2.2	Sistema híbrido TDMA e FDMA	11
2.2.3.1.1	Espalhamento espectral no CDMA-DS	12
2.3.1	Comutação por pacote de uma informação dividida em três pacotes nas técnicas (a) datagrama e (b) circuito virtual	14
2.5.1	Topologia GSM CS – BSS e SS	17
2.5.1.1	Ganho em eficiência espectral por meio da utilização da setorização	18
2.6.1.1	Procedimentos de chamada de voz oriunda de rede externa e terminada em uma MS, omitidos processos de autenticação e segurança	24
2.7.1.1	Procedimentos <i>handover</i> inter BSC intra MSC	26
3.1.1.1	Exemplo de série temporal de tráfego na HMM diária	31
3.2.1.1	Exemplo de série temporal de tráfego horário, janela de uma semana	34

3.3.1	Exemplo de gráfico de controle	41
3.3.1.1	CMS ₁ , em quantidade de amostras, necessário para detectar um desvio $k\sigma$ na média do processo em um gráfico \bar{x}	44
4.2.1.1	BSC01, HMM Diária: Tráfego normalizado para as janelas de identificação e de validação	48
4.2.1.2	BSC01, HMM Diária: FAC amostral para uma diferença de <i>lag</i> igual a um ...	49
4.2.1.3	BSC01, HMM Diária: FAC amostral para uma diferença de <i>lag</i> igual a 35	50
4.2.1.4	BSC01, HMM Diária: Tráfego normalizado, sem tendência e de média zero e sua estimação por meio dos parâmetros auto-regressivos e de médias móveis, na janela de identificação	51
4.2.1.5	BSC01, HMM Diária: Tráfego normalizado e sua estimação por meio do modelo ARIMA, na janela de validação	52
4.2.2.1	BSC02, HMM Diária: Tráfego normalizado para as janelas de identificação e de validação	53
4.2.2.2	BSC02, HMM Diária: FAC amostral para uma diferença de <i>lag</i> igual a 35	53
4.2.2.3	BSC02, HMM Diária: Tráfego normalizado, sem tendência e de média zero e sua estimação por meio dos parâmetros auto-regressivos e de médias móveis, na janela de identificação	54
4.2.2.4	BSC02, HMM Diária: Tráfego normalizado e sua estimação por meio do modelo ARIMA, na janela de validação	55
4.2.3.1	BSC03, HMM Diária: Tráfego normalizado para as janelas de identificação e de validação	56
4.2.3.2	BSC03, HMM Diária: FAC amostral para uma diferença de <i>lag</i> igual a 35	56
4.2.3.3	BSC03, HMM Diária: Tráfego normalizado, sem tendência e de média zero e sua estimação por meio dos parâmetros auto-regressivos e de médias móveis, na janela de identificação	57

4.2.3.4	BSC03, HMM Diária: Tráfego normalizado e sua estimação por meio do modelo ARIMA, na janela de validação	58
4.2.4.1	Setor01, HMM Diária: Tráfego normalizado para as janelas de identificação e de validação	59
4.2.4.2	Setor01, HMM Diária: FAC amostral para uma diferença de <i>lag</i> igual a 35	59
4.2.4.3	Setor01, HMM Diária: Tráfego normalizado, sem tendência e de média zero e sua estimação por meio dos parâmetros auto-regressivos e de médias móveis, na janela de identificação	60
4.2.4.4	Setor01, HMM Diária: Tráfego normalizado e sua estimação por meio do modelo ARIMA, na janela de validação	61
4.2.5.1	Setor02, HMM Diária: Tráfego normalizado para as janelas de identificação e de validação	62
4.2.5.2	Setor02, HMM Diária: FAC amostral para uma diferença de <i>lag</i> igual a 35	62
4.2.5.3	Setor02, HMM Diária: Tráfego normalizado, sem tendência e de média zero e sua estimação por meio dos parâmetros auto-regressivos e de médias móveis, na janela de identificação	63
4.2.5.4	Setor02, HMM Diária: Tráfego normalizado e sua estimação por meio do modelo ARIMA, na janela de validação	64
4.2.6.1	Setor03, HMM Diária: Tráfego normalizado para as janelas de identificação e de validação	64
4.2.6.2	Setor03, HMM Diária: FAC amostral para uma diferença de <i>lag</i> igual a 35	65
4.2.6.3	Setor03, HMM Diária: Tráfego normalizado, sem tendência e de média zero e sua estimação por meio dos parâmetros auto-regressivos e de médias móveis, na janela de identificação	66
4.2.6.4	Setor03, HMM Diária: Tráfego normalizado e sua estimação por meio do modelo ARIMA, na janela de validação	66

4.3.1.1.1	SetorA, Medidas Individuais, log(PQC): Gráfico de controle das observações individuais	68
4.3.1.1.2	SetorA, Medidas Individuais, log(PQC): Gráfico de controle das amplitudes móveis	68
4.3.1.2.1	SetorA, Medidas Individuais, PSH: Gráfico de controle das observações individuais	70
4.3.1.2.2	SetorA, Medidas Individuais, PSH: Gráfico de controle das amplitudes móveis	70
4.3.1.2.3	SetorA, Medidas Individuais, log(PSH): Gráfico de controle das observações individuais	71
4.3.1.2.4	SetorA, Medidas Individuais, log(PSH): Gráfico de controle das amplitudes móveis	72
4.3.2.1	SetorB, Medidas Individuais, log(PQC): Gráfico de controle das observações individuais	73
4.3.2.2	SetorB, Medidas Individuais, log(PQC): Gráfico de controle das amplitudes móveis	73
4.3.3.1.1	SetorA, \bar{x} e R, m=3, log(PQC): Gráfico de controle da média do processo	75
4.3.3.1.2	SetorA, \bar{x} e R, m=3, log(PQC): Gráfico de controle das amplitudes relativas	76
4.3.3.2.1	SetorA, \bar{x} e R, m=3, PSH: Gráfico de controle da média do processo	77
4.3.3.2.2	SetorA, \bar{x} e R, m=3, PSH: Gráfico de controle das amplitudes relativas	78
4.3.3.2.3	SetorA, \bar{x} e R, m=3, log(PSH): Gráfico de controle da média do processo	79
4.3.3.2.4	SetorA, \bar{x} e R, m=3, log(PSH): Gráfico de controle das amplitudes relativas	79

4.3.4.1	SetorB, \bar{x} e R, m=3, PQC: Gráfico de controle da média do processo	80
4.3.4.2	SetorB, \bar{x} e R, m=3, PQC: Gráfico de controle das amplitudes relativas	81
4.3.4.3	SetorB, \bar{x} e R, m=3, log(PQC): Gráfico de controle da média do processo	82
4.3.4.4	SetorB, \bar{x} e R, m=3, log(PQC): Gráfico de controle das amplitudes relativas	82
A1.1.1	Exemplo de distribuição normal e áreas sob sua curva	92
A1.2.1	Exemplo de distribuição lognormal e áreas sob sua curva	93

LISTA DE TABELAS

3.3.2.1	CMS ₁ necessário para detecção de deslocamentos de 1σ , 2σ e 3σ para gráficos de controle de medidas individuais com limites 3σ	45
4.2.1.1	BSC01, HMM Diária: Valores estimados dos parâmetros do modelo	51
4.2.2.1	BSC02, HMM Diária: Valores estimados dos parâmetros do modelo	54
4.2.3.1	BSC03, HMM Diária: Valores estimados dos parâmetros do modelo	57
4.2.4.1	Setor01, HMM Diária: Valores estimados dos parâmetros do modelo	60
4.2.5.1	Setor02, HMM Diária: Valores estimados dos parâmetros do modelo	61
4.2.6.1	Setor03, HMM Diária: Valores estimados dos parâmetros do modelo	65
4.3.1.1.1	SetorA, Medidas Individuais, log(PQC): Valores da LC, do LSC e do LIC	67
4.3.1.2.1	SetorA, Medidas Individuais, PSH: Valores da LC, do LSC e do LIC	69
4.3.2.1	SetorB, Medidas Individuais, log(PQC): Valores da LC, do LSC e do LIC	72
4.3.3.1.1	SetorA, \bar{x} e R, m=3, log(PQC): Valores da LC, do LSC e do LIC	74
4.3.3.2.1	SetorA, \bar{x} e R, m=3, PSH: Valores da LC, do LSC e do LIC	77
4.3.4.1	SetorB, \bar{x} e R, m=3, PQC: Valores da LC, do LSC e do LIC	80
4.3.4.2	SetorB, \bar{x} e R, m=3, log(PQC): Valores da LC, do LSC e do LIC	81
4.4.1.1	Resumo dos resultados das previsões de tráfego (janelas de estimação): EQM e diferença das médias das quatro maiores HMMs	84
A2.1	Medidas estatísticas para cálculo das linhas dos gráficos de controle de Shewhart	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ed.	Edição.
pp.	Página.
trx.	Transceptor.
v.	Volume.
1G	Primeira Geração.
2G	Segunda Geração.
3G	Terceira Geração.
3GPP	<i>Third Generation Partnership Group</i> (Grupo de Parceria da Terceira Geração).
4G	Quarta Geração.
ACM	<i>Adress Complete Message</i> (Mensagem de Realização do Endereçamento).
AGCH	<i>Access Granted Channel</i> (Canal de Acesso Concedido).
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i> (Sistema de Telefonia Móvel Avançado).
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações.
ANM	<i>Answering Message</i> (Mensagem de Resposta).
AR	Autoregressive ([Modelo] Auto-regressivo).
ARMA	Autoregressive Moving Average ([Modelo] Auto-regressivo de Média Móvel).
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average ([Modelo] Auto-regressivo Integrado de Média Móvel).
AuC	<i>Authentication Center</i> (Centro de Autenticação).
BCCH	<i>Broadcast Control Channel</i> (Canal de Controle de Difusão).
BCH	<i>Broadcast Channel</i> (Canal de Difusão).
BSC	<i>Base Station Controller</i> (Controladora de Estações Rádio-Base).
BSIC	<i>Base Station Identity Code</i> (Código de Identificação da Estação Rádio-Base).
BSS	<i>Base Station Subsystem</i> (Rede de Acesso).
BTS	<i>Base Transceiver Station</i> (Estação Rádio-Base).
CBCH	<i>Cell Broadcast Channel</i> (Canal de Broadcast do Setor).
CCCH	<i>Common Control Channel</i> (Canal de Controle Comum).
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i> (Função de Distribuição Cumulativa).
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo por Divisão de Códigos).
CDMA-DS	<i>Code Division Multiple Access – Direct Sequence</i> (Acesso Múltiplo por Divisão de Códigos – Sequência Direta).

CDMA-FH	<i>Code Division Multiple Access – Frequency Hopping</i> (Acesso Múltiplo por Divisão de Códigos – Saltos de Frequência).
CGI	<i>Cell Global Identity</i> (Identidade Global do Setor).
CI	<i>Cell Identity</i> (Identidade do Setor).
CMS	Comprimento Médio de Seqüência.
CN	<i>Core Network</i> (Rede Núcleo).
CODEC	<i>Coder / Decoder</i> (Codificador / Decodificador).
CS	<i>Circuit Switch</i> (Comutação por Circuito).
DCCH	<i>Dedicated Control Channel</i> (Canal de Controle Dedicado).
EDGE	<i>Enhanced Data rates for Global Evolution</i> (Taxas de Dados Melhoradas para a Evolução Global).
EIR	<i>Equipment Identity Register</i> (Registro de Identidade de Equipamentos).
EQM	Erro Quadrático Médio.
FAC	Função de Autocorrelação.
FACCH	<i>Fast Associated Control Channel</i> (Canal de Controle Associado Rápido).
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> (Comissão Federal de Comunicações).
FCCH	<i>Frequency Correction Channel</i> (Canal de Correção da Frequência).
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i> (Duplexação por Divisão de Frequência).
FDM	<i>Frequency Division Multiplex</i> (Multiplexação por Divisão do Tempo).
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência).
FR	<i>Full Rate</i> (Taxa Plena).
GMSC	<i>Gateway Mobile Switching Center</i> (Centro de Comutação Móvel de Interconexão).
GoS	<i>Grade of Service</i> (Categoria do Serviço).
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> (Serviço Geral de Pacotes via Rádio).
GSM	<i>Global System for Mobile</i> (Sistema Global para Móveis).
HLR	<i>Home Location Register</i> (Registro de Localização Base).
HMM	Hora de Maior Movimento.
HR	<i>Half Rate</i> (Taxa Compactas).
IAM	<i>Initial Address Message</i> (Mensagem Inicial de Endereçamento).
IMEI	<i>International Mobile Equipment Identity</i> (Identidade Internacional do Equipamento Móvel).

IMSI	<i>International Mobile Subscriber Identity</i> (Identidade Internacional do Assinante Móvel).
ISDN	<i>Integrated Services Digital Network</i> (Rede Integrada de Serviços Digitais).
LAC	<i>Location Area Code</i> (Código da Área de Locação).
LA	<i>Location Area</i> (Área de Locação).
LAI	<i>Location Area Identity</i> (Identidade da Área de Locação).
LC	Linha Central.
LGT	Lei Geral das Telecomunicações brasileiras.
LIC	Limite Inferior de Controle.
LIE	Limite Inferior de Especificação.
LSC	Limite Superior de Controle.
LSE	Limite Superior de Especificação.
LTE	<i>Long Term Evolution</i> (Evolução de Longo Prazo).
MA	<i>Moving Average</i> ([Modelo] Médias Móveis).
MCC	<i>Mobile Country Code</i> (Código Móvel do País).
ME	<i>Mobile Equipment</i> (Equipamento Móvel).
MNC	<i>Mobile Network Code</i> (Código Móvel da Rede).
MOS	<i>Mean Opinion Score</i> (Conceituação Média de Opiniões).
MS	<i>Mobile Station</i> (Estação Móvel).
MS-ISDN	<i>Mobile Station-Integrated Services Digital Network</i> (Estação Móvel-Rede Integrada de Serviços Digitais).
MSC	<i>Mobile Switching Center</i> (Central de Comutação Móvel).
MSRN	<i>Mobile Station Roaming Number</i> (Número da Estação Móvel em <i>Roaming</i>).
NCH	<i>Notification Channel</i> (Canal de Notificação).
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo por Divisão de Frequências Ortogonais).
OSS	<i>Operation Support System</i> (Sistema de Suporte à Operação).
pdf	<i>Probability Density Function</i> (Função Densidade de Probabilidade).
PCH	<i>Paging Channel</i> (Canal de <i>Paging</i>).
PLMN	<i>Public Land Mobile Network</i> (Rede Móvel Terrestre Pública).
PS	<i>Packet Switch</i> (Comutação por Pacote).
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i> (Rede Pública de Telefonia Comutada).
QoS	<i>Quality of Service</i> (Qualidade do Serviço).
RACH	<i>Random Access Channel</i> (Canal de Acesso Aleatório).

RI	<i>Routing Information</i> (Informação de Roteamento).
SACCH	<i>Slow Associated Control Channel</i> (Canal de Controle Associado Lento).
SARIMA	[Modelo] Auto-regressivo Integrado de Média Móvel Sazonal.
SCH	<i>Synchronization Channel</i> (Canal de Sincronização).
SDCCH	<i>Standalone Control Channel</i> (Canal de Controle em Conexão Não-Ativa).
SI	Sistema Irradiante.
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i> (Módulo de Identidade do Assinante).
SMC	Serviço Móvel Celular.
SMP	Serviço Móvel Pessoal.
SMS	<i>Short Message Service</i> (Serviço de Mensagens de texto Curtas).
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> (Relação Sinal / Ruído).
SS	<i>Switching Subsystem</i> (Subsistema de Comutação).
STFC	Serviço Telefônico Fixo Comutado.
TA	<i>Timing Advance</i> (Avanço Temporal).
TCH	<i>Traffic Channel</i> (Canal de Tráfego).
TDD	<i>Time Division Duplex</i> (Duplexação por Divisão do Tempo).
TDM	<i>Time Division Multiplex</i> (Multiplexação por Divisão do Tempo).
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo por Divisão do Tempo).
TELEBRÁS	Telecomunicações Brasileiras.
TIMSI	<i>Temporary International Mobile Equipment Identity</i> (Identidade Internacional Temporária do Equipamento Móvel).
TRAU	<i>Transcoder and Rate Adaptation Unit</i> (Unidade de Adaptação de Taxas e Transcodificação).
TS	<i>Time Slot</i> (Período de Tempo).
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> (Sistema Universal de Telecomunicações Móveis).
USDC	<i>United States Digital Cellular</i> (Celular Digital Norte-Americano).
VLR	<i>Visitor Location Register</i> (Registro de Locação Visitante).
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo Banda Larga por Divisão de Códigos).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	I
LISTA DE TABELAS.....	VI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	VII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. HISTÓRICO DAS COMUNICAÇÕES CELULARES NO BRASIL.....	2
1.2. OBJETIVOS E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	4
1.3. METODOLOGIA.....	6
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	6
2. SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO CELULAR.....	8
2.1. TÉCNICAS DE DUPLEXAÇÃO.....	8
2.2. TÉCNICAS DE ACESSO MÚLTIPLO.....	9
2.2.1. FDMA	9
2.2.2. TDMA	10
2.2.3. CDMA	11
2.3. TIPOS DE COMUTAÇÃO.....	13
2.4. PRINCIPAIS PADRÕES DE REDE CELULAR	13
2.5. TOPOLOGIA GSM CS	17
2.5.1. BSS CS	18
2.5.2. SS CS / OSS	19
2.6. CANAIS LÓGICOS GSM CS	20
2.6.1. Chamada terminada em uma MS.....	22
2.7. <i>HANDOVER</i> NO GSM.....	23
2.7.1. Procedimento de <i>handover</i> Inter-BSC Intra MSC	25
2.8. TEORIA DE TRÁFEGO CS EM REDES FDMA E TDMA.....	27
2.9. INDICADORES DE QUALIDADE GSM CS	28
2.10. CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
3. FERRAMENTAL TEÓRICO: MODELAGEM MATEMÁTICA E CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSOS.....	30
3.1. ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS	30
3.1.1. Motivação	30
3.2. MODELOS ARIMA.....	32
3.2.1. Identificação do modelo e estimação dos parâmetros.....	33
3.2.2. Algoritmo de estimação e de previsão implementado	36
3.2.3. Validação	38
3.3. CONTROLE ESTATÍSTICO COM GRÁFICOS DE CONTROLE DE SHEWHART	40
3.3.1. Gráficos de controle \bar{X} e R	42
3.3.2. Gráficos de controle para medidas individuais	44
3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
4. RESULTADOS	47
4.1. COLETA DAS INFORMAÇÕES	47
4.2. MODELAGEM E PREVISÃO DE TRÁFEGO	47
4.2.1. Modelagem do tráfego na HMM diária – BSC01.....	48
4.2.2. Modelagem do tráfego na HMM diária – BSC02.....	52
4.2.3. Modelagem do tráfego na HMM diária – BSC03.....	55
4.2.4. Modelagem do tráfego na HMM diária – Setor01.....	58
4.2.5. Modelagem do tráfego na HMM diária – Setor02.....	61
4.2.6. Modelagem do tráfego na HMM diária – Setor03.....	63
4.3. CONTROLE ESTATÍSTICO DE INDICADORES DE QUALIDADE EM REDES CELULARES	67
4.3.1. Gráficos de controle para medidas individuais na HMM diária - SetorA.....	67

4.3.1.1.	PQC	67
4.3.1.2.	PSH	69
4.3.2.	Gráficos de Controle para medidas individuais na HMM diária - SetorB	71
4.3.3.	Gráficos de Controle para medidas individuais em três HMMs diárias - SetorA	74
4.3.3.1.	PQC	74
4.3.3.2.	PSH	76
4.3.4.	Gráficos de Controle para medidas individuais em três HMMs diárias - SetorB	78
4.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
4.4.1.	Previsão das séries temporais de tráfego	83
4.4.2.	Controle estatístico de indicadores de qualidade em redes celulares	84
5.	CONCLUSÃO.....	86
5.1	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	ANEXO 1: CONCEITOS ESTATÍSTICOS BÁSICOS	91
	ANEXO 2: MEDIDAS ESTATÍSTICAS TABULADAS.....	97

1. INTRODUÇÃO

Desde a sua concepção, as redes celulares se tornaram amplamente difundidas em nível mundial, fato relacionado à mobilidade intrínseca ao sistema e à constante evolução dos tipos de serviços oferecidos e tecnologia aplicada no desenvolvimento dos terminais. O correto funcionamento de tais redes é função da cobertura¹, da capacidade dos equipamentos e interfaces, e das suas configurações.

Provisiona-se cobertura por meio dos elementos que compõem as Estações Rádio-Base (BTSs – *Base Transceiver Stations*). Nestas estações se encontram instalados os trxs. (transceptores), equipamentos responsáveis pela geração de potência, processamento de sinais, e definição da capacidade na interface aérea. As BTSs são conectadas às Controladoras de Estações Rádio-Base (BSCs – *Base Station Controllers*), cujas principais funções estão relacionadas aos procedimentos de mobilidade e ao controle de potência. Os equipamentos e interfaces mencionados até o momento realizam as funções designadas à Rede de Acesso (BSS – *Base Station Subsystem*), a qual é interligada à Rede Núcleo (CN – *Core Network*) e ao Sistema de Suporte à Operação (OSS – *Operation Support System*), responsáveis pela comutação, pela interconexão e pelo bilhetamento, além de possuir bases de dados que asseguram o acesso de móveis e de usuários autorizados na rede, bem como a restrição da utilização dos serviços a eles assignados.

A Figura 1.1 apresenta a topologia simplificada dos subsistemas que compõem redes celulares. Deve-se observar que padrões em descontinuidade não possuem BSCs, cujas funções são incorporadas à CN.

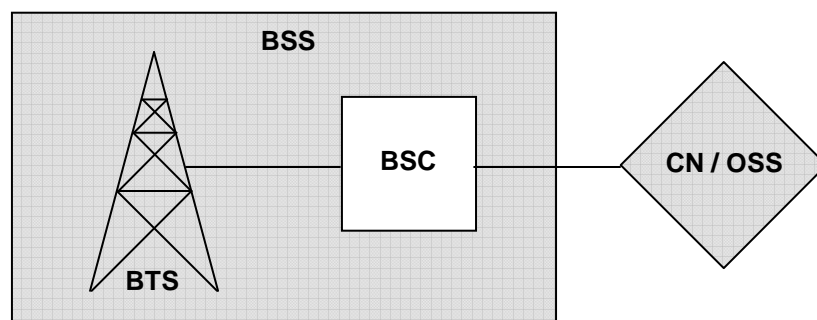


Figura 1.1 – Topologia simplificada de redes celulares.

¹ Deve-se observar que este fator não está relacionado apenas à potência transmitida, mas também ao perfil da Relação Sinal/Ruído (SNR – *Signal to Noise Ratio*) do canal.

Todos os elementos e interfaces possuem contadores que possibilitam a construção de formulações para o acompanhamento do desempenho da rede. Os indicadores estatísticos, como são denominados, permitem verificar o estado da rede sob diversas ópticas (MISHRA, 2004): cobertura, pela investigação da potência em relação ao Avanço Temporal (TA – *Timing Advance*), por exemplo; capacidade, pelo exame de bloqueios e de tempos de congestionamento, entre outros; e qualidade-configuração, pela inspeção das taxas de quedas de chamadas, de sucessos de *handover*², etc. Deve-se observar que, especialmente no âmbito da cobertura, é necessária a utilização de outras ferramentas para a operação do sistema, como testes realizados em campo com dispositivos e *softwares* que permitam a visualização e o armazenamento de informações relacionadas a esta.

1.1. Histórico das comunicações celulares no Brasil

O Brasil iniciou sua operação celular na década de 1990, com o sistema Telecomunicações Brasileiras (TELEBRÁS) estatizado, utilizando o padrão Primeira Geração (1G) *Advanced Mobile Phone System* (AMPS – Sistema de Telefonia Móvel Avançado). Posteriormente, as operadoras evoluíram seus sistemas de telefonia móvel para os padrões Segunda Geração (2G) IS-54 ou IS-95.

Em 1997, promulgou-se a Lei Geral das Telecomunicações (LGT) brasileiras, que ofereceu base para a criação da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) (MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES, História da Telefonia), cujas atribuições são regulamentar, outorgar e fiscalizar o setor de telecomunicações no país. A ANATEL foi a responsável por oferecer embasamento para o processo de privatização do setor de telefonia brasileiro, que viria a ocorrer em 1998, e exigir metas de atendimento à população por meio do Plano de Universalização, o qual deveria ser cumprido pelas operadoras que recebessem as outorgas. O resultado, conforme apresentado na Figura 1.1.2, foi o crescimento do setor no final da década de 1990 e início da década de 2000. Também no começo da década de 2000, as operadoras que utilizavam o padrão IS-54 iniciaram sua migração para o padrão 2G *Global System for Mobile* (GSM – Sistema Global para Móveis), que, na segunda metade da década referenciada, engloba a maior parte dos assinantes no país.

² Procedimento que assegura a continuidade das chamadas por meio da alteração de canais.

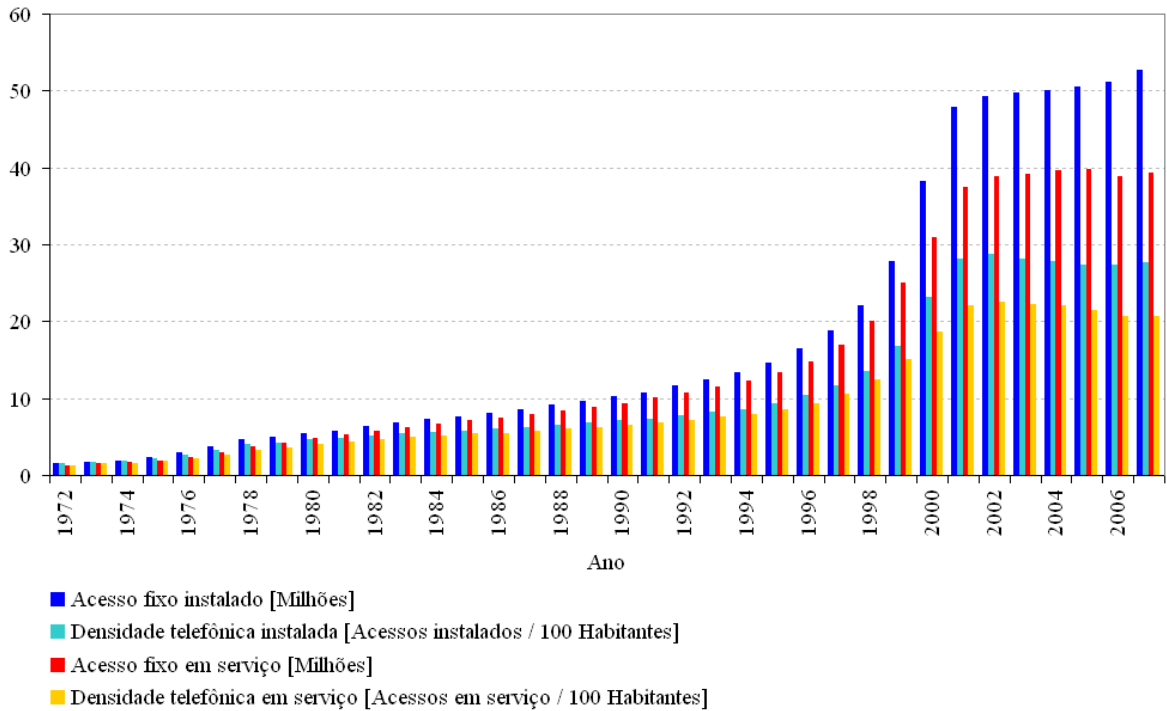


Figura 1.1.1 – Gráfico da evolução da quantidade e densidade de acessos do Serviço Telefônico Fixo Comutado (STFC) de uso individual instalados e em serviço no Brasil. Fonte: ANATEL.

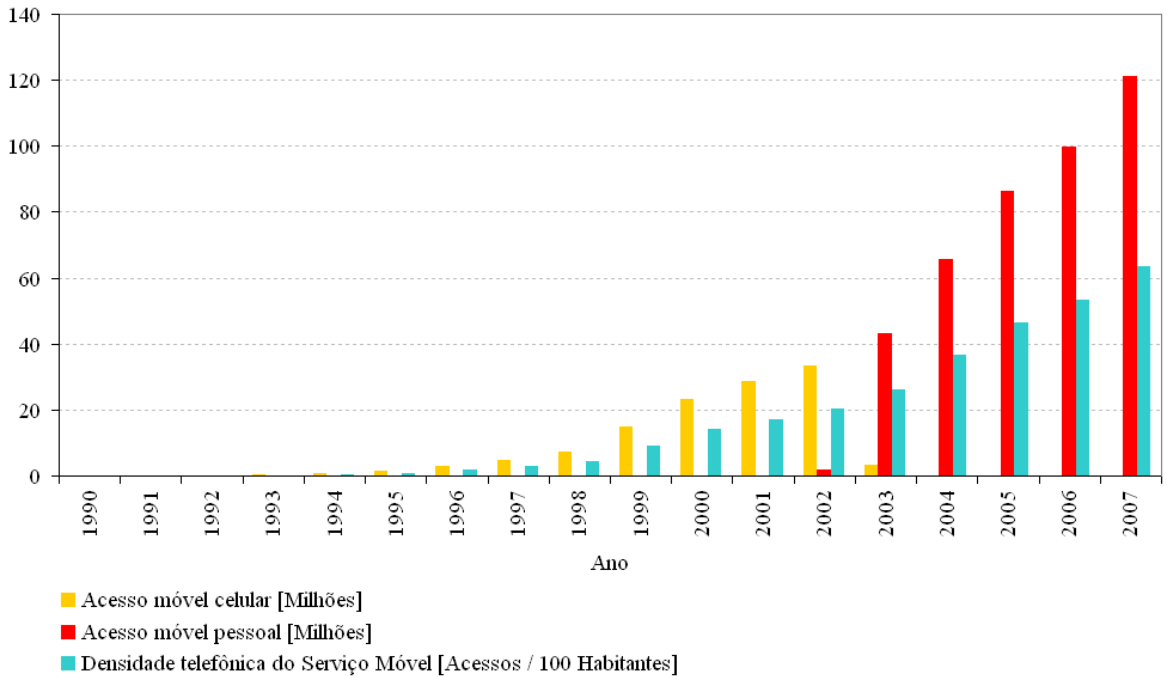


Figura 1.1.2 – Gráfico da evolução da quantidade e densidade de acessos dos Serviços Móvel Celular (SMC) e Pessoal (SMP) no Brasil. Fonte: ANATEL.

Como se pode observar, o crescimento dos serviços relacionados à telefonia móvel – Figura 1.1.2 – superou o crescimento do serviço de telefonia fixa – Figura 1.1.1 –, o qual possui uma tendência de estabilização. Tal crescimento implica em investimentos em cobertura e em capacidade, além do aumento da complexidade no monitoramento da qualidade da rede.

Em 2007, outorgou-se as bandas na faixa de 2.100MHz para a exploração da Terceira Geração (3G) no Brasil. Conforme edital da ANATEL, as operadoras que adquiriram direito de utilização de parte do espectro se responsabilizaram por cobrir a área urbana de todos os municípios brasileiros em até 60 meses com tecnologias 2G ou 3G, conforme população e *status* de cobertura celular na época do leilão. Algumas operadoras que haviam adquirido direito de uso de espectro para o 1G AMPS, na faixa de 850MHz, realizaram limpezas e passaram a utilizar parte da banda com o 3G.

1.2. Objetivos e relevância da pesquisa

Operadoras dispõem grandes montantes de investimento de capital e de operação para a disponibilização de cobertura e de capacidade, atividade crítica para estas corporações (ROSENBERG; KEMP, 2003).

Os investimentos em cobertura são usualmente definidos em planos de médio e de longo prazo, os quais prevêem a expansão da rede em *footprint* – maior quantidade de localidades a serem atendidas – ou em densidade – melhor cobertura nas localidades já atendidas –, conforme objetivos estratégicos. O montante de investimento destinado à capacidade também é definido em médio e em longo prazo, e está relacionado à previsão de crescimento da base e ao comportamento dos elementos de rede envolvidos. O direcionamento específico, entretanto, é usualmente uma premissa de projeto que ocorre em curto e médio prazo. Redl, Weber e Oliphant (1998, p. 32, tradução nossa) sutilmente ironizam a questão:

Não fossem os investimentos financeiros e os esforços para planejamento de frequência, a cobertura e a capacidade poderiam ser incrementadas por meio do mero aumento da quantidade de BTSs.

Investimentos em capacidade podem ocorrer de forma pró-ativa, onde se reduz a possibilidade de perda financeira em função de bloqueios e de congestionamentos, mas se corre o risco de se aplicar recursos erroneamente; ou reativa, onde o tempo para instalação e ativação

comercial dos equipamentos pode gerar perda de receita e a insatisfação de clientes, degradando, também, outros indicadores de qualidade. Courcoubeits e Weber (2003, p. 10, tradução nossa) exprimem a dificuldade no processo de determinação de demandas e de capacidades futuras:

(...) Há muita incerteza em relação à demanda por serviços de comunicação. (...) É difícil para qualquer operadora prever a demanda, como a tecnologia evoluirá, indicar os futuros gargalos no provisionamento de serviços, ou prever o preço e a qualidade da interconexão com outras redes.

Assim, um dos objetivos desta pesquisa é identificar e modelar o comportamento do tráfego em BSCs e em setores, que compõem as BTSs, para possibilitar a previsão do tráfego futuro em uma janela de tempo suficiente para o desenvolvimento do projeto de ampliação de capacidade e para a implantação deste, gerando aplicação orientada de recursos humanos e financeiros com uma menor possibilidade de erros, melhorando assim, a qualidade da rede percebida pelo cliente, e diminuindo a perda de receita. Considerando-se o período de entrega e de instalação dos equipamentos, um horizonte de previsão de dois meses seria satisfatório, sendo este, portanto, adotado nesta pesquisa.

Considerando-se que a quantidade de setores englobados em uma rede que abranja um país como o Brasil chega à ordem de dezenas de milhares, torna-se necessário o desenvolvimento de ferramentas para o acompanhamento dos principais indicadores de desempenho. Podem-se passar dias até que degradações sejam identificadas (por meio de relatórios macro ou de reclamações de clientes), fato que gera perda de receita e uma percepção ruim do usuário perante a rede ativa. Webb (1998, p. 75, tradução nossa) resume a dificuldade de monitoramento:

(...) As redes são boas na geração de estatísticas, tão boas que um dia de coleta em uma rede típica poderia facilmente gerar alguns gigabytes de informação. O desafio real das operadoras é filtrar estas informações de forma que apenas as estatísticas de interesse sejam apresentadas.

O outro objetivo da pesquisa, portanto, é realizar a detecção de alterações nos comportamentos de indicadores estatísticos de qualidade devido a problemas de configuração na parametrização ou em *hardware*, no nível de setores.

Assim, duas atividades críticas – a ampliação de capacidade pró-ativa, com correta aplicação de recursos; e a identificação em um curto intervalo de tempo de problemas em nível de setores – e que possuem características em comum – a influência direta na receita gerada, na quantidade de clientes da base e no nível de satisfação destes – são abordadas nesta pesquisa.

1.3. Metodologia

Para a modelagem e estimação do tráfego, utilizou-se os modelos Auto-regressivos Integrados de Médias Móveis (ARIMA – *Autoregressive Integrated Moving Average*), cujos parâmetros foram estimados pelo método dos mínimos quadrados. Coletou-se as amostras na Hora de Maior Movimento (HMM) diária, utilizada para fins de projeto, com uma janela de identificação de seis meses, que por meio de experimentos se apresentou como a mais apropriada. A validação foi realizada em uma janela de dois meses, com a massa de dados real e com a estimada pela rotina, que não possui a primeira massa citada como parâmetro de entrada, a qual foi utilizada apenas para efeito de comparação entre os valores reais e os preditos.

Para a detecção de falhas, utilizou-se os gráficos de controle de Shewhart \bar{x} e R projetados com amostras coletadas na HMM de três períodos do dia; e os gráficos de controle de Shewhart para medidas individuais, projetados com amostras coletadas na HMM diária, para efeito de comparação. Em ambos os casos, utilizou-se a HMM pelo fato de se obter melhor representatividade estatística dos indicadores de qualidade, motivo pelo qual as operadoras monitoram a rede nos períodos de maior tráfego.

1.4. Organização do texto

Inicia-se o texto com dois capítulos destinados ao embasamento teórico do leitor. No primeiro deles, apresenta-se conceitos básicos relacionados às redes celulares, bem como os principais padrões existentes, com posterior foco em redes GSM, das quais se retirou as massas de dados. Ainda nesta parte, expõe-se tópicos relacionados à teoria de tráfego e aos indicadores estatísticos de qualidade. O segundo capítulo aborda os modelos ARIMA, adotados para modelagem e previsão de tráfego; e os gráficos de controle de Shewhart, usados para o acompanhamento dos indicadores.

O texto segue com o capítulo de resultados, no qual se aborda os procedimentos de coleta das informações; os modelos ARIMA desenvolvidos e suas respectivas verificações nas janelas de validação; e a apresentação dos gráficos de controle implementados.

Apresenta-se, enfim, a conclusão, que contém as principais informações que se pôde extrair com base nos capítulos anteriores, bem como propostas para trabalhos futuros.

A pesquisa ainda reúne dois anexos. O primeiro aborda conceitos estatísticos básicos que podem facilitar a compreensão do segundo capítulo; e o segundo reúne tabuladas as medidas estatísticas utilizadas para o cálculo das linhas dos gráficos de controle de Shewhart.

2. SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO CELULAR

O objetivo deste capítulo é introduzir os principais conceitos relativos ao sistema celular, com a finalidade de oferecer ao leitor embasamento teórico para a compreensão do problema. O texto se inicia com a apresentação dos conceitos de técnicas de duplexação, acesso múltiplo e comutação. Posteriormente se listam os principais padrões de telefonia móvel para, então, expor-se o sistema GSM, incluindo sua topologia e canalização lógica. Finalmente, são relacionados a teoria de tráfego e os indicadores de qualidade.

2.1. Técnicas de Duplexação

Redes de telefonia celular permitem comunicação bidirecional e simultânea, sendo portanto denominadas *full-duplex*. Sistemas *full-duplex* podem utilizar técnicas de Duplexação por Divisão da Frequência (FDD – *Frequency Division Duplex*) ou por Divisão do Tempo (TDD – *Time Division Duplex*).

Técnicas FDD consistem na divisão do espectro em duas partes, uma para cada sentido da comunicação; enquanto o esquema TDD se baseia na alternância de períodos destinados à transmissão e à recepção, conforme apresentado na Figura 2.1.1.

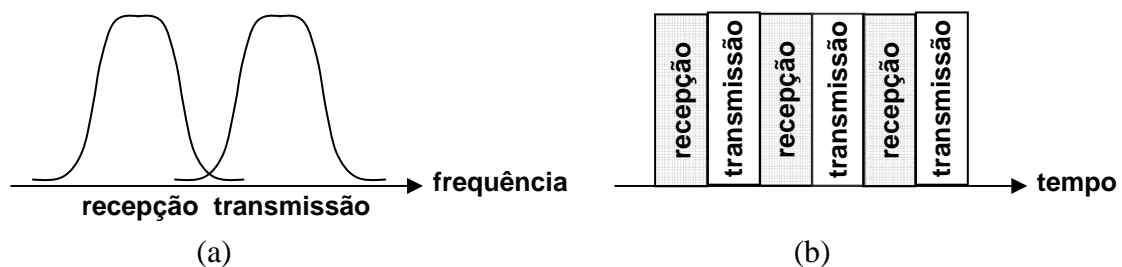


Figura 2.1.1 – Técnicas de duplexação (a) FDD e (b) TDD.

Sistemas celulares que utilizam o FDD possuem uma separação entre as faixas de frequências de transmissão e de recepção. A finalidade deste distanciamento é evitar interferência, uma vez que é frequente a utilização do mesmo Sistema Irradiante (SI) para ambos os sentidos da comunicação. Para a separação dos sinais, as BTSs possuem duplexadores, equipamentos constituídos por pares de filtros para cada uma das bandas citadas (EBERSPÄCHER; VÖGEL; BETTSTETTER, 2001).

2.2. Técnicas de Acesso Múltiplo

Devido à restrição espectral, técnicas de acesso múltiplo devem ser aplicadas às comunicações celulares, com a finalidade de otimizar a capacidade pelo incremento de usuários que compartilham o mesmo meio (WEBB, 1999). Três técnicas de acesso se destacam – o Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência (FDMA – *Frequency Division Multiple Access*), o Acesso Múltiplo por Divisão do Tempo (TDMA – *Time Division Multiple Access*) e o Acesso Múltiplo por Divisão de Códigos (CDMA – *Code Division Multiple Access*).

2.2.1. FDMA

Em 1889, Ernest Jules Pierre Mercadier criou uma técnica que possibilitava a inserção de até oito frequências para transportar informações telegráficas distintas em um único par metálico. Posteriormente, em 1921, Edwin Henry Colpitts e Otto Blackwell desenvolveram um sistema semelhante, e introduziram o conceito de ondas portadoras, alocando até doze destas por par metálico, fomentando, assim, a base para as técnicas de Multiplexação por Divisão de Frequências (FDM – *Frequency Division Multiplex*) (BARRADAS, 1995).

O FDMA é em uma aplicação do conceito FDM como técnica de acesso múltiplo. Em comunicações móveis, consiste na divisão do espectro disponível em sub-faixas, alocadas para cada usuário que deseja utilizar o serviço (FREEMAN, 1999), conforme Figura 2.2.1.1.

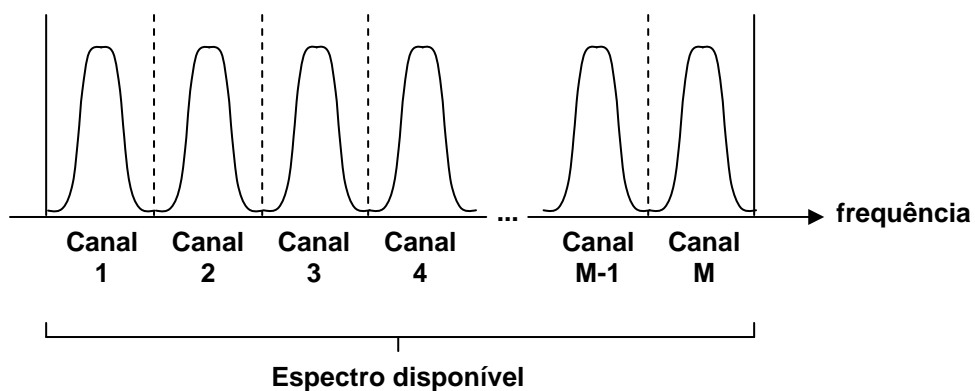


Figura 2.2.1.1 – FDMA.

O FDMA possui relativamente baixa eficiência espectral quando utilizado como única técnica de acesso múltiplo, uma vez que cada usuário ocupa a totalidade da sub-faixa na qual foi alocado no momento da comunicação (BANNISTER; MATHER; COOPE, 2004).

2.2.2. TDMA

Em 1874, Émile Baudot desenvolveu um sistema multiplexador que transmitia informações em espaços intercalados de tempo, dando origem à Multiplexação por Divisão do Tempo (TDM – *Time Division Multiplex*) (BARRADAS, 1995).

O TDMA é a técnica de acesso múltiplo que aplica o conceito TDM. Nela, utiliza-se o canal por meio de alternâncias cíclicas de Períodos de Tempo (TSs – *Time Slots*), os quais são alocados para os usuários (FREEMAN, 1999). Um *frame* é definido como um período de ciclo completo, conforme se pode observar na Figura 2.2.2.1.

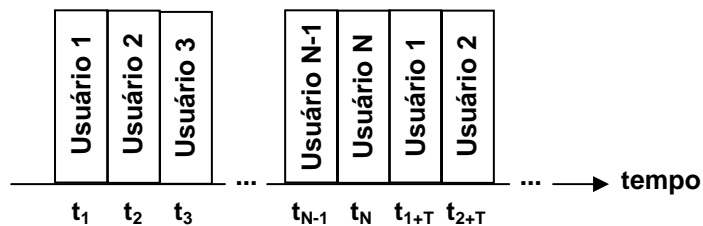


Figura 2.2.2.1 – TDMA.

Nesta técnica, a distância dos transmissores ao receptor pode ser crítica, ocasionando sobreposição de portadoras³. Uma solução para este problema é deixar de transmitir informações em períodos próximos ao início ou ao final dos TSs (período de guarda), o que gera diminuição da capacidade⁴ (FREEMAN, 1999).

³ Sejam dois transmissores tx_1 e tx_2 , onde a distância de tx_1 ao receptor é relativamente maior que a de tx_2 ao receptor. Caso o TS_1 , designado a tx_1 , possua posição na estrutura de *frame* imediatamente anterior ao TS_2 , designado a tx_2 , ou seja, tx_1 transmite antes de tx_2 , poderá haver sobreposição dos sinais devido ao atraso de propagação de tx_1 em relação a tx_2 .

⁴ O GSM contorna este problema com a estimação inicial da distância da Estação Móvel (MS – *Mobile Station*) à BTS, calculada com o uso do tempo de resposta de uma rajada de sincronização, gerando o TA. Assim, estações distantes, com maior TA, possuem uma estrutura de *frame* temporalmente adiantada em relação àquelas que se encontram próximas ao receptor. Nota-se que este artifício diminui o período de guarda, mas não o elimina (FREEMAN, 1999).

Em redes celulares é comum a utilização de sistemas híbridos FDMA e TDMA, onde um TS em determinada sub-faixa é alocado para cada usuário que utiliza o meio de comunicação, ação que resulta no aumento da eficiência espectral, conforme Figura 2.2.2.2.

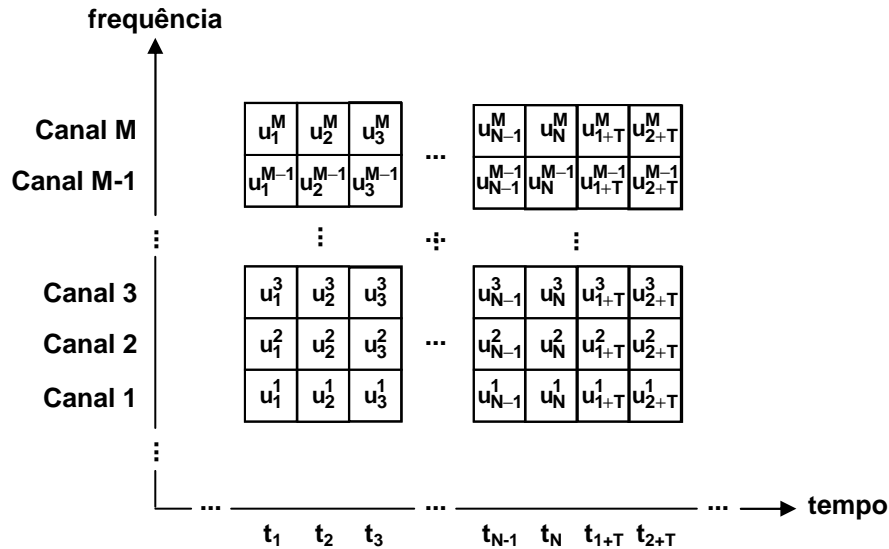


Figura 2.2.2.2 – Sistema híbrido TDMA e FDMA.

2.2.3. CDMA

Esquemas CDMA são denominados *spread spectrum*, uma vez que os sinais a serem transmitidos são distribuídos em todo o espectro disponível. Existem duas maneiras de implementação destas técnicas, o *CDMA-Frequency Hopping* (CDMA-FH – CDMA-Saltos de Frequência) e o *CDMA-Direct Sequence* (CDMA-DS – CDMA-Sequência Direta).

No CDMA-FH, os transmissores sintonizam diferentes canais dentro do espectro disponível, de acordo com uma sequência pré-estabelecida por códigos (EBERSPÄCHER; VÖGEL; BETTSTETTER, 2001).

2.2.3.1 CDMA-DS

No CDMA-DS, os sinais originais a serem transmitidos, de banda estreita e alto nível de potência, são espalhados de tal maneira que se tornam de banda larga e com baixo nível de

potência⁵ (EBERSPÄCHER; VÖGEL; BETTSTETTER, 2001) , conforme exibido na Figura 2.2.3.1.1.

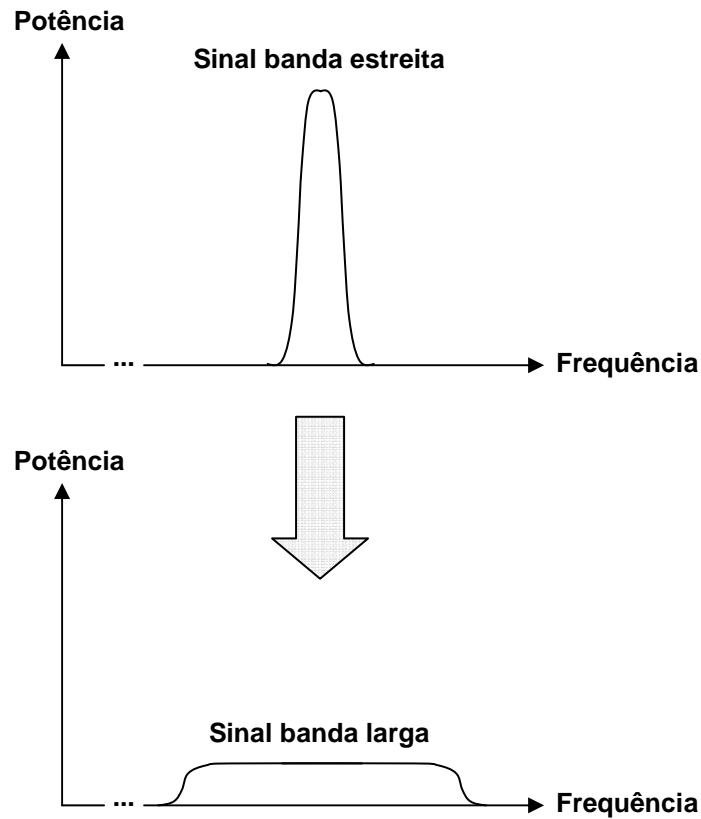


Figura 2.2.3.1.1 – Espalhamento espectral no CDMA-DS.

No CDMA-DS, os usuários são identificados por códigos e ocupam todo o espectro no mesmo instante de tempo. Assim, à medida que o número de acessos à rede aumenta, a intensidade total de potência em toda a banda é incrementada.

Nesta técnica são críticos o processo de admissão de usuários – novos acessos à rede implicam em aumento no piso de ruído – e o controle de potência – quanto maior o ruído, maior deve ser a potência dos transmissores, o que ocasiona mais ruído⁶. Bannister, Mather e Coope (2004, p. 28, tradução nossa) fazem uma relação:

⁵ Oespalhamento é obtido ao se combinar o sinal original com um código de alta taxa.

⁶ Um problema clássico relacionado ao controle de admissão e de potência no CDMA-DS é conhecido como *near-far* (perto-longe): Quanto mais longe do receptor, maior deve ser a potência do transmissor, o que aumenta o piso de ruído, fazendo com que os transmissores próximos ao receptor devam aumentar sua potência, o que gera mais ruído para os transmissores que estão longe do receptor (BANNISTER; MATHER; COOPE, 2004).

Uma analogia a esta idéia é uma festa, na qual todos os convidados estão conversando ao mesmo tempo. Em algum momento, com muitos convidados, o nível de ruído geral aumenta de tal maneira que nenhuma das conversas individuais pode ser escutada claramente.

2.3. Tipos de Comutação

As redes de telecomunicações podem ser classificadas quanto ao tipo de comutação – por circuito (CS – *Circuit Switch*) ou por pacote (PS – *Packet Switch*). No primeiro caso, estabelecem-se canais dedicados nos enlaces entre os nós de rede englobados no meio entre o transmissor e o receptor, durante todo o período da comunicação. Nota-se que este tipo de comutação é ineficiente, uma vez que o canal não é utilizado todo o tempo. Na comutação por pacote a informação a ser transmitida é dividida em pacotes, de tamanho fixo ou variável, compostos pelos dados a serem transmitidos acrescentados de cabeçalhos de controle. Nesta técnica o meio é ocupado pelos usuários apenas nos momentos em que estes possuam pacotes a serem trafegados.

A comutação por pacote pode ser dividida em duas técnicas – datagrama e circuitos virtuais. No primeiro caso, os pacotes são transmitidos independentemente, podendo cursar diferentes trajetos na rede, dependendo da utilização dos nós e enlaces. Neste tipo de aproximação os cabeçalhos contém, além das informações de roteamento, referências da seqüência do pacote, uma vez que, cursando diferentes caminhos, os dados podem chegar ao destino desordenadamente. No segundo caso, um circuito virtual é estabelecido e, uma vez iniciada a transmissão, todos os pacotes cursarão a mesma rota, possibilitando a diminuição do tamanho do cabeçalho.

As rotas do circuito virtual podem ser pré-configuradas entre os nós de modo a se manterem assim por longos períodos de tempo, caracterizando o circuito virtual permanente; ou a cada vez que for iniciada uma sessão de transmissão de informação, definindo o circuito virtual comutado (BANNISTER; MATHER; COOPE, 2004), conforme Figura 2.3.1.

2.4. Principais padrões de rede celular

Na década de 1960, o *Bell Laboratories* desenvolveu os conceitos de telefonia celular, e em meados da década de 1970, aparelhos radiotransmissores pequenos e confiáveis haviam sido

criados (RAPPAPORT, 2002). Em 1974, a *Federal Communications Commission* (FCC – Comissão Federal de Comunicações), agência reguladora norte-americana, alocou as faixas de 870MHz a 890MHz (*downlink*) e de 825MHz a 845MHz (*uplink*), subdivididas em 666 canais de 30khz, para a comunicação no sistema móvel celular. A *Bell Telephone Systems* realizou, então, os primeiros testes do AMPS. Em 1976, a empresa atendia aproximadamente 40.000 usuários nos Estados Unidos, sendo 55% destes habilitados a realizar chamadas diretamente, sem a necessidade de intermediários⁷ (LEE, 1997).

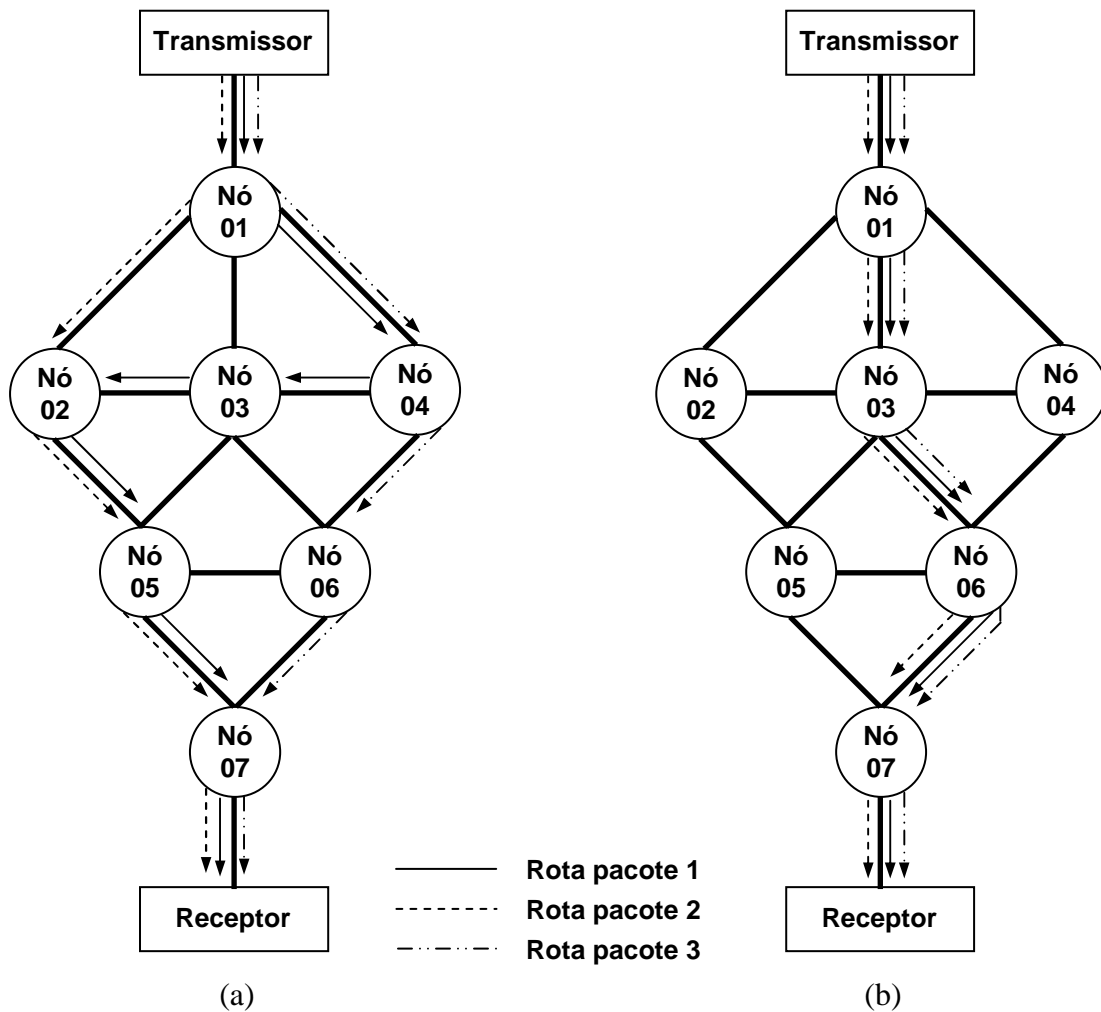


Figura 2.3.1 – Comutação por pacote de uma informação dividida em três pacotes nas técnicas (a) datagrama e (b) circuito virtual.

⁷ Nos Estados Unidos, o lançamento comercial do AMPS ocorreu apenas em 1984. Assim, a japonesa *Nippon Telephone and Telegraph* foi a primeira operadora a lançar comercialmente uma rede de telefonia celular. [WILLIAM C. Y. LEE]

Por ser um sistema analógico, o AMPS possui qualidade não satisfatória em diversas situações, além de problemas relativos à segurança da comunicação inerentes à tecnologia (BANNISTER; MATHER; COOPE, 2004). Tais redes utilizam técnica de duplexação FDD, acesso múltiplo FDMA e possuem capacidade para tráfego CS.

No início da década de 1990, foram instalados os primeiros sistemas digitais 2G nos Estados Unidos. O padrão *United States Digital Cellular* (USDC – Celular Digital Norte-Americano), conhecido como IS-54, possuía a vantagem de alocação de três usuários utilizando a mesma banda do AMPS, onde era possível alocar apenas um deles, com o uso da técnica híbrida TDMA e FDMA (RAPPAPORT, 2002). Este sistema digital possui técnica de duplexação FDD e capacidade para tráfego CS.

Posteriormente, operadoras norte-americanas adotaram o padrão IS-95, introduzido pela Qualcomm, baseado na técnica CDMA-DS. Neste sistema, que possui a vantagem de oferecer comunicação com menor SNR quando comparado ao TDMA, utiliza-se portadoras com largura de banda de 1,25MHz. O número de telefones celulares no país aumentou de 25 mil para 16 milhões em um período de 10 anos (1984 a 1994) (RAPPAPORT, 2002).

Na Europa, a 1G se destacou pela diversidade de padrões não compatíveis devido à utilização de diferentes faixas de frequências e protocolos. A maior parte das operadoras do continente, entretanto, adotou o GSM, que possuía o apelo de unificação de sistemas 2G. O primeiro país a lançar comercialmente uma rede GSM foi a Alemanha, em 1991 (LEE, 1997). No final da década de 1990, este era o padrão mais difundido na Europa.

O GSM possui canais com largura de 200kHz, onde são alocados até oito usuários por portadora, utilizando-se Codificadores / Decodificadores (CODECs – *Coders / Decoders*) *Full Rate* (FR – Taxa Plena). Este sistema possui, ainda, CODECs que aumentam a capacidade sem grandes degradações no *Mean Opinion Score* (MOS – Conceituação Média de Opiniões), os *Half Rates* (HR – Taxas Compactas), que possibilitam a alocação de até 16 usuários por portadora. Este padrão possui capacidade CS e PS, o último por meio do *General Packet Radio Service* (GPRS – Serviço Geral de Pacotes via Rádio) e do *Enhanced Data rates for Global Evolution* (EDGE – Taxas de Dados Melhoradas para a Evolução Global). As

faixas de frequência alocadas são 1800MHz⁸ e 900MHz, com técnica de duplexação FDD e acesso múltiplo híbrido TDMA e FDMA.

Sistemas 3G, caracterizados por oferecer alta velocidade na transmissão de dados, foram idealizados no final da década de 1990 e lançados comercialmente na primeira metade da década de 2000. Operadoras que utilizam a tecnologia 2G CDMA tendem a adotar o padrão CDMA-2000, baseado em um sistema multi-portadora⁹, e operadoras que utilizam o GSM tendem a adotar o *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS – Sistema Universal de Telecomunicações Móveis), com Acesso Múltiplo Banda Larga por Divisão de Códigos (WCDMA – *Wideband Code Division Multiple Access*) (BANNISTER; MATHER; COOPE, 2004).

O UMTS possui largura de banda por portadora de 5MHz e, além de canais FDD, que requerem espaço espectral para *uplink* e *downlink*, é possível optar pela utilização complementar de canais TDD, financeiramente menos onerosos por ocuparem uma menor banda, com a finalidade de garantir melhor *Quality of Service* (QoS – Qualidade do Serviço) aos usuários. Canais TDD podem variar a quantidade de tempo dedicada ao *downlink* e ao *uplink*, característica que se adapta ao tráfego assíncrono de dados, foco da 3G. Esta tecnologia possui capacidade CS, utilizada para tráfego de voz e vídeo-chamada; e PS (BANNISTER; MATHER; COOPE, 2004).

A especificação do UMTS prevê a execução de *handovers* com o GSM. Assim, operadoras tendem a optar pela utilização do GSM para tráfego de voz e do UMTS para dados, razão pela qual as redes devem co-existir, ao contrário do AMPS e do IS-54, que estão em processo de extinção devido ao surgimento de novas tecnologias.

Estudos para os sistemas de Quarta Geração (4G) estão em andamento. Nestas redes, almeja-se alcançar taxas equivalentes aos meios de transmissão guiados, na ordem de gigabits por segundo, com a utilização de técnicas de modulação mais sofisticadas, e com o uso do Acesso Múltiplo por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDMA – *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) como técnica de acesso. O *Third Generation Partnership Group* (3GPP – Grupo de Parceria da Terceira Geração), órgão responsável pela padronização do GSM e do

⁸ Nos Estados Unidos, 1900MHz.

⁹ Uma portadora CDMA-2000 (3,75MHz) equivale a três portadoras CDMA IS-95 (1,25MHz).

UMTS, possui em seu *roadmap* a evolução de tais redes para o *Long Term Evolution* (LTE – Evolução de Longo Prazo).

2.5. Topologia GSM CS

Os equipamentos GSM são agrupados em três subsistemas – o BSS, o Subsistema de Comutação (SS – *Switching Subsystem*) e o OSS – além da MS, conforme Figura 2.5.1.

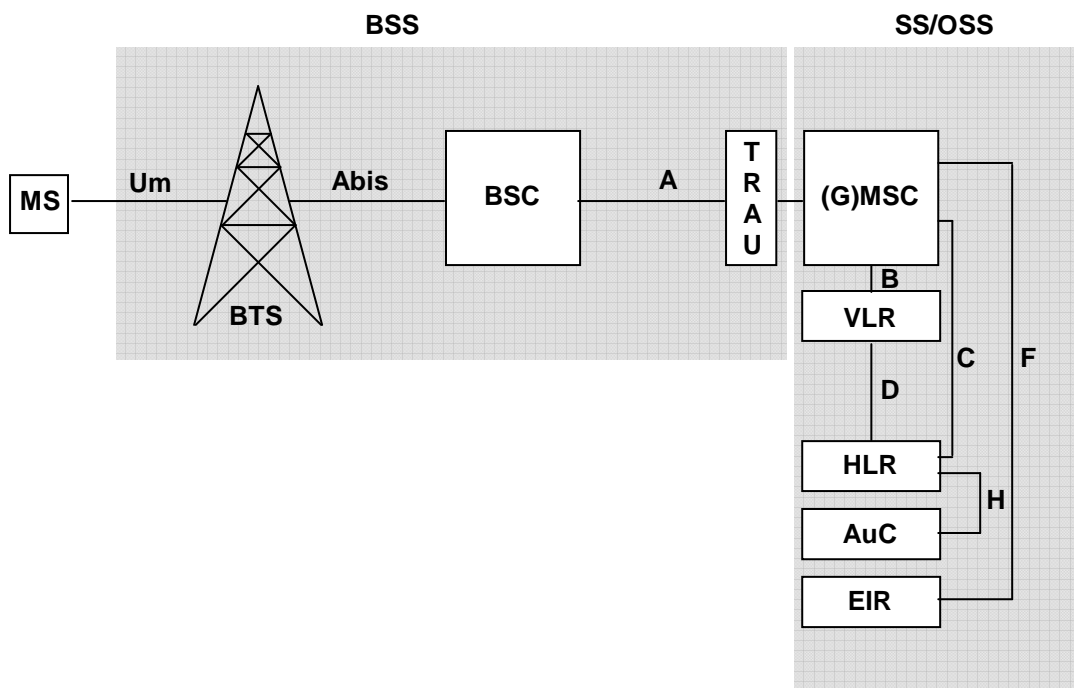


Figura 2.5.1 – Topologia GSM CS – BSS e SS.

A MS é composta por um Equipamento Móvel (ME – *Mobile Equipment*) e por um Módulo de Identidade do Assinante (SIM – *Subscriber Identity Module*). O ME, associado a uma Identidade Internacional do Equipamento Móvel (IMEI – *International Mobile Equipment Identity*) única, é utilizado pelos assinantes como dispositivo de acesso à rede e de conexão a outros equipamentos; enquanto o SIM, associado a uma Identidade Internacional do Assinante Móvel (IMSI – *International Mobile Subscriber Identity*) única, é utilizado para armazenar as informações do usuário necessárias para a sua identificação e para o acesso à rede, com os serviços contratados. Desta maneira, o GSM oferece a flexibilidade de utilizar diferentes MEs para acesso à rede, uma vez que as informações do assinante estão armazenadas no cartão SIM (EBERSPÄCHER; VÖGEL; BETTSTETTE, 2001).

2.5.1. BSS CS

O BSS CS é composto pela BTS, pela BSC e pela Unidade de Adaptação de Taxas e Transcodificação (TRAU – *Transcoder and Rate Adaptation Unit*).

A BTS, responsável pelo gerenciamento do enlace rádio, é composta por trxs, os quais são instalados em gabinetes que usualmente abrigam outros equipamentos, como duplexadores e bancos de baterias; e SIs, compostos por cabos, conectores e antenas. A quantidade de trxs varia conforme o número de setores e capacidade projetados. A setorização é um recurso utilizado na comunicação celular com a finalidade de melhorar a eficiência espectral da rede – ao invés de se instalar células com SIs que irradiam várias frequências em todas as direções, utiliza-se células com vários SIs direcionais que possibilitam a divisão dos canais em subgrupos, permitindo reusos mais flexíveis e em uma menor distância, conforme Figura 2.5.1.1.

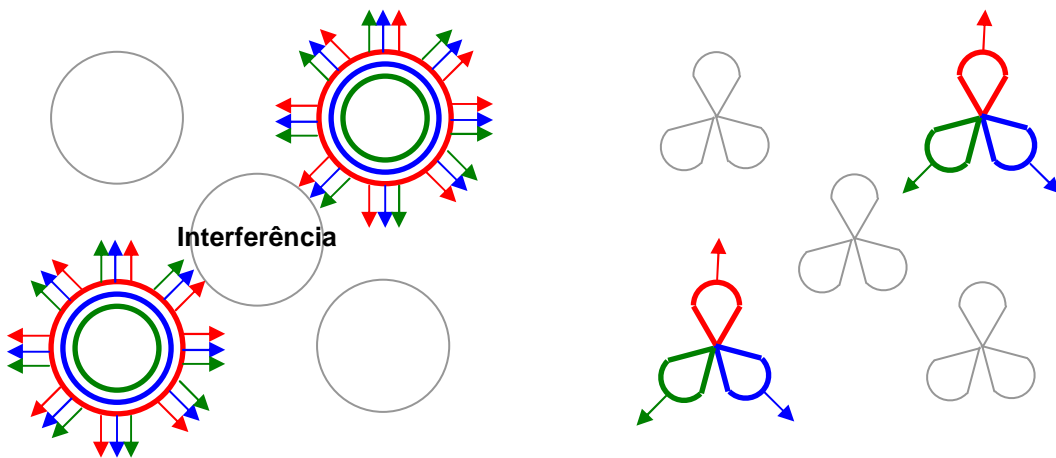


Figura 2.5.1.1 – Ganho em eficiência espectral por meio da utilização da setorização.

A identificação dos setores é dada pela Identidade Global do Setor (CGI – *Cell Global Identity*), composta pelo Código Móvel do País (MCC – *Mobile Country Code*), pelo Código Móvel da Rede (MNC – *Mobile Network Code*), pelo Código da Área de Locação (LAC – *Location Area Code*) e pela Identidade do Setor (CI – *Cell Identity*) (EBERSPÄCHER; VÖGEL; BETTSTETTE, 2001).

As BSCs são responsáveis pelo gerenciamento dos recursos rádio das BTSs que estão em seu domínio. Com base em medições recebidas via interface Abis, estes equipamentos são

capazes de realizar estatísticas e decidir a necessidade de realizar procedimentos como *handover* e alterações de potência. Os *softwares* instalados nas BSCs também permitem a manipulação de parâmetros e *features*, como o *frequency hopping*, além do gerenciamento do *status* dos elementos do BSS.

Considerada parte do BSS e originalmente planejada para ser alocada entre a BSC e a BTS, a TRAU é usualmente instalada junto à *Mobile Switching Center* (MSC – Central de Comutação Móvel) para economia de recursos na interface A. Este equipamento é responsável pela conversão dos canais com taxas de até 16kbps recebidos no enlace com a BSC para o padrão 64kbps cursado na Rede Pública de Telefonia Comutada (PSTN – *Public Switched Telephone Network*) e na Rede Integrada de Serviços Digitais (ISDN – *Integrated Services Digital Network*) (HEINE, 1999).

2.5.2. SS CS / OSS

O SS CS / OSS são compostos pela MSC, pelo Registro de Locação Base (HLR – *Home Location Register*), pelo Registro de Locação Visitante (VLR – *Visitor Location Register*), pelo Registro de Identidade de Equipamentos (EIR – *Equipment Identity Register*) e pelo Centro de Autenticação (AuC – *Authentication Center*).

A MSC é um nó de comutação que também é responsável pela alocação de recursos rádio durante o processo de acesso à rede, pela administração destes recursos e por realizar os procedimentos de *handover* inter-BSC¹⁰. Nota-se que mais de uma BSC pode ser afiliada a uma MSC, mas a configuração inversa não é possível. Quando uma MSC faz interface com redes externas, é denominada Centro de Comutação Móvel de Interconexão (GMSC – *Gateway Mobile Switching Center*). (BANNISTER; MATHER; COOPE, 2004).

O HLR é uma base de dados permanente responsável por armazenar informações administrativas, de localização¹¹ e de segurança¹² dos usuários, tais como IMSI e serviços disponíveis e inibidos.

¹⁰ *Handovers* entre BSCs diferentes. Quando ocorre entre BSCs afiliadas a diferentes MSCs, também é denominado inter-MSC.

¹¹ Em nível de VLR.

O VLR é uma base de dados usualmente associada a uma MSC, com informações temporárias dos móveis englobados em sua área. Enquanto o HLR armazena informações estáticas, o VLR possui informações dinâmicas, tais como a Identidade da Área de Locação (LAI – *Location Area Identity*)¹³ e a Identidade Internacional Temporária do Equipamento Móvel (TIMSI – *Temporary International Mobile Equipment Identity*)¹⁴ (HEINE, 1999).

O EIR é uma base de dados contendo as IMEIs dos MEs segregadas em três listas – branca, cinza e negra. A primeira delas possui a relação de MEs autorizados; a segunda daqueles que devem ser identificados por motivos diversos, como necessidade de atualização de *software*; e a terceira dos não autorizados, por razões como roubo (EBERSPÄCHER; VÖGEL; BETTSTETTER, 2001).

2.6. Canais Lógicos GSM CS

Os canais lógicos GSM CS na Interface Um são divididos em quatro grupos funcionais – *Traffic Channels* (TCHs – Canais de Tráfego), *Broadcast Channels* (BCHs – Canais de Difusão), *Common Control Channels* (CCCHs – Canais de Controle Comum) e *Dedicated Control Channels* (DCCHs – Canais de Controle Dedicados) (EBERSPÄCHER; VÖGEL; BETTSTETTER, 2001).

Os TCHs trafegam informação. No caso CS, podem ser classificados em FR ou HR. No caso PS, podem ser compartilhados por vários usuários, o que degrada sua utilização *multislot*.

Os BCHs são compostos por três canais unidirecionais, todos de *downlink* (BSS→MS): O *Frequency Correction Channel* (FCCH – Canal de Correção da Frequência), que consiste em uma senóide para ajuste de frequência na interface Um; o *Synchronization Channel* (SCH – Canal de Sincronização), que emite o identificador da Rede Móvel Terrestre Pública (PLMN – *Public Land Mobile Network*), o Código de Identificação da Estação Rádio-Base (BSIC –

¹² Pelo fato da interface H, entre o HLR e o AuC, não ter sido especificada com nível de detalhamento suficiente, estas bases são implementadas em conjunto. Assim, os *triplets* de autenticação, baseados em informações sigilosas, são calculados pelo HLR.

¹³ A LAI é composta pelo MCC, pelo MNC e pelo LAC e pode ser utilizada, por exemplo, para identificar o grupo de células no qual o assinante se encontra.

¹⁴ Por motivos de segurança, o VLR pode associar uma TIMSI ao ME, para que a IMSI, que é uma informação sigilosa, não seja trafegada na Interface Um.

Base Station Identity Code) e as informações de sincronização; e o *Broadcast Control Channel* (BCCH – Canal de Controle de Difusão), que contem a identidade do setor (LAI, CI), a configuração dos seus CCCHs e o *status* próprio e das vizinhas (intensidade de sinal) (BANNISTER; MATHER; COOPE, 2004; HEINE, 1999).

Os CCCHs são compostos por quatro canais unidirecionais: O *Random Access Channel* (RACH – Canal de Acesso Aleatório), único CCCH *uplink*¹⁵, utilizado pela MS para solicitação de um DCCH; o *Paging Channel* (PCH – Canal de *Paging*), pelo qual as MSs são informadas sobre chamadas entrantes; o *Access Granted Channel* (AGCH – Canal de Acesso Concedido), que informa a MS o *Standalone Control Channel* (SDCCH – Canal de Controle em Conexão Não-Ativa) ou o TCH que deverá ser utilizado nas chamadas; e o *Notification Channel* (NCH – Canal de Notificação), para informar as MSs sobre chamadas em grupo.

DCCHs são compostos por três canais bidirecionais: O SDCCH, requerido para trafegar sinalização durante o estabelecimento de chamadas, para a atualização das Áreas de Localização (LAs – *Location Areas*) e para tráfego do Serviço de Mensagens de texto Curtas (SMS – *Short Message Service*); o *Slow Associated Control Channel* (SACCH – Canal de Controle Associado Lento), utilizado para trafegar medições relativas às condições da Um, tais como relatórios de potência e sincronização; e o *Fast Associated Control Channel* (FACCH – Canal de Controle Associado Rápido), que consiste em um canal de sinalização que ocupa o espaço do TCH, gerando preempção¹⁶, utilizado em casos urgentes tais como procedimentos de *handover*. Adicionalmente, pode-se utilizar o *Cell Broadcast Channel* (CBCH – Canal de Broadcast do Setor), que permite a ativação do serviço de difusão de *short messages*. (BANNISTER; MATHER; COOPE, 2004; EBERSPÄCHER; VÖGEL; BETTSTETTER, 2001).

¹⁵ O acesso ao RACH é realizado pelo método *Slotted Aloha*, que consiste no acesso aleatório de MSs ao TS, o que pode ocasionar colisões – neste caso, aguarda-se um período aleatório de tempo para nova tentativa de acesso.

¹⁶ Preempção é o termo utilizado para denotar a interrupção do tráfego de um determinado canal para utilizar os recursos disponibilizados para transmitir outras informações prioritárias.

2.6.1. Chamada terminada em uma MS

Com a finalidade de exemplificar a utilização dos canais lógicos GSM CS, descreve-se nesta seção os procedimentos envolvidos no acesso com chamada terminada em uma MS. Considerar-se-á chamada entrante de rede externa.

Inicia-se o processo com a entrega da *Initial Address Message* (IAM – Mensagem Inicial de Endereçamento), que contém o MS-ISDN (número discado para o estabelecimento da comunicação) à GMSC.

A GMSC envia a requisição de *Routing Information* (RI – Informação de Roteamento) ao HLR, o qual possui os dados necessários para estabelecer a relação entre o MS-ISDN e a IMSI, além de identificar o VLR no qual a MS se encontra.

O HLR, então, envia ao VLR a requisição de um Número da Estação Móvel em *Roaming* (MSRN – *Mobile Station Roaming Number*), que é um número temporário associado à MS quando esta se encontra na área do VLR. Recebido o MSRN, o HLR envia à GMSC a RI contendo todas as informações necessárias para a solicitação de estabelecimento de chamada junto à MSC na qual a MS está alocada.

A GMSC, então, envia à MSC a IAM. A MSC, por sua vez, requer ao VLR a LA na qual a MS se encontra – LAs identificam grupos de setores dentro do VLR¹⁷. O VLR informa à MSC a LA, e esta envia um comando de *paging* ao BSS. Todas as MSs dentro da LA recebem este comando via PCH, na interface Um.

A MS na qual a chamada deve ser terminada responde via Um pelo RACH, informando o setor específico na qual está alocada e solicitando recursos para continuar o procedimento. O BSS envia, via AGCH, a mensagem de *Immediate Assignment*, informando o SDCCH no qual as transações de segurança, autenticação e *call setup* devem ser realizadas.

¹⁷ A definição dos setores contidos em uma LA objetiva o balanceamento de duas metas opostas – carga de *paging* e carga de atualizações de LAC. Quanto maior a LA, maior o número de *pagings* na área, o que pode inundar o PCH. Quanto menor a LA, maior o número de requisições para atualização de LAC, o que gera aumento no tráfego SDCCH, além do consumo excessivo da bateria do ME.

Após a alocação do TCH, a MS envia à MSC um alerta, informando que o estabelecimento do canal foi realizado com sucesso. A MSC, então, envia à GMSC a *Adress Complete Message* (ACM – Mensagem de Realização do Endereçamento). Posteriormente ao alerta, a MS envia à MSC uma solicitação de conexão. A MSC, então, envia à GMSC uma *Answering Message* (ANM – Mensagem de Resposta), e à MS uma autorização de conexão, estabelecendo, assim, a chamada (BANNISTER; MATHER; COOPE, 2004).

A Figura 2.6.1.1, apresenta o fluxo citado. Nela, os procedimentos 13 e 20 são realizados no SDCCH, enquanto 21, 23 e 15 utilizam o FACCH.

2.7. Handover no GSM

Define-se *handovers* como procedimentos de alteração do canal de comunicação para assegurar continuidade da chamada, os quais ocorrem devido a diversas causas. Eles são realizados de um TCH para outro TCH, ou de um SDCCH para outro SDCCH, ou seja, antes da alocação de um TCH. No último caso, o procedimento também é denominado *direct retry*.

Handovers são classificados como *intra-cell*, que ocorrem entre canais do mesmo setor; *intra-BTS*, entre setores do mesmo *site*; *intra-BSC*, entre setores contidos no domínio de uma mesma BSC; ou *inter-BSC*, entre setores de BSCs distintas. Nos três primeiros casos, a BSC é responsável pelo disparo, realização e gerenciamento dos *handovers*, enquanto no último, a MSC assume o processo.

As causas da inicialização deste procedimento podem ser basicamente classificadas em interferência, qualidade da chamada, nível de sinal, distância da MS à BTS¹⁸, condições de alterações bruscas do canal de rádio¹⁹, frequências distintas²⁰, balanceamento de tráfego e outras²¹.

¹⁸ Baseada no TA.

¹⁹ MSs virando quarteirão, entrando em ambientes construídos, em alta velocidade.

²⁰ Setores 900MHz e 1800MHz vizinhos ou setores dualizados (com BCCH 900MHz e TCHs 900MHz e 1800MHz).

²¹ Prioridade de serviço, prioridade de usuário, *inter-system* (entre GSM e UMTS), procedimentos de manutenção.

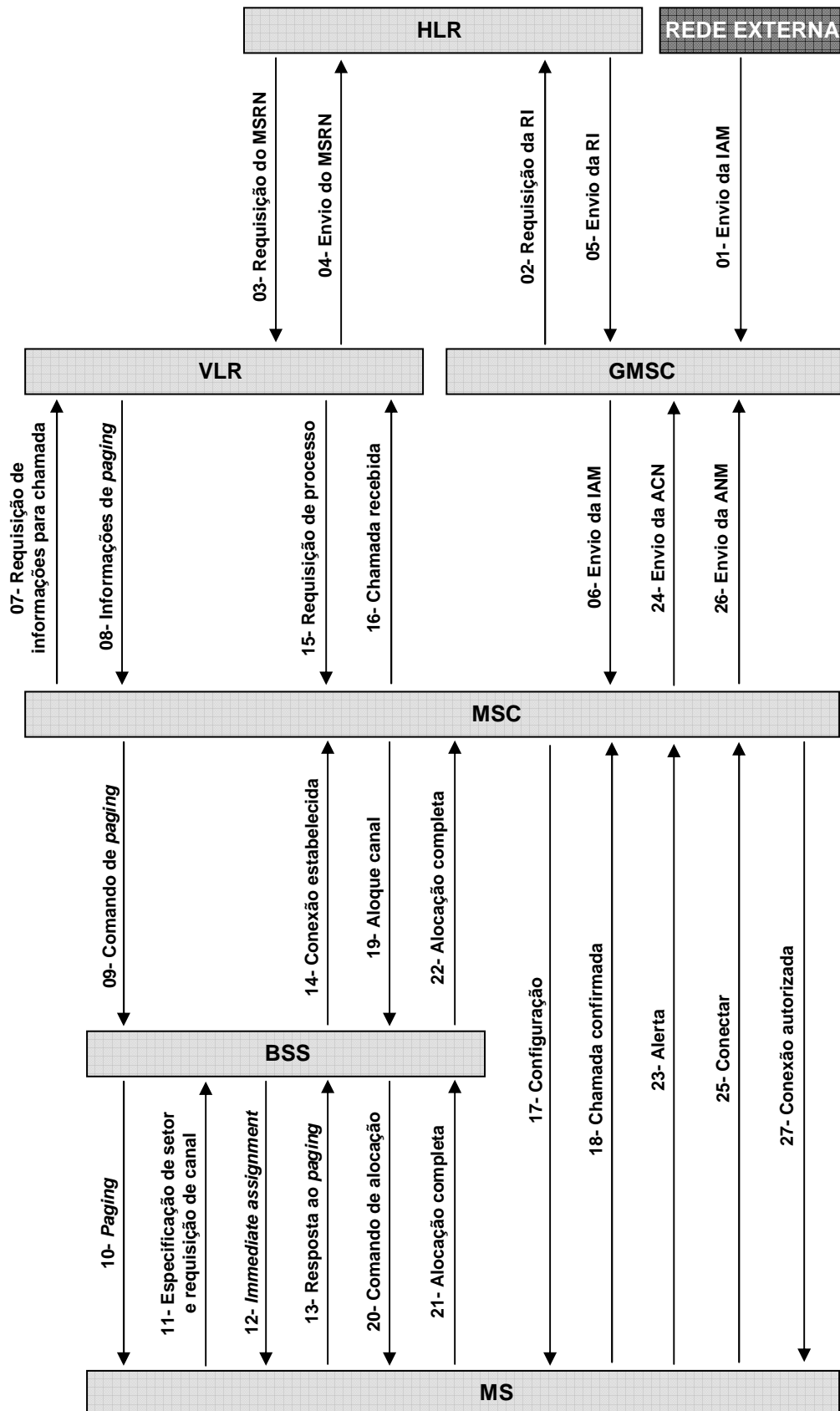


Figura 2.6.1.1 – Procedimentos de chamada de voz oriunda de rede externa e terminada em uma MS, omitidos processos de autenticação e segurança.

Para a realização dos *handovers*, as BTSs enviam relatórios de medições do enlace rádio com as MSs para as BSCs. Baseadas nestas informações, as BSCs verificam os limites de nível, qualidade e demais parâmetros, e priorizam os setores vizinhos, considerando suas cargas.

2.7.1. Procedimento de *handover* Inter-BSC Intra MSC

Com a finalidade de exemplificar o processo de *handover*, descreve-se nesta seção os procedimentos envolvidos quando este ocorre entre BSCs afiliadas a uma mesma MSC.

Inicia-se o processo com o envio de mensagens com as medições referentes à interface Um pelo móvel à BTS de origem. Com base na parametrização da rede, o BSS de origem verifica a necessidade de realização de *handover* e envia uma mensagem de *handover* requerido, a qual contém uma única célula ou uma lista de células candidatas, à MSC. A MSC, então, requer ao BSS de destino a alocação de recursos, disparada pela mensagem de *handover* requisitado.

Uma vez recebida pela MSC a mensagem de *handover* requisitado confirmado, esta inicia o procedimento para alocação de recursos do BSS de destino à MS, com o envio da mensagem de comando de *handover*.

A MS, então, envia a mensagem de acesso via *handover* ao BSS de destino, o qual verificará se esta está solicitando os recursos previamente acordados com a MSC. Em seguida, o BSS de destino envia uma mensagem de *handover* detectado à MSC, indicando que os recursos acordados foram os solicitados pela MS.

Uma vez que a MS estabeleceu conexão com o BSS de destino corretamente, esta envia uma mensagem de *handover* na interface aérea completo. O BSS de destino, então, envia uma mensagem de *handover* completo à MSC, que inicia a transação para liberar os recursos do BSS de origem os quais estavam inicialmente alocados à MS.

A Figura 2.7.1.1 apresenta todas as transações necessárias para a realização do *handover*. Nela, o procedimento 1 ocorre no SACCH, enquanto o 10, o 11 e o 14 utilizam o FACCH (ETSI, 2009).

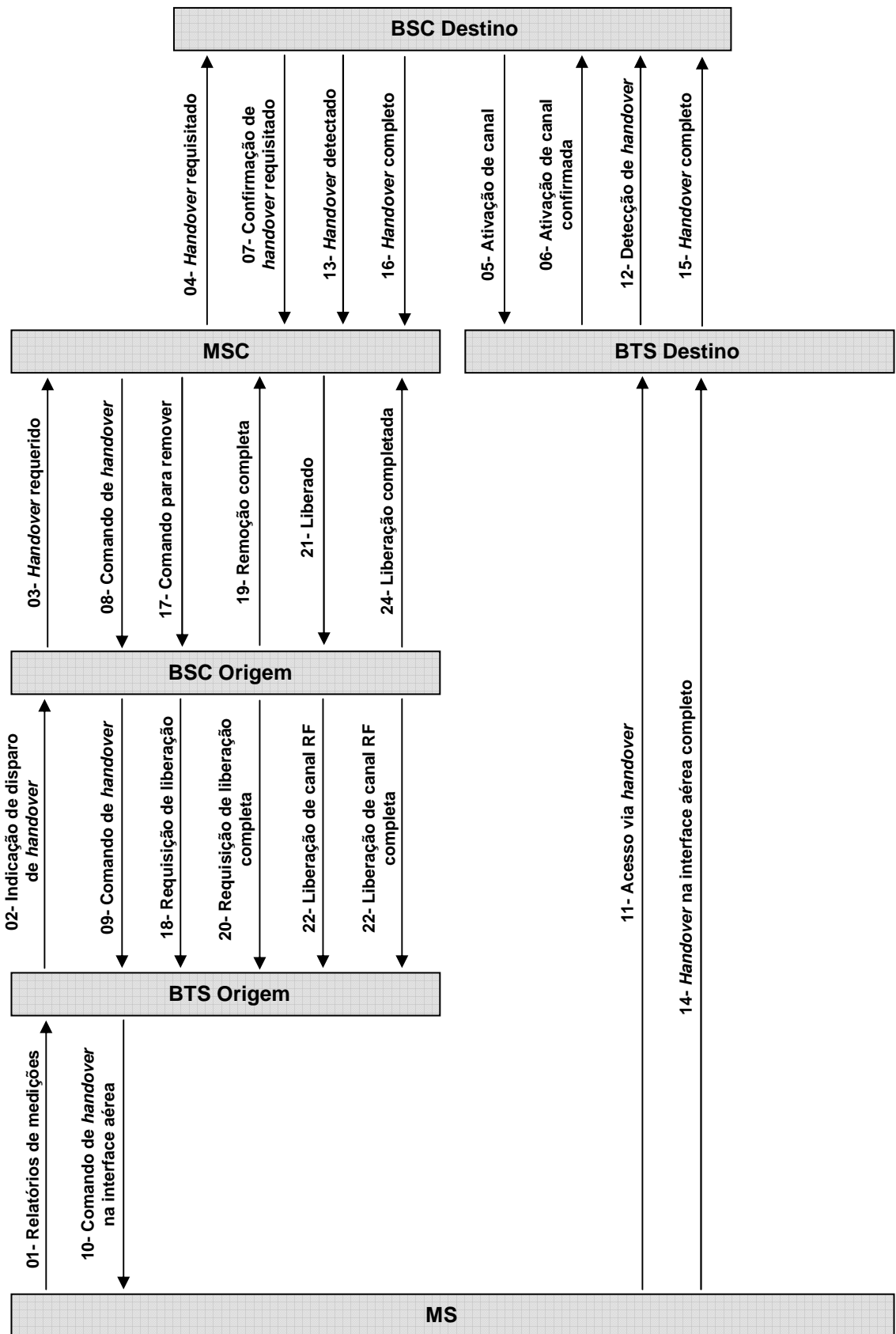


Figura 2.7.1.1 – Procedimentos *handover* inter BSC intra MSC.

2.8. Teoria de tráfego CS em redes FDMA e TDMA

Em 1909, Agner Krarup Erlang propôs em sua obra *The theory of probabilities and telephone conversations* (A teoria de probabilidades e conversações telefônicas), que chamadas entrantes na rede de telefonia são um processo de Poisson. Oito anos mais tarde, o matemático dinamarquês publicou o artigo *Solution of some problems in the theory of probabilities of significance in automatic telephone exchanges* (Solução de alguns problemas na teoria de probabilidades de significância para a comutação telefônica automática), onde definiu a distribuição de probabilidade de bloqueio e tempo de espera para chamadas telefônicas entrantes (ANTTALAINEN, 2003).

A teoria de tráfego em redes CS FDMA e TDMA se baseia nos estudos de Erlang, que foi homenageado com a unidade adimensional de tráfego que leva seu nome e representa a ocupação de um circuito durante o período de observação, convencionado em um hora.

A probabilidade de bloqueio, ou *Grade of Service* (GoS – Categoria do Serviço), para sistemas sem espera, foi descrita por Erlang como (ERLANG, 1918):

$$B = \frac{\frac{y^x}{x!}}{1 + \frac{y}{1!} + \frac{y^2}{2!} + \dots + \frac{y^x}{x!}}, \quad (2.8.1)$$

onde x denotava o número de linhas por grupo de comutadores e y o número de chamadas por unidade, ou intensidade de tráfego. Em redes celulares, x representa o número de canais disponíveis no setor e, atualmente, y é definido como o tráfego. Tornou-se comum utilizar a notação apresentada em (2.8.2):

$$B_x = \frac{\frac{y^x}{x!}}{\sum_{i=0}^x \frac{y^i}{i!}}, \quad (2.8.2)$$

2.9. Indicadores de qualidade GSM CS

Indicadores de qualidade são utilizados para assegurar uma boa percepção ao cliente perante a rede instalada. Na interface Um podem ser divididos em acesso, retenção, mobilidade, enlace de rádio e capacidade. Fornecedores possuem diferentes contadores que possibilitam o estabelecimento de diversas fórmulas para a definição de cada um dos indicadores contidos nos grupos mencionados.

Indicadores podem ser definidos de maneira abrangente ou específica. Usualmente se procura observar o comportamento dos indicadores gerais e, caso identificada alguma alteração em seu comportamento, busca-se a causa em indicadores específicos ou em contadores.

Indicadores específicos de acesso podem ser definidos como a taxa de desconexão em SDCCHs durante o *call setup* e a taxa de sucesso no estabelecimento de TCHs, entre outros; um indicador geral pode ser conceituado como a razão da quantidade total de chamadas estabelecidas com sucesso pela quantidade total de solicitações de estabelecimento de chamadas. Da mesma maneira, existem indicadores específicos de retenção, como quedas de chamadas devido a TA excedido, má qualidade e nível de sinal; de mobilidade, como percentual de *handovers* intra-BSC e inter-BSC que ocorreram com sucesso; de enlace rádio, como intensidade de sinal *uplink* e estimativas da qualidade da chamada; e de capacidade, como o tempo de congestionamento em SDCCHs, o tempo de congestionamento em TCHs e o tempo médio de utilização dos TCHs.

Nota-se que alguns indicadores podem ser classificados em mais de um grupo. O número de quedas de chamadas por falha de *handover*, por exemplo, pode ser classificado em retenção ou mobilidade – nesta pesquisa é considerado mobilidade; a quantidade de *handovers* intra-*cell* pode ser classificada em mobilidade ou enlace rádio – neste texto é considerada enlace rádio, por ser altamente relacionada a interferências.

Na pesquisa são tratados indicadores gerais de retenção e mobilidade conforme equações 2.9.1 e 2.9.2, respectivamente.

$$PQC = \frac{NQC}{NCE}, \quad (2.9.1)$$

onde PQC é o percentual de quedas de chamadas, NQC é o número de quedas de chamadas, excluindo a causa *handover*, e NCE o número de chamadas estabelecidas, e

$$PSH = \frac{NHR_{INTRA} + NHR_{INTER}}{NTH_{INTRA} + NTH_{INTER}}, \quad (2.9.2)$$

onde PSH é o percentual de sucesso de *handover*, NHR_{INTRA} o número de *handovers* intra-BSC realizados, NHR_{INTER} o número de *handovers* inter-BSC realizados, NTH_{INTRA} o número de tentativas de *handover* intra-BSC e NTH_{INTER} o número de tentativas de *handover* inter-BSC.

2.10. Considerações finais

Neste capítulo se abordou os tópicos básicos para a compreensão do GSM, padrão 2G FDD com técnica de acesso múltiplo híbrida TDMA e FDMA, e capacidade para tráfego CS e PS.

Observa-se que a interface Um possui canais específicos para cada tipo de transação. Assim, apresentou-se a aplicação de uma variedade destes em exemplos de procedimentos de acesso à rede e de *handover*. Na pesquisa, baseia-se a modelagem e estimação de tráfego de voz no volume cursado em TCHs, canais que podem sofrer preempção em procedimentos de urgência, como *handover*.

Introduziu-se também neste capítulo os conceitos relacionados à teoria de tráfego e de indicadores de qualidade, os quais são usados pelas operadoras no monitoramento das redes. Nesta pesquisa, utilizou-se os indicadores gerais de taxas de quedas de chamadas e de sucesso de *handover* para a verificação da aplicabilidade dos gráficos de controle de Shewhart no acompanhamento de desempenho.

O próximo capítulo aborda a modelagem utilizada para a descrição da série de tráfego, bem como para a previsão de seus valores futuros, e os tópicos relativos aos gráficos de controle de Shewhart.

3. FERRAMENTAL TEÓRICO: MODELAGEM MATEMÁTICA E CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSOS

Fundamenta-se na primeira parte do capítulo a base para a análise e para a estimação de parâmetros da série temporal de tráfego, fomentada por uma breve introdução à identificação de sistemas, pela definição dos modelos ARIMA, e pela exposição da modelagem utilizada para a implementação da previsão da série. Apresentam-se na segunda parte do capítulo os gráficos de controle de Shewhart, utilizados para a avaliação do comportamento de indicadores estatísticos de qualidade. Conceitos estatísticos básicos não abordados neste capítulo estão contidos no Anexo 1. Sempre que necessária a verificação da hipótese de normalidade, utilizou-se o teste de Lilliefors, descrito no anexo referenciado.

3.1. Análise de séries temporais

Um dos objetivos da análise de séries temporais é a previsão de valores futuros, a qual é abordada neste texto. Este processo envolve a escolha de uma classe geral de modelos, a identificação de um modelo específico, a estimação dos seus parâmetros, e sua validação (MORETTIN; TOLOI, 2004).

3.1.1. Motivação

Os dados de tráfego são usualmente gerados em granularidade horária, sendo que alguns fornecedores os disponibilizam a cada quinze minutos. Conforme se explicará na seção 3.2.1, adotou-se a amostragem na HMM diária. A Figura 3.1.1.1 apresenta um exemplo da série temporal a ser analisada.

Conforme se pode observar, a série é não estacionária, com tendência, ou seja, seus valores não oscilam em torno de uma média constante. Além disto, os dados apresentam características sazonais onde se observa, por exemplo, dois vales que ocorrem a cada sete amostras, indicando a diminuição de tráfego típica de finais de semana (sábado e domingo). Tais vales são também usualmente precedidos ou sucedidos pelo maior valor que ocorre no ciclo de sete dias, expondo a HMM semanal, que geralmente ocorre nas sextas-feiras ou segundas-feiras.

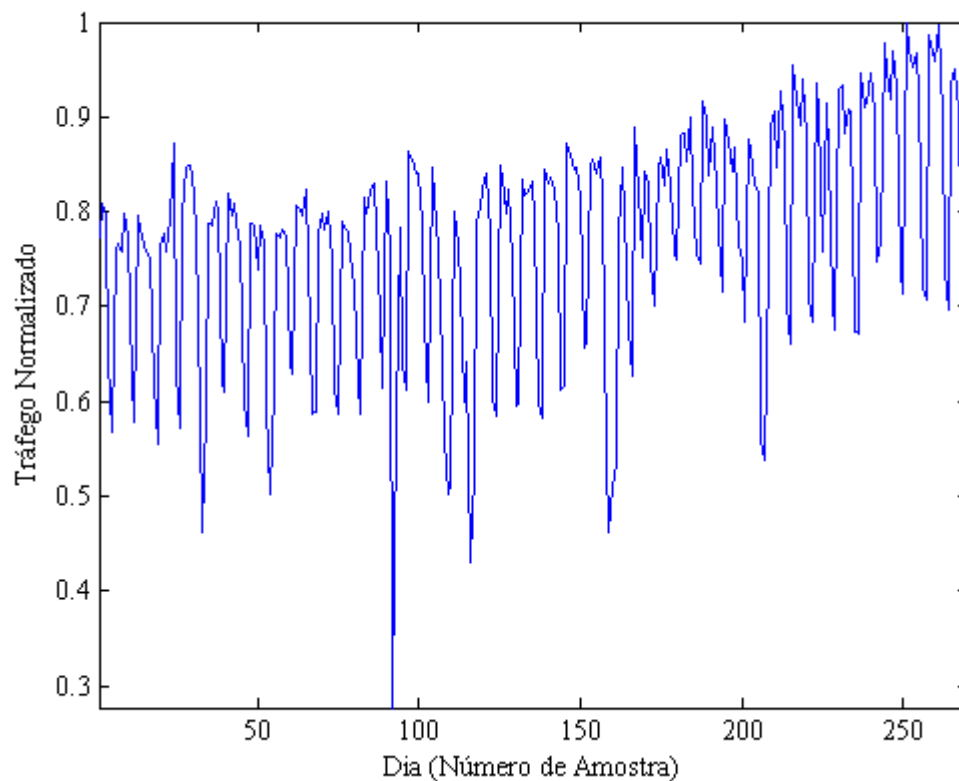


Figura 3.1.1.1 – Exemplo de série temporal de tráfego na HMM diária.

Como também se pode visualizar, apesar das características determinísticas presentes na massa, esta também possui componentes estocásticos, intrínsecos à origem da geração das informações – a aleatoriedade com que chamadas são realizadas e o tempo de duração destas.

O objetivo é, portanto, a descrição da série por meio de um modelo que a explique com base nos seus valores passados, que seja flexível para a inserção de componentes estocásticos, e que seja abrangente no sentido de englobar a descrição da tendência. A classe geral de modelos ARIMA, adotada nesta pesquisa, supre todas estas premissas, desde que o fenômeno observado seja gerado por um sistema linear no tempo (BOX; JENKINS; REINSEL, 2008).

Deve-se observar que outras classes gerais, tais como redes neurais e neuro-fuzzy, podem ser aplicáveis ao problema, gerando eventualmente bons resultados, desde que o problema da não-estacionariedade seja contornado. A utilização dos modelos ARIMA, entretanto, possui a vantagem de menores requerimentos de recursos computacionais, com maior facilidade de implementação, sendo, portanto, outro motivo para a escolha do estudo deste nesta pesquisa.

3.2. Modelos ARIMA

Conforme exposto na seção 3.1, escolheu-se a classe geral de modelos ARIMA uma vez que a série possui componentes determinísticos, que a explicam por meio dos seus valores passados, e estocásticos, pela aleatoriedade intrínseca à natureza do processo, além de tendência e sazonalidade.

Por definição, modelos ARIMA são uma classe de modelos paramétricos de erros para séries temporais não estacionárias homogêneas (MORETTIN; TOLOI, 2004). Destacam-se os modelos Auto-regressivo (AR – *Autoregressive*) e o de Médias Móveis (MA – *Moving Average*) como casos particulares para a modelagem de séries estacionárias.

O modelo AR genérico de ordem p , denominado AR(p), é dado na forma de equações de diferenças por:

$$Z_t = \varphi_1 Z_{t-1} + \varphi_2 Z_{t-2} + \dots + \varphi_p Z_{t-p} + a_t, \quad (3.2.1)$$

onde Z_t é a série temporal, φ_i os $i=1, 2, \dots, p$ parâmetros do modelo e a_t a componente aleatória.

Seja o operador translação para o passado:

$$B^m Z_t = Z_{t-m} \quad (3.2.2)$$

O modelo AR (p) pode, então, ser reescrito como:

$$\varphi(B)Z_t = a_t, \quad (3.2.3)$$

onde $\varphi(B) = 1 - \varphi_1 B - \varphi_2 B^2 - \dots - \varphi_p B^p$.

De forma análoga, o modelo MA genérico de ordem q , denominado MA(q), é dado na forma de equações de diferenças por:

$$Z_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (3.2.4)$$

Considerando (3.2.2), pode-se reescrevê-lo como:

$$Z_t = \theta(B)a_t, \quad (3.2.5)$$

onde $\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$.

A partir de (3.2.3) e (3.2.5), pode-se construir um modelo Auto-regressivo de Médias Móveis (ARMA – *Autoregressive Moving Average*) de ordem (p,q), denominado ARMA(p,q):

$$\varphi(B)Z_t = \theta(B)a_t, \quad (3.2.6)$$

ou, na forma de equações de diferenças:

$$Z_t = \varphi_1 Z_{t-1} + \varphi_2 Z_{t-2} + \dots + \varphi_p Z_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (3.2.7)$$

A classe de modelos ARMA possui a restrição de aplicabilidade em séries com tendência. Estes modelos, entretanto, são um caso particular dos modelos ARIMA (p,q,d) (BOX; JENKINS; REINSEL, 2008), cuja formulação pode ser verificada a seguir:

$$\varphi(B)\Delta^d Z_t = \theta(B)a_t, \quad (3.2.8)$$

onde Δ^d representa o número de diferenças necessárias para tornar a série Z_t estacionária.

3.2.1. Identificação do modelo e estimação dos parâmetros

A etapa inicial do processo de identificação envolve basicamente a verificação da amostragem, da sazonalidade, de tendências e a análise de autocorrelações.

A série de tráfego original, obtida por amostras horárias, apresenta, além das relações com amostras de dias, de semanas e de meses anteriores, características de oscilação diária, conforme se pode observar na Figura 3.2.1.1 (janela de uma semana).

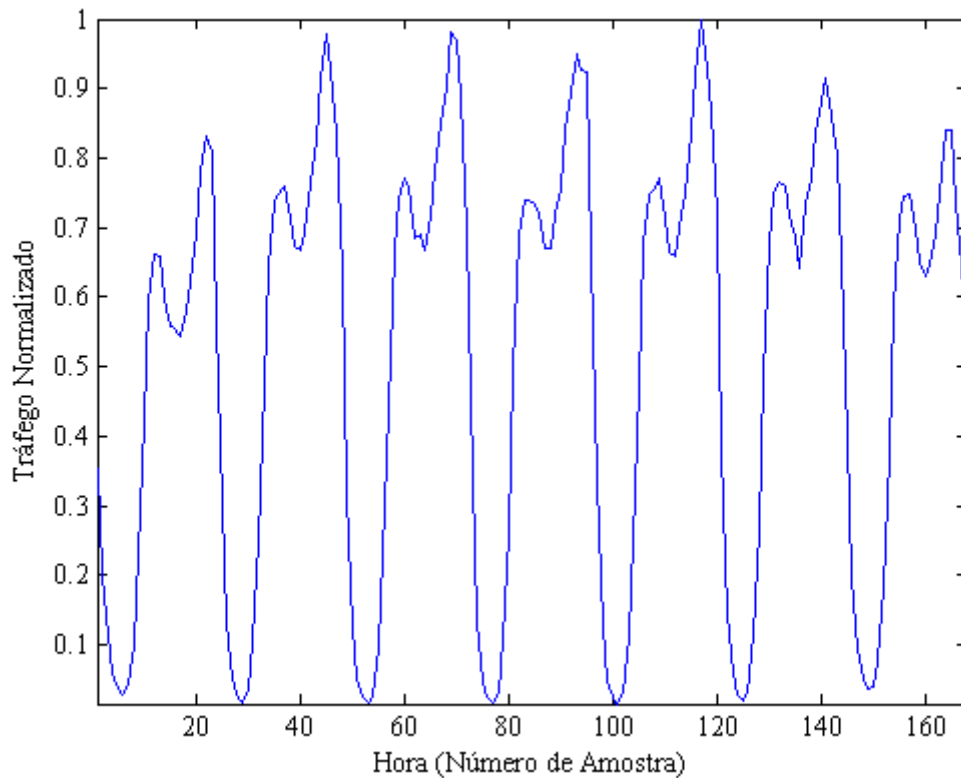


Figura 3.2.1.1 - Exemplo de série temporal de tráfego horário, janela de uma semana.

Nota-se que o tráfego de voz possui valores elevados ao longo do dia e início da noite, sendo reduzido no período da madrugada. Esta oscilação não é relevante para fins de projeto de capacidade, uma vez que se deve modelar o comportamento nos horários de alto tráfego. Além disto, dificilmente se obteria um modelo que abranja tanto as oscilações horárias quanto as que ocorrem em períodos mais espaçados. Portanto, seria necessário decimar a série de forma que as amostras sejam representativas, mas não frequentes o suficiente a ponto de malcondicionar o modelo (AGUIRRE, 2007). Por meio de experimentos, notou-se que as amostras nas HMMs diárias suprem tais expectativas – amostragens na HMM semanal e mensal geraram relativamente poucos pontos, cujas previsões não são precisas quando comparadas à HMM diária. Assim, baseou-se a escolha da amostragem no conhecimento em torno do problema e em experimentos, e não inteiramente nas técnicas fundamentadas na teoria da informação de Nyquist e de Shannon, pois as mesmas poderiam levar a resultados

não confiáveis, em função da impossibilidade de obtenção de determinadas informações a priori, no caso mencionado, a componente de maior frequência do sistema.

Os modelos ARIMA recebem a denominação “Integrados”, uma vez que no início do processo se toma a diferença da série com a finalidade de se eliminar a tendência, e no final, se somam os valores, em uma operação discreta que remete à integração em tempo contínuo (MORETTIN; TOLOI, 2004).

A estrutura específica do modelo, no caso da classe geral ARIMA, consiste na definição da sua ordem. Os parâmetros p e q especificam as ordens relativas às partes autorregressiva e de médias móveis, respectivamente.

A ordem dos modelos pode ser obtida a partir de métodos parsimoniosos (BOX; JENKINS; REINSEL, 2008), como pelo uso do critério de informação de Akaike (AKAIKE, 1974), que consiste em uma equação que penaliza o incremento de graus de liberdade pela diminuição da variância (AGUIRRE, 2007):

$$AIC(n) = N \left\{ \ln \left[\sigma_{\xi}^2(n) \right] \right\} + 2N, \quad (3.2.1.1)$$

onde n é o número de parâmetros em análise, $\sigma_{\xi}^2(n)$ a variância dos resíduos para a quantidade n de parâmetros em análise, e N a quantidade de dados.

Outros métodos similares, como o critério de informação de Bayes e o *final prediction error* (erro final de predição), também são comumente utilizados (AGUIRRE, 2007).

Neste problema, determinou-se a ordem p do modelo por meio dos lags da FAC amostral que ultrapassam o intervalo de confiança (MORETTIN; TOLOI, 2004). Apesar de usualmente se especificar modelos cuja ordem seja baixa (MORETTIN; TOLOI, 2004), inclusive pela premissa de se desenvolver modelos parsimoniosos, a massa de dados possui características sazonais que resultaram em ordens elevadas, com atrasos como ~7, ~15, ~30 e ~45, indicando a relação semanal, quinzenal e mensal existente. Verificou-se por meio de testes que a redução da ordem gera resultados não satisfatórios. Além disto, pelo fato de N ser relativamente grande, a redução da variabilidade compensa o incremento da ordem.

Realizou-se a estimação dos parâmetros com o uso do método dos mínimos quadrados. O modelo, portanto, é composto pelos parâmetros estimados e pelo erro, minimizado com base no método citado. O Anexo 1 traz informações em maior detalhe a respeito dos mínimos quadrados.

3.2.2. Algoritmo de estimação e de previsão implementado

A estimação convencional de parâmetros dos modelos ARIMA consiste em se tomar as diferenças da série e eliminar seu nível; posteriormente se estima os parâmetros auto-regressivos e, a partir dos resíduos deste, a parte de médias móveis, obtendo-se, portanto, o modelo ARIMA (p, q, d) (MORETTIN; TOLOI, 2004). Com base no exposto, o algoritmo desenvolvido consiste nos seguintes passos:

1. Leitura da série temporal original Z_t na janela de estimação (N=210 valores).
2. Tomada das diferenças da série Z_t com *lag* igual a 35, gerando a série W_t (N-d valores, d=35).
3. Extração da média da massa W_t , gerando \tilde{W}_t , eliminando, portanto, o nível de W_t .
4. Obtenção da parte auto-regressiva do modelo:
 - a. Cálculo dos coeficientes de autocorrelação, sendo que se utilizou os atrasos daqueles que se encontravam acima do intervalo de confiança como índices dos coeficientes da parte auto-regressiva.
 - b. Geração da matriz \tilde{W}_t^{AR} (N-d- $p_{\text{máx}}$ x $p_{\text{máx}}$ valores), composta pelos valores de \tilde{W}_t em cada um dos p atrasos.
 - c. Adaptação do tamanho do vetor \tilde{W}_t para possuir N-d- $p_{\text{máx}}$ valores de atraso 0.
 - d. Cálculo do vetor de parâmetros autorregressivos ϕ (tamanho p) por meio do método dos mínimos quadrados:

$$\phi = \left[\tilde{W}_t^{AR} \left\{ \text{Transposta} \right\} \tilde{W}_t^{AR} \right] \tilde{W}_t^{AR} \left\{ \text{Transposta} \right\} \tilde{W}_t.$$
 - e. Cálculo do vetor a_t (N-d- $p_{\text{máx}}$ x $p_{\text{máx}}$ valores): $a_t = \tilde{W}_t - \tilde{W}_t^{AR} \phi$.
5. Obtenção da parte de médias móveis do modelo:

- a. Geração da matriz a_t^{MA} ($(N-d-p_{máx}-q_{máx} \times q_{máx})$ valores), composta pelos valores de a_t em cada um dos q atrasos.
 - b. Adaptação do tamanho do vetor a_t para possuir $N-d-p_{máx}-q_{máx}$ valores de atraso 0.
 - c. Cálculo do vetor de parâmetros de médias móveis θ (tamanho q) por meio do método dos mínimos quadrados: $\theta = \left[a_t^{MA \{Transposta\}} a_t^{MA} \right] a_t^{MA \{Transposta\}} a_t$.
6. Geração das matrizes do modelo ARMA:
- a. Adaptação da matriz \tilde{W}_t^{AR} , para que possua $N-d-máx(p_{máx}, q_{máx}) \times p_{máx}$ valores.
 - b. Adaptação da matriz a_t^{MA} , para que possua $N-d-máx(p_{máx}, q_{máx}) \times q_{máx}$ valores.
 - c. Geração da matriz de dados \tilde{W}_t^{ARMA} , de tamanho $N-d-máx(p_{máx}, q_{máx}) \times q_{máx}+p_{máx}$, composta pelas matrizes \tilde{W}_t^{AR} e a_t^{MA} .
 - d. Geração da matriz de parâmetros estimados $\hat{\Theta}$, de tamanho n_p+n_q , composta pelos vetores φ e θ .
7. Cálculo de $\hat{\tilde{W}}_t$: $\hat{\tilde{W}}_t = \tilde{W}_t^{ARMA} \hat{\Theta}$ para efeito de comparação com \tilde{W}_t .
8. Geração da matriz de variância dos estimadores:
- $$\left[\tilde{W}_t^{ARMA \{Transposta\}} \tilde{W}_t^{ARMA} \right]^{-1} \text{var} \left(\tilde{W} - \hat{\tilde{W}} \right).$$
9. Estimação de valores futuros \hat{Z}_t (horizonte de previsão=60 amostras) por meio de simulação livre, para comparação na janela de validação.
10. Verificação dos resíduos $(Z_t - \hat{Z}_t)$, por meio da aplicação do teste de Lilliefors.

Com a finalidade de simplificar a implementação de uma rotina genérica para a previsão de valores futuros de modelos ARIMA (p,q,d), conforme item 8, deduziu-se equações em forma de somatórios.

Considerando o operador translação para o passado, (3.2.8) pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} & \left(1 - \varphi_1 B^1 - \varphi_2 B^2 - \varphi_3 B^3 - \dots - \varphi_p B^p\right) \left(1 - B^1 - B^2 - B^3 - \dots - B^d\right) Z_t = \\ & = \left(1 - \theta_1 B^1 - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3 - \dots - \theta_q B^q\right) a_t \end{aligned} \quad (3.2.2.1)$$

Expandindo a primeira parte de (3.2.2.1), obtém-se:

$$\begin{aligned} & \left(1 - B^1 - B^2 - B^3 - \dots - B^d + \right. \\ & - \varphi_1 B^1 + \varphi_1 B^2 + \varphi_1 B^3 + \varphi_1 B^4 + \dots + \varphi_1 B^{d+1} \\ & - \varphi_2 B^2 + \varphi_2 B^3 + \varphi_2 B^4 + \varphi_2 B^5 + \dots + \varphi_2 B^{d+2} \\ & - \varphi_3 B^3 + \varphi_3 B^4 + \varphi_3 B^5 + \varphi_3 B^6 + \dots + \varphi_3 B^{d+3} \\ & \vdots \\ & \left. - \varphi_p B^p + \varphi_p B^{1+p} + \varphi_p B^{2+p} + \varphi_p B^{3+p} + \dots + \varphi_p B^{d+p}\right) Z_t = \\ & = \left(1 - \theta_1 B^1 - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3 - \dots - \theta_q B^q\right) a_t \end{aligned} \quad (3.2.2.2)$$

(3.2.2.2) pode, então, ser reescrita na forma de somatórios:

$$\left(1 - \sum_{i=1}^d B^i - \sum_{j=1}^p \varphi_j B^j + \sum_{j=1}^p \sum_{i=j+1}^{d+j} \varphi_j B^i\right) Z_t = \left(1 - \sum_{k=1}^q \theta_k B^k\right) a_t \quad (3.2.2.3)$$

Assim, a previsão de valores futuros em dado passo h é:

$$\left(1 - \sum_{i=1}^d B^i - \sum_{j=1}^p \varphi_j B^j + \sum_{j=1}^p \sum_{i=j+1}^{d+j} \varphi_j B^i\right) Z_{t+h} = \theta_0 + \left(1 - \sum_{k=1}^q \theta_k B^k\right) a_{t+h} \quad (3.2.2.4)$$

Onde o termo θ_0 representa o nível da série após se tomar as diferenças, sendo o responsável pelo surgimento de inclinação na série prevista (MORETTIN; TOLOI, 2004). Deve-se observar que para $h > k$, a_{t+h} deve ser obtido por meio de um valor extraído aleatoriamente de uma distribuição normal com a mesma média e desvio padrão de a_t .

3.2.3. Validação

Para a validação do modelo, utiliza-se uma janela onde não se introduzem os valores reais da série como parâmetro de entrada, sendo estes usados apenas para efeito de comparação.

Realizou-se a determinação dos valores da série na janela de validação por meio de simulação livre, ou seja, a predição de valores futuros se baseia em um vetor composto pelas simulações passadas. Utilizou-se este tipo de simulação pois, quando comparadas às de k passos à frente, elas possuem melhor capacidade de expor deficiências na explicação da dinâmica dos sistemas (AGUIRRE, 2007).

A análise de resíduos, finalmente, consiste na verificação da aleatoriedade destes. Notadamente, caso o modelo consiga descrever a dinâmica do sistema, os resíduos possuirão apenas o que não se pode explicar, devendo, portanto, possuir espectro branco, com autocorrelação nula para todo *lag* diferente de zero. Outra maneira de se verificar a aleatoriedade do ruído é pelo teste de Lilliefors, abordado no Anexo 1.

Previsões eficientes da série temporal na HMM diária são essenciais para a estimação da capacidade futura sendo, portanto, um suporte efetivo na determinação da necessidade de inserção de novos elementos de rede, bem como um subsídio para a verificação da possibilidade de otimização, por meio da redistribuição de recursos, que em nível de setores pode consistir no remanejamento de trxs e balanceamento lógico de tráfego (como por revisões nos limites de *handover*, devendo-se observar a possibilidade de se gerar degradação da rede em alguns casos), e em nível de BSC, com a refiliação de *sites*, por exemplo.

Realizou-se a verificação da eficácia das predições de duas maneiras: pela verificação do Erro Quadrático Médio (EQM), dado pela Equação 3.2.3.1, medida usualmente aplicada para este fim; e por meio da diferença das médias das quatro maiores HMMs diárias, medidas e previstas. Introduziu-se esta última medida pelo fato de se utilizar o tráfego neste horário para se desenvolver o projeto de capacidade. Tomou-se a média de quatro valores pois, caso se utilize apenas um deles, pode-se malcondicionar a avaliação com eventuais picos esporádicos, os quais são diluídos ao se realizar o procedimento proposto.

$$\text{EQM} = \frac{\sum_{i=1}^h [Z_{t(i)} - \hat{Z}_{t(i)}]^2}{h}, \quad (3.2.3.1)$$

onde \hat{Z}_t é o tráfego normalizado estimado por meio do modelo ARIMA.

A modelagem desenvolvida neste estudo considerou todos os dias da semana, inclusive sábados e domingos, que usualmente possuem baixo tráfego. Em uma abordagem simplista do assunto, poder-se-ia eliminar as medições dos finais de semana (e feriados) e se realizar a modelagem e previsão apenas com as informações referentes aos dias úteis, o que teoricamente seria aplicável ao projeto da maior parte dos elementos de rede. Entretanto, não se pode realizar esta simplificação em alguns casos particulares, como em setores que atendem áreas turísticas (cidades históricas, cidades litorâneas, etc.), uma vez que estas tendem a ter incremento de tráfego em finais de semana e feriados, especialmente em períodos de férias escolares. Além disto, tal simplificação suprime a caracterização do tráfego em períodos de baixa utilização, quando a ociosidade da rede pode oferecer margens para se oferecer serviços cujas tarifas diferenciadas estimulem o uso desta sem degradar o seu desempenho. Assim, a modelagem e a estimação do tráfego são, além de úteis no projeto de capacidade, ferramentas de suporte a decisões estratégicas das operadoras.

3.3. Controle estatístico com gráficos de controle de Shewhart

Gráficos de controle são ferramentas utilizadas para o monitoramento da variabilidade do processo (HOGG; LEDOLTER, 1992). Este procedimento implica em melhoria da qualidade, uma vez que atualmente esta é definida como inversamente proporcional ao incremento da variabilidade (MONTGOMERY, 2004).

Os gráficos de controle de Shewhart, introduzidos em 1924 por Walter Andrew Shewhart em um memorando elaborado no Bell Laboratories, são compostos por pontos que descrevem determinada medida estatística (usualmente se monitora uma relativa à tendência central e outra relacionada à variabilidade); por uma Linha Central (LC), sobre a qual os pontos devem descrever traços não correlacionados, estacionários, sem ciclos, deslocamentos e misturas de distribuições, caracterizadas por pontos próximos aos limites de controle e alguns poucos próximos à LC; e por Limites Inferiores (LIC) e Superiores (LSC) de Controle, os quais, quando ultrapassados, podem indicar alterações no processo (HOGG; LEDOLTER, 1992). Deve-se observar que LIC e LSC são construídos considerando-se distribuição normal das amostras, caso contrário, tais limites são inapropriados, e que o processo se encontra sob controle – deve-se procurar causas atribuíveis para as amostras utilizadas para o cálculo dos

limites que ultrapassem os próprios limites e eliminá-las deste processo (MONTGOMERY, 2004). A Figura 3.3.1 apresenta um exemplo de gráfico de controle.

Além dos elementos mencionados, os gráficos de controle podem ainda possuir Limites Inferiores (LIE) e Superiores (LSE) de Especificação, que são metas previamente determinadas, e que não deveriam ser ultrapassadas (MONTGOMERY, 2004). Estes limites, entretanto, são estabelecidos como alvo, usualmente com conhecimento prévio do processo, e não são função da sua variabilidade, como LIC e LSC.

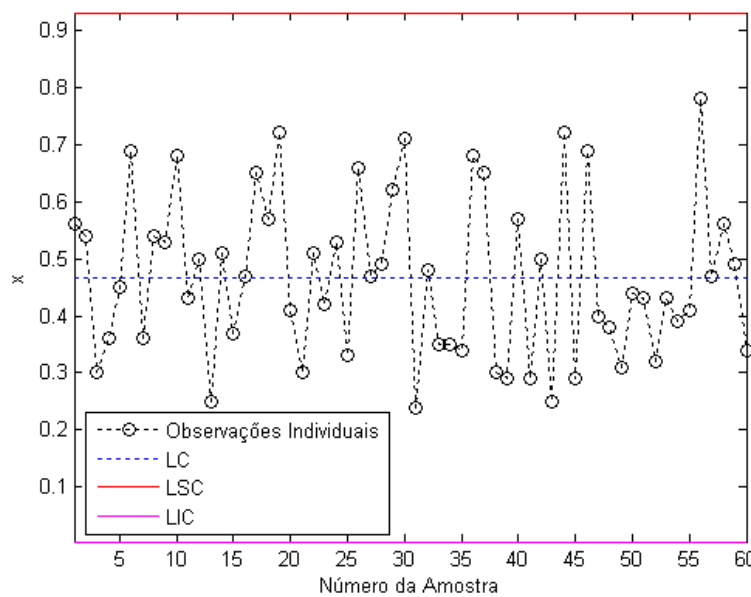


Figura 3.3.1 – Exemplo de gráfico de controle.

Ao se construir os limites de controle, deve-se observar a possibilidade de ocorrência de dois tipos de erro. O erro Tipo I ocorre quando os limites são especificados de maneira a permanecerem muito próximos à LC – neste caso, alarmes sem causas atribuíveis são gerados. Quando os limites são especificados de forma a permanecerem muito afastados da LC, diminui-se a possibilidade de erro Tipo I, mas se aumenta a possibilidade de ocorrência do erro Tipo II, onde amostras fora de controle não são detectadas (MONTGOMERY, 2004). Assim, usualmente se utiliza limites de controle 3σ , que abrangem 99,7% da área sob a Função Densidade de Probabilidade (pdf – *Probability Density Function*) da distribuição normal. Alternativamente se pode utilizar limites 2σ como alerta.

Nesta pesquisa serão considerados os gráficos para média e amplitude relativa (\bar{x} e R) e os gráficos de controle para medidas individuais, descritos a seguir.

3.3.1. Gráficos de controle \bar{x} e R

Gráficos de controle \bar{x} e R são utilizados quando o tamanho da amostra é relativamente pequeno – $m \leq 6$. Nele, utiliza-se a amplitude relativa R como medida de variabilidade:

$$R_i = x_{\text{máx}} - x_{\text{min}} \quad (3.3.1.1)$$

onde $x_{\text{máx}}$ e x_{min} representam, respectivamente, os valores máximos e mínimos das observações coletadas para a amostra i.

A medida de tendência central do processo é monitorada com o uso da média amostral das observações, dada por:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m} \quad (3.3.1.2)$$

Onde m é a quantidade de observações e x_i as $i=1, 2, \dots, m$ observações.

LC, LIC e LSC para o monitoramento da variabilidade são dados por (3.3.1.3), (3.3.1.4) e (3.3.1.5), respectivamente.

$$LC = \bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} \quad (3.3.1.3)$$

Onde n é o número de amostras coletadas.

$$LIC = D_3 \bar{R} \quad (3.3.1.4)$$

Onde valores tabulados para D_3 estão disponíveis no Anexo 2.

$$LSC = D_4 \bar{R} \quad (3.3.1.5)$$

Onde valores tabulados para D_4 estão disponíveis no Anexo 2.

Da mesma maneira, LC, LIC e LSC para o monitoramento da média do processo são dados respectivamente por (3.3.1.6), (3.3.1.7) e (3.3.1.8).

$$LC = \bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i}{n} \quad (3.3.1.6)$$

$$LIC = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} \quad (3.3.1.7)$$

Onde os valores tabulados para A_2 estão disponíveis no Anexo 2.

$$LSC = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \quad (3.3.1.8)$$

O Comprimento Médio de Sequência 0 (CMS_0) indica a quantidade média de amostras sob controle que são inseridas no gráfico até que uma delas gere um falso alarme. Para os gráficos \bar{x} , o CMS_0 é dado por:

$$CMS_0 = \frac{1}{\rho} \quad (3.3.1.9)$$

Onde ρ é a probabilidade de que algum ponto caia fora dos limites de controle.

Como serão construídos gráficos de controle 3σ , o CMS_0 é:

$$CMS = \frac{1}{(1 - 0,9973)} = \frac{1}{(0,0027)} = 370 \text{ amostras}$$

Ou seja, mesmo que o processo se encontre sob controle, em média a cada 370 amostras um alarme falso de processo fora de controle será gerado.

A medida CMS_1 indica quantas amostras se precisa coletar até que um deslocamento $k\sigma$ seja detectado. A Figura 3.3.1.1 apresenta curvas para o CMS_1 , em quantidade de amostras, para os gráficos \bar{x} , em função de um desvio $k\sigma$ na média do processo (MONTGOMERY, 2004).

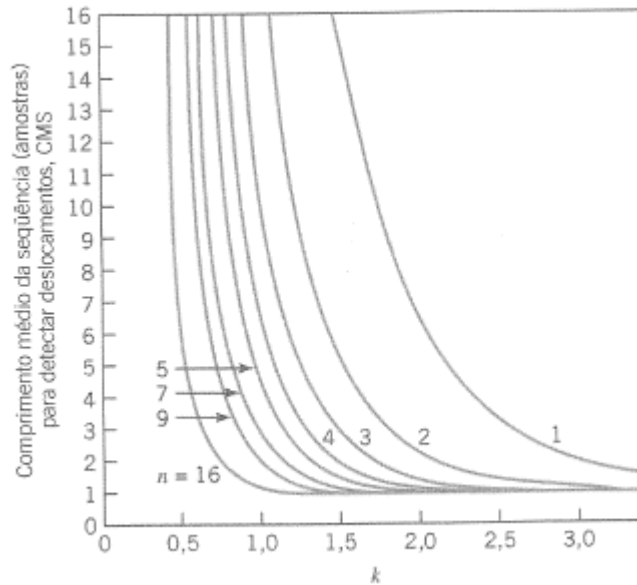


Figura 3.3.1.1 – CMS_1 , em quantidade de amostras, necessário para detectar um desvio $k\sigma$ na média do processo em um gráfico \bar{x} . Fonte: MONTGOMERY, 2004.

3.3.2. Gráficos de controle para medidas individuais

Os gráficos de controle para medidas individuais utilizam-se da amplitude móvel MR de duas amostras consecutivas:

$$MR_i = |x_i - x_{i-1}| \quad (3.3.2.1)$$

LC, LIC e LSC para o monitoramento da variabilidade são dados por (3.3.2.2), (3.3.2.3) e (3.3.2.4), respectivamente.

$$LC = \overline{MR} = \frac{\sum_{i=1}^k MR_i}{k} \quad (3.3.2.2)$$

Onde k é o número de amplitudes móveis tomadas.

$$LIC = D_3 \overline{MR} \quad (3.3.2.3)$$

$$LSC = D_4 \overline{MR} \quad (3.3.2.4)$$

O monitoramento da tendência central é realizado utilizando-se as próprias amostras individuais, sendo LC dada pela média aritmética das amostras, e LIC e LSC dados por (3.3.2.5) e (3.3.2.6), respectivamente.

$$LIC = \bar{x} - \frac{3\overline{MR}}{d_2} \quad (3.3.2.5)$$

Onde valores tabulados para d_2 estão disponíveis no Anexo 2.

$$LSC = \bar{x} + \frac{3\overline{MR}}{d_2} \quad (3.3.2.6)$$

A Tabela 3.3.2.1 contém o CMS_1 para tamanhos de deslocamento de 1σ , 2σ e 3σ em gráficos de controle para medidas individuais com limites 3σ (MONTGOMERY, 2004).

Tamanho do deslocamento	CMS_1
1σ	43,96
2σ	6,30
3σ	2,00

Tabela 3.3.2.1 – CMS_1 necessário para detecção de deslocamentos de 1σ , 2σ e 3σ para gráficos de controle de medidas individuais com limites 3σ .

3.4. Considerações finais

No processo de previsão da série temporal, adotou-se a classe de modelos ARIMA, que se apresenta adequada para a massa de dados, e cujo processo de identificação envolve a avaliação da tendência, da sazonalidade e das FACs. O estimador utilizado foi o de mínimos quadrados.

Para o monitoramento dos indicadores de qualidade, utilizou-se os gráficos de controle de Shewhart \bar{x} e R e gráficos de controle para medidas individuais, ambos com limites 3σ , e compostos pela LC, pelo LSC e pelo LIC.

Introduzida a modelagem matemática abordada para o tratamento do problema, apresenta-se no próximo capítulo os procedimentos de coleta e os resultados.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas a forma de coleta das informações e os resultados obtidos na identificação e na previsão das séries de tráfego de três BSCs e de três setores com a utilização dos modelos ARIMA, com a finalidade de oferecer subsídios para a estimação de capacidade futura, bem como a verificação da eficiência na detecção de falhas pelos gráficos de controle de Shewhart.

4.1. Coleta das informações

Realizou-se a coleta dos dados por meio de consulta a um banco de dados que armazena as informações de contadores obtidas diretamente do OSS em que os elementos de rede se encontram afiliados.

Deve-se observar que o tipo de informação coletada é gerada em nível de setor e em granularidade horária, sendo necessária a agregação para criação dos dados em níveis superiores – em alguns casos de estimação de tráfego, BSC – e na HMM diária.

Utilizam-se as informações na HMM diária para fins de projeto de capacidade e para o monitoramento da rede. Indicadores de desempenho coletados em horários de baixo tráfego possuem pouca representatividade estatística. Como exemplo da última afirmação, pode-se considerar o indicador de taxa de quedas de chamadas – duas quedas podem resultar em um PQC de quatro por cento caso no período se tenha estabelecido apenas cinquenta chamadas em determinado setor.

Por motivos de sigilo solicitado pelo cedente, não são citadas a operadora e a região onde os elementos estão instalados. Todas as informações se encontram normalizadas.

4.2. Modelagem e previsão de tráfego

Esta seção trata dos resultados e análises relativas à modelagem e à previsão de tráfego, com base nos procedimentos expostos nas seções 3.1 e 3.2.

4.2.1. Modelagem do tráfego na HMM diária – BSC01

Iniciou-se a modelagem do tráfego com base no comportamento de uma BSC, doravante denominada BSC01. Para este elemento, foram disponibilizadas 399 amostras na HMM diária. Inicialmente, utilizaram-se 339 medições para a janela de identificação e 60 para a de validação. Os resultados para um grande número de amostras na janela de identificação, entretanto, não geraram previsões precisas, de acordo com os critérios adotados nesta pesquisa (EQM e diferença das médias das quatro maiores HMMs). Verificou-se, por meio de experimentos, que os valores preditos se tornam próximos aos reais quando se utilizam em torno de seis meses de medições, ou seja, 210 amostras diárias. A Figura 4.2.1.1 apresenta a série temporal em ambas as janelas citadas.

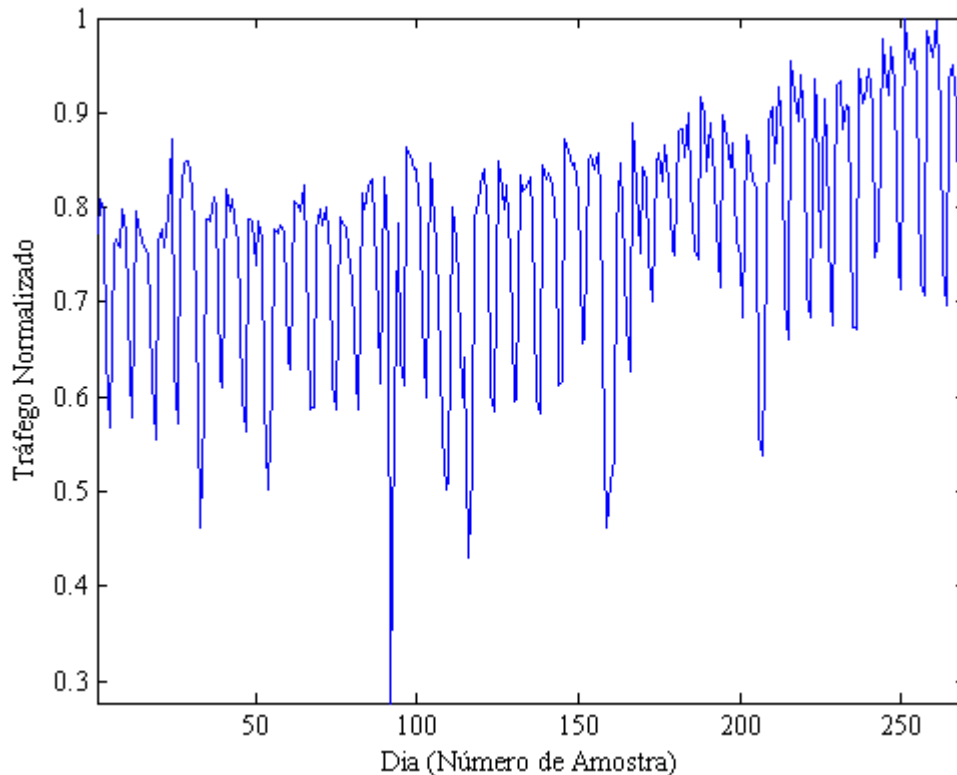


Figura 4.2.1.1 – BSC01, HMM Diária: Tráfego normalizado para as janelas de identificação e de validação.

Como se pode observar, a série possui tendência, devendo-se, portanto, tomar-se diferenças na janela de identificação para a estimação dos parâmetros auto-regressivos e de média móvel. Inicialmente, tomou-se uma diferença com *lag* igual a um. A Função de Autocorrelação (FAC) amostral, entretanto, apresentou coeficientes que decaem muito

lentamente para zero, podendo não caracterizar um processo identificável por parâmetros auto-regressivos e de médias móveis, ou caracterizando um processo de memória longa, não havendo evidências para isto, uma vez que o somatório dos módulos das autocorrelações não é não-finito, conforme se pode verificar na Figura 4.2.1.2.

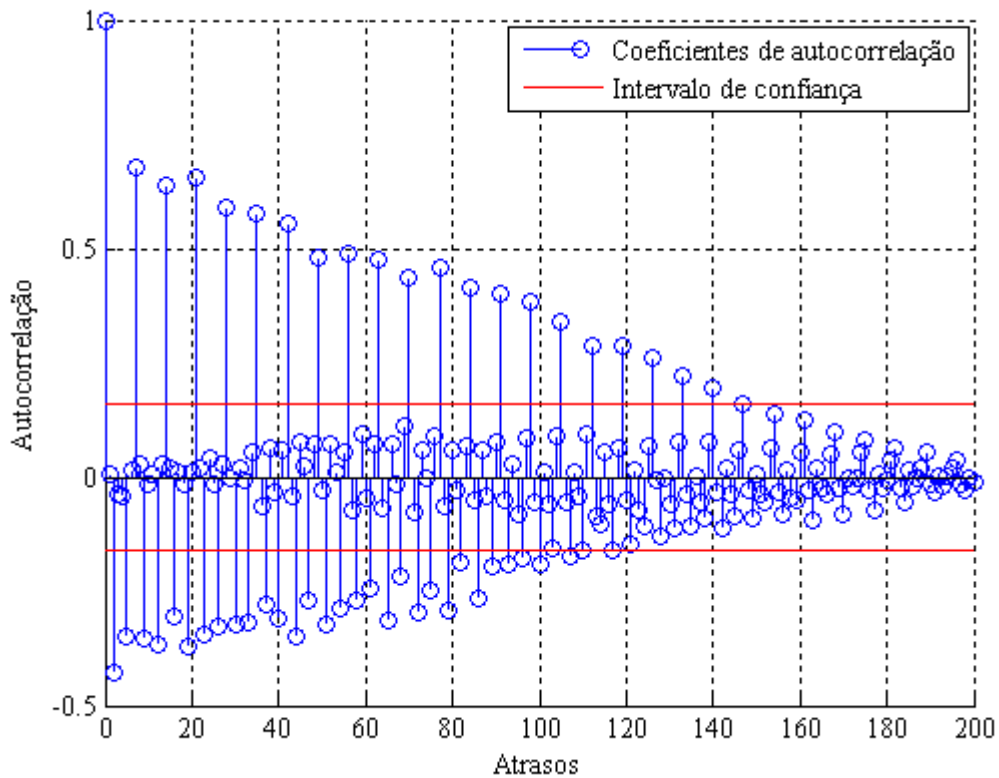


Figura 4.2.1.2 – BSC01, HMM Diária: FAC amostral para uma diferença de *lag* igual a um.

Assim, fez-se necessário verificar se algum *lag* específico geraria uma FAC amostral que representasse uma massa identificável por parâmetros dos modelos ARMA. Ao se tomar uma diferença para diversos lags distintos, verificou-se que aqueles múltiplos de sete atendem à expectativa mencionada. Tal fato está relacionado à sazonalidade que inicialmente se apresentou no problema sob a forma dos dias das semanas.

Verificou-se que as melhores previsões ocorreram quando a diferença é tomada nos lags 28 e, principalmente, 35. A Figura 4.2.1.3 apresenta a FAC amostral para uma diferença de *lag* igual a 35.

Apresentaram-se apenas 50 atrasos para FAC amostral da diferença tomada com *lag* igual a 35, pois os demais coeficientes de autocorrelação se encontram dentro dos limites do intervalo de confiança.

Nota-se que existe coerência no surgimento do valor 35 para a suavização dos efeitos da sazonalidade – pela diferença com este atraso –, e na definição dos termos auto-regressivos a serem considerados (ordem do modelo) – pelos coeficientes de autocorrelação fora dos intervalos de confiança. Tal valor exprime a sazonalidade que se apresenta na forma de semanas e de meses. Além disto, no atraso aproximado de 45 dias (1,5 mês), aparecem coeficientes de autocorrelação acima do intervalo de confiança, os quais tiveram de ser considerados para a construção do modelo, por gerar melhores resultados, e exprimiram sazonalidade quinzenal.

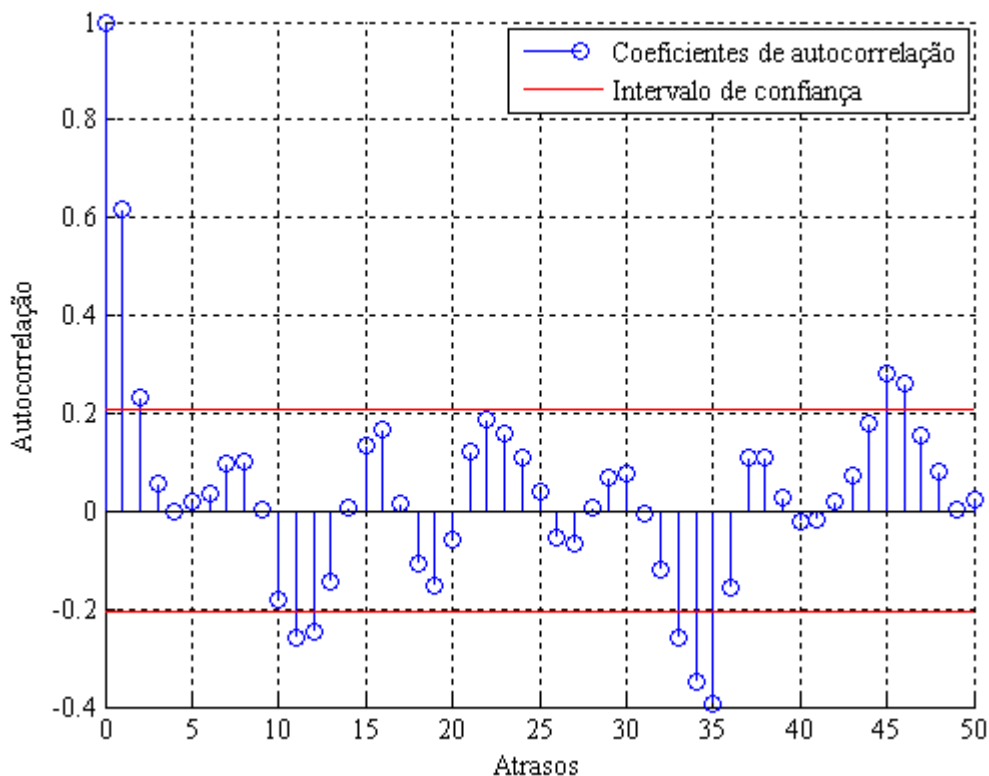


Figura 4.2.1.3 – BSC01, HMM Diária: FAC amostral para uma diferença de *lag* igual a 35.

A Tabela 4.2.1.1 apresenta os valores estimados dos parâmetros do modelo.

A Figura 4.2.1.4 exibe a série de tráfego normalizada, sem tendência e de média zero $W(t)$, bem como sua estimação, na janela de identificação.

A Figura 4.2.1.5 apresenta a série estimada pelo modelo na janela de validação.

Parâmetro	Atraso	Valor Estimado	Variância Estimator
φ	1	0,5825	0,0046
	2	-0,2402	0,0022
	11	-0,0082	0,0004
	12	-0,0310	3×10^{-5}
	33	-0,1149	8×10^{-5}
	34	0,0324	0,0003
	35	-0,2424	0,0006
	45	0,1460	3×10^{-5}
	46	-0,0320	0,0005
θ	1	0,1054	1×10^{-6}
d	35	-	-

Tabela 4.2.1.1 – BSC01, HMM Diária: Valores estimados dos parâmetros do modelo.

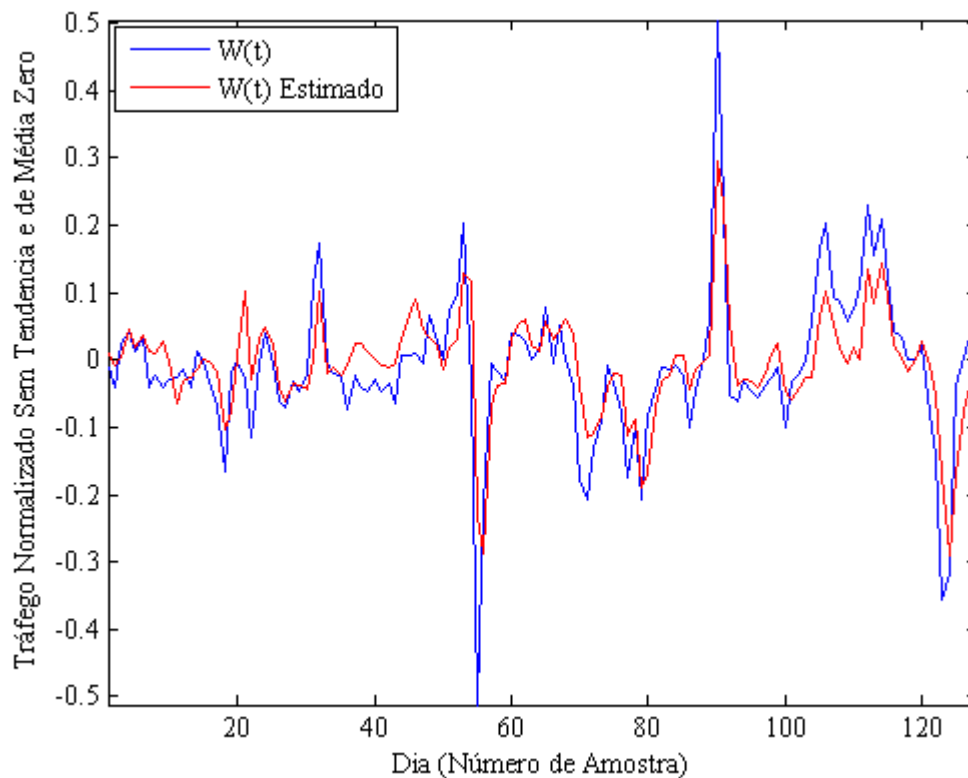


Figura 4.2.1.4 – BSC01, HMM Diária: Tráfego normalizado, sem tendência e de média zero e sua estimativa por meio dos parâmetros auto-regressivos e de médias móveis, na janela de identificação.

O Erro Quadrático Médio (EQM), dado pela Equação 3.2.3.1, é de 0,0075.

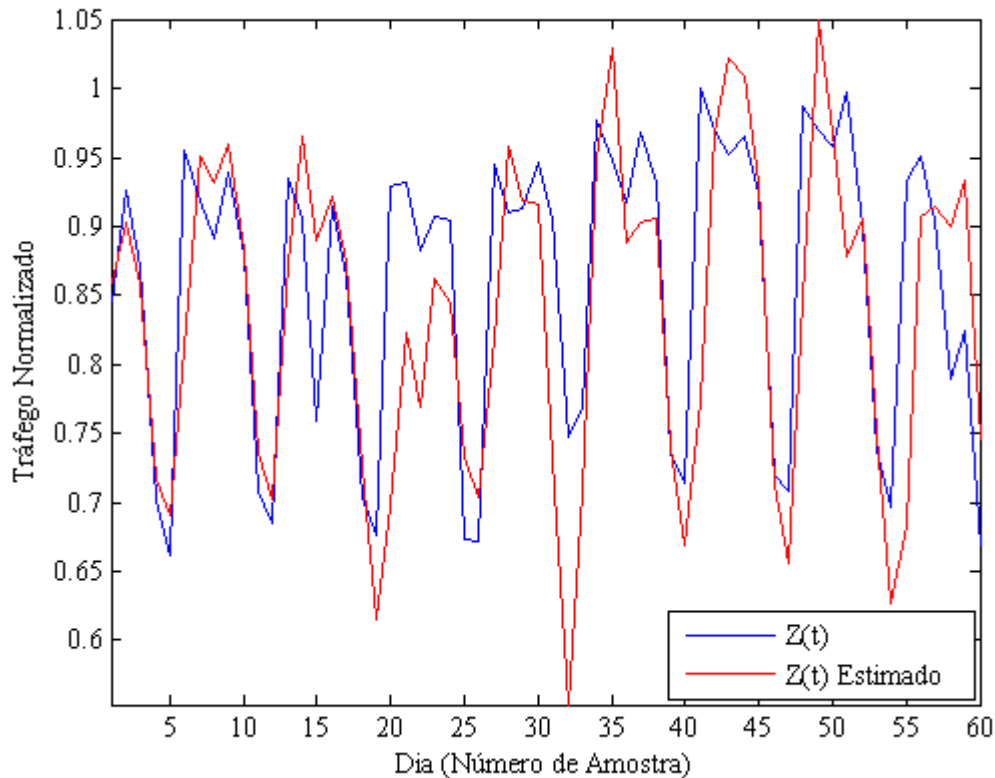


Figura 4.2.1.5 – BSC01, HMM Diária: Tráfego normalizado e sua estimativa por meio do modelo ARIMA, na janela de validação.

Conforme anteriormente mencionado, uma medida prática para a verificação do modelo é a comparação da média dos valores reais das quatro maiores HMMs da série (janela de validação) em relação à média das quatro maiores HMMs estimadas, realizada por meio da diferença destas. O valor obtido é $-0,0374$, ou seja, o tráfego foi superestimado em 3,74%.

4.2.2. Modelagem do tráfego na HMM diária – BSC02

Repetiu-se o mesmo procedimento realizado para a BSC01 para outra BSC, denominada BSC02. A Figura 4.2.2.1 exibe a série temporal na HMM diária para as janelas de identificação e de validação.

A FAC amostral apresentou aproximadamente o mesmo comportamento da BSC01, conforme Figura 4.2.2.2.

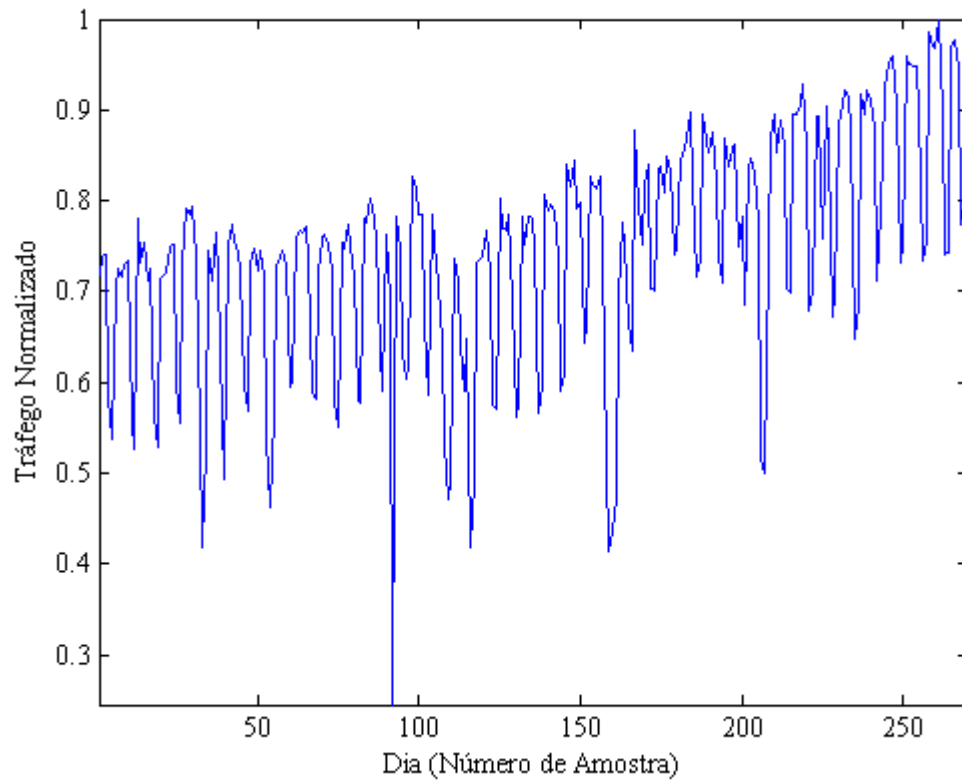


Figura 4.2.2.1 – BSC02, HMM Diária: Tráfego normalizado para as janelas de identificação e de validação.

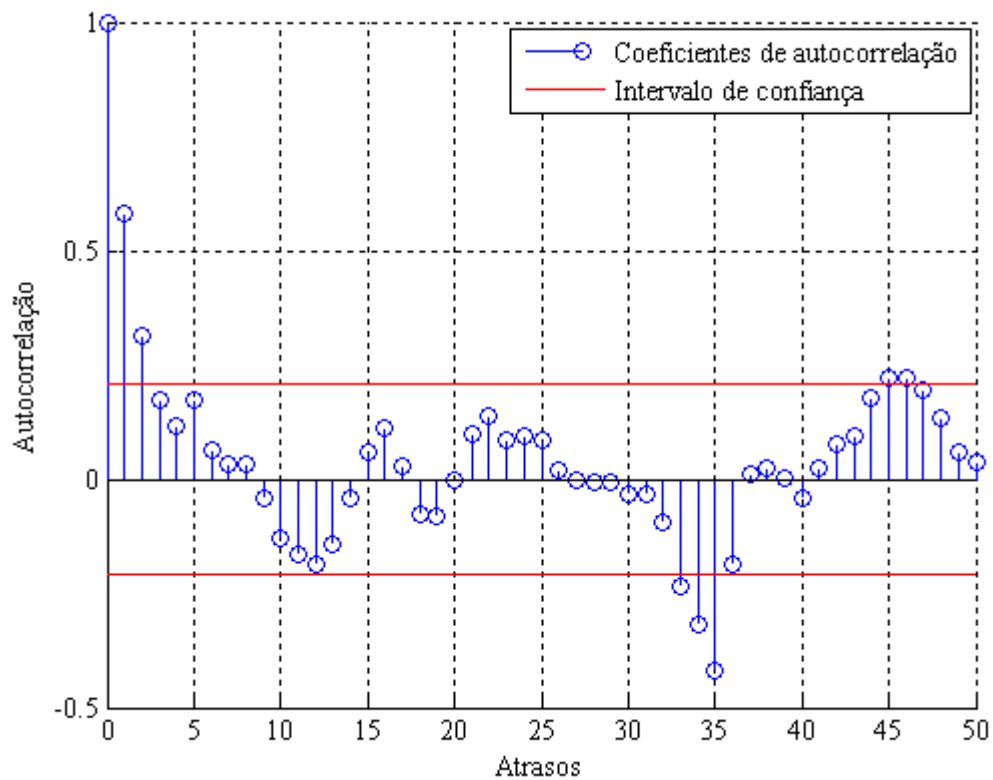


Figura 4.2.2.2 – BSC02, HMM Diária: FAC amostral para uma diferença de *lag* igual a 35.

A Tabela 4.2.2.1 contem os valores estimados dos parâmetros do modelo.

Parâmetro	Atraso	Valor Estimado	Variância Estimator
φ	1	0,3454	0,0049
	2	-0,0421	0,0020
	33	-0,1022	0,0003
	34	0,0046	0,0006
	35	-0,2978	0,0008
	45	0,0759	0,0004
θ	1	0,0894	4×10^{-7}
d	35	-	-

Tabela 4.2.2.1 – BSC02, HMM Diária: Valores estimados dos parâmetros do modelo.

A Figura 4.2.2.3 exibe a série de tráfego normalizada, sem tendência e de média zero $W(t)$, bem como sua estimação, na janela de identificação.

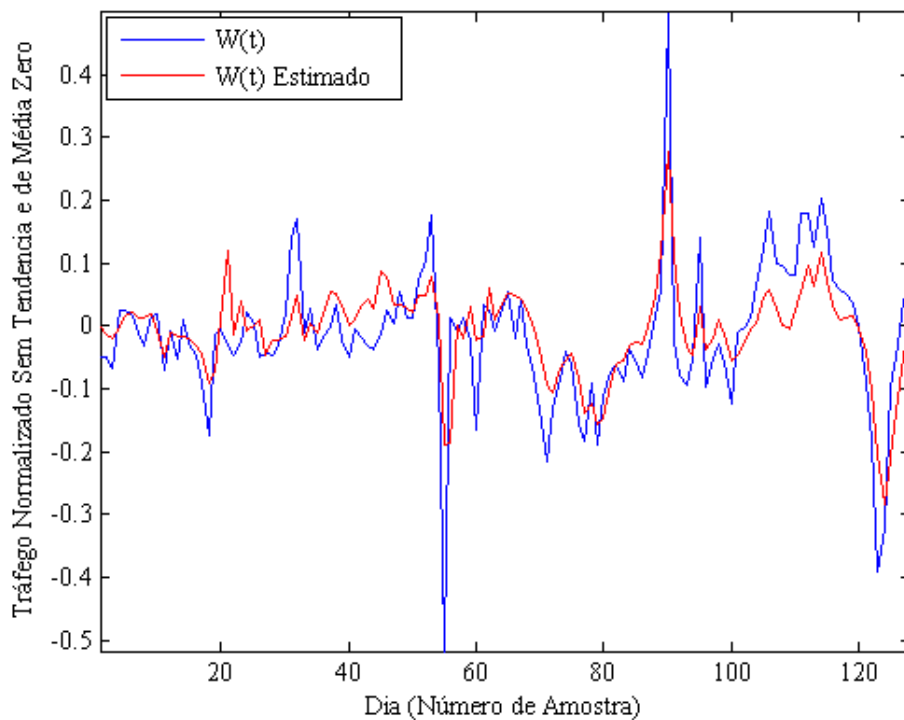


Figura 4.2.2.3 – BSC02, HMM Diária: Tráfego normalizado, sem tendência e de média zero e sua estimação por meio dos parâmetros auto-regressivos e de médias móveis, na janela de identificação.

A Figura 4.2.2.4 apresenta a série estimada pelo modelo na janela de validação.

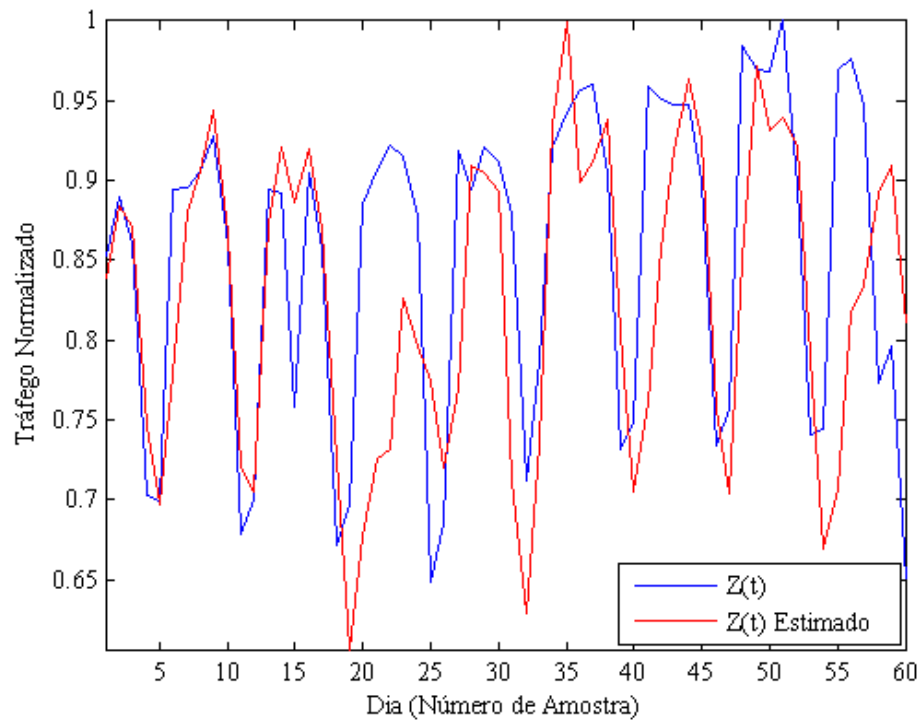


Figura 4.2.2.4 – BSC02, HMM Diária: Tráfego normalizado e sua estimação por meio do modelo ARIMA, na janela de validação.

O EQM é de 0,0085. A diferença entre as médias das quatro maiores HMMs da série original em relação aos valores previstos é de +0,0127, ou seja, o tráfego foi subestimado em 1,27%.

4.2.3. Modelagem do tráfego na HMM diária – BSC03

O mesmo procedimento foi novamente realizado para a BSC03.

A Figura 4.2.3.1 apresenta o tráfego normalizado na HMM diária para as janelas de identificação e de validação.

A Figura 4.2.3.2 apresenta a FAC, a qual apresentou comportamento similar às anteriores.

A Tabela 4.2.3.1 contém os valores estimados dos parâmetros do modelo.

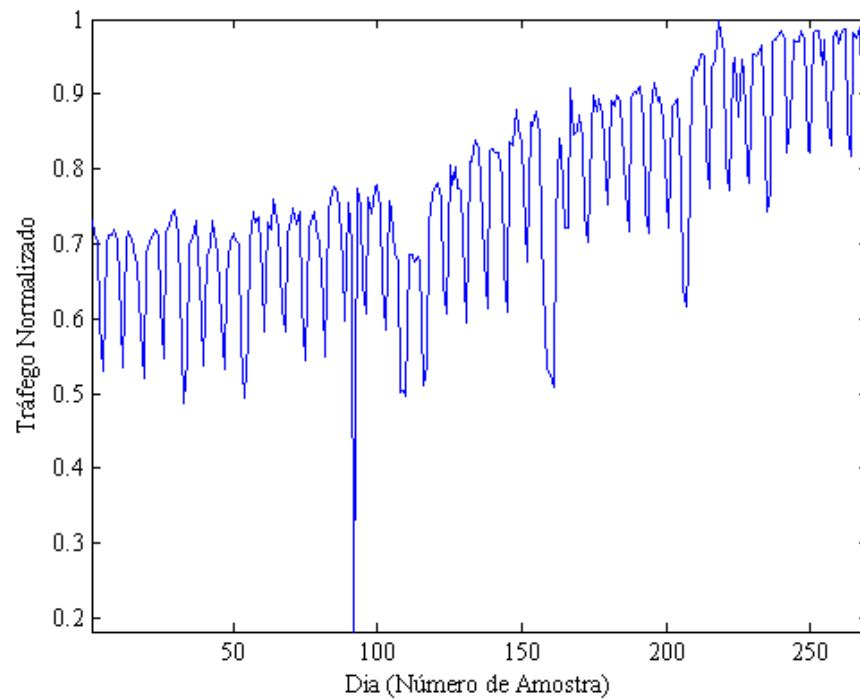


Figura 4.2.3.1 – BSC03, HMM Diária: Tráfego normalizado para as janelas de identificação e de validação.

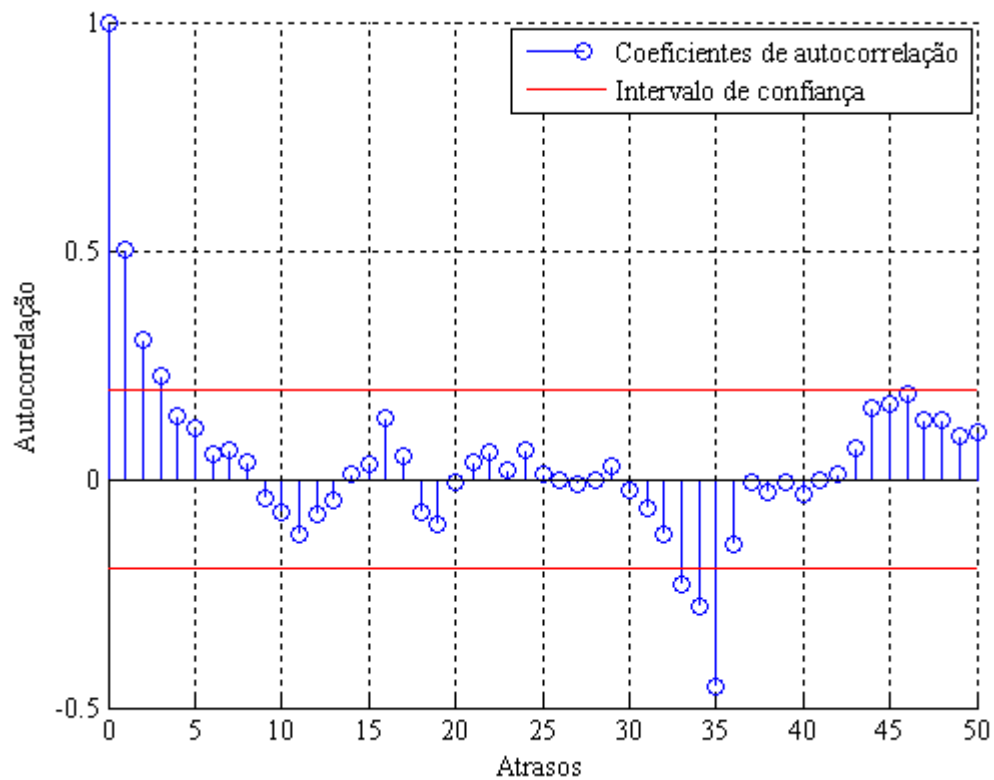


Figura 4.2.3.2 – BSC03, HMM Diária: FAC amostral para uma diferença de *lag* igual a 35.

Parâmetro	Atraso	Valor Estimado	Variância Estimator
φ	1	0,2527	0,0051
	2	0,0077	0,0016
	3	0,0845	0,0005
	33	-0,0951	7×10^{-7}
	34	-0,0013	0,0006
	35	-0,3612	0,0008
θ	1	0,1340	2×10^{-7}
d	35	-	-

Tabela 4.2.3.1 – BSC03, HMM Diária: Valores estimados dos parâmetros do modelo.

A Figura 4.2.3.3 apresenta a série de tráfego normalizada, sem tendência e de média zero $W(t)$, bem como sua estimativa, na janela de identificação.

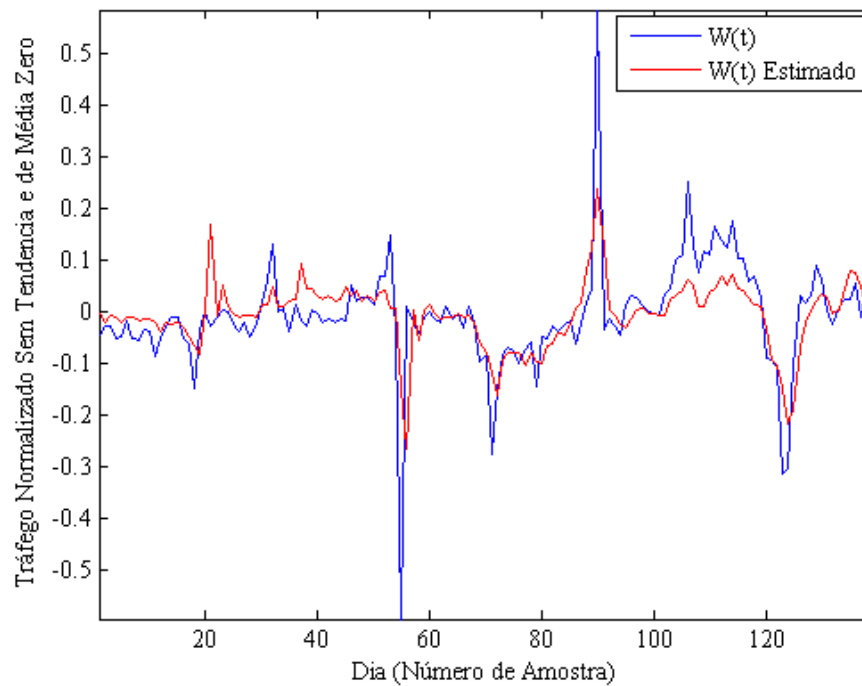


Figura 4.2.3.3 – BSC03, HMM Diária: Tráfego normalizado, sem tendência e de média zero e sua estimativa por meio dos parâmetros auto-regressivos e de médias móveis, na janela de identificação.

A Figura 4.2.3.4 exibe a série estimada pelo modelo na janela de validação.

O EQM é de 0,0078. A diferença entre as médias das quatro maiores HMMs da série original em relação aos valores previstos é de -0,0028, ou seja, o tráfego foi superestimado em 0,28%.

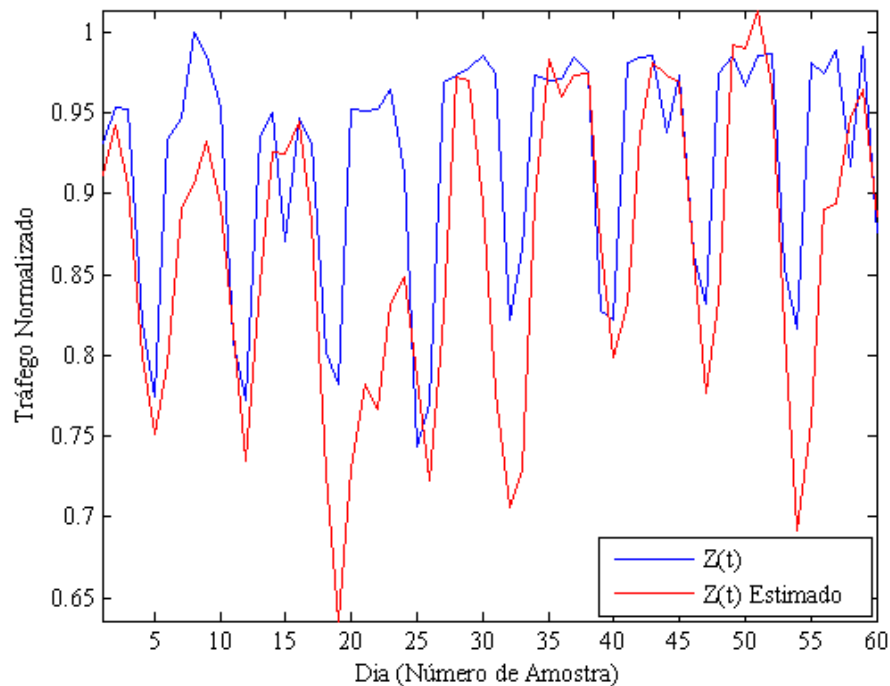


Figura 4.2.3.4 – BSC03, HMM Diária: Tráfego normalizado e sua estimativa por meio do modelo ARIMA, na janela de validação.

4.2.4. Modelagem do tráfego na HMM diária – Setor01

Baseou-se a modelagem para o primeiro setor, denominado Setor01, nos critérios adotados em nível de BSC. A Figura 4.2.4.1 apresenta a série temporal nas janelas de identificação e de validação.

Conforme comportamento em nível de BSC, o setor apresentou coeficientes de autocorrelação em atrasos relativamente grandes – aproximadamente 35 e 45 –, exprimindo a sazonalidade anteriormente exposta, como se pode observar na Figura 4.2.4.2.

A Figura 4.2.4.3 exibe a série de tráfego normalizada, sem tendência e de média zero $W(t)$, bem como sua estimativa, na janela de identificação.

A Tabela 4.2.4.1 contém os valores estimados dos parâmetros do modelo.

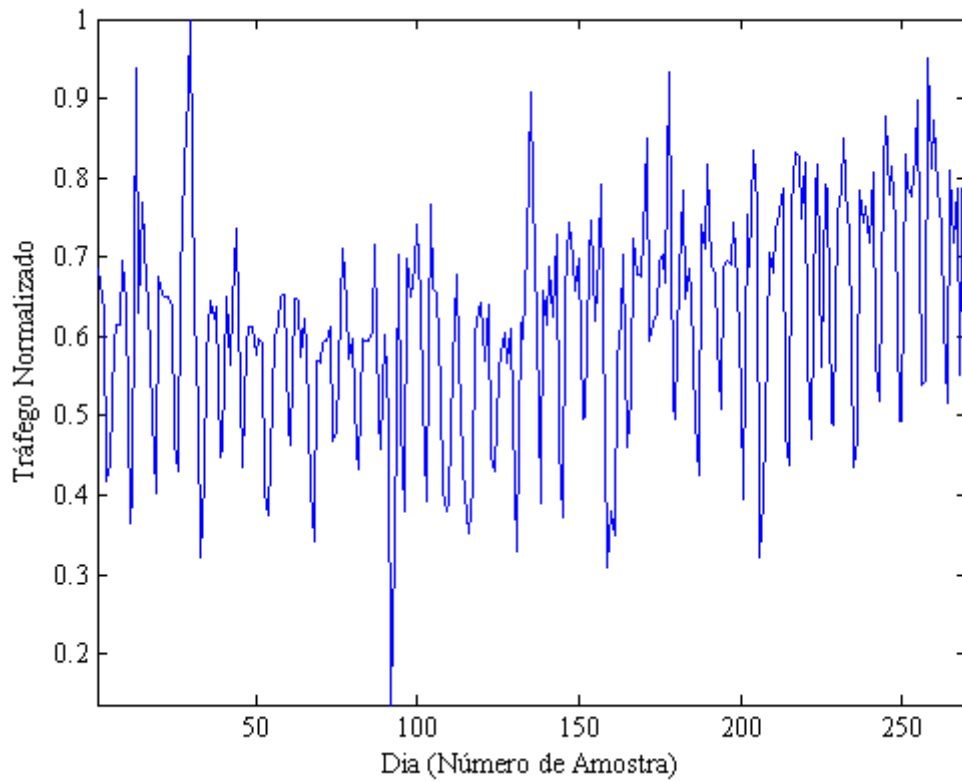


Figura 4.2.4.1 – Setor01, HMM Diária: Tráfego normalizado para as janelas de identificação e de validação.

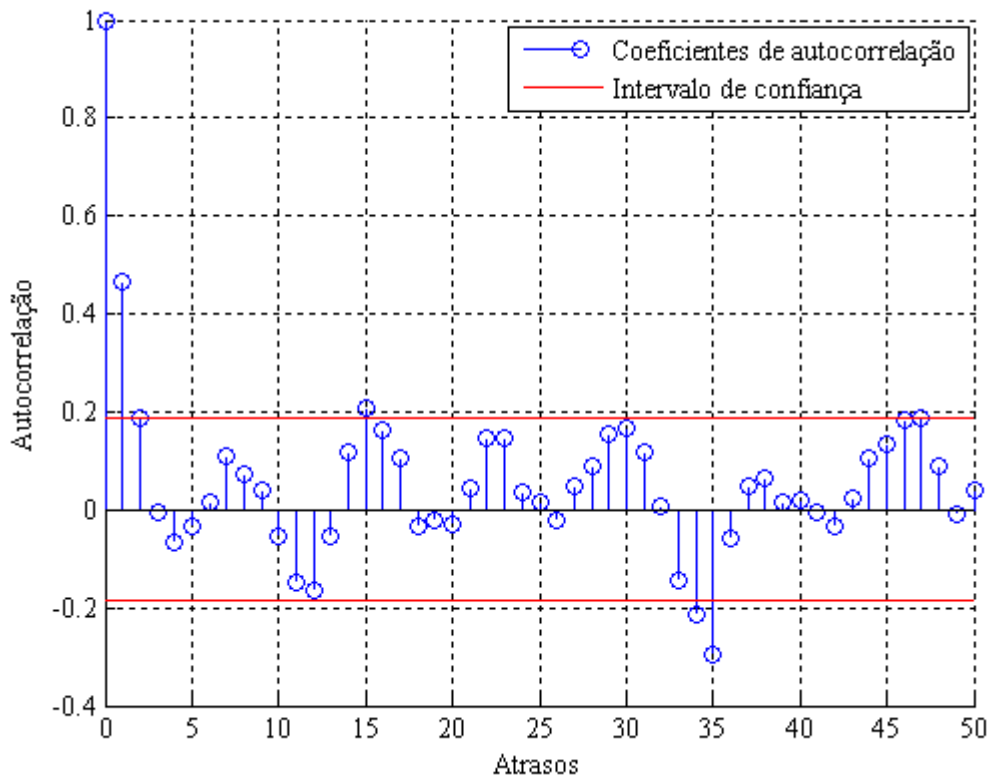


Figura 4.2.4.2 – Setor01, HMM Diária: FAC amostral para uma diferença de *lag* igual a 35.

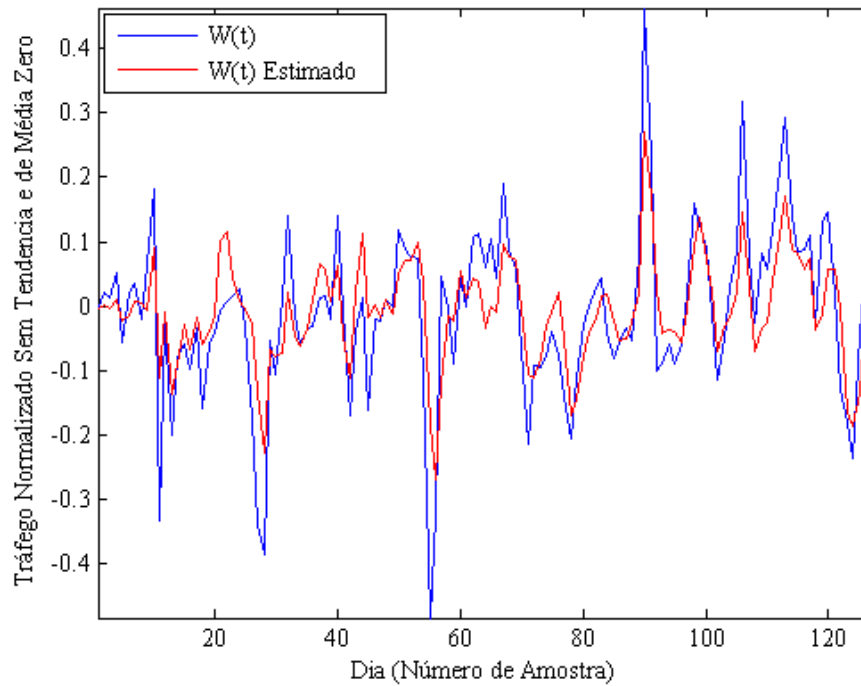


Figura 4.2.4.3 – Setor01, HMM Diária: Tráfego normalizado, sem tendência e de média zero e sua estimação por meio dos parâmetros auto-regressivos e de médias móveis, na janela de identificação.

Parâmetro	Atraso	Valor Estimado	Variância Estimador
φ	1	0,4533	0,0042
	2	-0,0986	0,0020
	15	0,1627	0,0006
	34	-0,1211	0,0002
	35	-0,1712	0,0007
	47	0,0986	0,0004
θ	1	0,0344	3×10^{-6}
d	35	-	-

Tabela 4.2.4.1 – Setor01, HMM Diária: Valores estimados dos parâmetros do modelo.

A Figura 4.2.4.4 apresenta a série estimada pelo modelo na janela de validação.

O EQM é de 0,0364. A diferença entre as médias das quatro maiores HMMs da série original em relação aos valores previstos é de -0,0718, ou seja, o tráfego foi superestimado em 7,18%.

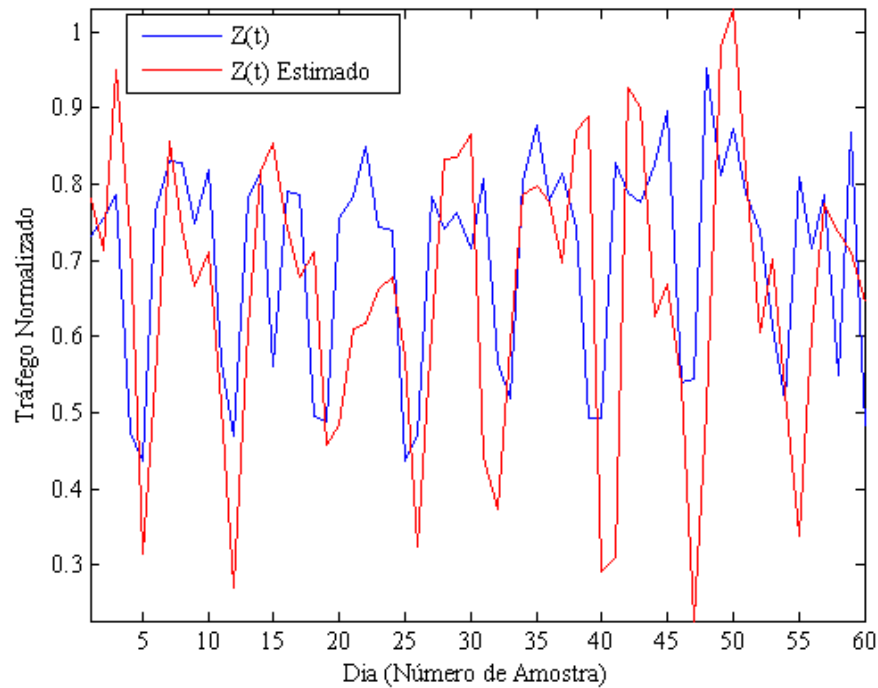


Figura 4.2.4.4 – Setor01, HMM Diária: Tráfego normalizado e sua estimativa por meio do modelo ARIMA, na janela de validação.

4.2.5. Modelagem do tráfego na HMM diária – Setor02

A Figura 4.2.5.1 apresenta a série temporal nas janelas de identificação e de validação para o Setor02. A Figura 4.2.5.2 exibe os coeficientes de autocorrelação.

A Tabela 4.2.5.1 contém os valores estimados dos parâmetros do modelo.

Parâmetro	Atraso	Valor Estimado	Variância Estimador
ϕ	1	0,4765	0,0041
	2	-0,1304	0,0021
	3	0,1304	7×10^{-5}
	6	0,1480	0,0002
	7	0,0189	0,0005
	34	-0,0262	0,0004
	35	-0,2546	0,0005
	45	0,1827	0,0002
θ	1	0,1016	1×10^{-5}
d	35	-	-

Tabela 4.2.5.1 – Setor02, HMM Diária: Valores estimados dos parâmetros do modelo.

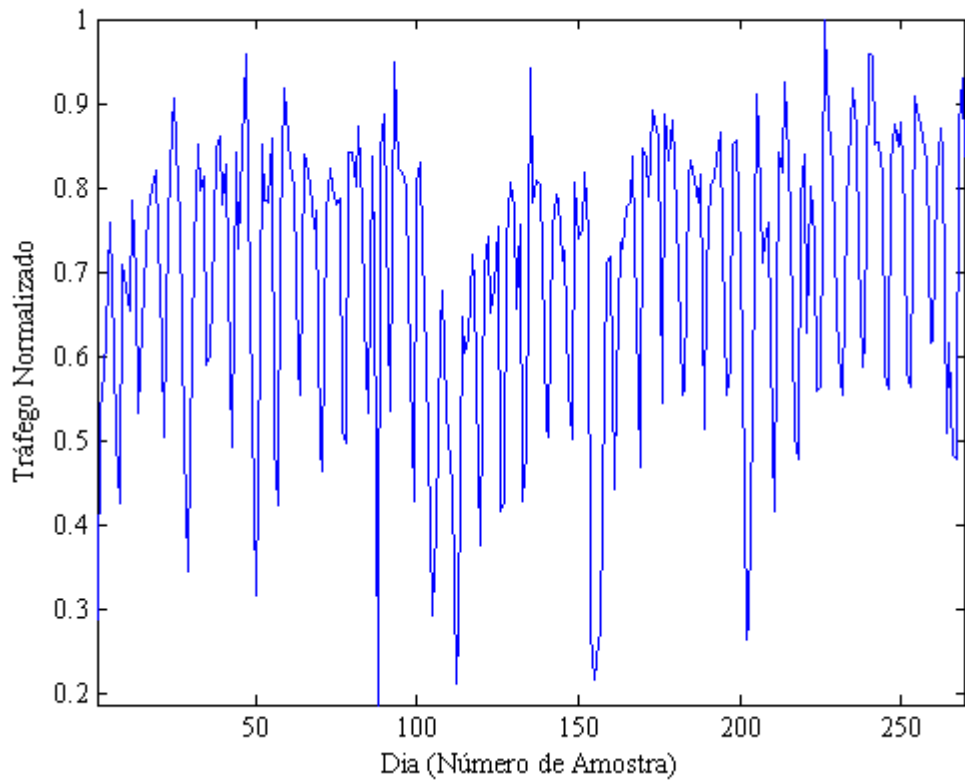


Figura 4.2.5.1 – Setor02, HMM Diária: Tráfego normalizado para as janelas de identificação e de validação.

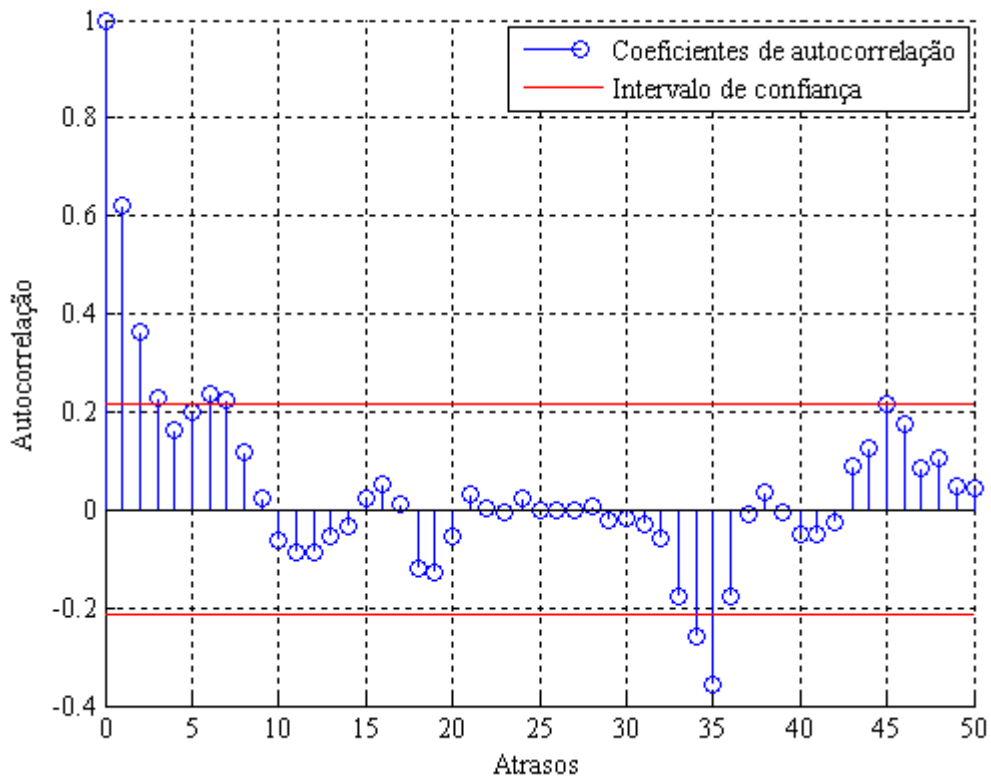


Figura 4.2.5.2 – Setor02, HMM Diária: FAC amostral para uma diferença de *lag* igual a 35.

A Figura 4.2.5.3 exibe a série de tráfego normalizada, sem tendência e de média zero $W(t)$, bem como sua estimação, na janela de identificação.

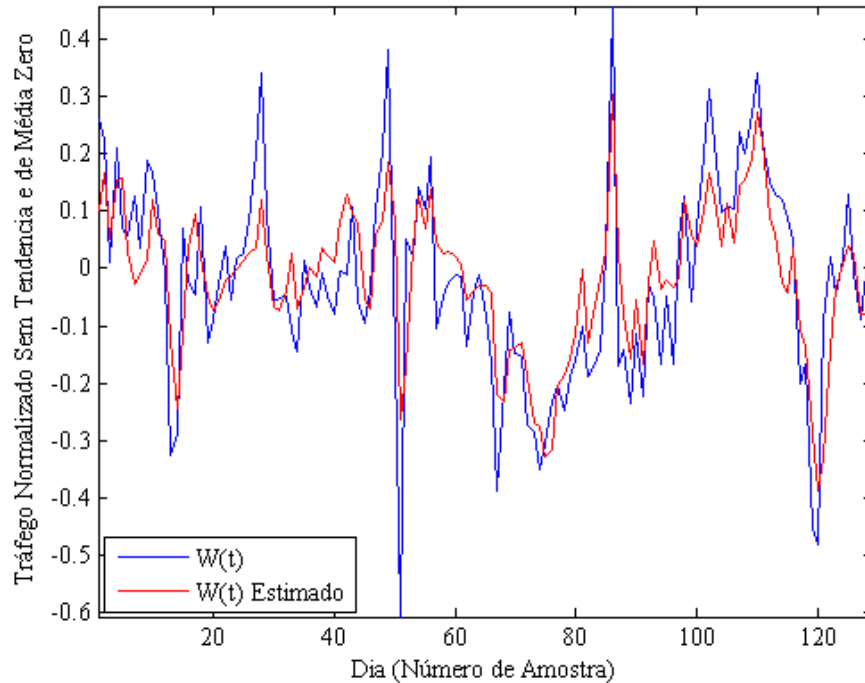


Figura 4.2.5.3 – Setor02, HMM Diária: Tráfego normalizado, sem tendência e de média zero e sua estimação por meio dos parâmetros auto-regressivos e de médias móveis, na janela de identificação.

A Figura 4.2.5.4 apresenta a série estimada pelo modelo na janela de validação.

O EQM é de 0,0183. A diferença entre as médias das quatro maiores HMMs da série original em relação aos valores previstos é de -0,0269, ou seja, o tráfego foi superestimado em 2,69%.

4.2.6. Modelagem do tráfego na HMM diária – Setor03

A Figura 4.2.6.1 apresenta a série temporal nas janelas de identificação e de validação para o Setor03.

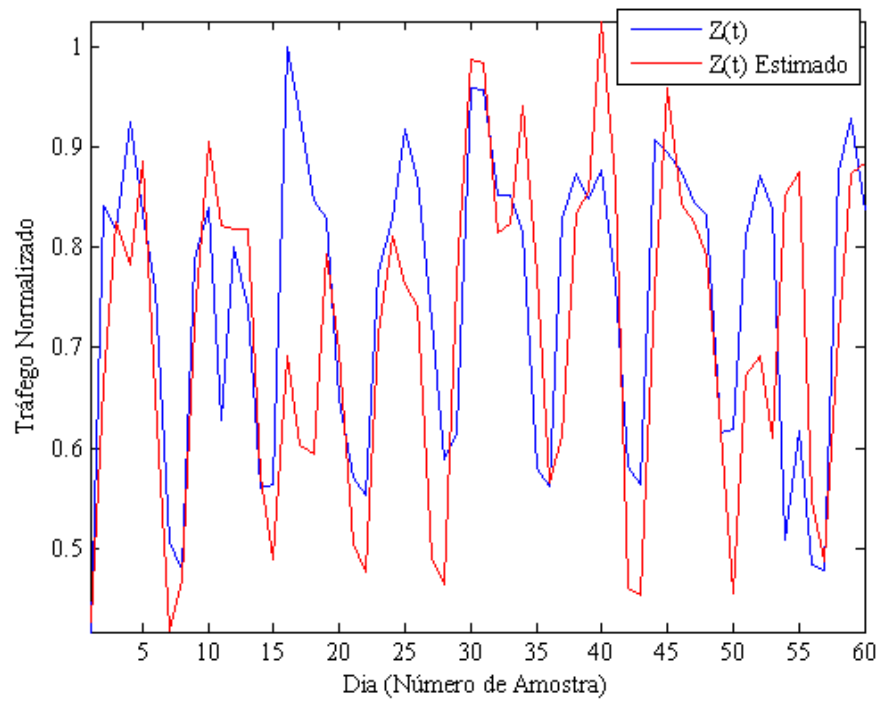


Figura 4.2.5.4 – Setor02, HMM Diária: Tráfego normalizado e sua estimação por meio do modelo ARIMA, na janela de validação.

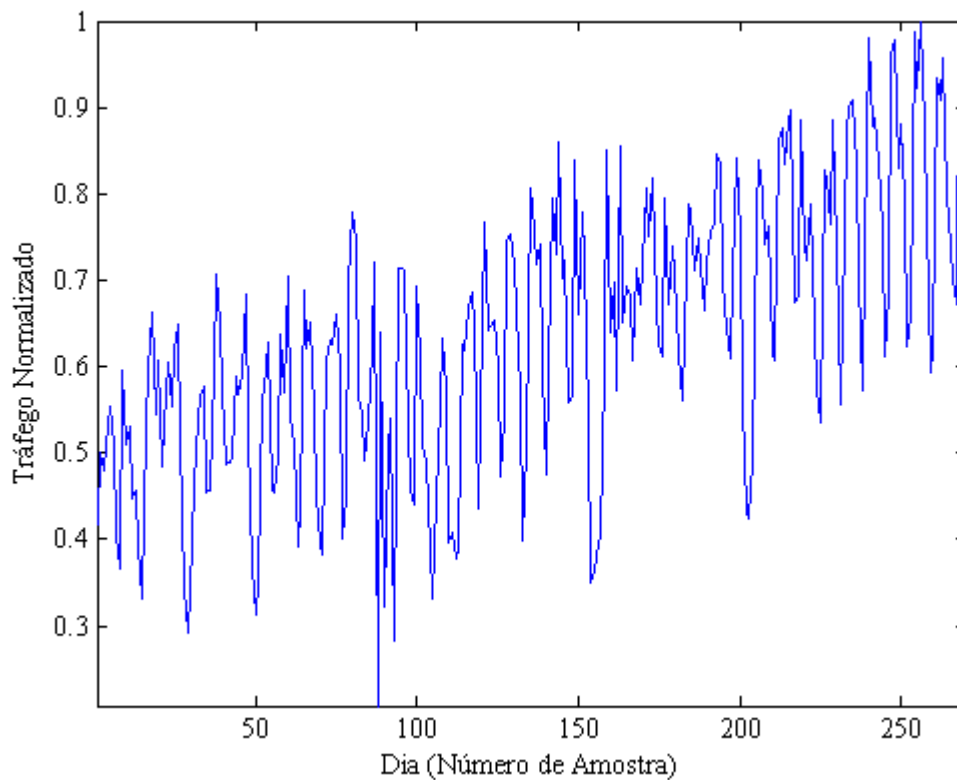


Figura 4.2.6.1 – Setor03, HMM Diária: Tráfego normalizado para as janelas de identificação e de validação.

A Figura 4.2.6.2 exibe os coeficientes de autocorrelação.

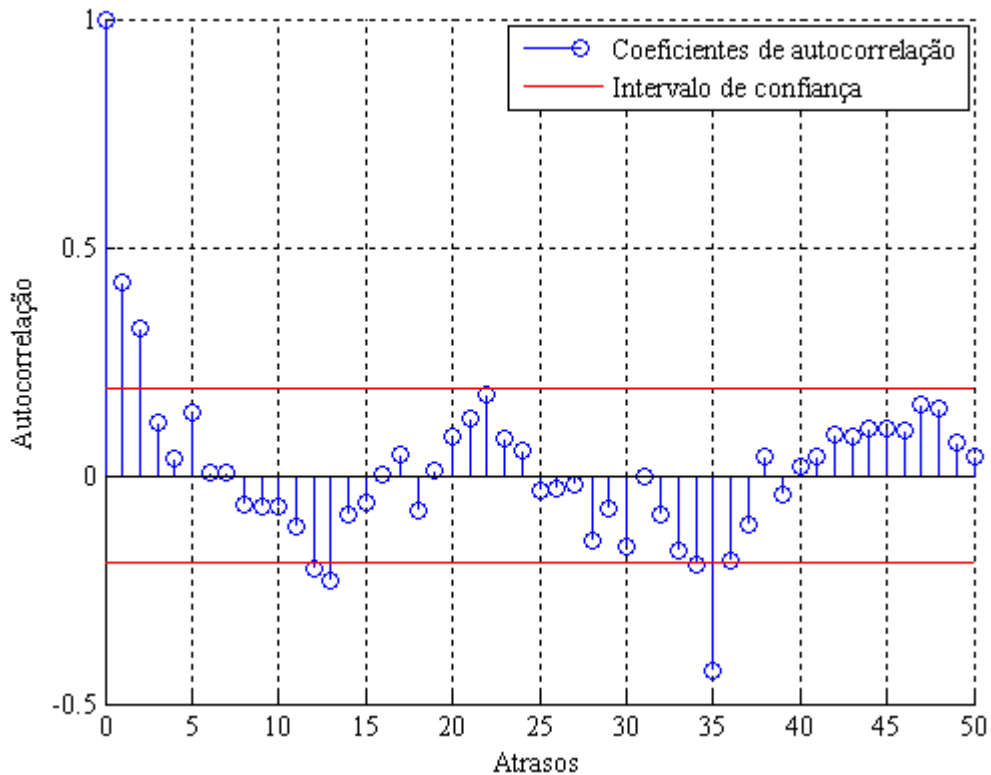


Figura 4.2.6.2 – Setor03, HMM Diária: FAC amostral para uma diferença de *lag* igual a 35.

A Tabela 4.2.6.1 contem os valores estimados dos parâmetros do modelo.

Parâmetro	Atraso	Valor Estimado	Variância Estimador
φ	1	0,2201	0,0056
	2	0,1127	0,0019
	12	-0,0882	0,0005
	13	-0,0077	0,0007
	34	0,0274	0,0006
	35	-0,4162	0,0005
θ	1	0,0801	8×10^{-6}
d	35	-	-

Tabela 4.2.6.1 – Setor03, HMM Diária: Valores estimados dos parâmetros do modelo.

A Figura 4.2.6.3 exibe a série de tráfego normalizada, sem tendência e de média zero $W(t)$, bem como sua estimação, na janela de identificação.

A Figura 4.2.6.4 apresenta a série estimada pelo modelo na janela de validação.

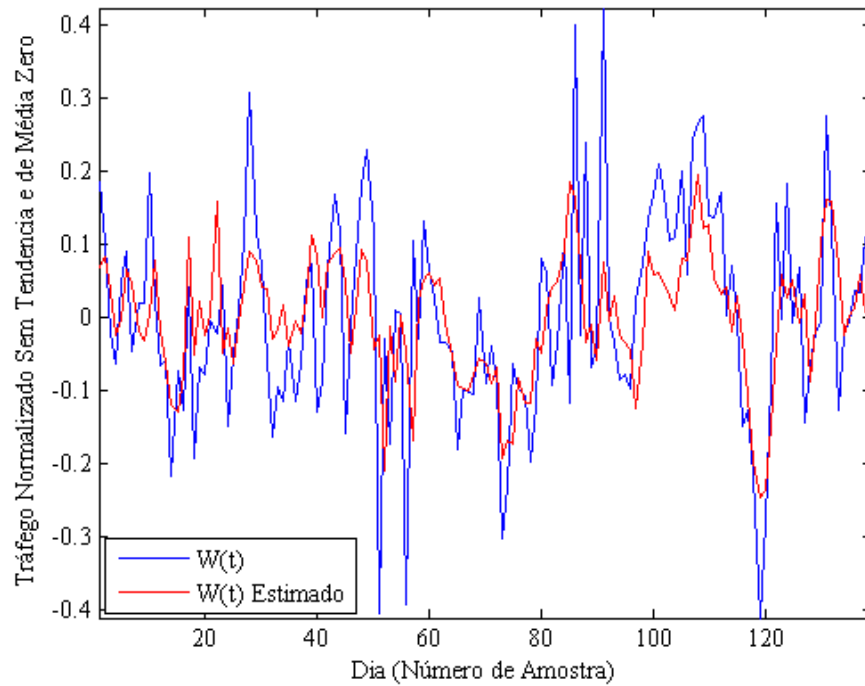


Figura 4.2.6.3 – Setor03, HMM Diária: Tráfego normalizado, sem tendência e de média zero e sua estimação por meio dos parâmetros auto-regressivos e de médias móveis, na janela de identificação.

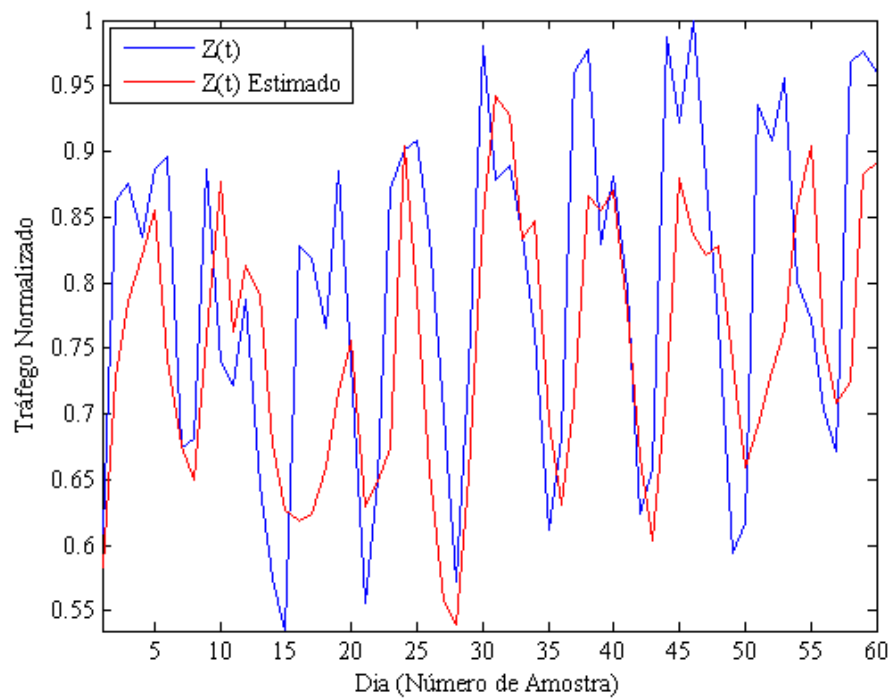


Figura 4.2.6.4 – Setor03, HMM Diária: Tráfego normalizado e sua estimação por meio do modelo ARIMA, na janela de validação.

O EQM é de 0,0141. A diferença entre as médias das quatro maiores HMMs da série original em relação aos valores previstos é de 0,0669, ou seja, o tráfego foi subestimado em 6,69%.

Nota-se que para as últimas amostras o tráfego foi subestimado em função de um aumento fora da tendência da série, conforme se pode observar na Figura 4.2.6.1.

4.3. Controle estatístico de indicadores de qualidade em redes celulares

Esta seção trata dos resultados e análises relativas à aplicação dos gráficos de controle de Shewhart, ferramentas do controle estatístico de processo, na detecção de falhas em indicadores estatísticos de desempenho no nível de setores, com base nos procedimentos expostos na seção 3.3.

4.3.1. Gráficos de controle para medidas individuais na HMM diária - SetorA

Nesta seção se investiga a eficiência dos gráficos de controle de Shewhart para medidas individuais na identificação de alterações no comportamento do PQC e do PSH no setor denominado SetorA.

4.3.1.1. PQC

Para este estudo, coletaram-se 60 amostras para o projeto do gráfico de controle, determinando a LC, o LSC e o LIC. Aceita-se a hipótese de normalidade, entretanto, somente quando se toma o logaritmo das amostras, caracterizando uma distribuição lognormal. A variável a ser controlada, portanto, passa a ser o logaritmo do PQC. A Tabela 4.3.1.1.1 contem os valores da LC, do LSC e do LIC.

Medida	Linha	Valor
Média do Processo	LC	-5,3374
	LSC	-4,2795
	LIC	-6,3952
Variabilidade do Processo	LC	0,3978
	LSC	1,2995
	LIC	0,0000

Tabela 4.3.1.1.1. – SetorA, Medidas Individuais, log(PQC): Valores da LC, do LSC e do LIC.

A Figura 4.3.1.11 exibe o gráfico de controle para as observações individuais, enquanto a Figura 4.3.1.1.2 apresenta o gráfico de controle para média móvel.

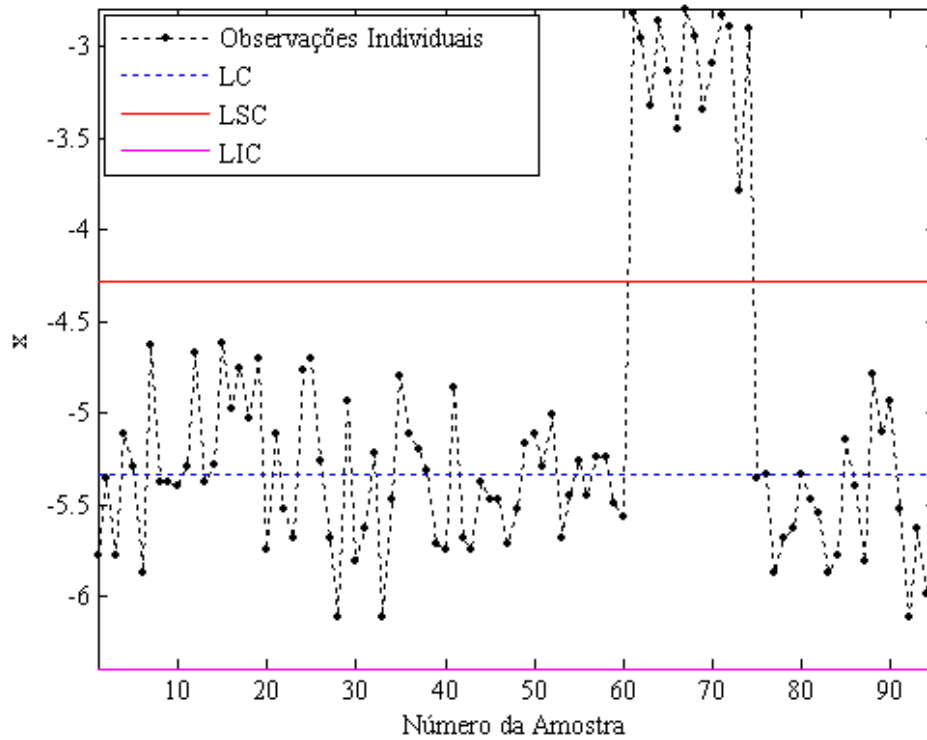


Figura 4.3.1.1.1. – SetorA, Medidas Individuais, log(PQC): Gráfico de controle das observações individuais.

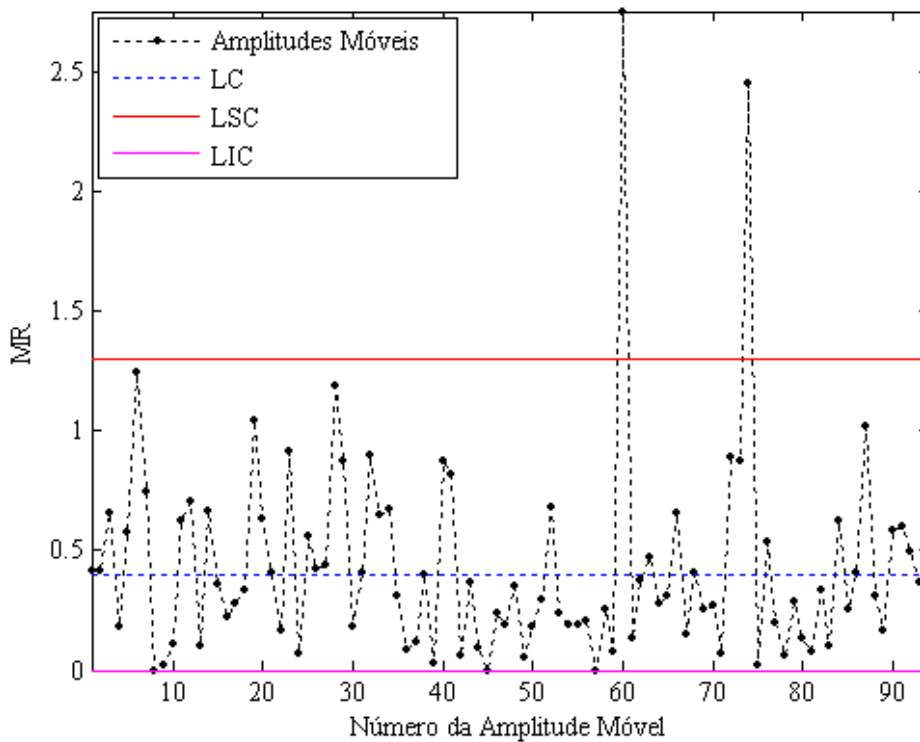


Figura 4.3.1.1.2. – SetorA, Medidas Individuais, log(PQC): Gráfico de controle das amplitudes móveis.

Como se pode observar na Figura 4.3.1.1.1, LSC é ultrapassado assim que a média do processo é alterada, mostrando-se eficaz nesta detecção. Nota-se dois pontos que ultrapassam LSC na Figura 4.3.1.1.2, os quais identificam os momentos onde as médias do processo foram drasticamente alteradas – quando esta sai e retorna ao estado de controle estatístico.

4.3.1.2. PSH

Para este estudo, coletaram-se 60 amostras para o projeto do gráfico de controle, determinando a LC, o LSC e o LIC. Ao se calcular os limites, verificou-se que duas amostras ultrapassaram LIC por alguma falha não identificada. Tais amostras foram retiradas e se desenvolveu novos limites a partir das 58 restantes. Aceita-se a hipótese de normalidade para este caso.

A Tabela 4.3.1.2.1 contem os valores da LC, do LSC e do LIC.

Medida	Linha	Valor
Média do Processo	LC	0,9951
	LSC	1,0002
	LIC	0,9899
Variabilidade do Processo	LC	0,0019
	LSC	0,0063
	LIC	0,0000

Tabela 4.3.1.2.1. – SetorA, Medidas Individuais, PSH: Valores da LC, do LSC e do LIC.

Deve-se observar que LSC, para este caso, deve ser no máximo 1, que representa 100% de sucesso de handover.

A Figura 4.3.1.2.1 exibe o gráfico de controle para as observações individuais, enquanto a Figura 4.3.1.2.2 apresenta o gráfico de controle para média móvel.

Novamente os gráficos se mostraram eficientes na detecção da falha pela média do processo, a qual também reflete alterações na variabilidade deste. Nota-se que a partir da amostra 73 o processo volta a ficar sob controle, porém os limites para o PSH necessitariam ser recalculados. Tal fato se deve a alterações no comportamento da média e da variância atribuíveis a uma re-sintonia que ocorreu na região no período em que o setor apresentava falhas. Tal re-sintonia não afetou o comportamento do PQC.

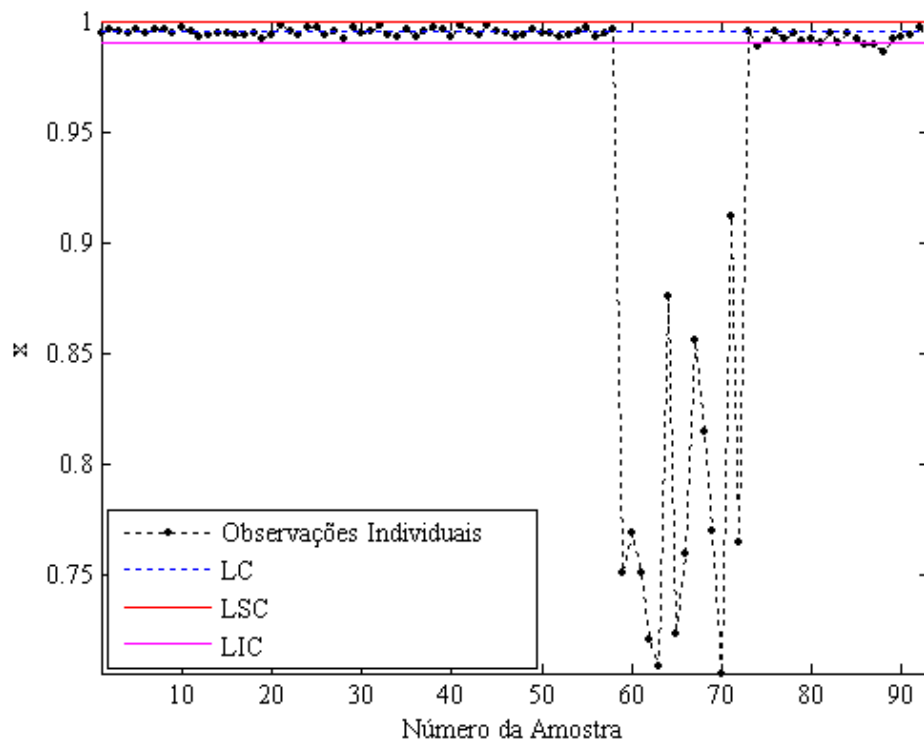


Figura 4.3.1.2.1. – SetorA, Medidas Individuais, PSH: Gráfico de controle das observações individuais.

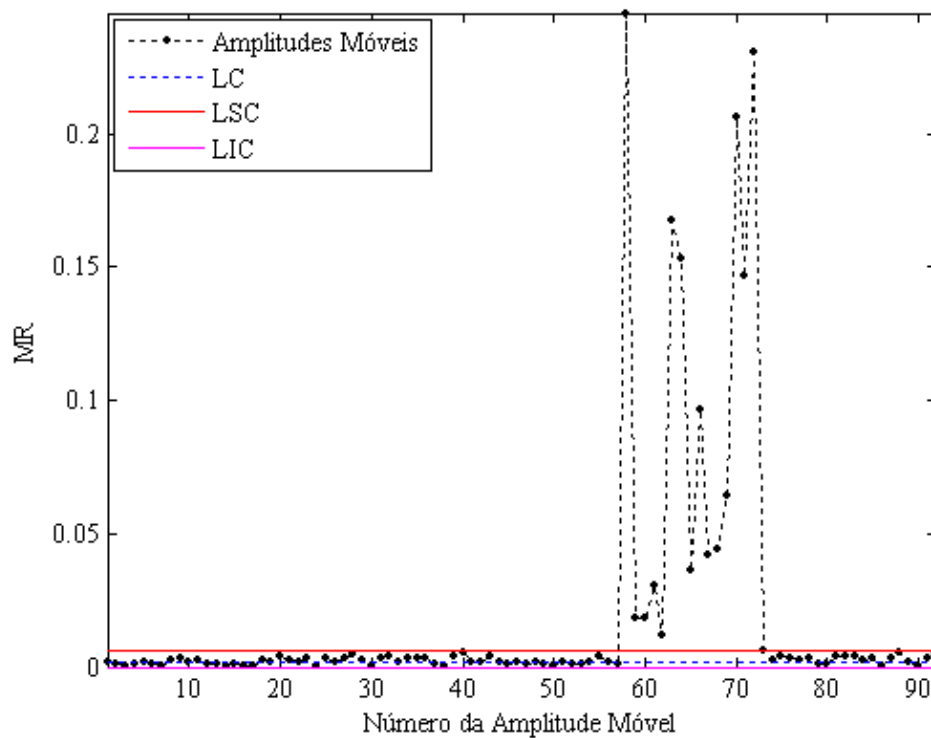


Figura 4.3.1.2.2. – SetorA, Medidas Individuais, PSH: Gráfico de controle das amplitudes móveis.

Com base na distribuição lognormal do PQC, investigou-se a distribuição gerada pelo logaritmo das amostras do PSH, a qual também possui hipótese de normalidade aceita. Como se pode observar nas Figuras 4.3.1.2.3 e 4.3.1.2.4, os gráficos são idênticos aos das Figuras 4.3.1.2.1 e 4.3.1.2.2, respectivamente.

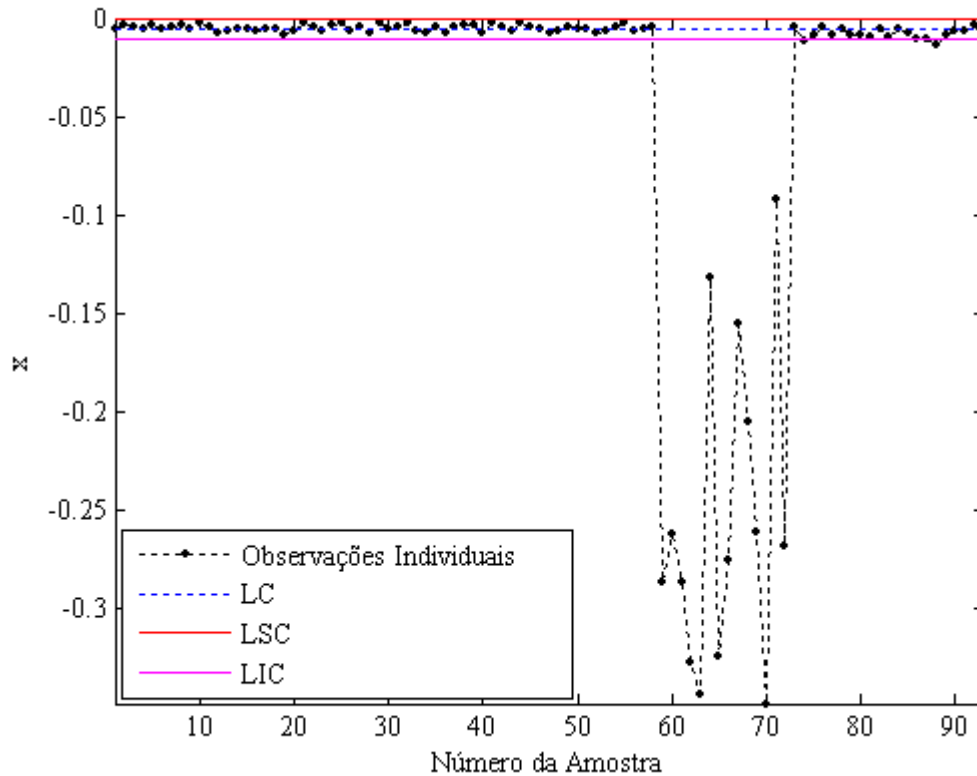


Figura 4.3.1.2.3. – SetorA, Medidas Individuais, $\log(\text{PSH})$: Gráfico de controle das observações individuais.

4.3.2. Gráficos de Controle para medidas individuais na HMM diária - SetorB

Nesta seção se investiga a eficiência de gráficos de controle de Shewhart para medidas individuais na identificação de alterações no comportamento do PQC no setor denominado SetorB.

Para este estudo, coletaram-se 60 amostras para o projeto do gráfico de controle, determinando a LC, o LSC e o LIC. Também neste caso, aceita-se a hipótese de normalidade somente quando se toma o logaritmo das amostras. A variável a ser controlada, portanto, passa a ser o logaritmo do PQC.

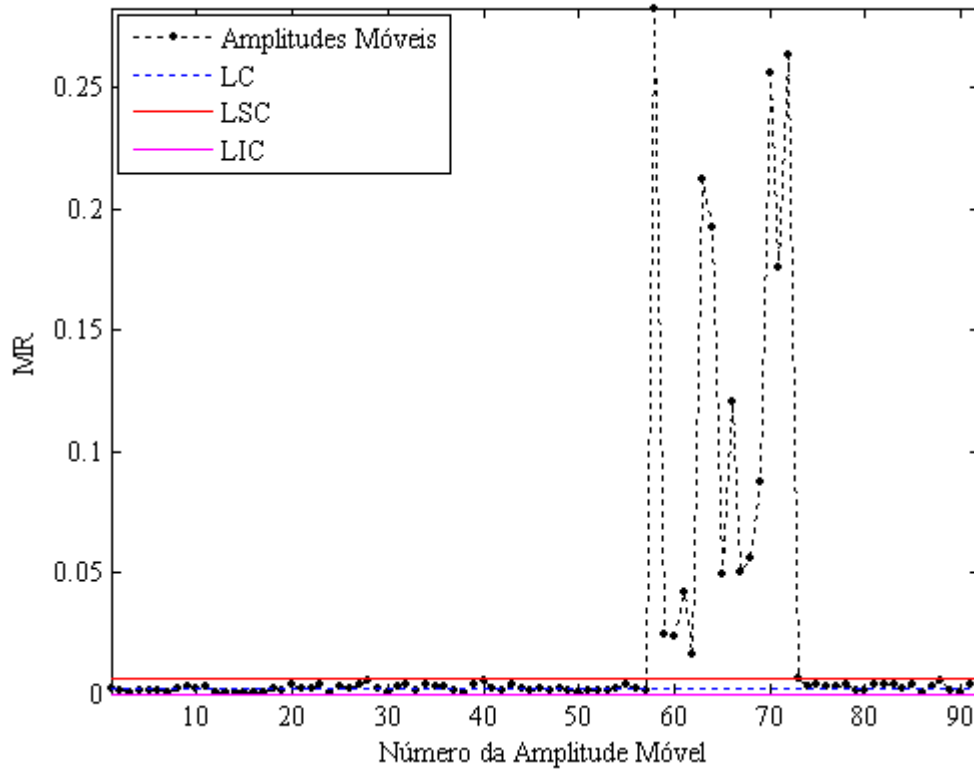


Figura 4.3.1.2.4. – SetorA, Medidas Individuais, log(PSH): Gráfico de controle das amplitudes móveis.

A Tabela 4.3.2.1 contém os valores da LC, do LSC e do LIC.

Medida	Linha	Valor
Média do Processo	LC	0,0049
	LSC	0,0100
	LIC	-0,0002
Variabilidade do Processo	LC	0,0019
	LSC	0,0063
	LIC	0,0000

Tabela 4.3.2.1 – SetorB, Medidas Individuais, log(PQC): Valores da LC, do LSC e do LIC.

A Figura 4.3.2.1 exibe o gráfico de controle para as observações individuais, enquanto a Figura 4.3.2.2 apresenta o gráfico de controle para média móvel.

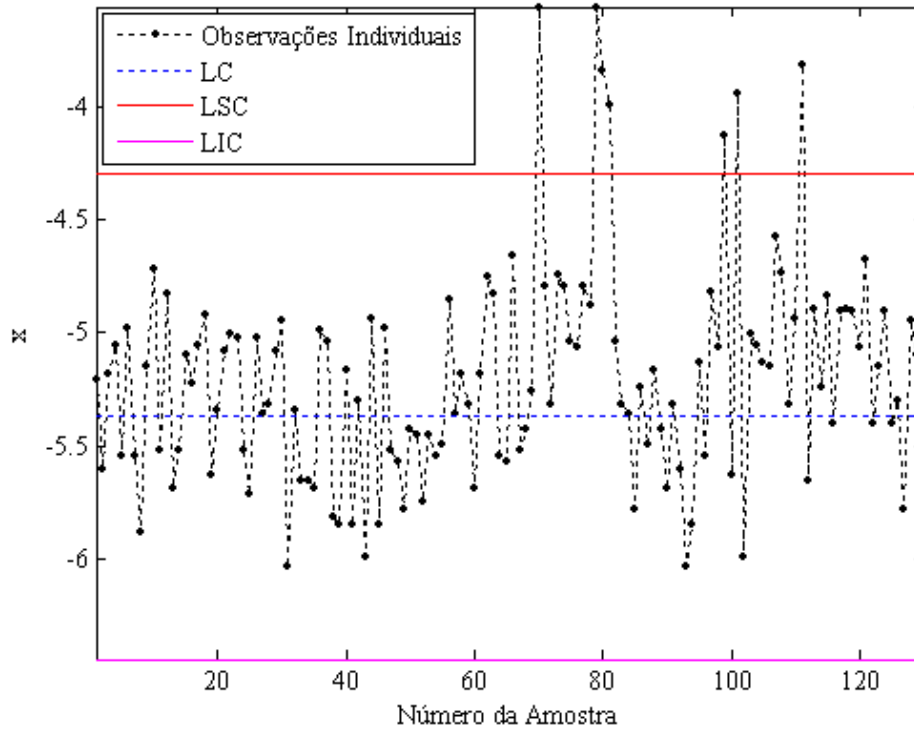


Figura 4.3.2.1. – SetorB, Medidas Individuais, log(PQC): Gráfico de controle das observações individuais.

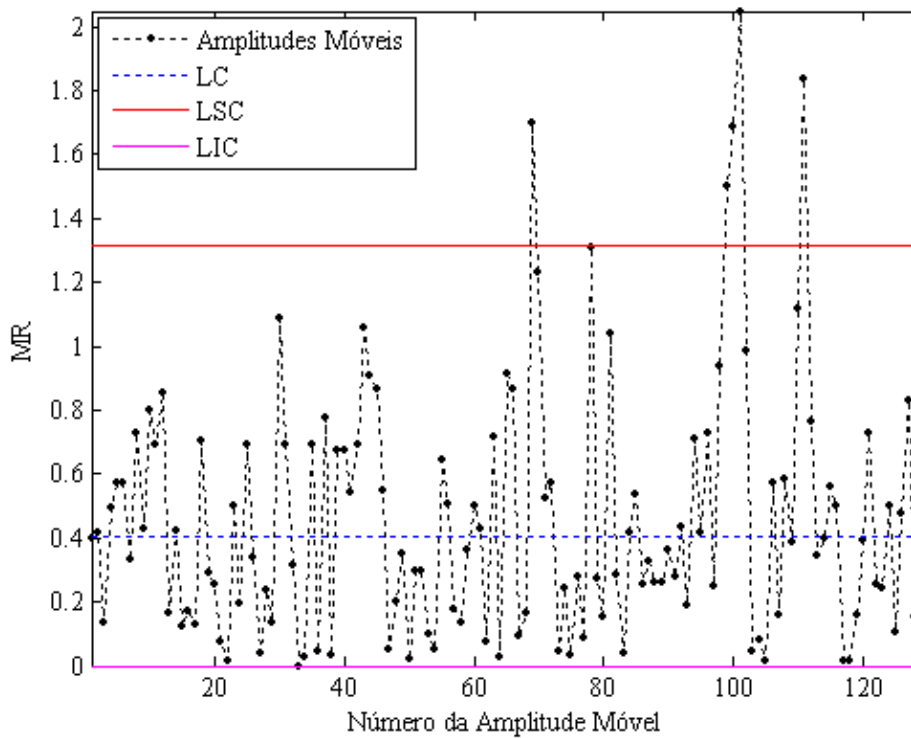


Figura 4.3.2.2. – SetorB, Medidas Individuais, log(PQC): Gráfico de controle das amplitudes móveis.

Como se pode observar na Figura 4.3.2.1, LSC é ultrapassado assim que a média do processo se altera, nas amostras 70, 79, 80, 81, 99, 101 e 111. Nota-se que diversos pontos ultrapassam LSC na Figura 4.3.2.2, identificando os momentos onde as médias do processo foram drasticamente alteradas.

4.3.3. Gráficos de Controle para medidas individuais em três HMMs diárias - SetorA

Nesta seção se investiga a eficiência dos gráficos de controle de Shewhart \bar{x} e R na identificação de alterações no comportamento do PQC e do PSH. Utilizou-se o mesmo período para a investigação na HMM do setor referido no subtítulo, sendo a informação, neste caso, coletada em três HMMs – de 08:00 às 13:00, de 13:00 às 18:00, e de 18:00 às 23:00. Assim, tem-se que $m=3$ para este estudo.

4.3.3.1. PQC

Para esta análise, coletaram-se 180 amostras para o projeto do gráfico de controle, determinando a LC, o LSC e o LIC. Deste grupo, descartaram-se as amostras referentes aos dias 22 e 32 uma vez que estas se apresentaram como *outliers* no gráfico R, do dia 24, pois caracterizou um *outlier* do gráfico \bar{x} , e do dia 60, já que o processo ficou fora de controle ainda neste dia (após a HMM diária, motivo pelo qual não foi descartada naquele caso). Aceita-se a hipótese de normalidade somente quando se toma o logaritmo das amostras, caracterizando uma distribuição lognormal. A variável a ser controlada, portanto, passa a ser o logaritmo do PQC.

A Tabela 4.3.3.1.1 contém os valores da LC, do LSC e do LIC.

Medida	Linha	Valor
Média do Processo	LC	-5,3089
	LSC	-4,7433
	LIC	-5,8746
Variabilidade do Processo	LC	0,5529
	LSC	1,4237
	LIC	0,0000

Tabela 4.3.3.1.1. – SetorA, \bar{x} e R, $m=3$, $\log(\text{PQC})$: Valores da LC, do LSC e do LIC.

A Figura 4.3.3.1.1 exibe o gráfico de controle para as médias amostrais, enquanto a Figura 4.3.3.1.2 apresenta o gráfico de controle para a amplitude. Retiraram-se de ambos os gráficos as amostras caracterizadas como *outliers*.

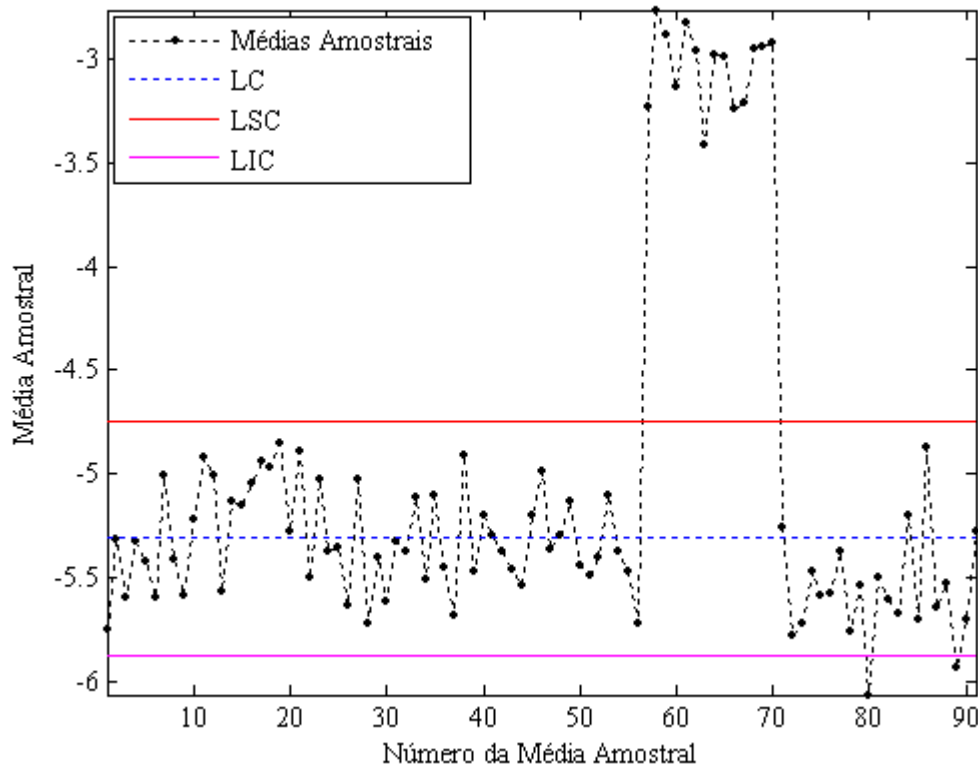


Figura 4.3.3.1.1. – SetorA, \bar{x} e R, $m=3$, log(PQC): Gráfico de controle da média do processo.

Como se pode observar na Figura 4.3.3.1.1, o gráfico se apresentou eficiente na detecção da alteração da média do processo, apontada ainda no dia 60, quando o setor passou a apresentar problemas (um dia antes que a detecção na HMM diária, uma vez que o problema passou a ocorrer após este horário). A Figura 4.3.3.1.2, entretanto, exibe apenas um pico, na amostra referente ao dia 60. Isto acontece pois somente no referido dia existem amostras em horários onde o problema ainda não existia e quando ele passou a ocorrer. Não foi observado nenhum pico no gráfico de amplitude relativa quando a média retorna aos níveis anteriores, uma vez que no dia 72 o setor apresentava falhas durante as três medições, e no dia 73 esta havia sido sanada durante o período de coleta – assim, a variabilidade definida pela amplitude relativa não foi alterada, o que não é verdade para o gráfico apresentado na Figura 4.3.1.1.2, que considera a amplitude móvel da HMM diária de dois dias consecutivos, um com e outro sem falha. Com este caso, confirma-se o fato da necessidade de controle do processo por meio dos gráficos de média, com auxílio dos gráficos de amplitude relativa.

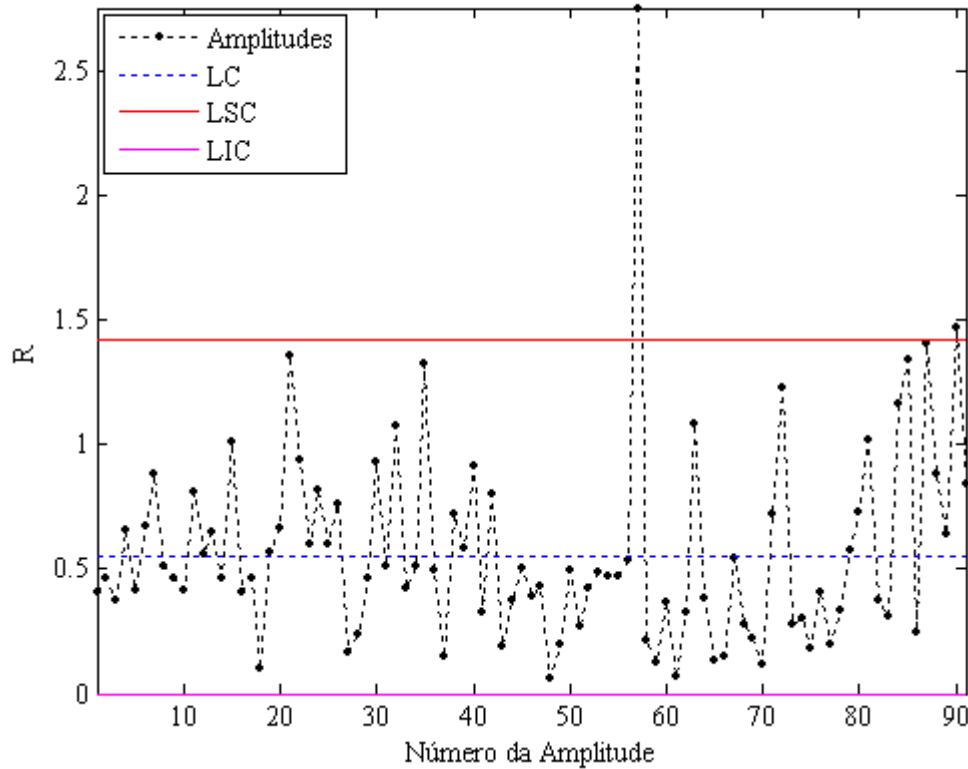


Figura 4.3.3.1.2. – SetorA, \bar{x} e R, $m=3$, $\log(\text{PQC})$: Gráfico de controle das amplitudes relativas.

Nota-se também que mesmo havendo tendência de decréscimo na média do processo (fato que, se confirmado, geraria a necessidade do cálculo de novos limites), a amplitude relativa apresentou tendência de crescimento, permanecendo acima do LSC em um caso. Isto se deve ao fato da coleta ser realizada em períodos onde o tráfego pode não ser representativo ao ponto de gerar amostras estatisticamente válidas.

Considerando todos os pontos citados, os gráficos de controle para medidas individuais na HMM diária apresentaram melhores resultados para este caso.

4.3.3.2. PSH

Para esta análise, coletaram-se 180 amostras para o projeto do gráfico de controle, determinando a LC, o LSC e o LIC. Deste grupo, descartaram-se as amostras referentes aos dias 15 e 33, uma vez que estas se apresentaram como *outliers* no gráfico R, dos dias 24 e 25, pois caracterizaram *outliers* dos gráficos \bar{x} e R, e do dia 60, já que o processo ficou fora de

controle ainda neste dia (após a HMM diária, motivo pelo qual não foi descartada naquele caso). Aceita-se a hipótese de normalidade.

A Tabela 4.3.3.2.1 contem os valores da LC, do LSC e do LIC.

Medida	Linha	Valor
Média do Processo	LC	0,9951
	LSC	0,9978
	LIC	0,9925
Variabilidade do Processo	LC	0,0026
	LSC	0,0067
	LIC	0,0000

Tabela 4.3.3.2.1. – SetorA, \bar{x} e R, m=3, PSH: Valores da LC, do LSC e do LIC.

A Figura 4.3.3.2.1 exibe o gráfico de controle para as médias amostrais, enquanto a Figura 4.3.3.2.2 apresenta o gráfico de controle para a amplitude. Retiraram-se de ambos os gráficos as amostras caracterizadas como *outliers*.

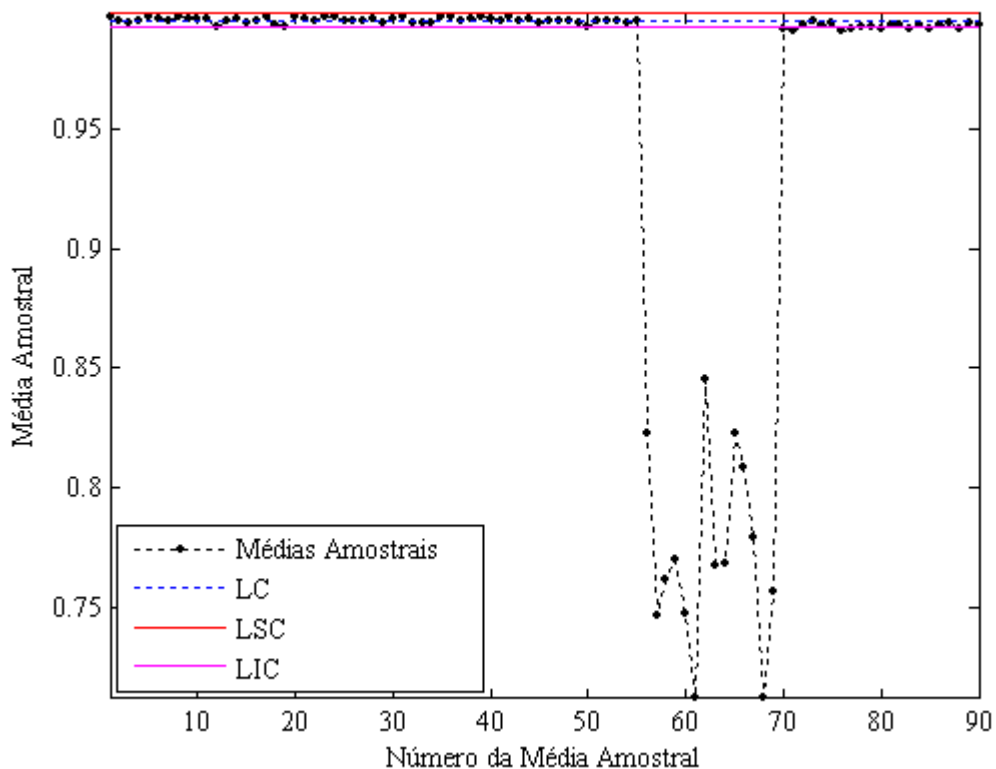


Figura 4.3.3.2.1. – SetorA, \bar{x} e R, m=3, PSH: Gráfico de controle da média do processo.

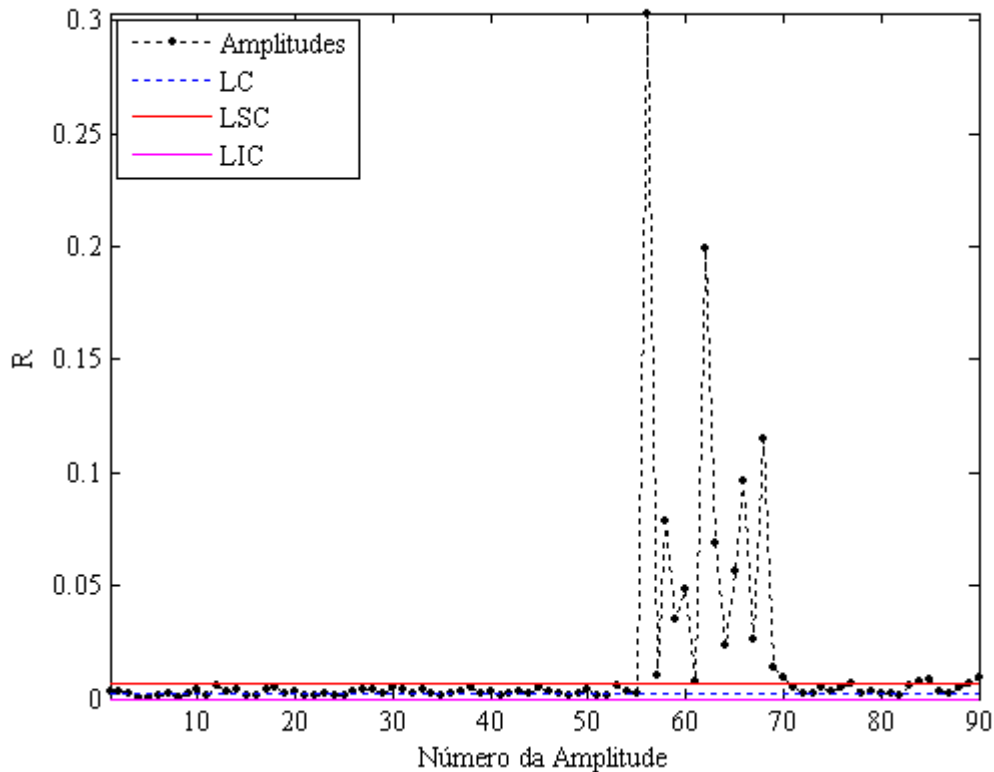


Figura 4.3.3.2.2. – SetorA, \bar{x} e R, $m=3$, PSH: Gráfico de controle das amplitudes relativas.

Nota-se que para o caso do PSH, o gráfico de amplitudes relativas também apresenta alterações, indicando oscilações nas amostras coletadas a cada dia. Conforme mencionado na seção 4.3.1.2, os limites do PSH necessitariam ser recalculados após o processo retornar ao estado de controle estatístico. Também de acordo com o procedimento adotado na seção mencionada, investigou-se o comportamento do logaritmo das amostras de PSH, que também apresentaram distribuição lognormal. Como anteriormente ocorrido, as Figuras 4.3.3.2.3 e 4.3.3.2.4 apresentam gráficos idênticos aos das Figuras 4.3.3.2.1 e 4.3.3.2.2, respectivamente.

4.3.4. Gráficos de Controle para medidas individuais em três HMMs diárias - SetorB

Nesta seção se investiga a eficiência de gráficos de controle de Shewhart \bar{x} e R na identificação de alterações no comportamento do PQC. Utilizou-se o mesmo período para a investigação na HMM do setor referenciado, sendo a informação, neste caso, coletada em três HMMs – de 08:00 às 13:00, de 13:00 às 18:00, e de 18:00 às 23:00. Assim, tem-se que $m=3$ para este estudo.

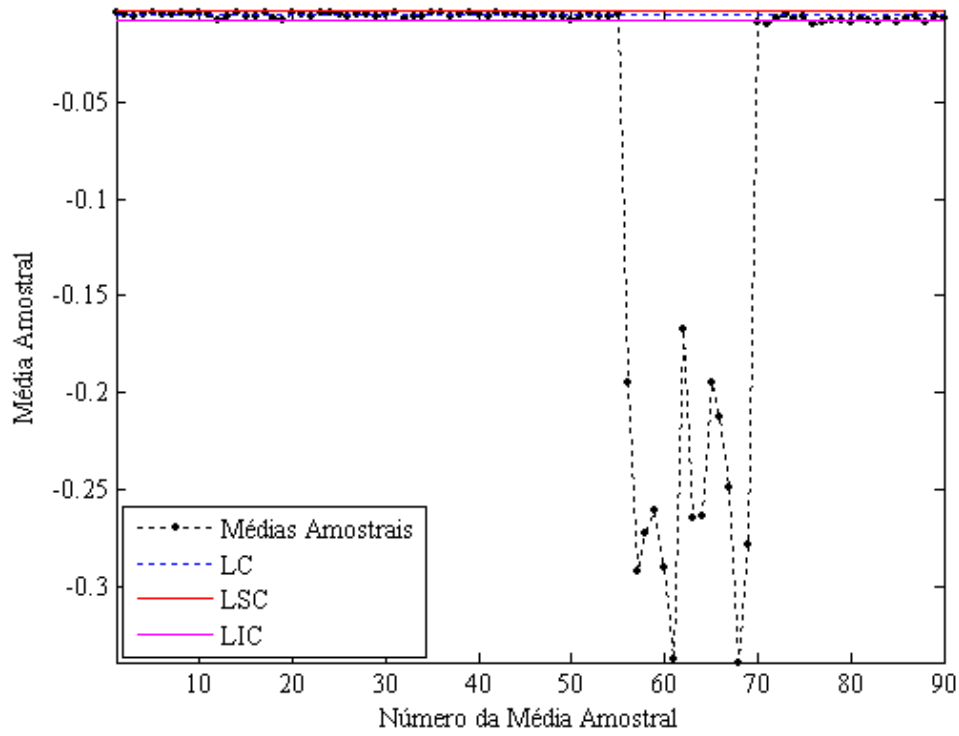


Figura 4.3.3.2.3. – SetorA, \bar{x} e R, m=3, log(PSH): Gráfico de controle da média do processo.

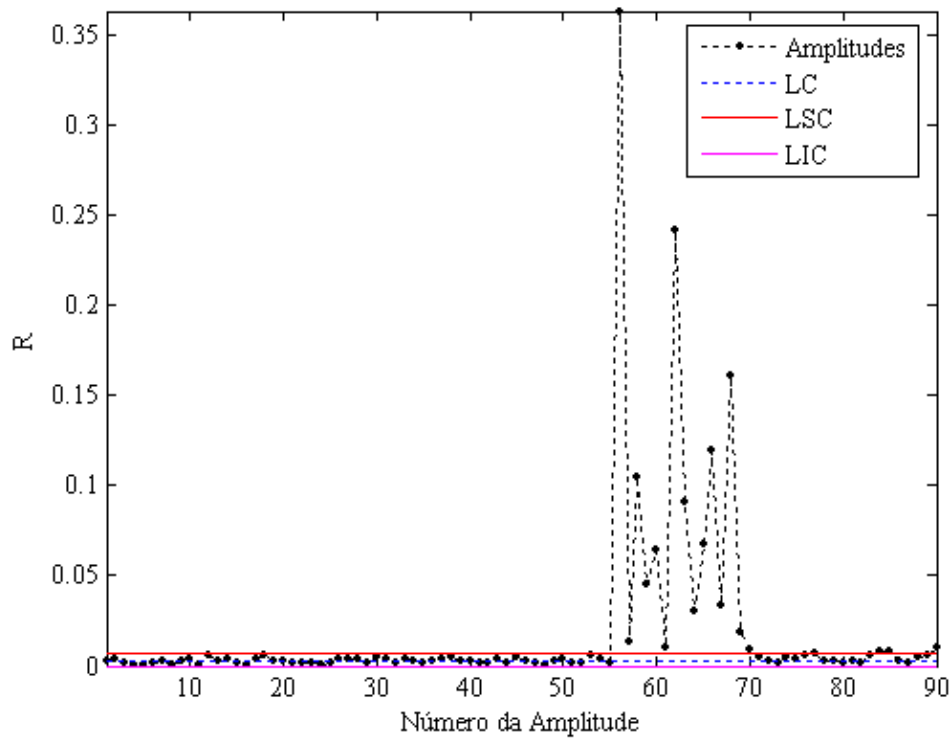


Figura 4.3.3.2.4. – SetorA, \bar{x} e R, m=3, log(PSH): Gráfico de controle das amplitudes relativas.

Para esta análise, coletaram-se 180 amostras para o projeto do gráfico de controle, determinando a LC, o LSC e o LIC. Aceita-se a hipótese de normalidade, e não houve a presença de *outliers*.

A Tabela 4.3.4.1 contem os valores da LC, do LSC e do LIC.

Medida	Linha	Valor
Média do Processo	LC	0,0044
	LSC	0,0073
	LIC	0,0016
Variabilidade do Processo	LC	0,0028
	LSC	0,0071
	LIC	0,0000

Tabela 4.3.4.1 – SetorB, \bar{x} e R, m=3, PQC: Valores da LC, do LSC e do LIC.

A Figura 4.3.4.1 exibe o gráfico de controle para as médias amostrais, enquanto a Figura 4.3.4.2 apresenta o gráfico de controle para a amplitude.

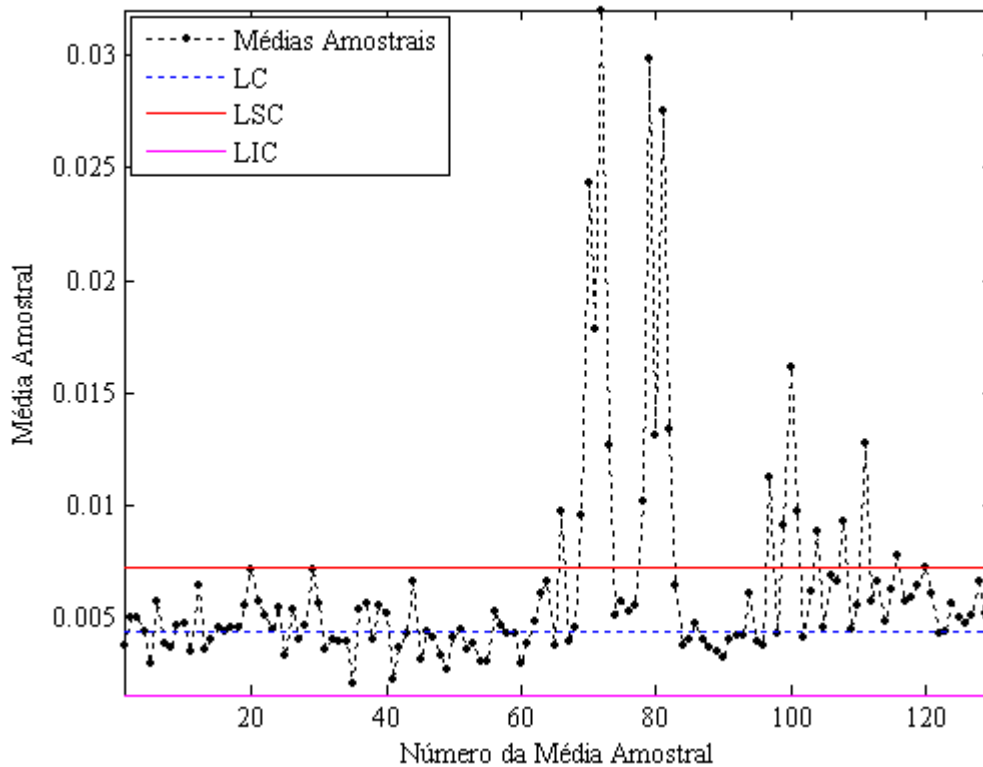


Figura 4.3.4.1 – SetorB, \bar{x} e R, m=3, PQC: Gráfico de controle da média do processo.

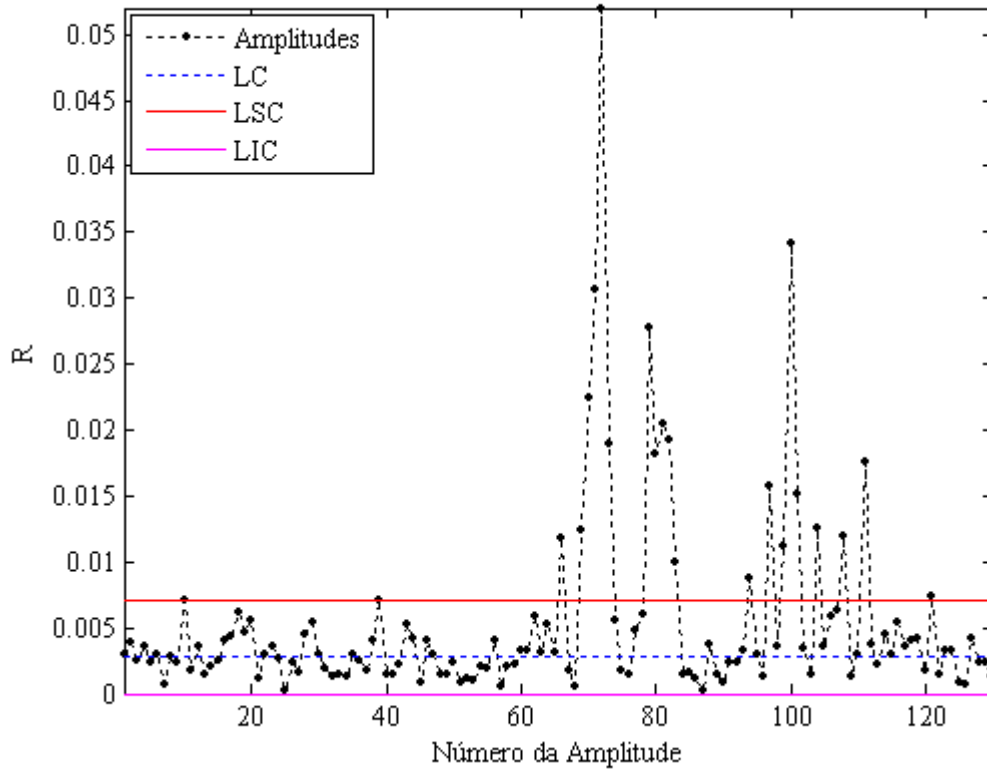


Figura 4.3.4.2. – SetorB, \bar{x} e R, $m=3$, PQC: Gráfico de controle das amplitudes relativas.

Conforme anteriormente realizado, tomou-se o logaritmo das amostras, os quais também descrevem uma distribuição lognormal. Para este caso, retiraram-se as amostras referentes aos dias 10, 18 e 35, pois caracterizam outliers no gráfico que representa a variabilidade do processo. A Tabela 4.3.4.2 contém os valores da LC, do LSC e do LIC.

Medida	Linha	Valor
Média do Processo	LC	-5,4382
	LSC	-4,8227
	LIC	-6,0536
Variabilidade do Processo	LC	0,6016
	LSC	1,5491
	LIC	0,0000

Tabela 4.3.4.2. – SetorB, \bar{x} e R, $m=3$, log(PQC): Valores da LC, do LSC e do LIC.

A Figura 4.3.4.3 exibe o gráfico de controle para as médias amostrais, enquanto a Figura 4.3.4.4 apresenta o gráfico de controle para a amplitude. Retiraram-se as amostras caracterizadas como *outliers*.

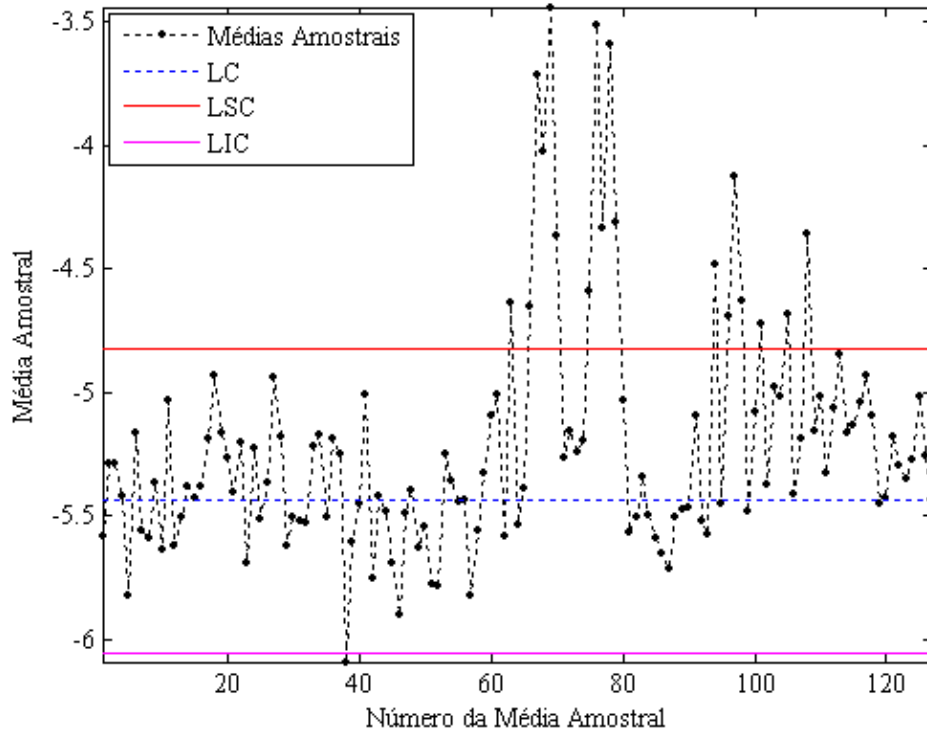


Figura 4.3.4.3 – SetorB, \bar{x} e R, $m=3$, log(PQC): Gráfico de controle da média do processo.

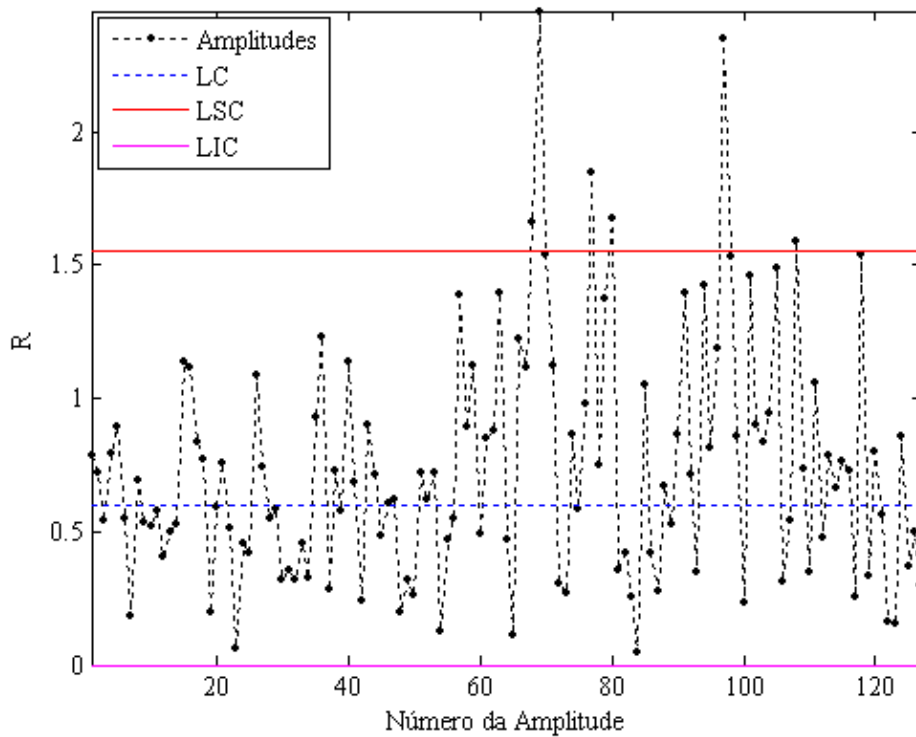


Figura 4.3.4.4. – SetorB, \bar{x} e R, $m=3$, log(PQC): Gráfico de controle das amplitudes relativas.

Novamente os gráficos das Figuras 4.3.4.1 e 4.3.4.2 possuem forma idêntica aos das Figuras 4.3.4.3 e 4.3.4.4, respectivamente, e tiveram bom desempenho na detecção da falha.

4.4. Considerações Finais

4.4.1. Previsão das séries temporais de tráfego

Considerando-se as métricas adotadas para avaliação nesta pesquisa, os modelos ARIMA se apresentam como uma alternativa adequada para a caracterização e previsão da série temporal de tráfego em nível de BSCs e de setores, o que possibilita a estimação da capacidade futura com o correto direcionamento de investimento em ampliações pró-ativas ou otimizações, além de subsidiar a tomada de decisões estratégicas.

No processo de identificação, notou-se que ao se tomar uma diferença com *lag* igual a um a série apresenta coeficientes de autocorrelação que decaem lentamente para zero, podendo não caracterizar um processo identificável por parâmetros auto-regressivos e de médias móveis. Ao se tomar uma diferença com *lag* igual a 35, entretanto, a FAC amostral representa massas identificáveis por modelos ARMA.

Entre as várias FACs amostrais calculadas a partir das massas de dados disponíveis, notou-se que os valores de correlação ultrapassaram os intervalos de confiança para os atrasos 1, 2, ~35 e ~45 (além de alguns casos ~7 e ~15). Deve-se observar que tais atrasos expressam a sazonalidade nas formas de semanas, quinzenas e meses.

A Tabela 4.4.1.1 apresenta um resumo dos resultados das previsões em relação ao EQM e à diferença das médias das quatro maiores HMMs.

Nota-se pelo EQM e pela diferença da média do tráfego nas quatro maiores HMMs que as previsões para as BSCs foram melhores que aquelas realizadas para os setores, fato provavelmente relacionado ao volume de tráfego cursado nos elementos concentradores.

Deve-se observar que mesmo o EQM sendo comumente utilizado para efeito de avaliação, a diferença do tráfego médio de quatro HMMs seria uma medida prática mais bem aplicada ao

problema de capacidade, uma vez que se elaboram os projetos com base nos horários de alto tráfego.

Elemento de Rede	EQM	Diferença das médias das quatro maiores HMMs
BSC01	0,0075	Superestimado em 3,74%
BSC02	0,0085	Subestimado em 1,27%
BSC03	0,0078	Superestimado em 0,28%
Setor01	0,0364	Superestimado em 7,18%
Setor02	0,0183	Superestimado em 2,69%
Setor03	0,0141	Subestimado em 6,69%

Tabela 4.4.1.1 – Resumo dos resultados das previsões de tráfego (janelas de estimação): EQM e diferença das médias das quatro maiores HMMs.

4.4.2. Controle estatístico de indicadores de qualidade em redes celulares

Os gráficos de controle de Shewhart se apresentaram eficientes para a detecção de alterações em indicadores estatísticos de qualidade.

Em todos os casos analisados, as massas de dados possuem distribuição lognormal (mesmo para aqueles cuja massa original também tem a hipótese de normalidade aceita), o que pode indicar que tal comportamento seja recorrente em toda a rede.

Quando tomada uma amostra diária na HMM, *outliers* ocorreram com menor frequência. Além disto, a variabilidade do processo é menor. Tal fato está relacionado à representatividade estatística da amostra, função da maior quantidade de tráfego cursada. Assim, este tipo de coleta é uma melhor alternativa quando comparada àquela realizada em três períodos diários, que podem conter observações em horário de baixo tráfego.

Com base nos resultados, nota-se a importância do uso em conjunto dos gráficos de controle para monitoramento da média e da variabilidade do processo. No caso do PQC do Setor A – medidas individuais –, por exemplo, o gráfico de controle de amplitudes móveis apresenta apenas dois picos, que representam os momentos em que o processo saiu e entrou novamente no estado de controle estatístico. Tal fato ocorreu pois a variabilidade intrínseca se manteve a mesma com exceção dos momentos em que a média foi alterada – esta, entretanto, permaneceu em nível diferente, caracterizando um estado fora de controle estatístico, durante todo o período em que houve o problema.

Deve-se observar que a dificuldade na definição dos limites de controle devido ao grande volume de setores existentes nas redes é um fator a ser considerado durante o processo de avaliação da viabilidade da aplicação desta técnica. Além disto, alterações de configurações em determinadas características dos setores, como dualizações, seriam procedimentos que influenciariam nos comportamentos dos indicadores, gerando a necessidade de revisão dos limites – estas ações, entretanto, ocorrem em quantidade suficientemente pequena para possibilitar a manutenção dos gráficos sem grandes esforços.

Exibidos os resultados, apresenta-se a conclusão no próximo capítulo, contendo as principais análises baseadas no texto e propostas para trabalhos futuros.

5. CONCLUSÃO

O acompanhamento do desempenho das redes celulares nos âmbitos de cobertura, de capacidade e da qualidade do serviço prestado se torna uma questão estratégica em um mercado cujo crescimento é notável desde a concepção do sistema.

Indicadores estatísticos de desempenho são índices amplamente utilizados para o monitoramento das redes, permitindo gerenciar o estado desta sob diferentes ópticas, tais como acesso, retenção, mobilidade, enlace rádio e capacidade, ao se analisar a interface Um.

O correto direcionamento de investimento na ampliação de capacidade pró-ativa é um problema que exige a modelagem do tráfego, o qual apresenta componentes determinísticos e estocásticos, com características sazonais e tendência, com a finalidade de se realizar previsões e, assim, se obter maior probabilidade de retorno do montante aplicado.

Notadamente, poder-se-ia utilizar apenas as amostras coletadas nas HMMs dos dias úteis para se modelar o tráfego com o objetivo de previsão da capacidade futura. Entretanto, dever-se-ia aplicar esta abordagem com critério, uma vez que alguns *clusters* específicos, como regiões turísticas, podem ter o tráfego subestimado ao se eliminar finais de semana e feriados. Além disto, deve-se observar que, mesmo usualmente havendo baixo tráfego nos finais de semana e feriados, a modelagem e a previsão nestes períodos podem ser úteis para a tomada de decisões estratégicas, como o estímulo ao uso dos serviços em dias de baixa utilização. Assim, a modelagem é necessária não somente para estimação da capacidade futura, mas também possui apelo estratégico.

Problemas como a automatização do processo de planejamento de frequências são amplamente tratados na área de comunicações móveis, com diversos *softwares* desenvolvidos, que usualmente utilizam algoritmos evolucionários em seu âmago. A modelagem e a previsão de tráfego em tais redes, apesar de sua importância, não é amplamente discutida em publicações, ao contrário de outras redes, como a Internet. SHU e colegas (2005) apresentam resultados obtidos por meio da utilização do modelo Auto-regressivo Integrado de Média Móvel Sazonal (SARIMA – *Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average*) em janelas de previsão de um mês utilizando simulações *k-steps ahead*. JIA e colegas (2009) também aplicam o modelo SARIMA no processo de modelagem, gerando previsões horárias em um

período de sete dias, mesma janela utilizada por (TIKUNOV; NISHIMURA, 2007), que adotaram o método de suavização exponencial de Holt-Winter como base para a modelagem.

Neste trabalho mostrou-se que a classe de modelos ARIMA, que possui relativa facilidade de implementação computacional, quando comparada a outras técnicas, como algoritmos evolucionários, é uma alternativa para a modelagem e para a previsão de séries temporais de tráfego. A identificação, que passa pela análise da sazonalidade, da tendência e das funções de auto-correlação, a definição da estrutura e estimação de parâmetros por meio do método dos mínimos quadrados, gerou modelos específicos para cada uma das séries apresentadas, os quais puderam prever o comportamento destas por um longo período de tempo.

Com base nos critérios de validação apresentados (EQM, diferença das médias das quatro maiores HMMs), que comparam os dados previstos com os reais, onde os últimos não são entrada para os primeiros, observa-se que os modelos desenvolvidos apresentaram resultado satisfatório na previsão das séries, em especial naquelas realizadas em nível de BSC, devido ao maior volume de tráfego cursado.

A quantidade de usuários que utilizam os serviços móveis é refletida no número de elementos de rede instalados. Este montante necessita ser monitorado, e os gráficos de controle de Shewhart são uma alternativa para o acompanhamento dos principais indicadores de qualidade no BSS. Nota-se que, neste caso, tais ferramentas potencializam o processo de filtragem de informações relevantes em meio à massa de contadores, que podem dar origem a inúmeros indicadores, gerada pelos sistemas celulares.

Uma vez realizado o esforço inicial para a definição dos limites, procedimento crítico para a aplicação dos gráficos neste problema, pode-se realizar o monitoramento da rede de forma precisa, com a geração de alarmes assim que falhas sejam detectadas, o que implica em uma melhor qualidade no serviço prestado com a solução eficaz de problemas, fato que impacta na fidelização de clientes e na imagem da empresa, além de maior facilidade no atendimento de metas especificadas pelo órgão regulador. Observa-se que intervenções de rede que geram a necessidade de novo cálculo dos limites não ocorrem com frequência suficiente para representarem um impacto na utilização desta técnica.

Conforme verificado, o acompanhamento realizado pelos gráficos de controle para medidas individuais com amostras coletadas na HMM se apresentaram mais adequados ao problema, quando comparados aos gráficos \bar{x} e R com $m=3$. Deve-se observar a importância, em ambos os casos, do monitoramento em conjunto dos gráficos de média e de variabilidade.

Nota-se que a aplicação de gráficos de controle em redes celulares, com o objetivo de identificação de falhas em equipamentos no BSS (uma maneira de se filtrar informações de interesse em meio à massa de dados gerada) não é um assunto amplamente explorado em pesquisas publicadas, apesar de ser uma ferramenta eficaz de acompanhamento.

5.1 Proposta para trabalhos futuros

Para a previsão de séries temporais de tráfego, seria interessante verificar a eficiência de outras ferramentas e modelos, para efeito de comparação. Algoritmos estocásticos, como redes neurais e cadeias de Markov, seriam inicialmente recomendados. Notadamente, em todos os casos se deve avaliar o ganho efetivo das previsões em relação aos custos computacionais de implementação.

Outra abordagem interessante relacionada às séries temporais de tráfego seria verificar se existe algum ganho ao se executar a modelagem e a previsão, utilizando-se apenas os dias úteis, observadas as restrições já mencionadas quanto a esta aproximação.

É interessante a verificação da aplicabilidade de gráficos de controle de Shewhart em outros indicadores estatísticos de qualidade. Além disto, recomendar-se-ia a averiguação da possibilidade de aplicação de outros tipos de gráficos de controle, como o CuSum, para a identificação de falhas de rede que degradam lentamente os indicadores – como cabos com pequenos orifícios que permitem o acúmulo de água – uma vez que a ferramenta mencionada detecta mais rapidamente alterações nos padrões de comportamento, o que seria adequado para este tipo de problema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Histórico**. Disponível em: <[www.anatel.gov.br/conheça a anatel/sobre a anatel/histórico](http://www.anatel.gov.br/conheça_a_anatel/sobre_a_anatel/histórico)>. Acessado em: 30 dez. 2008.

AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas: Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. 3a. Ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

AKAIKE, H. **A new look at the statistical model identification**. IEEE transactions on automatic and control: v.19, i.6, pp.716-723, 1974.

ANTTALAINEN, T. **Introduction to telecommunications network engineering**. 2nd. Ed. Norwood: Artech House, 2003.

BANNISTER, J.; MATHER, P.; COOPE, S. **Convergence technologies for 3G networks: IP, UMTS, EGPRS and ATM**. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

BARRADAS, O. **Você e as telecomunicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 1995.

BHATTACHARYYA, G. K.; JOHNSON, R. A. **Statistical concepts and methods**. New York: John Willey & Sons, 1977.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters: An introduction to design, data analysis, and model building**. New York: John Willey & Sons, 1978.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C. **Time series analysis: Forecasting and control**. Hoboken: John Willey & Sons, 2008.

COURCOUBEITS, C.; WEBER, R. **Pricing communication networks: Economics, technology and modelling**. Chichester: John Wiley & Sons, 2003.

EBERSPÄCHER, J.; VÖGEL, H. J.; BETTSTETTER, C. **GSM: Switching, services and protocols**. 2nd. Ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

ERLANG, A. K. **Solution of some problems in the theory of probabilities of significance in automatic telephone exchanges**. The post office electrical engineers' journal: v. 10, 1918.

ETSI. **Handover procedures: 3GPP TS 23.009 version 6.5.0 release 6**. ETSI: Sophia Antipolis, 2009.

FREEMAN, R. L. **Fundamentals of telecommunications**. New York: John Wiley & Sons, 1999.

JIA G.; YU P.; XIYUAN P.; QIANG C.; JIANG Y.; YUFENG D. **Traffic forecasting for mobile networks with multiplicative seasonal ARIMA models**. IEEE 9th international conference on electronic measurement & instruments, 2009.

HALD, A. **A history of parametric statistical inference from Bernoulli to Fisher, 1713-1935**. New York: Springer Science, 2007.

HEINE, G. **GSM networks**: Protocols, terminology and implementation. Norwood: Artech House, 1999.

LEE, W. C. Y. **Mobile communications engineering**: Theory and applications. 2nd. Ed. New York: McGraw Hill, 1997.

MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES. **História da Telefonia**. Disponível em: <www.mc.gov.br/o-ministerio/historico/historia-da-telefonias>. Acessado em: 30 dez. 2008.

MISHRA, A. R. **Fundamentals of Cellular Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G... Evolution to 4G**. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Tradução: Ana Maria Lima de Farias, Vera Regina Lima de Farias e Flores e Luiz da Costa Laurencel. 4a. Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2004.

TIKUNOV, D.; NISHIMURA, T. **Traffic prediction for móbile network using Holt-Winter's exponential smoothing**. IEEE 15th international conference on software, communications and computer networks, 2007.

RAPPAPORT, T. S. **Wireless communications**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

REDL, S. M.; WEBER, M. K. OLIPHANT, M. W. **GSM and personal communications handbook**. Norwood: Artech House, 1998.

ROSEMBERG, A.; KEMP, S. **CDMA capacity and quality optimization**. New York: McGraw-Hill, 2003.

SHU, Y.; YU, M.; YANG, O.; LIU, J.; FENG, H. **Wireless traffic modeling and prediction using seasonal ARIMA models**. IEICE transactions on communication, v.E88-B, no.10, pp.3992-3999, 2005.

STIGLER, S. M. **The history of statistics**: The measurement of uncertainty before 1900. Cambridge: The Belknap Press of Harvard University Press, 1986.

WEBB, W. **Understanding cellular radio**. Norwood: Artech House, 1998.

WEBB, W. **The complete wireless communications professional**: A guide for engineers and managers. Norwood: Artech House, 1999.

ANEXO 1: CONCEITOS ESTATÍSTICOS BÁSICOS

Apresenta-se neste anexo os conceitos estatísticos básicos referenciados no texto.

A1.1. Distribuição Normal

A distribuição normal descreve uma grande variedade de fenômenos, uma vez que observações realizadas repetidas vezes tendem a variar simetricamente em torno de um ponto central, com pequenos desvios ocorrendo mais frequentemente que os grandes (BOX; HUNTER; HUNTER, 1978).

Uma variável aleatória X possui distribuição normal caso sua pdf seja dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}{2}} \quad \forall -\infty < x < \infty \quad (\text{A1.1.1})$$

Onde μ representa a média da distribuição, dada por (A1.1.2) e σ o desvio padrão da distribuição, encontrado por meio da raiz quadrada da variância, expressa em (A1.1.3).

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx \quad (\text{A1.1.2})$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx \quad (\text{A1.1.3})$$

A distribuição normal usualmente é expressa pela seguinte notação reduzida:

$$x \sim N(\mu; \sigma^2) \quad (\text{A1.1.4})$$

A Figura A1.1.1 apresenta um exemplo desta distribuição.

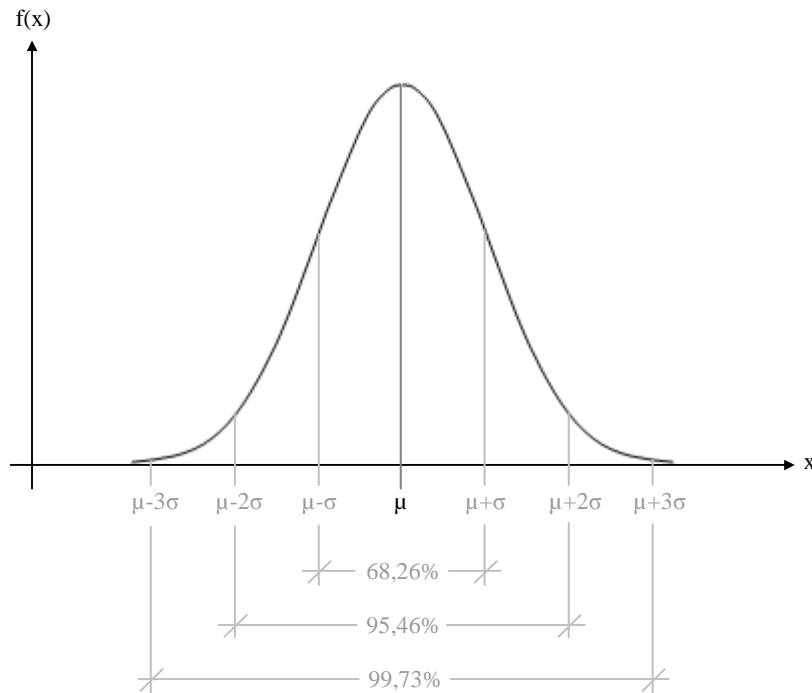


Figura A1.1.1 – Exemplo de distribuição normal e áreas sob sua curva.

São características da distribuição normal possuir o valor máximo de $f(x)$ em μ e pontos de inflexão em $\mu \pm \sigma$. Além disto, nota-se que a pdf é simétrica em torno de μ , e que os limites de x tendendo a $\pm\infty$ são zero. Como todas as pdfs, $f(x)$ possui valores não nulos para $x \geq 0$ e a área de $f(x)$, no intervalo $-\infty$ a $+\infty$ é unitária (HINES; MONTGOMERY; GOLDSMAN; BORROR, 2006).

A1.2. Distribuição lognormal

Em 1889, Francis Galton sugeriu que, observada assimetria na massa de dados, o logaritmo das observações poderia ser tomado, tornando a distribuição, então, normal (STIGLER, 1986).

Uma variável aleatória X possui distribuição lognormal caso o logaritmo das observações possua distribuição normal. A pdf é dada por:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\frac{-\ln(x)-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2}{2}} & \forall x > 0 \\ 0 & \forall x \leq 0 \end{cases} \quad (\text{A1.2.1})$$

Onde μ_y e σ_y são a média e variância, respectivamente, da variável aleatória $Y=\ln(X)$.

A distribuição lognormal surge em função de um processo multiplicativo na combinação dos termos aleatórios (HINES; MONTGOMERY; GOLDSMAN; BORROR, 2006). A Figura A1.2.1 apresenta um exemplo.

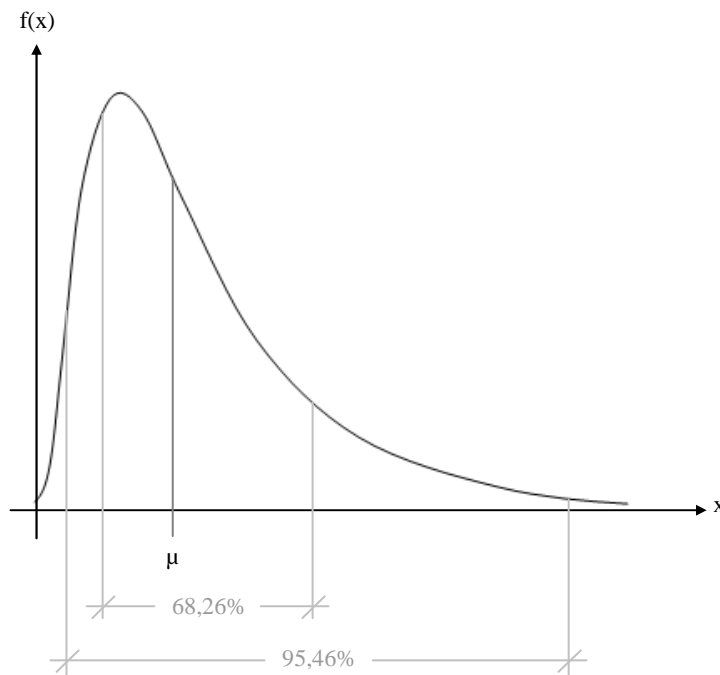


Figura A1.2.1 – Exemplo de distribuição lognormal e áreas sob sua curva.

A1.3. Teste de Lilliefors

O teste de Lilliefors é uma expansão do teste de Kolmogorov-Smirnov para a verificação da hipótese de normalidade em massas cuja média e variância são desconhecidas (LILLIEFORS, 1967).

O procedimento utiliza a média e variância amostrais, que são as medidas de tendência central e dispersão mais comumente empregadas em análises estatísticas, as quais são dadas por (4.2.1.2) e (A1.3.1), respectivamente.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (\text{A1.3.1})$$

Deve-se observar que a média amostral é uma medida não viesada da média populacional. Tal fato pode ser confirmado conforme segue:

$$E(\bar{x}) = E\left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(x_i) \quad (\text{A1.3.2})$$

Onde E denota o operador esperança.

O valor esperado para cada uma das x_i amostras é a média populacional, ou seja:

$$E(x_i) = \mu \quad (\text{A1.3.3})$$

Logo:

$$E(\bar{x}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu = \mu \quad (\text{A1.3.4})$$

Da mesma maneira, pode-se demonstrar que a variância amostral é uma medida não viesada da variância populacional. Tal demonstração pode ser encontrada em (HINES; MONTGOMERY; GOLDSMAN; BORROR, 2006).

O teste de Lilliefors consiste em verificar se a medida D, dada por (A1.3.5), excede os valores tabulados obtidos por meio de simulações Monte Carlo disponíveis em (LILLIEFORS, 1967).

$$D = \max |F^*(x) - S_n(x)| \quad (\text{A1.3.5})$$

Onde $S_n(x)$ é a Função de Distribuição Cumulativa (CDF – *Cummulative Distribution Function*) da amostra e $F^*(x)$ a CDF normal com média \bar{x} e variância s^2 .

A1.4. Autocorrelação

Em 1888, Francis Galton finalizou o livro *Natural Inheritance* (Herança Natural) no qual, apesar de não possuir destaque, pode-se atribuir a racionalização do conceito de correlação, abordado de maneira menos discreta no artigo *Co-Relations and Their Measurement, Chefly from Anthropometric Data* (“Co-Relações” e Suas Medidas, Principalmente a Partir de Dados Antropométricos), lido no mesmo ano à *Royal Society* (STIGLER, 1986).

A autocorrelação é uma medida para verificação da correlação existente entre as observações de uma massa de dados em uma determinada distância, ou atraso, k , conforme (A1.4.1) (BOX; HUNTER; HUNTER, 1978):

$$r_k = \frac{\sum_{i=k+1}^n (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{A1.4.1})$$

Sendo que o intervalo de confiança é aproximadamente:

$$IC_{r_k} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (\text{A1.4.2})$$

A1.5. Mínimos Quadrados

Em 1805, Adrien-Marie Legendre publicou o memorando *Nouvelles Méthodes pour la Détermination des Orbites des Comètes* (Novos Métodos para a Determinação de Órbitas de Cometas) cujo anexo *Sur la Méthode des Moindres Quarrés* (Sobre o Método dos Mínimos Quadrados) trouxe a primeira aplicação do método dos mínimos quadrados no ajuste de equações lineares. Carl Frederich Gauss, entretanto, afirmou ter utilizado o método

anteriormente a Legendre, a partir de 1795. Ele ainda defendeu que em 1798 uniu o conceito deste método ao cálculo de probabilidades. Nenhum destes trabalhos, entretanto, havia sido publicado (HALD, 2007).

Por meio da minimização do quadrado dos erros entre os valores observados e os estimados por determinado modelo, o método dos mínimos quadrados surge como uma alternativa para a estimação dos parâmetros de séries temporais (BOX; HUNTER; HUNTER, 1978). Bhattacharyya e Johnson (1997, p. 344, tradução nossa) descrevem:

O princípio dos mínimos quadrados consiste em determinar os valores para os parâmetros desconhecidos de maneira a minimizar a discrepância total.

Seja $Z \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ uma série temporal a ser explicada em função de $T \in \mathbb{R}^{n \times m}$ observações e de $\theta \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ parâmetros estimados com $\xi \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ resíduos:

$$Z = \theta T + \xi \tag{A1.5.1}$$

O vetor de parâmetros estimados é encontrado por (AGUIRRE, 2007):

$$\theta = \left[T^{\text{Transposta}} T \right]^{-1} T^{\text{Transposta}} Z \tag{A1.5.2}$$

ANEXO 2: MEDIDAS ESTATÍSTICAS TABULADAS

Quantidade de Observações na Amostra	A ₂	d ₂	D ₃	D ₄
2	1,880	1,128	0,000	3,267
3	1,023	1,693	0,000	2,575
4	0,729	2,059	0,000	2,282
5	0,577	2,326	0,000	2,115
6	0,483	2,534	0,000	2,004
7	0,419	2,704	0,076	1,924
8	0,373	2,847	0,136	1,864
9	0,337	2,970	0,184	1,816
10	0,308	3,078	0,223	1,777
11	0,285	3,173	0,256	1,744
12	0,266	3,258	0,283	1,717
13	0,249	3,336	0,307	1,693
14	0,235	3,407	0,328	1,672
15	0,223	3,472	0,347	1,653
16	0,212	3,532	0,363	1,637
17	0,203	3,588	0,378	1,622
18	0,194	3,640	0,391	1,608
19	0,187	3,689	0,403	1,597
20	0,180	3,735	0,415	1,585
21	0,173	3,778	0,425	1,575
22	0,167	3,819	0,434	1,566
23	0,162	3,858	0,443	1,557
24	0,157	3,895	0,451	1,548
25	0,153	3,931	0,459	1,541

Tabela A2.1 – Medidas estatísticas para cálculo das linhas dos gráficos de controle de Shewhart.